



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη της θερμικής καταπόνησης του πεντελικού
μαρμάρου σε αρχαία μνημεία »**

ΑΘΗΝΑ ΠΕΤΣΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΠΑΚΟΛΑΣ ΑΣΤΕΡΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη θερμικής καταπόνησης του πεντελικού
μαρμάρου σε αρχαία μνημεία»**

ΑΘΗΝΑ ΠΕΤΣΟΥ

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

- Επίκ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
(Επιβλέπων)
- ΕΔΙΠ Μ. Καρόγλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Δρ. Ε. Αγγελικοπούλου, ΥΠΠΟΑ,
Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων
Ακρόπολης

Επιτροπή Εξέτασης

- Καθ. Θ. Θεοδώρου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Καθ. Στ. Κουρκουλής, Σχ. ΕΜΦΕ
ΕΜΠ
- Καθ. Κ. Χαριτίδης, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ
ΕΜΠ

Αθήνα, 2017

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον κύριο Α.Μπακόλα, επίκουρο καθηγητή, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και την καθοδήγηση και τις γνώσεις του και την υπομονή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την διδάκτορα Μ.Καρόγλου για την επιστημονική υποστήριξη, για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές της καθώς για την ηθική ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη της καθ' όλο το διάστημα συνεργασίας μας. Χωρίς τη συμβολή της θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω την Ε. Αγγελικοπούλου, διδάκτορα χημικό μηχανικό και προϊσταμένη του Τεχνικού Γραφείου και Εργαστηρίου της Επιφάνειας και τη Σοφία Γαβριηλίδου, τις συντηρήτριες και συντηρητές στον Παρθενώνα για τις ανεκτίμητες πληροφορίες, την βοήθειά και τις υποδείξεις τους κατά την διάρκεια των μετρήσεων καθώς και την Β. Ελευθερίου, διευθύντρια της Υ.Σ.Μ.Α. και αρχιτέκτονα μηχανικό για την συνεργασία. Τέλος δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω όλο το προσωπικό στο Γραφείο Συντήρησης του Παρθενώνα για την φιλοξενία του κατά την διάρκεια των μετρήσεων και την Γραμματεία της Υ.Σ.Μ.Α. για την πρόσβαση σε εκδόσεις και αρχειακό υλικό.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον δρ. Νικόλαο Χαμάκο για τη μύηση μου στον κόσμο της υπολογιστικής μηχανικής, την αμέριστη βοήθεια του και συνεργασία καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στο πεντελικό μάρμαρο του Παρθενώνα της Ακρόπολης Αθηνών. Ο Παρθενώνας είναι το πιο σημαντικό μνημείο της ελληνικής πολιτισμικής κληρονομιάς για την αρχιτεκτονική, καλλιτεχνική και ιστορική του αξία. Είναι η πρώτη φορά που συνδυάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο με τη μη καταστρεπτική τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου σε ένα ελληνικό μνημείο.

Οι τρία στάδια της μελέτης ήταν τα εξής :

1. Μια πρώτη προσέγγιση στην ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας μέσα από τις θεωρητικές εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας.
2. Η εφαρμογή της τεχνικής της θερμογραφίας υπερύθρου και η αποτύπωση με αυτή τη μέθοδο της θερμοκρασιακής κατανομής όψεων του μνημείου.
3. Μετρήσεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των κιόνων σε διαφορετικά σημεία και της σχετικής υγρασίας με τη χρήση θερμομέτρο με αισθητήρα επαφής και θερμοϋγρόμετρο αντίστοιχα.

Στο πρώτο στάδιο κατασκευάστηκε το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης και στη συνέχεια έλαβαν χώρα οι επί τόπου μη καταστρεπτικές μετρήσεις. Μέσα από τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της αξιοπιστίας του θερμικού μοντέλου προσομοίωσης και αξιολόγηση της χρήσης του για τη δημιουργία ενός συστήματος τακτικής παρακολούθησης του μνημείου (monitoring) και για τη διάγνωση της φθοράς. Επιπρόσθετα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της θερμογραφίας υπερύθρου με τις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας των κιόνων με θερμομέτρο με αισθητήρες επαφής που αποδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε μια κατεύθυνση ποσοτικοποίησης και προτυποποίησης της μεθόδου. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η σχετική υγρασία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου στη μεταφορά θερμότητας ώστε σε ένα δεύτερο στάδιο να μελετηθεί το σύνθετο φαινόμενο της θερμικής καταπόνησης.

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης στη συγκεκριμένη περίπτωση αποδείχτηκε ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στο πεντελικό μάρμαρο: περιέγραψε αποτελεσματικά τη θερμική συμπεριφορά σε όλα τα τμήματα του κίονα, αποδίδει τρισδιάστατη κατανομή της θερμοκρασίας και υπολογίζει τη θερμοκρασιακή κατανομή τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό του κίονα. Επίσης, από τη συγκεκριμένη εργασία προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη βελτιστοποίηση του ίδιου του υπολογιστικού μοντέλου.

Το προτεινόμενο θερμικό μοντέλο απέδωσε μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας από ότι καταγράφηκαν από τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής με μικρότερες αποκλίσεις κατά μέσο όρο το καλοκαίρι από ότι το φθινόπωρο και το χειμώνα. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' ύψος του κίονα σημειώνονταν πάντοτε στο ανώτερο τμήμα του τελευταίου σπονδύλου του κορμού του κίονα. Παρατηρούνται ομοιόμορφες καθ' ύψος θερμοκρασιακές ζώνες ανάμεσα στο ανατολικό και στο δυτικό τμήμα του κίονα.

Η διαφορά θερμοκρασίας στα διαφορετικά τμήματα του κίονα αποδίδεται στη διαφορά απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω σκίασης που οφείλεται στην αρχιτεκτονική δομή του μνημείου δηλαδή στη γεωμετρία του αντικειμένου μελέτης, και στη θέση του ήλιου σε σχέση με την εποχή και την ώρα μελέτης. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες μεταφοράς θερμότητας. Οι αποκλίσεις του μοντέλου από τις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα ήταν μεγαλύτερες όταν η σχετική υγρασία ήταν υψηλότερη.

Στα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου και στις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα επαφής δεν αποτυπώθηκαν καθ' ύψος ισοθερμικρασιακές ζώνες, αντίθετα αποτυπώθηκαν διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία του κίονα, οι οποίες οφείλονται την πραγματική γεωμετρία του κίονα όπως οι ραβδώσεις του κίονα και στην επιφανειακή πάτινα και φθορά όπως επιδερμίδα, απώλεια υλικού και προσμίξεις. Η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του μαρμάρου μέσα στη μέρα αλλά και στις διαφορετικές εποχές είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος . Με αυτό τον τρόπο

διαπιστώνεται η συμβολή της θερμικής κόπωσης στην ανάπτυξη της επιφανειακής φθοράς.

Η θερμογραφία υπερύθρου σε όλες τις ημέρες αποτύπωσε μια μικρότερη θερμοκρασιακή κλίμακα σε σχέση με τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας των κίωνων με αισθητήρα επαφής και συνεπώς και με τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις σημειώθηκαν στις ημέρες με υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στα θερμογραφήματα που λήφθηκαν από μεγαλύτερες αποστάσεις καταγράφονται χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες, καθώς με την αύξηση της απόστασης απορροφάται μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Οι επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας επηρεάζονται από την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του ανέμου.

Abstract

The aim of the present dissertation is to study the heat transfer to the Pentelic marble found in the Parthenon of Acropolis, Athens. The Parthenon is deemed to be the most important monument of the Greek cultural heritage, due to its architectural, artistic and historical value. It's the first time that a thermal simulation model is combined with ir thermography to study an important greek monument.

The central axes of the study are summed up as follows:

1. An initial approach to the construction of a thermal simulation model for heat transfer due to sun radiation, by means of theoretical equations of heat transfer.
2. Application of infrared thermography and tracing the temperature distribution on different facets of the monument.
3. Surface point measurements of temperature and humidity using thermometer with sensors and ir thermometer and humidity meter.

At the first stage of the study, the proposed simulation model was constructed, ensued by non-destructive in situ measurements. Through the comparative study of the outcomes produced by these approaches a validation of the model and an assessment of the use of the thermal model was conducted, resulting in the creation of a system of monitoring of the monument and the diagnosis of decay. Moreover, there was a comparison between the outcomes produced by infrared thermography and surface point measurements of temperature with sensors, aiming at the quantification and the prototyping of the method. What was finally studied is the impact of different environmental factors, such as environment temperature, relative humidity, solar irradiation and wind velocity.

The results present a repeatability under identical conditions of measurement, both in each individual method and regarding the temperature variations among the three methods. The suggested thermal model led to larger temperature values compared to the ones documented during surface measurements of temperature with sensors. Variations were greater when relative humidity was higher.

Conversely, infrared thermography traced a smaller scale of temperature in comparison to surface measurements of temperature with sensors and hence the outcomes produced by the thermal model during all days. The greatest variation

incurred on days with a higher environment temperature and sun radiation intensity. The thermograms received from greater distance presented lower surface temperatures, as the increase of the distance leads to greater absorption of the emitted radiation by atmospheric particles. Surface measurements of temperature are affected by wind velocity and direction.

The thermal simulation model presents homogeneous zones of temperature around the pillar. Regarding infrared thermography and surface measurements of temperature, there are differences of temperature observed at different spots of the pillar, not only because of the exposure to sun radiation, but also because of impurities or surface corrosion. The differences of temperature observed on the marble's surface throughout a day, as well as from season to season are proportional to the increase of temperature, which marks the contribution of thermal fatigue to surface corrosion.

The implementation of a thermal simulation model can serve as a very useful tool for the study of the heat transfer due to solar radiation to Pentelic marble. The present dissertation and the initial approach to such a model led to significant conclusions regarding the enhancement of the model itself, as well as the impact exerted by the material's properties, the monument's structure and geometry and the environment to study in the future the thermal fatigue of such a significant monument.

Keywords: Pentelic Marble, Infrared Thermography, Thermal Simulation Model, Heat Transfer through Radiation, Parthenon, Acropolis

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ρ	Πυκνότητα του στερεού
C_p	Θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερή πίεση
k	Θερμική αγωγιμότητα του υλικού
u	Ταχύτητα ροής θερμότητας
Q	Θερμική πηγή
G	Εισερχόμενη ροή θερμότητας από ακτινοβολία
J	Εξερχόμενη ροή θερμότητας από ακτινοβολία
E	Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας
$e_b(T)$	Ένταση εκπομπής του μελανού σώματος
T	Θερμοκρασία της επιφάνειας
G_m	Η κοινή προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία υπολογίζεται από τα όρια του μοντέλου
G_{ext}	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τις εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας
G_{amb}	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία από το περιβάλλον
$T_{περ}$	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος
I_s	Ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας
T_o	Θερμοκρασία Βάσης Κίονα
U	Θερμική Ενέργεια
q''	Ροή θερμότητας
h	Συντελεστή συναγωγής

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

			4
Πίνακας	1.1.2.1	Φυσικοχημικές Ιδιότητες του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)	
Πίνακας	1.1.3.1	Ορυκτολογική σύσταση του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)	5
Πίνακας	1.1.3.2	Χημική ανάλυση του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)	5
Πίνακας	1.2.2.1	Παράμετροι για την δημιουργία ρωγμών σε μάρμαρο λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών	15
Πίνακας	2.1.1	Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική απόδοση ενός κτιρίου	23
Πίνακας	2.2.1	Μεγέθη της μεταφοράς θερμότητας	29
Πίνακας	2.2.2	Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου	31
Πίνακας	2.2.3	Τυπικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (h)	32
Πίνακας	2.2.4	Σύμβολα, μονάδες και μεγέθη των εξισώσεων μεταφοράς ενέργειας στα στερεά	35
Πίνακας	2.2.5	Συμβολισμοί, μονάδες και μεγέθη της εξίσωσης της εξερχόμενης ακτινοβολίας (J)	44
Πίνακας	2.2.6	Συμβολισμοί, μονάδες, μεγέθη και τρόποι υπολογισμού τους για την εξίσωση υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας	44
Πίνακας	2.4.1	Πρότυπο BS EN 13187	47
Πίνακας	2.4.2	Προγράμματα προσομοίωσης και οριακές τιμές σε διαφορετικές εφαρμογές	50
Πίνακας	4.1.1	Περιγραφή των τριών σταδίων της εργασίας	65
Πίνακας	4.1.2	Μέτρηση θερμοκρασίας επιφάνειας και περιβάλλοντος	67
Πίνακας	4.2.2.1	Τυπικές τιμές συντελεστή εκπομπής	76
Πίνακας	4.2.2.2	Πρότυπα για την εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου	81
Πίνακας	4.2.2.3	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί στη χρήση της Θερμογραφίας Υπερύθρου	82
Πίνακας	4.2.2.4	Εφαρμογές της θερμογραφίας Υπερύθρου σε μνημεία	82
Πίνακας	4.2.2.5	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Θερμοκάμερας	85
Πίνακας	4.2.3.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Θερμομέτρου με αισθητήρες επαφής	85
Πίνακας	4.3.1	Μεγέθη και τρόπος μετρήσεων	88
Πίνακας	4.3.2	Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία Μαρτίου (στ. Θησείου)	91
Πίνακας	4.3.3	Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία Ιουλίου (στ. Θησείου)	91
Πίνακας	4.3.4	Ταχύτητα ανέμου (Υδρολογικό Ινστιτούτο Αθηνών)	91
Πίνακας	4.3.5	Ολική Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας (Υδρολογικό Ινστιτούτο Αθηνών)	91
Πίνακας	5.1.2.1	Μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του θερμικού μοντέλου	95
Πίνακας	5.1.3.1	Ιδιότητες του Πεντελικού Μαρμάρου	97
Πίνακας	5.1.3.2	Περιβαλλοντικά δεδομένα και θερμοκρασία βάσης	97
Πίνακας	5.1.3.3	Γεωγραφικές Συντεταγμένες Παρθενώνα	98
Πίνακας	5.1.4.1	Σύγκριση διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα	99
Πίνακας	5.2.1	Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική καταπόνηση του μνημείου	100

Πίνακας	5.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν το μοντέλο προσομοίωσης και τη θερμογραφία υπερύθρου	101
Πίνακας	5.2.3	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	106
Πίνακας	5.2.4	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	109
Πίνακας	5.2.5	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	113
Πίνακας	5.2.6	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	115
Πίνακας	5.2.7	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	119
Πίνακας	5.2.8	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	122
Πίνακας	5.2.9	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	126
Πίνακας	5.2.10	Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)	130
Πίνακας	5.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου	133
Πίνακας	5.3.2	Σύγκριση των ισόθερμών κατανομών του μοντέλου	136

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα	1.1.1	Κρύσταλλοι του ασβεστίτη	1
Εικόνα	1.1.2	b) τυχαίος προσανατολισμός, c) κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός, d) προσανατολισμός των κόκκων, e) κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός και προσανατολισμός κόκκων	2
Εικόνα	1.1.2.1	Αυθεντική Σχεδιαστική Αναπαράσταση εξόρυξης πεντελικού μαρμάρου	3
Εικόνα	1.1.3.1	Διάγραμμα ονοματολογίας των αστρίων	6
Εικόνα	1.2.2.1	Ζαχαροειδής φθορά στο Jefferson Memorial, Washington D.C.	11
Εικόνα	1.2.2.2	Κυψελοειδής διάβρωση (Malta, Rabat-Gozo, Citadel, 1994. Γεωλογικό Ινστιτούτο Πανεπιστημίου του Aachen/ B. Fitzner)	12
Εικόνα	1.2.2.3	Μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας λόγω κυψέλωσης	12
Εικόνα	1.2.2.4	Διαφορική φθορά σε μάρμαρο (Portugal, Queluz Palace, 2003) (Α. Ποζιόπουλος, 1992)	12
Εικόνα	1.2.2.5	Απολέπιση σε μάρμαρο (φωτογραφία από Εργαστήριο Συντήρησης Λίθου Τ.Ε.Ι. Αθήνας)	13
Εικόνα	1.2.2.6	Μικρορηγματώσεις σε κεφάλι αγάλματος του Απόλλωνα (Τουρκία, Nemrud Dag 2002, Γεωλογικό Ινστιτούτο Πανεπιστημίου του Aachen / B. Fitzner)	13
Εικόνα	1.2.2.7	Σχηματική αναπαράσταση της γυψοποίησης επιφάνειας μαρμάρου και της εξάλειψης των λεπτομερειών της	16
Εικόνα	1.2.2.8	Απομείωση λεπτομερειών αγάλματος από την όξινη βροχή	17
Εικόνα	1.2.2.9	Τοίχος από την Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου	17
Εικόνα	1.2.2.10	Τσιμεντιτική κρούστα στον αρχαιολογικό χώρο Ελευσίνας	18
Εικόνα	1.2.2.11	Μαύρη κρούστα σε μάρμαρο Carrara (φωτογραφία από το Πανεπιστήμιο Federico II της Νάπολης, Ιταλία)	19
Εικόνα	1.2.2.12	Προστατευτική Πάτινα (Κέντρο Λίθου)	20
Εικόνα	1.2.2.13	Η αντικατάσταση λίθων οδήγησε στην επιτάχυνση φθοράς των παλαιότερων λίθων στο Κολλέγιο της Οξφόρδης [34]	21
Εικόνα	2.2.1	Διεπιφάνεια σώματος-αέρα	31
Εικόνα	2.2.2	Εισερχόμενη ακτινοβολία (αριστερά), εξερχόμενη ακτινοβολία (δεξιά)	37
Εικόνα	2.2.3	Η κατανομή Planck του μελανού σώματος στους 5780 K	39
Εικόνα	2.2.4	Κατανομή Planck μελανού σώματος στους 300 K	40
Εικόνα	2.2.5	Η διαφορική δύναμη εκπομπής μέλανος σώματος σε συνάρτηση με το λT	41
Εικόνα	2.2.6	Συσχέτιση του συντελεστή εκπομπής σε σχέση με το μήκος κύματος	41
Εικόνα	2.2.7	Κανονικοποιημένη κατανομή Planck μελανού σώματος στους 700 K και 5800 K	42
Εικόνα	2.2.8	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και εκπομπή στο περιβάλλον	42
Εικόνα	2.2.9	Προσεγγιστική συσχέτιση του συντελεστή εκπομπής με το	43

		μήκος κύματος	
Εικόνα	3.0.1	Αεροφωτογραφία της Αθηναϊκής Ακρόπολης	53
Εικόνα	3.1.1	Παρθενώνας	54
Εικόνα	3.1.2	Κάτοψη του Παρθενώνα	54
Εικόνα	3.1.3	Σκηνή με μάχη κενταύρου και Λάπιθα (Νότια Μετώπη, Βρετανικό Μουσείο)	55
Εικόνα	3.1.4	Ο Παρθενώνας ως εκκλησία, η ανατολική πλευρά	56
Εικόνα	3.1.5	Η ανατίναξη του Παρθενώνα στις 26 Σεπτεμβρίου 1687	57
Εικόνα	4.1.1	Σχεδιάγραμμα των παραγόντων	67
Εικόνα	4.2.2.1	Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ένα ημιδιαπερατό σώμα	70
Εικόνα	4.2.2.2	Μέλαν σώμα	71
Εικόνα	4.2.2.3	Κατανομή της ενέργειας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες	72
Εικόνα	4.2.2.4	Η εσωτερική φωτογραφία του tezzone 105 της Arsenal of Venice και το θερμογράφημα του βόρειου τοίχου	84
Εικόνα	4.2.2.5	Θερμογραφικό σύστημα B200	85
Εικόνα	4.3.1	Φωτογραφίες από την νοτιανατολική, ανατολική και βορειανατολική όψη του Παρθενώνα (φωτογραφίες από προσωπικό αρχείο)	86
Εικόνα	4.3.2	Φωτογραφίες από την νοτιανατολική, ανατολική και βορειανατολική όψη του Παρθενώνα (φωτογραφίες από προσωπικό αρχείο)	86
Εικόνα	4.3.3	Φωτογραφίες από την νοτιανατολική, ανατολική και βορειανατολική όψη του Παρθενώνα (φωτογραφίες από προσωπικό αρχείο)	87
Εικόνα	4.3.4	Θέσεις λήψεων των θερμογραφημάτων	87
Εικόνα	4.3.5	Κίονες επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρες	88
Εικόνα	4.3.6	Σημεία επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας	89
Εικόνα	4.3.7	Σχέδιο σπονδύλου	89
Εικόνα	4.3.8	Διάγραμμα ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας Μαρτίου (στ. Θησείου)	90
Εικόνα	4.3.9	Διάγραμμα ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας Ιουλίου (στ. Θησείου)	91
Εικόνα	4.3.10	Διάγραμμα μέσης σχετικής υγρασίας ανά μήνα (2016-2017)	92
Εικόνα	5.1.1.1	Αναπαράσταση της απλοποιημένης μορφής του κίονα σε σχέση με την πραγματική γεωμετρία του	94
Εικόνα	5.1.3.1	Ιδιότητες του υλικού	97
Εικόνα	5.1.3.2	Εισαγωγή γεωγραφικών συντεταγμένων	98
Εικόνα	5.1.4.1	Πολύ λεπτό πλέγμα (extra fine) εφαρμοσμένο στον κίονα	99
Εικόνα	5.1.4.2	Πολύ λεπτό πλέγμα (extra fine) εφαρμοσμένο στον κίονα	100
Εικόνα	5.2.1	Κίονες επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρες	102
Εικόνα	5.2.2	Σημεία επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας	103
Εικόνα	5.2.3	Σχέδιο σπονδύλου	103
Εικόνα	5.2.4	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	105
Εικόνα	5.2.5	Θερμογράφημα της βορειανατολικής γωνίας (30/03)	106

Εικόνα	5.2.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων (30/03)	107
Εικόνα	5.2.7	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	109
Εικόνα	5.2.8	Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (10/07)	109
Εικόνα	5.2.9	Σύγκριση αποτελεσμάτων (10/07)	110
Εικόνα	5.2.10	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	112
Εικόνα	5.2.11	Κάθετη τομή στο εσωτερικό του κίονα	112
Εικόνα	5.2.12	Θερμογράφημα ανατολικής όψης (11/07)	113
Εικόνα	5.2.13	Σύγκριση αποτελεσμάτων (11/07)	113
Εικόνα	5.2.14	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	115
Εικόνα	5.2.15	Σύγκριση αποτελεσμάτων (24/07)	115
Εικόνα	5.2.16	Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (24/07)	116
Εικόνα	5.2.17	Θερμογράφημα της νότιας όψης (24/07)	117
Εικόνα	5.2.18	Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (24/07)	117
Εικόνα	5.2.19	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	118
Εικόνα	5.2.20	Σύγκριση αποτελεσμάτων (25/07)	119
Εικόνα	5.2.21	Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (25/07)	120
Εικόνα	5.2.22	Θερμογράφημα της νότιας όψης (25/07)	120
Εικόνα	5.2.23	Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (25/07)	120
Εικόνα	5.2.24	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	122
Εικόνα	5.2.25	Σύγκριση αποτελεσμάτων (28/07)	123
Εικόνα	5.2.26	Θερμογράφημα της νότιαανατολικής όψης (28/07)	124
Εικόνα	5.2.27	Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (28/07)	124
Εικόνα	5.2.28	Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (28/07)	124
Εικόνα	5.2.29	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	126
Εικόνα	5.2.30	Σύγκριση αποτελεσμάτων (21/12)	127
Εικόνα	5.2.31	Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (21/12)	128
Εικόνα	5.2.32	Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (21/12)	128
Εικόνα	5.2.33	Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (21/12)	128
Εικόνα	5.2.34	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	130
Εικόνα	5.2.35	Σύγκριση αποτελεσμάτων (22/12)	130
Εικόνα	5.2.36	Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (22/12)	131
Εικόνα	5.2.37	Θερμογράφημα της νότιας όψης (22/12)	132
Εικόνα	5.2.38	Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (22/12)	132
Εικόνα	5.3.1	Το ύψος του ήλιου σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος ανά εποχή	134
Εικόνα	5.3.2	Η θέση του ήλιου σε σχέση με το προσανατολισμό του μνημείου ανά εποχή	135
Εικόνα	5.3.3	Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (25/07)	137
Εικόνα	5.3.4	Θερμογραφήμα τμήματος της ανατολικής όψης (24/07)	138

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα	5.3.1	Διαγράμμα T_{\min} και T_{\max} του κίονα 1	140
Σχήμα	5.3.2	Διαγράμμα T_{\min} και T_{\max} του κίονα 2	141
Σχήμα	5.3.3	Διαγράμμα T_{\min} και T_{\max} του κίονα 4	141
Σχήμα	5.3.4	Διαγράμμα T_{\min} και T_{\max} του κίονα 7	142
Σχήμα	5.3.5	Διαγράμμα T_{\min} και T_{\max} του κίονα 8	142

Πίνακας Περιεχομένων

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1: Πεντελικό μάρμαρο ιδιότητες και κύριοι τύποι φθοράς	1
1.1. Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του πεντελικού μαρμάρου	1
1.1.1 Μάρμαρο - ιδιότητες και χαρακτηριστικά	1
1.1.2 Πεντελικό μάρμαρο – ιδιότητες και χαρακτηριστικά	3
1.1.3 Προσμίξεις Πεντελικού μαρμάρου	5
1.1.4 Φυσικοχημικές ιδιότητες	7
1.2 Φθορές και μηχανισμοί φθοράς	9
1.2.1 Αίτια φθοράς	9
1.2.2 Τύποι και μηχανισμοί φθοράς	11
Κεφάλαιο 2: Θερμικά μοντέλα προσομοίωσης και μεταφορά θερμότητας	23
3.1 Θερμικά μοντέλα προσομοίωσης	23
3.2 Μεταφορά θερμότητας	28
3.3 Υπολογιστικά προγράμματα	45
3.4 Εφαρμογές	46
Κεφάλαιο 3: Ο Παρθενώνας της Ακρόπολης Αθηνών	53
3.1 Αρχιτεκτονική και ιστορική παρουσίαση του Παρθενώνα	53
3.2 Συντήρηση των μνημείων της Ακρόπολης	57
3.2.1 Κατάσταση της επιφάνειας των μνημείων	58
3.2.2 Ιστορικά ίχνη πάνω στην επιφάνεια των μνημείων	60
3.2.3 Ιστορικά στοιχεία σχετικά με τη συντήρηση στα μνημεία της Ακρόπολης	60
3.2.4 Σημερινές εργασίες συντήρησης	61
3.2.5 Υλικά συντήρησης	63

Πειραματικό μέρος

Κεφάλαιο 4: Πειραματικό Μέρος	65
4.1 Σκοπός και σχεδιασμός	68
4.2 Μέθοδοι και όργανα	68
4.3 Σχεδιασμός Λήψης θερμογραφημάτων στον Παρθενώνα	85
4.4 Σχεδιασμός Επιφανειακών Μετρήσεων Θερμοκρασίας με αισθητήρες επαφής και θερμορρογόμετρο	86
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα-Συζήτηση αποτελεσμάτων	93
5.1 Προτεινόμενο θερμικό μοντέλο	93
5.1.1 Εισαγωγή γεωμετρίας του αντικειμένου	93
5.1.2 Καθορισμός του φυσικού προβλήματος – Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου	94
5.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική καταπόνηση	96
5.1.4 Επιλογή και μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος	98
5.2 Έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου	100
5.3 Επίδραση περιβαλλοντικών παραμέτρων	132
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Προοπτικές	143
Βιβλιογραφία	147

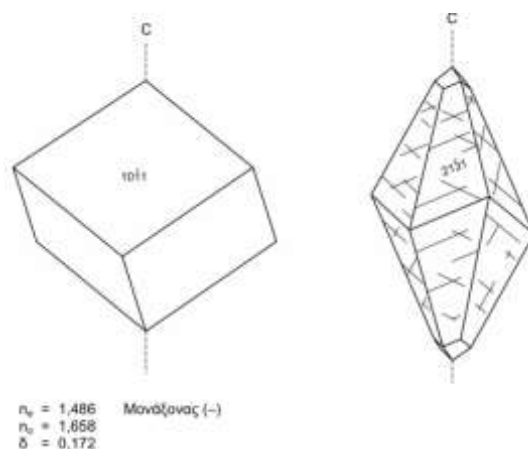
Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1: Πεντελικό μάρμαρο - ιδιότητες και κύριοι τύποι φθοράς

1.1 Πεντελικό Μάρμαρο -ιδιότητες και χαρακτηριστικά

1.1.1 Μάρμαρο – ιδιότητες και χαρακτηριστικά

Μάρμαρο ονομάζεται το πέτρωμα που έχει προέλθει από μεταμόρφωση ανθρακικών ιζημάτων (ασβεστόλιθων ή δολομιτών)[1]. Πρόκειται για πέτρωμα ολοκρυσταλλικό με αναπτυγμένη ή όχι σχιστότητα. Το κύριο ορυκτολογικό συστατικό του μαρμάρου είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3), ορυκτό το οποίο κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό κρυσταλλογραφικό σύστημα και σχηματίζει κρυστάλλους διαφόρων μεγεθών. Συχνά περιέχουν προσμίξεις είτε διάσπαρτες είτε υπό τη μορφή φλεβών που αποτελούνται κυρίως από οξείδια σιδήρου ή/και χαλαζία ή/και μαρμαρυγιών[2]. Διαφορετικά μάρμαρα έχουν διαφορετικές ιδιότητες λόγω της ανισοτροπίας των ιδιοτήτων του ασβεστίτη, την υφή του πετρώματος και την μικροδομή του.

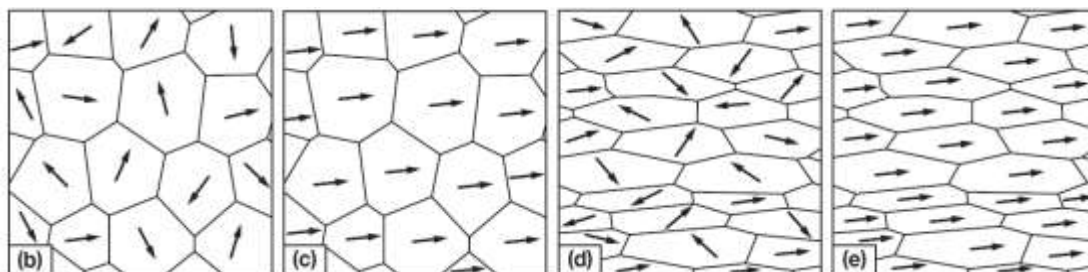


Εικόνα 1.1.1: Κρύσταλλοι του ασβεστίτη

Οι ιδιότητες του μαρμάρου ποικίλουν και εξαρτώνται από την μικροδομή και την κοκκομετρία του μαρμάρου. Το πορώδες τους, είναι συνήθως μικρό, ενώ ποικίλλει το μέγεθος των κρυστάλλων τους και το χρώμα τους (άσπρο, γκρίζο, κόκκινο, κίτρινο, πράσινο, καφέ κ.λ.π.). Ο ασβεστίτης έχει σκληρότητα 3 κατά Mohs, και ειδικό βάρος $2,7 \text{ g/cm}^3$. Είναι πιθανόν να περιέχει δολομίτη $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, ο οποίος κρυσταλλώνεται επίσης στο τριγωνικό σύστημα. Ο δολομίτης είναι σκληρότερο (3,5-

4 κατά Mohs) και βαρύτερο ($2,9 \text{ g/cm}^3$) ορυκτό από τον ασβεστίτη, και η παρουσία του καθιστά τη κατεργασία του μαρμάρου δυσχερή και επιταχύνει τις διαδικασίες φθοράς του. Εκτός του ασβεστίτη και δολομίτη συναντώνται και άλλα ορυκτά, όπως χαλαζίας και εμποτισμοί μετάλλων με τη μορφή φλεβών που προσδίδουν τις διάφορες αποχρώσεις στη μάζα του μαρμάρου και επηρεάζουν τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Τα λεπτόκοκκα μάρμαρα θεωρείται ότι έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από τα χονδρόκοκκα. Η αντοχή τους εξαρτάται και από την ιστολογική κατασκευή τους.

Όταν το μάρμαρο δεν περιέχει σημαντικά ποσοστά άλλων στοιχείων, έχει λευκό χρώμα. Παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στους εξωτερικούς παράγοντες (ψύχος, θέρμανση, υγρασία) και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό διαπιστώνεται από την καλή κατάσταση στην οποία βρίσκονται σήμερα τα περισσότερα μαρμάρινα μνημεία. Καταστρέφεται όμως εύκολα από τη φωτιά, όπως οι κοινοί ασβεστόλιθοι γιατί περίπου στους 900°C (λόγω της ανισοτροπίας των κρυστάλλων του), αποσυντίθεται το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σε CaO και CO_2 [3].



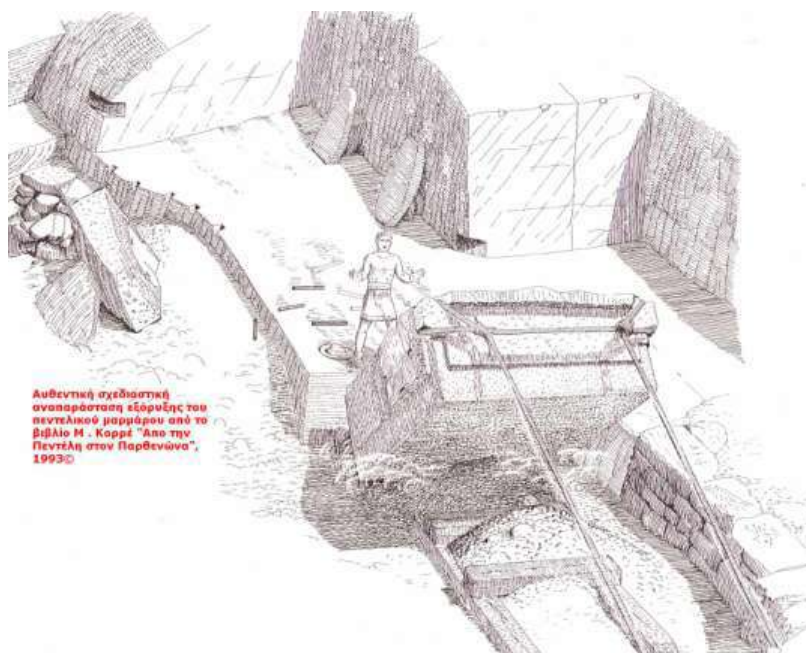
Εικόνα 1.1.2: b)τυχαίος προσανατολισμός, c)κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός, d)προσανατολισμός των κόκκων, e)κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός και προσανατολισμός κόκκων (σχήμα Paolo Conti)

Στην Ελλάδα εντοπίζεται στις κρυσταλλοσχιστώδεις γεωτεκτονικές ζώνες της Ροδόπης, Πελαγονικής, Αττικοκυκλαδικής, Πελοποννήσου, Κρήτης, με πιο γνωστά μάρμαρα το μάρμαρο της Πάρου, της Νάξου, το Πεντελικό, του Μαραθώνα και της

Αγίας Μαρίνας, της Δόμβραινας κοντά στη Θήβα, της Δράμας, της Ερέτριας και της Καρύστου στην Εύβοια, της Μάνης κ.ά.[3-6].

1.1.2 Πεντελικό μάρμαρο - ιδιότητες και χαρακτηριστικά

Το πεντελικό μάρμαρο άρχισε να εξορύσσεται κατά την αρχαιότητα στη νοτιοδυτική πλευρά του όρους Πεντέλης, στη Κουιάδα της Σπηλιάς, όπως ονομάζεται σήμερα. Η νεότερη εξόρυξη στην Πεντέλη άρχισε το 1836, επί της βασιλείας του Όθωνα και συνεχίστηκε μέχρι το 1976, σε διάφορες θέσεις της νότιας πλευράς του Πεντελικού όρους. Από το 1976 η εξόρυξη πεντελικού μαρμάρου συνεχίζεται μόνο στη βόρεια πλευρά της Πεντέλης, στην περιοχή του Διονύσου, την αθέατη από το λεκανοπέδιο των Αθηνών [7]. Σήμερα, στην περιοχή των αρχαίων λατομείων διατηρείται σε καλή κατάσταση ένα από τα αρχαία μέτωπα εξόρυξης.



Εικόνα 1.1.2.1: Αυθεντική Σχεδιαστική Αναπαράσταση εξόρυξης πεντελικού μαρμάρου (Μ. Κορρές, «Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα», εκδ. Μέλισσα, 1993)

Τα πεντελικά μάρμαρα παρουσιάζουν σχιστότητα, ιδιότητα που διευκολύνει την εξόρυξη των ογκόλιθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Έχουν λεπτό υποσακχαροειδή ιστό και μεγάλη συνεκτικότητα, φυσιολογική αντοχή στη θραύση και σπλιβώνονται εύκολα. Είναι

χρώματος λευκού, μεγάλης καθαρότητας, χωρίς διάστιξη και διεσπαρμένες φλέβες. Η ορυκτολογική και χημική σύσταση και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα [5]:

Πίνακας 1.1.2.1: Φυσικοχημικές Ιδιότητες του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)

Φαινόμενο ειδικό βάρος (kg/m³)	Συντελεστής υδαταπορρόφησης	Αντοχή σε θλίψη (kg/m²)
2717	0,11	1134

Στα ιστορικά κτίρια, το πεντελικό μάρμαρο έχει χρησιμοποιηθεί είτε στις προσόψεις είτε ως φέρον στοιχείο. Οι επιφάνειες του μαρμάρου είναι πρώτης προτεραιότητας όσο αναφορά τον στρατηγικό σχεδιασμό της περιοδικής συντήρησής τους. Από τα πεντελικά μάρμαρα έχουν κατασκευαστεί ο Παρθενώνας, το Ερεχθείο, τα Προπύλαια της Ακρόπολης, το Θησείο, ο ναός του Ολυμπίου Διός και πολλοί άλλοι ναοί και μνημεία των Αθηνών και άλλων αρχαίων πόλεων της Ελλάδας. Στα νεότερα χρόνια με πεντελικό μάρμαρο κατασκευάστηκαν η Εθνική Βιβλιοθήκη, η Ακαδημία Αθηνών [5].

Το Πεντελικό μάρμαρο χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη διακοσμητική και αρχιτεκτονική. Χρησιμοποιήθηκε τόσο σε εξωτερικές χρήσεις όσο και στη γλυπτική. Δύο ιδιαίτεροι τύποι Πεντελικού μαρμάρου είναι γνωστοί από την αρχαιότητα είναι Pentelique Statuaire και το Greco Fino. Το Pentelique Statuaire είναι μάρμαρο εξαιρετικής ποιότητας και μοναδικό στο είδος του και διαφέρει από το λευκό μάρμαρο ως προς την απόχρωσή του. Χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα στην γλυπτική. Στην κλασική αρχαιότητα χρησιμοποιούνταν από τους γλύπτες για την κατασκευή των γυμνών μερών των αγαλμάτων. Ο τύπος greco fino είχε τις περισσότερες εφαρμογές στην αρχιτεκτονική των Ρωμαίων. Είναι ένα μάρμαρο κατάλευκο και λεπτοκοκκώδες [8].

1.1.3 Προσμίξεις Πεντελικού Μαρμάρου

Εκτός από τον ασβεστίτη, το κύριο ορυκτό του πεντελικού μαρμάρου, στη σύστασή του συμμετέχουν και άλλες ενώσεις που παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας 1.1.3.1: Ορυκτολογική σύσταση του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)

ασβεστίτης	χαλαζίας	μοσχοβίτης	σερικήτης	Χλωρίτης
98%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%

Πίνακας 1.1.3.2: Χημική ανάλυση του Πεντελικού Μαρμάρου (Ι.Γ.Μ.Ε.)

CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	CO ₂
54,8%	1,55%	1,10%	0,14%	0,2%	0,09%	0,04%	0,02%	43,05%

- Μαρμαρυγίες: Ο γενικός τύπος των μαρμαρυγιών είναι $IM_{2-3}T_4O_{10}A_2$

I: K, Na, Ca, Cs, Rb, Ba

M: Li, Fe²⁺ ή Fe³⁺, Mg, Mn²⁺ ή Mn³⁺, Zn, Al, Cr, V, Ti

T: Si, Al, Fe, Be, B

A: OH, F, Cl, O, S

Οι μαρμαρυγίες είναι διοκταεδρικοί ή τριοκταεδρικοί. Για παράδειγμα, ο μοσχοβίτης είναι δικτατορικός μαρμαρυγίας ενώ αντίθετα ο βιοτίτης ανήκει στους τριοκταεδρικούς μαρμαρυγίες [9,10]. Ο μοσχοβίτης, με χημικό τύπο $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$, αποτελεί και το συνηθέστερο πυριτικό συστατικό του Πεντελικού. Τα φυλλάρια συνήθως είναι αργυρόχρωμα και σπανιότερα τεφροπράσινα, είτε είναι μεμονωμένα είτε διάσπαρτα εντός του πετρώματος, ή συγκεντρώνονται κατά μήκος των ρωγμών, ραφών ή στρωσιγενών επιφανειών σε φακοειδή συσσωματώματα [9].

- Χλωρίτες: Τα πεντελικά μάρμαρα, κυρίως τα ανοιχτόχρωμα, είναι πλούσια σε χλωρίτη που συνήθως συναντάται μαζί με τον μοσχοβίτη [9]. Οι χλωρίτες ανήκουν στην ομάδα των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Είναι ένυδρα ορυκτά του Al, του Fe²⁺ ή του Mg. Ο γενικός τους τύπος είναι $X_{12}Z_8O_{20}(OH)_{16}$ [10].

X: Al, Fe, Li, Mg, Mn, Ni

Z: Si, Al, Fe

- Χαλαζίας (SiO_2): Συναντάται σπάνια, αλλά σε μερικές ζώνες μαρμάρου που βρίσκονται σε επαφή με σχιστόλιθους, ο χαλαζίας είναι αφθονότερος και μπορεί να σχηματίζει λεπτά φλεβίδια ή φλέβες μαζί με διάφορα άλλα πυριτικά ορυκτά [9].
- Σιδηροπυρίτης (FeS_2): Έχει χρώμα κίτρινο (πυριτόχρωμο), ανοικτό ορειχάλκινο μέχρι χρυσοκίτρινο. Πολλές φορές γίνεται πιο σκούρος από επιφανειακά χρώματα οξείδωσης και ιριδίζει. Οξείδια του σιδήρου που μπορεί να βρίσκονται υπό την μορφή κόκκων μέσα στο μάρμαρο [9].
- Άστριοι: Έχουν τον γενικό τύπο XZ_4O_8

X: K, Na, Ca, Ba, Fe, Mg

Z: Si, Al

Οι διαφορετικές ονοματολογίες των αστρίων απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 1.1.3.1: Διάγραμμα ονοματολογίας των αστρίων

Τα παραπάνω ορυκτολογικά συστατικά, όταν εμπεριέχονται σε μεγάλα ποσοστά, επηρεάζουν τις ιδιότητες και το χρώμα του μαρμάρου. Τα φυλλώδη ορυκτά (μοσχοβίτης, χλωρίτης) αυξάνουν τη σχιστότητα του πετρώματος, όταν τα φυλλάριά τους διατάσσονται παράλληλα προς τη διεύθυνση επιμήκυνσης των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Ο χαλαζίας αυξάνει την αντοχή στην αποσάθρωση, ενώ οι σιδηροπυρίτες μειώνουν την αντοχή [9,10].

1.1.4 Φυσικοχημικές ιδιότητες

Από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του μαρμάρου εξαρτάται η ικανότητα του να αντιστέκεται στη μόλυνση του περιβάλλοντος και σε μηχανικές καταπονήσεις. Τα μονόμικτα και λεπτόκοκκα πετρώματα (όπως το Πεντελικό μάρμαρο) παρουσιάζουν καλύτερες φυσικοχημικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των συγκεκριμένων ιδιοτήτων γίνεται σε εξειδικευμένα εργαστήρια βάσει των διεθνών προδιαγραφών που αφορούν στα φυσικά διακοσμητικά πετρώματα. Οι ιδιότητες αυτές είναι [11]:

α. Φαινόμενο ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος είναι ο λόγος του βάρους του πετρώματος προς τον όγκο του. Επειδή όμως τα πετρώματα έχουν πόρους, κοιλότητες και κενά, υπάρχουν δύο μετρούμενοι όγκοι: ο φαινόμενος, που είναι ο όγκος του πετρώματος μαζί με τα κενά και ο πραγματικός, που είναι χωρίς τα κενά. Αυτό που χαρακτηρίζει τα πετρώματα είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος και εκφράζεται σε Kg/m^3 . Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι μια ιδιότητα που πρέπει να είναι γνωστή για όλων των ειδών τις κατασκευές, αφού με βάση αυτή και το πάχος των πλακών του μαρμάρου προσδιορίζουμε το βάρος κάθε τετραγωνικού μέτρου και επομένως το πόσο επιβαρύνεται η όλη κατασκευή. Η μέση τιμή του φαινομένου ειδικού βάρους του λευκού μαρμάρου Πεντέλης είναι $\rho=2710 \text{ Kg/m}^3$ [11].

β. Υδατοαπορρόφηση - Συντελεστής Υδατοαπορρόφησης

Είναι η ιδιότητα του πετρώματος να πληρώνεται με νερό. Συγκεκριμένα, η υδατοαπορροφητικότητα είναι η διαφορά της μάζας κορεσμένου με νερό δοκιμίου και ξηρού δοκιμίου. Όταν εκφράζεται επί % ονομάζεται συντελεστής υδατοαπορρόφησης. Η συγκεκριμένη ιδιότητα καθορίζει την καταλληλότητα ενός πετρώματος για εξωτερικές χρήσεις, όπου αυτό είναι εκτεθειμένο σε υγρές συνθήκες. Θεωρείται, όμως, σημαντική ιδιότητα και στην περίπτωση των εσωτερικών χρήσεων, όπου το μάρμαρο καλύπτει μεγάλους χώρους με μεγάλη συγκέντρωση ανθρώπων, όπου απαιτείται συχνός καθαρισμός με υγρά. Η μέση τιμή του συντελεστή υδατοαπορρόφησης για το λευκό μάρμαρο Πεντέλης είναι: $I_c=0.06\%$ [11].

γ. Μέτρο ελαστικότητας

Είναι ο λόγος της τάσης που ασκείται σε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο πετρώματος προς την αξονική του παραμόρφωση. Από δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί τα μάρμαρα παρουσιάζουν μέτρο ελαστικότητας $E=650-700\text{tn/m}^2$ [11].

δ. Αντοχή στην θλίψη

Θλιπτική αντοχή ενός πετρώματος ορίζεται ο λόγος του συνολικού φορτίου που ασκείται σε ένα δοκίμιο προς το εμβαδόν της διατομής του. Εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της σύστασης και της δομής του. Η αντοχή στην θλίψη θεωρείται μια πολύ σημαντική ιδιότητα για την αξιολόγηση των μαρμάρων για χρήση τους σε διάφορες κατασκευές. Ειδικά για την χρήση των πετρωμάτων σε εξωτερικούς χώρους και χώρες με έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι καλό να ελέγχεται η αντοχή σε θλίψη. Η μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής για λευκό μάρμαρο Πεντέλης είναι: $F_c=1091\text{ Kg/cm}^2$ [11].

ε. Αντοχή στον εφελκυσμό

Η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος ισοδυναμεί με τη μέγιστη τάση που ασκείται στο κάτω μέρος της πλάκας, όταν αυτή υφίσταται καμπτική καταπόνηση. Η αντοχή στην κάμψη των πετρωμάτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της σύστασης και της δομής τους. Αυτή η ιδιότητα επηρεάζεται σημαντικά από τη στρώση ή τη σχιστότητα των πετρωμάτων. Η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής για το λευκό Πεντελικό μάρμαρο είναι $F_t=263\text{ Kg/cm}^2$ [11].

στ. Αντοχή στη φθορά από τριβή

Η ιδιότητα αυτή εκφράζει την αντίσταση των πετρωμάτων στην τριβή. Σαν φθορά ορίζεται η προοδευτική απώλεια υλικού από την επιφάνεια ενός σταθερού σώματος που προκαλείται από μηχανικές αιτίες. Η αντοχή στη φθορά από τριβή εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογική σύσταση και επομένως τη σκληρότητα του πετρώματος και μερικώς από την τριβή και τον πιθανό βαθμό εξαλλοίωσής του. Η μέση τιμή της αντοχής στη φθορά από τριβή για το λευκό Πεντελικό μάρμαρο είναι $F=4,33\text{mm}$ [11].

ζ. Άλλες φυσικομηχανικές ιδιότητες

Άλλες φυσικομηχανικές ιδιότητες είναι η αντοχή στην κρούση, η μικροσκληρότητα Knoop, και η αντοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές [11].

1.2 Φθορές και μηχανισμοί φθοράς

1.2.1 Αίτια φθοράς

Φθορά ορίζεται ως η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής) των υλικών που οδηγεί στην αποσάθρωσή τους. Η φθορά είναι συνάρτηση τόσο ενδογενών (ορυκτολογική σύνθεση υλικού, ενεργός επιφάνεια επαφής με τους παράγοντες φθοράς), όσο και εξωγενών παραγόντων (υγρασία της ατμόσφαιρας, θερμοκρασία, θαλάσσιο περιβάλλον και κυρίως ατμοσφαιρική ρύπανση)[12]. Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες υλικών-περιβάλλοντος ή υλικών-υλικών.

Οι ενδογενείς παράγοντες σχετίζονται με το ίδιο το υλικό. Αυτοί περιλαμβάνουν τον τύπο του υλικού (π.χ. λίθοι, κονιάματα, κεραμικά, μέταλλα, ξύλο, σύγχρονα υλικά όπως το σκυρόδεμα κ.α.), τις ιδιότητές του (ορυκτολογικές, φυσικές, φυσικοχημικές, χημικές και μηχανικές), την κατανομή της μάζας του (μακροδομή, μικροδομή, νανοδομές) καθώς και την πηγή και την τεχνολογία επεξεργασίας (π.χ. θέση του λατομείου, κύκλοι κόπωσης του υλικού κ.λπ.)[13,14]. Επιπλέον, η ιστορία του υλικού (από την αρχική φάση κατασκευής μέχρι όλες τις εφαρμοζόμενες επεμβάσεις συντήρησης-ανακατασκευές του) και η συμβατότητα του με άλλα υλικά μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν ως ενδογενείς παράγοντες[14].

Οι εξωγενείς παράγοντες αναφέρονται στην επίδραση που έχει το περιβάλλον στο υλικό και μπορούν γενικά να διακριθούν σε εκείνους που αφορούν την ατμόσφαιρα και εκείνους που σχετίζονται με τη χρήση του υλικού. Το ίδιο υλικό παρουσιάζει διαφορετική αντοχή στη φθορά, όταν βρίσκεται σε ένα αστικό ρυπασμένο, αγροτικό ή θαλάσσιο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται συχνά στη μεγάλη διάρκεια ζωής των κατασκευών που βρίσκονται σε αγροτικό περιβάλλον, σε αντίθεση με εκείνες που εκτίθενται σε αστικά περιβάλλοντα υψηλής ρύπανσης [15-17].

Άλλοι σημαντικοί εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος, όπως η κατανομή, ο προσανατολισμός και το εύρος των κύριων περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, pH, άνεμος, κατακρημνίσεις κ.α.). Επιπλέον καθοριστικό παράγοντα αποτελεί και το μικροκλίμα, δηλαδή ο προσανατολισμός και η τοποθεσία του

κτιρίου σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες, η μορφολογία της επιφάνειας και ο τρόπος προσβολής από τις βροχοπτώσεις. Από το μικροκλίμα μπορεί επομένως να γίνει σαφές, πως το ίδιο υλικό μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικούς τύπους φθοράς σε διαφορετικές περιοχές ενός κτιρίου[16,17].

Το νερό είναι ένας άλλος σημαντικός εξωγενής παράγοντας. Το νερό έρχεται σε επαφή με τα δομικά υλικά μέσω της ατμόσφαιρας (βροχή, χιόνι, συμπύκνωση υγρασίας, αερολύματα) ή μέσω του εδάφους (ανερχόμενη υγρασία) και διαδραματίζει κύριο ρόλο στην κρυστάλλωση αλάτων, ένα σημαντικό φαινόμενο φθοράς για τα πορώδη δομικά υλικά [18]. Το πεντελικό μάρμαρο έχει πολύ μικρό πορώδες και η υγρασία δεν αποτελεί κύριο παράγοντα φθοράς. Όμως πολλές αντιδράσεις μεταξύ των λίθων και των ατμοσφαιρικών ρύπων λαμβάνουν χώρα σε υδατικό περιβάλλον έχοντας σαν συνέπεια για παράδειγμα τη δημιουργία κρούστας ή τη διάλυση των λίθων από την όξινη βροχή [19,20].

Επίσης στους εξωγενείς παράγοντες φθοράς κατατάσσονται και οι μηχανικές φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται οι λίθοι. Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται στη στατική φόρτιση (θλίψη, εφελκυσμός, διάτμηση και στρέψη), σε δυναμικά φορτία (π.χ. σεισμός), σε φορτία λόγω θερμικής συστολής-διαστολής, σε διαφορική διαστολή γειτονικών υλικών, σε φορτία από την κρυστάλλωση αλάτων και από τους κύκλους ψύξης-θέρμανσης. Τέλος ως εξωγενής παράγοντας μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί η παρουσία χλωρίδας και πανίδας αλλά και ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως βανδαλισμοί από graffiti, παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης κ.ά.

Πρέπει να τονιστεί ότι τις περισσότερες φορές πολλοί από τους παραπάνω παράγοντες δρουν είτε συνεργατικά, είτε ανταγωνιστικά οπότε εκτός από την μεμονωμένη εξέταση του καθενός είναι απαραίτητος και η μελέτη των κοινών επιπτώσεων τους. Η δράση της φθοράς μπορεί να είναι φυσική, φυσικοχημική, χημική και βιοχημική. Η ένταση και η ταχύτητα των φαινομένων εξαρτώνται από το βραδύτερο στάδιο του πραγματικού μηχανισμού και τις οριακές συνθήκες εξέλιξής του [12,16].

1.2.2 Τύποι και μηχανισμοί φθοράς

Οι συχνότεροι τύποι φθοράς στο μάρμαρο είναι:

α. Χημική φθορά

- Ζαχαροειδή/περικρυσταλλική φθορά: Είναι από τους πλέον συχνούς τύπους φθοράς του Πεντελικού μαρμάρου. Οφείλεται στην όξινη προσβολή των περατωτικών ορίων των κόκκων από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους-οξείδια του άνθρακα, του θείου και του αζώτου τα οποία, παρουσία του νερού της βροχής, μετατρέπονται σε αραιά οξέα (όξινη βροχή). Οδηγεί στην απώλεια της συνοχής και στην εκλεκτική αποκόλληση κόκκων, μεταβάλλοντας την υφή της επιφάνειας, η οποία προσομοιάζει κόκκους ζάχαρης.



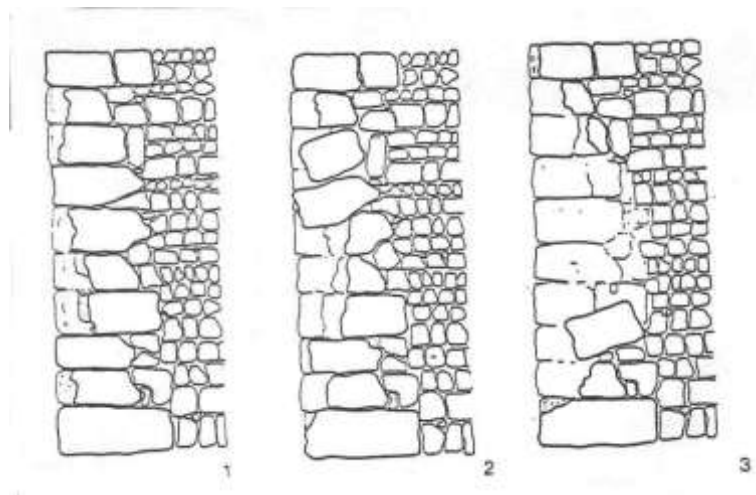
Εικόνα 1.2.2.1: Ζαχαροειδής φθορά στο Jefferson Memorial, Washington D.C.

- Κυψελοειδής διάβρωση: εμφανίζεται με τη μορφή οπών σποραδικά ή σε συστάδες. Στους συμπαγείς λίθους συμβαίνει λόγω όξινης προσβολής ή βιολογικών δράσεων (ενώ στους πορώδεις λίθους λόγω της δράσης διαλυτών αλάτων). Παρατηρείται κυρίως στις βόρειες όψεις των μνημείων και είναι εντονότερη στις ζώνες των αργιλοπυριτικών φλεβών.



Εικόνα 1.2.2.2: Κυψελοειδής διάβρωση (Malta, Rabat-Gozo, Citadel, 1994.

Γεωλογικό Ινστιτούτο Πανεπιστημίου του Aachen/ B. Fitzner)



Εικόνα 1.2.2.3: Μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας λόγω κυψέλωσης

(Α. Ποζιόπουλος, 1992)

- Διαφορική φθορά: είναι η ανομοιόμορφη απομείωση της επιφάνειας του μαρμάρου που οφείλεται στην ορυκτολογική ετερογένεια του υλικού.



Εικόνα 1.2.2.4: Διαφορική φθορά σε μάρμαρο (Portugal, Queluz Palace, 2003)

- Αποσάρθρωση και απολεπίσεις: παρατηρούνται σε περιοχές της επιφάνειας, όπου το μάρμαρο παρουσιάζει μειωμένη συνοχή, με συνέπεια τη διείσδυση και συγκράτηση αυξημένης ποσότητας νερού, δράσης αλάτων, όξινης προσβολής και θερμοκρασιακών μεταβολών.



Εικόνα 1.2.2.5: Απολέπιση σε μάρμαρο
(φωτογραφία από Εργαστήριο Συντήρησης Λίθου Τ.Ε.Ι. Αθήνας)

- Ρωγμές: προκύπτουν λόγω αστοχίας του υλικού κατά την τοποθέτηση του, από σεισμούς, από τη χημική εξαλλοίωση των φλεβών του, λόγω των συνεχόμενων κύκλων συστολής-διαστολής εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών [21].



Εικόνα 1.2.2.6: Μικρορηγματώσεις σε κεφάλι αγάλματος του Απόλλωνα
(Τουρκία, NemrudDag 2002, Γεωλογικό Ινστιτούτο Πανεπιστημίου του Aachen / B. Fitzner)

- Περικρυσταλλικές ρηγματώδεις: προκύπτουν στην μικρό-κλίμακα του υλικού, λόγω κόπωσης του λίθου από συνεχόμενους κύκλους συστολοδιαστολών, οι οποίες επιδεινώνονται από την όξινη προσβολή των αέριων ρυπαντών.

- Διάβρωση από μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από θερμοκρασιακές μεταβολές: Οι διαστολές και οι συστολές στα υλικά είναι φαινόμενα που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Αν η διάταξη των υλικών είναι τυχαία, μπορούν να δημιουργηθούν εσωτερικές τάσεις για συγκρουόμενες διαστολές ανάμεσα στα υλικά που έχουν αντίθετους προσανατολισμούς και διαφορετικούς συντελεστές διαστολής. Στην περίπτωση των μαρμάρων ο ασβεστίτης διαστέλλεται κατά τον κατακόρυφο άξονα των $z'z$. Οι δύο κρύσταλλοι του ασβεστίτη συμπλέκονται και προσανατολίζονται με τον ίδιο τρόπο κατά τον κατακόρυφο άξονα $z'z$ του κρυστάλλου. Με τις αυξήσεις της θερμοκρασίας διαστέλλονται ο ένας κόντρα στον άλλο, προκαλώντας εσωτερικές τάσεις στο πέτρινο υλικό. Στην κάθετη αυτή διεύθυνση δημιουργείται η τάση για απόσπαση ανάμεσα στους κρυστάλλους. Επομένως, εάν ένα μάρμαρο υποβληθεί σε επαναλαμβανόμενους θερμοκρασιακούς κύκλους, πολλές φορές τείνει να αλλοιωθεί από το εσωτερική απομείωση των κόκκων του ασβεστίτη.

Τα χονδρόκοκα υλικά τείνουν να αλλοιωθούν πιο γρήγορα από τα λεπτόκοκα στα οποία δημιουργούνται ρωγμές. Η ελάττωση των κόκκων σε μία πέτρα επιφέρει αύξηση της ειδικής επιφάνειας, η οποία ευνοεί τη χημικής της αλλοίωση. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας συμβαίνουν κύριως όταν η πέτρα υπόκειται σε συνεχή έκθεση στον ήλιο την ημέρα και ψύξη τη νύχτα. Η θερμότητα που μπορεί να συσσωρευτεί στην πέτρα εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να ανεβάσει την επιφανειακή της θερμοκρασία στους 50-60°C ή και περισσότερο σε περίπτωση που δεν υπάρχουν άνεμοι, ενώ παράλληλα το βράδυ η ψύξη μπορεί να μειώσει την θερμοκρασία της σχετικά πάντα με τις κλιματολογικές συνθήκες, ακόμα και κάτω από το μηδέν. Επειδή συμβαίνει οι πέτρες να είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας, το εξωτερικό τους ζεσταίνεται πολύ περισσότερο από το εσωτερικό, δημιουργώντας έτσι δυνάμεις εσωτερικής θραύσης, οι οποίες αν επαναληφθούν προκαλούν ξεφλουδίσματα και σπασίματα στο πέτρινο υλικό. Σοβαρό ρόλο επίσης διαδραματίζει η συχνότητα και η ταχύτητα των θερμοκρασιακών μεταβολών και όχι τόσο η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, μία ξαφνικής ραγδαία βροχή μπορεί ψύχοντας απότομα μία πέτρα, που έχει ζεσταθεί από τον ήλιο, να της προκαλέσει μικρορωγμές και απολεπίσεις

στην επιφάνεια. Οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται σε μία πέτρα εκτεθειμένη σε θερμοκρασιακές μεταβολές, που προκαλούν ανομοιομερείς εσωτερικές μετακινήσεις στη μάζα της πέτρας και έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και αποκολλήσεων τεμαχίων υλικού, εξαρτώνται από την μεταβολή της θερμοκρασίας, από το συντελεστή θερμικής διαστολής και από τον συντελεστή ελαστικότητας της πέτρας.

Πίνακας 1.2.2.1: Παράμετροι για την δημιουργία ρωγμών σε μάρμαρο λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

Παράμετροι για τη δημιουργία ρωγμών σε μάρμαρο
Μεταβολές της θερμοκρασίας
Συντελεστής θερμικής διαστολής του μαρμάρου
Συντελεστής ελαστικότητας του μαρμάρου

Για διαφορά θερμοκρασίας 30°C και για πέτρα μήκους ενός μέτρου που κινείται ελεύθερα, οι προβλεπόμενες κινήσεις είναι :

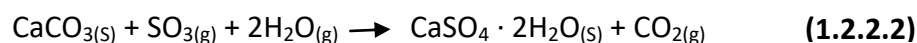
Μάρμαρο	0,15mm περίπου
Σκυρόδεμα	0,3-0,4mm περίπου
Σίδηρος	0,3mm περίπου
Γυαλί	0,3mm περίπου

β. Επιφανειακές κρούστες

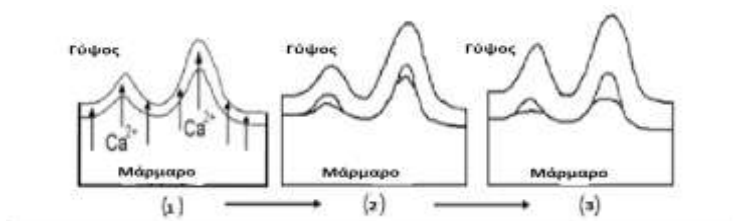
Πρόκειται για το φαινόμενο της επιφανειακής αλλοίωσης των υλικών και του σχηματισμού κρούστων με διαφορετική σύσταση, δηλαδή διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με το υπόστρωμα. Ο τύπος της κρούστας και η έκταση της διάβρωσης που αυτή συνεπάγεται εξαρτάται τόσο από ενδογενείς παράγοντες, δηλαδή τα διακριτά χαρακτηριστικά του λίθου (π.χ. χημική σύσταση, πορώδες, γεωμετρία επιφάνειας), όσο και από εξωγενείς παράγοντες στους οποίους εκτίθεται το υλικό, δηλαδή το κλίμα και το μικροκλίμα του αντικειμένου και την ατμόσφαιρα (π.χ. συγκεντρώσεις ρυπαντών, τύπος και χρόνος διαβροχής, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, pH βροχής). Οι βασικοί τύποι στους οποίους

διακρίνονται οι κρούστες που προσβάλλουν τα δομικά υλικά των επιφανειών των μνημείων είναι:

- Γυψοποίηση: Αναφέρεται στον σχηματισμό γύψου με προσβολή του ανθρακικού ασβεστίου των λίθων από θειικό οξύ. Συνδέεται κυρίως με την διαβρωτική δράση των ρύπων SO_x , που μετατρέπουν το ανθρακικό ασβέστιο των λίθων σε γύψο. Η συνεχής αποφλοιώση της φθαρμένης επιφάνειας αποκαλύπτει συνεχώς νέα επιφάνεια, που με τη σειρά της εκτίθεται στη γυψοποίηση και αποφλοιώση, με αποτέλεσμα την εξέλιξη του φαινομένου σε βάθος. Ο σχηματισμός του γύψου παρατηρείται κυρίως σε επιφάνειες που προστατεύονται από το νερό της βροχής. Η γυψοποίηση πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια:



Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πεντελικό μάρμαρο στο οποίο η διάλυση του στρώματος του γύψου στην επιφάνεια του απαλείφει τις ανάγλυφες λεπτομέρειες όπως για παράδειγμα έγινε από το πρόσωπο και τις πτυχές του χιτώνα των Καρυάτιδων.



Εικόνα 1.2.2.7: Σχηματική αναπαράσταση της γυψοποίησης επιφάνειας μαρμάρου και της εξάλειψης των λεπτομερειών της [20]



Εικόνα 1.2.2.8: Απομείωση λεπτομερειών αγάλματος από την όξινη βροχή

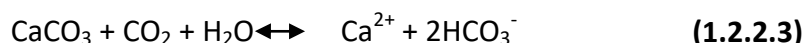
- Όξινη ανθρακική κρούστα: Στην περίπτωση αυτή έχουμε μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου σε όξινο ανθρακικό και με εξάτμιση του νερού σε ανακρυσταλλωμένο ανθρακικό ασβέστιο. Το καινούριο στρώμα που σχηματίζεται δε διαθέτει καλή συνοχή με το υποκείμενο ανθρακικό ασβέστιο. Ο μηχανισμός αυτός σε συνεργασία με τη βιολογική δραστηριότητα και την ανάπτυξη φυτών, μπορεί να προκαλέσει καταρρεύσεις σε τοιχοποιίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι περιοχές στα Μεσαιωνικά τείχη της Ρόδου όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.2.9.



Εικόνα 1.2.2.9: Τοίχος από την Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου.

- Αποπλυμένες επιφάνειες-Λευκές Κρούστες: Οφείλονται σε διαδοχική διάλυση του ασβεστίτη από την όξινη βροχή. Λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών

σχηματίζεται ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης με αποτέλεσμα την αποσύνθεση και απώλεια του αυθεντικού υλικού. Σε κρούστες αυτού του τύπου είναι πιθανή επίσης η ανίχνευση παρουσίας γύψου σε μικρές ή μεγάλες ποσότητες ανάλογα με το μερικό βαθμό προστασίας της επιφάνειας από τη βροχή. Η διάλυση των ασβεστόλιθων στο νερό αυξάνεται με την παρουσία του CO₂ σύμφωνα με την αντίδραση [20]:



- Τσιμεντιτικές κρούστες: Μια άλλη κατηγορία κρουστών που έχει παρατηρηθεί σε μνημεία που βρίσκονται σε βιομηχανικό περιβάλλον είναι οι τσιμεντιτικές ή αλκαλοπυριτικές. Οι κρούστες αυτές συνίστανται ένα στρώμα ένυδρων ενώσεων αργιλοπυριτικού ασβεστίου προερχόμενο από την επικάθηση και ακόλουθη ενυδάτωση αιωρούμενων σωματιδίων εργοστασιακής προέλευσης, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα ή η πυριτική παιπάλη. Περιμετρικά των κρουστών αυτών παρουσιάζονται συνήθως πολλές κοιλότητες και ρηγματώσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα μνημεία του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας [10,13, 21].



Εικόνα 1.2.2.10: Τσιμεντιτική κρούστα στον αρχαιολογικό χώρο Ελευσίνας

- Φαιοκάστανες κρούστες: Διαθέτουν πλούσια περιεκτικότητα σε οξειδία και υδροξειδία του σιδήρου (έντονη γκριζοκάστανη ή/και πορτοκαλοκάστανη χροιά).
- Φαιόμαυρες ή Μαύρες κρούστες: Αναπτύσσονται σε επιφάνειες του λίθου που προστατεύονται από το νερό και η σύνθεσή τους οφείλεται στην

αλληλεπίδραση μεταξύ της ρυπασμένης ατμόσφαιρας από διοξείδιο του θείου και της επιφάνειας του λίθου. Γενικά παρουσιάζουν υψηλή ευθραυστότητα και έντονο ανάγλυφο και έχουν πάχος από 100 μm έως μερικά mm. Ο σχηματισμός των μαύρων κρουστών συνδέεται με τον αποχρωματισμό και την ανάπτυξη μίας επικάλυψης με κόκκινη-καφέ έως καφέ-μαύρη απόχρωση [26]. Τα κύρια συστατικών των μαύρων κρουστών είναι ο γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ο ασβεστίτης (CaCO_3) και αργιλικά ορυκτά τα οποία προέρχονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις επικαθίσεις σκόνης, ενώ μπορεί να ανιχνεύονται και οργανικές ενώσεις σε μικρή συγκέντρωση [27]. Επίσης στις μαύρες κρούστες ενσωματώνονται σφαιρικά σωματίδια ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Τα σωματίδια αυτά περιέχουν πυρίτιο, αργίλιο, θείο, σίδηρο, τιτάνιο μόλυβδο, ψευδάργυρο, και μαγγάνιο και είναι συνδεδεμένα με την καύση πετρελαίου και άνθρακα [28]. Περιστασιακά ενδέχεται να περιέχονται στις μαύρες κρούστες και νιτρικά άλατα, τα οποία προκύπτουν από την αντίδραση των συστατικών του λίθου με το νιτρικό οξύ, που περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Τα νιτρικά άλατα μπορούν επίσης να προέρχονται από βιολογικές ή μεταβολικές δράσεις των πτηνών [28]. Το έντονο μαύρο χρώμα τους αποδίδεται στην παρουσία μαύρων ανθρακικών σωματιδίων τα οποία είναι προϊόντα καύσης. Επίσης στο σώμα των μαύρων κρουστών μπορούν να παρατηρηθούν μικρά λευκά σωματίδια, τα οποία κυρίως συνδέονται με την παρουσία κρυστάλλων γύψου και ανακρυσταλλωμένου ασβεστίτη [23].



Εικόνα 1.2.2.11: Μαύρη κρούστα σε μάρμαρο Carrara
(φωτογραφία από το Πανεπιστήμιο FedericoII της Νάπολης, Ιταλία)

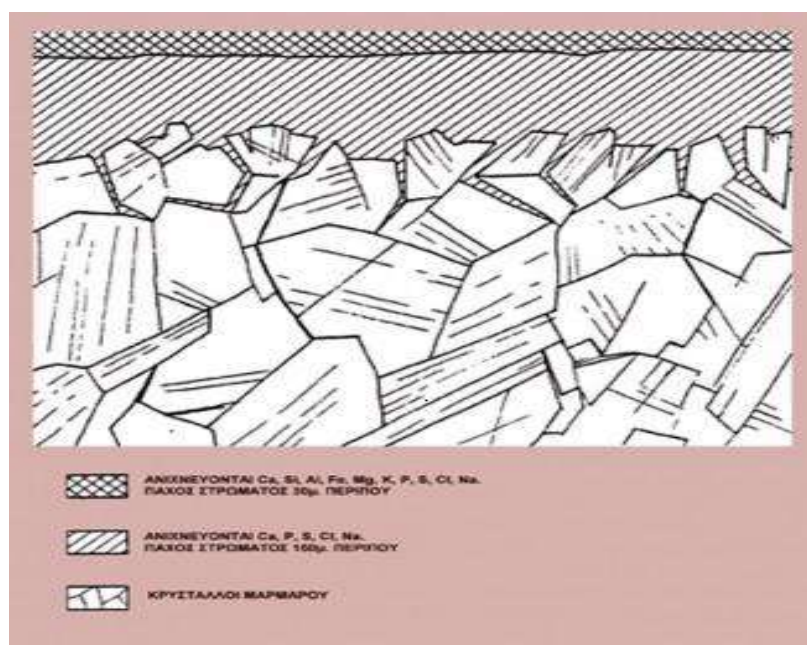
- Πάτινες: Μοιάζουν με ομοιογενείς και εκτεταμένες επικαλύψεις με χρωματικές διαβαθμίσεις μεταξύ του καφέ και του πορτοκαλί. Οι πάτινες εμφανίζονται σε προστατευμένες και αποπλυμένες επιφάνειες λίθου. Κυρίως αποτελούνται από οξαλικό ασβέστιο ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), πυριτικά και φωσφορικά άλατα σε μικρές ποσότητες. Τρεις βασικές υποθέσεις έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα σχετικά με την προέλευση της πάτινας:

(1) Σύμφωνα με τη «βιολογική» υπόθεση, το οξαλικό ασβέστιο προκύπτει από το οξαλικό οξύ, το οποίο εκκρίνεται από μικροοργανισμούς, όπως είναι οι λειχήνες που αποικούν στα μνημεία [29].

(2) Η «χημική» υπόθεση θεωρεί ότι τα οξαλικά οξέα είναι προϊόντα μετασχηματισμού από παλαιότερες επεμβάσεις για την προστασία ή το γυάλισμα της επιφάνειας του μνημείου, όπου είχαν χρησιμοποιηθεί οργανικά υποστρώματα, όπως λάδι, κερί, μονοδικαρβοξυλικό οξύ, αυγό [29-34].

(3) Επιπλέον οι πάτινες συχνά αποδίδονται σε αλληλεπίδραση του λίθου με ατμοσφαιρικούς παράγοντες και σωματίδια σκόνης [31].

Σε περίπτωση που η πάτινα προσδιορισθεί ότι προέρχεται από την αρχική κατεργασία του μαρμάρου, θεωρείται αυθεντικό υλικό και δρα ως προστατευτική και θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να διατηρείται.



Εικόνα 1.2.2.12: Προστατευτική Πάτινα (Κέντρο Λίθου)

Οι χρυσές πάτινες/πάτινες στο χρώμα της σκουριάς προκύπτουν από τη διάχυση ιόντων σιδήρου του μαρμάρου από το εσωτερικό προς την εξωτερική του επιφάνεια. Η εμφανιζόμενη έντονη πορτοκαλοκάστανη χροιά οφείλεται στην οξείδωσή τους.

γ. Επικαθίσεις στην επιφάνεια του μαρμάρου

- Μαύρες επικαθίσεις (black depositions): Πρόκειται για αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα συνήθως αργιλοπυριτικής σύστασης, έντονου μαύρου χρώματος λόγω της προσρόφησης σωματιδίων αιθάλης και υδρογονάνθρακες. Οι επικαθίσεις αυτές μπορεί να εμπεριέχονται ή/και να επικαλύπτουν χαλαρά συνδεδεμένες και συμπαγείς περιοχές κρουστών.

- Επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης (dust fall): Πρόκειται για αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα κυρίως αργιλοπυριτικής σύστασης.

- **δ. Φθορά προερχόμενη από προηγούμενες ασύμβατες επεμβάσεις:**

Η εφαρμογή ακατάλληλων υλικών στα πλαίσια προηγούμενων επεμβάσεων έχει σαν αποτέλεσμα την επιβάρυνση των δομικών υλικών και επιτάχυνση της φθοράς τους η οποία εκδηλώνεται στη διεπιφάνεια των δυο υλικών και επεκτείνεται προς το πιο ευπαθές όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.2.13. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ακατάλληλων επεμβάσεων αποτελούν τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης, προσανατολισμένα χαράγματα από την χρήση σκληρών βουρτσών σε καθαρισμούς [30].



Εικόνα 1.2.2.13: Η αντικατάσταση λίθων οδήγησε στην επιτάχυνση φθοράς των παλαιότερων λίθων στο Κολλέγιο της Οξφόρδης [34]

ε. Βιολογική φθορά

Στα μνημεία συναντάμε ένα πλήθος μικροοργανισμών και ανώτερων φυτών που επιφέρουν φυσικοχημική διάβρωση και μηχανική καταπόνηση στα δομικά υλικά με ποικίλους τρόπους (αισθητική υποβάθμιση, χρωματική αλλοίωση, μηχανικές τάσεις, διαφοροποίηση μικροδομής του λίθου, επιτάχυνση της δράσης των ατμοσφαιρικών ρυπαντών)[35-40]. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που σχετίζονται με την ανάπτυξη βιολογικής φθοράς είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, οι άνεμοι, η ηλιοφάνεια, το pH του εδάφους και τα συστατικά του, καθώς και η ρύπανση της περιοχής [41,42].

Κεφάλαιο 2: Θερμικά Μοντέλα Προσομοίωσης και Μεταφορά Θερμότητας

2.1 Θερμικά Μοντέλα Προσομοίωσης

Γενικά τα θερμικά μοντέλα προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί κυρίως στον οικοδομικό τομέα όσο αφορά την προσομοίωση και την αποτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Ο οικοδομικός τομέας είναι υπεύθυνος για το μεγαλύτερο μερίδιο χρήσης ενέργειας και είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο μερίδιο του τομέα των μεταφορών ή της βιομηχανίας. Τα κτήρια είναι υπεύθυνα για παραπάνω από το 40% της τελικής ενεργειακής απαίτησης στις πιο ανεπτυγμένες χώρες και ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό αναμένεται σε πολλές αναπτυσσόμενες οικονομίες. Σε ένα τέτοιο σενάριο, μπορούν να ειπωθούν ως ένα στοιχείο κλειδί για την αναγκαία μετάβαση προς την βιωσιμότητα.

Ένα κτιριακό κέλυφος είναι εκτεθειμένο στις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως είναι η θερμοκρασία (ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα), η ταχύτητα του ανέμου (μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής) και το ποσοστό υγρασίας στον αέρα. Σημαντικό ρόλο στην θερμική απόδοση ενός κτιρίου (γενικότερα και ενός ιστορικού κτιρίου ή μνημείου ειδικότερα) έχουν και οι θερμικές ιδιότητες των δομικών του υλικών. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες ενός υλικού είναι: η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα. Οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού γενικά εξαρτώνται από τη χημική και ορυκτολογική σύστασή του αλλά και από την μικροδομή του, δηλαδή το πορώδες, και την κατανομή του μεγέθους των πόρων του[43].

Πίνακας 2.1.1: Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική απόδοση ενός κτιρίου



Υλικά με διαφορετική χημική σύσταση και μικροδομή έχουν διαφορετική συμπεριφορά στις εξωτερικές συνθήκες. Είναι πολύ σημαντική η συσχέτιση της μικροδομής των υλικών με τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που καθορίζουν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου. Διαφορετικοί τρόποι μεταφοράς θερμότητας επηρεάζουν διαφορετικά τα υλικά ανάλογα με την μικροδομή τους. Η μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία συνιστά πολύ σημαντικό ρόλο σε υλικά πολύ χαμηλής πυκνότητας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας μέσω της επαφής είναι αμελητέο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος. Στη συγκεκριμένη εργασία το μνημείο είναι από ένα υλικό, πεντελικό μάρμαρο και μάρμαρο Διονύσου, οπότε είναι πιο εύκολη η μελέτη της μικροδομής. Σε μνημεία με περισσότερα υλικά γίνεται πιο περίπλοκη η κατασκευή θερμικού μοντέλου.

Πέρα από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού, οι υπόλοιπες ιδιότητες του κτιριακού κελύφους είναι ένας κομβικός παράγοντας στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Τα οφέλη από την ηλιακή ενέργεια, οι διαρροές αέρα, ο έλεγχος της υγρασίας και οι θερμικές απώλειες επηρεάζονται από τον σχεδιασμό και την κατασκευή του κτιριακού κελύφους. Ο τύπος του κτιριακού κελύφους επηρεάζει το μέγεθος και τους τύπους των μηχανικών συστημάτων που χρειάζονται για να προσφέρουν θέρμανση και ψύξη. Από όλα τα μέρη του το πιο σημαντικό είναι ο σχεδιασμός των παραθύρων.

Η μεταφορά ενέργειας μέσω των συστατικών μερών του κτηρίου είναι περίπλοκη και δυναμική. Ο προσανατολισμός και η ένταση της θερμικής ροής επηρεάζονται από τα ηλιακά κέρδη, από την εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία και την εκτιθέμενη εξωτερική επιφάνεια. Τα μέρη του κτηριακού κελύφους έχουν τρία σημαντικά χαρακτηριστικά: U-Factor, η θερμική αντίσταση και η θερμική τους μάζα ή η ικανότητα τους να αποθηκεύσουν θερμότητα, μετρημένη ως θερμική ικανότητα (HC) και οι συνθήκες εξωτερικής επιφάνειας, (για παράδειγμα, αν τα ανοιχτά χρώματα αντανακλούν ή τα σκοτεινά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία).

U-Factor

Ο U-Factor είναι ο ρυθμός της σταθερής θερμικής ροής. Αποτελεί την ποσότητα της θερμοκρασίας σε βρετανικές θερμικές μονάδες (Btu) που ρέει κάθε ώρα σε 1ft^2 της επιφάνειας όταν η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό αέρα είναι 1°F . Η μόνωση και τα άλλα οικοδομικά υλικά επηρεάζουν τη ροή θερμότητας ισότιμα και στις δύο κατευθύνσεις, αλλά κάποια στοιχεία της κατασκευής, όπως τα φράγματα ακτινοβολίας μπορεί να μειώσουν την ροή θερμότητας που εισέρχεται στο κτήριο παρόλα αυτά μπορεί να έχουν μικρό αντίκτυπο στην θερμότητα που εξέρχεται από αυτό.

Οι συνθήκες σταθερής ροής προϋποθέτουν ότι οι θερμοκρασίες και στις δύο πλευρές του κτηριακού κελύφους (παρότι διαφορετικές) παραμένουν σταθερές για μια επαρκή περίοδο, ώστε η θερμότητα που εξέρχεται από την μια πλευρά είναι ίση με εκείνη που εισέρχεται από την άλλη πλευρά. Οι συνθήκες σταθερής ροής είναι μια παραδοχή διότι στη πραγματικότητα οι θερμοκρασίες αλλάζουν συνεχώς. Παρόλα αυτά, **ο U-Factor μπορεί να προβλέψει το μέσο ποσοστό ροής θερμότητας σε σχέση με τον χρόνο** και συχνά χρησιμοποιείται για να εξηγήσει την θερμική απόδοση των κτηρίων.

Λόγω της ευκολίας στην κατανόηση και στη χρήση, οι όροι για την σταθερή κατάσταση μεταφοράς θερμότητας είναι μέρος του βασικού λεξιλογίου της ενεργειακής απόδοσης κτηρίου.

Οι περισσότεροι τοίχοι δεν είναι ομογενείς: συχνά υπάρχουν ξύλινα, μεταλλικά ή πλαίσια από σκυρόδεμα που μπορεί να εισχωρούν στη μόνωση και να δημιουργούν θερμικές γέφυρες. Ιδιαίτερα, αν οι γέφυρες είναι μεταλλικές, έχουν μια σημαντική επίδραση στην ενεργειακή απόδοση όλου του κτηρίου, μερικές φορές μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της μόνωσης πάνω από 50%. Για κατασκευές με ελαφρά πλαίσια τοίχων, ο U-Factor παρέχει μία επαρκή περιγραφή για την μεταφορά θερμότητας. Για τοιχοποιίες όμως, ή για κατασκευές από σκυρόδεμα, ο U-Factor έχει νόημα για σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες. Οι δυναμικές ιδιότητες αποθήκευσης θερμότητας του σκυροδέματος και της τοιχοποιίας αλλάζουν την θερμική συμπεριφορά του κτηρίου και ο U-Factor μετατρέπεται σε ένα λιγότερο ακριβές εργαλείο για την πρόβλεψη της ροής θερμότητας.

R-Values

Οι R-Values είναι ένα ακόμη εργαλείο για την περιγραφή της ροής θερμότητας σε σταθερές συνθήκες αλλά με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Ενώ ο U-Factor αναφέρεται στο σύνολο της κτηριακής κατασκευής, η R-Value είναι μια ιδιότητα του υλικού, όπως η πυκνότητα, η αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα. Μία μεγαλύτερη τιμή R-Value έχει μεγαλύτερη θερμική αντίσταση ή μεγαλύτερο δυναμικό μόνωσης από ότι μια μικρότερη τιμή. Είναι ευρέως αναγνωρισμένες στην οικοδομική βιομηχανία και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την αποδοτικότητα μιας μόνωσης. Όμως οι R-Values της μόνωσης δεν περιγράφει την ολοκληρωμένη απόδοση της αλλά την θερμική αντίσταση του υλικού της μόνωσης.

Η τιμή της R-Value των υλικών εξαρτάται επίσης από την θερμοκρασία. Ο κύριος λόγος εξάρτησης από την θερμοκρασία είναι ότι τα περισσότερα προϊόντα μόνωσης αποτελούνται από παγιδευμένο αέρα, και ενώ ο αέρας είναι καλό υλικό μόνωσης, οι θερμικές του ιδιότητες αλλάζουν ανάλογα με την θερμοκρασία.

Θερμική Μάζα

Η μάζα είναι ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει την θερμική απόδοση ενός οικοδομικού συνόλου. Οι βαριοί τοίχοι, σκεπές και πατώματα έχουν μεγαλύτερη θερμική μάζα από ότι οι ελαφρύτεροι. Η θερμική μάζα καθυστερεί και μετριάζει τη ροή θερμότητας. Η χρονική υστέρηση ανάμεσα στο μέγιστο της εξωτερικής θερμοκρασίας και στην εσωτερική μεταφορά θερμοκρασίας κυμαίνεται μεταξύ 4-12 ωρών ανάλογα με την θερμική ικανότητα της κατασκευής και άλλα χαρακτηριστικά. Η επίπτωση της θερμικής μάζας είναι μεγαλύτερη σε κλίμακα όπου υπάρχει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη μέρα και την νύχτα (όπως στα βουνά και στα ερημικά κλίματα). Η θερμική μάζα έχει μικρότερο ρόλο όταν οι εξωτερικές συνθήκες είναι σταθερά ζεστές ή ψυχρές.

HC

Το HC είναι το μετρικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της θερμικής μάζας. Το HC είναι η ποσότητα θερμότητας σε Btu που πρέπει να προστεθεί σε 1 ft² μιας επιφάνειας για να αυξήσει ομοιόμορφα τη θερμοκρασία της

κατασκευής κατά 1°F. Οι μονάδες είναι Btu/ft²×°F. Το HC είναι το ποσό της θερμικής ικανότητας σε κάθε ξεχωριστή στρώση στον τοίχο. Η θερμική ικανότητα της κάθε στρώσης είναι η πυκνότητα του υλικού επί την σκληρότητα επί την ειδική θερμότητα. Η μεταφορά θερμότητας επίσης επηρεάζεται από την ανάκλαση και την εκπομπή της εξωτερικής επιφάνειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις οροφές.

Εργαλεία σχεδιασμού

Η θερμική συμπεριφορά μιας κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί με πολλούς τρόπους. Η κατάλληλη μέθοδος εξαρτάται από τον τύπο και την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Οι βασικές μέθοδοι υπολογισμού περιλαμβάνουν:

- Σειριακή Μέθοδος Υπολογισμού: είναι ο πιο εύκολος τρόπος να υπολογιστεί ο U-Factor, αλλά η εφαρμογή της περιορίζεται σε κατασκευές που δεν έχουν πλαίσιο και είναι από ομογενή υλικά
- Μέθοδος Υπολογισμού Παράλληλης Διαδρομής: μια απλή επέκταση της σειριακής μεθόδου και μπορεί να χρησιμοποιεί για σύνολα με ξύλινα πλαίσια. Μπορεί να υπολογιστεί ο U-Factor μέσω του συμπαγούς ξύλου και την μεμονωμένη κοιλότητα και να εξαχθεί ο σταθμισμένος μέσος όρος.
- Μέθοδος του Πραγματικού R-Value (ισόθερμα επίπεδα): χρησιμοποιεί αρχές παρόμοιες με την σειριακή μέθοδο και τη μέθοδο παράλληλης διαδρομής, είναι δε κατάλληλη για κατασκευές όπως τοιχοποιίες με σκυρόδεμα και τοίχους/οροφές με μεταλλικά πλαίσια όπου υλικά μεγάλης αγωγιμότητας χρησιμοποιούνται στη σύνδεση με μονωμένες ή κενές κοιλότητες.
- Μέθοδος Υπολογισμού 2 διαστάσεων: μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί ο U-Factor μιας σύνθετης κατασκευής. Υπολογίζοντας την μεταφορά θερμότητας σε 2 διαστάσεις. Χρειάζονται ανώτερα μαθηματικά και χρειάζεται υπολογιστής.
- Testing: είναι ο πιο ακριβής τρόπος για να καθοριστεί ο U-Factor για όλους τους τύπους κατασκευών. Αλλά είναι ακριβό και χρονοβόρο γιατί υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε πιθανές κατασκευές και δεν είναι πρακτικό να εξετάζονται όλα τα ενδεχόμενα. Συχνά, το testing χρησιμοποιείται για

γενικές κατασκευές και υπολογισμοί χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν αυτά τα αποτελέσματα για άλλες κατασκευές[42].

2.2 Μεταφορά θερμότητας

Η θερμότητα είναι ενέργεια. Ο όρος θερμότητα χρησιμοποιείται για να περιγραφούν διεργασίες ή δυναμικά για ανταλλαγή ενέργειας. Η μεταφορά θερμότητας (heat transfer) ασχολείται με τη μελέτη των μηχανισμών μέσω των οποίων σώματα ανταλλάσσουν ενέργεια. Στόχος αυτής της μελέτης είναι η πρόβλεψη του ρυθμού και της παραγωγικότητας αυτής της διεργασίας. Η μεταφορά θερμότητας διαφέρει από τη θερμοδυναμική. Η μεταφορά θερμότητας μελετά συστήματα τα οποία δεν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας ενώ η θερμοδυναμική ασχολείται με συστήματα σε κατάσταση ισορροπίας.

Η μετάδοση θερμότητας είναι ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο οι περιβαλλοντικές μεταβολές εκδηλώνονται στο εσωτερικό των κτηρίων. Η αγωγή της θερμότητας από το περίβλημα ενός κτηρίου, η άμεση μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα παράθυρα, αλλά και η απορρόφηση αυτής της ακτινοβολίας από τα εκτεθειμένα στοιχεία ενός κτηρίου (τοιχοί, οροφή) και, τέλος, ή αίσθηση ψύχους των χρηστών ενός κτηρίου, λόγω της έντονης κυκλοφορίας του αέρα, είναι παραδείγματα του πως η μεταφορά θερμότητας επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά των κτηρίων και τους χρήστες τους. Οι βασικές αρχές της μετάδοσης θερμότητας απαιτούνται για να αναλύσει κάποιος και να προβλέψει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, τη θερμική απόδοση κτηριακών εγκαταστάσεων, καθώς και την απόδοση του αντίστοιχου εξοπλισμού. Η μεταφορά θερμότητας είναι η επιστήμη και η τέχνη της πρόβλεψης του ρυθμού με τον οποίο η θερμότητα ρέει μέσα από διάφορα υλικά, κάτω από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες που οφείλονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι νόμοι της μετάδοσης θερμότητας μας δίδουν το ρυθμό με τον οποίο η θερμική ενέργεια πρέπει να παρέχεται ή να αφαιρείται από ένα κτήριο, προκειμένου να διατηρηθεί η άνεση των χρηστών του ή/και για την κάλυψη άλλων θερμικών αναγκών του κτηρίου.

Πίνακας 2.2.1: Μεγέθη της μεταφοράς θερμότητας

Ποσότητα	Έννοια	Σύμβολο	Μονάδες
Θερμική ενέργεια(thermal energy)	Ενέργεια η οποία συσχετίζεται με την μικροσκοπική συμπεριφορά της ύλης	U ή u ή E	J ή J/Kg
Θερμοκρασία (temperature)	Ένας τρόπος για έμμεσο προσδιορισμό της θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην ύλη	T	K ή °C
Μεταφορά θερμότητας (heat transfer)	Μεταφορά θερμικής ενέργειας λόγω βαθμίδων θερμοκρασίας		
Θερμότητα (heat)	Ποσότητα θερμικής ενέργειας η οποία μεταφέρεται κατά την διάρκεια χρόνου $\Delta t > 0$	Q ή q	J
Ρυθμός θερμότητας (heat rate)	Μεταφορά θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου	Q ή q	W
Ροή θερμότητας (heat flux)	Μεταφορά θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και εμβαδό επιφανείας	q''	W/m ²

Η θερμότητα μεταφέρεται με τρεις μηχανισμούς:

- **Αγωγή (conduction):** ανταλλαγή ενέργειας μέσω ενός στερεού σώματος ή διαμέσου σωμάτων τα οποία βρίσκονται σε επαφή από το σημείο επαφής.
- **Συναγωγή (convection):** μεταφορά ενέργειας μέσω της κίνησης ενός ρευστού μέσω της επαφής του ρευστού και των άλλων σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή.
- **Ακτινοβολία (radiation):** ανταλλαγή ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και απορρόφησης.

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής περιγράφεται από το νόμο του Fourier. Η γενική του μορφή είναι η ακόλουθη:

$$\vec{q}'' = -k \vec{\nabla} T$$

Ροή θερμότητας
 W/m^2
Θερμική αγωγιμότητα
 W/mK
Βαθμίδα θερμοκρασίας
 $^{\circ}C/m$ ή K/m

(2.2.1)

Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το υλικό και αλλάζει με τη θερμοκρασία. Στα ρευστά η αγωγή οφείλεται στην άτακτη κίνηση των σωματιδίων των ρευστών. Τα σωματίδια τα οποία περνούν το σύνορο μεταξύ των δύο ρευστών μεταφέρουν ενέργεια ανάλογη με τη θερμοκρασία του υγρού οπότε έχουμε αγωγή ενέργειας από το ένα υγρό στο άλλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η άτακτη κίνηση των σωματιδίων αυξάνεται συνεπώς αυξάνεται και ο ρυθμός αγωγής.

Τα στερεά έχουν δύο μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας:

- Μετανάστευση ελεύθερων ηλεκτρονίων

Η ροή ηλεκτρονίων είναι παρόμοια με την αγωγή λόγω άτακτης κίνησης σωματιδίων στα αέρια. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ανάλογος με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού οπότε όσο πιο καλός αγωγός είναι ένα υλικό τόσο καλύτερο είναι ως αγωγός θερμότητας.

- Ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος

Οι ταλαντώσεις των πλεγμάτων σχετίζεται με τις δονήσεις των ατόμων και των μορίων της δομής των στερεών. Με απλά λόγια αν δονηθεί η μία πλευρά ενός κρυστάλλου, η άλλη μεριά θα αντιδράσει ανάλογα.

Η πειραματική μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας (k) είναι πολύ δύσκολη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας για κάποια υλικά σε θερμοκρασία δωματίου[44].

Πίνακας 2.2.2: Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου

Υλικό	κ (W/m ⁰ K)
Διαμάντι	2300
Χαλκός	401
Σίδηρος	80
Νερό	0.613
Ίνες γυαλιού	0.043
Αέρας	0.026

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει ψυχρός αέρας σε επαφή με μια επίπεδη επιφάνεια. Αν ο αέρας δεν κινείται, τότε ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η αγωγή. Αν όμως ο αέρας κινείται τότε υπάρχει σημαντική αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.



Εικόνα 2.2.1 : Διεπιφάνεια σώματος-αέρα

Η βασική εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής είναι ο νόμος της ψύξης του Νεύτωνα.

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty)$$

- h [W/m²K] είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (convection heat transfer coefficient).

(2.2.2)

Διακρίνονται πέντε μορφές συναγωγής:

- **Εξαναγκασμένη συναγωγή (forced convection):** μια εξωτερική πηγή ευθύνεται για την κίνηση του υγρού κατά μήκος της επιφάνειας.
- **Φυσική ή ελεύθερη συναγωγή (natural or free convection):** οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές πυκνότητας του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο ρευστό.

- **Μικτή συναγωγή (mixed convection):** παρουσία φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής.
- **Βρασμός και συμπύκνωση:** σε αυτές τις δύο περιπτώσεις υπάρχει αλλαγή φάσης του ρευστού και αυξημένη μεταφορά θερμότητας.[45]

Πίνακας 2.2.3: Τυπικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (h)

Είδος συναγωγής	h (W/m ² / K)
Ελεύθερη συναγωγή αερίων	2-25
Ελεύθερη συναγωγή υγρών	10-1000
Εξαναγκασμένη συναγωγή αερίων	25-250
Εξαναγκασμένη συναγωγή υγρών	50-20.000
Βρασμός και συμπύκνωση	2.500-100.000

Ο συντελεστής συναγωγής h_c είναι ένα συνολικό μέγεθος, δηλαδή περιγράφει συνολικά το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός ρευστού που είναι σε επαφή μ' αυτήν. Στην πραγματικότητα ο h_c έχει διαφορετικές τιμές στα διάφορα σημεία μιας επιφάνειας, οι οποίες εξαρτώνται από τη γεωμετρία και την ομαλότητα της επιφάνειας, από την ταχύτητα και το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης), αλλά και από άλλες φυσικές ιδιότητες του ρευστού, όπως η πίεση, η θερμοκρασία το ιξώδες κλπ. Για την περίπτωση των κτηρίων, ενδιαφέρει ως ρευστό ο αέρας (σε ατμοσφαιρική πίεση), στο χώρο και στο περιβάλλον. Στα κτήρια συναντώνται συνήθως οριζόντιες και κατακόρυφες επιφάνειες και έτσι ο συντελεστής h_c είναι συνάρτηση των παρακάτω παραγόντων.

α. Ταχύτητα του αέρα : Αέρας θερμοκρασίας θ_a , ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με επιφάνεια θερμοκρασίας θ_e . Δεδομένου ότι ο ψυχρός αέρας είναι βαρύτερος από το θερμό, προκύπτει πάντα μια κίνηση του αέρα ανοδική ή καθοδική και μιλάμε τότε για φυσική (ή ελεύθερη) κυκλοφορία του αέρα, που είναι και ο βασικός τρόπος μεταφοράς θερμότητας από και προς τις εσωτερικές επιφάνειες των κτηρίων. Βέβαια η κίνηση του αέρα μπορεί να οφείλεται και σε διάφορα άλλα φαινόμενα

όπως, αερισμός των χώρων, διείσδυση αέρα από χαραμάδες, άνοιγμα παραθύρων, μετακίνηση ατόμων κλπ.

β. Προσανατολισμός της επιφάνειας και της κατεύθυνσης ροής της θερμότητας. Εάν η επιφάνεια είναι οριζόντια και το θερμό στοιχείο είναι πάνω από ψυχρό, όπως π.χ. δάπεδο πάνω από υπόγειο μη θερμαινόμενο χώρο το χειμώνα ή η περίπτωση θερμαινόμενης οροφής, τότε η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι μικρή. Έτσι αν πρόκειται για ψυχρό δάπεδο, ο αέρας που ψύχεται σε επαφή με αυτό, (ροή θερμότητας προς τα κάτω) «βαραίνει» και παραμένει ακινητοποιημένος στο δάπεδο. Εάν πάλι υπάρχει θερμαινόμενη οροφή, (ροή θερμότητας προς τα κάτω) ο αέρας θερμαινόμενος γίνεται ελαφρύτερος και ακινητοποιείται προς την οροφή. Στην περίπτωση που το θερμό στοιχείο είναι κάτω από το ψυχρό, όπως π.χ. σε θερμαινόμενο δάπεδο, (ροή θερμότητας προς τα πάνω) τότε η θερμική μεταφορά είναι μεγάλη. Επίσης, στην περίπτωση οροφής μέσα σε θερμαινόμενο χώρο, ο θερμός αέρας ερχόμενος σε επαφή με την ψυχρότερη οροφή (ροή θερμότητας προς τα πάνω) «βαραίνει» και κινείται ελεύθερα προς τα κάτω. Αντικαθίσταται επομένως με θερμό αέρα και έτσι δημιουργείται έντονη κίνηση του αέρα, άρα αυξημένη συναγωγή. Στις κατακόρυφες επιφάνειες η κατεύθυνση της ροής της θερμότητας δεν έχει σημαντικό ρόλο για τον υπολογισμό του h , ενώ η μεταβολή του συντελεστή με την ταχύτητα του αέρα μπορεί να εκτιμηθεί με τη βοήθεια σχετικών διαγραμμάτων.

Για την εκτίμηση του συντελεστή h πολλά πρότυπα εγχειρίδια μετάδοσης θερμότητας δίνουν μια σειρά από «εμπειρικές» σχέσεις, που προέκυψαν από τη χρήση πειραματικών δεδομένων, σε συνδυασμό με αναλυτικούς υπολογισμούς. Στις σχέσεις αυτές γίνεται χρήση αδιάστατων αριθμών, όπως του Reynolds (για εξαναγκασμένη συναγωγή) ή του Grashof (φυσική συναγωγή), Prandtl και Nusselt[46].

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρονικής ακτινοβολίας (δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού

μέσου για τη μεταφορά). Η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας περιλαμβάνει απορρόφηση ακτινοβολίας από τον περιβάλλοντα χώρο καθώς και συναγωγή.

Η ισχύς της ακτινοβολουμένης ενέργειας, εξαρτάται από:

- **Τη θερμοκρασία** του σώματος. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της ακτινοβολουμένης ενέργειας.
- **Το εμβαδόν** της επιφάνειας του σώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνειά του σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ισχύς της ακτινοβολουμένης ενέργειας.
- **Την υφή της επιφάνειας**. Οι τραχιές επιφάνειες εκπέμπουν θερμότητα με ακτινοβολία εντονότερα από τις λείες.
- **Το χρώμα της επιφάνειας** του σώματος. Οι σκουρόχρωμες επιφάνειες εκπέμπουν θερμότητα με ακτινοβολία εντονότερα από τις ανοιχτόχρωμες.

Από τους ίδιους παράγοντες και ακριβώς με τον ίδιο τρόπο εξαρτάται και η ισχύς της ενέργειας που απορροφάται από ένα σώμα [47].

Υπολογισμός Μεταφοράς Θερμότητας

Η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας είναι μια προσέγγιση βασισμένη στη γενική εξίσωση θερμικής αγωγής η οποία ανάγεται από τον Νόμο του Fourier και την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Ειδικότερα, όσον αφορά τη ροή θερμότητας διαμέσου του κτηριακού κελύφους μπορεί η γενική εξίσωση να απλοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη μονοδιάστατη μορφή της και υποθέτοντας μια κατεύθυνση διάδοσης. Όλα τα προηγούμενα οδηγούν στην έκφραση:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\lambda}{\rho \times c} \times \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (2.2.3)$$

Ο όρος $\frac{\lambda}{\rho \times c}$ αντιπροσωπεύει την λεγόμενη θερμική διαχυτικότητα και είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας αφού είναι άμεσα συνδεδεμένο με ένα συνολικό ποσό μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με την αποθηκευμένη ενέργεια μέσα στο σύστημα. Η εξίσωση (3.2.0) είναι μία μερική διαφορική εξίσωση, οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούνται για την απόκτηση μίας ακριβούς λύσης. Σε κάθε περίπτωση, θεωρούνται συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Ανάμεσα σε όλες τις προσεγγίσεις, η

πιο κοινή μεθοδολογία που υιοθετείται είναι ο υπολογισμός σταθερής συνθήκης όπου οι παροδικές επιδράσεις της διάδοσης θερμικής ροής δε λαμβάνονται υπόψη. Η εξίσωση (2.2.0) μπορεί να απλοποιηθεί στη σταθερή μορφή της με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν σταθερά οι επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό και στο εξωτερικό[69].

Μεταφορά θερμότητας στα στερεά:

Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στα στερεά χρησιμοποιείται εκδοχή της εξίσωσης θερμότητας που ακολουθεί :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (2.2.4, 2.2.5)$$

Με τις ακόλουθες ιδιότητες:

Πίνακας 2.2.4: Σύμβολα, μονάδες και μεγέθη των εξισώσεων μεταφοράς ενέργειας στα στερεά

Συμβολισμοί	Μονάδες	Μεγέθη
ρ	kg/m^3	Πυκνότητα του στερεού
C_p	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερή πίεση
k	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Θερμική αγωγιμότητα του υλικού
U	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Ταχύτητα ροής θερμότητας
Q	W/m^3	Πηγή θερμότητας

Σε αυτή τη φάση του προβλήματος η παραπάνω γενική εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

- Απλοποιείται ο πρώτος όρος γιατί δεν μελετάται σε αυτή τη φάση η αλλαγή θερμοκρασίας με βάση το χρόνο
- Ως πηγή θερμότητας εισάγεται ξεχωριστά και η θερμοελαστική απόσβεση (Q_{ted})

Η οποία ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{\text{ted}} = -\alpha T \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.2.6)$$

Όπου,

S , ο δεύτερος Piola-Kirchhoff τανυστής

α , ο συντελεστής θερμικής διαστολής

Εξωτερική πηγή ακτινοβολίας

Η κάθε εξωτερική πηγή ακτινοβολίας συμβάλει στην προσπίπτουσα ροή θερμότητας από ακτινοβολία σε όλη τη φασματική ζώνη. Η συμβολή της πηγής $G_{\text{ext}, Bi}$ ισούται με το προϊόν του παράγοντα θέασης (view factor) επί την αντανάκλαση της πηγής.

$$G_{\text{ext}, Bi} = F_{\text{ext}, Bi} P_{s, Bi} \quad (2.2.7)$$

Για πηγές ακτινοβολίας οι οποίες βρίσκονται σταθερές σε ένα σημείο χρησιμοποιείται η έκφραση $G_{\text{ext}, Bi} = F_{\text{ext}, Bi} P_{s, Bi}$. Ενώ για κατευθυντικές πηγές ακτινοβολίας όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ο τύπος:

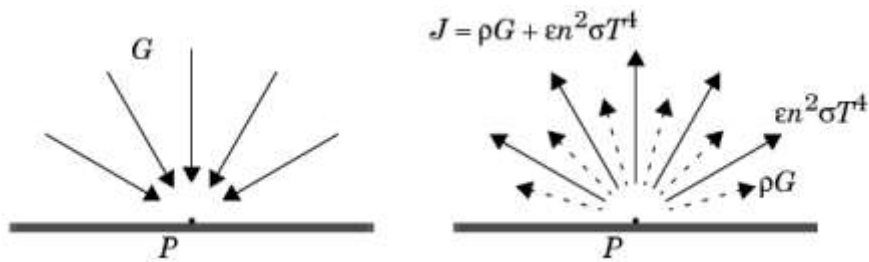
$$G_{\text{ext}, Bi} = F_{\text{ext}, Bi} q_{0, s} \quad (2.2.8)$$

Ως πηγή ακτινοβολίας στη συγκεκριμένη εργασία ορίζεται η ηλιακή ακτινοβολία. Η θέση του ήλιου σε σχέση με το αντικείμενο προς μελέτη υπολογίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος και μήκος) και τη ζώνη ώρας καθώς και την ημερομηνία αλλά και την ώρα. Επίσης, συμπληρώνεται από το χρήστη η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, I_s (W/m^2). Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αντιπροσωπεύει τη ροή θερμότητας που μια επιφάνεια από τον ήλιο αν είναι κάθετη στις ακτίνες. Όταν η επιφάνεια μελέτης δεν είναι κάθετη στις ακτίνες του ήλιου τότε η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης. Η τιμή που εισάγεται στην προσομοίωση λαμβάνεται από πίνακες μετεωρολογικών δεδομένων.

Η θερμοκρασία στη βάση του κίονα εισάγεται στο πρόγραμμα από το χρήστη και μετράται στην επιφάνεια απευθείας με θερμοστοιχεία.

1. Ροή θερμότητας με ακτινοβολία

Στην παρακάτω εικόνα, ας υποθέσουμε ότι ένα σημείο P που υπάρχει στην επιφάνεια έχει το συντελεστή εκπομπής ϵ , το συντελεστή ανάκλασης ρ , και την απορροφητικότητα α , το συντελεστή διάθλασης n και τη θερμοκρασία T . Το σώμα θεωρείται αδιαφανές, δηλαδή δεν διέρχεται ακτινοβολία διαμέσου του σώματος. Η παραπάνω συνθήκη ισχύει για τα περισσότερα στερεά σώματα.



Εικόνα 2.2.2: Εισερχόμενη ακτινοβολία (αριστερά), εξερχόμενη ακτινοβολία (δεξιά).

Η συνολική εισερχόμενη ροή ακτινοβολίας (irradiation) στο P δηλώνεται ως G , ενώ η συνολική εξερχόμενη ροή ακτινοβολίας στο P (radiosity) δηλώνεται ως J . Η εξερχόμενη ροή ακτινοβολίας είναι το σύνολο της ανακλώμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολία:

$$J = \rho G + \epsilon e_b(T) \quad (2.2.9)$$

Σύμφωνα με τον νόμο Stefan-Boltzmann, $e_b(T)$ είναι ανάλογη της θερμοκρασίας:

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (2.2.10)$$

Η καθαρή εισροή ακτινοβολίας, q υπολογίζεται από τη διαφορά ανάμεσα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία (irradiation) και την εξερχόμενη ακτινοβολία (radiosity):

$$q = G - J \quad (2.2.11)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2.5 και 3.2.6 ο όρος J μπορεί να απλοποιηθεί και η γενική έκφραση υπολογίζεται από την εισερχόμενη ροή θερμότητας μέσα στο αδιαφανές σώμα βασισμένο στο G και στο T .

$$q = (1 - \rho)G - \varepsilon e_b(T) \quad (2.2.12)$$

Τα περισσότερα μη διαφανή σώματα επίσης συμπεριφέρονται ως ιδανικά γκριζα σώματα, που σημαίνει ότι ο συντελεστής απορροφητικότητας και εκπομπής είναι ίσοι, και ο συντελεστής ανάκλασης επομένως απορρέει από την παρακάτω σχέση :

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho \quad (2.2.13)$$

Έτσι, για το ιδανικό γκριζο σώμα το q δίνεται από τη σχέση:

$$q = \varepsilon(G - e_b(T)) \quad (2.2.14)$$

Αυτή είναι η έκφραση που χρησιμοποιείται συχνότερα ως οριακή συνθήκη .

2. Η εξάρτηση του μήκους κύματος από το συντελεστή εκπομπής και απορροφητικότητας της ακτινοβολίας

Οι ιδιότητες της επιφάνειας όσο αφορά την ακτινοβολία εξαρτώνται από το συντελεστή απορροφητικότητας και εκπομπής, την θερμοκρασία επιφάνειας και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics εφαρμόζει την μέθοδο της εξερχόμενης ακτινοβολίας, η οποία λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση από τη θερμοκρασία, ενώ παράλληλα υποθέτει ότι οι συντελεστές εκπομπής και απορροφητικότητας είναι ανεξάρτητοι από τη γωνία εκπομπής και απορρόφησης. Επίσης, είναι δυνατό να υπολογιστεί η εξάρτηση του μήκους κύματος από το συντελεστή εκπομπής και απορροφητικότητας στην επιφάνεια.

3. Φασματική Κατανομή Planck

Η κατανομή Planck της εκπομπής ενός μέλανος σώματος σε κενό δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας επιφάνειας και του μήκους κύματος.

Η ένταση εκπομπής του μελανού σώματος (SI: $W/(m^3 \cdot sr)$), εκφράζεται ως $e_{b,\lambda}(\lambda, T)$, και υπολογίζεται:

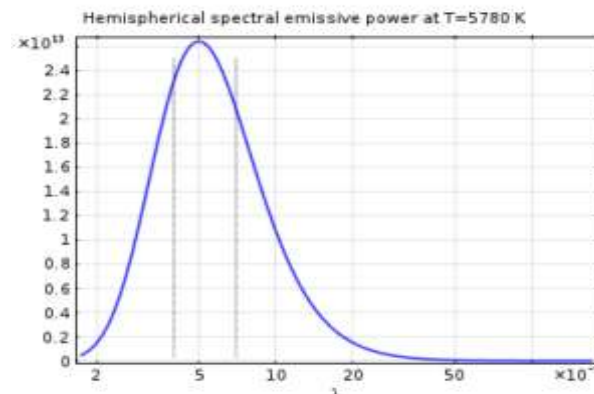
$$e_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi n^2 C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.2.15)$$

Οι σταθερές C_1 (SI : $W \cdot m^2 / sr$) and C_2 (SI : $m \cdot K$) υπολογίζονται από

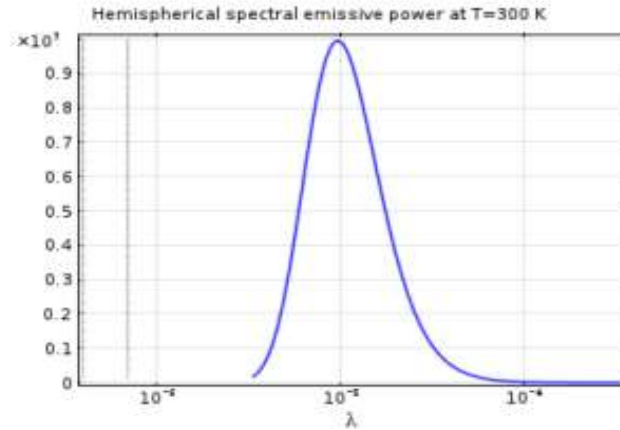
$$C_1 = hc_0^2 \quad C_2 = \frac{hc_0}{k_B} \quad (2.2.16) \quad (2.2.17)$$

- h : η σταθερά Planck (SI : J·s)
- k_B : η σταθερά Boltzmann (SI : J/K)
- c_0 : η ταχύτητα του φωτός υπό κενό (SI : m/s)
- λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας υπό κενό (SI : m)
- n : ο δείκτης διάθλασης του μέσου, ισούται με 1 στο κενό

Τα ακόλουθα διαγράμματα περιγράφουν την ημισφαιρική φασματική ένταση εκπομπής ενός μελανού σώματος στους 5780 K (που είναι η θερμοκρασία μέλανος σώματος του Ήλιου) και για ένα μέλαν σώμα στους 300 K. Οι κάθετες γραμμές στα διαγράμματα ορίζουν το φάσμα του ορατού (από 0.4 μm μέχρι 0.7 μm).



Εικόνα 2.2.3: Η κατανομή Planck του μελανού σώματος στους 5780 K.



Εικόνα 2.2.4: Κατανομή Planck μελανού σώματος στους 300 K.

Το ολοκλήρωμα του $e_{b,\lambda}(\lambda, T)$ σε μια φασματική ζώνη αντιπροσωπεύει την ένταση ακτινοβολίας σε αυτή τη φασματική ζώνη και υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = F_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T} \int_0^{\infty} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (2.2.18)$$

Όπου $F_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T}$ είναι η ένταση εκπομπής ενός μελανού σώματος,

$$F_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (2.2.19)$$

Ανακαλώντας τον νόμο του Stefan-Boltzmann που υπολογίζει την ένταση της ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος:

$$\int_0^{\infty} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (2.2.20)$$

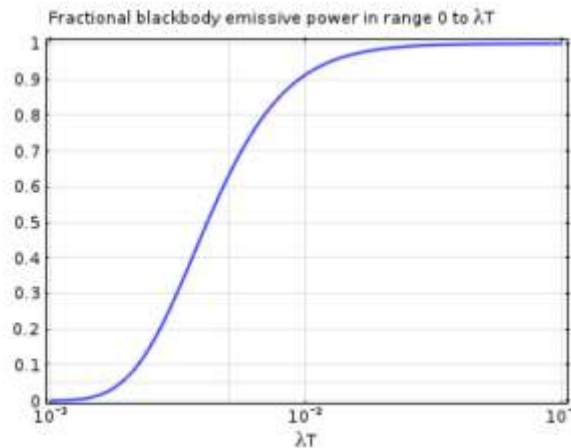
Όπου το n είναι ο δείκτης διάθλασης, και σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann που ισούται με $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$. Έτσι, η ένταση της ακτινοβολίας στη φασματική περιοχή $[\lambda_1, \lambda_2]$ γίνεται:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = F_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T} e_b(T) \quad (2.2.21)$$

Σημειώνεται ότι:

$$F_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T} = F_{0 \rightarrow \lambda_2 T} - F_{0 \rightarrow \lambda_1 T} \text{ και } F_{0 \rightarrow \infty} = 1$$

Το ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 3.2.4) περιγράφει την τιμή του $F_{0 \rightarrow \lambda T}$ για διαφορετικές τιμές λT .

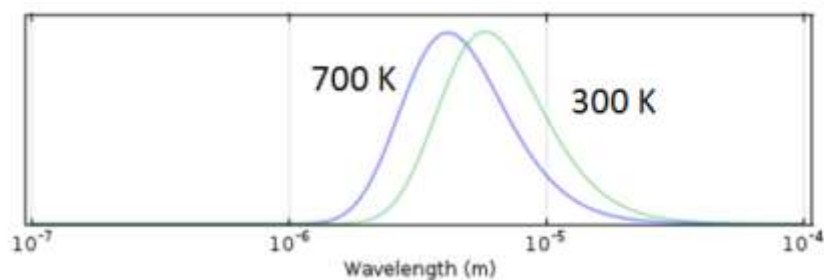


Εικόνα 2.2.5: Η διαφορική δύναμη εκπομπής μέλανος σώματος σε συνάρτηση με το λT

4. Διάχυση σε γκρίζες επιφάνειες

Η διάχυση σε γκρίζες επιφάνειες αντιστοιχεί στην υπόθεση ότι οι ιδιότητες της επιφάνειας είναι ανεξάρτητες από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία ανάμεσα στην επιφάνεια και την κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

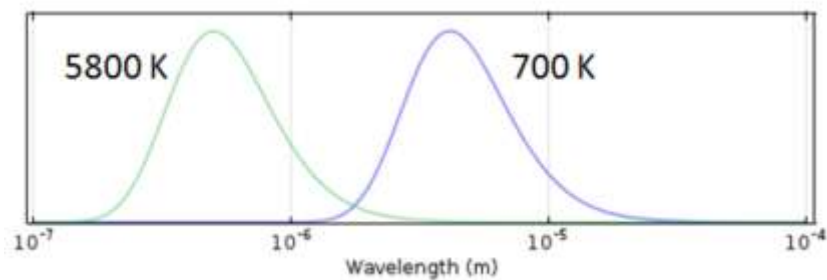
Η υπόθεση ότι ο συντελεστής εκπομπής είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι ισχύει όταν το μεγαλύτερο μέρος της δύναμης της ακτινοβολίας είναι συγκεντρωμένη σε ένα σχετικά στενή φασματική ζώνη. Αυτό είναι πιο πιθανό στην περίπτωση που η ακτινοβολία εκπέμπεται σε ένα ορισμένο εύρος θερμοκρασιών.



Εικόνα 2.2.6: Συσχέτιση του συντελεστή εκπομπής σε σχέση με το μήκος κύματος

5. Ηλιακή φασματική ζώνη

Για τον υπολογισμό της διάχυσης ακτινοβολίας σε γκρίζες επιφάνειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο φασματικές ζώνες: μια αφορά μικρά μήκη κύματος και μια που αφορά μεγάλα μήκη κύματος. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι περίπου το 97% της δύναμης ακτινοβολίας από ένα μέλαν σώμα στους 700 K είναι σε μήκη κύματος από 2.5 μm και μεγαλύτερα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα[48].

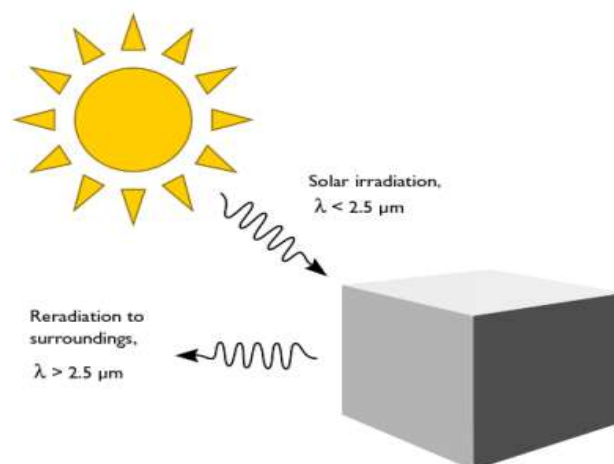


Εικόνα 2.2.7: Κανονικοποιημένη κατανομή Planck μελανού σώματος στους 700 K και 5800 K.

Σε πολλά προβλήματα υπάρχει το ηλιακό φορτίο, αλλά το μέγιστο της θερμοκρασίας είναι κάτω από 700 K. Σε τέτοιες περιπτώσεις αντιστοιχεί η προσέγγιση για δύο φάσματα ακτινοβολίας :

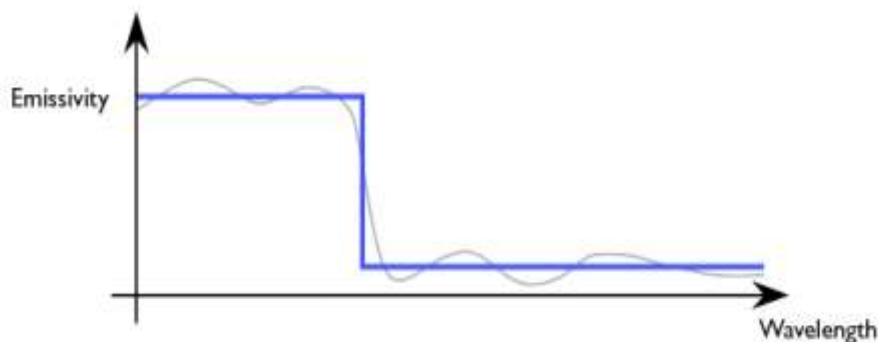
- Ένα ηλιακό φάσμα για μήκη κύματος μικρότερα από 2.5 μm
- Ένα φάσμα περιβάλλοντος για μήκη κύματος πάνω από 2.5 μm

Για κάθε επιφάνεια, οι ιδιότητες της περιγράφονται από τους όρους του συντελεστή απορροφητικότητας και εκπομπής.



Εικόνα 2.2.8: Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και εκπομπή στο περιβάλλον

Με το διαχωρισμό των φασμάτων με την αρχική τιμή των 2.5 μm, το κλάσμα της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε επιφάνεια ορίζεται κυρίως από το συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.2.9: Προσεγγιστική συσχέτιση του συντελεστή εκπομπής με το μήκος κύματος

6. Η μέθοδος της εξερχόμενης ακτινοβολίας για διάχυση σε γκρίζες επιφάνειες

Η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία συνδυάζεται με την μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή με την εισαγωγή στην εξίσωση θερμότητας έναν επιπρόσθετο όρο για την πηγή θερμότητας. Ανακαλώντας την εξίσωση 3.2.8, το ποσό θερμότητας q υπολογίζει τη διαφορά ανάμεσα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία (irradiation), και την ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια (radiosity)[70].

$$q = G - J \quad (2.2.22)$$

Η εξερχόμενη ακτινοβολία, J είναι το σύνολο της ανακλώμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα για γκρίζες επιφάνειες υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$J = (1 - \epsilon)G + \epsilon e_b(T) \quad (2.2.23)$$

Πίνακας 2.2.5: Συμβολισμοί, μονάδες και μεγέθη της εξίσωσης της εξερχόμενης ακτινοβολίας (J)

Συμβολισμοί	Μονάδες	Μεγέθη
G	W/m^2	η εισερχόμενη ροή θερμότητας από ακτινοβολία (<i>irradiation</i>)
ε	$0 \leq \varepsilon \leq 1$	ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας
$e_b(T)$	W/m^2	το σύνολο της ημισφαιρικής δύναμης εκπομπής του μελανού σώματος
T	K	θερμοκρασία της επιφάνειας

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία, G , διαχωρίζεται σε τρεις συνιστώσες σύμφωνα με :

$$G = G_m + G_{ext} + G_{amb} \quad (2.2.24)$$

όπου:

Πίνακας 2.2.6: Συμβολισμοί, μονάδες, μεγέθη και τρόποι υπολογισμού τους για την εξίσωση υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Συμβολισμοί	Μονάδες	Μεγέθη και τρόποι υπολογισμού
G_m	W/m^2	η κοινή προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία υπολογίζεται από τα όρια του μοντέλου
G_{ext}	W/m^2	η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τις εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας $G_{ext} = \sum F_{ext} P_s + \sum F_{ext} q_{0,s}$
G_{amb}	W/m^2	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία από το περιβάλλον. $G_{amb} = F_{amb} e_b(T_{amb})$, $0 \leq F_{amb} \leq 1$

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε τελικά στην παρούσα εργασία η εξερχόμενη ακτινοβολία είναι μια συνάρτηση της G_m και οδηγεί σε ένα έμμεσο ισοζύγιο ακτινοβολίας :

$$J = (1 - \varepsilon)(G_m(J) + G_{ext} + G_{amb}) + \varepsilon e_b(T) \quad (2.2.25)$$

2.3 Υπολογιστικά Προγράμματα

Οι μέθοδοι υπολογισμού που περιγράφονται παραπάνω έχουν εφαρμοστεί σε μία σειρά εργαλείων σχεδιασμού και υπολογιστικά προγράμματα.

- Προγράμματα προσομοίωσης γενικής χρήσης όπως το Energy-Plus, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν αποθέματα διαφόρων κατασκευών. Γί' αυτά τα προγράμματα, οι δυναμικές της μεταφοράς θερμότητας είναι μοντελοποιημένες. Το πρόγραμμα Energy Plus μοντελοποιεί τη θερμοκρασιακή βαθμίδα της κατασκευής.
- Το Therm-Program έχει σχεδιαστεί κυρίως για να αναλύει πλαίσια παραθύρων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύπο ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας δύο διαστάσεων.
- Η χρήση του Comsol Multiphysics. Για μια καλύτερη κατανόηση πως η μεταφορά θερμότητας επηρεάζει ένα συγκεκριμένο κτηριακό κέλυφος, πραγματοποιείται μια προσομοίωση σε ένα περιβάλλον Comsol Multiphysics. Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο που διευκολύνει όλα τα βήματα στη διαδικασία της μοντελοποίησης. Αφού προσδιοριστεί η γεωμετρία και η φυσική του προβλήματος από το χρήστη, το πρόβλημα λύνεται εύκολα και τα γραφικά αποτελέσματα οπτικοποιούνται. Μέσω αυτών των εικόνων που προέρχονται από έναν πολύ δυνατό προσομοιωτή, το αρχικό περίπλοκο μοντέλο που απαιτεί τη λύση της εξίσωσης Fourier- μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί από τον χρήστη. Τα αποτελέσματα μπορούν να καταγραφούν ως ένα θερμοκρασιακό προφίλ μέσα στον τοίχο ή σαν ισόθερμες καμπύλες. Επιπροσθέτως, αποτελέσματα για προβλήματα χρόνου είναι περιορισμένα και οδηγεί στην βελτιστοποίηση των διαφορετικών λύσεων με το να χρησιμοποιούνται οι εισερχόμενοι

παράγοντες. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση των εικόνων που δίνονται με προσομοίωση μπορούν να ειπωθούν ως ένα θεμελιώδες εργαλείο για να λυθεί γρήγορα ένα πραγματικό πρόβλημα, αλλιώς απαιτούνται περίπλοκες εξισώσεις. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει κατευθείαν τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτηρίου ή του μνημείου που μελετά καθώς επίσης και να δημιουργήσει βιβλιοθήκη με τις ιδιότητες των υλικών της κατασκευής, γεγονός που κάνει την προσομοίωση πιο αποτελεσματική. Για τη διεξαγωγή αυτής της εργασίας επιλέχθηκε το συγκεκριμένο πρόγραμμα λόγω ευκολίας στο χειρισμό και της δυνατότητας για την εισαγωγή δεδομένων για τα υλικά του μνημείου, αλλά και η επεξεργασία από το χρήστη των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα για την εισαγωγή των αρχιτεκτονικών σχεδίων 2D και 3D [50].

2.4 Εφαρμογές

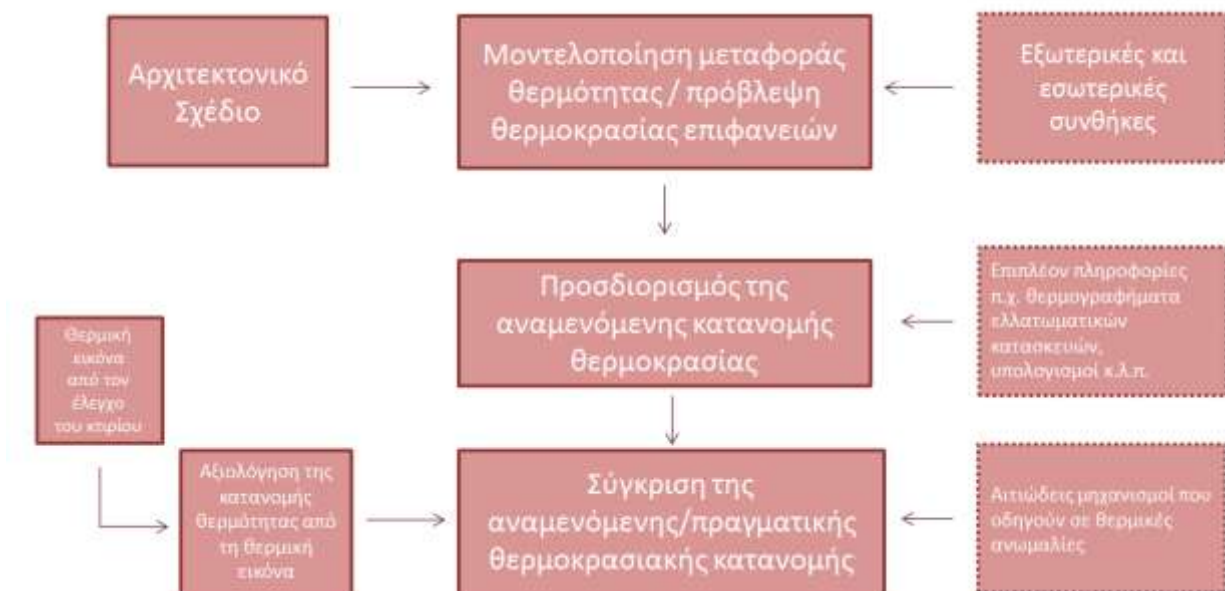
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες που μελετούν συγκριτικά τα αποτελέσματα της Υπερύθρης Θερμογραφίας με τα αποτελέσματα από μοντέλα προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας. Κάποια χαρακτηριστικά αναφέρονται παρακάτω και είναι αυτά πάνω στα οποία βασίστηκε και αυτή η εργασία:

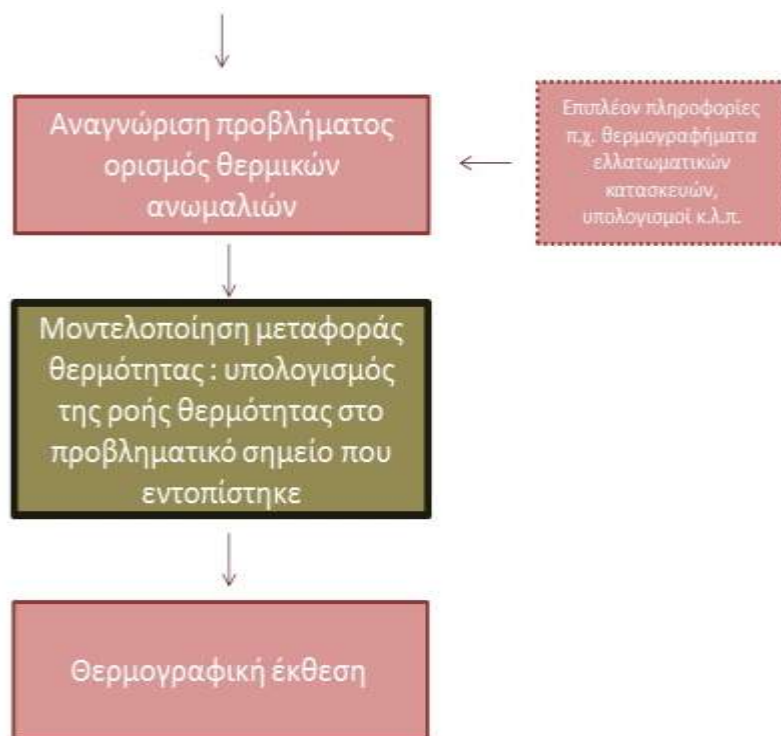
Οι Voelker και Diwald μελέτησαν με τη θερμότητα που μεταφέρει ένα δοκίμιο δομικού υλικού στο εσωτερικό περιβάλλον. Για τη διεξαγωγή του πειράματος μετρήθηκαν η θερμοκρασία της επιφάνειας του δείγματος με σένσορες και η θερμοκρασία του πυρήνα του δείγματος καθώς και η θερμοκρασία του αέρα και το πεδίο ροής μετρήθηκε με ανεμόμετρο. Παρόμοιες μετρήσεις με θερμοστοιχεία αλλά επιφανειακά πραγματοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία. Η Θερμογραφία Υπερύθρου προσέφερε την οπτικοποίηση του μικροκλίματος του δείγματος. Οι μετρήσεις συμπληρώθηκαν με προσομοίωση υπολογιστικής μηχανικής (CFD). Μελετήθηκε τόσο η μεταφορά θερμότητας μέσα στο δείγμα που πραγματοποιείται μέσω αγωγής αλλά και η μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό περιβάλλον που γίνεται με τους μηχανισμούς της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκαν διαφορετικές οριακές συνθήκες. Στο

τέλος συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με τα πειραματικά και ήταν σε συμφωνία μεταξύ τους. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Fluent (CFD software) και το πρόγραμμα ICEM για να εισαγάγει στο Fluent τις γεωγραφικές συντεταγμένες και να γίνει η διακριτοποίηση του 3-d αντικειμένου. Επίσης, επιλέχθηκε το μοντέλο της επιφάνειας προς επιφάνεια ακτινοβολίας που υπάρχει στο Fluent και οι εξισώσεις Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS)[51].

Ο T. Taylor, J. Counsell, S. Gill χρησιμοποίησαν την τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας για τον έλεγχο της περιμετρικής μόνωσης σε ένα ξύλινο δάπεδο. Χρησιμοποίησαν τα μοντέλα προσομοίωσης HEAT3 και THERM. Ιδιαίτερη σημασία και προσοχή δόθηκε στις οριακές συνθήκες που όρισαν. Για την διεξαγωγή της μελέτης χρησιμοποίησαν το Πρότυπο BSEN 13187 (πίνακας 2). Το πρότυπο BSEN 13187 είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο. Το χρησιμοποίησε ως μεθοδολογία και το Institute of Sustainability στο πλαίσιο του προγράμματος για την Κτηριακής Φυσικής Ενεργειακής Απόδοσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης[52-54].

Πίνακας 2.4.1: Πρότυπο BS EN 13187





Για τον ορισμό των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε το ISO 10211[75]. Είναι ένα πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός για τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Έκαναν την παραδοχή ότι οι συνθήκες προσομοιάζουν τη μόνιμη κατάσταση, όταν η διαφορά των εξωτερικών και των εσωτερικών οριακών συνθηκών στο κτίριο είναι σχετικά σταθερή για μία επαρκή χρονική περίοδο. Σχετικά με τις εσωτερικές οριακές συνθήκες το ISO 10211 προτείνει να ορίζεται η εσωτερική θερμοκρασία ως η μέση τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας. Ωστόσο στην περίπτωση κτιρίων με καλή μόνωση και για συνθήκες μόνιμης κατάστασης η εσωτερική θερμοκρασία αέρα και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας έχουν σχεδόν την ίδια τιμή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα σαν εσωτερική οριακή συνθήκη. Ως εξωτερικές οριακές συνθήκες το ISO 10211 ορίζει τη εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, θεωρώντας ότι η θερμοκρασία του αέρα και η θερμοκρασία ακτινοβολίας είναι ίσες. Όμως η μέση ακτινοβόλος θερμοκρασία του ουρανού εξαρτάται με την ώρα της ημέρας (μέρα ή νύχτα) και με την έκταση της νεφοκάλυψης. Έτσι εισάγεται ο όρος της θερμοκρασίας $T_{sol-air}$:

$$T_{sol-air} = T_e + (a \cdot I_{sol} - \Phi) R_{se} \quad (2) \quad (2.4.1)$$

όπου ,

$T_{sol-air}$ = η θερμοκρασία ηλίου – περιβάλλοντος,

T_e = η εξωτερική θερμοκρασία,
 α = ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας,
 I_{sol} = η συνολική ηλιακή ακτινοβολία,
 Φ = η θερμική ακτινοβολία του ουρανού
 R_{se} = η αντίσταση της εξωτερική επιφάνειας.

Επομένως με τη χρήση αυτών των δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία $T_{sol-air}$ και στη συνέχεια η διαφορά της θερμοκρασίας αυτής από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα δT_e . Οι τιμές της δT_e χρησιμοποιούνται σαν συντελεστής διόρθωσης στη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας $T_{sol-air}$ γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκος, όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς επηρεάζεται από τη θέση του ήλιου, τον προσανατολισμό του κτιρίου και την έκταση της νεφοκάλυψης. Για το λόγο αυτό γίνεται μία απλουστευτική παραδοχή σύμφωνα με το ISO 10211.

Ο B. Lehmann και άλλοι ερευνητές πραγματοποίησαν έρευνα με σκοπό την ποσοτική ανάλυση της επιρροής διαφορετικών παραμέτρων στις θερμικές εικόνες. Σε πρώτο στάδιο τοποθετήθηκαν θερμοζεύγη στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου που μελετήθηκε. Προκειμένου να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία, τοποθετήθηκε ένας μικρός μετεωρολογικός σταθμός σε μικρή απόσταση από το κτίριο.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία μεγάλου μήκους ποσοτικοποιείται μέσω της πραγματικής θερμοκρασίας του ουρανού και του συντελεστή εκπομπής του ουρανού. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ουρανό $I_{r,sky}$ υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_{r,sky} = \sigma \cdot T_{sky}^4 = \epsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{ae}^4 \quad (2.4.2)$$

Όπου,

T_{ae} = η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος

T_{sky} = η θερμοκρασία ουρανού (= η θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος με την ίδια ροή ακτινοβολίας)

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος VOLTRA για την προσομοίωση της θερμοκρασιακής κατανομής κάτω από μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Για την αναλυτική αξιολόγηση της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RADCON.

Επιπλέον για τη μοντελοποίηση ορίστηκαν οι ακόλουθες οριακές συνθήκες:

- Η εξωτερική θερμοκρασία αέρα κοντά στην πρόσοψη όπου μετρήθηκε από τα θερμοζεύγη.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία είναι ίση με τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα.

$$\theta_{re} = \sqrt{F_{sky} T_{sky}^4 + F_e T_e^4} - 273,16 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.4.3)$$

Όπου,

θ_{re} = η θερμοκρασία περιβάλλοντος,

F_{sky} , F_e = ο παράγοντας θέασης του ουρανού και της πρόσοψης αντίστοιχα, T_{sky} η θερμοκρασία του ουρανού,

T_e = η θερμοκρασία του αέρα

- Η ηλιακή ακτινοβολία στους τοίχους ανάλογα με τον προσανατολισμό τους.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα προγράμματα και οι οριακές συνθήκες:

Πίνακας 2.4.2 : Προγράμματα προσομοίωσης και οριακές τιμές σε διαφορετικές εφαρμογές

Ερευνητές	Εφαρμογή	Λογισμικό	Οριακές Συνθήκες
Voelker, Diewald	Δείγμα δομικού υλικού	FLUENT&ICEM (εισαγωγή 3D αντικειμένου)	Εξίσωση RANS (διάφορες οριακές συνθήκες)
T.Taylor, J.Counsell, S. Gill (70)	Έλεγχος περιμετρικής μόνωσης σε ξύλινο δάπεδο	HEAT3 & THERM	Εσωτερικές οριακές συνθήκες: Εσωτερική θερμοκρασία αέρα Εξωτερικές οριακές

			<p>συνθήκες: διορθωμένη εξωτερική θερμοκρασία αέρα από το συντελεστή δT_e ή απλουστευμένη παραδοχή σύμφωνα με το ISO 10211</p>
<p>B. Lehmann, K. Ghazi Wakili, Th. Frank, B. Vera Collado, Ch. Tanner (72)</p>	<p>Ποσοτική ανάλυση της επιρροής διαφορετικών παραμέτρων στις θερμικές εικόνες</p>	<p>VOLTRA & RADCON</p>	<p>Εξωτερική θερμοκρασία αέρα κοντά στην πρόσοψη, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία, παράγοντας απορρόφησης, ταχύτητα του ανέμου, μέση εσωτερική θερμοκρασία αέρα</p>

Κεφάλαιο 3: Ο Παρθενώνας της Ακρόπολης Αθηνών

Η Αθηναϊκή Ακρόπολη είναι ένα από τα σημαντικότερα μνημεία Παγκόσμιας Πολιτισμικής Κληρονομιάς, κηρυγμένο από την Unesco ήδη από το 1987. Αποτελεί ύψιστη έκφραση της προσαρμογής της αρχιτεκτονικής σε φυσικό περιβάλλον. Πρόκειται για μια μεγαλοπρεπή σύνθεση όπου οι όγκοι βρίσκονται σε τέλεια αρμονία, δημιουργώντας ένα μνημειώδες τοπίο μοναδικής ομορφιάς, που αγκαλιάζει ένα σύνολο αριστουργημάτων του 5ου αιώνα π.Χ.: τον Παρθενώνα, τα Προπύλαια, το ναό της Αθηνάς Νίκης και το Ερέχθειο. Τα μνημεία της παραμένουν ζωντανή παράδοση και κρατούν ζωντανή τη μνήμη ενός πολύτιμου τμήματος της πολιτιστικής κληρονομιάς της ανθρωπότητας [55].



Εικόνα 3.0.1: Αεροφωτογραφία της Αθηναϊκής Ακρόπολης

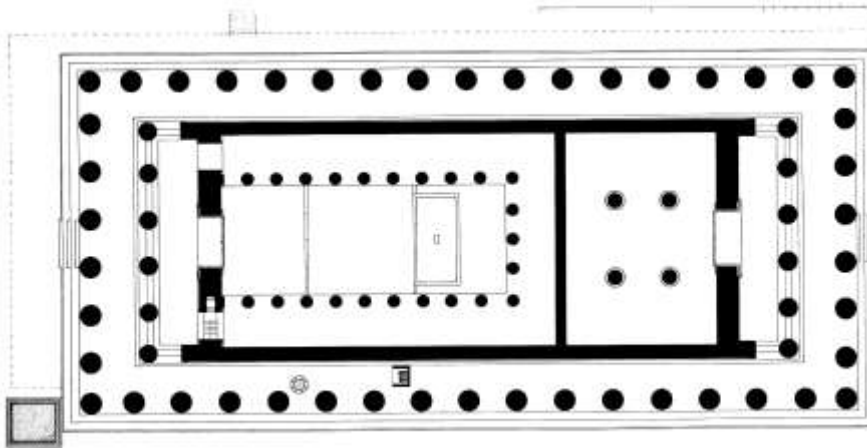
3.1 Αρχιτεκτονική και Ιστορική παρουσίαση του Παρθενώνα

Με τον Παρθενώνα οι αρχαίοι Αθηναίοι πραγματοποίησαν το κορυφαίο επίτευγμα της αρχαίας ελληνικής αρχιτεκτονικής, ένα από τα τελειότερα δημιουργήματα του ανθρωπίνου πνεύματος, κι ένα μοναδικής σημασίας σύμβολο του κλασσικού κάλλους. Το μνημείο δεν έπαψαν να το θαυμάζουν από την αρχαιότητα ως σήμερα. Άπειρα πράγματα γράφηκαν για αυτό. Η οικοδόμηση του άρχισε το 447 και τελείωσε το 438 π. Χ.



Εικόνα 3.1.1: Παρθενώνας (Υ.Σ.Μ.Α.)

Ο Παρθενών είναι ναός οκτάστυλος περίπτερος με εξάστυλο αμφιπρόστυλο σηκό, με γενικές διαστάσεις στο ύψος του στυλοβάτη 30,86x69,51m. Ο σηκός ήταν χωρισμένος σε δύο άνισα μέρη από τα οποία το μεν ανατολικό είχε διώροφη δωρική στοά και στέγαζε το λατρευτικό άγαλμα της θεάς, το δε δυτικό προσπελάσιμο από τον οπισθόδομο ήταν κυρίως ο Παρθενώνας και περιελάμβανε τέσσερις ιωνικούς κίονες οι οποίοι στήριζαν την στέγη.



Εικόνα 3.1.2: Κάτοψη του Παρθενώνα (Μ.Κορρές)

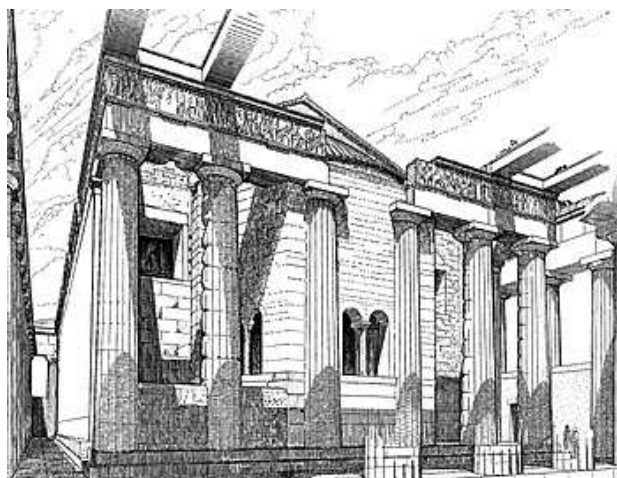
Για την κατασκευή του ναού εν μέρει χρησιμοποιήθηκε το οικοδομικό υλικό του παλαιότερου, που ξαναλαξεύθηκε κατάλληλα. Ολόκληρο το μνημείο (εκτός από την ξύλινη στέγη) ήταν από πεντελικό μάρμαρο, συμπεριλαμβανομένων και των κεραμιδιών. Είναι φανερό ότι στον Παρθενώνα όλα τα τεχνικά προβλήματα είχαν

λυθεί και ότι η λιθοξοϊκή έφθασε σε πρωτοφανή και ανεπανάληπτη τελειότητα. Πράγματι, η προσαρμογή των μαρμάρινων μελών (που φθάνουν ενίοτε σε βάρος τους 10 τόνους) παρουσιάζει ακρίβεια δεκάτου του χιλιοστομέτρου και αυτό ως την μικρότερη λεπτομέρεια του κτιρίου, ως και σε μέρη τελείως αφανή. Η απίστευτη αυτή τελειότητα είναι συναρτημένη με τις μορφολογικές προθέσεις των κατασκευαστών του μνημείου. Στο Παρθενώνα εμφανίζονται όλες σχεδόν οι λεγόμενες οπτικές διορθώσεις και εκλεπτύνσεις του δωρικού ρυθμού, ενώ το σύστημα των αναλογικών σχέσεων ολοκληρώνεται για να δώσει ένα σύνολο ισορροπημένο και αρμονικό. Οι μεγάλες μορφολογικές προθέσεις φαίνονται άλλωστε σε μερικούς νεωτερισμούς που διαπιστώνονται στον Παρθενώνα. Η ζωφόρος του σηκού γίνεται συνεχής κατά τον ιωνικό τρόπο και αυτό δίνει αυξημένες δυνατότητες γλυπτικού διακόσμου. Η εσωτερική κιονοστοιχία σε σχήμα πι δημιουργεί ένα σχήμα υποδοχής που αναδεικνύει το λατρευτικό άγαλμα και αυτό δείχνει σοβαρή φροντίδα για την ανάπτυξη του εσωτερικού χώρου του ναού. Ο γλυπτικός διάκοσμος του ναού είναι ένας σταθμός στην ιστορία της τέχνης. Ο Φειδίας με τους μαθητές του και τους άλλους συνεργαζόμενους γλύπτες πραγματοποίησαν μια μεγάλη σειρά γλυπτών με μοναδική καλλιτεχνική αξία, έργων που αντιπροσωπεύουν κατεξοχήν την κλασική τέχνη. Όλες οι μετώπες στολίζονταν με ανάγλυφα. Σε αυτές απεικονιζόταν μάχη κενταύρων και Λαπίθων, θεών και γιγάντων, Αθηναίων και Αμαζόνων και η άλωση της Τροίας.



Εικόνα 3.1.3: Σκηνή με μάχη κενταύρου και Λάπιθα
(Νότια Μετώπη, Βρετανικό Μουσείο)

Η ζωφόρος του σηκού, η οποία τον περιέτρεχε σε συνολικό μήκος 160 μέτρων απεικόνιζε την πομπή των Παναθηναίων, που κατέληγε σε ένα όμιλο θεών του Ολύμπου. Τα αετώματα, εξαιρετικά πλούσια απέδιδαν μυθολογικά θέματα σχετικά με την Αθηνά. Στο ανατολικό την γέννηση της, στο δυτικό τον ανταγωνισμό της με τον Ποσειδώνα για την γη της Αττικής. Τα εναέτια που σώθηκαν, διάφορα θραύσματα βοηθούν την αναπαράσταση του δυτικού αετώματος. Η σύνθεση του ανατολικού παραμένει στο κεντρικό τουλάχιστον τμήμα της σχεδόν άγνωστη. Το λατρευτικό άγαλμα της Αθηνάς Παρθένου ήταν έργο του Φειδία χρυσελεφάντινο ύψους 10,10 μέτρων. Το άγαλμα στηριζόταν σε μεγάλο μαρμάρινο βάθρο διαστάσεων 8x4,10 μέτρα σαν αρχιτέκτονες του Παρθενώνα είναι γνωστοί ο Ικτίνος και ο Καλλικράτης. Δυστυχώς δεν ξέρουμε τι έκανε ο καθένας, αν συνεργάστηκαν ή αν ο ένας διαδέχθηκε τον άλλο. Ασαφής είναι ο ρόλος του κορυφαίου γλύπτη. Ο Πλούταρχος μας διαβεβαιώνει «πάντων επίσκοπος η Ερέχθειο ην αυτώ Φειδίας», ο μηχανισμός όμως των απευθείας αναθέσεων από τις υπεύθυνες επιτροπές σε πολλούς γλύπτες, καθώς και οι στυλιστικές διαφορές που διαπιστώνονται στα επιμέρους πλαστικά έργα μαρτυρούν ότι η πραγματικότητα ήταν κάπως διαφορετική. Ο Παρθενώνας έμεινε για αιώνες σχεδόν άθικτος. Κατά τα όψιμα ρωμαϊκά χρόνια υπέστη αρκετές ζημιές από πυρκαγιά. Την επισκευή του την ανάγουν στα χρόνια του Ιουλιανού του αποστάτη. Λίγο αργότερα οι Χριστιανοί κατά τον τέταρτο και πέμπτο μ.Χ. αιώνα έκαναν μικρές μετατροπές στο εσωτερικό (προσθήκη αψίδας, άνοιγμα πλευρικών εισόδων, διαμόρφωση κλιμακοστασίου ανόδου στην Ν.Δ. γωνία του σηκού), όταν το μνημείο έγινε εκκλησία.



Εικόνα 3.1.4: Ο Παρθενώνας ως εκκλησία, η ανατολική πλευρά (Μ.Κορρές)

Κατά το διάστημα της Φραγκοκρατίας χρησίμευσε ως καθολική μητρόπολη των Φράγκων Δουκών των Αθηνών. Αργότερα έγινε τζαμί. Το 1687 μια έκρηξη πυρίτιδας κατά την πολιορκία του κάστρου της Ακροπόλεως από τους Ενετούς προκάλεσε φοβερή καταστροφή στον ναό με την κατάρρευση του σηκού και των περισσότερων κίωνων της βορινής πλευράς.



Εικόνα 3.1.5: Η ανατίναξη του Παρθενώνα στις 26 Σεπτεμβρίου 1687.

Διμετρική αναπαράσταση (Σχέδιο Μ. Κορρές)

Αργότερα στα 1801-1803 αφαιρέθηκαν από τον ερειπωμένο Παρθενώνα τα περισσότερα γλυπτά του. Στο διάστημα μεταξύ 1835-1844 το μνημείο απηλλάγη από τις νεώτερες προσθήκες και έγιναν καθαρισμοί, ενώ κατά τα έτη 1898-1929 σημαντικά τμήματα αναστηλώθηκαν όχι με απόλυτη επιτυχία πάντοτε. Μεγάλο μέρος των γλυπτών του Παρθενώνα, δεκαοχτώ αγάλματα των αετωμάτων δεκαπέντε μετώπες και εβδομήντα πέντε μέτρα της ζωφόρου, εκτίθεται τώρα σε ειδική αίθουσα του Βρετανικού Μουσείου. Άλλα γλυπτά του εκτίθενται στο Μουσείο της Ακροπόλεως και στο Μουσείο του Λούβρου στο Παρίσι [56-58].

3.2 Συντήρηση των μνημείων της Ακρόπολης

Με τον όρο συντήρηση εννοείται διεθνώς το σύνολο των επεμβάσεων σε έργα πολιτιστικής κληρονομιάς ή στο περιβάλλον τους, που αποσκοπούν στην πρόληψη ή την αναστολή της φθοράς τους. Οι επεμβάσεις αυτές -σύμφωνα με τον Χάρτη της Βενετίας [58]- “στόχο έχουν να τα διασώσουν τόσο ως έργα τέχνης όσο και ως ιστορικές μαρτυρίες”, ενώ δεν πρέπει να αλλοιώσουν την μορφή και την υφή τους.

Η συντήρηση των Μνημείων της Ακρόπολης επικεντρώνεται στην επιφάνεια του μαρμάρου και αποτελεί από το 1986 διακεκριμένο έργο, που συμβαδίζει και συντονίζεται με τα προγράμματα αποκατάστασης και αναστήλωσης.

Το έργο της συντήρησης, που εκτελείται σήμερα στα μνημεία της Ακρόπολης, περιλαμβάνει την ενεργητική συντήρηση, με επεμβάσεις κυρίως στερεωτικές πάνω στα ίδια τα μνημεία ή σε αποσυναρμολογημένα μέλη τους στα εργαστήρια των διαφόρων εργοταξίων ή στο εργαστήριο του Μουσείου Ακροπόλεως, και την παθητική συντήρηση, με επεμβάσεις προληπτικού κυρίως χαρακτήρα, όπως είναι η μεταφορά των αρχιτεκτονικών γλυπτών των μνημείων σε περιβάλλον μουσείου και η τοποθέτηση ορισμένων από αυτά σε αδρανές περιβάλλον αζώτου ή περιβαλλοντικές ρυθμίσεις στο ευρύτερο περιβάλλον [59-61].

3.2.1 Κατάσταση της επιφάνειας των μνημείων

- Η μεμονωμένη ή συνδυασμένη δράση μηχανικών, χημικών και βιολογικών αιτιών, σε συνδυασμό με το μικροκλίμα του περιβάλλοντος και τη μικροδομή του μαρμάρου, προκαλούν τις ακόλουθες μορφές φθοράς [62-64] :

α.Ρηγματώση: Διακοπή της συνέχειας του μαρμάρου με τη μορφή ρωγμών που μπορεί να οδηγήσει σε διαμπερή ρήγματα, με τελικό αποτέλεσμα τον αποχωρισμό και την πτώση θραυσμάτων .

β.Αποφλοιώση: Σχηματισμός παράλληλων με την επιφάνεια ρωγμών, που συνοδεύεται από κίνδυνο πτώσης αποφλοιωμένων τμημάτων μαρμάρων .

γ.Απολέπιση: Σχηματισμός απολεπισμάτων μαρμάρου μειωμένης μηχανικής αντοχής.

δ.Ζαχαροειδής φθορά: Απώλεια συνοχής των επιφανειακών κρυστάλλων του μαρμάρου και συνεχής πτώση τους.

ε. Αποσάθρωση: Απώλεια συνοχής του μαρμάρου σε βάθος με περικρυσταλλική αποσάθρω-ση ή/και πλέγμα μικρορωγμών.

στ.Κυψελοειδής φθορά: Εμφάνιση μικρών ημισφαιρικών οπών (διαμέτρου 0,2 - 0,7cm), σποραδικά ή σε συστάδες.

ζ.Διαφορική φθορά:Ανομοιογενής απομείωση της επιφάνειας του μαρμάρου που καθορίζεται από τη γεωλογική ετερογένεια του υλικού.

η.Γυψοποίηση:Στις περιοχές που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής αλλά επηρεάζονται από την ρύπανση της ατμόσφαιρας εμφανίζεται το φαινόμενο της γυψοποίησης ή της θείωσης του μαρμάρου, κατά την οποία το ανθρακικό ασβέστιο του μαρμάρου μετατρέπεται σε γύψο, που παραμένει στην επιφάνεια και μέχρι ένα ορισμένο πάχος διατηρεί το ανάγλυφό της.

- Τα **ξένα μη ασβεστικά εγλείσματα** (μαρμαρυγίες, άστριοι, χαλαζίας, χλωρίτης, τιτανίτης, οξειδία του σιδήρου, θειούχα ορυκτά κυρίως σιδήρου) που υπάρχουν στο πεντελικό μάρμαρο της Ακρόπολης συγκροτούν επίπεδα ασυνέχειας. Ορισμένα από αυτά προσβάλλονται ταχύτερα, εξαλλοιώνονται και αποσαθρώνονται, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται εσοχές και συνεπώς περισσότερα μέτωπα προσβολής στο μάρμαρο.
- **Μικροοργανισμοί:** Οι διάφοροι επιλιθικοί, ενδολιθικοί και χασμολιθικοί οργανισμοί, εκτός από την αποδεδειγμένη συμμετοχή τους στη φθορά των μνημείων [88], εμποδίζουν την απόδοση των υλικών συντήρησης, ενώ αποτελούν βέβαιη απειλή για τη μακροχρόνια αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων συντήρησης.
- **Επικαθήσεις:** Η έκθεση των μνημείων στους ατμοσφαιρικούς ρύπους και στα αιωρούμενα σωματίδια, προκαλεί τη χρωματική αλλοίωσή τους στις περιοχές που δεν ξεπλένονται από το νερό της βροχής. Η επικάθιση κυρίως σωματιδίων σκόνης και αιθάλης, σε συνδυασμό και με τα φαινόμενα ανακρυστάλλωσης ανθρακικού ασβεστίου, προκαλούν χαλαρές επικαθήσεις, εμφάνιση μαύρης κρούστας καθώς και μαύρης κρούστας δενδριτικής μορφής [65].
- **Κηλίδες σκουριάς:** Χρωματική αλλοίωση μικρότερης κλίμακας προκαλείται από τα προϊόντα διάβρωσης των σιδηρών συνδέσμων.
- **Βιολογικοί παράγοντες:** Η πανίδα (περιστέρια) και η χλωρίδα (βλάστηση) μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές φθορές αλλά και αισθητική υποβάθμιση των μνημείων. Τα περιστέρια μπορούν να προκαλέσουν μηχανική φθορά στα μάρμαρα, ενώ τα περιττώματά τους αποτελούν πηγή οπτικής ρύπανσης και αιτία χημικής φθοράς. Τα διάφορα είδη φυτών, που αναπτύσσονται μέσα στις ρωγμές και τους αρμούς των λίθων, προξενούν με τις ρίζες τους μηχανική και χημική βλάβη στο αρχαίο μάρμαρο και προκαλούν αισθητικό πρόβλημα στα μνημεία [67].

3.2.2 Ιστορικά ίχνη πάνω στην επιφάνεια των μνημείων

α.Πορτοκαλοκάστανη επιδερμίδα: Στην επιφάνεια των μνημείων, και συχνά των γλυπτών, παρατηρείται ένα στρώμα πάχους περίπου 180μm και χρώματος πορτοκαλοκάστανου , που αποτελείται κυρίως από οξαλικό ασβέστιο, σίδηρο και φώσφορο. Το στρώμα αυτό δεν αποτελεί μια απλή επίστρωση, αλλά εισχωρεί και μέσα σε περικρυσταλλικές περιοχές. Ίσως πρόκειται για αρχαία προστατευτική κατεργασία της επιφάνειας, χωρίς όμως να αποκλείεται και το ενδεχόμενο της βιογενούς προέλευσης.

β.Υπόλευκο επίστρωμα: Με τον όρο αυτόν περιγράφεται (μπεζ) σχετικά ομοιόμορφο επίστρωμα πάχους 70 μm, που παρατηρήθηκε στον Παρθενώνα πάνω από την πορτοκαλοκάστανη επιδερμίδα. Η χημική του ανάλυση (ανθρακικό ασβέστιο και γύψος) και τα ίχνη ψήκτρας που φέρει υποδεικνύουν ότι πρόκειται για μεταγενές στέρεο προστατευτικό ασβέστωμα.

γ.Γραπτός διάκοσμος/πολυχρωμία: Ίχνη του αρχαίου γραπτού διακόσμου και της πολυχρωμίας των μνημείων, σώζονται σήμερα σε αποσπασματική μορφή πάνω στην επιφάνεια των μνημείων.Στον Παρθενώνα έχουν καταγραφεί και αναλυθεί ίχνη κόκκινου (αιματίτης) και κυανού (αιγυπτιακό μπλε) χρώματος, ενώ είναι ορατά ακόμα ίχνη του εγχάρακτου γραπτού διακόσμου (υπογραμμός). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ύπαρξη γραπτού διακόσμου διαπιστώνεται έμμεσα, από τη διαφορική διάβρωση που έχει υποστεί το μάρμαρο.

δ.Χαράγματα: Ακιδογραφήματα διαφόρων εποχών (ονόματα, σχέδια, επικλήσεις κ.ά.) διατηρούνται στις επιφάνειες των μνημείων. Τα χαράγματα αυτά αποτελούν πηγή ιστορικών πληροφοριών κυρίως της Χριστιανικής περιόδου [67-71].

3.2.3 Ιστορικά στοιχεία σχετικά με τη συντήρηση στα μνημεία της Ακρόπολης

Συστηματικές ή σωστικές εργασίες συντήρησης της επιφάνειας των μνημείων της Ακρόπολης έγιναν στο παρελθόν, στο πλαίσιο ευρύτερων αναστηλωτικών επεμβάσεων: πρόγραμμα Ν. Μπαλάνου (1898-1940), επεμβάσεις Υπηρεσίας Αναστηλώσεως Υπουργείου Πολιτισμού (1940-1960) και Εφορείας Ακροπόλεως (1960-1975).

Οι επεμβάσεις αυτές περιελάμβαναν τη συγκόλληση αποκολλημένων θραυσμάτων, τη στερέωση ετοιμόρροπων θραυσμάτων με σφραγίσεις ρωγμών και τη σφράγιση γενικά ρωγμών και αρμών για την αποτροπή της βλάστησης και της εισροής του νερού.

- Για τη συγκόλληση και τις σφραγίσεις χρησιμοποιήθηκε η κονία **Meyer** (ανόργανη κονία οξυχλωριούχου μαγνησίου ή κονία **Sorel**), με ποσοστό αδρανούς ανάλογα με τη χρήση.
- Για ενίσχυση των συγκολλήσεων και των στερεωτικών επεμβάσεων, χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τη δεκαετία του 1960 χάλκινα σύρματα με τη μορφή συνδετήρων και αργότερων ορειχάλκινες καρφίδες.

Τα σοβαρά μειονεκτήματα της κονιάς Sorel (υδατοδιαλυτότητα, άσκηση διωστικής δύναμης στο μάρμαρο και δημιουργία ρωγμών, περιεκτικότητα σε χλωριούχα άλατα) [69,70], οδήγησαν στην εγκατάλειψη της χρήσης της μετά τη σύσταση της ΕΣΜΑ και την αντικατάστασή της με λευκό τσιμέντο Portland. Η εμφανής χρήση των συνδέσμων και η διαμπερής τοποθέτηση καρφίδων εγκαταλείφθηκε επίσης μετά το 1975, και υιοθετήθηκε η τοποθέτηση αφανών καρφίδων από τιτάνιο [72,73].

3.2.4 Σημερινές εργασίες συντήρησης

Όλες οι φάσεις των εργασιών, καθώς και όλες οι πληροφορίες που επισημαίνονται για μορφολογικά, κατασκευαστικά στοιχεία ή παλαιότερες επεμβάσεις, τεκμηριώνονται. Προηγείται των εργασιών αναλυτική έκθεση με την εκτίμηση της κατάστασης της επιφάνειας που θα συντηρηθεί και πρόγραμμα αποκατάστασης.

Με χαρτογραφήσεις σε αρχιτεκτονικά σχέδια υπό κλίμακα αποτυπώνονται οι προηγούμενες επεμβάσεις, οι μορφές φθοράς των λίθων, τα ίχνη ιστορικών τεκμηρίων, οι επικαθίσεις, τα έγχρωμα επιφανειακά στρώματα, καθώς και όλη η πορεία των εργασιών. Η έναρξη, η εξέλιξη και το τέλος των επεμβάσεων συντήρησης συνοδεύονται από φωτογραφικές λήψεις, που αρχειοθετούνται. Τηρείται, επίσης, ημερολόγιο εργασιών, ενώ έχει αρχίσει και η ηλεκτρονική αρχειοθέτηση φωτογραφιών.

Η συντήρηση των μνημείων γενικά περιλαμβάνει τρεις φάσεις: τη στερέωση, τον καθαρισμό και την προστασία. Η φάση συντήρησης που σήμερα εφαρμόζεται σε

ευρεία κλίμακα στα μνημεία της Ακρόπολης, είναι η **στερέωση**. Η συστηματική εργασία στερέωσης της επιφάνειας ξεκίνησε στον Παρθενώνα το 1988 και επεκτάθηκε ως οργανωμένο πρόγραμμα στα Προπύλαια το 1990.

Η στερέωση περιλαμβάνει σειρά επεμβάσεων, που σκοπό έχουν να αποκαταστήσουν τα διάφορα συμπτώματα απώλειας της συνοχής του μαρμάρου [74,75]. Συγκεκριμένα:

α. Συγκολλήσεις: Τα αποκολλημένα ή ετοιμόρροπα θραύσματα μαρμάρου καθαρίζονται στην επιφάνεια θραύσης τους και συγκολλούνται με λευκό τσιμέντο Portland. Όταν το θραύσμα είναι υγιές η συγκόλληση ενισχύεται με την τοποθέτηση καρφίδων τιτανίου. Όταν πρόκειται να συγκολληθεί ένα σαθρό και μικρών διαστάσεων απολέπισμα, τότε χρησιμοποιείται κονίαμα μειωμένης αντοχής αποτελούμενο από μείγμα τσιμέντου και υδράσβεστου, με την προσθήκη ανθρακικού ασβεστίου σε αναλογία 6% του βάρους της υδρασβέστου [76].

β. Ενέματα: Σε περιπτώσεις όπου πιστοποιούνται εσωτερικά κενά (οπτικά ή με ηχοβολιστικό έλεγχο), αυτά καθαρίζονται με πεπιεσμένο αέρα, υδροβολή και υπεροξείδιο υδρογόνου και στη συνέχεια πληρώνονται με ένεμα τσιμέντου ή μείγματος τσιμέντου και ασβέστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της αντοχής .

γ. Σφραγίσεις: Σε περιπτώσεις αβαθών ρωγμών, καθώς και μετά την ολοκλήρωση μιας συγκόλλησης ή πλήρωσης, ο αρμός σφραγίζεται με κονίαμα μείγματος τσιμέντου, ασβέστη και χαλαζιακής άμμου. Στο κονίαμα προστίθεται χρωστική για τη χρωματική εναρμόνισή του με το αρχαίο μάρμαρο, καθώς και 6% του βάρους της υδρασβέστου σε ανθρακικό ασβέστιο, για την επιτάχυνση της σκλήρυνσης του κονιάματος.

δ. Εμποτισμός: Στις περιπτώσεις, όπου το μάρμαρο παρουσιάζει περικρυσταλλική αποσάθρωση (περίπτωση ζαχαροειδούς φθοράς και αποσάθρωσης σε βάθος), το μάρμαρο ψεκάζεται ή εμποτίζεται στάγδην με διάλυμα ή αιώρημα ασβέστη σε νερό, με τη προσθήκη 6% ανθρακικού ασβεστίου.

Μετά από ένα μακροχρόνιο ερευνητικό πρόγραμμα, που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών υπό τον καθηγητή Θ. Σκουλικίδη, αφού απορρίφθηκαν όλα τα προσφερόμενα εμπορικά προστατευτικά υλικά, σχεδιάστηκε ένα υλικό που βασίζεται στους n-ημιαγωγούς. Αυτοί είναι οξειδία

μετάλλων που αποκτούν τις ιδιότητες του ημιαγωγού, όταν παρασκευαστούν ηλεκτρολυτικά. Η δράση τους βασίζεται στην αναστολή της γυψοποίησης. Μεταξύ πολλών τέτοιων οξειδίων που δοκιμάστηκαν, απεδείχθη ότι το οξείδιο του αλουμινίου με φορέα αντιστρεπτό πολυμερές είναι το πλέον αποτελεσματικό. Η σύνθεση του υλικού είναι φορέας μεθακρυλικό αιθύλιο σε τολουόλιο 10% με προσθήκη ηλεκτρολυτικά παρασκευασμένου οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3), που είναι το συστατικό με τις ιδιότητες του n-ημιαγωγού. Ο n-ημιαγωγός, πέραν της προστασίας που προσφέρει στο μάρμαρο, προστατεύει και τον φορέα από την υπεριώδη ακτινοβολία και την γήρανση. Το υλικό αυτό έχει εφαρμοστεί πιλοτικά σε κίονα των Προπυλαίων και σε επιγραφή στο πλάτωμα της Ακρόπολης.

Το ζήτημα της βλάστησης αντιμετωπίζεται σε όλα τα μνημεία με την περιοδική εκρίζωση των διαφόρων φυτών και της σφράγιση ρωγμών και αρμών, ενώ το πρόβλημα της πρόληψης της ρύπανσης από τα περιστέρια δεν έχει ακόμα βρει ικανοποιητική λύση [77].

3.2.5 Υλικά συντήρησης

Τα υλικά συντήρησης που χρησιμοποιούνται, είναι **ανόργανα** υλικά επιλεγμένα για το πεντελικό μάρμαρο των μνημείων της Ακρόπολης. Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται, είναι **λευκό Portland** χαμηλής περιεκτικότητας σε θειικά άλατα. Η προσθήκη ασβέστη σε μορφή **υδρασβέστου**, στα εξωτερικά κονιάματα σφράγισης αυξάνει την πλαστικότητα του τσιμέντου και μειώνει τις αντοχές του, ενώ η επιλογή της **χαλαζιακής άμμου** ως αδρανούς έχει γίνει με κριτήριο την αδράνειά της στους όξινους ρυπαντές. Όπου χρησιμοποιείται ασβέστης (στα ενέματα, στις σφραγίσεις, στο ασβεστόνερο κ.τ.λ.) προστίθεται 6% ανθρακικό ασβέστιο (του βάρους της υδρασβέστου) στο μείγμα, προκειμένου να επιταχυνθεί η μετατροπή του σε ανθρακικό ασβέστιο και συνεπώς η σκλήρυνσή του). Η απομάκρυνση των κηλίδων σκουριάς από τους διαβρωμένους συνδέσμους επιτυγχάνεται με εξουδετερωμένο διάλυμα **θειογλυκολικού οξέος**. Για την άμβλυνση της χρωματικής αντίθεσης του νέου μαρμάρου των συμπληρωμάτων με το αρχαίο μάρμαρο των αρχιτεκτονικών μελών εφαρμόζεται η τεχνητή πάτινα. Η σύνθεση του υλικού βασίζεται στη βασική ιδέα του προστατευτικού υλικού και αποτελείται από φορέα **μεθακρυλικό αιθύλιο**

σε τολουόλιο 10%, με προσθήκη ηλεκτρολυτικά παρασκευασμένου οξειδίου του σιδήρου και ανόργανες χρωστικές [76,77].

Κεφάλαιο 4: Πειραματικό Μέρος

4.1 Σκοπός και Σχεδιασμός

Σκοπός αυτής της ερευνητικής εργασίας είναι η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της ανάπτυξης ενός θερμικού μοντέλου και η εξέταση της αξιοπιστίας του, έτσι ώστε σε ένα επόμενο βήμα να μπορέσει να μελετηθεί η θερμική καταπόνηση του πεντελικού μαρμάρου σε αρχαία μνημεία, και συγκεκριμένα στον Παρθενώνα της Ακρόπολης Αθηνών. Η μελέτη χωρίζεται σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου προσομοίωσης της μεταφοράς θερμότητας στο πεντελικό μαρμάρου μέσα από τη θεωρητική προσέγγιση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας. Το δεύτερο στάδιο της εργασίας αποτελείται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της θερμογραφίας υπερύθρου για τη μέτρηση της θερμοκρασιακής κατανομής του μνημείου. Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των κίωνων του Παρθενώνα σε διαφορετικά σημεία με αισθητήρες επαφής και της σχετικής υγρασίας με θερμουγρόμετρο που αποδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Είναι η πρώτη φορά που συνδυάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο με τη μη καταστρεπτική τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου σε ένα ελληνικό μνημείο και μάλιστα τόσο μεγάλης σημασίας όπως ο Παρθενώνας της Ακρόπολης Αθηνών.

Πίνακας 4.1.1: Περιγραφή των τριών σταδίων της εργασίας

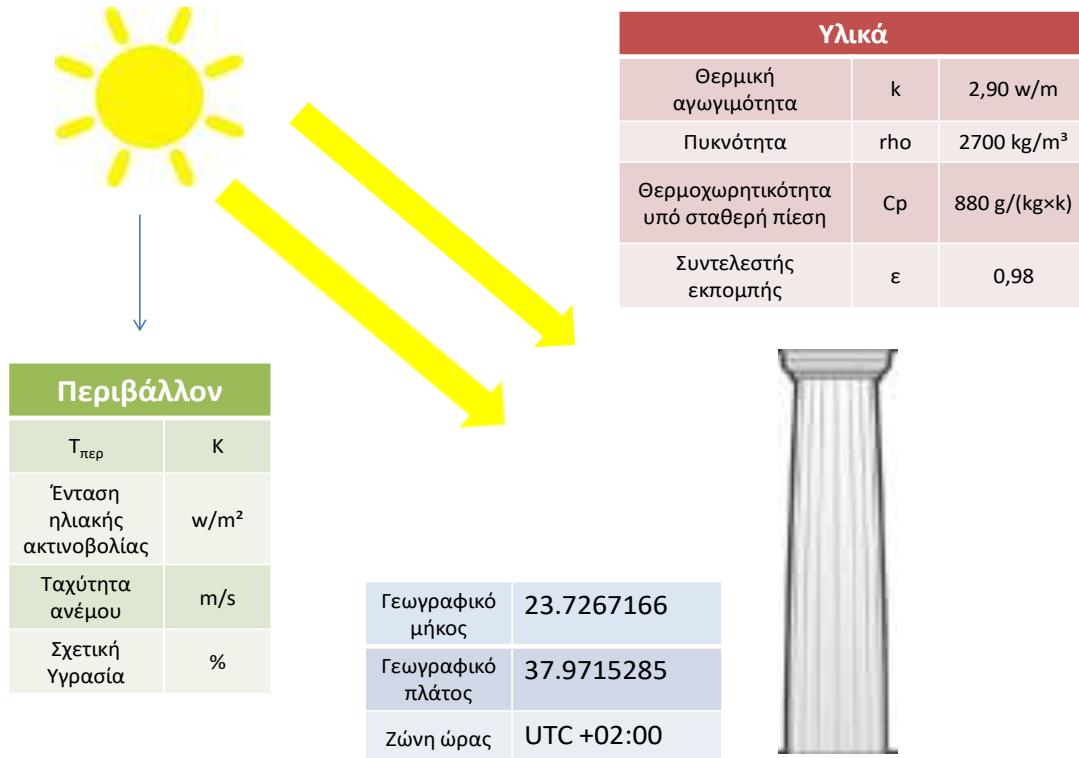
Διαστάσεις	Μέθοδος/ Υπολογιστικό Πρόγραμμα	Αποτελέσματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1D	Μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής και υγρόμετρο	Θερμοκρασίες επιφάνειας των κίωνων , Θερμοκρασία και σχετική υγρασία του	-Ακρίβεια -τιμές ελέγχου	- δυσκολία στην πρόσβαση σε ορισμένα σημεία (απαιτείται χρήση ικριώματος) - μόνο επιφανειακές μετρήσεις

		μικροκλίματος του μνημείου		θερμοκρασίας
2D	Θερμογραφία Υπερύθρου	Θερμοκρασιακή Κατανομή σε όλη την όψη του Παρθενώνα	-Δυνατότητα διάγνωσης φθοράς της επιφάνειας - κατανομή θερμοκρασίας ολόκληρης όψης του μνημείου	-Επηρεάζεται από την απόσταση, τον άνεμο και τη βροχή -Δυσκολία στην πρόσβαση σε όλα τα σημεία -Επιφανειακή μέθοδος
3D	Θερμικό μοντέλο προσομοίωσης	Εξωτερική και εσωτερική κατανομή θερμοκρασίας ενός κίονα	-Δυνατότητα εκτίμησης στο εσωτερικό του κίονα -Εύκολη εφαρμογή -Πρόβλεψη συμπεριφοράς σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες -Δυνατότητα να υπολογίζει τη μεταφορά θερμότητας σε βάθος χρόνου -Δυνατότητα εκτέλεσης της προσομοίωσης όχι στο φυσικό χώρο του	-Δεν υπάρχει η δυνατότητα να συνυπολογίζεται η φθορά -Σε αυτό το στάδιο της προσομοίωσης η γεωμετρία του κίονα δεν είναι ακριβής -Χρειάζεται η εισαγωγή της τιμής θερμοκρασίας της βάσης του κίονα ως οριακή συνθήκη

Πίνακας 4.1.2: Μέτρηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και επιφάνειας

$T_{\text{επιφ}}$	1. Θερμογραφία υπερύθρου 2. Αισθητήρα επαφής
$T_{\text{περ}}$	Θερμοϋγρόμετρο

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας μελετήθηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας διακρίνονται στις ιδιότητες του ίδιου του υλικού (πεντελικού μαρμάρου): τη θερμική αγωγιμότητα (k), την πυκνότητα (d), το συντελεστή εκπομπής (ϵ) και τη θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση (C_p) και στους παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον: τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T), την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (I_s), την ταχύτητα του ανέμου (V_w) και τη σχετική υγρασία (RH%). Επιπλέον, ένας ακόμη παράγοντας είναι η θέση του μνημείου και οι γεωγραφικές του συντεταγμένες.



Εικόνα 4.1.1: Σχεδιάγραμμα των παραγόντων

Η τεχνική της θερμογραφίας υπεράυθρου εφαρμόστηκε με σκοπό τη διάγνωση της φθοράς στις μαρμάρινες επιφάνειες σε ένα τόσο μεγάλο και σημαντικό μνημείο όπως η Ακρόπολη Αθηνών (και συγκεκριμένα στα μνημεία του Παρθενώνα, του Ερεχθείου και των Προπυλαίων) για πρώτη φορά στα πλαίσια της προπτυχιακής εργασίας. Επικουρικά, στα πλαίσια της ίδιας εργασίας μελετήθηκε η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων (απόσταση, ώρα, θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου) σε μία προσέγγιση προτυποποίησης της μεθόδου. Με βάση τα αποτελέσματα της προπτυχιακής εργασίας λοιπόν, αυτή η μεταπτυχιακή εργασία ερευνά περαιτέρω τη συμβολή ενός θερμικού μοντέλου για τη θερμική καταπόνηση του πεντελικού μαρμάρου, στη διάγνωση της επιφανειακής φθοράς του μνημείου, στην αποτίμηση των επεμβάσεων αποκατάστασης και τέλος στην δημιουργία ενός συστήματος παρακολούθησης του μνημείου (monitoring) και ποιες θερμοκρασιακές μεταβολές καταγράφονται ανάλογα με την εποχή.

4.2 Μέθοδοι και όργανα

4.2.1 Λογισμικό Comsol Multiphysics

Για την δημιουργία του θερμικού μοντέλου για τη μελέτη περιοχών στο μνημείο του Παρθενώνα μετά από τη βιβλιογραφική έρευνα επιλέχθηκε το λογισμικό Comsol Multiphysics 5.2. Το Comsol Multiphysics αποτελείται από διάφορα υποπρογράμματα το κάθε ένα εκ των οποίων αποτελεί ένα αυτοτελές μοντέλο με εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος όταν αυτό οριστεί πλήρως από το χρήστη. Για να οριστεί πλήρως ένα πρόβλημα (αφού σχεδιαστεί η μελετώμενη γεωμετρία στην επιφάνεια εργασίας) πρέπει για το κάθε μοντέλο να οριστούν οι εξισώσεις χωρίου, οι συνοριακές συνθήκες, οι αρχικές τιμές και οι σταθερές που περιέχονται στις εξισώσεις κάθε μοντέλου.

Με το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου, τρισδιάστατη απεικόνιση του αντικειμένου εισάγοντας τα αντίστοιχα σχέδια καθώς και την δυνατότητα εισαγωγής χαρακτηριστικών των υλικών του μνημείου αλλά και η επιλογή των οριακών συνθηκών από το χρήστη

4.2.2 Θερμογραφία Υπερύθρου

Αρχές της Μεθόδου

Η θερμογραφία υπερύθρου είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική κατά την οποία μετριέται και καταγράφεται η διαβάθμιση της θερμοκρασίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του υλικού ή ενός σώματος, στην υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το αποτέλεσμα της καταγραφής αυτής είναι το θερμογράφημα, το οποίο είναι μία θερμική εικόνα και η οποία μπορεί να παρουσιαστεί είτε σε έγχρωμη είτε σε ασπρόμαυρη μορφή [90-92].

Υπέρυθρο φάσμα

Η υπέρυθρη ακτινοβολία καλύπτει την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τα 0,75 έως 1000 μm . Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα υλικά λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων τους. Η κίνηση αυτή γίνεται πιο έντονη με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται με την μείωσή της. Αφού όλα τα μόρια αποτελούνται από ηλεκτρικά φορτία, οι ταλαντώσεις των μορίων δημιουργούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ένταση, η συχνότητα και το μήκος της υπέρυθρης ακτινοβολίας ελέγχεται βασικά από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της πηγής και από την ικανότητα εκπομπής του υλικού [45].

Βασικές αρχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η πιο βασική αρχή είναι γνωστή ως νόμος του Kirchoff, ο οποίος είναι αποτέλεσμα του ότι κατά την θερμική ισορροπία η ισχύς της ακτινοβολίας του υλικού πρέπει να είναι ίση με την ισχύ της απορροφητικής του ικανότητας. Καθώς η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας, η εκπεμπόμενη ισχύς είναι μέγιστη για ένα ιδανικό απορροφητικό μέσο. Για λιγότερο απορροφητικά υλικά, η εκπομπή είναι αντίστοιχα χαμηλότερη και μπορεί να εκφραστεί από το νόμο του Kirchoff, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$a = e \quad (4.2.1)$$

a = απορροφητικότητα

e = συντελεστής εκπομπής, παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εκφράζει την χαρακτηριστική εκπομπή κάθε επιφάνειας.

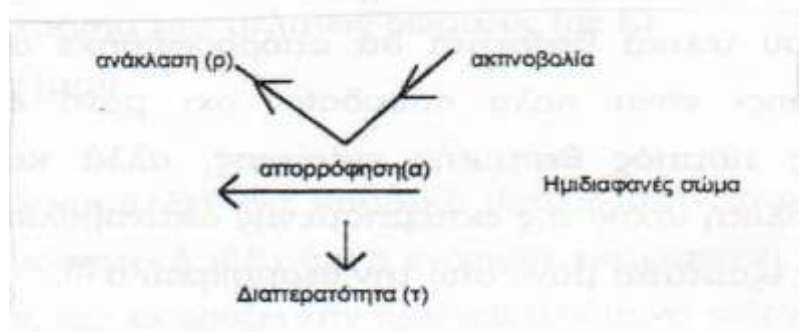
Ο νόμος αυτός ισχύει για κάθε υλικό και μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε μήκος κύματος.

Ανάκλαση, διαπερατότητα, απορρόφηση

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από μια πηγή συναντήσει ένα υλικό, μέρος αυτής το διαπερνά, ανακλάται ή απορροφάται από το υλικό. Εάν όλη η ακτινοβολία πέσει πάνω στο υλικό τότε ισχύει η σχέση:

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (4.2.2)$$

Όπου τ , ρ και α είναι αντίστοιχα η διαπερατότητα, η ανάκλαση και η απορρόφηση του υλικού.



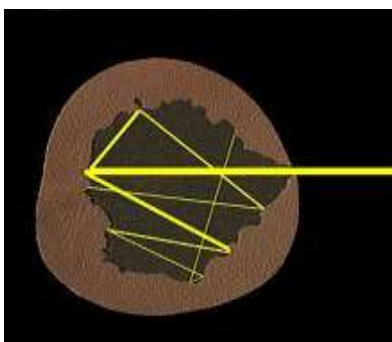
Εικόνα 4.2.2.1: Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ένα ημιδιαπερατό σώμα

Αν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας διαπεράσει το υλικό, τότε το υλικό αυτό θα λέγεται διαφανές. Ακόμη διακρίνουμε αδιαφανή υλικά (ακτινοβολούν μόνο από την επιφάνεια τους) και ημιδιαπερατά (ακτινοβολούν από τη μάζα τους). Τέλος υπάρχουν εξαιρετικά λιασμένα υλικά που αντανακλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω τους και ονομάζονται κάτοπτρα. Η απορροφητική ικανότητα των υλικών αυξάνει όταν η επιφάνεια τους είναι ανώμαλη.

Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Ως μέλαν σώμα ονομάζεται ένα αντικείμενο το οποίο απορροφά όλη την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό σε οποιοδήποτε μήκος κύματος. Η ονομασία «μέλαν» που σχετίζεται με ένα σώμα το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία εξηγείται από το νόμο του Kirchhoff, που αναφέρει ότι ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία σε οποιοδήποτε μήκος κύματος, είναι εξίσου ικανό να την εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο νόμος του Kirchhoff οδηγεί σε μια πολύ σημαντική έννοια, αυτή του ιδανικού απορροφητή ή «μέλανος σώματος» (black body), που είναι επίσης και ο πιο σημαντικός πομπός θερμικής ακτινοβολίας. Ένα μελανό σώμα μπορεί να περιγραφεί με ένα άνοιγμα που οδηγεί σε μια κοιλότητα, τα τοιχώματα της οποίας είναι μαύρα και έχουν σταθερή θερμοκρασία (εικόνα 3.1.2). Ακόμα και αν ο συντελεστής απορρόφησης των τοιχωμάτων είναι μικρότερος της μονάδας, η ακτινοβολία που διέρχεται από το άνοιγμα θα υποστεί τόσες πολλές ανακλάσεις πριν εξέλθει, που τελικά θεωρείται ότι απορροφήθηκε ολικά. Η έννοια του «μέλανος σώματος» είναι πολύ σπουδαία, όχι μόνο επειδή

είναι ο πιο αποτελεσματικός πομπός θερμικής ενέργειας, αλλά και γιατί μπορεί να αποδείξει ότι η ολική ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και ο φασματικός διαχωρισμός της εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία.



Εικόνα 4.2.2.2: Μέλαν σώμα

Οι παρακάτω σχέσεις περιγράφουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα.

Νόμος του Planck: Ο Planck περιέγραψε την κατανομή του φάσματος που εκπέμπεται από μέλαν σώμα με την παρακάτω σχέση:

$$W_{\lambda,b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} 10^{-6}, W/(m^2 \mu m) \quad (4.2.3)$$

όπου

$W_{\lambda,b}$: το φάσμα εκπομπής του μέλανος σώματος σε μήκος κύματος λ

c : η ταχύτητα του φωτός = 3×10^8 m/sec

h : η σταθερά του Planck = 6.6×10^{-34} Joule/sec

k : η σταθερά Boltzmann = 1.4×10^{-23} Joule/K

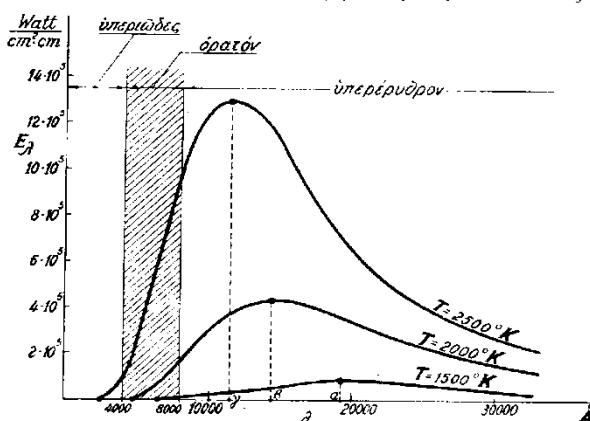
T : η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος (σε K)

λ : το μήκος κύματος (μm)

Ο νόμος του Planck αποτελεί ένα κομβικό σημείο στην ιστορία της φυσικής, εισάγοντας την επαναστατική ιδέα ότι η ενέργεια εκπέμπεται και απορροφάται υπό μορφή κβάντων, και εκφράζει την ακτινοβολούμενη ενέργεια ενός μελανού σώματος θερμοκρασίας T , κάθετα προς τη διεύθυνση διαδόσεως της ακτινοβολίας, ανά μονάδα μήκους και ανά μονάδα στερεάς γωνίας.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση χαρακτηριστικών φασμάτων εκπομπής π.χ. το ακτινόμετρο, πρέπει να χρησιμοποιούν μία περιορισμένη ζώνη ακτινοβολίας προκειμένου να καταγράφεται μία ένδειξη. Γι' αυτό μία τιμή της εκπομπής ακτινοβολίας φάσματος δεν έχει νόημα εκτός και αν καθορίζεται η περιοχή του φάσματος.

Η εξίσωση του Planck, όταν παρουσιάζεται γραφικά για διάφορες θερμοκρασίες, παράγει μία σειρά από καμπύλες. Όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο.



Εικόνα 4.2.2.3: Κατανομή της ενέργειας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες

Νόμος μετατόπισης του Wien (Wien's Displacement Law). Αν διαφορίσουμε τη σχέση του Planck και βρούμε το μέγιστο της, τότε θα πάρουμε την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_{\max} = (2898/T) \quad (4.2.4)$$

Η σχέση αυτή μας δίνει τη μέγιστη κορυφή λ_{\max} σε μm που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία T (Kelvin) για ένα σώμα που εκπέμπει. Για παράδειγμα παρατηρώντας ένα πυρακτωμένο φύλλο σιδήρου που έχει θερμοκρασία 1.000 K, η κορυφή θα είναι περίπου 3μm. Σε αυτήν την περίπτωση το θερμόμετρο Herschel υποδεικνύει μια μέγιστη θερμοκρασία πέρα από την κόκκινη περιοχή του ορατού φάσματος (0,7μm). Η σχέση αυτή εκφράζει μαθηματικά την κοινή παρατήρηση ότι τα χρώματα αλλάζουν από κόκκινο σε πορτοκαλί ή κίτρινο καθώς η θερμοκρασία του πομπού

αυξάνεται. Το μήκος κύματος είναι το ίδιο με αυτό που υπολογίστηκε για λ_{\max} . Έτσι ένα πολύ ζεστό αστέρι όπως ο Σείριος (11.000 K) ακτινοβολεί με την κορυφή του φάσματος στο υπεριώδες φάσμα σε μήκος κύματος 0.27 μm . Ο ήλιος (περίπου 6.000 K) εκπέμπει κίτρινο φως, με κορυφή στα 0.5 μm στο μέσο του ορατού φάσματος. Σε θερμοκρασία δωματίου (300 K), η κορυφή της ακτινοβολίας εκπομπής είναι 9,7 μm , στο υπέρυθρο. Στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου (77 K), το μέγιστο του σχεδόν ασήμαντου ποσού ακτινοβολίας εκπομπής παρουσιάζεται στα 38 μm , επίσης στο υπέρυθρο.

Νόμος Stefan Boltzmann Ολοκληρώνοντας τη σχέση του Planck από $\lambda=0$ έως $\lambda=\infty$ παίρνουμε την ολική ακτινοβολία (W_b) ενός μέλανος σώματος:

$$W_b = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.2.5)$$

όπου

S: η σταθερά Boltzmann = $5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$

T: σε βαθμούς Kelvin

Η παραπάνω σχέση αναφέρει ότι η συνολική ικανότητα εκπομπής ενός μέλανος σώματος είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης του θερμοκρασίας [92-93].

Ακτινοβολία Μη Μέλανος (γκρίζου) Σώματος

Τα πραγματικά αντικείμενα ή έγχρωμα σώματα σχεδόν ποτέ δεν ακολουθούν τους νόμους ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, σε μία ευρεία περιοχή μήκους κύματος, αν και μπορεί να προσεγγίζουν την συμπεριφορά του μέλανος σώματος σε συγκεκριμένα διαστήματα φάσματος. Για παράδειγμα η λευκή βαφή εμφανίζεται απόλυτα λευκή στο ορατό φάσμα, γκρι σε μήκος κύματος 2 μm και σχεδόν μαύρη στα 3 μm .

Υπάρχουν τρεις διεργασίες που μπορεί να συμβούν και εμποδίζουν ένα πραγματικό αντικείμενο από το να συμπεριφερθεί ως μέλαν σώμα. Ένα μέρος της ακτινοβολίας (α) μπορεί να απορροφηθεί, ένα άλλο (ρ) μπορεί να ανακλαστεί και ένα τρίτο μέρος (τ) μπορεί να μεταδοθεί. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ . Έτσι:

- απορρόφηση ακτινοβολίας $\alpha_\lambda = \mu$ το λόγο της απορροφούμενης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο, προς την προσπίπτουσα,
- ανάκλαση της ακτινοβολίας $\rho_\lambda = \mu$ το λόγο της ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα αντικείμενο προς την προσπίπτουσα.
- Μεταδιδόμενη ακτινοβολία $\tau_\lambda = \mu$ το λόγο της ακτινοβολίας που διαπερνά διαμέσου ενός αντικειμένου προς την προσπίπτουσα .

Το άθροισμα αυτών των συντελεστών σε κάθε μήκος κύματος πρέπει να ισούται με την μονάδα.

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4.2.6)$$

Συντελεστής εκπομπής

Ο συντελεστής εκπομπής ϵ , απαιτείται για να περιγράψει το μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος, που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Ο φασματικός συντελεστής εκπομπής ϵ_λ ισούται με το λόγο της ενέργειας που εκπέμπει ένα αντικείμενο, προς την ενέργεια που εκπέμπει το μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος.

Ως μαθηματική έκφραση αποτελεί το λόγο της εκπομπής φάσματος του αντικειμένου προς αυτή του μέλανος σώματος.

$$\epsilon_\lambda = W_{\lambda o} / W_{\lambda b} \quad (4.2.7)$$

Όπου,

$W_{\lambda o}$ = η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε συγκεκριμένη περιοχή φάσματος.

$W_{\lambda b}$ = η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα.

Γενικά υπάρχουν τρία είδη πηγών θερμικής ακτινοβολίας που διακρίνονται με βάση τους τρόπους με τους οποίους η εκπομπή φάσματος του καθενός μεταβάλλεται με το μήκος κύματος.

- ένα μέλαν σώμα για το οποίο $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$, το ϵ ανεξάρτητο από το μήκος κύματος
- ένα μη μέλαν σώμα για το οποίο $\epsilon_\lambda = \epsilon = \text{σταθερό}$ και μικρότερο του 1 και ανεξάρτητο του μήκους κύματος
- εκλεκτικός πομπός θερμικής ακτινοβολίας (selective radiation) όπου το ϵ_λ μεταβάλλεται με το μήκος κύματος.

Σύμφωνα με το νόμο του Kirchoff, για κάθε σώμα ο συντελεστής εκπομπής και η φασματική απορρόφηση ενός σώματος είναι ίσες σε κάθε θερμοκρασία και μήκος κύματος.

Για εξαιρετικά λιασμένα σώματα, το ϵ_{λ} πλησιάζει το μηδέν ώστε για υλικά που ανακλούν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία (τέλειο κάτοπτρο) να ισχύει $\rho_{\lambda}=1$.

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του ϵ για ένα μη μέλαν πομπό θερμικής ακτινοβολίας η εξίσωση Stefan Boltzmann γίνεται:

$$W = \epsilon S T^4, W/m^2 \quad (4.2.8)$$

S=σταθερά Boltzmann

Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι η συνολική ικανότητα εκπομπής ενός μη μέλανος σώματος είναι ίδια με αυτή ενός μέλανος στην ίδια θερμοκρασία-μειωμένη ανάλογα κατά την τιμή του ϵ για το μη μέλαν.

Τυπικές τιμές συντελεστή εκπομπής

Οι τιμές του ϵ που λαμβάνονται με τη χρήση οργάνου θερμικών μετρήσεων, είναι ο μέσος όρος των ϵ_{λ} που απαντώνται πέρα από το διάστημα του υπέρυθρου φάσματος που χρησιμοποιούνται από αυτό το όργανο. Αν το ϵ_{λ} μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, το ϵ (μέση τιμή) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αντικειμένου. Ανοξείδωτα υλικά αποτελούν ακραία περίπτωση σχεδόν τέλειας αδιαφάνειας και υψηλής αντανάκλαστικότητας, η οποία μεταβάλλεται πολύ με το μήκος κύματος. Συνεπώς ο συντελεστής εκπομπής των μετάλλων είναι χαμηλός, όμως αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για τα μη μέταλλα ο συντελεστής εκπομπής τείνει να είναι μεγάλος και μειώνεται με τη θερμοκρασία. Τυπικές τιμές συντελεστή εκπομπής για μια ποικιλία κοινών υλικών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως οδηγός, επειδή αυτές εξαρτώνται από την περιοχή του φάσματος που ανταποκρίνεται το όργανο [93].

Πίνακας 4.2.2.1: Τυπικές τιμές συντελεστή εκπομπής

ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ °C	ϵ
Μπρούτζος	100	0,03
Χαλκός	100	0,05
Χάλυβας	100	0,07

Επιχρίσματα	0-100	0,91
Ασβεστόλιθος	40	0,93
Μάρμαρο (λευκό)	40	0,95
Μάρμαρο (Γκρί)	40	0,94
Σίδηρος	40	0,21
Άσφαλτος	30	0,94
Πλίνθος	20	0,93
Γυαλί	20	0,94
Νερό	20	0,96
Ξύλο	20	0,90
Χαρτί	20	0,93

Συστήματα Ανίχνευσης και Καταγραφής της Υπέρυθρης Ακτινοβολίας

Η ανίχνευση και η καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς και η δυνατότητα οπτικοποίησης της, έτσι ώστε να είναι κατανοητή από τον άνθρωπο, αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο στη συντήρηση έργων τέχνης και μνημείων.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας:

- Καταγραφή της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας.
- Καταγραφή της ανακλώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας μετά από εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας επάνω στο εξεταζόμενο σώμα.
- Καταγραφή ενός μίγματος ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Μήκος Κύματος Θερμογραφικών Συστημάτων

Στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διακρίνονται δύο περιοχές μήκους κύματος, οι οποίες είναι διαπερατές από την ατμόσφαιρα και που χρησιμοποιούνται από τα θερμογραφικά συστήματα. Αυτές συνήθως είναι οι εξής: 2-5,6μm (χαμηλού-μεσαίου μήκους κύματος) και 8-14μm (υψηλού μήκους κύματος). Η επιλογή του κατάλληλου μήκους κύματος εξαρτάται συνήθως από την εφαρμογή. Γενικότερα πάντως ισχύει ότι:

- Τα θερμογραφικά συστήματα χαμηλού-μεσαίου μήκους κύματος έχουν μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες (\geq της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Περιορίζονται όμως όσον αφορά στην απόσταση καταγραφής-ελέγχου, σε περίπτωση που θέλουμε όμως μόνο ακρίβεια στην μέτρηση της θερμοκρασίας και όχι για εντοπισμό, η οποία κυμαίνεται περίπου στα 200m .
- Τα θερμογραφικά συστήματα υψηλού μήκους κύματος από την άλλη, έχουν μεγάλη ευαισθησία στις χαμηλές θερμοκρασίες (\leq της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή μεγαλύτερων αποστάσεων, καθώς η ατμόσφαιρα εξασθενεί λιγότερο στα υψηλά μήκη κύματος.

Διακριτική Ικανότητα Θερμογραφικών Συστημάτων

Η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου-υλικού προς εξέταση, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν, κατά την διαδικασία των μετρήσεων. Για παράδειγμα, εάν η απόσταση μεταξύ της κάμερας και ενός θερμού αντικειμένου είναι μεγάλη, τότε θα έχουμε χαμηλότερες από ότι στην πραγματικότητα θερμοκρασιακές μετρήσεις. Είναι επίσης σημαντικό να γνωρίζει κανείς την αναλογία του μεγέθους του σημειακού φωτός του φακού, καθώς έτσι μπορεί να προσδιοριστεί το ελάχιστο μέγεθος του αντικειμένου προς εξέταση. Το μέγεθος αυτό διαφοροποιείται, αφού εξαρτάται από τον φακό και την κάμερα.

$$\text{Ελάχιστο Μέγεθος Αντικειμένου} = \frac{\text{Απόσταση από το Αντικείμενο}}{\text{Αναλογία Μεγέθους Σημειακού Φωτός}}$$

Θερμογραφικός Έλεγχος

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις – μεθοδολογίες θερμογραφικού ελέγχου:

α. Η **παθητική** προσέγγιση (passive): Με τον παθητικό θερμογραφικό έλεγχο εξετάζονται υλικά και κατασκευές που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασιακή κλίμακα από το περιβάλλον (συνήθως υψηλότερη), δηλ. αφορά σε εφαρμογές που το υλικό περιέχει τη δική του πηγή θερμότητας (π.χ. το ανθρώπινο σώμα) ή ως πηγή θερμότητας λαμβάνεται η ηλιακή ακτινοβολία.

Κατά τη μέθοδο αυτή καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας.

Τα κυριότερα μέρη του εξοπλισμού είναι :

1. Μια κάμερα υπέρυθρου (imager).
2. Ένας τρίποδας στήριξης της κάμερας
3. Προσωπικός υπολογιστής με κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία των θερμογραφημάτων.

β. Η **ενεργητική** προσέγγιση (active): Στην ενεργητική μέθοδο ελέγχου χρησιμοποιείται μία εξωτερική πηγή διέγερσης των υλικών που εξετάζονται. Ποιοτικά ο μηχανισμός λειτουργίας της είναι ο εξής: Με τη βοήθεια της εξωτερικής πηγής διέγερσης το υπό εξέταση υλικό δέχεται ένα θερμικό παλμό, ο οποίος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των 3,8-47Btu (4-49,6KJ). Η θερμοκρασία του υλικού μεταβάλλεται απότομα μετά την εφαρμογή του θερμικού παλμού, λόγω φαινομένων διάχυσης της ακτινοβολίας κάτω από την επιφάνεια και απωλειών λόγω φαινομένων μεταφοράς με συναγωγή και ακτινοβολία. Η παρουσία ενός άλλου υλικού ή κενού μειώνει το ρυθμό διάχυσης. Παρατηρώντας τη θερμοκρασία στην επιφάνεια, η ανομοιογένεια του υλικού φαίνεται σαν περιοχή με διαφορετική θερμοκρασία σε σχέση με τη γύρω «υγιή» ομοιογενή περιοχή. Επιπλέον η ανομοιογένεια σε μεγαλύτερο βάθος παρατηρείται αργότερα με μειωμένη οπτική αντίθεση (contrast).

Η εφαρμογή του ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου σε ένα υλικό-κατασκευή με τη λήψη θερμογραφημάτων της θερμοκρασίας της επιφάνειας, μετά από μια διαδικασία θέρμανσης-ψύξης, μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με το εσωτερικό του υλικού-κατασκευής. Θεωρητικά γνωρίζοντας, από τη μια, τη διάρκεια και την ένταση του εφαρμοζόμενου παλμού και την ιδιότητα της διάχυσης και αγωγή θερμότητας, από την άλλη, (στο βαθμό που είναι δυνατόν να εκτιμηθούν αυτές) είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι το τέλος της ψύξης και στη συνέχεια, το βάθος από το οποίο προέρχεται η θερμική πληροφορία κατά τη διάρκεια της ψύξης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να σχηματιστεί μια θερμική τομογραφία της εξεταζόμενης επιφανείας.

Η εξωτερική πηγή μπορεί να ψύξει ή να θερμάνει το εξεταζόμενο υλικό

Για να ψυχθεί το υλικό χρησιμοποιούνται :

- Συσκευές εκτόξευσης ψυχρού νερού
- Συσκευές εκτόξευσης ψυχρού αέρα/αερίου
- Χιόνι ή πάγος
- Σάκοι με ψυχρό νερό

Για να θερμανθεί το υλικό χρησιμοποιούνται :

- Υψηλής ισχύος κινηματογραφικές λάμπες
- Υπέρυθρες λάμπες χαλαζία
- Υψηλής ισχύος φωτογραφικά φλάς
- Ακτίνα Laser
- Συσκευές θερμότητας, εκτοξευτές θερμού νερού/αέρα, σάκοι θερμού νερού

Η τεχνική όμως της θερμογραφίας υπερύθρου παρουσιάζει δυσκολίες στην εφαρμογή τους κυρίως στις εκτεταμένες κατασκευές για τρεις λόγους:

- Σε μια κατασκευή τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο.
- Η κατάσταση φθοράς της κατασκευής, που τροποποιεί τις φυσικές (πορώδες, θερμική αγωγιμότητα) και τις οπτικές παραμέτρους (ανάκλαση, συντελεστή εκπομπής) της επιφάνειας, θεμελιώδεις για τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς των εξεταζομένων υλικών, είναι σε μεγάλο βαθμό ανομοιογενής.
- Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες δε μπορούν να παραμετροποιηθούν με ακρίβεια σε ένα θερμοδυναμικό μοντέλο του συστήματος κατασκευής-περιβάλλοντος.

Δεδομένου της πολυπλοκότητας των φαινομένων και της ανομοιογένειας που παρουσιάζει πολλές φορές μια κατασκευή, κρίνεται απαραίτητο για τη μείωση της δυσκολίας και της αβεβαιότητας στην ανάγνωση των θερμογραφημάτων που αφορούν στην ανίχνευση των ασυνεχειών της κατασκευής, να προηγείται συλλογή οποιονδήποτε πληροφοριών για την υπό εξέταση κατασκευή [46].

Οι παραπάνω λόγοι είναι πεδία σύγχρονης έρευνας στην προτυποποίηση της τεχνικής.

Τεχνικές Λήψης Θερμογραφημάτων

Ιδιαίτερα στις επί τόπου μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των θερμογραφημάτων.

Οι σύγχρονες θερμικές κάμερες είναι ικανές να διακρίνουν θερμοκρασιακές μεταβολές στην επιφάνεια τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Για τον ποσοτικό υπολογισμό των θερμοκρασιακών μεταβολών, θα πρέπει διάφορες παράμετροι να εισαχθούν στο λογισμικό για να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις, όπως: η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η απόσταση από την επιφάνεια λήψης και ο συντελεστής εκπομπής του υλικού.

Γενικά, οι επί τόπου εφαρμογές σε κτίρια υπό λειτουργία πραγματοποιούνται μετά την δύση του ήλιου με την θερμότητα να λειτουργεί μέσα στο κτίριο για να παράγει τις απαραίτητες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών επιφανειών. Είναι απαραίτητο η θέρμανση να έχει αρχίσει να λειτουργεί κάποιες ώρες πριν τον έλεγχο (στην περίπτωση εφαρμογής ενεργητικής θερμογραφίας) για να μπορέσει να αναπτυχθεί μια θερμική διαβάθμιση μεταξύ των τοίχων και/ή της στέγης. Για καλύτερα αποτελέσματα, τέτοιες έρευνες καλύτερα να πραγματοποιούνται μεταξύ της άνοιξης και του φθινόπωρου. Σε αυτές τις εποχές, η ηλιακή επίδραση συχνά διαχέεται και οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και το απόγευμα. Τους καλοκαιρινούς μήνες προτείνεται οι μετρήσεις να πραγματοποιηθούν ακόμη και πριν την αυγή.

Επιπρόσθετα οι δυνατοί άνεμοι μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητα των ερευνών πεδίου λόγω της επιρροής τους στην κατανομή της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Αντίστοιχα, η βροχή μπορεί να οδηγήσει στην ψύχρανση της επιφάνειας, και την συγκάλυψη των θερμικών φαινομένων που υπάρχουν κάτω αυτή. Επίσης, τα λιμνάζοντα νερά στις οροφές πρέπει να αποφευχθούν.

Γενικά, η χρήση θερμικής κάμερας με μεγάλα μήκη κύματος είναι πιο αποτελεσματική για την επιθεώρηση κτιρίων όπου το εύρος θερμοκρασίας κυμαίνεται από 27-65°C. Για αυτό λοιπόν, χρησιμοποιούνται για εξωτερικές εφαρμογές σε περιοχές με θερμά κλίματα. Από την άλλη πλευρά, τα μικρά μήκη κύματος χρησιμοποιούνται για επιθεώρηση στέγης και λαμβάνουν υπόψη το

επίπεδο έκθεσης της ηλιακής ακτινοβολίας και το φαινόμενο της ανάκλασης που αναφέρθηκε παραπάνω.

Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι ορισμένα υλικά όπως επενδυμένα κεραμίδια και μωσαϊκά μπορεί να εμποδίζουν την θερμική μετάδοση μέχρι το υπόστρωμα. Το plexiglass και το γυαλί μπορεί να είναι πρακτικά αδιαφανή στα υπέρυθρα μήκη κύματος. Αυτό το γεγονός για παράδειγμα μπορεί να περιορίζει την αποτελεσματικότητα ερευνών κτιριακών κελυφών.

Παρακάτω αναφέρονται πρότυπα για την εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου σε κτιριακά κελύφη[108-109]:

Πίνακας 4.2.2.2: Πρότυπα για την εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου

ASTM C-1060	Thermographic Inspection of insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings
ISO 6781	Thermal insulation, qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes, Infrared Method
ASTM E1186	Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Barrier Systems
Canadian National Master Specification	Thermographic Inspection Services of Building Envelope

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει πρότυπο για την εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου σε μνημεία ή ιστορικά κτίρια ούτε για την εξέταση των υλικών μιας κατασκευής.

Βασικές εφαρμογές της θερμογραφίας Υπερύθρου στα κτίρια και στα μνημεία

Η θερμογραφία υπερύθρου είναι πλέον καθιερωμένο εργαλείο για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο και τη συνεχή παρακολούθηση. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές εφαρμογές σε στρατιωτικά, εργοστασιακά, μηχανικά και ιατρικά πεδία. Χρησιμοποιείται για να διερευνήσει μεγάλο εύρος καταστάσεων/περιπτώσεων όπου η αλλαγή στην θερμοκρασία της επιφάνειας

μπορεί να υποδηλώνει κάποιο πρόβλημα ή μια ιδιαίτερη ιδιότητα του υλικού κάτω από την επιφάνεια ή πάνω σε αυτήν.

Με δεδομένη την ολοκληρωτικά μη καταστρεπτική και μη επεμβατική φύση της, μια τέτοια έρευνα μπορεί, γενικά, να ολοκληρωθεί πολύ γρήγορα, με ελάχιστες απαιτήσεις εξοπλισμού και γι αυτό μπορεί να είναι πολύ οικονομική. Η «οπτική» φύση του αποτελέσματος μπορεί συχνά να οδηγήσει σε άμεση ερμηνεία από έναν εξειδικευμένο και έμπειρο επιστήμονα.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της μεθόδου.

Πίνακας 4.2.2.3: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί στη χρήση της Θερμογραφίας Υπερύθρου

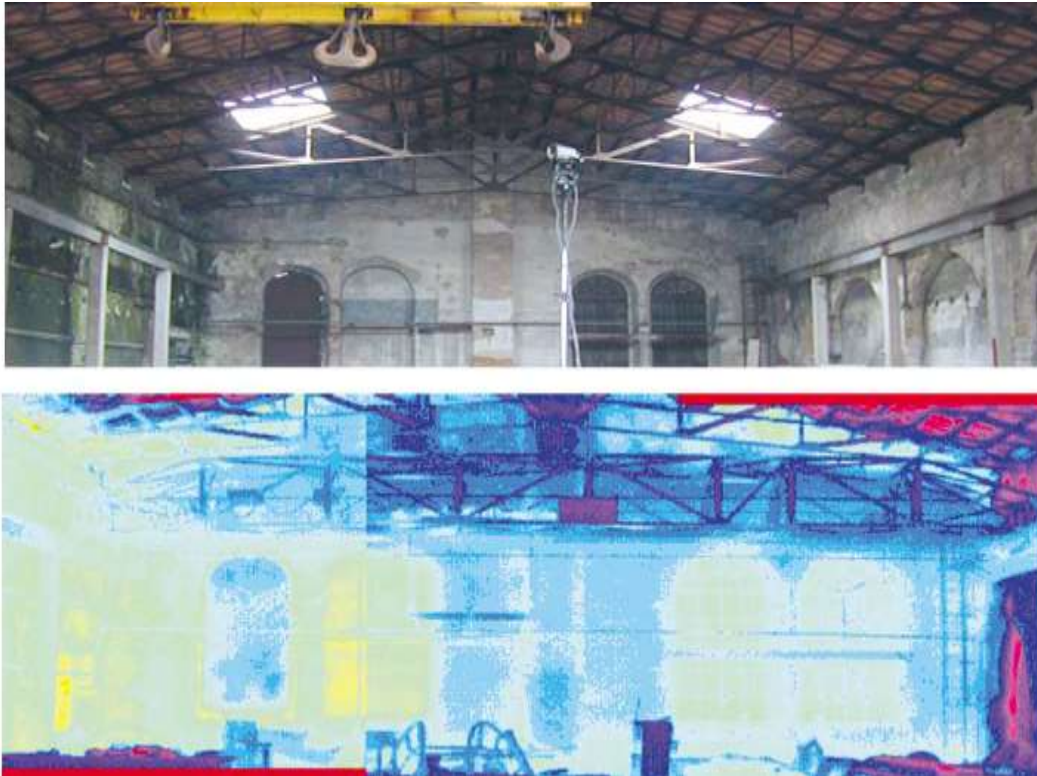
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ
Λήψη γρήγορων αποτελεσμάτων	Εφαρμογή σε περιορισμένο πάχος επιφάνειας
Μη καταστρεπτική	Ποιοτική ανάλυση (όχι χημική ανάλυση)
Ασφαλής, όχι επιβλαβής ακτινοβολία στον χειριστή	Επηρεάζεται από τον καιρό και την μόλυνση του αέρα
Εφαρμογή μόνο σε μια πλευρά του αντικειμένου	

Πίνακας 4.2.2.4: Εφαρμογές της θερμογραφίας υπερύθρου σε μνημεία

Βασικές εφαρμογές της θερμογραφίας Υπερύθρου σε μνημεία
Αποτίμηση της συμβατότητας νέων αλλά και παλαιότερων υλικών επεμβάσεων
Ανίχνευση της υγρασίας
Ανίχνευση οικοδομικών φάσεων
Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού
Ανίχνευση εσωτερικών ρηγματώσεων ή κενών της τοιχοποιείας
Εντοπισμός φθοράς της επιφάνειας
Ανίχνευση διαστρωμάτωσης και φθοράς σε ψηφιδωτά
Διάγνωση φθοράς σε τοιχογραφίες

Τέλος, αναφέρεται χαρακτηριστικά το Πρόγραμμα Πολιτιστικής Κληρονομιάς του Ιταλικού CNR. Το έργο που πραγματοποιήθηκε την περίοδο 2002 είναι η θερμική περιοδική παρακολούθηση των ιστορικών κτιρίων, με επικέντρωση στην προοπτική της θερμογραφίας υπερύθρου για την γνώση και τη διάγνωση.

Για παράδειγμα η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στην ιστορική Arsenal of Venice (εικόνα 4.2.2.4) εμφανίζει προκλήσεις σε σχέση με την ταυτόχρονη αλληλεπίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών παραγόντων. Η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων διαφόρων μεθόδων και η μελέτη ενός περιβάλλοντος που λαμβάνονταν υπόψη πολλές μεταβλητές επέτρεψαν στους ερευνητές να αποκτήσουν μια πολύ πιο βαθειά γνώση τόσο της ιστορίας του κτιρίου όσο και της κατάστασης συντήρησης του. Ταυτόχρονα τους επέτρεψε να έρθουν σε μία καλύτερη κατανόηση και των ίδιων των μεθόδων μετρήσεων. Μέχρι στιγμής, η θερμογραφία υπερύθρου χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για την γνώση της σύνδεσης των τοίχων, την χαρτογράφηση της υγρασίας και την μέτρηση της θερμικής διάχυσης των τούβλων και του κονιάματος. Στο μέλλον προβλέπεται να υπάρξει η μελέτη του εσωτερικού μικροκλίματος. Ένας σημαντικός παράγοντας που έπαιξε ρόλο ήταν η χρήση των ψηφιακών και αναλυτικών θερμικών μοντέλων και πολύ σύγχρονο θερμογραφικό εξοπλισμό. Το μαθηματικό μοντέλο βελτιώνει την αποτελεσματικότητα του ελέγχου και μειώνει το κόστος λόγω μάταιων προσπαθειών και ανέξοδων επαναλήψεων και επιτρέπει την επαλήθευση διαφόρων υποθέσεων σε σχέση με το κτίριο[67].



Εικόνα 4.2.2.4: Η εσωτερική φωτογραφία του tezone 105 της Arsenal of Venice και το θερμογράφημα του βόρειου τοίχου.

Θερμογραφικό σύστημα

Το θερμογραφικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το FLIR B200 Western της εταιρίας FLIR SYSTEMS. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το φακό FOL18 με γωνία 25° και με τον ευρυγώνιο φακό 45°. Το σύστημα αυτό μπορεί να μετρήσει σε ανοιχτούς χώρους στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 7,5-13μm και έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει θερμοκρασίες αντικειμένων από -20°C έως +120°C. Οι θερμικές εικόνες επεξεργάστηκαν με το λογισμικό FLIR QuickReport και FLIR Tools. Ακόμη, ελήφθησαν φωτογραφίες με την κάμερα .

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμογραφικού συστήματος.



Εικόνα 4.2.2.5: Θερμογραφικό σύστημα B200

Πίνακας 4.2.2.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Θερμοκάμερας

Εύρος θερμοκρασίας αντικειμένου	-20°C έως 120°C
Ακρίβεια	±2°C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	15°C έως 50°C
Θερμική ευαισθησία	80mK
Τύπος ανιχνευτή	Focal Plane Array (FPA) microbolomete


4.2.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας με αισθητήρες επαφής και θερμογρόμετρο

Τα θερμομέτρα με αισθητήρες επαφής μπορούν να μετρήσουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών με μεγάλη ακρίβεια. Οι αισθητήρες είναι από πλατίνα, νικέλιο ή χαλκό των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο P500 της εταιρείας DOSTMANN electronic GmbH. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμομέτρου με αισθητήρες επαφής:

Πίνακας 4.2.3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Θερμομέτρου με αισθητήρες επαφής

Αισθητήρας	NTC
Θερμοκρασιακό εύρος	-40°C...+200°C
Ανάλυση	0,1°C
Ακρίβεια	±0,5°C, για T= 0-100°C, ±1,5°C για τις υπόλοιπες T
Θερμοκρασία Λειτουργείας	0°C...+40°C
Θερμοκρασία	-20°C...+70°C

Αποθήκευσης	
Οθόνη	LCD, numerical height 15 mm
Ηλεκτρική Τάση	2 x 1,5 V Battery AA Size
Ζωή Μπαταρίας	> 12 month (without illumination)
Χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> • Κάρτα μνήμης για Μέγιστες και Ελάχιστες τιμές <p>Προστασία από το νερό</p>
	

Για την μέτρηση επιτόπου της θερμοκρασίας και της υγρασίας με θερμουγρόμετρο υπερύθρου επιτρέπει μετρήσεις θερμοκρασίας χωρίς επαφή και σχετικής υγρασίας με αισθητήρες. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι MR77 της εταιρείας FLIR.

4.3 Σχεδιασμός λήψης θερμογραφημάτων στον Παρθενώνα

Σχεδιασμός Λήψης Θερμογραφημάτων και περιοχές μελέτης

Για τη λήψη των θερμογραφημάτων μετά από την καθοδήγηση και την άδεια της Υ.Σ.Μ.Α. επιλέχθηκαν η ανατολική όψη και τμήματα της βόρειας και νότιας όψης. Η βόρεια όψη είχε μελετηθεί επίσης με τη μέθοδο της θερμογραφίας στα πλαίσια της προπτυχιακής εργασία. Επίσης, για τη λήψη των θερμογραφημάτων έγινε χρήση τρίποδα. Οι θέσεις λήψης και οι αποστάσεις από το μνημείο παρέμειναν σταθερές κατά τη διάρκεια της έρευνας και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχέδιο (Εικόνα 5.1.2.4). Περιοριστικούς παράγοντες στη λήψη των θερμογραφημάτων αποτέλεσε το γεγονός ότι υπάρχει κλίση στο έδαφος και οι μεγάλες τουριστικές ροές, παράγοντες όμως που είναι συνδεδεμένοι με την ίδια τη θέση του μνημείου πάνω στον Ιερό βράχο της Ακρόπολης και την μεγάλη ιστορική και καλλιτεχνική αξία που έχει ως αποτέλεσμα επισκέψιμότητά του.



Εικόνες 4.3.1-4.3.3: Φωτογραφίες από την νοτιανατολική, ανατολική και βορειανατολική όψη του Παρθενώνα (φωτογραφίες από προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 4.3.4 : Θέσεις λήψεις των θερμογραφημάτων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν επί τόπου τον Απρίλιο και τον Ιούλιο 2017. Επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις μέρες με ηλιοφάνεια, χωρίς άνεμο και υψηλές θερμοκρασίες. Τα θερμογραφήματα λαμβάνονταν σε διάφορες ώρες από 09.00-15.00. Δυστυχώς, δεν υπήρχε ο περιορισμός στην πρόσβαση στα μνημεία ως προς το χρόνο για τη λήψη των θερμικών εικόνων. Σε ένα επόμενο στάδιο της μελέτης, θα χρειαζόταν να χορηγηθεί ειδική άδεια για απογευματινές και βραδινές λήψεις για να τη μελέτη του κύκλου θέρμανσης-ψύξης μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια μετρήσεων καταγράφονταν οι εξής παράγοντες όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

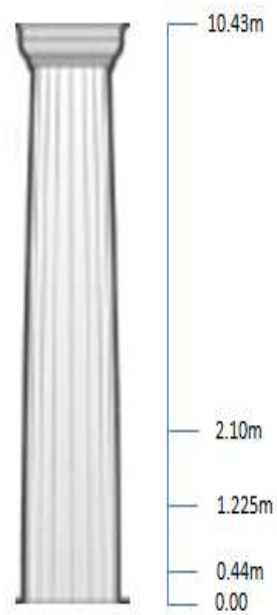
Πίνακας 4.3.1: Μεγέθη και τρόπος μετρήσεων

Μεγέθη	Τρόπος μετρήσεων
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	Θερμο-υγρόμετρο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Υγρασία Περιβάλλοντος	Θερμο-υγρόμετρο
Θερμοκρασία στη βάση	Θερμοστοιχείο
Θερμοκρασία σε σημεία καθ' ύψος των κίωνων	Θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής
Απόσταση	Μέτρο
Ταχύτητα ανέμου	Μετεωρολογικός σταθμός Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών
Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	Μετεωρολογικός σταθμός Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών - Ε.Μ.Π., Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

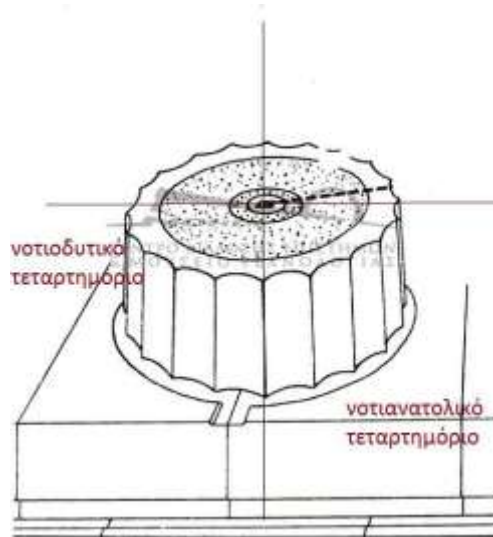
Οι μετρήσεις θερμοκρασίας της επιφάνειας έγιναν στους κίονες 1, 2, 4, 7, 8 της ανατολικής όψης του Παρθενώνα (εικόνα 5.3.2.) , όπως και στην νότιας και βόρεια όψη σε διαφορετικά ύψη: 0, 0,44m, 1,225m, 2,10m λόγω περιορισμού στην πρόσβαση, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Οι μετρήσεις έγιναν στα διαφορετικά τεταρτημόρια του κίονα (εικόνα 4.3.6)



Εικόνα 4.3.5 : Κίονες επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρες



Εικόνα 4.3.6: Σημεία επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας



Εικόνα 4.3.7: Σχέδιο σπονδύλου

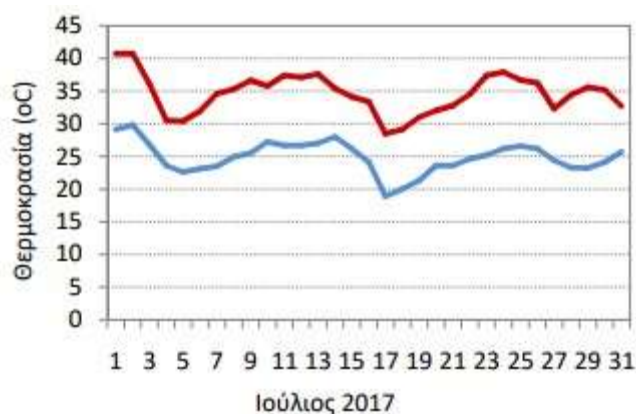
Παράλληλα με τις επιτόπου μετρήσεις παρακολουθούνταν τα συνολικότερα δεδομένα θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας από το μετεωρολογικό σταθμό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και οι μέσες τιμές των οποίων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και γραφήματα.



Εικόνα 4.3.8: Διάγραμμα ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας Μαρτίου (στ. Θησείου)

Πίνακας 4.3.2: Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία Μαρτίου (στ. Θησείου)

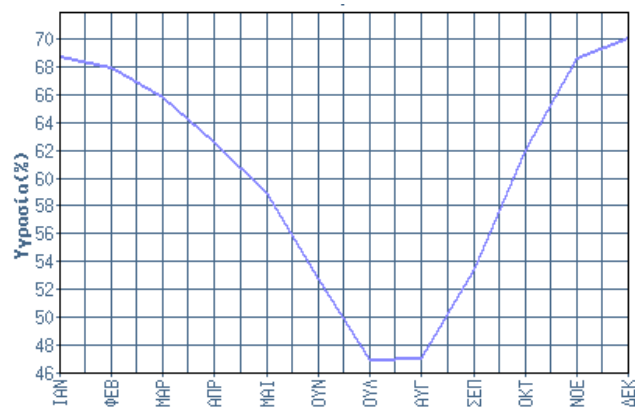
	Τιμή μηνός	Κλιματική τιμή 1961-1990	Κλιματική τιμή 1971-2000
Μέση μέγιστη θερμοκρασία	18.6	16.0	16.1
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία	10.6	8.4	8.2
Αθροιστική βροχόπτωση (mm)	70.4	42.6	
Ημέρες με βροχή (>0.1 mm)	6	11	



Εικόνα 4.3.9: Διάγραμμα ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας Ιουλίου (στ. Θησείου)

Πίνακας 4.3.3: Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία Ιουλίου (στ. Θησείου)

	Τιμή μηνός	Κλιματική τιμή 1961-1990	Κλιματική τιμή 1971-2000
Μέση μέγιστη θερμοκρασία	34.6	32.6	33.1
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία	24.9	22.5	22.8
Αθροιστική βροχόπτωση (mm)	5.2	4.2	
Ημέρες με βροχή (> 0.1 mm)	1	2	



Εικόνα 4.3.10: Διάγραμμα μέσης σχετικής υγρασίας ανά μήνα (2016-2017)

Πίνακας 4.3.4: Ταχύτητα ανέμου (Υδρολογικό Ινστιτούτο Αθηνών)

Μήνας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
Μάρτιος	1-6,5
Ιούλιος	0,5-4,5
Δεκέμβριος	2,5-7

Πίνακας 4.3.5: Ολική Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας (Υδρολογικό Ινστιτούτο Αθηνών)

Μήνας	Ολική Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας (W/m ²)
Μάρτιος	200-750
Ιούλιος	400-800
Δεκέμβριος	30-400

Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα – Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.1 Προτεινόμενο θερμικό μοντέλο

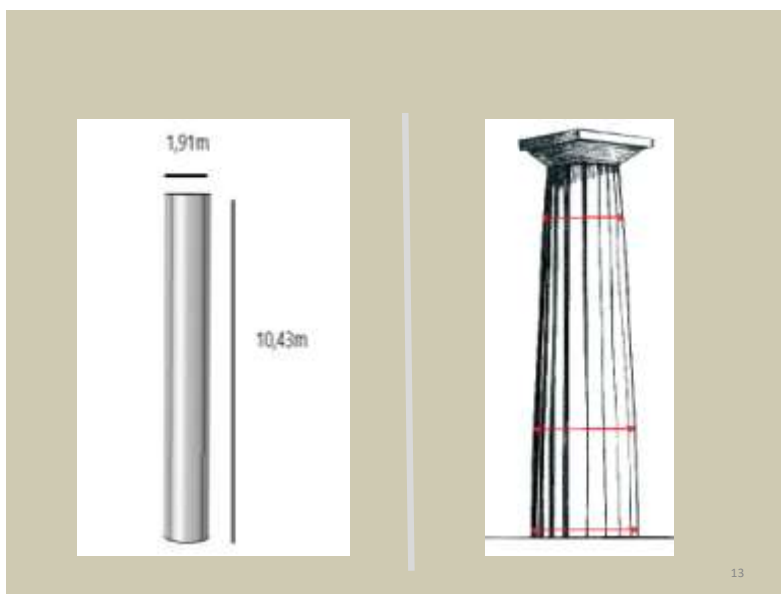
Για τη προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας όπως έχει προαναφερθεί χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol Multiphysics στην έκδοση 5.2. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει ευρεία χρήση και παρέχει δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων από πολλούς κλάδους καθώς και συζευγμένων φυσικών προβλημάτων με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Χαρακτηριστικά, μπορεί να προσομοιώσει προβλήματα θερμοδυναμικής, ηλεκτρομαγνητισμού, αλλά και προβλήματα ακουστικής, ροής υγρών, ηλεκτροχημείας, πλάσματος και διάφορα άλλα. Το λογισμικό προσομοίωσης στηρίζεται σχεδόν απόλυτα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method), όμως υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις επιτρέπει και την χρήση της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων (boundary element method). Για την κατασκευή του μοντέλου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα :

1. Εισαγωγή γεωμετρίας αντικειμένου (Geometry)
2. Επιλογή του υλικού (Materials)
3. Σχεδιασμός του φυσικού προβλήματος και εισαγωγή των οριακών συνθηκών (Physics)
4. Επιλογή πλέγματος (Mesh)
5. Επίλυση- τύπος μελέτης (Study)
6. Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων σε μορφή εικόνων και γραφημάτων (Results)

5.1.1 Εισαγωγή της γεωμετρίας του αντικειμένου

Για την διεξαγωγή αυτής της εργασίας επιλέχθηκε η χρήση ενός αντικειμένου 3D διαστάσεων. Η εισαγωγή της γεωμετρίας του αντικειμένου πραγματοποιήθηκε σε 2 βήματα. Αρχικά, σχεδιάστηκε ένας απλός κύλινδρος με διαστάσεις: ύψος 10,43m και διάμετρο 1,91m, μια αρκετά απλοποιημένη μορφή ενός κίονα του Παρθενώνα για τον έλεγχο του φυσικού προβλήματος και των εξισώσεων μεταφοράς ενέργειας. Με αίτηση στην Υ.Σ.Μ.Α. ζητήθηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση ενός κίονα για την

εισαγωγή στο μοντέλο. Όμως, τελικά χρησιμοποιήθηκε η απλοποιημένη μορφή ως κύλινδρο, η οποία χρησιμοποιείται επίσης στα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων της Υ.Σ.Μ.Α.. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας έγινε δοκιμή στην προσομοίωση της γεωμετρίας του κίονα που αποτελείται από σπονδύλους, όμως δεν είχε διαφορά στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης.



Εικόνα 5.1.1.1: Αναπαράσταση της απλοποιημένης μορφής του κίονα σε σχέση με την πραγματική γεωμετρία του

5.1.2 Καθορισμός του φυσικού προβλήματος- Μαθηματική Περιγραφή του Μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης λήφθηκαν υπόψη η μεταφορά θερμότητας μεταφορά θερμότητας με αγωγή, η μεταφορά θερμότητας από συναγωγή και η μεταφορά θερμότητας από ακτινοβολία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι παραδοχές που έγιναν και οι παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη.

Μαθηματική Περιγραφή του Μοντέλου

- **Μεταφορά θερμότητας στα Στερεά:**

Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στα στερεά χρησιμοποιήθηκε εκδοχή της εξίσωσης θερμότητας που ακολουθεί :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (5.1.2.1, 5.1.2.2)$$

Απλοποιείται ο πρώτος όρος γιατί δεν μελετάται σε αυτή τη φάση η αλλαγή θερμοκρασίας με βάση το χρόνο.

- **Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή**

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty) \quad (5.1.2.3)$$

- **Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία**

$$q = G - J \quad 5.1.2.4$$

$$J = (1 - \epsilon)G + \epsilon e_b(T) \quad (5.1.2.5)$$

$$\int_0^\infty e_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (5.1.2.6)$$

$$G = G_m + G_{\text{ext}} + G_{\text{amb}} \quad (5.1.2.7)$$

$$G_{\text{ext}} = \sum F_{\text{ext}} P_s + \sum F_{\text{ext}} q_{0,s} \quad (5.1.2.8)$$

$$G = G_m + G_{\text{ext}} + G_{\text{amb}} \quad (5.1.2.9)$$

$$G_{\text{amb}} = F_{\text{amb}} e_b(T_{\text{amb}}) \quad (5.1.2.10)$$

$$J = (1 - \epsilon)(G_m(J) + G_{\text{ext}} + G_{\text{amb}}) + \epsilon e_b(T) \quad (5.1.2.11)$$

Τα μεγέθη που αναφέρονται στις παραπάνω εξισώσεις περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.1.2.1: Μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του θερμικού μοντέλου

Συμβολισμοί	Μεγέθη	Μονάδες
h	Συντελεστής συναγωγής (αέρα)	(W/m ²)/ K
ρ	Πυκνότητα του στερεού	kg/m ³
C_p	Θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερή πίεση	J/(kg·K)
K	Θερμική αγωγιμότητα του	W/(m·K)

	υλικού	
U	Ταχύτητα ροής θερμότητας	W/(m·K)
Q	Θερμική πηγή	W/m ³
G	Εισερχόμενη ροή θερμότητας από ακτινοβολία	W/m ²
J	Εξερχόμενη ροή θερμότητας από ακτινοβολία	W/m ²
E	Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας	- $0 \leq \varepsilon \leq 1$
$e_b(T)$	Ένταση εκπομπής του μελανού σώματος	W/m ²
T	Θερμοκρασία της επιφάνειας	K
G_m	Η κοινή προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία υπολογίζεται από τα όρια του μοντέλου	W/m ²
G_{ext}	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τις εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας	W/m ²
G_{amb}	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία από το περιβάλλον	W/m ²

5.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας στη συγκεκριμένη περίπτωση χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: σε παράγοντες που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού, παράγοντες που σχετίζονται με μετρήσεις περιβάλλοντος και σε παράγοντες που αφορούν τη θέση του αντικειμένου, όπως περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

Ιδιότητες των Υλικών

Το υλικό καθορίζεται από το χρήστη. Μέσα στη βιβλιοθήκη του προγράμματος υπάρχουν οι θεωρητικές τιμές ιδιοτήτων για τα περισσότερα υλικά. Στη συγκεκριμένη εργασία, το υλικό που μελετάται είναι το πεντελικό μάρμαρο. Δεν χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της βιβλιοθήκης οπότε μετά από τη βιβλιογραφική

έρευνα εισήχθησαν οι ακόλουθες πειραματικές τιμές για τις ιδιότητες για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.1.3.1 : Ιδιότητες του Πεντελικού Μαρμάρου

Συμβολισμοί	Μεγέθη	Τιμές
C_p	Θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερή πίεση	880 J/(kg·K)
ρ	Πυκνότητα	2700 kg/m ³
k	Θερμική αγωγιμότητα του υλικού	2.9 W/(m·K)
ϵ	Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας	0.98



Εικόνα 5.1.3.1: Ιδιότητες του υλικού

Οριακή Συνθήκη

Ως οριακή συνθήκη επιλέχθηκε, ακολουθώντας σχετικό παράδειγμα της βιβλιογραφίας, να οριστεί η θερμοκρασία στη βάση του κάθε κίονα, η οποία μετρήθηκε κάθε φορά επιτόπου με θερμοστοιχείο. Η τιμή που εισάγεται στο πρόγραμμα κάθε φορά είναι η μέση τιμή των μετρήσεων στη βάση του κίονα.

Πίνακας 5.1.3.2 : Περιβαλλοντικά δεδομένα και θερμοκρασία βάσης

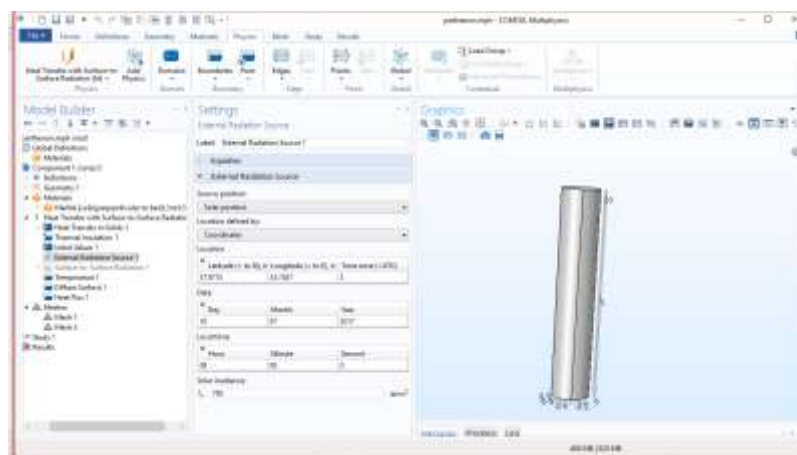
Συμβολισμοί	Μεγέθη	Τιμές
$T_{περ}$	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	Θερμογυρόμετρο
I_s	Ένταση Ηλιακής	Μετεωρολογικός σταθμός

	Ακτινοβολίας	
T_o	Θερμοκρασία Βάσης Κίονα	Αισθητήρας επαφής

Επίσης, τα υπόλοιπα στοιχεία που προσδιορίζονται από το χρήστη είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες, η μέρα και η ώρα για να υπολογιστεί η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.

Πίνακας 5.1.3.3: Γεωγραφικές Συντεταγμένες Παρθενώνα

Γεωγραφικό Μήκος	37.9715° N
Γεωγραφικό Πλάτος	23.7267° E

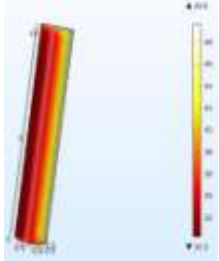
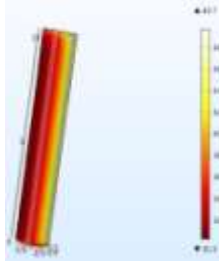

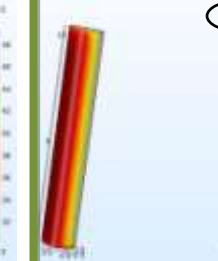
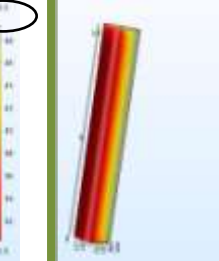


Εικόνα 5.1.3.2: Εισαγωγή γεωγραφικών συντεταγμένων

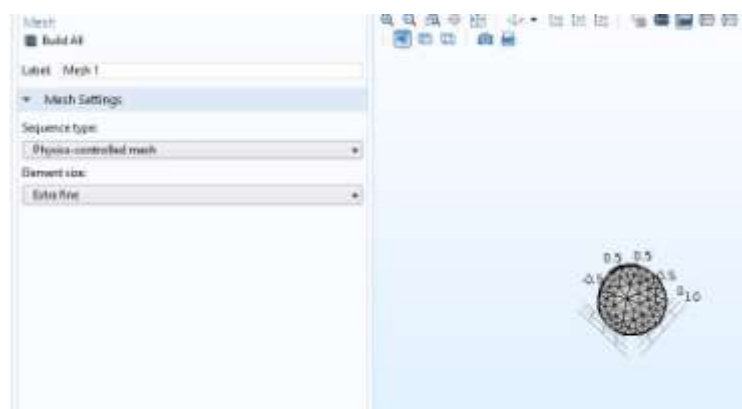
5.1.4 Επιλογή και μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος

Το πλέγμα ρυθμίζει το πλήθος των στοιχείων (elements) στα οποία χωρίζεται η γεωμετρία. Μπορεί να επιλεγεί ένα αραιό ή ένα πυκνό πλέγμα. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα αλλά αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος από το πρόγραμμα. Για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος έγιναν δοκιμές με διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα. Οι δοκιμές έγιναν για διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

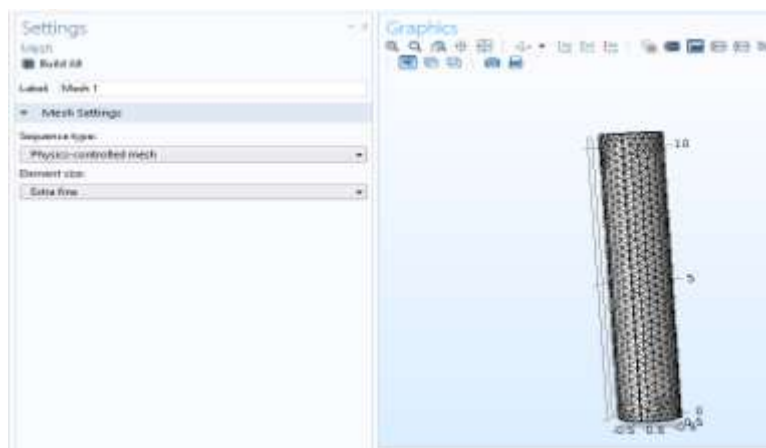
Πίνακας 5.1.4.1: Σύγκριση διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα

Element size parameters	Normal mesh	Fine mesh	Finer mesh	Extra fine mesh	Extremely fine mesh
Maximum element size	1.04m	0.834m	0.574m	0.365m	0.209m
Minimum element size	0.188m	0.104m	0.0417m	0.0156m	0.00209m
Maximum element growth rate	1.5	1.45	1.4	1.35	1.3
Curvature factor	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
Resolution of narrow regions	0.5	0.6	0.7	0,85	1
Results (example)					

Τελικά, επιλέχθηκε **extra fine mesh** γιατί ήταν ο καλύτερος συμβιβασμός ανάμεσα στην ακρίβεια υπολογισμού της θερμοκρασίας και υπολογιστικού κόστους.



Εικόνα 5.1.4.1: Πολύ λεπτό πλέγμα (extra fine) εφαρμοσμένο στον κίονα

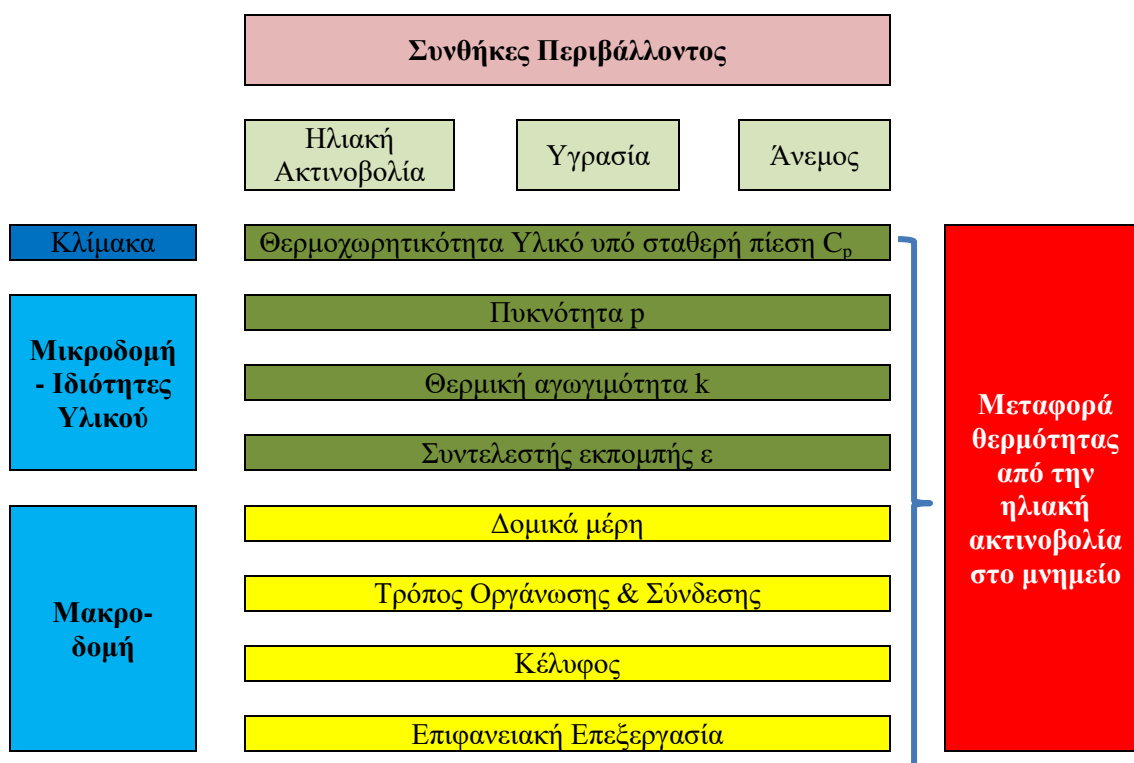


Εικόνα 5.1.4.2: Πολύ λεπτό πλέγμα (extra fine) εφαρμοσμένο στον κίονα

5.2 Έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου

Σε αυτή την εργασία έγινε μια προσπάθεια να μελετηθεί πώς οι διαφορετικοί παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον, τις ιδιότητες του υλικού και τη δομή του μνημείου επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά και τη θερμική καταπόνηση του. Από τη βιβλιογραφική έρευνα συγκεντρώθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική καταπόνηση (εικόνα 5.2.1).

Πίνακας 5.2.1: Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας στο μνημείο



Το προτεινόμενο θερμικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη παράγοντες του περιβάλλοντος: θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{περ}$) και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (I_s). Επίσης, λαμβάνει υπόψη ιδιότητες του πεντελικού μαρμάρου: τη θερμοχωρητικότητα του υλικού (C_p), την πυκνότητα (ρ), την θερμική αγωγιμότητα (k), και το συντελεστή αγωγιμότητας (ϵ). Παράλληλα, η θερμογραφία υπερύθρου είναι μια δυναμική μέθοδος που επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Από τους παράγοντες του περιβάλλοντος λαμβάνονται υπόψη η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{περ}$), η ταχύτητα του ανέμου (V) και η σχετική υγρασία (%RH). Όσο αφορά τη δομή του μνημείου το προτεινόμενο θερμικό μοντέλο εξετάζει μια απλοποιημένη μορφή του κίονα σε σχήμα μονολιθικού κυλίνδρου (3D) ενώ η θερμογραφία υπερύθρου δίνει τη δυνατότητα να εξεταστεί η ανατολική όψη του ναού (2D) και πώς επηρεάζει η πραγματική γεωμετρία του κίονα τα αποτελέσματα. Οι διαφορές των μεθόδων συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (εικόνα 5.2.2). Τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους συγκρίνονται επίσης με τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας της επιφάνειας, οι οποίες είναι σημειακές αλλά μεγαλύτερης ακρίβειας.

Πίνακας 5.2.2: Παράγοντες που επηρεάζουν το μοντέλο προσομοίωσης και τη θερμογραφία υπερύθρου

	Θερμικό μοντέλο	Θερμογραφία υπερύθρου
Περιβάλλον	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
	Έκταση Ηλιακής Ακτινοβολίας	Ταχύτητα ανέμου
		Σχετική υγρασία
Μικροδομή Υλικού Ιδιότητες	Θερμοχωρητικότητα Υλικό υπό σταθερή πίεση (C_p)	
	Πυκνότητα (ρ)	
	Θερμική αγωγιμότητα (k)	Συντελεστής εκπομπής (ϵ)
	Συντελεστής εκπομπής (ϵ)	

**Μακροδομή
Κλίμακα
Μνημείου**

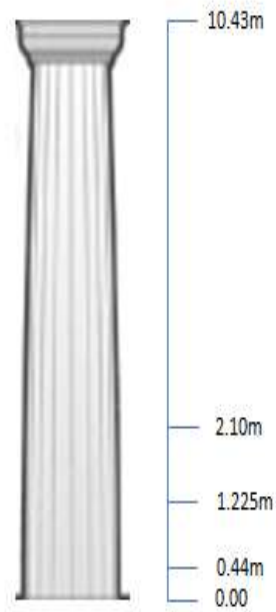
**Απλοποιημένη γεωμετρία κίονα
Κυλινδρική μορφή 3D**

**Ύψεις του ναού
Κανονική γεωμετρία 2D**

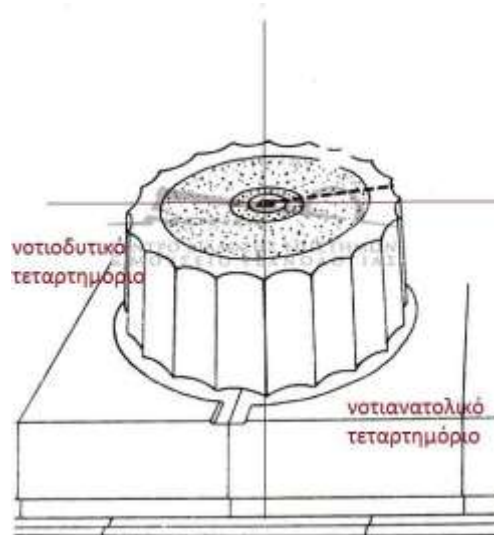
Οι μετρήσεις θερμοκρασίας της επιφάνειας με τη χρήση θερμόμετρου με αισθητήρα επαφής πραγματοποιήθηκαν στους κίονες 1, 2, 4, 7, 8 της ανατολικής όψης του Παρθενώνα (εικόνα 5.3.2.), όπως επίσης και σε κάποιους κίονες της νότιας και βόρειας όψη σε διάφορα ύψη: 0, 0,44m, 1,225m, 2,10m λόγω περιορισμού στην πρόσβαση, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Οι μετρήσεις περιορίστηκαν κυρίως στους κίονες της ανατολικής όψης λόγω εργασιών συντήρησης. Για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε άλλα ύψη θα χρειαζόταν η τοποθέτηση ικρίωματος για το οποίο δεν υπήρχε η σχετική άδεια. Οι μετρήσεις έγιναν στα διαφορετικά τεταρτημόρια του κίονα (εικόνα 5.3.5)



Εικόνα 5.2.1 : Κίονες επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρες



Εικόνα 5.2.2: Σημεία επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας



Εικόνα 5.2.3: Σχέδιο σπονδύλου

Σε κάθε μέρα μετρήσεων με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες δίνονται τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης, της θερμογράφησης και της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας επιφάνειας κάθε κίονα σε κάθε ύψος της μέτρησης με αισθητήρα. Οι μετρήσεις λαμβάνονται από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. όμως επιλέγεται να εξεταστεί το διάστημα 11.00-11.30 σε όλες τις ημέρες μετρήσεων για να γίνει συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων.

30 Μαρτίου 2017

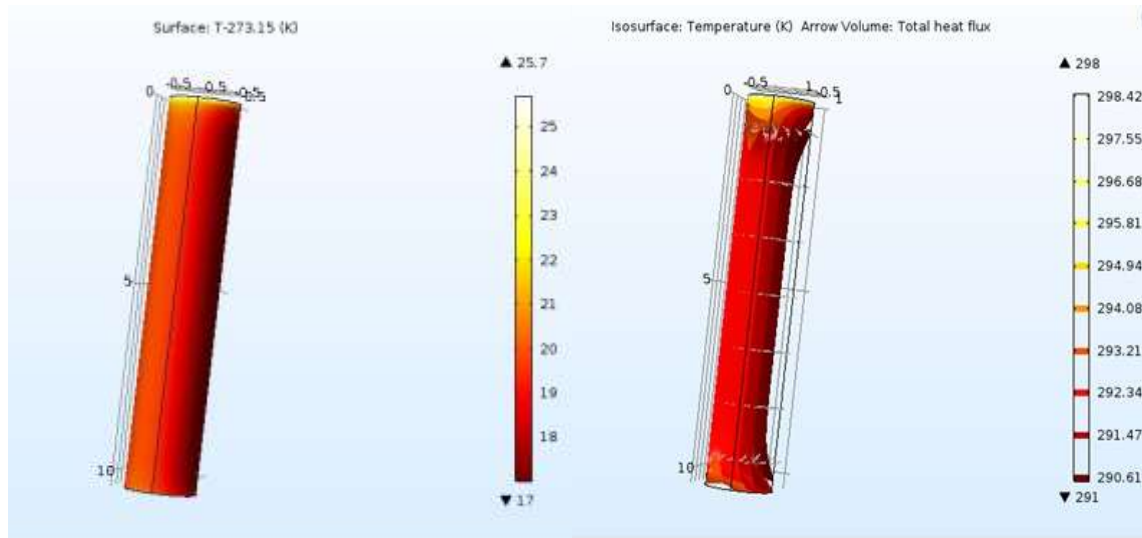
Στις 30/03/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 έως τις 15.30 π.μ. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις στο διάστημα 11.00-11.30. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 18°C και η σχετική υγρασία 49,9%. Ο άνεμος είχε ταχύτητα 4,3m/s. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 15,7°C.

Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.4). Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούνται όπως σε όλες τις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής στην κορυφή του κίονα, γεγονός το οποίο δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα γιατί έχει επιλεγθεί η εισαγωγή του κίονα σαν ελεύθερο στοιχείο ενώ στην πραγματικότητα υπάρχουν και ανώτερα οικοδομικά στοιχεία. Στο κύριο σώμα του κίονα παρατηρείται θερμοκρασιακό εύρος ανάμεσα στη ψυχρότερη και τη θερμότερη περιοχή 3,5 °C (17-20,5 °C).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης παρουσιάζει αρκετά αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με τις πραγματικές θερμοκρασίες των κίωνων που λήφθηκαν με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής. Οι επιφανειακές μετρήσεις του κίονα 1 που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.3 προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου όσο αφορά τις υψηλότερες θερμοκρασία του κίονα, με θερμοκρασιακή απόκλιση 0,5°C. Αντίθετα, οι υπόλοιποι κίονες εμφανίζουν θερμοκρασιακά μέγιστα κατά 3°C χαμηλότερα από την μέγιστη θερμοκρασία της προσομοίωσης.

Οι πραγματικές μετρήσεις θερμοκρασίας παρουσιάζουν ομοιομορφία σε όλους τους κίονες εκτός από τον κίονα 1. Αυτό πιθανώς να δικαιολογείται λόγω της θέσης του στην νοτιανατολική γωνία του Παρθενώνα.

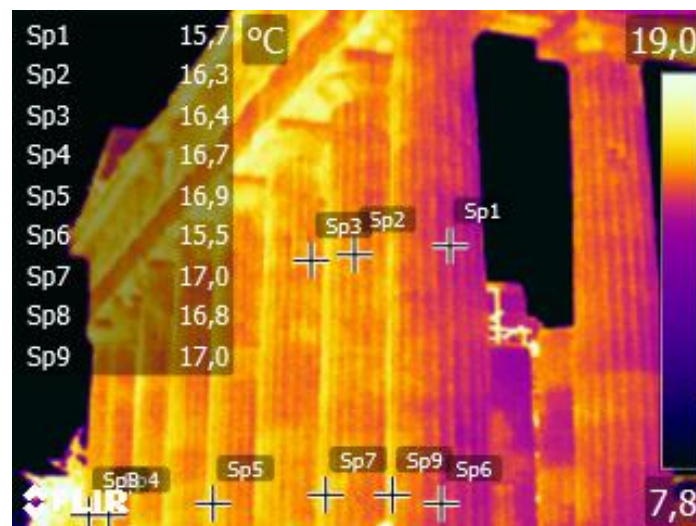
Στο ακόλουθο θερμογράφημα, η κατανομή θερμοκρασίας είναι πιο κοντινή με τις πραγματικές μετρήσεις θερμοκρασίας των κίωνων. Παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι το μοντέλο προσομοίωσης και στις μέγιστες και στις ελάχιστες θερμοκρασίες του κάθε κίονα. Επίσης, μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι στο θερμογράφημα αυτό παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή θερμοκρασίας.



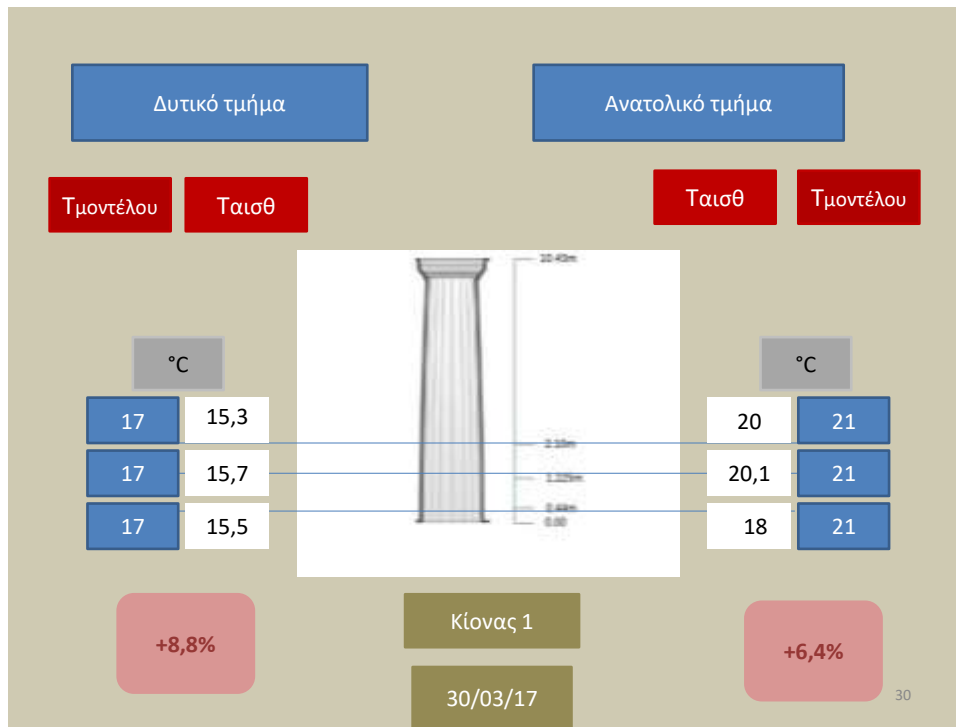
Εικόνα 5.2.4: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

Πίνακας 5.2.3: Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής)

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)		Κίονας 2(°C)		Κίονας 4(°C)		Κίονας 7(°C)		Κίονας 8(°C)	
0,44	15,5	18	15,2	17,2	15,1	16,4	15	17,3	15,2	16,7
1,25	15,7	20,1	15	16,7	14,3	17,1	15,3	17	15,7	17
2,10	15,3	20	15	16	14,9	17,3	15,2	17,5	15,2	17,2



Εικόνα 5.2.5: Θερμογράφημα της βορειανατολικής γωνίας (30/03)



Εικόνα 5.2.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων (30/03)

10 Ιουλίου 2017

Στις 10/07/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.00 έως τις 12 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 35-39°C και η σχετική υγρασία 27,8%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 33,2°C. Παρατηρήθηκε ότι υπήρχε συννεφιά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν η μικρότερη σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ημέρες μετρήσεων της ίδιας εποχής καθώς και η σχετική υγρασία. Παρουσιάζονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια των κίωνων αυτής της εποχής.

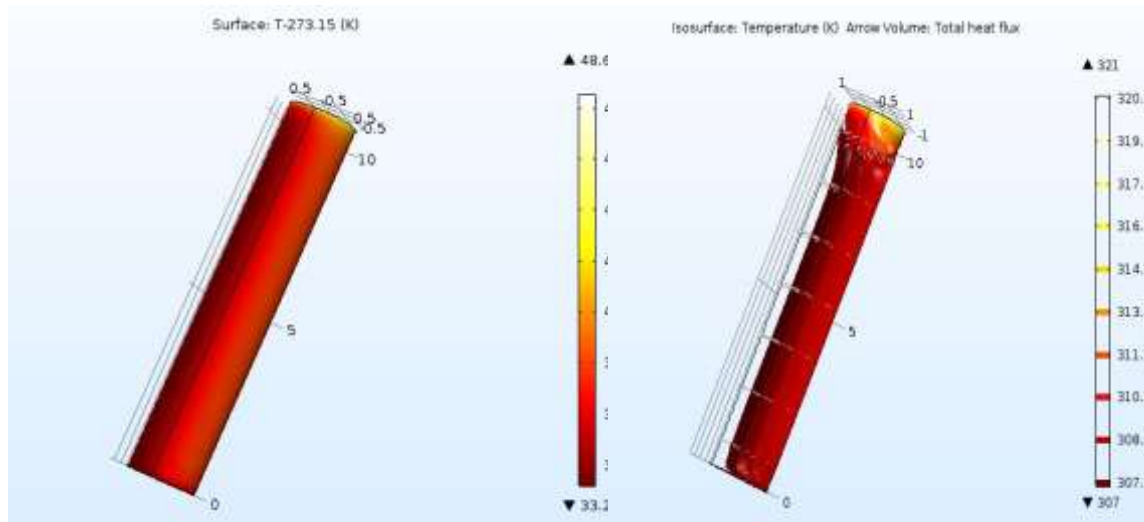
Αναλύοντας τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις θερμοκρασίες που παρουσιάζουν οι κίονες μεταξύ τους. Αυτή η ομοιογένεια στο θερμοκρασιακό εύρος (32-38 °C) είναι η μοναδική φορά που παρατηρείται στα αποτελέσματα των θερινών μετρήσεων. Οι κίονες 7, 8 παρουσιάζουν αυξημένες κατώτερες θερμοκρασίες κατά 1°C σε σχέση με

τους υπόλοιπους κίονες. Τις υψηλότερες θερμοκρασίες τις παρουσιάζουν οι κίονες 1 και 4.

Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.5). Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες συγκεντρώνονται όπως σε όλες τις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής στην κορυφή του κίονα, γεγονός το οποίο δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα γιατί έχει επιλεχθεί η εισαγωγή του κίονα σαν ελεύθερο στοιχείο στο χώρο ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει και ανωδομή. Στο κύριο σώμα του κίονα παρατηρείται θερμοκρασιακό εύρος ανάμεσα στη ψυχρότερη και τη θερμότερη περιοχή 6°C ($33,3-40^{\circ}\text{C}$).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας και το θερμογράφημα παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου προσεγγίζουν τις θερμοκρασιακές μετρήσεις όλων των κίωνων. Η μέγιστη θερμοκρασία στο σώμα του κίονα (εικόνα 5.2.5- 39°C) είναι κατά $0,8^{\circ}\text{C}$ μεγαλύτερη από την μέγιστη θερμοκρασία του πίνακα 5.2.4 για τον κίονα 1 και $0,3^{\circ}\text{C}$ για τον κίονα 4. Οι υπόλοιποι κίονες παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση.

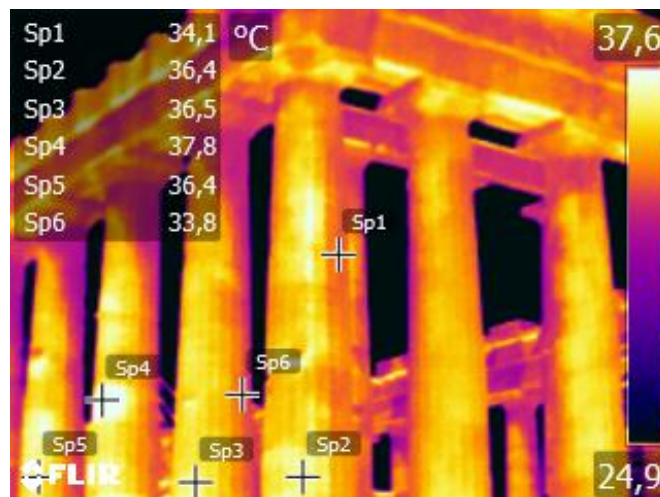
Στο ακόλουθο θερμογράφημα (εικόνα 5.2.7) οι κίονες 1, 2 έχουν μικρή θερμοκρασιακή απόκλιση από τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας της τάξεως του 1°C . Σε όλη την νότια όψη και στην ανατολική παρατηρείται μια ομοιογένεια στις θερμοκρασίες των γειτονικών κίωνων, όπως και στον πίνακα 5.2.5. Οι ψυχρότερες θερμοκρασίες του θερμογραφήματος επίσης συμφωνούν με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων.



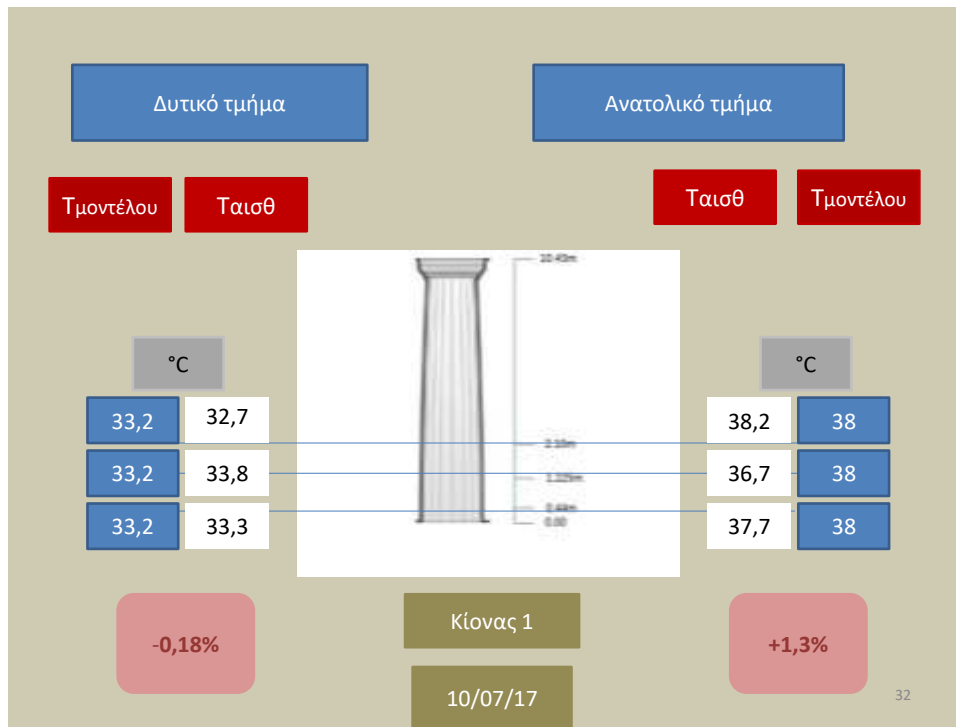
Εικόνα 5.2.7: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

Πίνακας 5.2.4 : Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με αισθητήρα επαφής)

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)	Κίονας 2(°C)	Κίονας 4(°C)	Κίονας 7(°C)	Κίονας 8(°C)					
0,44	32,7	38,2	33,5	35,5	32	37,6	34,1	36,8	33,7	37,9
1,25	33,8	36,7	33,7	35,7	33,4	38,2	34,7	37,1	34	37,6
2,10	33,3	37,7	33,7	35	33	38,7	34,8	36,8	34,2	37,6



Εικόνα 5.2.8:Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (10/07)



Εικόνα 5.2.9: Σύγκριση των αποτελεσμάτων (10/07)

11 Ιουλίου 2017

Στις 11/07/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.36 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 34,2°C και η σχετική υγρασία 35%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 33,2°C.

Το μοντέλο προσομοίωσης αποδίδει σε τρισδιάστατη μορφή την κατανομή θερμοκρασίας στο εξωτερικό και στο εσωτερικό του κίονα. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε μια πλάγια απεικόνιση του κίονα ώστε να είναι εμφανείς όσο το δυνατόν περισσότερες θερμοκρασιακές ζώνες. Για την συγκεκριμένη μέρα μέτρησης επιλέχθηκε όμως να γίνει το ανάπτυγμα του κίονα (εικόνα _).

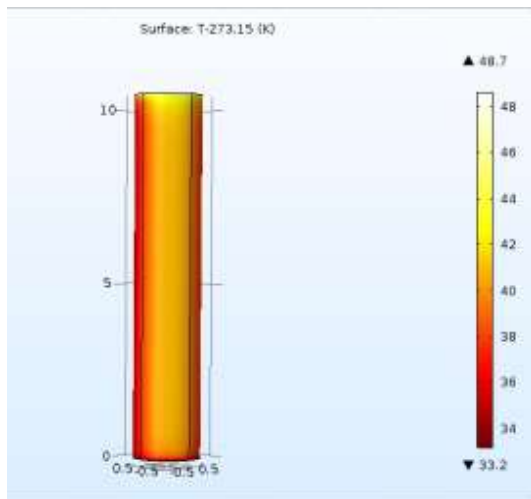
Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.7). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου προσεγγίζουν τις θερμοκρασιακές μετρήσεις των κίωνων 1,2, ενώ οι επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας των

κίωνων 7, 8 (πίνακας)αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες που απεικονίζονται στο θερμογράφημα (sp3, sp4).

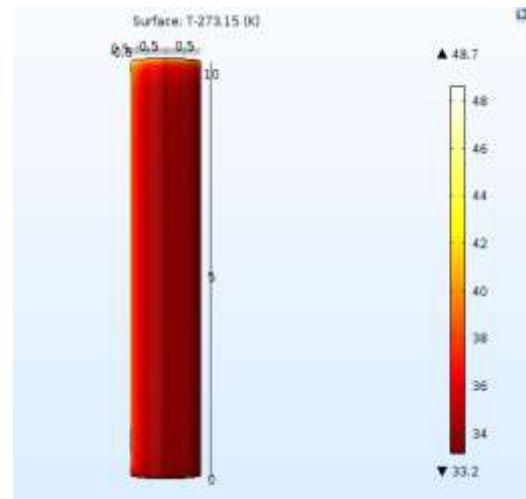
Η μεγαλύτερη θερμοκρασία που δείχνει η προσομοίωση εντοπίζεται στην κορυφή του κορμού του κίονα (48,7°C), στην πραγματικότητα όμως η κορυφή του κίονα δεν είναι το ανώτερο τμήμα του μνημείου. Στο ανατολικό τεταρτημόριο του κίονα που είναι και το θερμότερο στην προσομοίωση σημειώνονται θερμοκρασίες που φτάνουν τους 44°C, πολύ κοντινές με τις τιμές θερμοκρασίας των επιφανειακών μετρήσεων των κίωνων 1,2. Σε σχέση όμως με τους υπόλοιπους κίονες παρουσιάζεται μια μεγάλη απόκλιση που φτάνει τους 5°C. Αυτή η απόκλιση σημειώνεται αντίστροφα ανάμεσα στο θερμογράφημα και τις επιφανειακές μετρήσεις των κίωνων 1,2.

Στην εικόνα 5.2.7 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα, αντίθετα στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας του πίνακα σημειώνεται διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως του 2°C ανάμεσα στα διαφορετικά σημεία του κάθε κίονα. Η διαφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι ο κίονας του μοντέλου είναι απλής κυλινδρικής μορφής και δεν έχει τη λέπτυνση και την ένταση που παρουσιάζει καθ' ύψος ο πραγματικός κίονας. Επίσης, κάθε κίονας εμφανίζει διαφορετικά είδη φθοράς σε σημεία της επιφάνειάς του. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες των κίωνων παρουσιάζουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους καθ' ύψος, της τάξης των 0,7°C. Ο κίονας που εμφανίζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι ο κίονας 1,2 ενώ αντίθετα οι υπόλοιποι κίονες παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες από το μοντέλο.

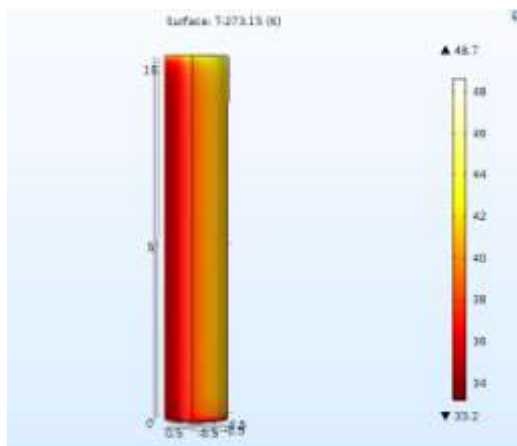
Στο ακόλουθο θερμογράφημα οι κίονες 1, 2 έχουμε πολύ μικρή θερμοκρασιακή απόκλιση από τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής. Ο κίονας 4 παρουσιάζει μικρή θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης του 1°C ενώ στους κίονες 1, 2 η θερμοκρασιακή διαφορά διευρύνεται στους 5°C για τα θερμότερα σημεία του κίονα και 3°C για τα ψυχρότερα. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η λήψη του θερμογραφήματος έγινε χρονικά νωρίτερα από τις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα επαφής.



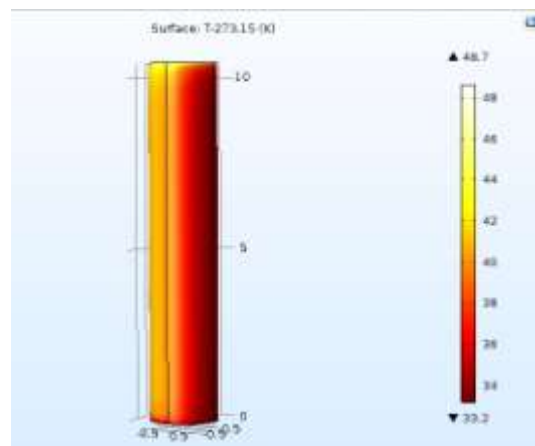
Ανατολικό
τεταρτημόριο



Δυτικό
Τεταρτημόριο

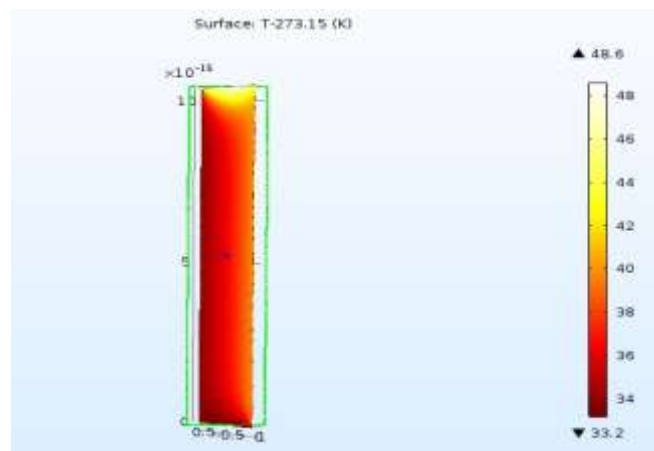


Νότιο
Τεταρτημόριο



Βόρειο
Τεταρτημόριο

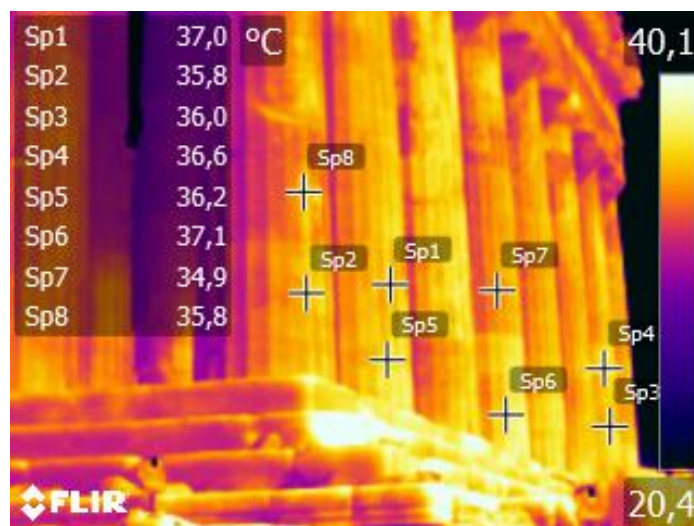
Εικόνα 5.2.10: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου



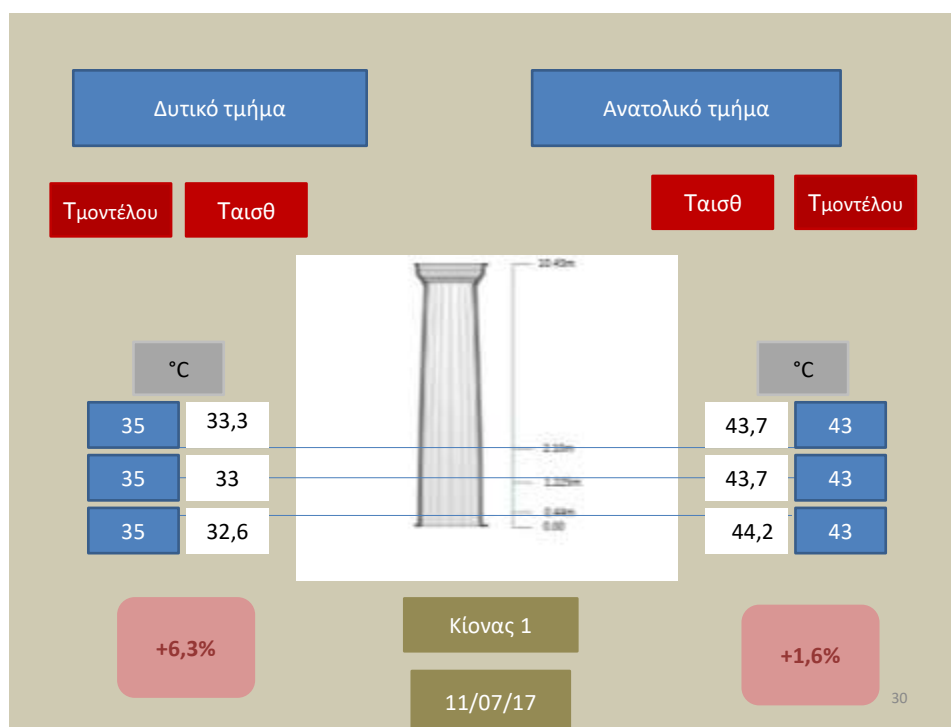
Εικόνα 5.2.11: Κάθετη τομή στο εσωτερικό του κίονα

Πίνακας 5.2.5: Ελάχιστη και Μέγιστη Θερμοκρασία ανά κίονα (μετρήσεις με αισθητήρα επαφής)

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)		Κίονας 2(°C)		Κίονας 4(°C)		Κίονας 7(°C)		Κίονας 8(°C)	
0,44	32,6	44,2	34	43,3	32	37,6	32,7	36,8	32,7	37,9
1,25	33	43,7	33,8	42,4	33,4	38,2	32,6	37,1	32,6	37,6
2,10	33,3	43,7	33,5	39,1	33	38,7	33	36,8	33	37,6



Εικόνα 5.2.12: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (11/07)

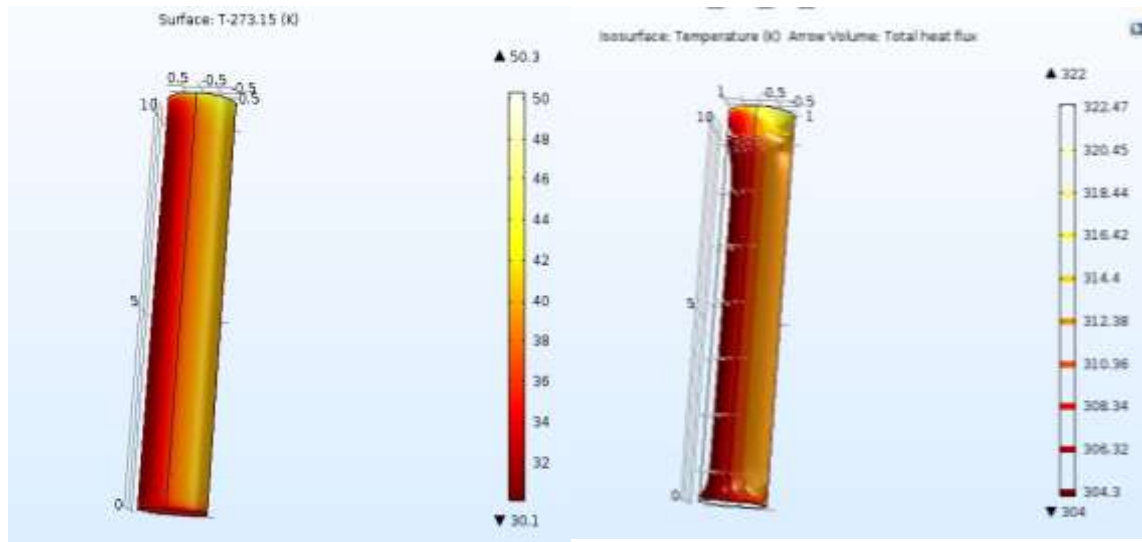


Εικόνα 5.2.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων (11/07)

24 Ιουλίου 2017

Στις 24/07/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.00 έως τις 11.30 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 40°C και η σχετική υγρασία 30%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 30°C.

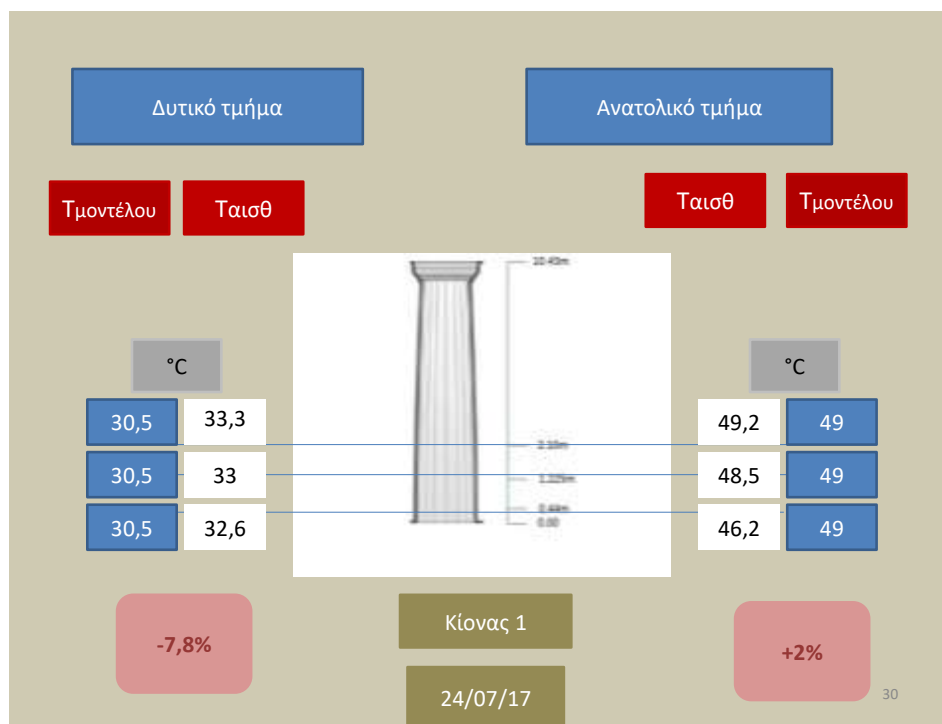
Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 6.2.9). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας του πίνακα 6.2.6 παρατηρείται ότι και τα δύο βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα (30-50°C). Σημειώνεται μια διαφορά θερμοκρασίας στα διαφορετικά σημεία του κίονα της τάξης των 20°C. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας είναι η μεγαλύτερη από όσες έχουν σημειωθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και των εφαρμογών της προσομοίωσης. Στην εικόνα 6.2.9 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα, αντίθετα στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας σημειώνεται διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως του 2°C. Η διαφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι ο κίονας του μοντέλου είναι απλής κυλινδρικής μορφής και δεν έχει τη λέπτυνση που παρουσιάζει καθ' ύψος ο πραγματικός κίονας. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες των κίωνων παρουσιάζουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους καθ' ύψος, της τάξης των 0,5°C. Ο κίονας που εμφανίζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι ο κίονας 2. Ο κίονας αυτός εμφανίζει θερμοκρασία μεγαλύτερη από την αντίστοιχη προβλεπόμενη θερμοκρασία του μοντέλου, με διαφορά 2,5°C ενώ αντίθετα οι υπόλοιποι κίονες παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες από το μοντέλο. Ο κίονας 1,2, 8 έχει τη μικρότερη απόκλιση από το προτεινόμενο μοντέλο, ενώ οι κίονας 7 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις. Αυτό ίσως οφείλεται στη θέση του και στην αλληλεπίδραση με τους υπόλοιπους κίονες. Σημαντικός παράγοντας στις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής είναι η ταχύτητα και ο προσανατολισμός του ανέμου όπως διαπιστώνεται σε αυτή την ημέρα μετρήσεων, όπου τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια ανάμεσα στους κίονες. Το θερμικό μοντέλο παρέχει μια μέση εκτίμηση για την κατανομή θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.2.14: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

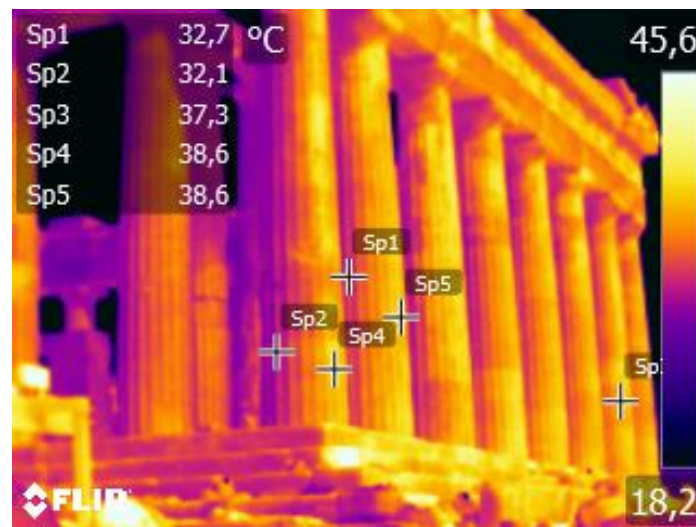
Πίνακας 5.2.6: Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία (μετρήσεις με αισθητήρα επαφής)

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)	Κίονας 2(°C)	Κίονας 4(°C)	Κίονας 7(°C)	Κίονας 8(°C)
0,44	32,6	46,2	34	50,6	32
1,25	33	48,5	33,8	50,7	33,4
2,10	33,3	49,2	33,5	52,7	33

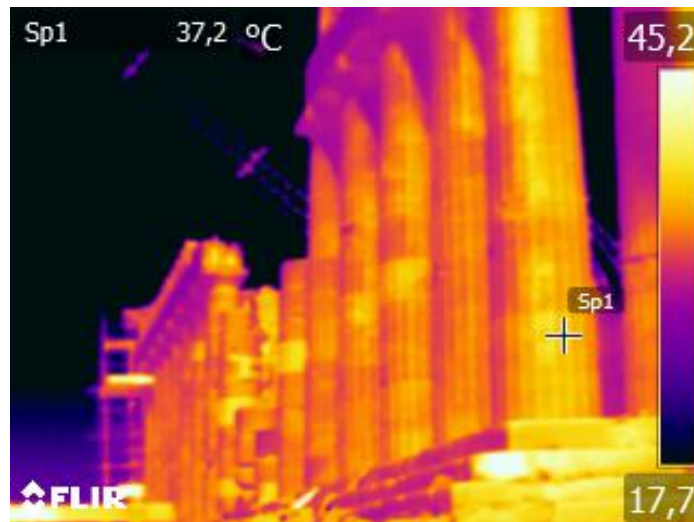


Εικόνα 5.2.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων (24/07)

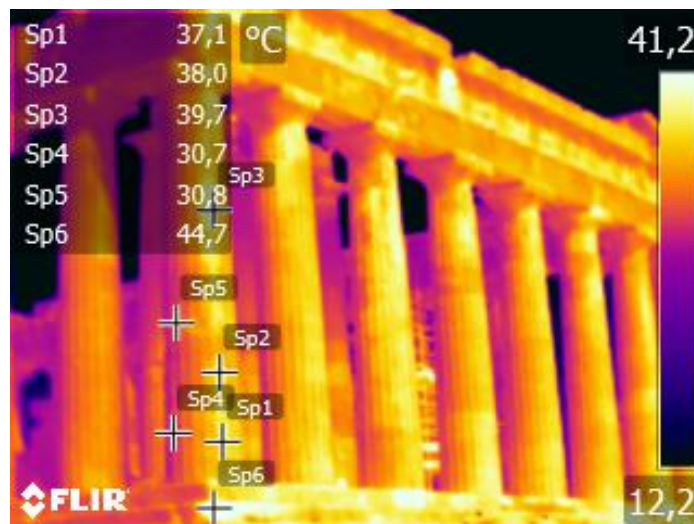
Την συγκεκριμένη ημέρα μετρήσεων λόγω ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών και κύματος καύσωνα, ο βράχος της Ακρόπολης δεν παρέμεινε ανοιχτός για τη λήψη θερμογραφήματων. Όμως, παρακάτω παρουσιάζονται θερμογραφήματα που λήφθηκαν στις 9.00 π.μ. Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων και του προτεινόμενου θερμικού μοντέλου, γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική ώρα μελέτης του μνημείου. Παρατηρείται μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμότερο και στο ψυχρότερο κομμάτι του κίονα της τάξεως των 10°C (30-40°C). Οι χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τις υψηλότερες. Στο ψυχρό τμήμα του κίονα οι θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται καθ' ύψος του κίονα. Η υψηλότερη θερμοκρασία του κίονα 1 φτάνει τους 44,7°C όπως αποτυπώνεται με τη θερμογραφία υπερύθρου. Οι ανώτεροι σπόνδυλοι παρουσιάζουν αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με τους κατώτερους.



Εικόνα 5.2.16: Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (24/07)



Εικόνα 5.2.17: Θερμογράφημα της νότιας όψης (24/07)



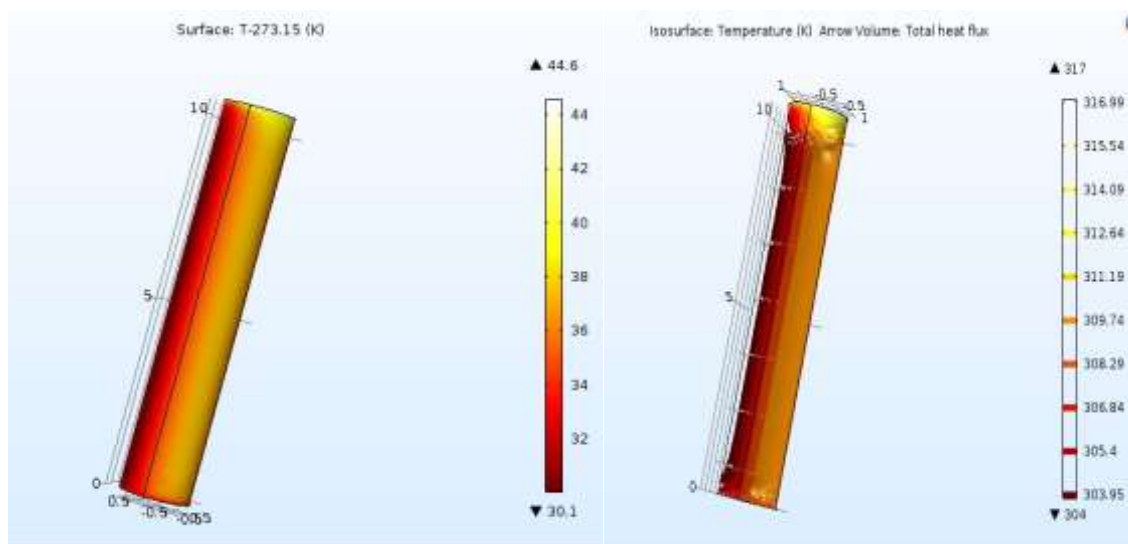
Εικόνα 5.2.18: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (24/07)

25 Ιουλίου 2017

Στις 25/07/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.36 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 39°C και η σχετική υγρασία 32%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 30°C.

Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.13). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής παρατηρείται ότι και τα δύο βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα (29-46,2°C). Σημειώνεται μια διαφορά θερμοκρασίας στα διαφορετικά ανάμεσα στο

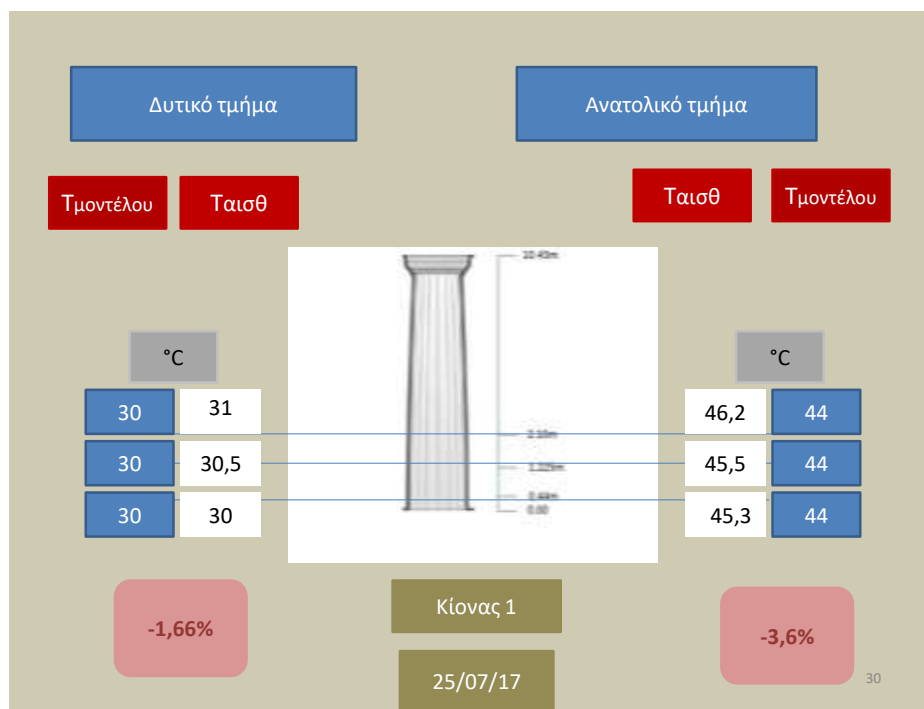
ψυχρότερο και θερμότερο του κίονα της τάξης των 15°C. Στην εικόνα 5.2.13 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα, αντίθετα στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας του πίνακα 5.2.7 σημειώνεται διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως του 0,5°C. Η διαφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι ο κίονας του μοντέλου είναι απλής κυλινδρικής μορφής και δεν έχει τη λέπτυνση που παρουσιάζει καθ' ύψος ο πραγματικός κίονας. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες των κίωνων παρουσιάζουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους καθ' ύψος, της τάξης των 0,3°C. Ο κίονας που εμφανίζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι ο κίονας 1, ο οποίος είναι ο γωνιαίος νοτιοανατολικός κίονας του Παρθενώνα και είναι εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και στον άνεμο. Είναι ο μοναδικός ο οποίος εμφανίζει σημείο με θερμοκρασία μεγαλύτερη από την αντίστοιχη προβλεπόμενη θερμοκρασία του μοντέλου, με διαφορά 1,8°C ενώ αντίθετα οι υπόλοιποι κίονες παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες από το μοντέλο. Ο κίονας 2 έχει τη μικρότερη απόκλιση από το προτεινόμενο μοντέλο, ενώ οι κίονας 7 και 8 παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί οι κίονες βρίσκονται στη βορειοανατολική γωνία του Παρθενώνα.



Εικόνα 5.2.19: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

Πίνακας 5.2.7: Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία με θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής

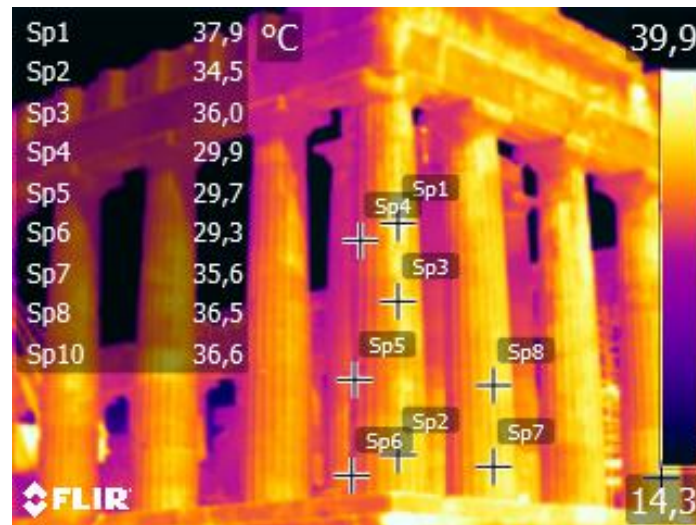
Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)		Κίονας 2(°C)		Κίονας 4(°C)		Κίονας 7(°C)		Κίονας 8(°C)	
0,44	30,0	45,3	30,1	44,6	29,0	43,1	41,3	39,1	30,1	42,2
1,25	30,5	45,5	31,0	43,3	30,0	41,9	41,3	38,9	29,0	42,0
2,10	31,0	46,2	31,0	44,0	30,0	42,0	41,4	39,1	29,8	43,0



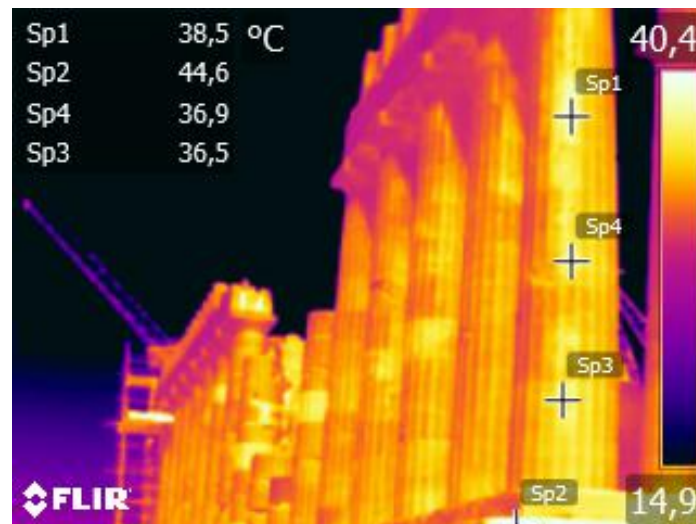
Εικόνα 5.2.20: Σύγκριση αποτελεσμάτων (25/07)

Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων του παραπάνω πίνακα και του προτεινόμενου θερμικού μοντέλου ιδιαίτερα όσο αφορά τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρατηρείται μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμότερο και στο ψυχρότερο κομμάτι του κίονα της τάξεως των 10°C. Οι χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τις υψηλότερες. Στο ψυχρό τμήμα του κίονα οι θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται καθ' ύψος του κίονα. Η υψηλότερη θερμοκρασία του κίονα 1 φτάνει τους 39°C όπως αποτυπώνεται με τη θερμογραφία υπερύθρου. Αυτή είναι μια παρατήρηση που λαμβάνεται από όλες τα θερμογραφήματα. Μια εξίσου σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι θερμοκρασίες στις κρηπίδες του Παρθενώνα οι οποίες είναι πιο

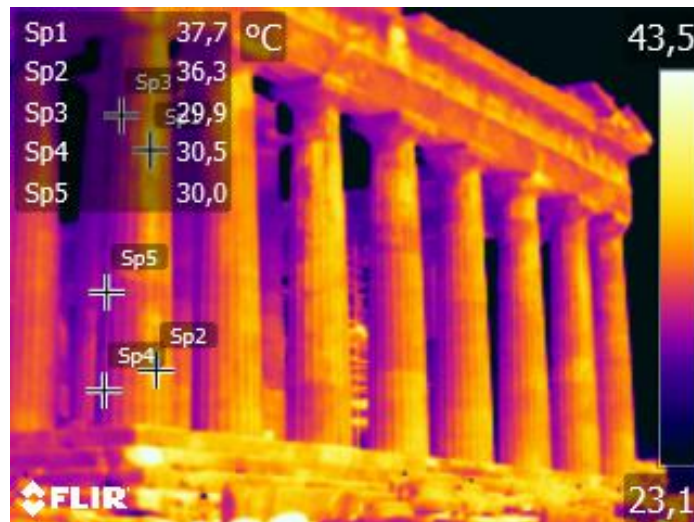
εκτεθειμένες φτάνει τους 44,6°C (εικόνα 5.2.16), η μέγιστη δηλαδή θερμοκρασία του αποτελέσματος του θερμικού μοντέλου.



Εικόνα 5.2.21: Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (25/07)



Εικόνα 5.2.22: Θερμογράφημα της νότιας όψης (25/07)



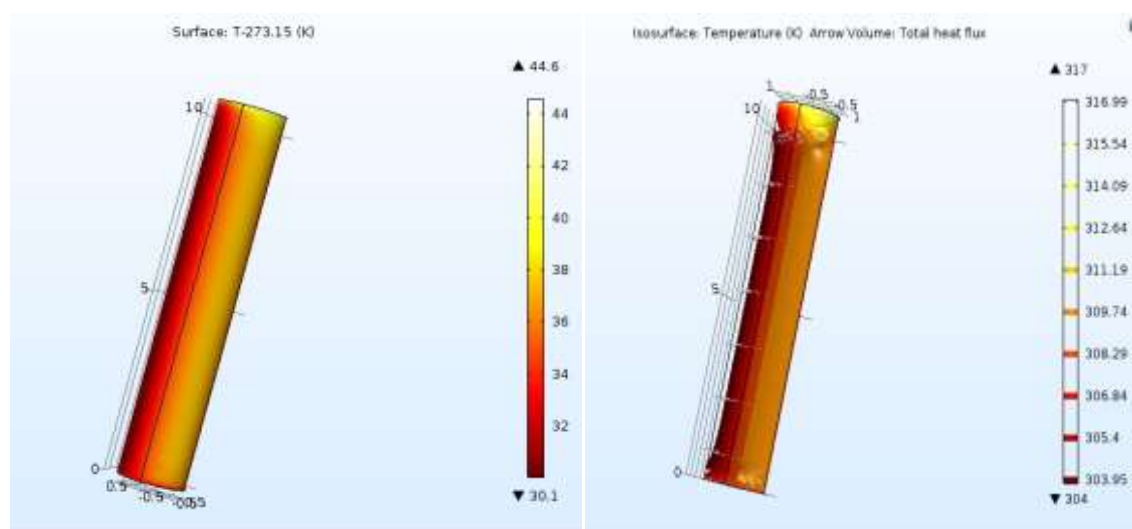
Εικόνα 5.2.23: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (25/07)

28 Ιουλίου 2017

Στις 28/07/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.36 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 38,5°C και η σχετική υγρασία 34%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 30°C.

Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.24). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα με τις επιφανειακές μετρήσεις (30-46°C) που λήφθηκαν με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής. Σημειώνεται μια διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα ψυχρότερα και θερμότερα σημεία του κίονα της τάξης των 15°C. Στην εικόνα 5.2.24 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα, αντίθετα στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας του πίνακα παρατηρείται μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως του 0,5°C καθ' ύψος. Η διαφορά στο αποτέλεσμα πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι ο κίονας του μοντέλου είναι απλής κυλινδρικής μορφής και δεν έχει τη λέπτυνση που παρουσιάζει καθ' ύψος ο πραγματικός κίονας. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες των κίωνων παρουσιάζουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους καθ' ύψος, της τάξης των 0,3°C. Ο κίονας που παρουσιάζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι ο κίονας 1. Ο κίονας 1 είναι ο

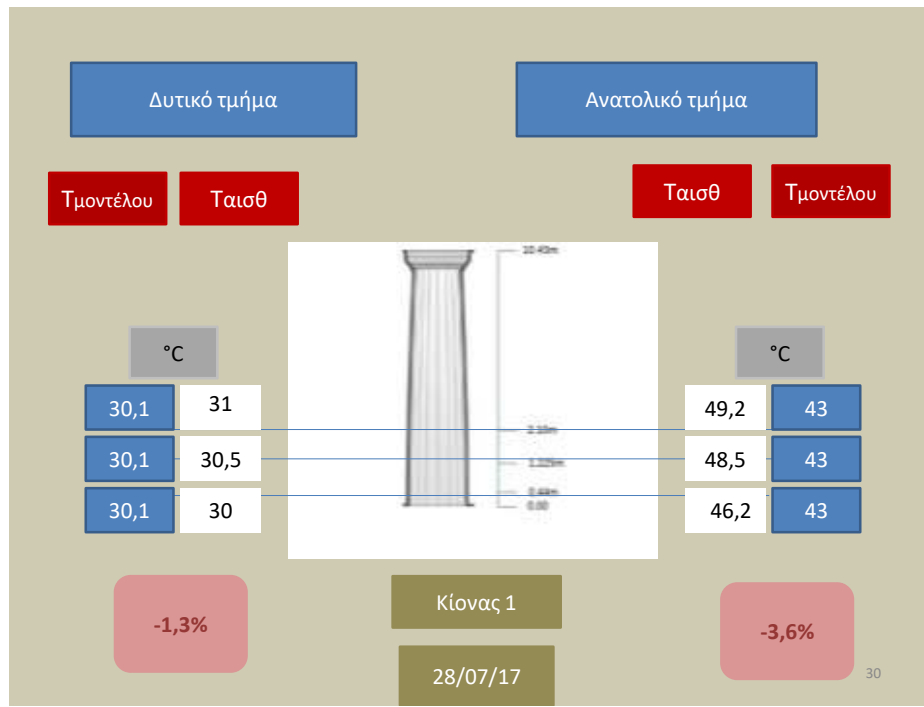
γωνιαίος νοτιανατολικός κίονας του Παρθενώνα και είναι εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και στον άνεμο. Ο κίονας 1 είναι ο μοναδικός ο οποίος εμφανίζει σημείο με θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη προβλεπόμενη θερμοκρασία του μοντέλου, με διαφορά θερμοκρασίας 1,8°C ενώ αντίθετα οι υπόλοιποι κίονες παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες από το μοντέλο. Ο κίονας 2 έχει τη μικρότερη απόκλιση από το προτεινόμενο μοντέλο, ενώ ο κίονας 7 και 8 παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί οι κίονες βρίσκονται στη βορειανατολική γωνία του Παρθενώνα και έχουν μεγαλύτερη σκίαση.



Εικόνα 5.2.24: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

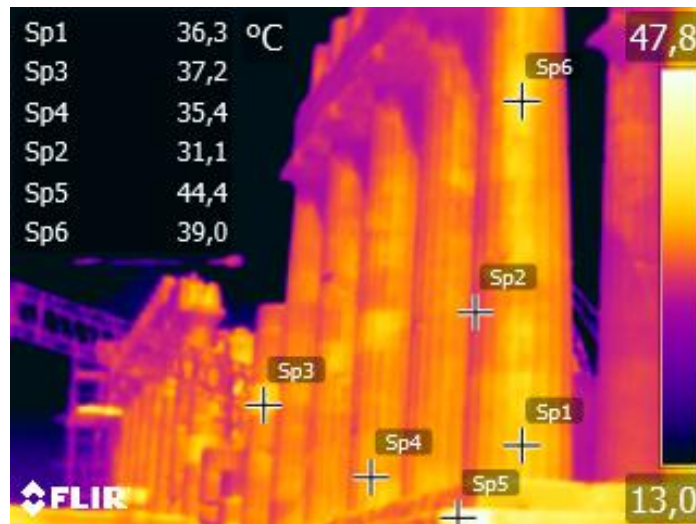
Πίνακας 5.2.8 : Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία με θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)	Κίονας 2(°C)	Κίονας 4(°C)	Κίονας 7(°C)	Κίονας 8(°C)
0,44	30,0	45,3	30,1	44,6	29,0
1,25	30,5	45,5	30,6	43,3	30,0
2,10	31,0	46,1	30,2	43,8	30,0

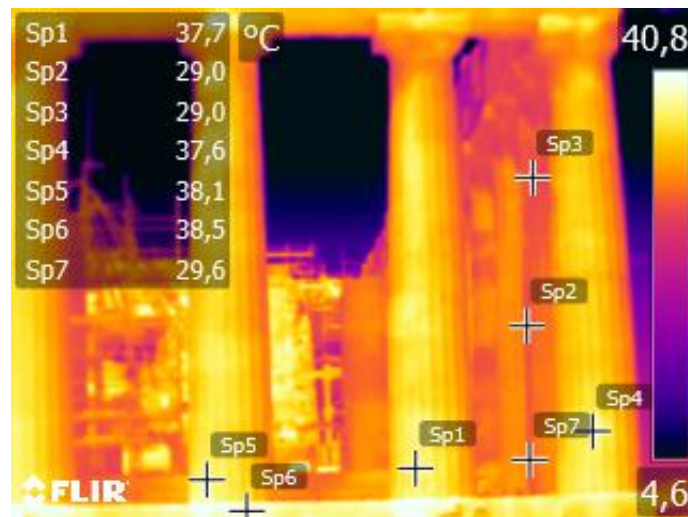


Εικόνα 5.2.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων (28/07)

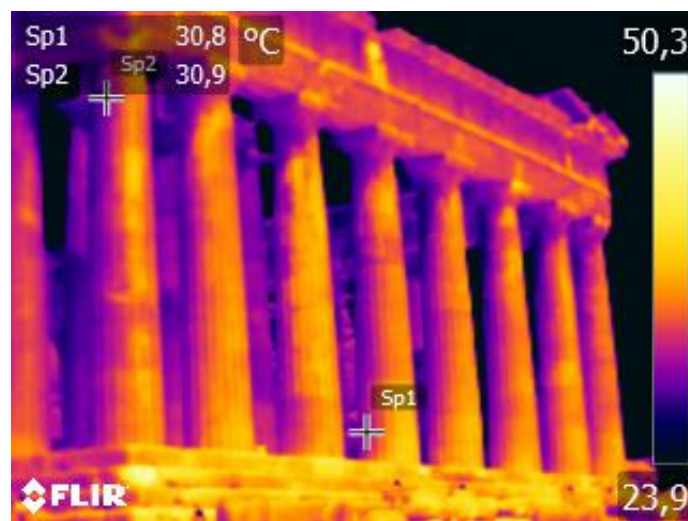
Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων του πίνακα 5.2.8 και του προτεινόμενου θερμικού μοντέλου ιδιαίτερα όσο αφορά τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρατηρείται μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμότερο και στο ψυχρότερο κομμάτι του κίονα της τάξεως των 10°C. Οι χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τις υψηλότερες. Ενώ στο δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του κίονα που αποτελούν τις ψυχρότερες περιοχές, οι θερμοκρασίες δε μεταβάλλονται καθ' ύψος του κίονα. Στο ανατολικό τμήμα οι υψηλότερες θερμοκρασίες του κίονα 1 φτάνουν τους 39°C και είναι πιο υψηλές καθ' ύψος του κίονα. Αυτή είναι μια παρατήρηση που λαμβάνεται από όλες τα θερμογραφήματα. Μια εξίσου σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι θερμοκρασία στις κρηπίδες του Παρθενώνα οι οποίες είναι πιο εκτεθειμένες φτάνουν τους 44,4°C (εικόνα 6.2.18), μια τιμή θερμοκρασίας αρκετά κοντινή στη μέγιστη θερμοκρασία των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου.



Εικόνα 5.2.26: Θερμογράφημα της νοτιοανατολικής όψης (28/07)



Εικόνα 5.2.27: Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (28/07)

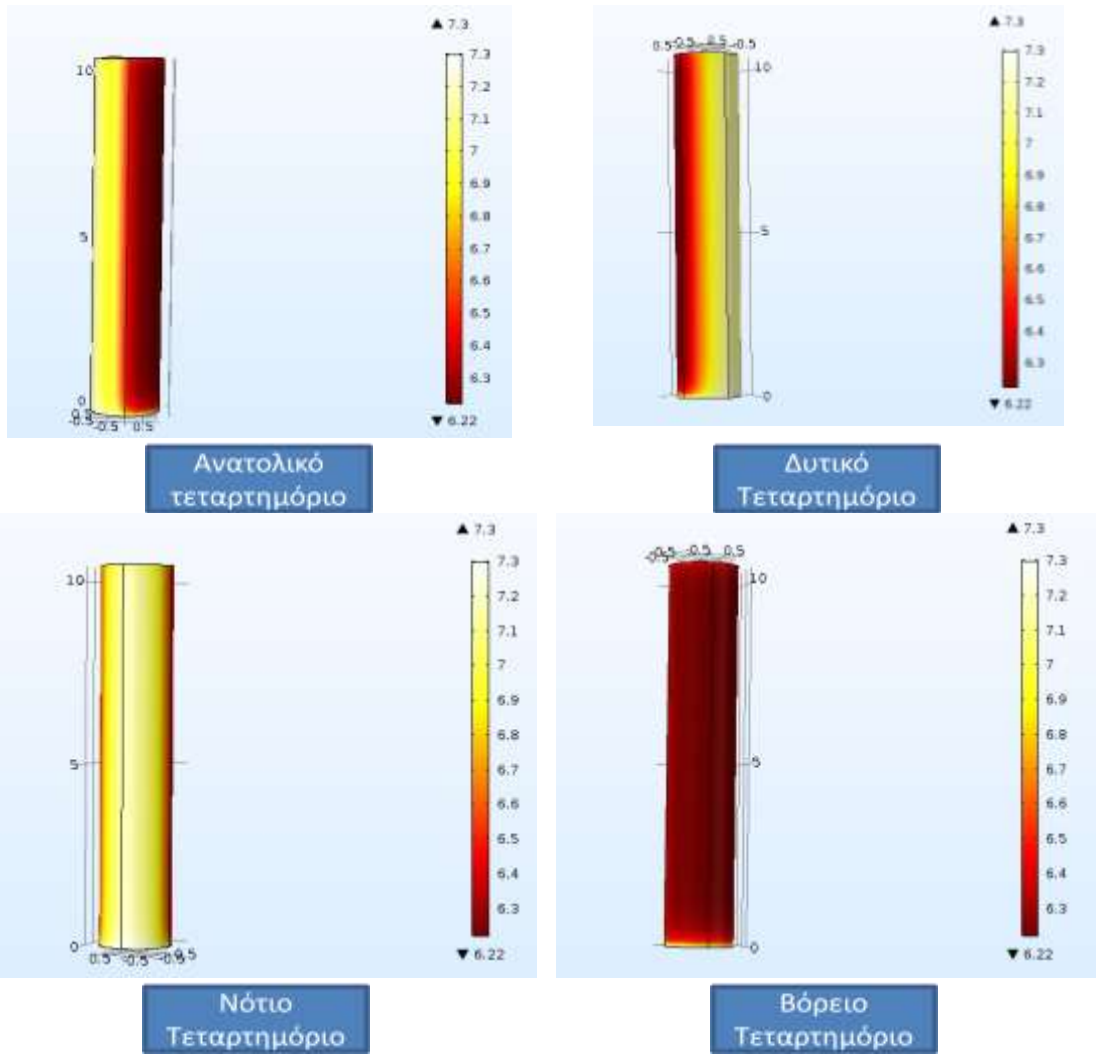


Εικόνα 5.2.28: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (28/07)

21 Δεκεμβρίου 2017

Στις 21/12/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.36 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε από 6,2-8,5°C και η σχετική υγρασία 66-75%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 6,9°C.

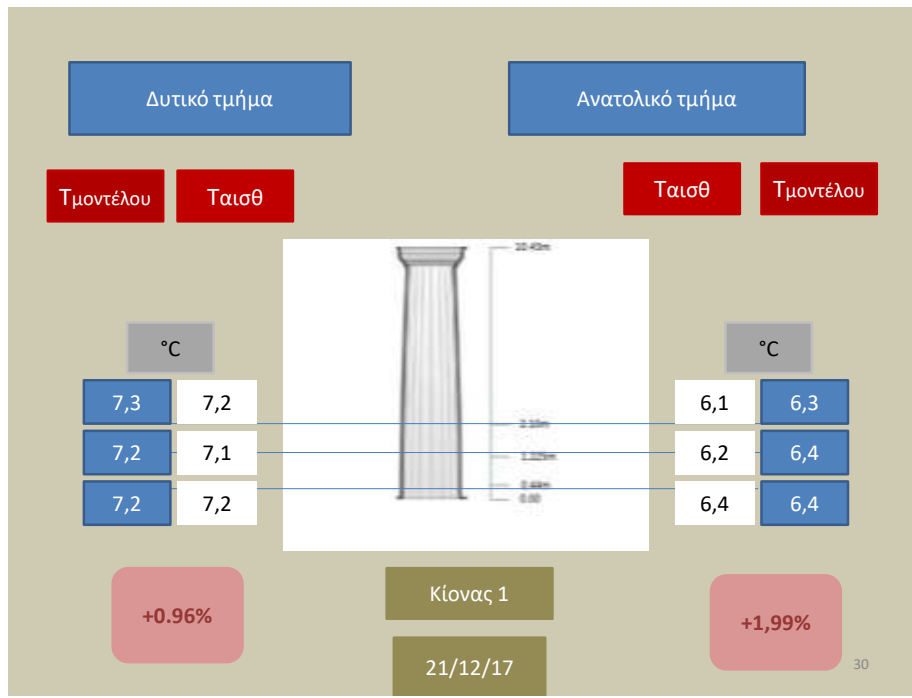
Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.29). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα με τις επιφανειακές μετρήσεις (6,5-7,5°C) που λήφθηκαν με αισθητήρα επαφής. Σημειώνεται μια διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα ψυχρότερα και θερμότερα σημεία του κίονα της τάξης του 1°C. Στην εικόνα 6.2.5 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το χειμώνα παρατηρήθηκε μικρή θερμοκρασιακή διαφορά καθ' ύψος του κίονα στο κάθε τεταρτημόριο (μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά 0,2°C). Ο κίονας που παρουσιάζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι ο κίονας 8. Ο κίονας 8 είναι ο μοναδικός ο οποίος εμφανίζει σημεία με θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη προβλεπόμενη θερμοκρασία του μοντέλου. Οι απόκλιση του μοντέλου από τις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα επαφής έχουν απόκλιση 0,99% στο δυτικό τεταρτημόριο του κίονα και 1,99% στο ανατολικό.



Εικόνα 5.2.29: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

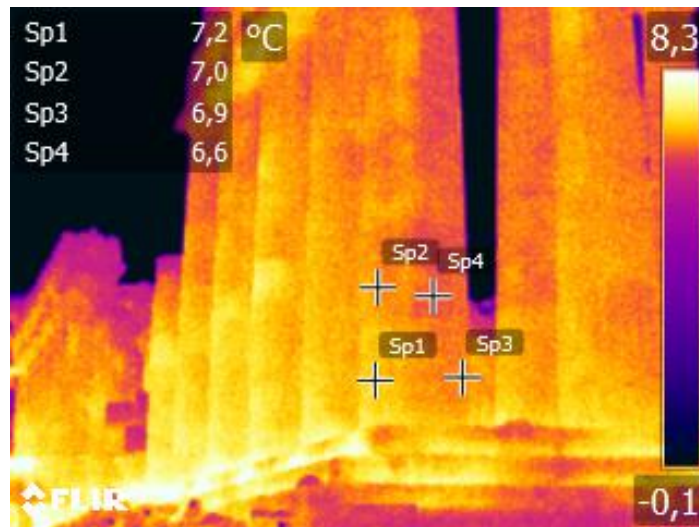
Πίνακας 5.2.9 : Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία με θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)		Κίονας 2(°C)		Κίονας 4(°C)		Κίονας 7(°C)		Κίονας 8(°C)	
0,44	7,2	6,4	7,2	6,4	7	6,4	7,3	6,3	7,4	6,6
1,25	7,1	6,2	7	6,3	7,1	6,5	7,4	6,4	7,4	6,6
2,10	7,2	6,1	7,1	6,2	7,1	6,6	7,5	6,4	7,6	6,8

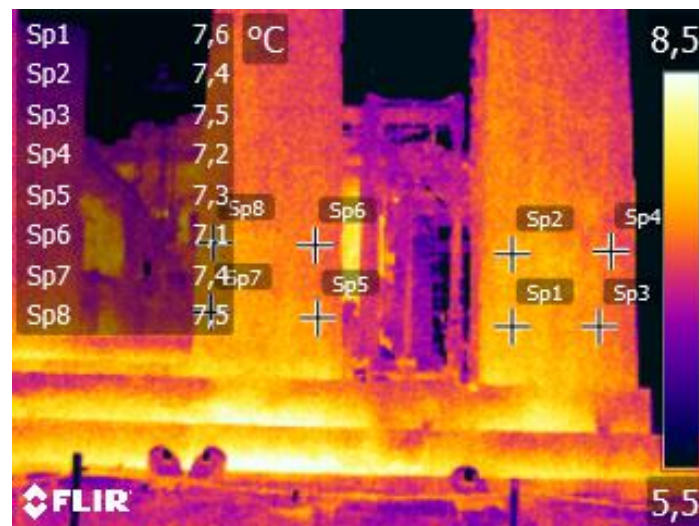


Εικόνα 5.2.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων (21/12)

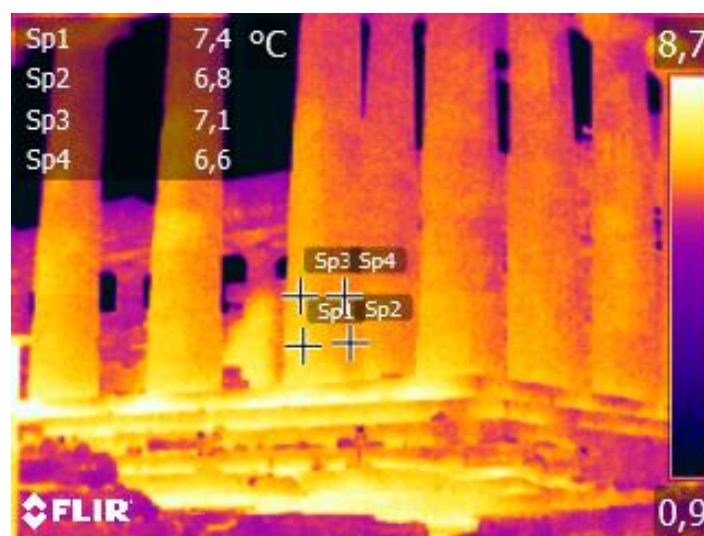
Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου συμφωνούν με τα αποτελέσματα του μοντέλου και των μετρήσεων με αισθητήρα επαφής. Καταγράφονται θερμοκρασίες στην επιφάνεια του κίονα 6,6-7,6°C. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασία στη βάση του κάθε κίονα είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία σε ανώτερο τμήμα του και επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Επίσης, παρατηρείται ότι στους κίονες 7, 8 καταγράφονται με τη θερμοκρασία υπερύθρου υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι στους κίονες 1,2. Αυτή είναι μια παρατήρηση που προκύπτει και από τον πίνακα 5.2.9, όπου παρουσιάζονται οι μετρήσεις με τον αισθητήρα επαφής,



Εικόνα 5.2.31: Θερμογράφημα της νοτιοανατολικής όψης (21/12)



Εικόνα 5.2.32: Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (21/12)

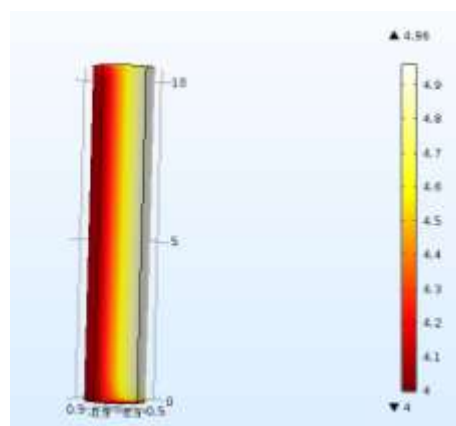
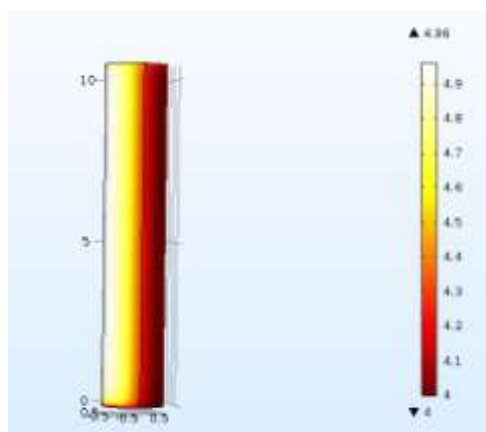


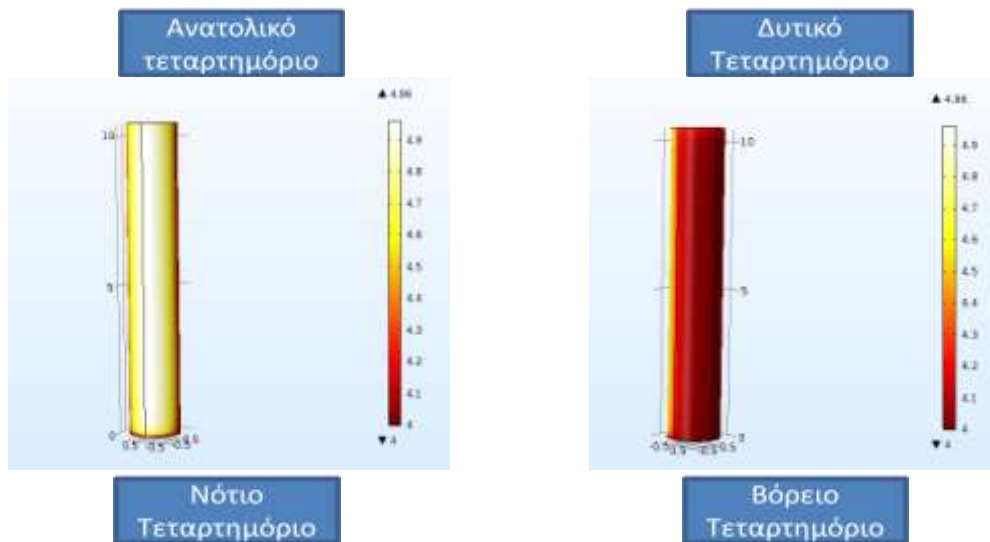
Εικόνα 5.2.33: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (21/12)

22 Δεκεμβρίου 2017

Στις 22/12/2017 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 09.00 π.μ.-15.00 μ.μ. Ακολουθούν οι μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.36 π.μ. για να μπορεί να γίνει η σύγκριση και με τις μετρήσεις των υπόλοιπων ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε από 6,2-6,5°C και η σχετική υγρασία 70-75%. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα ορίστηκε στους 4°C. Τη συγκεκριμένη ημέρα, η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας ήταν πολύ υψηλή και μετά τις μετρήσεις έλαβε χώρα βροχόπτωση.

Για τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόστηκε το προτεινόμενο μοντέλο (εικόνα 5.2.34). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα με τις επιφανειακές μετρήσεις (4-5,2°C) που λήφθηκαν με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής. Επίσης, τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου καταγράφουν θερμοκρασίες στους κίονες 3-5,5°C. Οι θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμότερο και στο ψυχρότερο τμήμα του κίονα δεν υπερβαίνει τον 1°C. Στην εικόνα 6.2.5 παρατηρείται ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κίονα, αντίθετα στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας του πίνακα παρατηρείται μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως του 0,3°C καθ' ύψος. Η βάση του κίονα παρατηρείται πιο ψυχρή από το ανώτερο τμήμα του. Στην εικόνα 5.3.35 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις επιφανειακές μετρήσεις. Στο ανατολικό τμήμα του κίονα η απόκλιση είναι +1.4% ενώ στο δυτικό +6,5%.

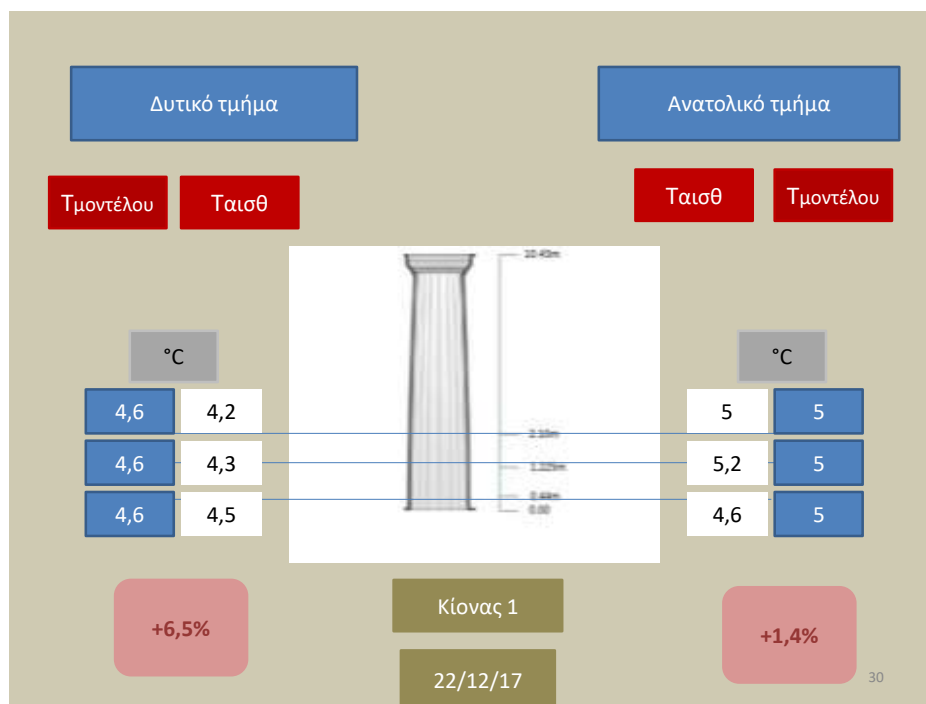




Εικόνα 5.2.34: Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου

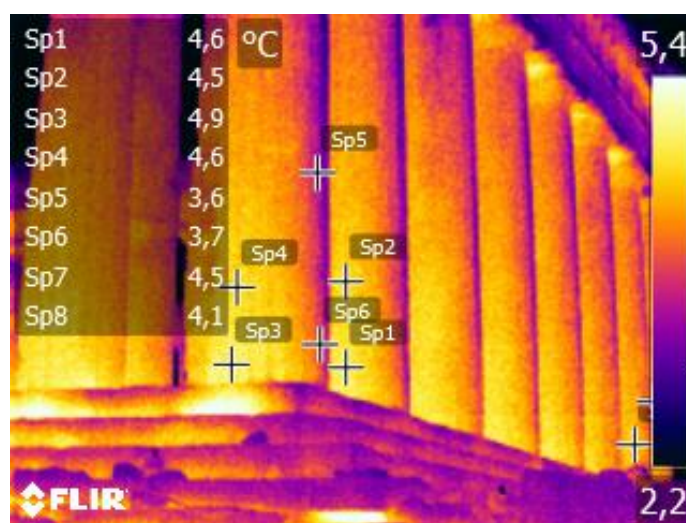
Πίνακας 5.2.10 : Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία με θερμόμετρο με αισθητήρες επαφής

Ύψος (m)	Κίονας 1(°C)		Κίονας 2(°C)		Κίονας 4(°C)		Κίονας 7(°C)		Κίονας 8(°C)	
0,44	5	4,2	5,1	4	4,7	3,6	4,2	3,9	4,5	3
1,25	5,2	4,3	5	4,1	4,5	3,7	4,5	3,5	4,3	3,2
2,10	4,6	4,5	5,2	4,2	4,3	3,3	4,3	3,4	4,5	3,3

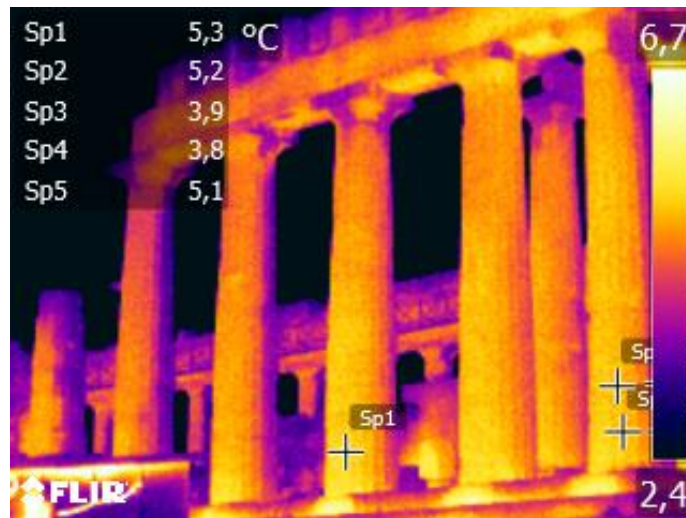


Πίνακας 5.2.35 : Σύγκριση αποτελεσμάτων

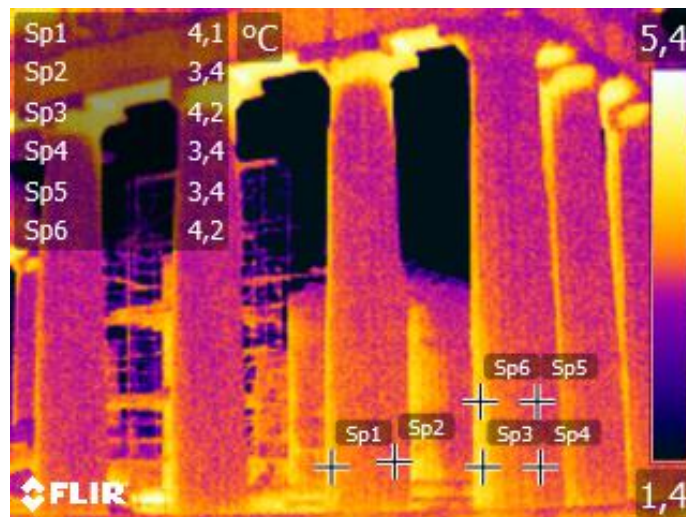
Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αποτελέσματα των επιφανειακών μετρήσεων του πίνακα 5.2.10 και του προτεινόμενου θερμικού μοντέλου. Η θερμοκρασία βάσης του κίονα παρατηρείται 3,9-4,1°C, όπως έχει εισαχθεί και στο μοντέλο προσομοίωσης. Παρατηρείται μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμότερο και στο ψυχρότερο κομμάτι του κίονα της τάξεως των 10°C. Οι χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τις υψηλότερες. Ενώ στο δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του κίονα που αποτελούν τις ψυχρότερες περιοχές, οι θερμοκρασίες δε μεταβάλλονται καθ' ύψος του κίονα. Στο νοτιανατολικό τμήμα οι υψηλότερες θερμοκρασίες του κίονα 1 φτάνουν τους 5,2°C και είναι πιο υψηλές καθ' ύψος του κίονα. Από τα θερμογραφήματα παρατηρείται ότι η νοτιανατολική πλευρά του κίονα είναι θερμότερη, όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα 5.2.36: Θερμογράφημα της ανατολικής όψης (22/12)



Εικόνα 5.2.37: Θερμογράφημα της νότιας όψης (22/12)



Εικόνα 5.2.38: Θερμογράφημα της νοτιανατολικής γωνίας (22/12)

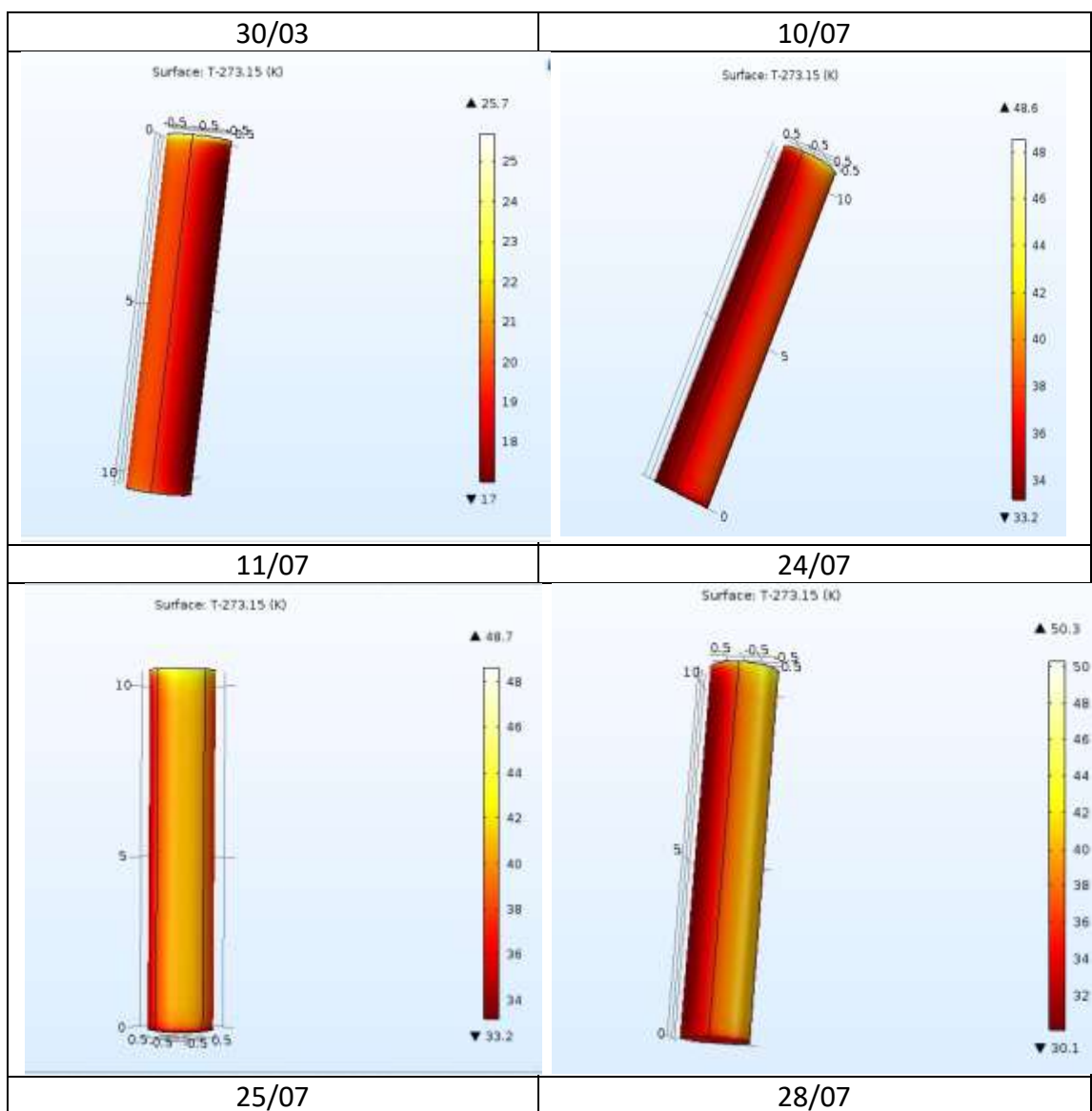
5.3 Επίδραση περιβαλλοντικών παραμέτρων

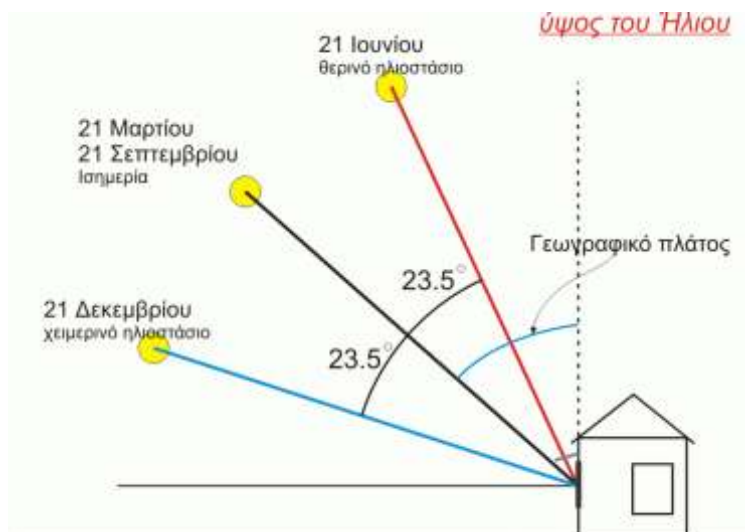
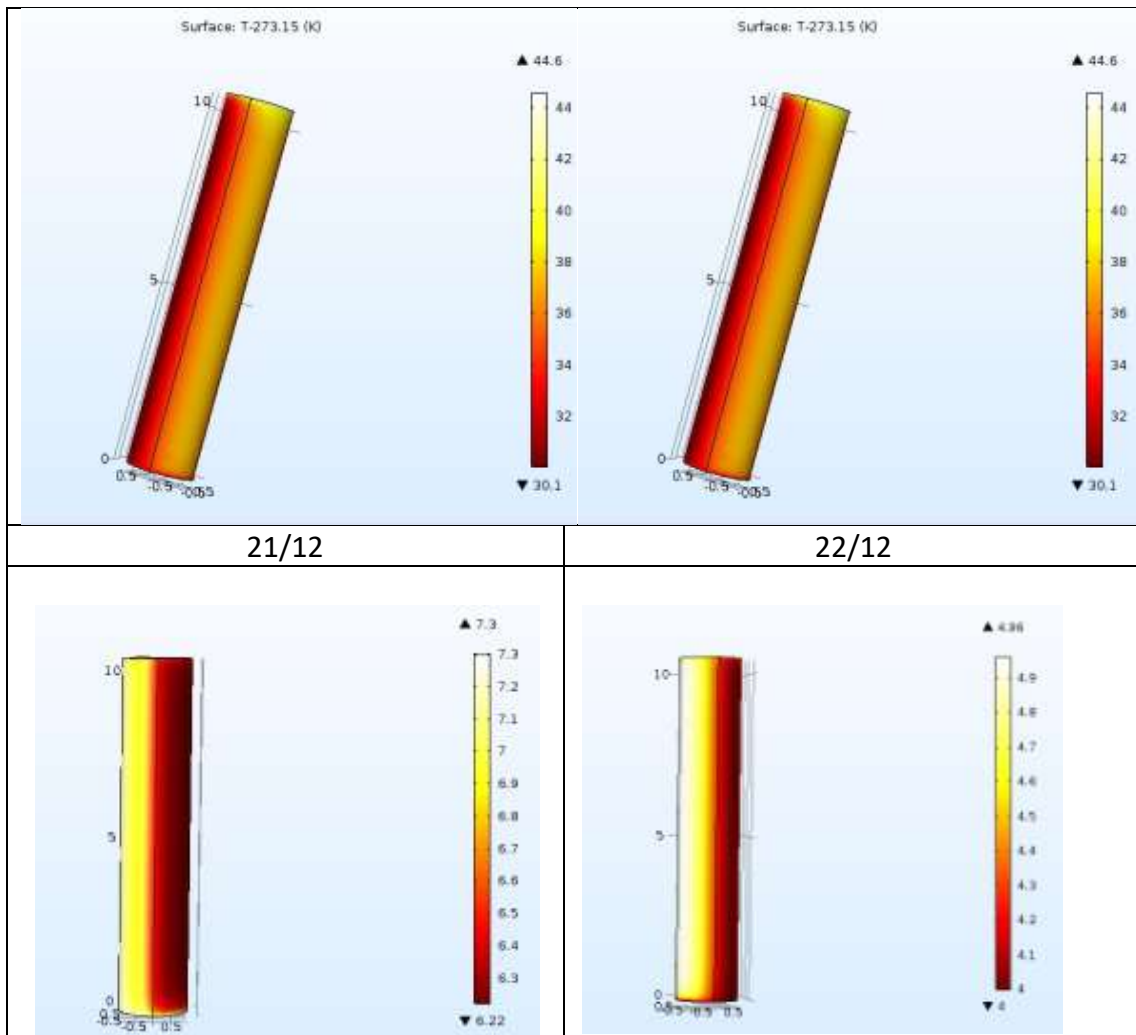
Αρχικά, έγινε σύγκριση του αποτελέσματος του προτεινόμενου μοντέλου (πίνακας 5.3.1) στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες των μετρήσεων.

Μπορούν να διαχωριστούν τρεις θερμοκρασιακές κλίμακες 5°C (17-22°C), 15°C (30-45°C) και 20°C (30-50°C), ανάμεσα στις διαφορές θερμοκρασίας που σημειώνονται στα διαφορετικά τεταρτημόρια του κίονα. Σημαντική παράμετρος για το αποτέλεσμα αποτελεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με την άνοδο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τους 17°C στους 33-38°C παρατηρείται η

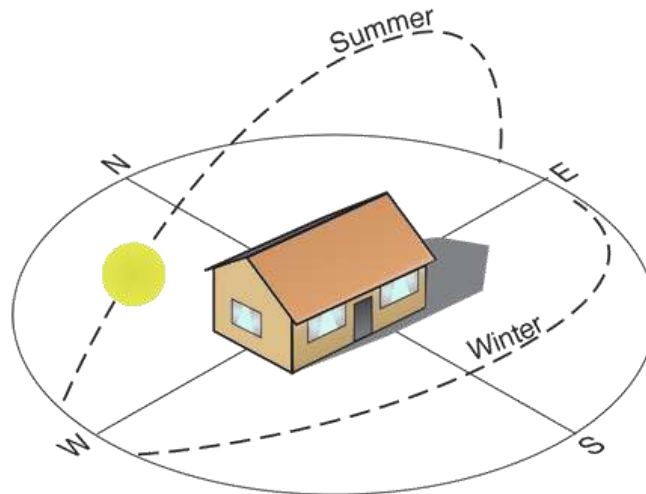
διαφορά στη θερμοκρασιακή κλίμακα του κίονα από 5°C στους 15°C. Ένας παράγοντας που συμβάλλει επίσης στην άνοδο των θερμοκρασιών του κίονα και στη διαφορά ανάμεσα στις ψυχρές και θερμές περιοχές του, είναι η θέση του ήλιου ανάλογα με την εποχή του χρόνου καθώς και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Από τη διαφορά στη θέση του ήλιου ανάμεσα στις δύο εποχές (εικόνες 6.2.1, 6.2.2) μπορεί να δικαιολογηθεί γιατί την καλοκαιρινή περίοδο του Ιουλίου η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη και σε χαμηλότερα ύψη του κορμού του κίονα.

Πίνακας 5.3.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου





Εικόνα 5.3.1: Το ύψος του ήλιου σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος ανά εποχή



Εικόνα 5.3.2: Η θέση του ήλιου σε σχέση με το προσανατολισμό του μνημείου ανά εποχή

Παράλληλα, θα πρέπει να σημειωθεί η διαφορά που σημειώνεται μέσα στο μήνα του Ιουλίου στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (24/07). Εκείνη την ημέρα σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες ολόκληρου του μήνα Ιουλίου για την Αθήνα και θερμά ρεύματα. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας την ώρα των μετρήσεων ήταν 900 W/m^2 . Η μέγιστη θερμοκρασία που προέβλεψε το μοντέλο έφτασε τους 50°C , κατά 5°C περίπου υψηλότερη από άλλες ημέρες της ίδιας εποχής.

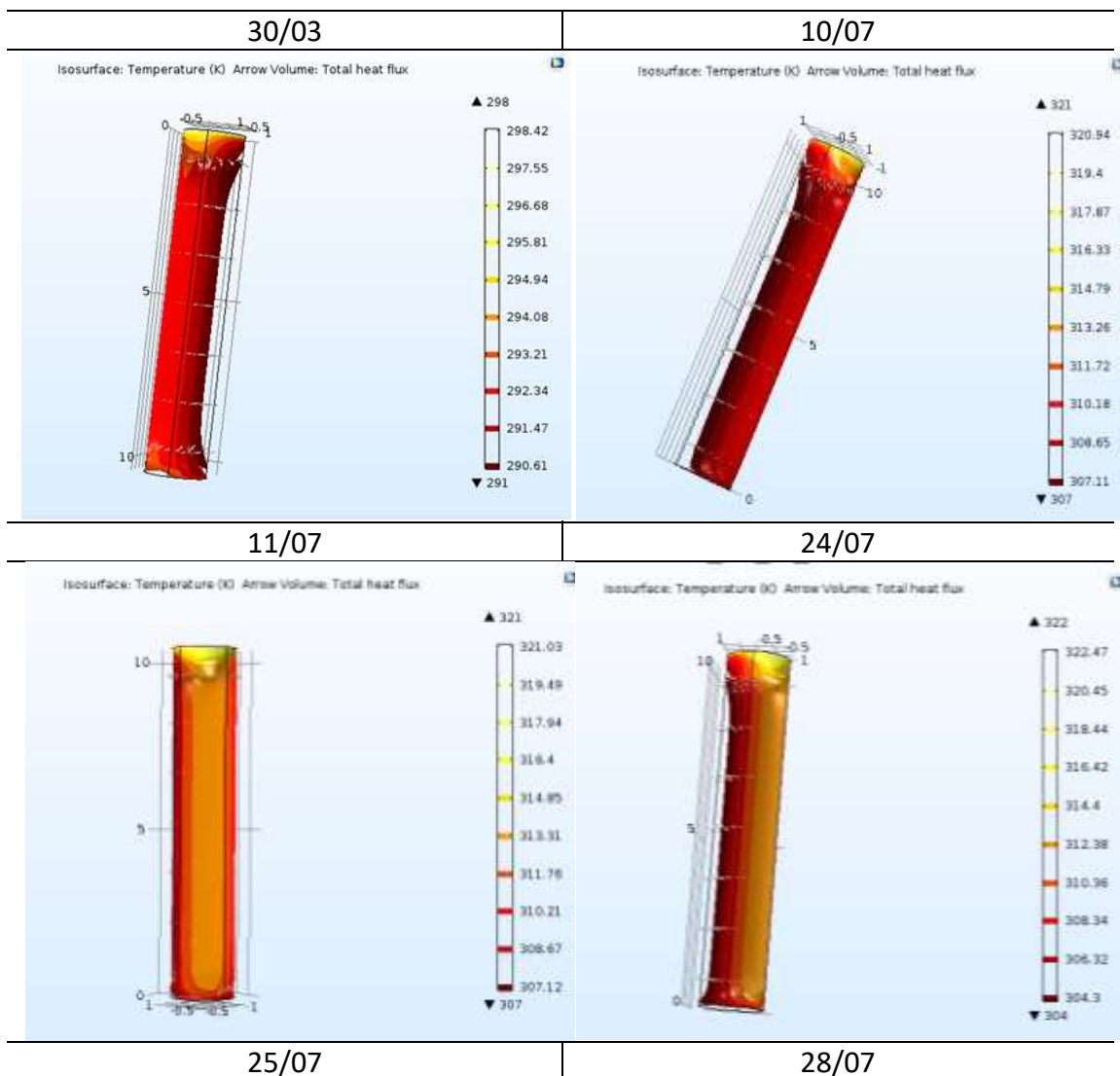
Επιπρόσθετα, το θερμικό μοντέλο δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης της κατανομής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κίονα (πίνακας 5.3.2). Αυτό είναι ένα βήμα σημαντικό για την μελέτη της μεταφοράς θερμότητας και σε ένα δεύτερο στάδιο της θερμικής καταπόνησης του πεντελικού μαρμάρου γιατί όπως είναι γνωστό από τη μέθοδο της παθητικής θερμογραφίας δεν μπορούν να ληφθούν συμπεράσματα για το εσωτερικό του μνημείου, μόνο για την επιφανειακή φθορά.

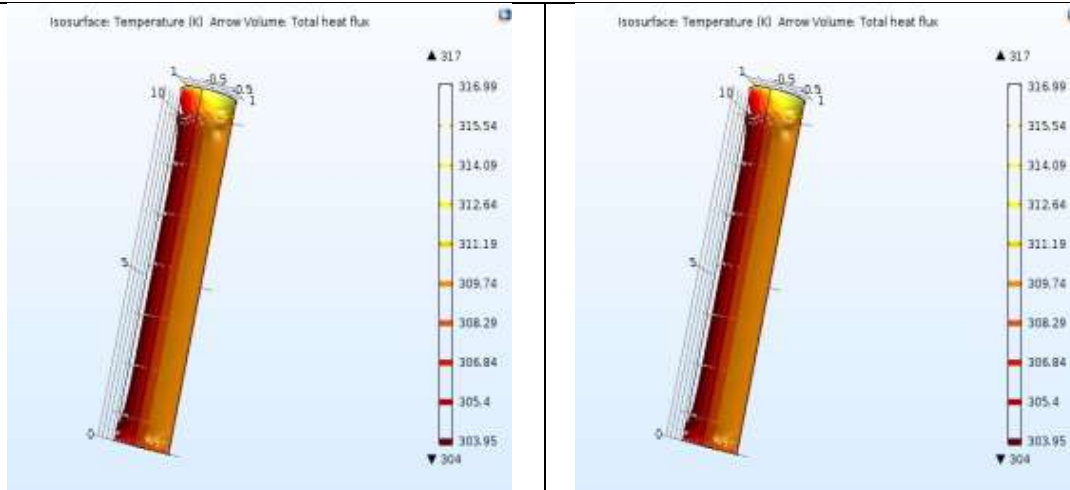
Παρατηρούνται στα διαγράμματα των ισόθερμων καμπυλών στο εσωτερικό του κίονα κάθε φορά τέσσερις θερμοκρασιακές ζώνες. Η θερμότερη ζώνη σε όλα τα αποτελέσματα εντοπίζεται στην κορυφή του κίονα και αποδίδεται στην επιλεγμένη γεωμετρία του μοντέλου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στις ημέρες με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμή ζώνη του κίονα δεν περιορίζεται μόνο στην κορυφή αλλά αποτελεί ένα μεγάλο

μέρος της συνολικής επιφάνειας του. Επίσης, οι ενδιάμεσες θερμοκρασιακές ζώνες παρατηρούνται παχύτερες στους θερινούς μήνες.

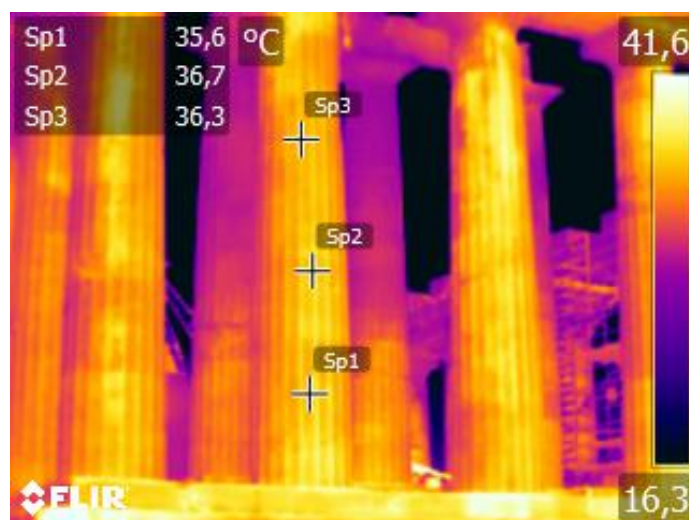
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα έχουν πιθανώς απόκλιση από την πραγματικότητα λόγω των παραδοχών που έγιναν για την κατασκευή του μοντέλου. Οι κίονες του Παρθενώνα δεν είναι ελεύθερα στοιχεία στο χώρο αλλά είναι μέρος του αρχιτεκτονικού συνόλου του μνημείου. Επίσης, υπάρχουν στο εσωτερικό των κίωνων μεταλλικά στοιχεία που τοποθετήθηκαν κατά την αναστύλωση τους. Σε ένα δεύτερο στάδιο μπορεί να διερευνηθεί πώς αυτοί οι δομικοί παράγοντες επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

Πίνακας 5.3.2: Σύγκριση των ισόθερμων κατανομών του μοντέλου

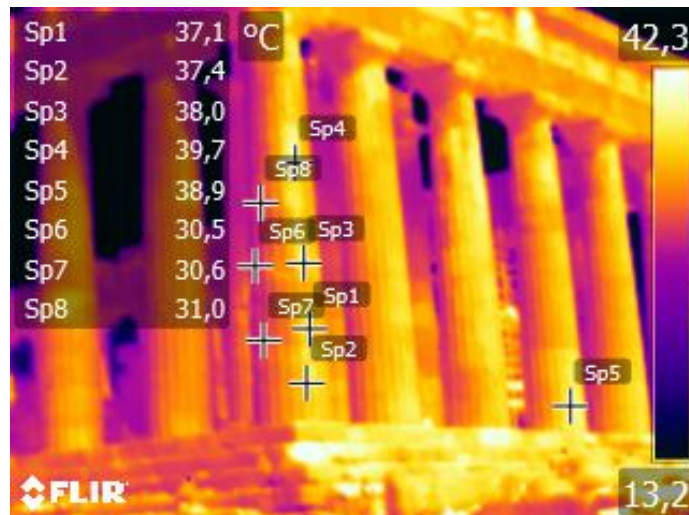




Όπως, αναφέρθηκε παραπάνω η σκίαση είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη θερμική καταπόνηση του μνημείου λόγω της διαφοράς απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικά αρχιτεκτονικά μέλη του. Ο παράγοντας της σκίασης εξαρτάται από δύο συνιστώσες από τη θέση του ήλιου σε σχέση με την εποχή και την ώρα μελέτης (εικόνα 5.3.1, 5.3.2) και από την ίδια την αρχιτεκτονική δομή του μνημείου δηλαδή την γεωμετρία του αντικειμένου εξέτασης. Για τη μελέτη του παράγοντα αυτού επιλέχθηκαν τα ακόλουθα θερμογραφήματα (εικόνες 5.3.3, 5.3.4).



Εικόνα 5.3.3: Θερμογράφημα τμήματος της ανατολικής όψης (25/07)



Εικόνα 5.3.4: Θερμογραφήμα τμήματος της ανατολικής όψης (24/07)

Το θερμογράφημα (εικόνα 6.3.3.) λήφθηκε στις 25/07. Η ώρα λήψης του θερμογραφήματος ήταν 09.40 π.μ. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μετρήθηκε στους 37°C και η σχετική υγρασία 34%. Η θέση του ήλιου για το μήνα του Ιουλίου και την ώρα μπορεί να υπολογιστεί, από τις εικόνες 6.3.1, 6.3.2. Η πρώτη σειρά από κίονες έχουν ήδη θερμανθεί στο ανατολικό τεταρτημόριο τους και οι μέση θερμοκρασία όλων των κίωνων υπολογίζεται στους 36°C, κατά 1°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας καθύψος των κίωνων (1°C). Αντίθετα, στη δεύτερη εσωτερική σειρά των κίωνων διακρίνονται δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές περιοχές: μια θερμότερη (με μέση θερμοκρασία 33°C) που εντοπίζεται στον πρώτο και δεύτερο σπόνδυλο κάθε κίονα και μια ψυχρότερη (31,5-29,5°C) στους ανώτερους σπόνδυλους του κίονα. Η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη περιοχή ελαττώνεται καθ' ύψος, γιατί λόγω θέσης του ήλιου το συγκεκριμένο μήνα οι ακτίνες του ήλιου θερμαίνουν πρώτα τα κατώτερα τμήματα του κίονα, ενώ τα ανώτερα βρίσκονται επίσης σε σκίαση από τους εξωτερικούς). Ο διαφορετικός τρόπος που ένας κίονας έρχεται σε επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, της τάξεως των 7° C στο συγκεκριμένο θερμογράφημα.

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν επαναληψιμότητα όπως επιβεβαιώνει η εικόνα 5.3.4. Το συγκεκριμένο θερμογράφημα λήφθηκε την ίδια ώρα, στις 24/07, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C και σχετική υγρασία 34%. Οι θερμότερες επιφάνειες των εξωτερικών κίωνων κυμαίνονται από 37,5-39°C. Οι εσωτερικοί

κίονες διακρίνονται σε ένα θερμότερο (35-36°C) και ένα ψυχρότερο τμήμα (31-29,5°C). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο διαφορετικός τρόπος που ένας κίονας έρχεται σε επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε διαφορά θερμοκρασίας 10° C.

Στις επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας με αισθητήρες επαφής παρατηρήθηκαν διαφορετικές θερμοκρασίες ανά κίονα για την ίδια μέρα και ώρα μετρήσεων. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες. Για τη περαιτέρω μελέτη αυτών κατασκευάστηκαν για τον κάθε κίονα ξεχωριστά τα διαγράμματα (σχέδια 5.3.1-5.3.5) ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας για τις αντίστοιχες ημέρες μετρήσεων. Ως σημείο αναφοράς επιλέχθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

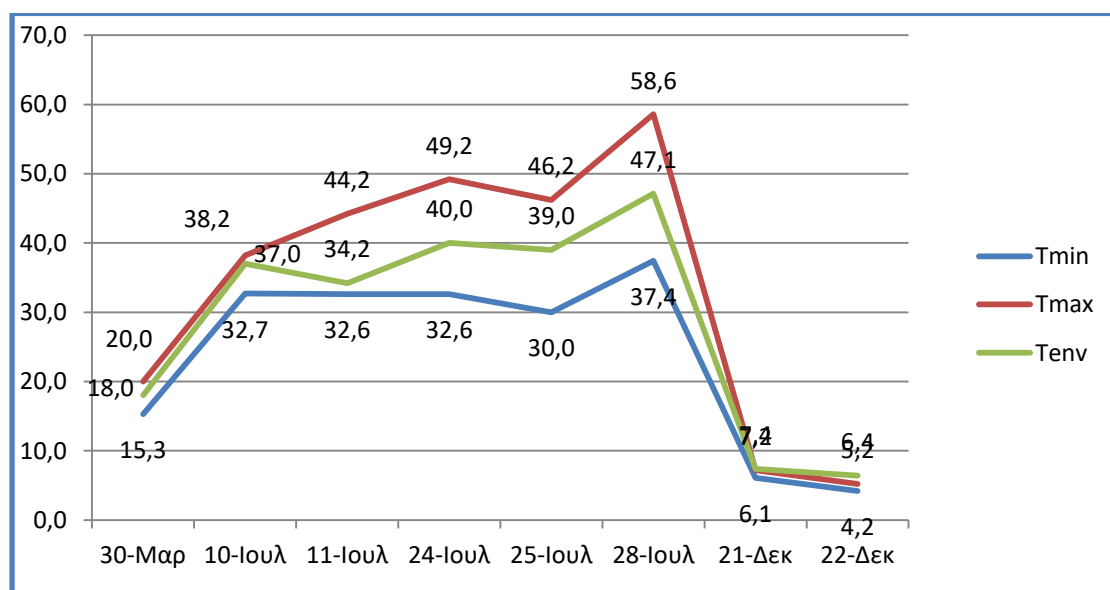
Παρατηρείται ότι ο κίονας 4 και ο κίονας 8 παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας για όλες τις ημέρες των μετρήσεων. Ο κάθε κίονας παρουσιάζει μια απόκλιση από τους υπόλοιπους για διαφορετική ημέρα των μετρήσεων. Ο κίονας 1 παρουσιάζει διαφορά θερμοκρασίας στην περίοδο του Μαρτίου κατά 5°C ανάμεσα στη μέγιστη και στην ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ οι υπόλοιποι κίονες κυμαίνονται σε διαφορά 2-3°C. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στη θέση του επειδή είναι ο νοτιανατολικός κίονας του Παρθενώνα. Γενικότερα, την περίοδο του Μαρτίου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κοντά με τη μέγιστη θερμοκρασία.

Στην περίοδο 10, 11/07 οι κίονες 1, 2 εμφανίζουν τα υψηλότερα μέγιστα σε σχέση με τους υπόλοιπους κίονες (πιθανώς πάλι λόγω της θέσης τους). Γενικότερα, την περίοδο του Ιουλίου ο κίονας 1 παρουσιάζει μια διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας έως 17°C. Στον ίδιο μήνα, κίονας 2 παρουσιάζει τη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας 20°C ανάμεσα στη μέγιστη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή ενώ ο κίονας 7 παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη θερμοκρασία από όλους τους κίονες (10°C). Στο διάστημα 25,28/07 τα μέγιστα θερμοκρασίας μειώνονται από τον κίονα 1 στον κίονα 7 αναλογικά. Ο κίονας 8 όμως παρουσιάζει αυξημένη μέγιστη τιμή. Αυτή η διαφορά μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της θέσης του κίονα στη βορειανατολική γωνία του Παρθενώνα. Στις 28/07, ο κίονας 8 παρουσιάζει απόκλιση σε σχέση με

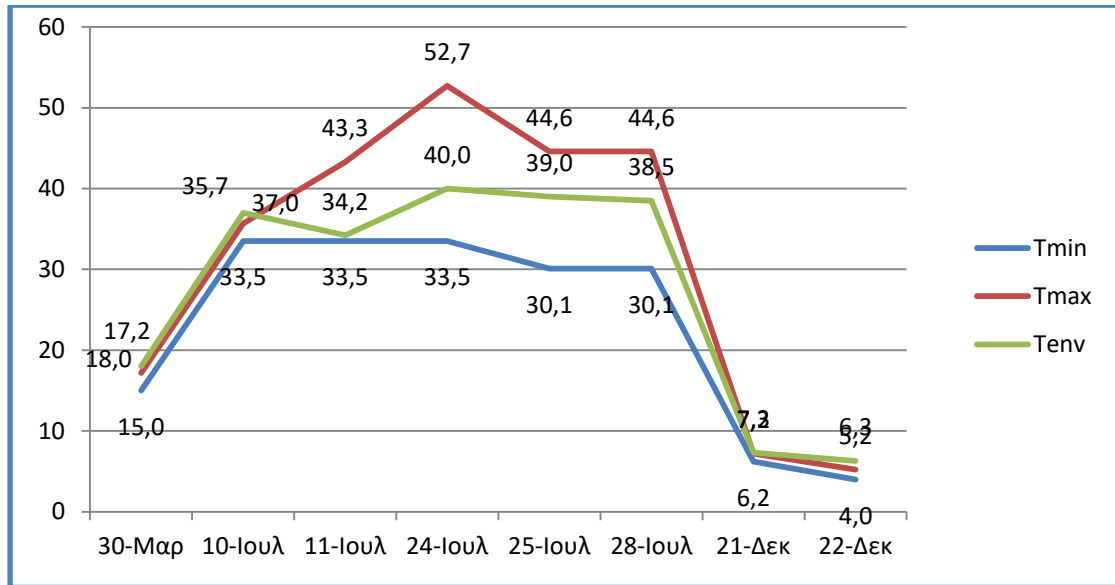
τους υπόλοιπους κίονες όσο αφορά την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας, η οποία ταυτίζεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας για τον κάθε κίονα επηρεάζονται από τη θέση του και τη σκίαση του κάθε κίονα ανάλογα με την εποχή και την ώρα της μέτρησης. Επίσης, επηρεάζονται από τις επιφανειακές φθορές όπως ρωγμές ή απομείωση του υλικού, την πάτινα (κίονα 1) και περιοχές προσμίξεων. Τέλος, ένας παράγοντας που επηρεάζει τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας και διαπιστώθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι η ένταση και ο προσανατολισμός του ανέμου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ή μειωμένες τιμές θερμοκρασίας και μεγάλες αποκλίσεις ανάμεσα σε ελάχιστα λεπτά μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός μετρήσεων στο κάθε σημείο.

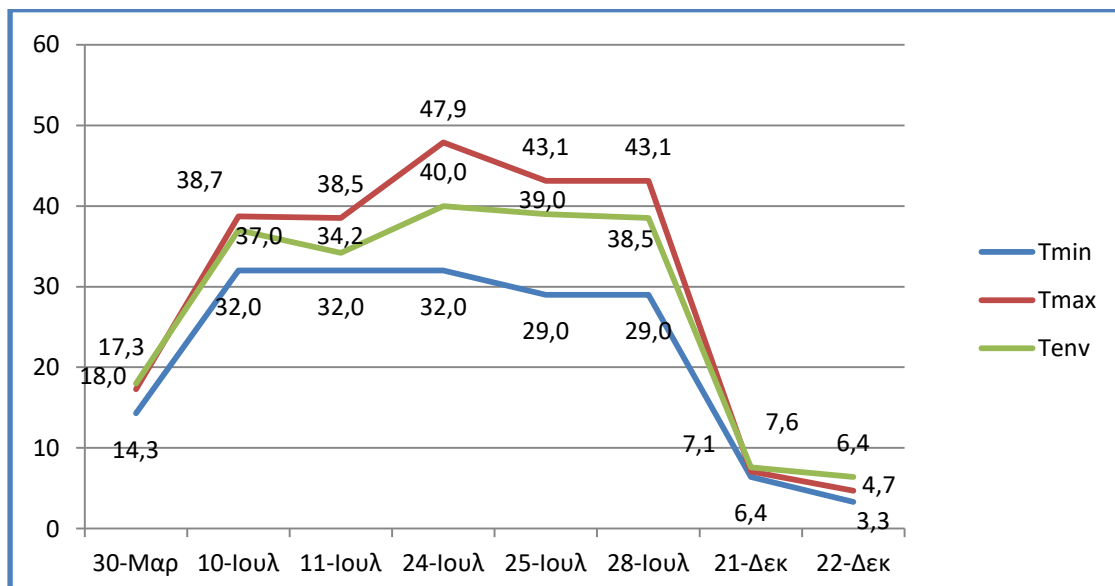
Τέλος, τα ακόλουθα διαγράμματα υπολογίστηκε η μέση τιμή της θερμοκρασίας και η τυπική απόκλιση για κάθε κίονα για την περίοδο του Μαρτίου και του Ιουλίου. Στον κίονα 1 η μέση τιμή θερμοκρασίας υπολογίστηκε στους 34,75°C με τυπική απόκλιση 10,10. Στον κίονα 2 η μέση τιμή θερμοκρασίας υπολογίζεται στους 34,48°C με τυπική απόκλιση 10,54. Στον κίονα 4 η μέση τιμή της θερμοκρασίας επιφάνειας είναι 33,08°C με τυπική απόκλιση 9,66. Στον κίονα 7 η μέση τιμή της θερμοκρασίας είναι 33,38°C με τυπική απόκλιση 8,56. Στον κίονα 8 η μέση τιμή της θερμοκρασίας υπολογίστηκε στους 33,23°C με τυπική απόκλιση 9,41.



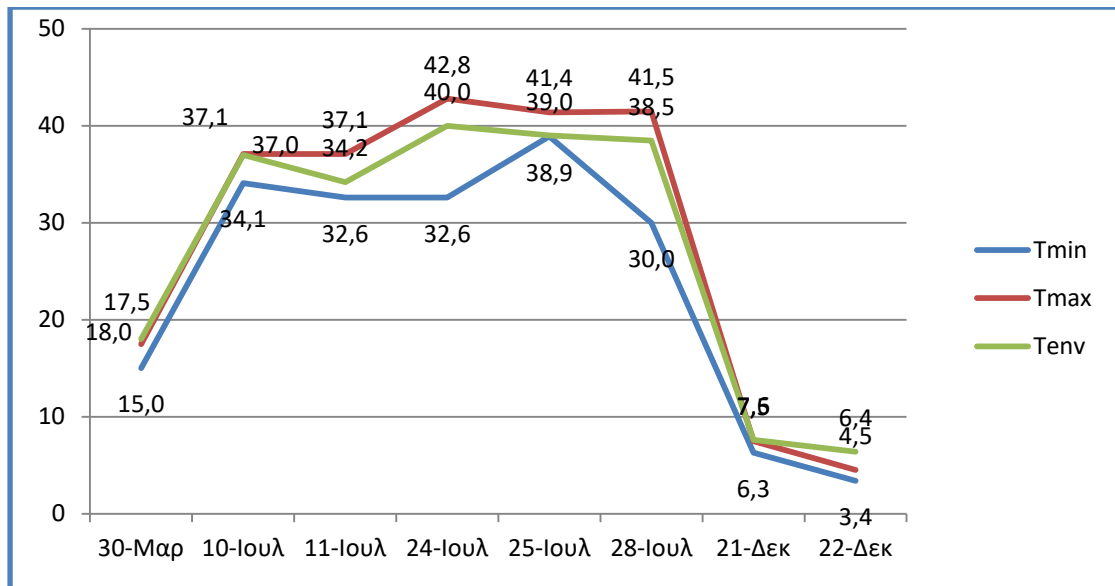
Σχήμα 5.3.1: Διαγράμμα T_{min} και T_{max} του κίονα 1



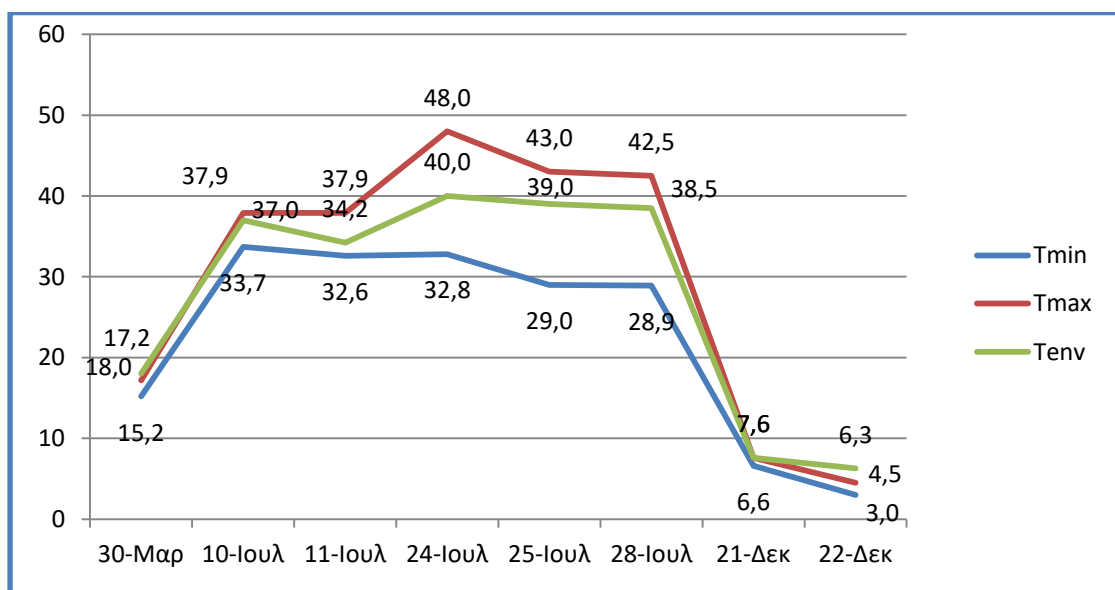
Σχήμα 5.3: Διαγράμμα T_{min} και T_{max} του κίονα 2



Σχήμα 5.3.3: Διαγράμμα T_{min} και T_{max} του κίονα 4



Σχήμα 5.3.4: Διαγράμμα T_{min} και T_{max} του κίονα 7



Σχήμα 5.3.5: Διαγράμμα T_{min} και T_{max} του κίονα 8

T_{min} = ελάχιστη θερμοκρασία
 T_{max} = μέγιστη θερμοκρασία
 T_{env} = θερμοκρασία περιβάλλοντος

Κεφάλαιο 6: Τελικά Συμπεράσματα-Προοπτικές

Σε αυτή την ερευνητική εργασία μελετήθηκε η μεταφορά θερμότητας στο πεντελικό μαρμάρο του Παρθενώνα της Ακρόπολης Αθηνών. Είναι η πρώτη φορά που συνδυάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο με τη μη καταστρεπτική τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου σε ένα ελληνικό μνημείο.

Τα βασικά στάδια της μελέτης ήταν τα εξής :

1. Μια πρώτη προσέγγιση στην ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας μέσα από τις θεωρητικές εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας.
2. Η εφαρμογή της τεχνικής της θερμογραφίας υπερύθρου και η αποτύπωση με αυτή της θερμοκρασιακής κατανομής όψεων του μνημείου αντίστοιχα.
3. Μετρήσεις της θερμοκρασίας επιφάνειας των κίωνων σε διαφορετικά σημεία και της υγρασίας με θερμόμετρο με αισθητήρα επαφής και με θερμοϋγρόμετρο.

Στο πρώτο στάδιο κατασκευάστηκε το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης και στη συνέχεια έλαβαν χώρα οι επί τόπου μη καταστρεπτικές μετρήσεις. Μέσα από τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της αξιοπιστίας του προτεινόμενου μοντέλου και η αξιολόγηση της χρήσης του για τη δημιουργία ενός συστήματος τακτικής παρακολούθησης του μνημείου (monitoring). Επιπρόσθετα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της θερμογραφίας υπερύθρου με σημειακές επιφανειακές μετρήσεις της θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής σε μια κατεύθυνση ποσοτικοποίησης και προτυποποίησης της μεθόδου. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η σχετική υγρασία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου.

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης στη συγκεκριμένη περίπτωση αποδείχτηκε ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στο πεντελικό μάρμαρο: περιέγραψε αποτελεσματικά τη θερμική συμπεριφορά σε όλα τα τμήματα του κίονα, αποδίδει τρισδιάστατη κατανομή της θερμοκρασίας και υπολογίζει τη θερμοκρασιακή κατανομή τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό του κίονα. Επίσης, από τη συγκεκριμένη εργασία προέκυψαν

σημαντικά συμπεράσματα για τη βελτιστοποίηση του ίδιου του υπολογιστικού μοντέλου και το πώς οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας μπορεί να οδηγήσει στη μελέτη του σύνθετου φαινομένου της θερμικής καταπόνησης ενός τόσο σημαντικού μνημείου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν επαναληψιμότητα για πανομοιότυπες συνθήκες μετρήσεων. Το προτεινόμενο θερμικό μοντέλο απέδωσε μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας από ότι καταγράφηκαν από τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας με αισθητήρα επαφής με μικρότερες αποκλίσεις κατά μέσο όρο το καλοκαίρι από ότι το φθινόπωρο και το χειμώνα. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' ύψος του κίονα σημειώνονταν πάντοτε στο ανώτερο τμήμα του τελευταίου σπονδύλου του κορμού του κίονα. Παρατηρούνται ομοιόμορφες καθ' ύψος θερμοκρασιακές ζώνες ανάμεσα στο ανατολικό και στο δυτικό τμήμα του κίονα.

Η διαφορά θερμοκρασίας στα διαφορετικά τμήματα του κίονα αποδίδεται στη διαφορά απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω σκίασης που οφείλεται στην αρχιτεκτονική δομή του μνημείου δηλαδή στη γεωμετρία του αντικειμένου μελέτης, και στη θέση του ήλιου σε σχέση με την εποχή και την ώρα μελέτης. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες μεταφοράς θερμότητας. Οι αποκλίσεις του μοντέλου από τις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα ήταν μεγαλύτερες όταν η σχετική υγρασία ήταν υψηλότερη.

Στα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου και στις επιφανειακές μετρήσεις με αισθητήρα επαφής δεν αποτυπώθηκαν καθ' ύψος ισοθερμοκρασιακές ζώνες, αντίθετα αποτυπώθηκαν διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία του κίονα, οι οποίες οφείλονται την πραγματική γεωμετρία του κίονα όπως οι ραβδώσεις του κίονα και στην επιφανειακή πάτινα και φθορά όπως επιδερμίδα, απώλεια υλικού και προσμίξεις. Η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του μαρμάρου μέσα στη μέρα αλλά και στις διαφορετικές εποχές είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος . Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνεται η συμβολή της θερμικής κόπωσης στην ανάπτυξη της επιφανειακής φθοράς.

Η θερμογραφία υπερύθρου σε όλες τις ημέρες αποτύπωσε μια μικρότερη θερμοκρασιακή κλίμακα σε σχέση με τις επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας των κίωνων με αισθητήρα επαφής και συνεπώς και με τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις σημειώθηκαν στις ημέρες με υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στα θερμογραφήματα που λήφθηκαν από μεγαλύτερες αποστάσεις καταγράφονται χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες, καθώς με την αύξηση της απόστασης απορροφάται μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Οι επιφανειακές μετρήσεις θερμοκρασίας επηρεάζονται από την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του ανέμου.

Προοπτικές

Προκειμένου να αποκτήσουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα για τη μεταφορά θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία στον Παρθενώνα της Ακρόπολης Αθηνών απαραίτητη είναι η εξέλιξη του μοντέλου προσομοίωσης:

- Είναι απαραίτητη η εισαγωγή της πραγματικής γεωμετρίας του κίονα και της όψης του μνημείου, μετά από τρισδιάστατη αποτύπωση του γιατί οι σκιάσεις επηρεάζουν πολύ τη διαφορά θερμοκρασίας στα διαφορετικά τεταρτημόρια των κίωνων. Επόμενο βήμα είναι η τρισδιάστατη αποτύπωση ολόκληρου του μνημείου.
- Εισαγωγή μιας διαφορετικής οριακής συνθήκης, όχι στη βάση του κίονα, λόγω ότι είναι δύσκολη η πρόσβαση, πιθανώς στην κορυφή να αυξήσει την ακρίβεια του μοντέλου προσομοίωσης. Για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να τοποθετηθεί θερμοστοιχείο στο σημείο αυτό.
- Εισαγωγή στη μελέτη η μεταβλητή του χρόνου, έτσι ώστε σε ένα δεύτερο στάδιο μέσα από τη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας να μελετηθεί η θερμική καταπόνηση του μνημείου.

Η υλοποίηση όμως των παραπάνω απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος και μεγάλο χρονικό διάστημα μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Α.Μοροπούλου, Γ.Μπατής**, Δομικά υλικά, 9 εξ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013
2. **Α.Τσιραμπίδης**, «Ο Ορυκτός Πλούτος της Ελλάδος», Εκδοτικός Οίκος Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη 1998
3. **Ν.Ε.Δαβή**, «Πετρολογία», Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Αθήνα 1991
4. **Ε.Μπαλταζής**, «Πετρολογία μεταμορφωμένων πετρωμάτων», Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Αθήνα 1994
5. **Κ.Θ.Δελέγκου**, «Κριτήρια και Μεθοδολογία αποτίμησης υλικών και στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες επιφάνειες μνημείων», διδακτορική διατριβή Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
6. Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου για το Ελληνικό Μάρμαρο, ΓΕΩΤ.Ε.Ε., Θεσσαλονίκη, Μάιος 1989
7. **Γ.Ε.Εξαδάκτυλος**: σημειώσεις του μαθήματος «Σχεδιασμός λατομείων μαρμάρων και γεωτεχνικών έργων», Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά 2000
8. **Κ.Κολοτούρος**, «Λατομεία μαρμάρου», 2009 (περιοδικό Μάρμαρο-ετήσια έκδοση 2009)
9. **Σ.Η.Σαπουντζής, Θ.Γ.Χριστοφορίδης**, «Ορυκτολοδιαγνωστική», University Studio Press
10. **Ι.Ρούσσου**, «Ορυκτοπετρογραφική Μελέτη των Λίθινων Μνημείων του Αρχαιολογικού Χώρου της Ελευσίνας: Ταυτοποίηση των Λιθοτύπων και Διερεύνηση των Αιτίων Διάβρωσής τους», Πανεπιστήμιο Πάτρας
11. **Α.Τσιραμπίδης**, «Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα», UniversityStudioPress, Θεσσαλονίκη (1996)
12. **Α.Μοροπούλου**, Φθορά και Προστασία Υλικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
13. **Α.Μοροπούλου, Κ.Βισβίκου, Κ.Τορφς, R. Van Grieken, F. Zezza, F. Macri**, Origin and Growth of Weathering Crusts on Ancient Marbles in Industrial Atmosphere, Atmospheric Environment, Pergamon, 1998, p.32
14. **J.Sanjurjo-Sánchez, C.Alves**, Pollutant-Induced Decay of Building Materials. [επιμ.ελ.] E. Lichtfouse et al., *Remediation of Air and Water Pollution*. s.l. :

- Springer, 2012
15. **A.Moropoulou, K.Labropoulos, A.Konstanti, K.Roumpopoulos, A.Bakolas, P.Michailidis**, Susceptibility of building stones to environmental loads: Evaluation, performance, repair strategies. [επιμ.] S.K. Kourkoulis. *Fracture and Failure of Natural Building Stones*. s.l. : Springer, 2006
 16. **E.Doehne., C.A.Price**, Stone Conservation-An Overview of Current Research, Second Edition, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2010, pp 9-25
 17. **G.Torraca**, Lectures on Materials Science for Architectural Conservation, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 72-87
 18. **C.Gentilini, E.Franzoni, S.Bandini, L.Nobile**, Effect of salt crystallisation on the shear behaviour of masonry walls: An experimental study, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 2012, p.37
 19. **D.Camuffo, M.DelMonte, C.Sabbioni, O.Vittori**, Wetting deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area, Atmospheric Environment, Pergamon Press, 1981, p.16
 20. **M.Steiger, A.E.Charola**, Weathering and Deterioration, [επιμ.] R.Sneathlage S.Siegesmund, *Stone in Architecture*, s.l., Springer, 2011
 21. **R.DALPINO, P.NARDUCCI, G.ROYER-CARFAGNIA**, SEM investigation on fatigue damage of marble, *Journal of Materials, Science Letters* 18, 1999, pp. 1619-1622
 22. **B.N.Λαμπρόπουλος**, Διάβρωση και Συντήρηση της Πέτρας, Αθήνα, 1992
 23. **J.Rodriguez-Gordillo, M.P.Saez-Perez**, Effects of thermal changes on Macael marble: Experimental study, *Construction and Building Materials* 20, 2006, pp. 355–367
 24. **G.F.Royer-Carfagni**, Technical Note On the thermal degradation of marble, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, 1999, pp. 119-126
 25. **A.B.Yavuz ,T.Topal**, Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: Examples from Western Anatolia, Turkey, *Engineering Geology* 90, 2007, pp.30-40
 26. **P.Kapsalas, P.Maravelaki-Kalaitzaki, M.Zervakis, E.T.Delegou**,

- A.Moropoulou**, Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces, *NDT & E International*, Elsevier, 2007, p.40
27. **P.Maravelaki-Kalaitzaki, D.Anglos, V.Kilikoglou, V.Zafirooulos**, Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part B*, Elsevier, 2001, p.56
 28. **R.Bugini, M.Laurenzi Tabasso, M.Realini**, Rate of formation of black crusts on marble. A case study, *Journal of Cultural Heritage* 1, 2000, pp.111-116
 29. **C.Sabbioni, G.Zappia**, Oxalate patinas on ancient monuments: the biological hypothesis, *Aerobiologia*, Springer, 1991,p.7
 30. **V.Fassina**, New findings on past treatments carried out on stone and marble monuments' surfaces, *Science of The Total Environment*, Elsevier, 1995,p. 167
 31. **M.Garcia-Vallès, M.Vendrell-Saz, J.Molera, F.Blazquez**, Interaction of rock and atmosphere: patinas on Mediterranean monuments, *Environmental Geology*, Springer, 1998
 32. **J.M.Gil, F.J.M.Gil, M.d.C.Ramos-Sánchez, P.Martín-Ramos**, The Orange-Brown Patina of Salisbury Cathedral (West Porch) Surfaces: Evidence of its Man-Made Origin, *Environ. Sci & Pollut Res.*, 2005, p.122
 33. **K.Ulens, R.Dans, P.DePaepe**, Study of patina of ancient marble isotope analysis, *The science of the total Environment* 158, 1994, pp.63-69
 34. **T.Zammit, J.Cassar, A.J.Vella, A.Torpiano**, Decay in Oxford limestone: observational units and jumping edges, *SWAPNET 2007 & Workshop on Limestone Decay and Conservation*, 2007, p.30
 35. **Th.Warscheid,J.Braams**, Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Elsevier, 2000, p.46
 36. **P.Mahammadi, W.E.Krumbein**, Biodeterioration of ancient stone materials from the Persepolis monuments (Iran), *Aerobiologia*, Springer, 2008, p.24
 37. **U.Wollenzien, G.S.deHog, W.E.Krumbein, C.Urzi**, On the isolation of microcolonial fungi occurring on and in the marble and other calcareous rocks, *The Science of Total Environment* 167, 1995, pp.287-294
 38. **M.R.D. Seaward, C. Giacobini, M.R. Giuliani, A. Roccardi**, The role of lichens in the biodeterioration of ancient monuments with particular reference to

- central Italy. *International Biodeterioration*, Elsevier, 1989, p.25
39. **A.A.Gorbushina, W.E.Krumbein, C.H.Hamman, L.Panina, S.Soukharjevski, U.Wollenzien**, Role of black fungi in color change and biodeterioration of antique marbles, *Ceomicrobiology Journal*, Taylor & Francis, 1993, p.11
 40. **K.C.Labropoulos, N.Katsiotis, E.Xinopoulou, A.T.Delegou, A.Bakolas, A.Moropoulou**, Diagnostic Study at the Acropolis of Sarantapicho and the Acropolis of Erimokastro, Rhodes, *Proceedings of MONUBASIN*, 2010
 41. **P.S.Griffin, N.Indictor, R.J.Koestler**, The Biodeterioration of Stone: a Review of Deterioration Mechanisms, Conservation Case Histories and Treatment, *International Biodeterioration*, Elsevier, 1991, p.28
 42. **A.Μοροπούλου**, Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012
 43. **N. C. Balajia*, Monto Manib, B.V.Venkatarama Reddy**, Discerning heat transfer in building materials, *Energy Procedia* 54 (2014) 654 – 668
 44. **Ξ. Κ. Κακάτσιος**, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 2006
 45. **Cengel**, Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, McGraw-Hill Companies, International Edition, 1997
 46. Εκπαιδευτικό υλικό ΤΕΕ για την κατάρτιση των ενεργειακών επιθεωρητών. Α' Έκδοση, 2011.
 47. **Δ.Ι. Ασημακόπουλος, Β.Ι. Λυγερού, Γ.Α. Αραμπατζής**. *Μεταφορά Θερμότητας*. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2009. σσ. 387-446.
 48. **Tiwari, Sahcta**, Advanced Solar-Distillation Systems, Basic Principles, Thermal Modelling and its Application/Chapter 2: Solar Radiation and Heat Transfer
 49. **file:///C:/Program%20Files/COMSOL/COMSOL52/Multiphysics/doc/html/comsol/helpdesk.htm**
 50. **Maurizio Carlinia, Elena Allegrinia*, Domenico Zillia, Sonia Castelluccib**, Simulating Heat Transfers through the Building Envelope: Useful Tool in the Economical Assessment, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013

51. **Conrad Voelker, Markus Diewald**, CFD SIMULATION AND MEASUREMENT OF THE HEAT TRANSFER FROM BUILDING MATERIAL SPECIMENS TO THE INDOOR ENVIRONMENT, Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015
52. **T. Taylor, J. Counsell, S. Gill**. Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building facades. *Energy and Buildings*. 2014, 76, σς. 130-142
53. **Timothy J. Taylor**, Development and evaluation of a testing approach in the context of new housing in Wales, phd thesis, Cardiff Metropolitan University 2014
54. **Thomas Blomberg**, HEAT3/A PC-program for heat transfer in three dimensions.

Manual with brief theory and examples, March 23, 1998 (Revised February 10, 1999)
55. **Ι.Βενιέρη**, http://odysseus.culture.gr/h/2/gh255.jsp?obj_id=973
56. Συλλογικό, Ιστορία του Ελληνικού Έθνους, Εκδοτική Αθηνών, τόμοι Β, Γ1, Γ2
57. **Χαράλαμπος Μπούρας**, Μαθήματα της Ιστορίας της αρχιτεκτονικής, εκδ. Συμμετρία, 1999
58. Χάρτης της Βενετίας: «Αρχιτεκτονικά θέματα», 9, 1975, σ. 108.
59. **Th.Skoulikidis, P.Papakonstantinou, D.Charalampous**: " Le mecanisme de la sulfatation des marbles par action de SO₂", 3^{me} Congres International sur la Deterioration et la Preservation des Pierres en Oeuvre, Venice, 1979, p.439
60. **Ph.Delopoulou, D.Sikioti**: Dry depositions of nitrates on Parthenon, The Science of Total Environment, 106, 1991, pp.263-268
61. **Θ.Σκουλικίδης, Π.Θεουλάκης, Κ.Κουζέλη, Ν.Μπελογιάννης, Ε.Παπακωνσταντίνου, Δ.Χαραλάμπος, Γ.Δογάνη, Α.Μωραΐτου**: «Το μάρμαρο του Παρθενώνος και η συντήρησή του», «Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος », τομ. 2α, Αθήνα, 1989, σ.181
62. **W.S.Williams, B.Trautman, S.Findley, H.Sobel**: Materials analysis of marble

- of Parthenon, *Materials Characterization*, Vol.29, Issue 2, pp. 185-194
63. **S.K.Kourkoulis, E.Ganniari-Papageorgiou, M.Mentzini:** Dionysos marble beams under bending: A contribution towards understanding the fracture of the Parthenon architraves, *Engineering Geology*, 115, 2010, pp 246-256
 64. **P.Maravelaki-Kalaitzaki,** Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin, *Analytica Chimica Acta* 532 , 2005, pp.187-198
 65. **W.E.Krumbein, A.Pantazidou, C.Urzi,** The Biodeterioration of Marbles of the Acropolis. The choice of Biological Treatments and of Biological Status of some of the sculptures in the Acropolis Museum, August 1992, αρχείο Ε.Σ.Μ.Α.
 66. **Δ.Χολεβάς,** Καταπολέμηση ζιζανίων στα μάρμαρα του Παρθενώνα, έκθεση Μπεννακείου Φυτοπαθολογικού Ινστιτούτου, 1980, Αρχείο Α΄ Εφορίας Πρ.&Κλ. Αρχαιοτήτων
 67. **K.Kouzeli, N.Beloyannis, Ch.Tolias and Y.Dogani,** Monochromatic Layers with and without Oxalates on the Parthenon, *Int.Symp : the Oxalate Films, Origin and Significance in the conservation of Works of arts*, Milano, 1989
 68. **G.Bell, J.Coulthard,** Stone Preservation with Illustrative Examples from the United Kingdom, p.883
 69. **K.Kouzeli, Y.Dogani, N.Beloyiannis,** Study of the Remain Colouring on the Architectural Surfaces of the Parthenon, *Superfici dell' Architettura, Le Finiture*, Bressanone, 1990
 70. **I.D. Jenkins, A.P. Middleton,** Paint on the Parthenon Sculptures, *The Annual of the BSA at Athens*, Vol. 83, 1988, p.183
 71. **A.Κ.Ορλάνδος, Λ.Βρανούσης,** Τα χαράγματα του Παρθενώνος, Ακαδημία Αθηνών, Αθήνα, 1973
 72. **A.Μωραΐτου,** Η αρνητική επίδραση της κονίας Meyer σε γλυπτά του Μουσείου της Ακρόπολης, Αρχείο της Ε.Σ.Μ.Α., Μάρτιος 1991
 73. **P.Maravelaki-Kalaitzakia, GMoraitou,** Sorel's cement mortars-Decay susceptibility and effect on Pentelic marble, *Cement and Concrete Research* 29, 1999, pp.1929–1935

74. **Th.Skoulikidis**, Deterioration de Materiaux de Construction et notamment des marbles par la corrosion d'acier incorpore. Cas de l'Acropole., 1^{er} Colloque Intern. Sur la Deterioration des Pierres en Oeuvre, Athenes, 1976, p.347
75. **E.Πapakonstantinou, A.Πanou, K.Franzikinaki, A.Tsimereki, G.Frantzi**, The surface conservation project of the Acropolis Monuments: Studies and Internentions, XXI International CIPA Symposium, Athens, 2007
76. **Γ.Ανδριανοπούλου**, Σύγκριση Στερεωτικών Επεμβάσεων στον Παρθενώνα και στο Ναό του Επικούριου Απόλλωνα, Πανεπιστήμιο Πατρών, τμ. Πολιτικών Μηχανικών.
77. **Ε.Σ.Μ.Α.**, Συντήρηση της επιφάνειας των Μνημείων της Ακρόπολης, Αθήνα, 1994
78. **L.Lambrinou**, State of the Art: 'Parthenon of Athens: A Challenge Throughout History'
79. **H.Bouras, M.Korres**, Study for the restoration of the Parthenon, Athens, 1989, p.686
80. **A.Galanos, Y.Doganis**, The west frieze of the Parthenon-Conservation Report, Study for the conservation of the Parthenon, Athens, 1994, p.184
81. **K.Zambas**, Structural interventions on the Acropolis monuments, Acropolis Restoration, Academy Editions, London, 1994, p.108
82. **A.Galanos, Y.Doganis**, The west frieze of the Parthenon-Conservation Report, Study for the conservation of the Parthenon, Vol. 3, Athens, 1994, p.186
83. **Acropolis Restauration Service**, The restauration of the monuments of the Athenian Acropolis, 2nd Edition
84. **Acropolis Restauration Service**, The Acropolis Restauration Project, 2008
85. **Α.Γαλάνου, Γ.Δογάνη, Α.Μωραΐτου, Κ.Μπαμπανίκα**, Η συντήρηση στα μνημεία της Ακρόπολης.
86. **M.Ioannidou**, The restauration of the Propylaia of the Athenian Acropolis, ERGON IV.2007
87. Διεθνής Συνάντηση για συντήρηση του Ερεχθείου, Αθήνα, 1977
88. **Α.Παπανικολάου**, Η αποκατάσταση του Ερεχθείου (1979-1987), Αθήνα, 2012

89. Abstracts of presentations, 6th International meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments, Athens, 4-5 October 2013
90. **A.Μοροπούλου**, Έλεγχος ποιότητας δομικών υλικών και έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012
91. **X.P.V.Malague**, Non-destructive evaluation of Materials by Infrared Thermography, Springer Verlag, 1993
92. **Ν.Π.Αβδελίδης**, Εφαρμογές της Υπέρυθρης Θερμογραφίας για τον έλεγχο δομικών υλικών σε κατασκευές, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2002
93. **Ν.Π.Αβδελίδης**, Προτυποποίηση της Υπέρυθρης Θερμογραφίας για την εφαρμογή της στη διάγνωση φθοράς και την αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης σε ιστορικές τοιχοποιίες, Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., 2000
94. **A.A.Gowena, B.K.Tiwaria, P.J.Cullenb, K.McDonnella, C.P.O'Donnella**, Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment, Trends in Food Science & Technology, 21, 2010, pp. 190-200
95. **M.Bharara, J.E.Cobb, D.J.Claremont**, Thermography and Thermometry in the Assessment of Diabetic Neuropathic Foot:A Case for Furthering the Role of Thermal Techniques, FIPEM, International Journal of Lower Extremity Wound Thermal Techniques, FIPEM, International Journal of Lower Extremity Wound
96. **A.Μοροπούλου**, Έλεγχος ποιότητας δομικών υλικών και έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012
97. **X.P.V.Malague**, Non-destructive evaluation of Materials by Infrared Thermography, Springer Verlag, 1993
98. **N.T.Thành**, Ifrared thermography for the detection and characterization of buried objects,Thesis, Department of Electronics and Informatics, Vrije Universiteit Brussel
99. **N.T.Thành**, Ifrared thermography for the detection and characterization of buried objects,Thesis, Department of Electronics and Informatics, Vrije Universiteit Brussel
100. **T.Ummenhofer, J.Medgenberg**, On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints, International Journal of Fatigue, 31, 2009, pp.130-137
101. **M.Omara, M.I.Hassan, K.Saito, R.Alloo**, IR self-referencing thermography for

- detection of in-depth defects, *Infrared Physics & Technology*, 46, 2005, pp.283–289
102. **V.Vavilov, X.Maldague, B.Dufort, F.Robitaille, J.Picard**, Thermal non-destructive testing of carbon epoxy composites: analysis and data processing
 103. **I.M.DeRosa, C.Santulli, F.Sarasini, M.Valente**, Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography, *Composites Science and Technology*, 69, 2009, pp.1142-1150
 104. **Z.Liu, M.Genest, D.Krys**, Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT&E International*, 47, 2012, pp.105-115
 105. **A.Kroll, W.Baetz, D.Peretzki**, On autonomous detection of pressured air and gas leaks using passive IR-thermography for mobile robot application, *Robotics and Automation*, 2009.
 106. **C.Ibarra-Castanedo, D.Gonzalez, M.Klein, M.Pilla, S.Vallerand, X.Maldague**, Infrared image processing and data analysis, *Infrared Physics & Technology*, 46, 2004, pp.75–83
 107. **S.P.Garnaik**, *Infrared Thermography: A versatile Technology for Condition Monitoring and Energy Conservation*
 108. **T.Y.Lo, K.T.W. Choi**, Building defects diagnosis by infrared thermography, *Structural Survey*, Vol. 22, pp. 259-263
 109. **D.J.Titman**, Applications of thermography in non-destructive testing of structures, *NDT&E International*, 34, 2001, pp. 149-154
 110. **H.Wiggenhauser**, Active IR-applications in civil engineering, *Infrared Physics & Technology*, 43, 2002, pp.233-238
 111. **C.Meola, G.M.Carlomagno, L.Giorleo**, The use of infrared thermography for materials characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, pp. 1132-1137
 112. **Δ.Μ.Σωτηρόπουλος**, Επεξεργασία εικόνων θερμοκάμερας για την αποτίμηση σφαλμάτων στις πλατείες Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, Διπλ. Εργασία, ΕΜΠ, 2012

113. **E.Grinzato, P.G.Bison, S.Marinetti**, Monitoring of ancient buildings by the thermal method, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 2002, pp. 21-29
114. **Δ.Σιδηροπούλου-Βελίδου**, Αξιοποίηση θερμικών λήψεων για τον εντοπισμό παθολογίας στα μνημεία, Διπλ.εργασία, ΕΜΠ, 2012