



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

*Έλεγχος της κατάστασης διατήρησης του
Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο με μη
καταστρεπτικές τεχνικές με έμφαση στη
θερμογραφία υπερύθρου*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Μαρέτση

Επιβλέπουσα

Αντωνία Μοροπούλου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

*Έλεγχος της κατάστασης διατήρησης του
Ναού του Ηφαίστου στο Θησείο με μη
καταστρεπτικές τεχνικές με έμφαση στη
θερμογραφία υπερύθρου*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Μαρέτση

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

Καθ. Ε. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ
Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
(επιβλέπουσα)
Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
Μ. Καρόγλου, Δρ., ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
Μ. Αποστολοπούλου, MSc, ΧΜ, ΥΔ Σχ.
ΧΜ ΕΜΠ

Επιτροπή Εξέτασης

Καθ. Ε. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ
Καθ. Μ. Κουή, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
Καθ. Στ. Τσίμας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Πρόλογος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εφαρμόστηκε η μη καταστρεπτική μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας στο ναό του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά. Πρόκειται για έναν από τους καλύτερα διατηρημένους αρχαίους ναούς και αποτελεί μνημείο υψηλής καλλιτεχνικής και ιστορικής αξίας. Στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας και ο έλεγχος της επιφανειακής φθοράς με τη μέθοδο αυτή.

Η μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Α. Μοροπούλου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Α. Μοροπούλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο και να εργαστώ στην επιστημονική της ομάδα υπό την καθοδήγησή της.

Επιπλέον ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Επίκουρο καθηγητή Α. Μπακόλα για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Παράλληλα θα ήθελα να εκφράσω τις ελικρινείς μου ευχαριστίες στη διδάκτορα Μ. Καρόγλου για την επιστημονική υποστήριξη, την ηθική ενθάρρυνση και την άψογη συνεργασία. Επιπλέον οφείλω να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μ. Αποστολοπούλου για την αμέριστη βοήθειά της.

Επίσης θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες στην Κ. Τσόγκα, αρχαιολόγο και στην Ε. Αλεξανδράκη, πολιτικό μηχανικό στην Α' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων για τη συνεργασία. Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω όλο το προσωπικό στην Αρχαία Αγορά για τη φιλοξενία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια και με βοηθούν με κάθε τρόπο.

Αθήνα, 2015

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εφαρμόστηκε η μη καταστρεπτική μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας στο ναό του Ηφαίστου. Η μελέτη του μνημείου αποτελείται από δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος αφορά στην εκτίμηση των σημαντικότερων παραγόντων που επιδρούν στα αποτελέσματα της θερμογραφίας, σε μία προσπάθεια προτυποποίησης της μεθόδου και ο δεύτερος αφορά στην αξιολόγηση της εφαρμογής της μεθόδου για τον έλεγχο του είδους και της έκτασης των επιφανειακών φθορών στο μνημείο.

Στο πρώτο στάδιο οι παράγοντες, των οποίων η επίδραση εξετάστηκε, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Οι πρώτοι είναι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (ατμοσφαιρική θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου), δεύτεροι είναι οι παράγοντες που σχετίζονται με το ίδιο το κτίριο (υλικά, γεωμετρία, μικροκλίμα) και τρίτοι, οι παράγοντες που σχετίζονται με τη λήψη των θερμικών εικόνων (ώρα λήψης, γωνία, απόσταση). Για τον έλεγχο της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος του μνημείου σε όλες τις εποχές του χρόνου (Οκτώβριος 2014 έως Ιούλιος 2015). Επειδή είναι γνωστό ότι η υψηλή σχετική υγρασία και οι ισχυροί άνεμοι αλλοιώνουν τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας οι μετρήσεις διεξήχθησαν τις ημέρες που η σχετική υγρασία ήταν χαμηλότερη από 50% και η ταχύτητα του ανέμου μικρότερη από 2 μποφόρ. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων προσδιοριζόταν με τη βοήθεια θερμο-υγρόμετρου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία, ενώ η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία κάθε ημέρας προέρχονται από τη βάση δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού του Ε.Μ.Π. Το γεγονός ότι το μνημείο αποτελείται κατά κύριο λόγο από ένα υλικό (μάρμαρο) διευκολύνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Παράλληλα για τη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του κτιρίου λήφθηκαν θερμικές εικόνες ανά εποχές, καθώς από τη μεταβολή του ύψους του ήλιου μέσα στο χρόνο σχηματίζονται διαφορετικές σκιάσεις. Η επιρροή του μικροκλίματος του ναού εξετάστηκε με το θερμογραφικό έλεγχο σε όλες τις όψεις του για κάθε εποχή. Οι παράγοντες που σχετίζονται με τη λήψη της θερμικής εικόνας μελετήθηκαν με την πραγματοποίηση μετρήσεων σε διαφορετικές αποστάσεις και διαφορετικές ώρες μέσα στη μέρα. Επιπλέον επειδή η γωνία λήψης προκαλεί μεταβολές στα αποτελέσματα της θερμογραφίας, οι εικόνες που λήφθηκαν ήταν κάθετες στην επιφάνεια ελέγχου. Ωστόσο στις περιπτώσεις που δεν κατέστη αυτό δυνατό, λήφθηκαν θερμικές εικόνες και υπό γωνία.

Όσον αφορά την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων διαπιστώνεται ότι οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του περιβάλλοντος και του μνημείου είναι η συναγωγή και η ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της επιφάνειας του

μαρμάρου, ενώ η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εξαρτάται από την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας και το συντελεστή απορρόφησης του υλικού. Τις ημέρες με ασθενή ηλιοφάνεια (μεταφορά θερμότητας κυρίως με συναγωγή) η επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου ήταν ίση με αυτή του περιβάλλοντος. Παράλληλα όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη (μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή) καταγράφονται σημαντικές διαφορές μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του μαρμάρου, ενώ αναπτύσσονται και μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στις επιφάνειες εξαιτίας της ανομοιόμορφης ακτινοβολίας.

Ταυτόχρονα εξαιτίας της γεωμετρίας του μνημείου παρατηρείται ενίσχυση των φαινομένων ανάκλασης, ιδιαίτερα στην ανατολική όψη, καθώς και δημιουργία σκιάσεων που εξαρτώνται και από το ύψος του ήλιου κάθε εποχή του χρόνου. Από την εξέταση του μικροκλίματος του μνημείου διαπιστώνεται ότι τους φθινοπωρινούς και τους χειμερινούς μήνες η νότια και η ανατολική όψη είναι θερμότερες από τη βόρεια και τη δυτική εξαιτίας της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Αντίθετα την άνοιξη και το καλοκαίρι η νότια, η βόρεια και η δυτική όψη εμφανίζουν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, ενώ η ανατολική όψη είναι θερμότερη. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη μεταβολή του ύψους του ήλιου το καλοκαίρι, που έχει σαν αποτέλεσμα την ακτινοβολία των επιφανειών της βόρεια και της δυτικής όψης.

Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η ώρα του θερμογραφικού ελέγχου. Με την πάροδο του χρόνου ο ήλιος μετακινείται από την ανατολή προς τη δύση με αποτέλεσμα να μετατοπίζονται οι θερμότερες επιφάνειες του κτιρίου από την ανατολική όψη στη νότια. Επιπλέον από τη λήψη θερμικών εικόνων από διαφορετικές αποστάσεις, γίνεται αντιληπτό ότι στα θερμογραφήματα που λήφθηκαν από μικρές αποστάσεις καταγράφονται μεγαλύτερες επιφανειακές θερμοκρασίες, καθώς με την αύξηση της απόστασης απορροφάται μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Από τη μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών ανά εποχές, αλλά και των θερμοκρασιακών διαφορών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του μαρμάρου μέσα στη μέρα, διαπιστώνεται συμβολή της θερμικής κόπωσης στην ανάπτυξη επιφανειακής φθοράς.

Στο επόμενο στάδιο μελετήθηκε η επιφανειακή φθορά στα επιμέρους αρχιτεκτονικά στοιχεία. Το μνημείο έχει κατασκευαστεί κυρίως από πεντελικό μάρμαρο, ένα λεπτόκοκκο υλικό με μικρή αναλογία οξειδίων, μεγάλη συνεκτικότητα και υψηλή ανθεκτικότητα. Ο θερμογραφικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε από κοντινότερες αποστάσεις. Επίσης στα αποτελέσματα των μετρήσεων υπήρχε επαναληψιμότητα, ως προς της θερμοκρασίες που καταγράφονταν. Στις επιφάνειες που προστατεύονται από το νερό της βροχής εντοπίζονται περιοχές μαύρων επικαθίσεων, οι οποίες είναι θερμότερες από τις λευκές επιφάνειες του μαρμάρου. Παράλληλα έντονη ήταν η παρουσία φλεβώσεων, που στις θερμικές εικόνες αποδίδονται θερμότερες από την κύρια μάζα του μαρμάρου. Στις περιπτώσεις που οι προσμίξεις των φλεβώσεων

έχουν αποπλυθεί, έχουν σχηματιστεί μικρορηγματώσεις, οι οποίες έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα. Το κονίαμα αυτό είναι ψυχρότερο από τις γειτονικές επιφάνειες. Η επιδερμίδα του μαρμάρου έχει απομακρυνθεί κατά τόπους προς σχηματισμό λευκών επιφανειών με ζαχαροειδή φθορά. Οι επιφάνειες αυτές εμφανίζονται ψυχρότερες από την επιδερμίδα. Συχνά παρατηρούνται περιοχές πορτοκαλί και πορτοκαλοκάστανης χροιάς στην επιφάνεια του μαρμάρου, οι πρώτες περιοχές είναι θερμότερες και οι δεύτερες ψυχρότερες. Στο κρηπίδωμα της βόρειας όψης διακρίνονται φαιόμαυρες περιοχές, που πιθανώς να οφείλονται στην ανάπτυξη βιοδιάβρωσης. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν υψηλότερη θερμοκρασία. Επίσης στους κίονες της βόρειας όψης παρατηρούνται οπές από βελονοειδή διάβρωση εξαιτίας της συνέργειας παραγόντων φθοράς (π.χ. βιοδιάβρωση, απώλεια προσμίξεων). Τέλος, στο κρηπίδωμα έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα, ενδεχομένως τσιμεντιτικό, το οποίο όταν ακτινοβολείται εμφανίζεται θερμότερο από το μάρμαρο.

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποδείχθηκε πολύτιμη μέθοδος για την παρακολούθηση των θερμοκρασιακών μεταβολών του μαρμάρου μέσα στο χρόνο, σε μία πρώτη προσέγγιση προτυποποίησής της, ενώ σημαντικές είναι και οι πληροφορίες που λαμβάνονται σχετικά με τα είδη και τις υφές της φθοράς κατά τη μελέτη των αρχιτεκτονικών στοιχείων.

Abstract

For the development of this thesis, the non-destructive testing method of infrared thermography was applied in the temple of Hephaestus. The study of the monument consists of two main axes. The first axis concerns the assessment of the most important factors which affect the results of thermography in an attempt to standardize this method and the second relates to the assessment of the method implementation for controlling the type and extent of surface damage to the monument.

In the first stage, the factors whose effect was examined, fall into three categories. The first ones are environmental factors (air temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed); the second ones are factors related to the building itself (materials, geometry, microclimate); thirdly, there are factors associated with the capturing of the thermal image (shooting time, angle, distance).

To test the effect of environmental factors, thermographic inspection of the monument was conducted in all four seasons of the year (October 2014 to July 2015). Since it is known that high rates of relative humidity and strong winds affect the results of infrared thermography, measurements were performed on days which the relative humidity was lower than 50% and the wind speed less than 2 Beaufort. During measurements the ambient temperature and relative humidity were determined by using a thermo-hygrometer, while the values of wind speed and solar radiation derived from the database of NTUA meteorological station. The fact that the monument is composed primarily of one material (marble) facilitated the comparison of the results. Moreover, in order to study the influence of the building geometry, thermal images were taken during all seasons, as the change of the sun height during the year forms different shades. The influence of the building microclimate was examined by thermographic inspection all over its sights in every season. Factors associated with the capturing of the thermal image were studied by conducting measurements at different distances and different times throughout the day. Furthermore, because the angle causes changes in the thermographic results, images were taken vertically to the control surface. However, in those cases where it was not possible, thermal images were obtained at an angle.

Regarding the influence of environmental factors, it was found that the heat transfer mechanisms between the environment and the monument were convection and radiation. Heat transfer through convection depends on the ambient temperature and temperature of marble surface, while heat transfer through radiation is dependent on the intensity of solar radiation and the absorption coefficient of the material. On days with weak sunlight (convective heat transfer), the surface temperature of the marble was equal to ambient temperature. At the same time, when solar radiation was

intense (heat transfer through radiation and convection), significant differences between the ambient temperature and the temperature of the marble were recorded, while large temperature differences on the surfaces also developed, due to irregular irradiation.

In addition, due to the geometry of the monument, strengthening of reflection phenomena was observed, especially on the east side, as well as shadows, which depended on the sun height all year round, were created. As for the microclimate of the monument, it was shown that in autumn and winter, the south and the east sides were warmer than the northern and western ones, due to sunlight exposure. On the other hand, in spring and summer, the southern, northern and western sides showed small temperature differences, while the east side was warmer. This phenomenon was attributed to the change of the sun height in summer, resulting in the irradiation of the surfaces of the north and the west side.

Also, another important factor is the time of the thermographic inspection. As time passes, the sun moves from east to west, so warmer surfaces of the building shifted from the east side to the south. What is more, by taking thermal images from different distances, thermograms obtained at small distances displayed higher surface temperatures, since most of the radiation emitted was absorbed by atmospheric particles, as distance increased. By studying temperature changes every season and temperature differences developed on the surface of the marble during the day, thermal stress contribution to the development of surface decay was established.

In the next stage, surface decay was studied on individual architectural elements. The monument is mainly constructed of Pentelic marble, a fine-grained material with a minor proportion of oxides, great consistency and high durability. The thermographic inspection was conducted at shorter distances. Also, the results of measurements were recurrent in terms of the temperatures which were recorded. On surfaces protected from rainwater, areas of black deposits were identified, which were warmer than the white surfaces of marble. At the same time, there was a strong presence of veining, which appeared warmer than the main mass of marble, on the thermal images. In cases where admixtures of veining had been washed out, micro-cracking had been formed, which was supplemented with mortar. The mortar was cooler than the adjacent surfaces. The "epidermis" of the marble had been removed in places and white surfaces with sugaring were formed instead. These surfaces appeared colder than the "epidermis". Orange and orange-brown regions were often observed on the surface of marble, with the first type of regions appearing warmer and the latter cooler. In the north sided foundations, black areas were distinguished, probably due to the development of biodeterioration. These regions showed a higher temperature. Additionally, on the columns of the north sides, pitting was observed due to the synergy of deterioration factors (eg biodeterioration, loss of admixtures). Finally, a

type of mortar – possibly a cement mortar – had been used in the foundations, which appeared warmer than marble when it was irradiated.

In a first approach of being standardized, infrared thermography has proven to be a valuable method for monitoring temperature changes of marble through time, while important information is received about the types and textures of decay on architectural elements.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	7
Περίληψη.....	9
Abstract	13
1. Γενικό θεωρητικό μέρος.....	19
1.1 Το μάρμαρο ως δομικό υλικό	19
1.1.1 Εισαγωγή – Κύρια χαρακτηριστικά μαρμάρων.....	19
1.1.2 Το Πεντελικό μάρμαρο.....	20
1.1.3 Φυσικο-μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου	21
1.2 Η επιφανειακή φθορά του μαρμάρου	23
1.2.1 Μαύρες κρούστες.....	24
1.2.2 Γκρίζες κρούστες	30
1.2.3 Πάτινες	31
1.2.4 Όξινη προσβολή	32
1.2.5 Οξειδωτική προσβολή.....	34
1.2.6 Βιολογική διάβρωση	34
2. Ειδικό θεωρητικό μέρος.....	41
2.1 Υπέρυθρη θερμογραφία	41
2.1.1 Εισαγωγή	41
2.1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	41
2.1.3 Βασικές αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας.....	42
2.1.4 Θερμοκάμερα υπέρυθρου	50
2.1.5 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της θερμοκάμερας και της επιφάνειας ελέγχου	54
2.1.6 Προσεγγίσεις στη χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας	56
2.1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την υπέρυθρη θερμογραφία	59
2.1.8 Εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας.....	63
2.1.9 Συνδυασμός υπέρυθρης θερμογραφίας και μοντέλων προσομοίωσης	68
2.2 Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά	73
2.2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή και περιγραφή του μνημείου.....	73
2.2.2 Παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης	78
2.3 Περιβαλλοντικά δεδομένα για την πόλη της Αθήνας.....	80
2.3.1 Το κλίμα της Αθήνας	80
2.3.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα	81
3. Πειραματικό μέρος.....	83
3.1 Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας	83

3.1.1	Εισαγωγή	83
3.1.2	Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων.....	84
3.1.3	Θερμογραφικό σύστημα	85
3.1.4	Μακροσκοπικές παρατηρήσεις.....	86
4.	Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	101
4.1	Αποτελέσματα θερμογραφίας υπέρυθρου ανά όψη	101
4.1.1	Αποτελέσματα υπέρυθρης θερμογραφίας κατά τη μελέτη της νότιας όψης ανά εποχές	101
4.1.2	Επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας.....	130
4.1.3	Θερμοκρασιακός έλεγχος σε κάθε όψη του μνημείου.....	173
4.1.4	Επίδραση της απόστασης στο θερμογραφικό έλεγχο	181
4.2	Επιμέρους μελέτη αρχιτεκτονικών στοιχείων.....	185
4.2.1	Θερμογραφικός έλεγχος γύρω από τους κίονες της νότιας όψης.....	185
4.2.2	Μελέτη επιφανειακής φθοράς με την υπέρυθρη θερμογραφία	194
5.	Τελικά συμπεράσματα – Προοπτικές.....	229
	Βιβλιογραφία	233

1. Γενικό θεωρητικό μέρος

1.1 Το μάρμαρο ως δομικό υλικό

1.1.1 Εισαγωγή – Κύρια χαρακτηριστικά μαρμάρων

Τα μεταμορφωσιγενή ή κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα σχηματίστηκαν από τη μερική ή ολική μεταμόρφωση εκριξηγενών ή ιζηματογενών πετρωμάτων υπό την επίδραση διάφορων εξωτερικών παραγόντων, όπως η θερμότητα, η πίεση, το νερό κ.ά. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζουν στρωματογραφία ανάλογη των ιζηματογενών και μεταλλοφορία ανάλογη των εκρηξιγενών πετρωμάτων. Τα κυριότερα μεταμορφωσιγενή πετρώματα, από τα οποία προέρχονται φυσικοί δομικοί λίθοι, είναι το μάρμαρο, ο σερπεντίνης ή οφίτης και οι κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι.

Το μάρμαρο σχηματίστηκε από τη μεταμόρφωση ασβεστόλιθου και δολομίτη και έχει χρώμα, το οποίο ποικίλει από λευκό μέχρι μαύρο. Είναι πέτρωμα κρυσταλλοκοκκώδες, με καλή λείανση και λαξεύεται εύκολα. Το μάρμαρο δεν είναι ανθεκτικό στη φωτιά, ενώ η ανθεκτικότητά του στις καιρικές επιδράσεις ποικίλει ανάλογα με τη σύστασή του. (1) Τα μάρμαρα διακρίνονται σε ασβεστιτικά ή δολομιτικά, ανάλογα με την επικράτηση του ασβεστίτη ή του δολομίτη. Συχνά περιέχουν προσμίξεις είτε διάσπαρτες είτε υπό τη μορφή φλεβών. Οι προσμίξεις αυτές αποτελούνται κυρίως από οξειδία σιδήρου, ή χαλαζία ή μαρμαρυγιών. Στα διάφορα είδη μαρμάρων διαφέρουν οι μηχανικές τους ιδιότητες, όπως και το πορώδες τους (συνήθως μικρό), το μέγεθος των κρυστάλλων τους και το χρώμα τους (άσπρο, γκρίζο, ρόδινο, κόκκινο, κίτρινο, πράσινο, καστανό κ.λ.π.). (2)

Το μάρμαρό έχει σκληρότητα 3 κατά Mohs και ειδικό βάρος $2,7 \text{ g/cm}^3$. Εκτός από τον ασβεστίτη το μάρμαρο μπορεί να περιέχει και δολομίτη, ορυκτό σκληρότερο (3,5-4 κατά Mohs) και βαρύτερο ($2,9 \text{ g/cm}^3$). Η παρουσία του δολομίτη καθιστά την κατεργασία του μαρμάρου πιο δυσχερή και επιταχύνει τη φθορά του. (3) Επιπλέον στα μάρμαρα μπορεί να συνυπάρχουν και άλλα ορυκτά, όπως διοψίδιος, βιοτίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης, πλαγιόκλαστο, γρανάτης, χαλαζίας κ.λ.π. Ανάλογα με τα συμπτωματικά αυτά ορυκτά που περιέχουν, κατατάσσονται σε μάρμαρα υψηλών θερμοκρασιών (καταζώνης), ή μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης). (4) Ανάλογα με το μέγεθος του κρυστάλλου του ασβεστίτη, τα μάρμαρα διακρίνονται σε λεπτοκοκκώδη (διάμετρος κρυστάλλου ασβεστίτη $d = 0,01-0,05 \text{ mm}$), μέσοκοκκώδη ($d = 0,6-2 \text{ mm}$) και χονδροκοκκώδη ($d = 2-6 \text{ mm}$). Επιπλέον το μάρμαρο παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και ανθεκτικότητα στους παράγοντες φθοράς, εξαιτίας της μικροδομής του (πορώδες περίπου 0,3%). Ωστόσο καταστρέφεται εύκολα από τη φωτιά, όπως και οι κοινοί ασβεστόλιθοι, επειδή αποσυντίθεται το ανθρακικό ασβέστιο σε CaO και CO_2 περίπου στους 900°C . (3)

Όταν το μάρμαρο δεν περιέχει σημαντικά ποσοστά άλλων στοιχείων, έχει λευκό χρώμα, είναι ανθεκτικότερο στους εξωτερικούς παράγοντες (ψύχος, θέρμανση, υγρασία) και η διάρκεια της ζωής του είναι μεγάλη.

Στην Ελλάδα εντοπίζεται μάρμαρο στις κρυσταλλοσχιστώδεις γεωτεκτονικές ζώνες της Ροδόπης, Πελαγονικής, Αττικοκυκλαδικής, Πελοποννήσου και Κρήτης. Τα πιο γνωστά μάρμαρα είναι της Πάρου, της Νάξου, το Πεντελικό, του Μαραθώνα και της Αγίας Μαρίνας, της Δόμβραινας κοντά στη Θήβα, της Δράμας, της Ερέτριας, της Καρύστου, της Μάνης κ.α. (5)

1.1.2 Το Πεντελικό μάρμαρο

Η εξόρυξη του Πεντελικού μαρμάρου ξεκίνησε κατά την αρχαιότητα από τη νοτιοδυτική πλαγιά του Πεντελικού Όρους στην κοιλάδα της Σπηλιάς, όπως ονομάζεται σήμερα και έφτανε μέχρι την κορυφογραμμή σε υψόμετρο 1020m. Σήμερα διατηρείται μόνο ένα αρχαίο λατομείο στην κοιλάδα της Σπηλιάς και σε υψόμετρο περίπου 700m. Η αρχαιότερη χρήση Πεντελικού μαρμάρου χρονολογείται στο 570 π.Χ. στη γλυπτική. Στην Αθήνα χρησιμοποιήθηκε πολύ στην κατασκευή μνημείων κατά την εποχή του Περικλή, αλλά και αργότερα στην Ελληνιστική και τη Ρωμαϊκή εποχή, ιδιαίτερα δε στα χρόνια του Ηρώδη του Αττικού που ήταν και «κτήτορας» των λατομείων. (6)

Το Πεντελικό μάρμαρο είναι λευκό και διασχίζεται από κυανίζουσες ή υπότεφρες γραμμές. Περιέχει μικρή αναλογία οξειδίων, κυρίως του σιδήρου. Στα οξείδια αυτά οφείλεται το χρώμα της σκουριάς που αποκτά, όταν εκτεθεί στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σπάνια, περιέχει επίσης χαλαζία το οποίο δυσχεραίνει την επεξεργασία του. (3) Παρουσιάζει σχιστότητα, ιδιότητα που διευκολύνει την εξόρυξη των ογκόλιθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Έχει λεπτό υποσακχαροειδή ιστό και μεγάλη συνεκτικότητα, φυσιολογική αντοχή στη θραύση και στιλβώνεται εύκολα. (5)

Η ορυκτολογική και χημική σύσταση και οι φυσικοχημικές ιδιότητές του αναγράφονται στον πίνακα του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.ΜΕ.).

Πίνακας 1.1.2-1: Ορυκτολογική σύσταση, χημική ανάλυση και φυσικές ιδιότητες Πεντελικού μαρμάρου (Ι.Γ.ΜΕ.) (5)

Ορυκτολογική σύσταση (%)					Χημική ανάλυση (% βάρους)									Φυσικές – μηχανικές ιδιότητες		
Ασβεστίτης	Χαλαζίας	Μοσχοβίτης	Σερικίτης	Χλωρίτης	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	CO ₂	Φαινόμενο ειδικό βάρος (kg/m ³)	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης κβ. (%)	Αντοχή σε θλίψη (kg/m ²)
98	0,5	0,5	0,5	0,5	54,8	1,55	1,10	0,14	0,2	0,09	0,04	0,02	43,05	2717	0,11	1334

Ο μοσχοβίτης αποτελεί στο συνηθέστερο πυριτικό συστατικό του Πεντελικού μαρμάρου. Τα φυλλάκια 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. Επιπλέον τα Πεντελικά μάρμαρα είναι πλούσια σε χλωρίτη που συνήθως εμφανίζεται με το μοσχοβίτη. Ο χαλαζίας συναντάται σπάνια, αλλά σε μερικές ζώνες μαρμάρου που βρίσκονται σε επαφή με σχιστόλιθους, είναι άφθονος και μπορεί να σχηματίζει λεπτά φλεβίδια ή φλέβες μαζί με διάφορα άλλα πυριτικά ορυκτά. Ο σιδηροπυρίτης έχει χρώμα κίτρινο, ανοιχτό ορειχάλκινο μέχρι χρυσοκίτρινο. Ο σιδηροπυρίτης και τα οξείδια του σιδήρου μπορεί να βρίσκονται στο μάρμαρο υπό μορφή κόκκων. (7)

Τα παραπάνω ορυκτά, όταν περιέχονται στο μάρμαρο επηρεάζουν τις ιδιότητές του και το χρώμα του. Για παράδειγμα τα φυλλώδη ορυκτά (μοσχοβίτης και χλωρίτης) αυξάνουν τη σχιστότητα του πετρώματος, όταν τα φυλλάκια τους διατάσσονται παράλληλα προς τη διεύθυνση επιμήκυνσης των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Ο χαλαζίας αυξάνει την αντοχή στην αποσάθρωση, ενώ ο σιδηροπυρίτης τη μειώνει. (7)

1.1.3 Φυσικο-μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου

Η γνώση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων είναι απαραίτητη στον καθορισμό της ποιότητάς τους. Ωστόσο μάρμαρα όπως το Πεντελικό, που είναι μονόμετα και λεπτόκοκα, παρουσιάζουν καλύτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες. Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των μαρμάρων είναι οι εξής: (6)

1. Φαινόμενο ειδικό βάρος: Είναι ο λόγος του βάρους προς το φαινόμενο όγκο του. Τα υλικά διαθέτουν απόλυτο και φαινόμενο όγκο, επειδή παρουσιάζουν πόρους και κενά. Ο φαινόμενος όγκος είναι το άθροισμα του απόλυτου όγκου

- και του όγκου των κενών. Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι μία ιδιότητα που είναι απαραίτητο να είναι γνωστή για όλων των ειδών τις κατασκευές, αφού με βάση αυτό και το πάχος των πλακών υπολογίζεται το βάρος κάθε τετραγωνικού μέτρου του μαρμάρου. Τα γνήσια ασβεστιτικά μάρμαρα (όπως το Πεντελικό) παρουσιάζουν φαινόμενο ειδικό όγκο ίσο με 2710-2720 kg/m³.
2. Υδαταπορρόφηση – Συντελεστής εμποτισμού: Η υδαταπορρόφηση ή εμποτισμός είναι η ιδιότητα του πετρώματος να πληρώνεται με νερό. Ορίζεται ως η διαφορά μάζας του υδατοκορεσμένου δοκιμίου από αυτή του δοκιμίου μετά από ξήρανση διά τη μάζα του δοκιμίου μετά την ξήρανση και εκφράζεται επί τις εκατό. Τα ασβεστιτικά μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι έχουν συντελεστή από 0,02-0,8%.
 3. Μέτρο ελαστικότητας: Ως μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ο λόγος της τάσης που ασκείται σε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο μαρμάρου προς την αξονική του παραμόρφωση. Τα μάρμαρα και οι συμπαγείς ασβεστόλιθοι έχουν μέτρο ελαστικότητας από 650-700 τη/m².
 4. Αντοχή σε θλίψη: Είναι ο λόγος του φορτίου θραύσης προς τη διατομή του δοκιμίου. Η αντοχή ενός δοκιμίου σε θλίψη εξαρτάται από το i) το μέγεθος των κόκκων του και την έκταση των ενδιάμεσων κενών τους. Είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των κόκκων, ii) από την ορυκτολογική του σύσταση, iii) από την υφή του πετρώματος (η εμφάνιση φολιδωτής ή γραμμωτής υφής επιβάλλει την πραγματοποίηση δύο μετρήσεων με άσκηση πίεσης παράλληλα και κάθετα στον προσανατολισμό των κρυστάλλων των ορυκτών συστατικών σε δοκίμια κατάλληλα προετοιμασμένα), iv) από τη συνηθισμένη παρουσία πυριτικών κονδύλων ή άλλων ξένων προσμίξεων, v) από το βαθμό εξαλλοίωσης. Η θλιπτική αντοχή του Πεντελικού μαρμάρου είναι 1091 kg/cm².
 5. Αντοχή σε εφελκυσμό: Η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος ισοδυναμεί με τη μέγιστη τάση που ασκείται στο κάτω μέρος της πλάκας, όταν αυτή υφίσταται καμπτική καταπόνηση. Η ιδιότητα αυτή επηρεάζεται σημαντικά από τη στρώση ή τη σχιστότητα των πετρωμάτων για αυτό απαιτείται οι μετρήσεις να γίνονται σε δοκίμια κάθετα και οριζόντια. Η εφελκυστική αντοχή των μαρμάρων είναι: 130-390 kg/cm².
 6. Αντοχή στη φθορά από τριβή: Εκφράζει την αντίσταση των πετρωμάτων στην τριβή. Εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και επομένως από τη σκληρότητα του πετρώματος και μερικώς από την τριβή και τον πιθανό βαθμό εξαλλοίωσης.
 7. Λοιπές ιδιότητες: Αυτές είναι η αντοχή στην κρούση, η μικροσκληρότητα Κοορ, η αντοχή στις μικροθερμοκρασιακές μεταβολές, η αντοχή στους ατμοσφαιρικούς ρύπους, η σταθερότητα χρώματος και η ορυκτολογική σύσταση και πετρογραφικός τύπος.

1.2 Η επιφανειακή φθορά του μαρμάρου

Η φθορά των υλικών αποτελεί συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Οι ενδογενείς παράγοντες σχετίζονται με το ίδιο το υλικό. Αυτοί περιλαμβάνουν τον τύπο του υλικού (π.χ. λίθοι, κονιάματα, κεραμικά, μέταλλα, ξύλο, προηγμένα 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.). (8), (9) 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. (10)

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. Σημαντικό ρόλο σχετικά με την ατμοσφαιρική επίδραση πάνω στο υλικό παίζει ο «τύπος» της ατμόσφαιρας. 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. (10), (11), (12)

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, ρΗ, άνεμος, συγκέντρωση αέριων ρύπων και αερολυμάτων, 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. Γίνεται έτσι σαφές, πως το ίδιο υλικό είναι δυνατόν να παρουσιάζει διαφορετικούς τύπους φθοράς σε διαφορετικές περιοχές μίας κατασκευής. (10), (13), (14), (15)

Το νερό είναι ένας άλλος ουσιαστικός 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. (16) Επιπλέον, πολλές αντιδράσεις μεταξύ των δομικών υλικών 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. (17)

Οι μηχανικές φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται τα δομικά υλικά κατατάσσονται στους εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με τη χρήση του. Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται στη στατική (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 στα δομικά υλικά. (10)

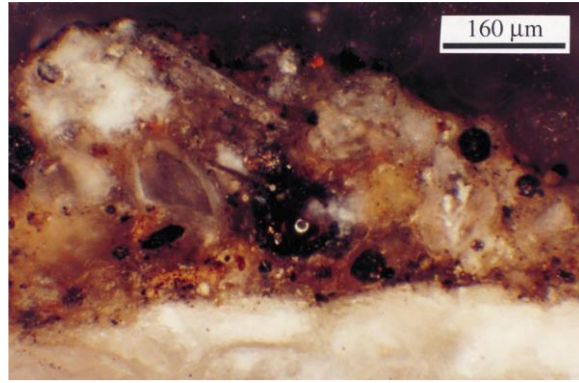
Οι μηχανισμοί φθοράς λειτουργούν με διάφορους τρόπους. Ένας από τους σημαντικότερους είναι η εμφάνιση των επιφανειακών κρουστών λόγω όξινων αερίων και ατμοσφαιρικών αιωρημάτων. (10), (18), (19) Η σύνθεση αυτών των κρουστών οφείλεται στο συνδυασμό δράσεων φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων. Αναφέρονται συχνά διάφοροι τύποι κρουστών οι οποίοι διακρίνονται από το χρώμα, την υφή και τη σύσταση. (20)

1.2.1 Μαύρες κρούστες

Οι 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 την ανάπτυξη μίας επικάλυψης με κόκκινη – καφέ έως καφέ – μαύρη απόχρωση. (21) 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. (22) 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. (23), (24) 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. (24) Το έντονο μαύρο χρώμα τους αποδίδεται στην παρουσία μαύρων ανθρακικών σωματιδίων τα οποία είναι προϊόντα καύσης και δρουν καταλυτικά στην αντίδραση της γυψοποίησης. (17), (24) Επίσης στο σώμα των μαύρων κρουστών μπορούν να παρατηρηθούν μικρά λευκά σωματίδια, τα οποία κυρίως συνδέονται με την παρουσία κρυστάλλων γύψου και ανακρυσταλλωμένου ασβεστίτη. (11)



Εικόνα 1.2.1-1: Εικόνα SEM: Ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου (25)

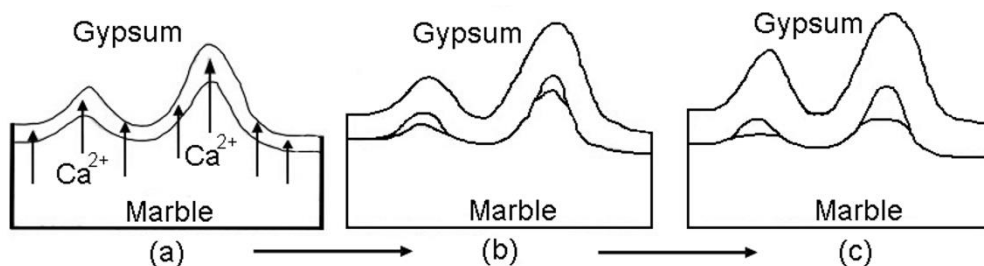


Εικόνα 1.2.1-2: Κρύσταλλοι ασβεσίτη στην επιφάνεια της μαύρης κρούστας (11)

Μοντέλο γαλβανικού στοιχείου του καθηγητή Θ.Ν. Σκουλικίδη

Ο καθηγητής Θ.Ν. Σκουλικίδης (2) πραγματοποίησε μελέτη με σκοπό την αποκάλυψη του μηχανισμού γυψοποίησης στις μαρμάρινες επιφάνειες. Αρχικά έλαβαν χώρα επί τόπου παρατηρήσεις και εργαστηριακές μετρήσεις σε τμήματα από μάρμαρα των μνημείων της Ακρόπολης, ώστε να διαπιστωθεί η κατάσταση φθοράς του και να προταθούν μέθοδοι προστασίας. Από το πρώτο στάδιο της μελέτης κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στις επιφάνειες μαρμάρου που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής το σχηματισμένο στρώμα γύψου αποτελείται από γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) κατά 85-97%, ενώ το υπόλοιπο ήταν θειώδες ασβέστιο ($\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Πιστοποιήθηκε για πρώτη φορά ότι λεπτομέρειες των αγαλμάτων και των γλυπτών διακόσμων διατηρούνται στις επιφάνειες των στρωμάτων γύψου, ενώ τις περισσότερες φορές έχουν εξαφανιστεί από την επιφάνεια του μαρμάρου, δηλαδή τα στρώματα του γύψου μιμούνται της επιφάνεια του μαρμάρου, ως συνέπεια του μηχανισμού της γυψοποίησης. Επομένως τα στρώματα αυτά του γύψου πρέπει να διασωθούν και να στερεωθούν, για να μην χαθούν για πάντα οι λεπτομέρειες του μαρμάρου τις οποίες έχουν διατηρήσει.

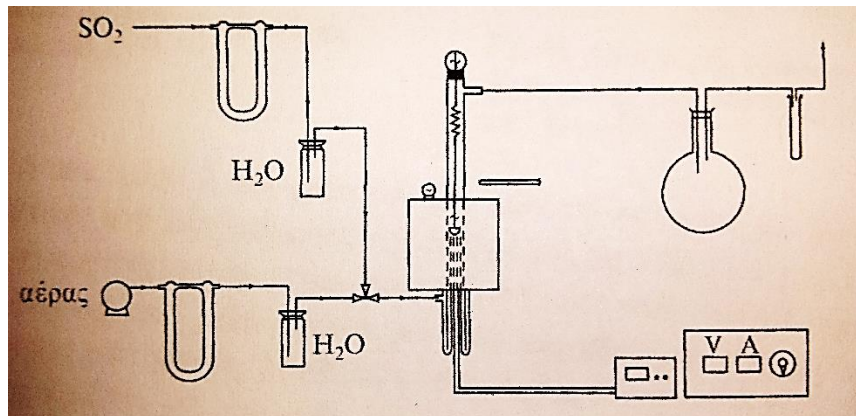


Εικόνα 1.2.1-3: Διατήρηση λεπτομερειών στην επιφάνεια του γύψου (26)



Εικόνα 1.2.1-4: Διατήρηση λεπτομερειών στο πίσω μέρος Καρυάτιδας, η οποία προστατεύεται από το νερό της βροχής. Οι λεπτομέρειες διατηρούνται πάνω στα στρώματα του γύψου. (26)

Στο δεύτερο στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη του μηχανισμού και μέτρηση των ταχυτήτων της γυψοποίησης με σπείρα χαλαζία πάνω σε σκόνη και τεμάχια μαρμάρου υπό την επίδραση SO_2 σε θερμοκρασία 25°C και ροή 50% SO_2 και 50% αέρα παρουσία υγρασίας.

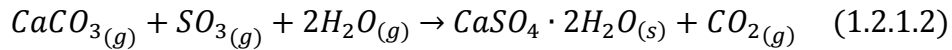
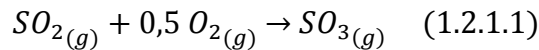


Εικόνα 1.2.1-5: Διάταξη μέτρησης της θείωσης με σπείρα χαλαζία (2)

Στάδιο 1: Αποδείχθηκε ότι μέχρι πάχος γύψου $\approx 300\text{\AA}$ ισχύει ευθύγραμμη χρονική εξέλιξη: $\gamma = K \cdot t$, όπου γ : πάχος ή βάρος ή % γύψος ή θειωμένα προϊόντα/ cm^2 , t : χρόνος και K : σταθερά της ταχύτητας), με ενέργεια ενεργοποίησης $\approx 14 \text{ Kcal/mol}$ ή $\approx 59 \text{ KJ/mol}$.

Στάδιο 2: Για πάχος πάνω από $\approx 300\text{\AA}$ ισχύει παραβολική χρονική εξέλιξη $\gamma^2 = K \cdot t$ με ενέργεια ενεργοποίησης $\approx 18 \text{ Kcal/mol}$ ή $\approx 75 \text{ KJ/mol}$.

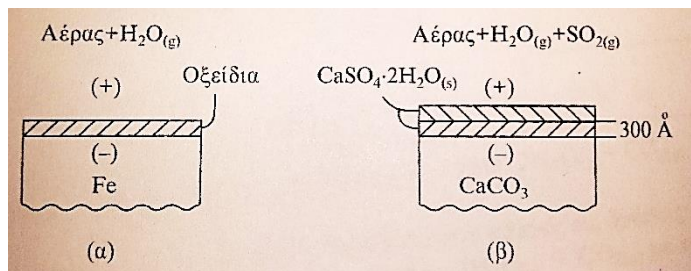
Η διαδικασία γυψοποίησης του μαρμάρου αποτελείται από τις δύο αντιδράσεις που ακολουθούν:



Όμως η πρώτη δράση είναι πολύ γρήγορη, επομένως το βραδύτερο στάδιο θα πρέπει να αναζητηθεί στη δεύτερη εγγενή δράση.

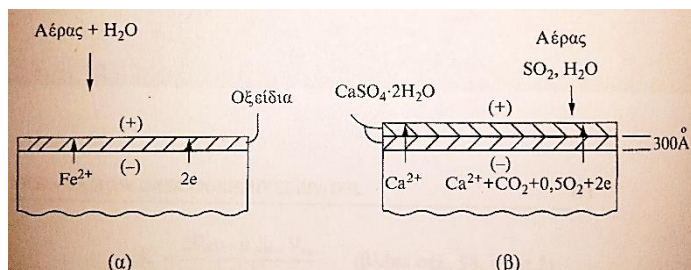
Η ενέργεια ενεργοποίησης των 18 Kcal/mol του δεύτερου σταδίου σημαίνει διάχυση ιόντων σε στερεά κατάσταση. Επειδή το φαινόμενο πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες, θα πρέπει μία άλλη μορφή ενέργειας να δημιουργεί τις προϋποθέσεις για διάχυση σε στερεή κατάσταση και γίνεται η υπόθεση, όπως και στην περίπτωση της διάβρωσης μετάλλων, ότι δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο μεταξύ πέτρας (αρνητικός πόλος), γύψου (ηλεκτρολύτης) και ρυπασμένου με SO₂ υγρού αέρα (θετικός πόλος).

(-) CaCO_{3(s)}/CaSO₄*2H₂O_(s)/SO_{2(g)}, O_{2(g)}, H₂O_(g) (+)



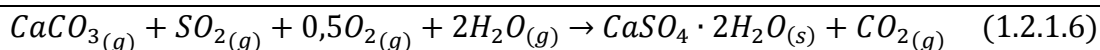
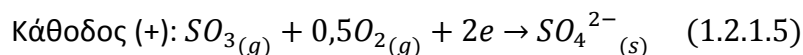
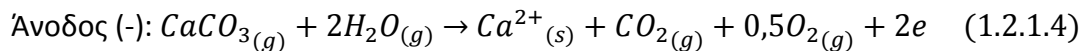
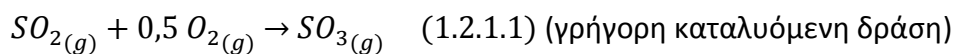
Εικόνα 1.2.1-6: (α) Μοντέλο γαλβανικού στοιχείου για την ομοίμορφη διάβρωση των μετάλλων (β) Προτεινόμενο γαλβανικό στοιχείο για την ερμηνεία του μηχανισμού γυψοποίησης (2)

Η διάχυση κάποιων από τα ιόντα Ca²⁺, CO₃²⁻, SO₄²⁻ θα μπορούσε να ήταν το βραδύτερο στάδιο. Σύμφωνα με τη Θεωρία Αταξίας σε πλεγματικές θέσεις μεταναστεύουν, και συνεπώς διαχέονται, τα μικρότερα ιόντα, δηλαδή τα Ca²⁺. Επομένως, το ηλεκτρικό ρεύμα του γαλβανικού στοιχείου ρέει διαμέσου της μετανάστευσης των ιόντων Ca²⁺ προς το διαβρωτικό περιβάλλον και προκύπτει η ακόλουθη Εικόνα:

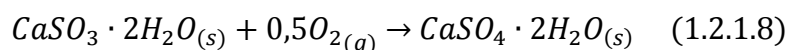
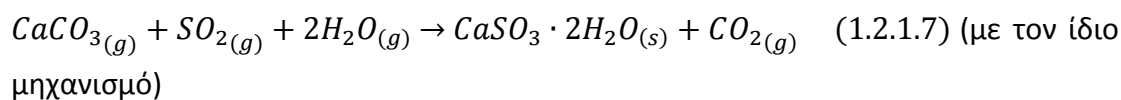


Εικόνα 1.2.1-7: Δράσεις στο γαλβανικό στοιχείο (2)

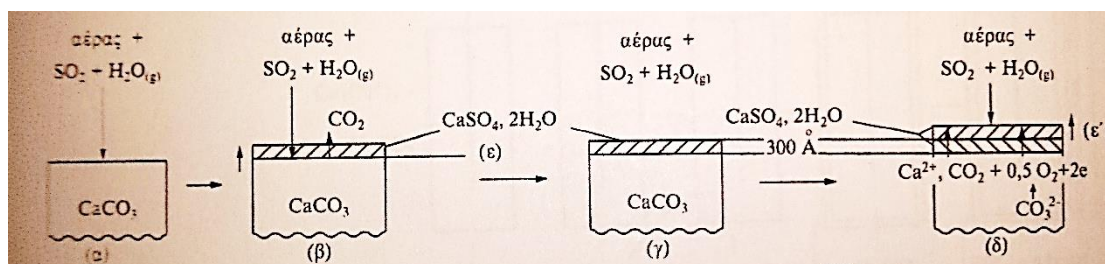
Άρα τα ιόντα ασβεστίου διαχέονται μέσα στο στρώμα του γύψου προς την ατμόσφαιρα με παράλληλη μετανάστευση ηλεκτρονίων. Οι ηλεκτροχημικές δράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι παρακάτω:



Χωρίς, ωστόσο να αποκλείονται και οι ακόλουθες δράσεις:



Σύμφωνα με το μοντέλο του καθηγητή Σκουλικίδη η εξέλιξη της γυψοποίησης περιγράφεται από τα ακόλουθα στάδια:



Εικόνα 1.2.1-8: Χρονική εξέλιξη γυψοποίησης (2)

(α) Χρονική στιγμή μηδέν, όπου ξεκινάει το φαινόμενο της γυψοποίησης.

(β) Περιγράφεται το πρώτο γραμμικό στάδιο, όπου το SO_2 , το O_2 και το H_2O διαχέονται στο μάρμαρο μέσω των πόρων και σχηματίζουν στοιβάδα γύψου πάχους. Το στάδιο αυτό καθορίζεται από την ταχύτητα εκρόφησης του CO_3^{2-} από την επιφάνεια του ασβεστίτη και τη διάχυση του, μέσω των πόρων του στρώματος του γύψου στην επιφάνεια.

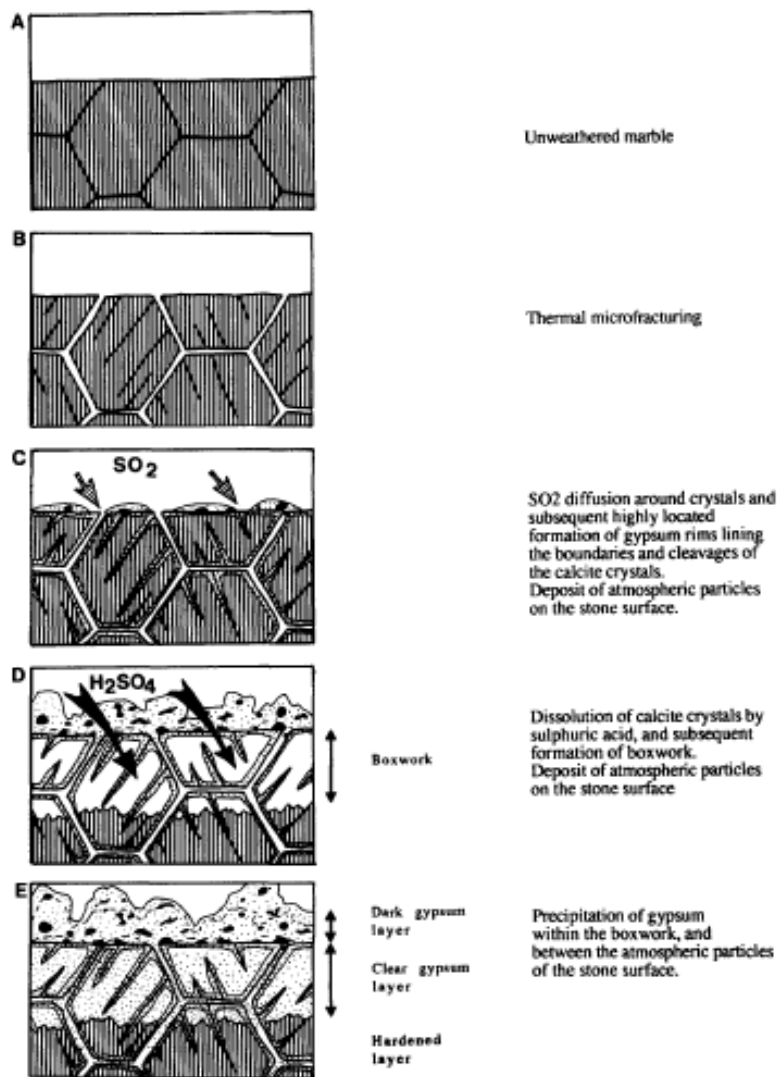
(γ) Ολοκληρώνεται το γραμμικό στάδιο, επειδή η στοιβάδα του γύψου έχει πλέον πάχος 300\AA .

(δ) Ξεκινάει το παραβολικό στάδιο της γυψοποίησης. Το SO_2 , το O_2 και το H_2O δεν διαχέονται πλέον μέσω του στρώματος του γύψου, επειδή αυτό δεν είναι πλέον πορώδες. Η αντίδραση ελέγχεται τώρα από την διάχυση των ιόντων ασβεστίου μέσω της στοιβάδας του γύψου στο περιβάλλον.

Ψευδομορφισμός γύψου – Μοντέλο γυψοποίησης της V. Verges – Belmin

Ψευδομορφισμός ονομάζεται η διεργασία όπου ένα ορυκτό αντικαθιστά χημικά κάποιο άλλο, ενώ διατηρείται μερικώς ή ολικώς η κρυσταλλική δομή του αρχικού ορυκτού. (27) Στην περίπτωση του σχηματισμού κρούστας γύψου σε λίθινη επιφάνεια, ο ψευδομορφισμός εμφανίζεται, όταν εντοπίζονται πάνω στο στρώμα του γύψου κόκκοι ασβεστίτη, ενώ τεκμηριώνεται και από την παρουσία πολλών στρωμάτων με διαφορετικές συστάσεις στη διαβρωμένη επιφάνεια. Ο ψευδομορφισμός σαν φαινόμενο διάβρωσης αναπτύσσεται στα ακόλουθα στάδια, όπως περιγράφεται από τη V. Verges – Belmin: (28)

1. Δημιουργία μικρορηγματώσεων λόγω θερμικής κόπωσης
2. Διάχυση SO_2 γύρω από τους κρυστάλλους ασβεστίτη και σχηματισμός γύψου γύρω από τα περατωτικά όρια των κρυστάλλων ασβεστίτη και των σχισμών του ασβεστίτη
3. Επικάθηση ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην επιφάνεια του λίθου
4. Διάλυση των κρυστάλλων του ασβεστίτη από το θειικό οξύ και σχηματισμός γύψου κυψελοειδούς μορφής (boxwork)
5. Κατακρήμιση γύψου μέσα στην κυψελοειδή μορφή του και συμπλήρωση των κενών, καθώς και ανάμεσα στα σωματίδια της επιφάνειας της πέτρας



Εικόνα 1.2.1-9: Διαδικασία σχηματισμό στρωμάτων γύψου στην επιφάνεια μαρμάρου (28)

1.2.2 Γκρίζες κρούστες

Εξετάζοντας αυτές τις επιφάνειες ανακαλύφθηκε ότι αυτό το χαρακτηριστικό χρώμα οφείλεται στις επικαθίσεις σκόνης στο λίθο. Ένα διακριτό όριο μεταξύ του στρώματος σκόνης και της υποκείμενης λίθινης επιφάνειας αποδεικνύει ότι δεν πραγματοποιείται καμία χημική ή φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο υλικών. Αν απομακρυνθεί η στοιβάδα της σκόνης, η επιφάνεια του λίθου αποκαλύπτεται χωρίς κανένα σημάδι διάβρωσης. Μερικές φορές το στρώμα της σκόνης μπορεί να απομακρυνθεί με τη μορφή ενός συμπαγούς φιλμ. Αυτή η συμπαγής δομή είναι σαφής ένδειξη ότι οι επικαθίσεις σκόνης έχουν υποστεί μία σειρά από φυσικές και χημικές αντιδράσεις, που οδήγησαν στη σύνδεση μεταξύ του υλικού και των σωματιδίων σκόνης. Οι γκρίζες κρούστες εντοπίζονται συνήθως σε στοές ή αψίδες, όπου δεν έρχονται σε επαφή με το βρόχινο νερό. (17), (29)

1.2.3 Πάτινες

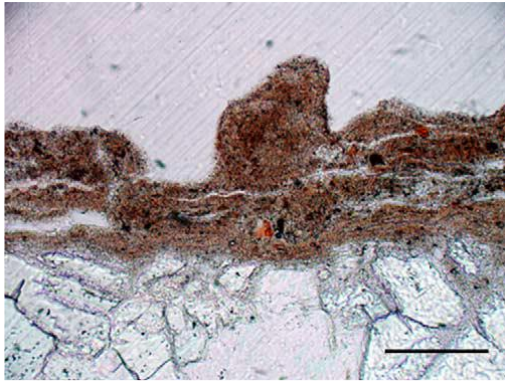
Οι πάτινες μοιάζουν με ομοιογενείς και εκτεταμένες επικαλύψεις με χρωματικές διαβαθμίσεις μεταξύ του καφέ και του πορτοκαλί. Οι πάτινες εμφανίζονται σε προστατευμένες και αποπλυμένες επιφάνειες λίθου. Κυρίως αποτελούνται από οξαλικό ασβέστιο ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) και πυριτικά και φωσφορικά άλατα σε μικρές ποσότητες. (24) 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. (30)
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, κεριά, μονοδικαρβοξυλικό οξύ, αυγό κτλ. (30), (31), (32), (33), (34)
3. Επιπλέον οι πάτινες συχνά αποδίδονται σε αλληλεπίδραση του λίθου με ατμοσφαιρικούς παράγοντες και σωματίδια σκόνης. (32)

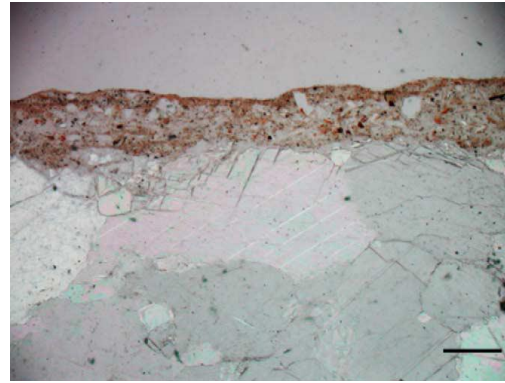
Πάτινες στον Παρθενώνα και στο Ερεχθείο

Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε δείγματα πορτοκαλοκάστανης πάτινας από τον Παρθενώνα και το Ερεχθείο, διαπιστώθηκε ότι στα δύο μνημεία εμφανίζονται διαφορετικά είδη πάτινας. Από άποψη υφής η επιδερμίδα στον Παρθενώνα μοιάζει με βερνίκι με ομοιογενή δομή, ενώ η πάτινα του Ερεχθείου μοιάζει με λεπτό επίχρισμα. Από τον εργαστηριακό έλεγχο ανιχνεύτηκαν χαμηλά ποσοστά θείου και σημαντικά ποσοστά φωσφόρου και σιδήρου. Η παρουσία του φωσφόρου και του σιδήρου σχετίζονται με τον εντοπισμό υδροξυαπατίτη και αιματίτη αντίστοιχα. Οι πάτινες αποτελούνταν επίσης από οξαλικό ασβέστιο (σε ένυδρη και διένυδρη μορφή), το οποίο προστατεύει το μάρμαρο από την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων.

Το οξαλικό ασβέστιο και ο υδροξυαπατίτης είναι πιθανόν να σχετίζονται με προϊόντα αποσύνθεσης οργανικής ύλης από αρχαίες επεμβάσεις, προκειμένου να προστατευθεί ή να τονωθεί η επιφάνεια του μαρμάρου. Το σημαντικό ποσοστό πυριτίου που είναι κατανεμημένο όχι μόνο στην επιδερμίδα αλλά και κάτω από το στρώμα της πάτινας και συγκεκριμένα ανάμεσα στους κρυστάλλους του ασβεστίτη σε συνδυασμό με ιστορικές αναφορές υποδηλώνει την εφαρμογή αργυλοπυριτικών υλικών για την προστασία των μαρμάρων του Παρθενώνα. Στην πάτινα του Ερεχθείο ανιχνεύθηκε σημαντική ποσότητα μόλυβδου στη μορφή κερουσίτη, που σχετίζεται με τη χρήση αττικής ώχρας πλούσιας σε μόλυβδο για το χρωματισμό των επιστρώσεων. (24)



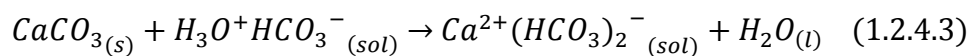
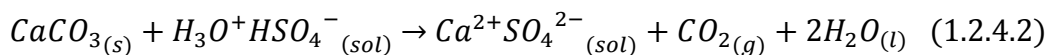
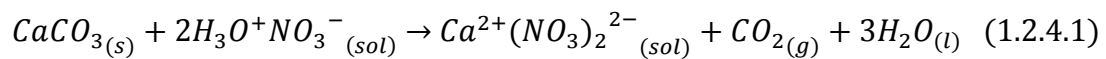
Εικόνα 1.2.3-1: Λεπτή τομή. Πάτινα από τον Παρθενώνα. (24)



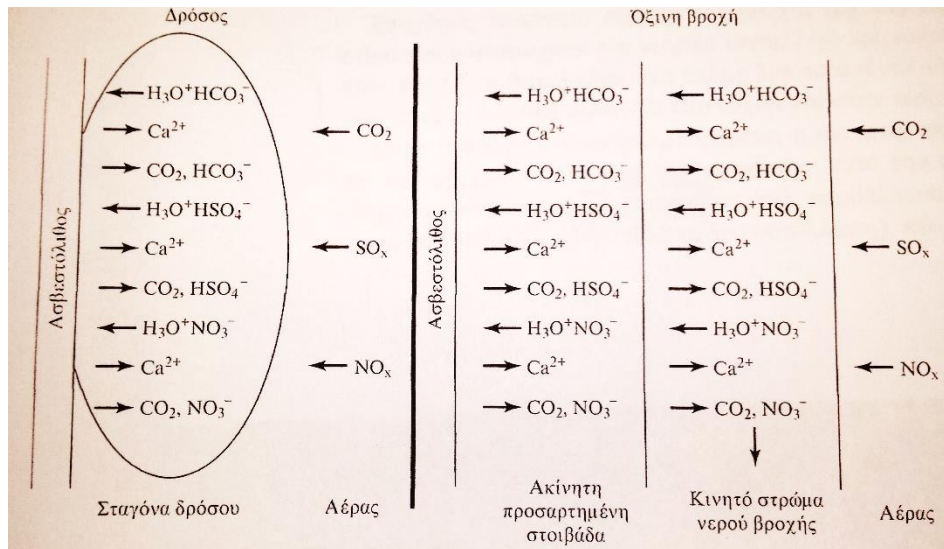
Εικόνα 1.2.3-2: Λεπτή τομή. Πάτινα από το Ερεχθείο (24)

1.2.4 Όξινη προσβολή

Η όξινη βροχή προσβάλλει με τα οξέα $H_3O^+HSO_4^-$, $H_3O^+NO_3^-$, $H_3O^+HCO_3^-$, που έχουν διαλυθεί ή σχηματιστεί στις σταγόνες της, τα φυσικά υλικά. Ειδικά για τα ανθρακικά υλικά ισχύει:



Το κινητό στρώμα της βροχής ή το στρώμα του δρόσου περιέχει πολλά ιόντα ασβεστίου που αντιστοιχούν στα νιτρικά ιόντα, λιγότερα ιόντα ασβεστίου που αντιστοιχούν στα όξινα θειικά ιόντα και ακόμη λιγότερα ιόντα ασβεστίου που αντιστοιχούν στα ανθρακικά ιόντα. Όταν η βροχή σταματήσει παραμένει η ακίνητη προσαρτημένη στοιβάδα και αρχίζει η εξάτμιση του νερού της. Κατά την κρυστάλλωση των αλάτων ανακρυσταλλώνεται πρώτα και σε μεγαλύτερο ποσοστό το ανθρακικό ασβέστιο, που αν η ταχύτητα εξάτμισης του νερού είναι μικρή, αποκτά μορφή αραγωνίτη, ενώ ταυτόχρονα ή χωριστά ανακρυσταλλώνεται γύψος, νιτρικό ασβέστιο και νιτρικό ασβέστιο με τέσσερα μόρια νερού. (2) Συνέπειες της όξινης προσβολής είναι η απόπλυση των επιφανειών και η ζαχαροειδής φθορά.



Εικόνα 1.2.4-1: Σχηματική απεικόνιση όξινης προσβολής φυσικών υλικών. Στον αέρα υπάρχουν επίσης O_2 και N_2 , που διαχέονται αλλά εδώ το O_2 δεν δρα άμεσα, όπως στα μέταλλα, αλλά έμμεσα: $SO_2 \rightarrow SO_3$ (2)

Αποπλυμένες επιφάνειες

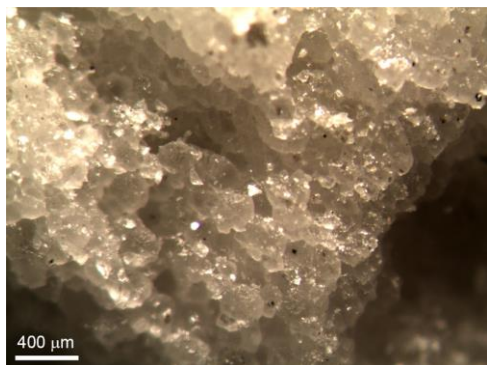
Οι επιφάνειες αυτές εκτίθενται σε μεγάλο βαθμό στη διαβροχή, συνεπώς είναι επιδεικτικές στη διάβρωση και την απόθεση σωματιδίων. Εξαιτίας της άμεσης έκθεσης στο βρόχινο νερό εξαφανίζονται τα προϊόντα της διάβρωσης λόγω απόπλυσης. Ο συνδυασμός της διάβρωσης και της απόπλυσης έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια υλικού από το λίθο και η σοβαρότητα αυτού του φαινομένου εξαρτάται από το βαθμό της χημικής προσβολής και της ποσότητας του νερού. Μερικές φορές στις αποπλυμένες επιφάνειες ανιχνεύεται μικρή ποσότητα γύψου. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του υγιούς και του αποπλυμένου τμήματος διαπιστώνεται ότι μέρος του λίθου, κυρίως ασβεστίτης, έχει διαλυθεί και απομακρυνθεί από τη μεγάλη ποσότητα του νερού. (17), (35)



Εικόνα 1.2.4-2: Απομείωση λεπτομερειών στο γλυπτό εξαιτίας της απόπλυσης (36)

Ζαχαροειδής φθορά

Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την κοκκώδη αποσάθρωση του μαρμάρου, καθώς διαλύεται η συνδετική ύλη των κρυστάλλων εξαιτίας της όξινης βροχής, με αποτέλεσμα οι κόκκοι του ασβεστίτη να έχουν τη μορφή κόκκων ζάχαρης. (37), (38)



Εικόνα 1.2.4-3: Ζαχαροειδής φθορά σε μάρμαρο (37)

1.2.5 Οξειδωτική προσβολή

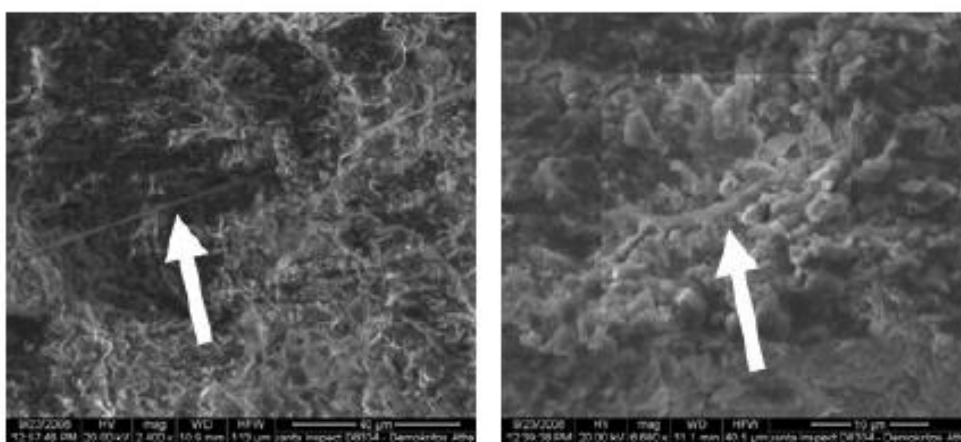
Ορισμένες προσμίξεις σε πετρώματα, όπως είναι οι ενώσεις σιδήρου ή γενικά οι θειούχες ενώσεις, οξειδώνονται από το οξυγόνο του αέρα. Έτσι, στην περίπτωση προσμίξεων σιδηροπυρίτη FeS_2 , όπως στα μάρμαρα σχηματίζεται οξείδιο και υδροξείδιο του σιδήρου, που χρωματίζει την επιφάνεια καστανέρυθρη. Εκτός από το χρωματισμό οι οξειδώσεις αυτές συνεπάγονται συνήθως διόγκωση, προκαλούν μικρορηγματώσεις και λύση της συνοχής των κρυστάλλων. (2)

1.2.6 Βιολογική διάβρωση

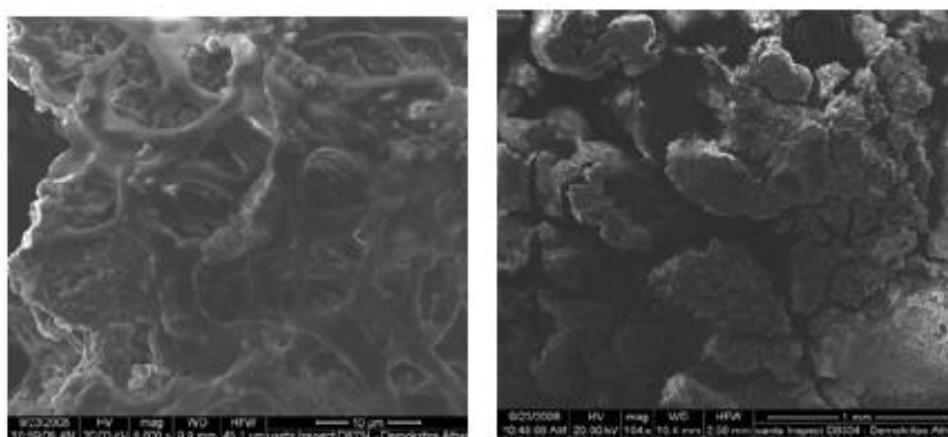
Η βιολογική φθορά στο λίθο είναι ένας από τους πολλούς μηχανισμούς φθοράς που προκαλούν διάλυση και καταστροφή στα ιστορικά μνημεία. Η βιοδιάβρωση συνήθως θεωρούταν σαν μία διαδικασία υποβάθμισης των ανόργανων παραγόντων, η οποία ακολουθεί τα πρώτα αποτελέσματα της φθοράς. Οι παράγοντες φθοράς αρχικά δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες στη δομή του λίθου και προκαλούν τον εμπλουτισμό του με οργανικά και ανόργανα θρεπτικά συστατικά προετοιμάζοντας έτσι την ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε αυτόν. Ωστόσο, μελέτες στον τομέα της βιοδιάβρωσης και συγκεκριμένα στον τομέα των βιοφίλμ, που σχηματίζονται από τους μικροοργανισμούς για να προστατευθούν από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, αναφέρουν ότι οι επιπτώσεις της βιοδιάβρωσης μπορούν να εντοπιστούν στα αρχικά στάδια της έκθεσης του λίθου. (39), (40), (41)

Στις επιπτώσεις αυτές συμπεριλαμβάνεται κατά πρώτο λόγο και η αισθητική υποβάθμιση των λίθινων επιφανειών εξαιτίας της χρώσης από τις βιογενείς χρωστικές (χλωροφύλλη, καροτενοειδή, μελανίνη). (42) Δεύτερον, παρουσιάζονται εξωκυτταρικές πολυμερικές ουσίες οι οποίες ασκούν μηχανικές τάσεις στο ορυκτό,

εξαιτίας των κύκλων συστολής – διαστολής των κολλοειδών βιογενών προϊόντων στο εσωτερικό των πόρων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στη διαφοροποίηση της μικροδομής του λίθου. (19) Μηχανικές τάσεις ασκούνται και από τη διείδυση των υφών των μικροοργανισμών μέσα στο λίθο. (43) Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία βιοφίλμ σε λίθινες επιφάνειες επιταχύνει τη συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων. (44) Η απελευθέρωση των βιογενών διαβρωτικών οξέων είναι ίσως ο πιο γνωστός και καταστρεπτικός βιοχημικός μηχανισμός για τα ανόργανα υλικά. Οι μικροοργανισμοί εκκρίνουν οργανικά ή ανόργανα οξέα και λαμβάνει χώρα η διεργασία υποβάθμισης του λίθου που ονομάζεται οξεόλυση. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελονοειδή διάβρωση και σε απώλεια υλικού σε μεγάλη κλίμακα. (45)



Εικόνα 1.2.6-1: Εικόνες SEM. Διακρίνεται η ανάπτυξη υφών οι οποία οδηγεί στην επιφανειακή πυκνή ανάπτυξη μυκηλίων (46)



Εικόνα 1.2.6-2: Εικόνα SEM. Η ανάπτυξη μυκηλίων, τα οποία εισέρχονται κάθετα στο κύριο σώμα του λίθου και προκαλούν επιφανειακές ρωγμές (46)

Επιδεκτικότητα λίθου στη βιολογική διάβρωση

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω τα χαρακτηριστικά φθοράς του λίθου επηρεάζονται από τους ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. (10) Μία εκτεταμένη

εσωτερική επιφάνεια πόρων διευκολύνει την διάδοση της μικροχλωρίδας μέσα στο πορώδες του λίθου. Τα υψηλά ποσοστά πορώδους επιτρέπουν την βαθιά είσδυση της υγρασίας στο υλικό, ώστε να προετοιμαστεί το έδαφος για την ανάπτυξη μικροοργανισμών με βάθος από 3 έως 5 cm. Ενώ στους λίθους με μεγάλους πόρους εξαιτίας της σύντομης παραμονής της υγρασίας στο εσωτερικό τους επιτρέπεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών μόνο περιστασιακά, οι λίθους με μικρούς πόρους, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραμονή υγρασίας, προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες για τον αποικισμό μικροοργανισμών. (19)

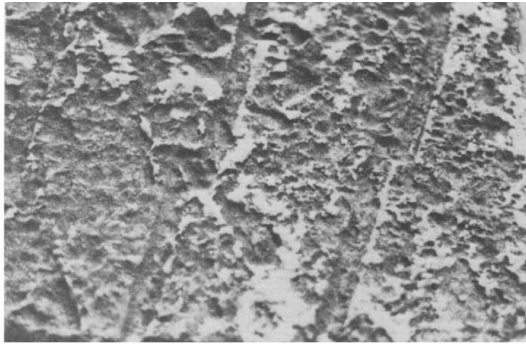
Η υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικές ενώσεις (>3% w/v CaCO₃) στο λίθο οδηγεί στη ρύθμιση των βιογενών μεταβολικών προϊόντων διατηρώντας ένα σταθερό pH, κατάλληλο για την ανάπτυξη βακτηρίων. (19) Ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο αποτελούνται συνήθως από μία πυκνή ασβεστιτική μήτρα, η οποία επιτρέπει την επιφανειακή μικροβιακή ανάπτυξη. Ωστόσο τα υλικά αυτά φαίνεται να υποβάλλονται υπό την επίθεση λειχήνων και μυκήτων. (47), (48)

Μηχανισμοί της βιολογικής διάβρωσης

Βιοχημική διάβρωση

Ο Berthelin (1983) είχε διακρίνει τους μηχανισμούς βιοδιάβρωσης σε διαλυτούς και αδιάλυτους. Οι διαλυτοί μηχανισμοί περιλαμβάνουν τις αντιδράσεις οξέων, καθώς και τις ενζυματικές και μη ενζυματικές αντιδράσεις. Από την άλλη πλευρά στους αδιάλυτους μηχανισμούς συγκαταλέγονται η οξείδωση, η αναγωγή θειικών συμπλεγμάτων και η αποικοδόμηση οργανομεταλλικών συμπλεγμάτων.

Η απελευθέρωση βιογενών διαβρωτικών οξέων είναι πιθανόν η πιο γνωστή και περισσότερο διερευνημένη διεργασία βιοχημικής διάβρωσης στα ανόργανα υλικά. Η διεργασία αυτή γνωστή και με τον όρο «biocorrosion», προκαλείται από τις μικροβιακές εκκρίσεις ανόργανων και οργανικών οξέων (οξεόλυση και συμπλοκοποίηση). Οι ουσίες αυτές διαλύουν και χαράσσουν την μήτρα του ορυκτού με ταυτόχρονη υποβάθμιση της συνοχής. (49), (19) Ανάλογα με τις ορυκτολογικές, μορφολογικές και φυσικοχημικές παραμέτρους του λίθου η βιοδιάβρωση προκαλεί βελονοειδείς σχηματισμούς ή σε μεγαλύτερη κλίμακα αποφλοίωση της επιφάνειας. (50)



Εικόνα 1.2.6-3: Βελονοειδής διάβρωση σε λίθο (33)

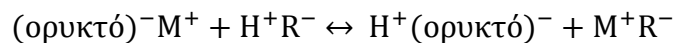


Εικόνα 1.2.6-4: Βελονοειδής διάβρωση εξαιτίας της ανάπτυξης λειχήνων σε δολομιτικά εγκλείσματα λίθου (51)



Εικόνα 1.2.6-5: Βελονοειδής διάβρωση (43)

Η οξεόλυση είναι μία αντίδραση οξέων (π.χ. ανθρακικό, νιτρικό, θεικό, μυρμηκικό, οξικό, γαλακτικό, γλυκονικό) που ακολουθεί τον παρακάτω τύπο: (52)



όπου $\text{R}^- = \text{NO}_3^-, \text{R}_1\text{COO}^-, \text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}$

Η ανταλλαγή πρωτονίου – κατιόντος μπορεί να προκύψει κυρίως από την αντίδραση χημειολιθοτροφικών μικροοργανισμών και συγκεκριμένα βακτηρίων που παράγουν νιτρικά και θεικά οξέα. Τα νιτροποιητικά βακτήρια προκαλούν την οξείδωση της δυσδιάλυτης αμμωνίας (που προέρχεται κυρίως από γεωργικά λιπάσματα) και των νιτωδών (που προέρχονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση) σε νιτρώδη και νιτρικά οξέα που είναι ευδιάλυτα. Η αντίδρασή τους με το ανθρακικό ασβέστιο και άλλα ορυκτά οδηγεί στο σχηματισμό νιτρικών και νιτωδών, τα οποία διαλύονται ευκολότερα από τις φάσεις του ορυκτού. Τα θειο – οξειδωτικά βακτήρια εκκρίνουν θεικό οξύ κατά τη διάρκεια της μεταβολικής δράσης τους το οποίο αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο προς το σχηματισμό θεικού ασβεστίου (γύψου). (19)

Η διαβρωτική δράση των χημειοργανοτροφικών μικροοργανισμών, συμπεριλαμβανομένων και των λειχήνων, χαρακτηρίζεται από την έκκριση συμπλεγμάτων. Αυτά εμπεριέχουν οξέα όπως το οξαλικό, κιτρικό, γλυκονικό, 2-οξογλυκονικό, 2-οξογλουταρικό, άλλα και ανθρακικό οξύ που παράγεται κατά την

κυτταρική αναπνοή. (39), (19) Αυτά το οξέα έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν κατιόντα όπως Ca, Al, Si, Fe, Mn, και Mg από τα ορυκτά προς σχηματισμό σταθερών συμπλόκων. (53), (52)

Έχει αποδειχτεί ότι τα βιογενή οργανικά οξέα είναι αισθητά πιο καταστρεπτικά από ότι τα ανόργανα για τα ορυκτά και θεωρούνται ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διάβρωσης των λίθων. Πολλοί μικροοργανισμοί είναι σε θέση να παράγουν αυτά τα οξέα, αλλά οι μύκητες χαρακτηρίζονται ως οι πλέον σημαντικοί οργανισμοί στη φύση για τη βιοδιάβρωση των λίθων. (19), (54)

Η βιοδιάβρωση στους λίθους μπορεί να λάβει χώρα και μέσω αλκαλικών αντιδράσεων. Η ικανότητα αποικοδόμησης νιτρικών συμπλόκων και αλάτων νατρίου οργανικών οξέων είναι διαδεδομένη στους μικροοργανισμούς. Τα προϊόντα αυτής της διεργασίας (αμμωνίας ή άλας νατρίου) αυξάνουν το pH του διαλύματος στους πόρους του λίθου και προκαλούν (σε τιμές pH>9) τη διάλυση του πυριτίου. Η παγίδευση του διοξειδίου του άνθρακα από τη φωτοσύνθεση προκαλεί επίσης μία ελαφρά αλκαλοποίηση του μικροβιακού περιβάλλοντος (pH 8,3) και τη ρύθμιση των εκκρίσεων της κυτταρικής αναπνοής. (19)

Ένας επιπλέον σημαντικός βιοχημικός μηχανισμός διάβρωσης, που απαντάται συχνά σε λίθους προκαλείται από διάφορα χημειοοργανοτροφικά βακτήρια και μύκητες τα οποία είναι σε θέση να απομακρύνουν κατιόντα σιδήρου και μαγγανίου από το ορυκτό μέσω οξειδωσης. (55)

Βιοφυσική διάβρωση

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι οι μικροοργανισμοί μπορεί να συμβάλλουν στην ανάπτυξη μαύρης κρούστας, επιταχύνοντας ή δρώντας σαν καταλύτες στις αντιδράσεις. Η βιογενής επιρροή σχετίζεται άμεσα με την ανάπτυξη μικροβιακών βιοφίλμ στις επιφάνειες των μνημείων. (45) Ενώ οι βασικές παράμετροι για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών διατίθενται από το υλικό και το περιβάλλον, η ανάπτυξη των βιοφίλμ διευκολύνει τη διαδοχή των μικτών κοινοτήτων μικροοργανισμών. Ακόμα και συνθήκες έλλειψης θρεπτικών συστατικών και υγρασίας μπορούν να βελτιωθούν από το σχηματισμών διαδοχικών σύνθετων βιοφίλμ. Τα βιοφίλμ αποτελούνται από μικροβιακά κύτταρα που βρίσκονται στην επιφάνεια του λίθου (υπόστρωμα), τα οποία συχνά είναι ενσωματωμένα σε οργανική πολυμερική μήτρα μικροβιακής προέλευσης. Η μήτρα αυτή έχει σχηματιστεί από εξωκυτταρικές πολυμερικές ουσίες, όπως πολυσακχαρίτες, λιποπολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, γλυκοπρωτεΐνες, λιπίδια, γλυκολιπίδια, λιπαρά οξέα και ένζυμα. Δεν χρειάζεται να βρίσκονται σε άμεση επαφή με το υπόστρωμα όλοι οι μικροοργανισμοί του σύνθετου βιοφίλμ, οι οποίοι μπορούν να προσβάλλουν το λίθο. (56), (45)

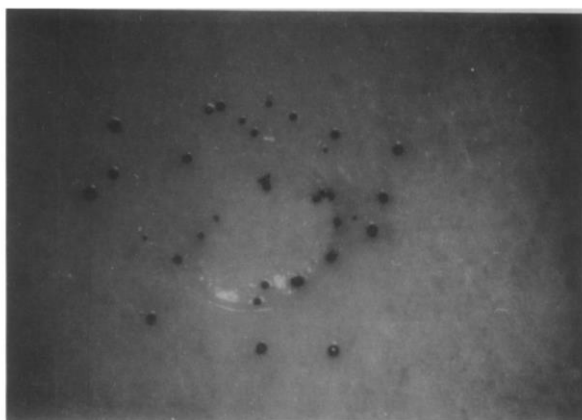
Ο μικροβιακός αποχρωματισμός των λίθινων επιφανειών θεωρείται ως πρωτογενής βιοφυσική επίπτωση, επειδή δρα σαν πρόδρομος του σχηματισμού μαύρης κρούστας. Αρχικά μειώνεται η αισθητική αξία του μνημείου, αλλά μπορεί να

επηρεαστούν και οι θερμικές ιδιότητες του λίθου προκαλώντας σημαντικές φθορές, ιδιαίτερα σε λίθους με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλαζία ή σε ορυκτά που περιέχουν άργιλο. (19)

Η πρώτη αναφορά σε βιογενή μαύρο χρωματισμό σε λίθο, που προκλήθηκε από χλωροφύλλη, έγινε από το Jaag το 1945. Οι χρωματικές αλλαγές πάνω στην επιφάνεια του λίθου αποδόθηκαν στην παραγωγή χλωροφύλλης από κυανοβακτήρια και φύκη. Στον αποχρωματισμό συμβάλλουν και άλλες βιογενείς χρωστικές όπως οι φυκοχολινοπρωτεΐνες και τα καροτενοϊδή. Η αλλοίωση του χρώματος του λίθου από βιογενείς χρωστικές ουσίες μπορεί να διαιρεθεί σε: (19), (57)

1. μαύρες κηλίδες που προκαλούνται από τη μελανίνη, τις μελανοϊδίνες, και από προϊόντα της φθοράς της χλωροφύλλης
2. πράσινες και πρασινωπές κηλίδες που προκύπτουν από φωτοσυνθετικές χρωστικές από τα φύκη και τα κυανοβακτήρια
3. κιτρινοπορτοκαλοκάστανες κηλίδες που δημιουργούνται από τα καροτένια, τα καροτενοϊδή και από προϊόντα φθοράς της χλωροφύλλης, όπως οι φυκοχολινοπρωτεΐνες
4. πορτοκαλί, ροζ και κόκκινες κηλίδες που απορρέουν από χρωστικές από χημειοργανοτροφικά βακτήρια και προϊόντα φθοράς των κυανοβακτηρίων και των φυκών που περιέχουν σίδηρο.

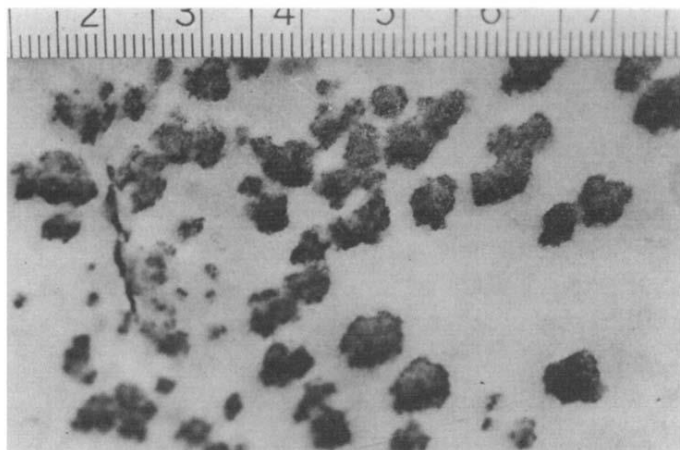
Κατά την έρευνα της χρωματικής αλλοίωσης του λίθου από μικροοργανισμούς δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην προέλευση και τη λειτουργία των καφέ – μαύρων μελανίνων. Ο Willimzing απέδωσε το μαύρο χρωματισμό των λίθων σε ενζυματικές δραστηριότητες πολλών μικροοργανισμών που βρέθηκαν σε λίθινες επιφάνειες. Τεκμηριώνει ότι η τυροσινάση, ένα ευρέως διαδεδομένο ένζυμο στη φύση, απελευθερώνεται από νεκρά μικροβιακά κύτταρα και προκαλεί το σχηματισμό της μελανίνης. Η μελανίνη αναφέρεται ότι προστατεύει τους μικροοργανισμούς από την UV – ακτινοβολία και τις αλλαγές της θερμοκρασίας. (19)



Εικόνα 1.2.6-6: Μαύρες κηλίδες στην επιφάνεια μαρμάρου από την επίδραση βιογενών χρωστικών (42)

Επιπλέον, τα μικροβιακά βιοφίλμ επηρεάζουν την υδαταπορρόφηση των λίθων προκαλώντας σοβαρές αλλαγές στην διάχυση του νερού στους πόρους του υλικού. (45)

Τα βιοφίλμ επίσης, συγκεντρώνουν αιωρούμενα σωματίδια, όπως αιθάλη και σκόνη, ενώ απορροφούν και διαβρωτικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι επιταχύνουν το φαινόμενο της χημικής διάβρωσης. Η παραγωγή οξαλικών, φωσφορικών, θειικών, ανθρακικών και μελανίνων από τη βιολογική δράση ενισχύει το σχηματισμό κρυστών. (19)



Εικόνα 1.2.6-7: Κυανοβακτήρια σε επιφάνεια μαρμάρου (33)

Στο πλέγμα του ορυκτού ασκούνται μηχανικές τάσεις εξαιτίας της συστολής και της διαστολής βιοφίλμ τα οποία περιέχουν κολλοειδή μόρια υδατανθράκων και πρωτεϊνών. Σε ασβεστόλιθους ασκεί τάσεις και η είσδυση των υφών από τους μύκητες και της λειχήνες. Οι βιοφυσικοί μηχανισμοί ενισχύουν τις μηχανικές δραστηριότητες που σχετίζονται με τους θερμικούς κύκλους ή την κρυστάλλωση αλάτων και επιταχύνουν τις αβιοτικές διεργασίες διάβρωσης. (19)

2. Ειδικό θεωρητικό μέρος

2.1 Υπέρυθρη θερμογραφία

2.1.1 Εισαγωγή

Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές είναι πλέον ιδιαίτερα δημοφιλείς στη διαγνωστική μελέτη των κτηρίων, καθώς δεν έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια ελέγχου και προσφέρουν γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα. Ιδιαίτερα στον τομέα της προστασίας μνημείων, όπου αποφεύγεται η εκτεταμένη χρήση αναλυτικών μεθόδων εξαιτίας των προβλημάτων που προκαλούν η προσβασιμότητα στους ιστορικούς χώρους, καθώς και ο μη αναστρέψιμος χαρακτήρας της δειγματοληψίας, οι μη καταστρεπτικές τεχνικές αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της κατάστασης διατήρησής τους. (58), (59) Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές βασίζεται σε διαφορετικές αρχές και παρουσιάζει διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας που εξετάζεται. Έτσι λαμβάνονται διαφορετικές πληροφορίες από την κάθε μία τεχνική, ενώ ο συνδυασμός όσο περισσότερων τεχνικών για τη μελέτη ενός κτηρίου είναι ιδανικός για τη διαμόρφωση μίας συνολικής εικόνας για την κατάστασή του. (60)

Μία από τις μη καταστροφικές τεχνικές είναι η υπέρυθρη θερμογραφία, η οποία παρουσιάζει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στον τομέα της διάγνωσης κτηρίων. Συμβάλλει στη διερεύνηση της δομής των κατασκευών, των ελέγχου των οικοδομικών υλικών και της κατάστασης διατήρησης, επίσης είναι σε θέση να εξετάσει μεγάλες περιοχές. Η θερμογραφία υπέρυθρου καταγράφει τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας που στην επιφάνεια του υλικού. 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. (59), (61)

2.1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ανακαλύφθηκε το 1800 από τον αστρονόμο Sir William Herschel. Γνωρίζοντας ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από όλα τα χρώματα του φάσματος, ήθελε να ανακαλύψει ποια χρώματα ευθύνονται για τη θέρμανση των αντικειμένων. Με τη βοήθεια ενός γυάλινου πρίσματος ανέλυσε τη λευκή δέσμη του ηλιακού φωτός στα χρώματα του φάσματός της, στη συνέχεια μέτρησε τη θερμοκρασία κάθε χρώματος και διαπίστωσε ότι η θερμοκρασία των χρωμάτων αυξάνεται από το ιώδες στο κόκκινο χρώμα. Κατόπιν, αποφάσισε να μετρήσει τη θερμοκρασία πέρα από το κόκκινο χρώμα του φάσματος, όπου και παρατήρησε ότι σε αυτή την περιοχή ήταν η υψηλότερη. Ο Herschel ονόμασε την ακτινοβολία αυτή που σήμερα λέγεται υπέρυθρη «θερμικές ακτίνες». (62), (63) Ύστερα από επιπλέον

παρατήρηση του φαινομένου ανακάλυψε ότι η υπέρυθη ακτινοβολία συμπεριφέρεται παρόμοια με την ορατή: ανακλάται, διαθλάται, απορροφάται και διέρχεται. (58) Ο Thomas Johann Seebeck εισήγαγε έμμεσα τη συζήτηση σχετικά με τη φύση της θερμότητας και του φωτός, η οποία βασιζόταν σε πειράματα που διεξάγονταν με χαμηλής έντασης ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε κλειστά κυκλώματα από ανόμοιους μεταλλικούς αγωγούς. Ακολουθώντας αυτά τα ευρήματα ο Leopoldo Nobili κατασκεύασε το πρώτο θερμοστοιχείο που βασιζόταν στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο Sir John Herschel, γιος του εφευρέτη της υπέρυθρης ακτινοβολίας και αστρονόμος, κατάφερε να αναπτύξει την πρώτη θερμική εικόνα το 1840. Με βάση τη διαφορική εξάτμιση μίας λεπτής μεμβράνης λαδιού, όταν εκτίθεται σε ένα θερμικό μοτίβο, η θερμική εικόνα μπορούσε να γίνει ορατή μέσω του ανακλώμενου φωτός και της επίδρασης του φιλμ λαδιού. Ο Herschel απέκτησε και μία πρωτόγονη καταγραφή της θερμικής εικόνας σε χαρτί, την οποία ονόμασε θερμογράφημα. Το 1880 ο Samuel P. Langley ανακάλυψε το βολόμετρο, γεγονός που συνέβαλε στην εξέλιξη της ευαισθησίας των ανιχνευτών υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το βολόμετρο αποτελούταν από μία λεπτή μαυρισμένη ταινία πλατίνας, που ήταν συνδεδεμένη με ένα βραχίονα κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone και πάνω από την οποία ήταν εστιασμένη υπέρυθη ακτινοβολία. Το κύκλωμα συνδεόταν με ένα ευαίσθητο γαλβανόμετρο. Η συσκευή αυτή βασιζόταν στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών, λόγω απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. (62), (64)

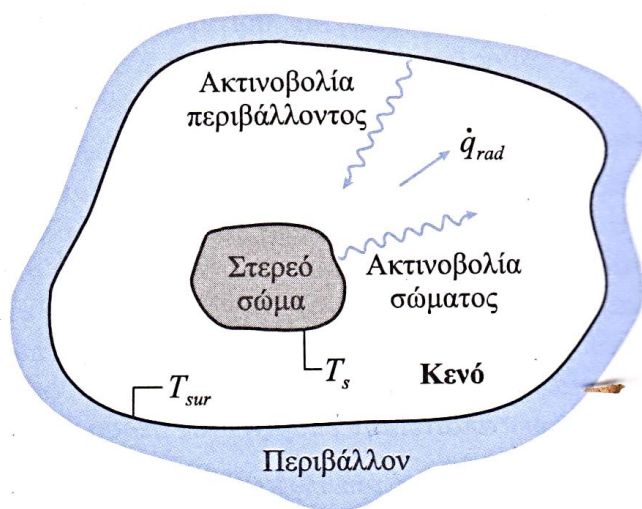
Η πρώτη θερμοκάμερα ανακαλύφθηκε το 1929 από τον Tihanyi και χρησιμοποιήθηκε από τον βρετανικό στρατό. Μεταξύ του Α' και Β' Παγκοσμίου Πολέμου πραγματοποιήθηκε μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη φωτοανιχνευτών και μετατροπέων εικόνας, καθώς επίσης η φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας αναδείχθηκε μία από τις κυριότερες μεθόδους χημικής ανάλυσης. Η ανάπτυξη του μετατροπέα εικόνας στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για το στρατό, επειδή επέτρεπε τη νυχτερινή όραση. Στο τέλος της δεκαετίας του 1960 εμπορευματοποιήθηκε η θερμοκάμερα και έγινε προσιτή σε ένα ευρύτερο κοινό πέρα του στρατού. (58), (62)

2.1.3 Βασικές αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας

Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας

Έστω στερεό σώμα με θερμοκρασία T_s , το οποίο βρίσκεται σε θάλαμο, τα τοιχώματα του οποίου (περιβάλλον) έχουν θερμοκρασία $T_{sur} < T_s$ (Εικόνα 2.1.3-1). Θεωρείται ότι ο χώρος ανάμεσα στο σώμα και στα τοιχώματα είναι το κενό και επομένως αποκλείεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται ψύξη του σώματος μέχρι αυτό να φτάσει σε θερμική ισορροπία

με το περιβάλλον. Το φαινόμενο οφείλεται σε μεταφορά θερμότητα με ακτινοβολία από την επιφάνεια του θερμού σώματος προς τα ψυχρότερα τοιχώματα του χώρου. Θερμότητα ακτινοβολεί κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν. Στο παράδειγμα που περιγράφεται ακτινοβολία εκπέμπουν και το στερεό σώμα και τα τοιχώματα. Ωστόσο το στερεό σώμα, επειδή βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό θερμικής ακτινοβολίας. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ένας ρυθμός μεταφοράς \dot{q}_{rad} από το στερεό στα τοιχώματα. Για να γίνει μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δε χρειάζεται να παρεμβαίνει κάποιο υλικό μέσο μεταξύ του πομπού και του δέκτη, όπως συμβαίνει με την αγωγή και τη συναγωγή. Επίσης, ενώ η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή πραγματοποιείται πάντα στη διεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας (από το θερμότερο στο ψυχρότερο μέσο), η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ δύο σωμάτων που διαχωρίζονται από ένα ψυχρότερο και από τα δύο σώματα μέσο. Για παράδειγμα η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης, αφού διέλθει από πολύ ψυχρά στρώματα ατμόσφαιρας. (65)



Εικόνα 2.1.3-1: Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (65)

Η ερμηνεία των φαινομένων της ακτινοβολίας στηρίζεται σε δύο βασικές θεωρίες:

- Τη θεωρία του Maxwell, σύμφωνα με την οποία η μεταφορά της ενέργειας γίνεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Τη θεωρία του Max Planck, η οποία υιοθετεί την ύπαρξη φωτονίων (ή κβάντα), με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η μεταφορά θερμότητας.

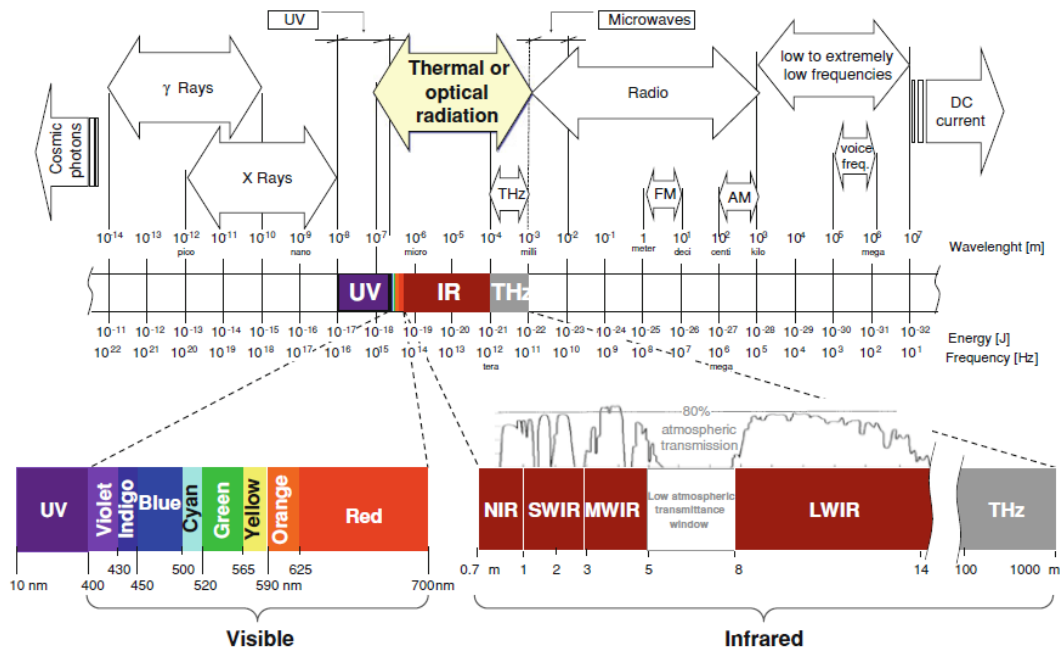
Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, τα κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός, ενώ σύμφωνα με τη θεωρία των κβάντα, η ενέργεια μεταφέρεται με φωτόνια που ταξιδεύουν με αυτή την ταχύτητα. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι συνάρτηση της συχνότητάς του:

$$e = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1.3.1)$$

Όπου $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, είναι η σταθερά του Planck, ν η συχνότητα (αριθμός ταλαντώσεων ανά δευτερόλεπτο, c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός και λ το μήκος κύματος. (65)

Εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας

Παρατηρώντας το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Εικόνα 2.1.3-2) διαπιστώνεται ότι το εύρος της θερμικής ακτινοβολίας είναι ένα μικρό τμήμα του φάσματος που εκτείνεται από τα 0,1 έως 100 μm , η οποία περιλαμβάνει τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας, την ορατή και την υπέρυθρη ακτινοβολία. Η θερμική ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα σώματα και οφείλεται στις δονήσεις και τις περιστροφικές κινήσεις των μορίων, των ατόμων και των ηλεκτρονίων του σώματος. Μέτρο της ενέργειας αυτής είναι η θερμοκρασία του σώματος. Επομένως, ο ρυθμός εκπομπής αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ένταση, η συχνότητα και το μήκος κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας ελέγχεται από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της πηγής και την ικανότητα εκπομπής του υλικού. Όταν ένα σώμα βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι υπέρυθρη. Το εύρος αυτής της ακτινοβολίας χωρίζεται στο εγγύς (0,75 – 1,5 μm), στο μέσο (1,5 – 7 μm) και το άπω υπέρυθρο (7 – 1000 μm). (65), (66), (67)



Εικόνα 2.1.3-2: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (68)

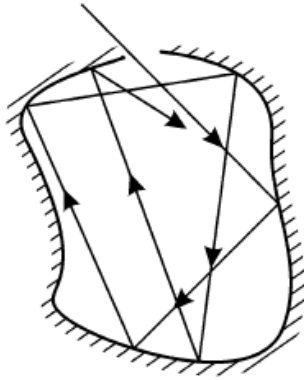
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αν η θερμοκρασία ενός στερεού, υγρού ή αερίου είναι πάνω από το απόλυτο μηδέν, τότε τα ηλεκτρόνια, τα άτομα και τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, ώστε συνεχώς να εκπέμπεται, να απορροφάται και να

τα διαπερνά συνεχώς ακτινοβολία. Συνεπώς, η μεταφορά ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται ογκομετρικό φαινόμενο. Δηλαδή, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα πεπερασμένο όγκο ύλης είναι το συνολικό αποτέλεσμα των τοπικών εκπομπών σε όλο τον όγκο. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις τα στερεά και τα υγρά είναι αδιαφανή και η μη ανακλώμενη ακτινοβολία απορροφάται σε βάθος λίγων μικρόμετρων από την επιφάνεια. Παράλληλα τα γειτονικά μόρια απορροφούν την ακτινοβολία που εκπέμπεται στον εσωτερικό των αδιαφανών υλικών. Έτσι η μεταφορά ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί επιφανειακό φαινόμενο. (66)

Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Το μέλαν σώμα είναι ένα ιδανικό αντικείμενο, το οποίο είναι ικανό να απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ανεξάρτητα από το μήκος κύματός της και τη γωνία πρόσπτωσης. Ομοίως, εκπέμπει όλη αυτή την ακτινοβολία ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. (68) Η ονομασία «μέλαν σώμα» που συνδέεται με ένα σώμα που εκπέμπει ακτινοβολία αποδίδεται από το νόμο του Kirchhoff, σύμφωνα με τον οποίο ένα σώμα ικανό να απορροφά όλη την ακτινοβολία, κάθε μήκους κύματος που προσπίπτει σε αυτό, είναι επίσης ικανό και να την εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο νόμος του Kirchhoff οδηγεί σε μία πολύ σημαντική έννοια, αυτή του ιδανικού απορροφητή ή «μέλανος σώματος», που είναι επίσης και ο πιο αποτελεσματικός πομπός θερμικής ακτινοβολίας. (67)

Αν κανείς λάβει υπόψιν το ορατό τμήμα του φάσματος, ως μέλαν σώμα (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) μπορεί να χαρακτηριστεί μία θαμπή μαύρη επιφάνεια, καθώς απορροφά σχεδόν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία του φωτός, χωρίς ανάκλαση. Ωστόσο επειδή η ζώνη της ορατής ακτινοβολίας αποτελεί μία μικρή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, γενικά μία επιφάνεια μαύρου χρώματος συμπεριφέρεται σπάνια σαν ιδανικό μέλαν σώμα. Αντίθετα το μέλαν σώμα μπορεί να περιγραφεί σαν μία ισόθερμη κοιλότητα με μία μικρή οπή (Εικόνα 2.1.3-3). Καθώς η θερμική ακτινοβολία εισέρχεται στην κοιλότητα από το άνοιγμα υφίσταται συνεχείς ανακλάσεις και ύστερα εξέρχεται ξανά από το άνοιγμα. Κατά τη διάρκεια κάθε ανάκλασης απορροφάται από την επιφάνεια ένα τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, για το λόγο αυτό η θερμική ακτινοβολία εξερχόμενη του μέλανος σώματος έχει ελαττωθεί σε υψηλό ποσοστό. Επιπλέον, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την εσωτερική επιφάνεια της κοιλότητας υφίσταται επίσης συνεχείς ανακλάσεις, πριν την έξοδο από την οπή. Κατά συνέπεια παράγεται μέγιστη εκπομπή προς όλες τις κατευθύνσεις. (66)



Εικόνα 2.1.3-3: Περιγραφή μέλανος σώματος σαν μία ισόθερμη κοιλότητα με μικρό άνοιγμα (66)

Η φασματική ισχύς του μέλανος σώματος (ενέργεια που εκπέμπει ένα σώμα ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μήκους κύματος) συμβολίζεται ως $E_{b\lambda}$ ($W/m^2\mu m$) και δίνεται από το νόμο του Planck για την ακτινοβολία: (65), (66), (68)

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.1.3.2)$$

Όπου T (K) είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας, λ το μήκος κύματος, και οι C_1 και C_2 είναι η πρώτη και η δεύτερη σταθερά ακτινοβολίας:

$$C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3,742 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = hc_0/k = 1,439 \cdot 10^4 \text{ K}/\mu\text{m}$$

Όπου η σταθερά του Planck είναι $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, με k συμβολίζεται η σταθερά του Boltzmann $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ και c_0 είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Η τιμές των σταθερών C_1 και C_2 ισχύουν στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης είναι το κενό. Όταν η ακτινοβολία διαδίδεται σε άλλα μέσα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για c_0 η τιμή $c = c_0/n$, όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου. (66)

Στην Εικόνα 2.1.3-4 παρουσιάζεται η ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για διαφορετικές θερμοκρασίες (κατανομή Planck). Κάποιες παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι οι ακόλουθες: (65), (66), (68)

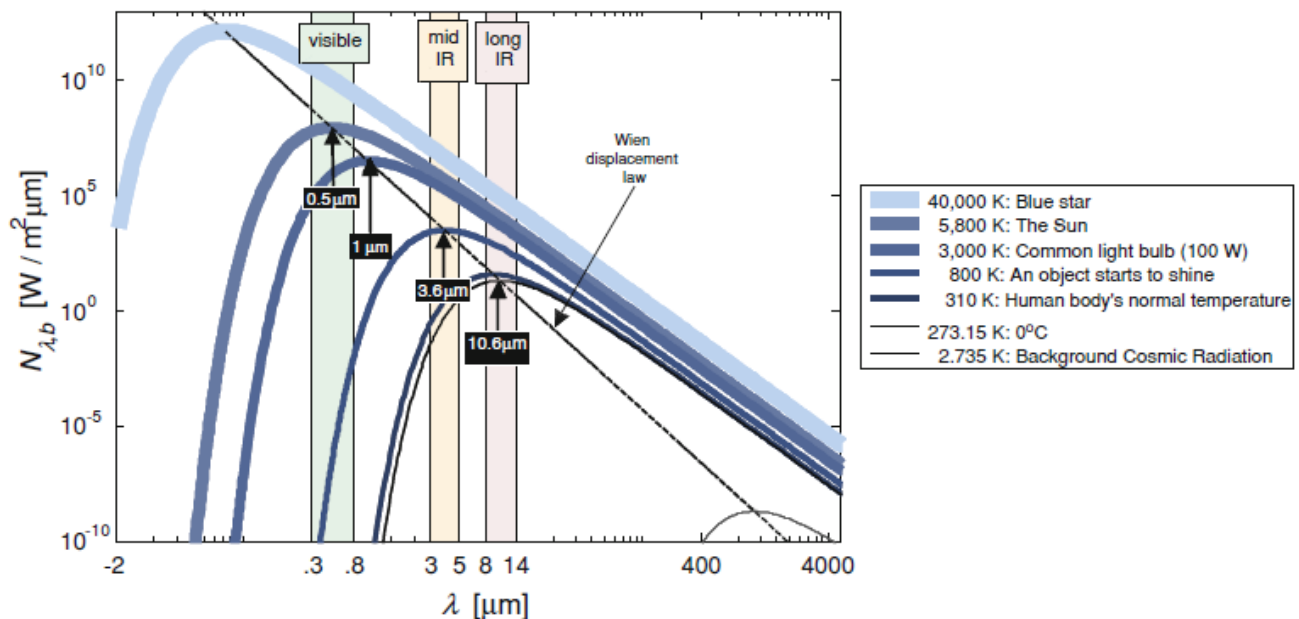
- Για συγκεκριμένο μήκος κύματος η εκπεμπόμενη ισχύς αυξάνεται με τη θερμοκρασία και οι καμπύλες δεν τέμνονται μεταξύ τους.
- Η ισχύς είναι συνεχής συνάρτηση του μήκους κύματος και κάθε ισόθερμη καμπύλη τείνει προς το μηδέν για πολύ μεγάλες και πολύ μικρές τιμές του μήκους κύματος.
- Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αυξάνεται με το μήκος κύματος, φτάνει σε μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται.

- Με την αύξηση στη θερμοκρασία του μέλανος σώματος μετατοπίζονται οι καμπύλες (και τα μέγιστα) σε περιοχές μικρότερου μήκους κύματος.
- Μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο βρίσκεται στην ορατή περιοχή. Αντίθετα οι επιφάνειες σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 800 K εκπέμπουν σχεδόν αποκλειστικά στην υπέρυθρη περιοχή.

Το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της ισχύος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, λ_{\max} (μm) είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Παραγωγίζοντας την εξίσωση

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.1.3.3)$$

Και θέτοντας το αποτέλεσμα ίσο με το μηδέν, προκύπτει $\lambda_{\max} = 2897,7/T$. Η εξίσωση αυτή ονομάζεται νόμος μετατόπισης του Wien και συμβάλει στο να προσδιοριστεί το μήκος κύματος στο οποίο το μέλαν σώμα εκπέμπει ακτινοβολία μέγιστης ισχύος σε ορισμένη θερμοκρασία. Ο γεωμετρικός τόπος της σχέσης είναι η ευθεία που παρουσιάζεται στην που ακολουθεί. (66), (68)



Εικόνα 2.1.3-4: Φασματική κατανομή ισχύος μέλανος σώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες σύμφωνα με το νόμο του Planck (68)

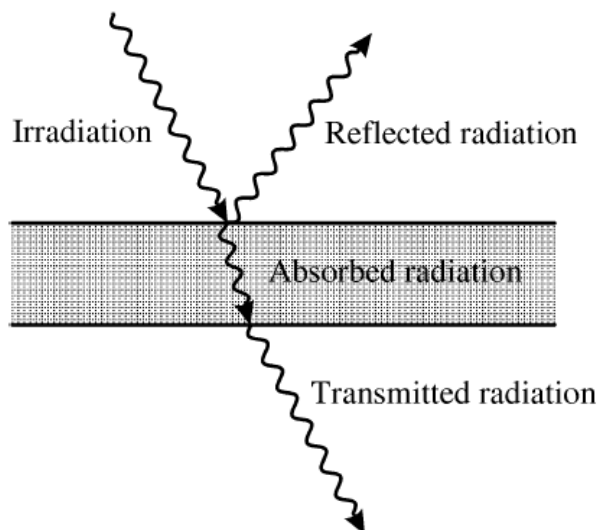
Ολοκληρώνοντας την εξίσωση του Planck από $\lambda=0$ έως $\lambda=\infty$ προκύπτει η ολική ακτινοβολία εκπομπής ενός μέλανος σώματος E_b . Η σχέση αποτελεί το νόμο του Stefan – Boltzmann.

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.1.3.4)$$

Όπου $\sigma = \pi^4 C_1 / 15 C_2^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ και είναι γνωστή ως σταθερά Stefan – Boltzmann. (66)

Ακτινοβολία φαιού σώματος – Συντελεστής εκπομπής

Τα πραγματικά αντικείμενα δεν συμπεριφέρονται σύμφωνα με τους νόμους του μέλανος σώματος σε μία ευρεία περιοχή από μήκη κύματος, αν και μπορεί να προσομοιάζουν το μέλαν σώμα σε συγκεκριμένα διαστήματα φάσματος. (67) Ένα τμήμα της προσπίπτουσας σε ένα σώμα ακτινοβολίας μπορεί να ανακλαστεί (ρ), ένα μέρος της να απορροφηθεί (α) και ένα άλλο να διέλθει (τ) μέσα από το σώμα. (58) Η κατεύθυνση της ανακλώμενης ακτινοβολίας εξαρτάται τόσο από την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο και από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ανάκλασης. Υπάρχουν δύο τύποι ανάκλασης η κατοπτρική, όπου η γωνία ανάκλασης είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης και η διάχυτη, όπου η ακτινοβολία ανακλάται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται όχι μόνο από την δομή της ύλης, αλλά και από την ενέργεια της ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των φωτονίων και τόσο βαθύτερα εισχωρεί η ακτινοβολία πριν απορροφηθεί. Επομένως, το ίδιο υλικό συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με το πάχος του και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (65)



Εικόνα 2.1.3-5: Ανακλώμενη, απορροφούμενη και διερχόμενη ακτινοβολία (66)

Αν G είναι η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (ακτινοβολήση) τότε με G_a , G_r και G_t συμβολίζονται αντίστοιχα η απορροφούμενη, η ανακλώμενη και η διερχόμενη ακτινοβολία. Λόγω ικανοποίησης του ισοζυγίου ενέργειας ισχύει: (65)

$$G = G_a + G_r + G_t \quad (2.1.3.5)$$

Με βάση τις ποσότητες αυτές ορίζονται τρεις ιδιότητες της ακτινοβολίας:

Συντελεστής απορρόφησης:

$$\alpha = \frac{G_a}{G} = \frac{\text{απορροφούμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad (2.1.3.6)$$

Συντελεστής ανάκλασης:

$$\rho = \frac{G_r}{G} = \frac{\text{ανακλώμανη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad (2.1.3.7)$$

Συντελεστής διαπερατότητας:

$$\tau = \frac{G_t}{G} = \frac{\text{διερχόμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad (2.1.3.8)$$

Από το ισοζύγιο ενέργειας ισχύει ότι:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.1.3.9)$$

Για αδιαφανή σώματα $\tau=0$, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.1.3.10)$$

Επειδή ο συντελεστής απορρόφησης ορίζεται με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία, εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει. Έτσι μπορεί μία επιφάνεια που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία να έχει διαφορετική τιμή του συντελεστή απορρόφησης από όταν δέχεται ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος που προέρχεται από σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. (65)

Στην Εικόνα 2.1.3-4 παρουσιάζεται η φασματική ισχύς ακτινοβολίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες για ένα μέλαν σώμα. στην περίπτωση πραγματικών σωμάτων μόνο ένα ποσό της ενέργειας εκπέμπεται μέσω ακτινοβολίας από τις επιφάνειες των σωμάτων. Αυτό το ποσό δίνεται από μία ιδιότητα της επιφάνειας που λέγεται συντελεστής εκπομπής ε . Ο Kirchoff ορίζει το συντελεστή εκπομπής σαν το λόγο της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία πραγματική επιφάνεια σε συγκεκριμένη θερμοκρασία προς τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στις ίδιες συνθήκες (θερμοκρασία, μήκος κύματος και γωνία εκπομπής). : Φασματική κατανομή ισχύος μέλανος σώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες σύμφωνα με το νόμο του Planck

$$\varepsilon = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (2.1.3.11)$$

Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής εξαρτώνται από παραμέτρους όπως η θερμοκρασία T (K), η γωνία εκπομπής θ (rad), το μήκος κύματος λ (μm) και οι συνθήκες της επιφάνειας (τραχύτητα, επίπεδα οξειδίων, κλπ.). Κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1. Μία επιφάνεια με συντελεστή εκπομπής $\varepsilon=1$ θεωρείται μέλαν σώμα, ενώ μία επιφάνεια με $\varepsilon=0$ ονομάζεται λευκό σώμα. Οποιοδήποτε αντικείμενο με

ενδιάμεσο συντελεστή εκπομπής ($0 < \varepsilon < 1$) μπορεί να ονομαστεί φαιό σώμα, αν ο συντελεστής εκπομπής του έχει σταθερή τιμή και δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος. (68)

Για διάχυτη εκπομπή (ή διάχυτη ακτινοβολή) ο νόμος του Kirchhoff ορίζει ότι ο συντελεστής εκπομπής είναι ίσος με το συντελεστή απορρόφησης. Κατά συνέπεια για ένα αδιαφανές σώμα ($\tau=0$) ισχύει ότι: (66)

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (2.1.3.12)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή του συντελεστή εκπομπής για ένα φαιό σώμα, η εξίσωση Stefan – Boltzmann παίρνει τη μορφή:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.1.3.13)$$

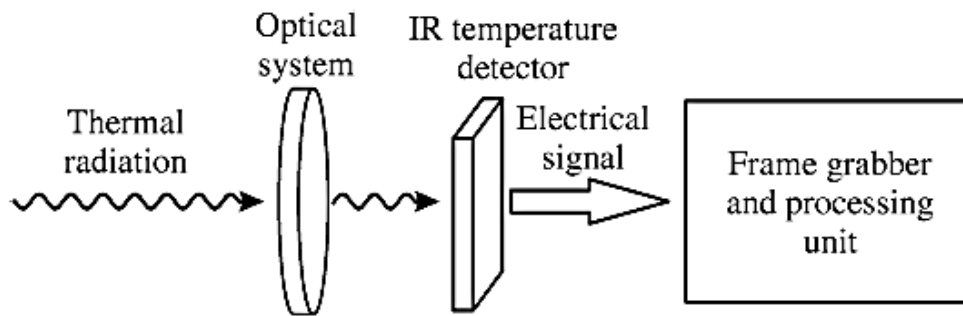
Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι η συνολική ικανότητα εκπομπής ενός φαιού σώματος είναι ίδια με αυτή ενός μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία – μειωμένη ανάλογα με την τιμή του ε για το φαιό σώμα. (67)

Στην περίπτωση των στερεών ο συντελεστής εκπομπής δε μεταβάλλεται σημαντικά, όμως στα υγρά και στα αέρια οι διακυμάνσεις γίνονται περισσότερο αισθητές. Ο συντελεστής εκπομπής των μετάλλων μειώνεται με το μήκος κύματος, ενώ των αμέταλλων τείνει να αυξάνεται. Η γωνιακή εξάρτηση του συντελεστή εκπομπής συνεπάγεται διαφορετικές φαινόμενες τιμές για μη επίπεδες επιφάνειες. Στα αμέταλλα ο συντελεστής εκπομπής είναι υψηλός και παραμένει σχεδόν αμετάβλητος για γωνίες μεταξύ 0° και 60° . Μετά τις 70° η τιμή του συντελεστή μειώνεται. Στα μέταλλα ο συντελεστής εκπομπής έχει χαμηλότερες τιμές και πρακτικά παραμένει σταθερός μεταξύ των 0° και των 40° , ενώ αυξάνεται για μεγαλύτερες γωνίες.

Τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές χαρακτηρίζονται από ανεξάρτητο από την κατεύθυνση συντελεστή εκπομπής (διάχυτες επιφάνειες) και το μήκος κύματος (όμοια συμπεριφορά με ένα φαιό σώμα). Για το λόγο αυτό ο συντελεστής εκπομπής των υλικών αυτών μπορεί να θεωρηθεί σταθερός για συγκεκριμένη θερμοκρασία. (62)

2.1.4 Θερμοκάμερα υπέρυθρου

Στην Εικόνα 2.1.4-1 παρουσιάζονται σχηματικά τα στοιχεία μίας θερμοκάμερας. Η θερμική ακτινοβολία εισέρχεται στο σαρωτή, συλλέγεται από το οπτικό σύστημα και αποστέλλεται στον ανιχνευτή θερμότητας, ο οποίος είναι ευαίσθητος σε στο επιλεγμένο φάσμα του υπέρυθρου. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τον ανιχνευτή συσσωρεύεται σε μία μονάδα επεξεργασίας από μία ειδική ηλεκτρονική πλακέτα, ώστε να ληφθεί ο θερμοκρασιακός χάρτης της σαρωμένης επιφάνειας. (66)



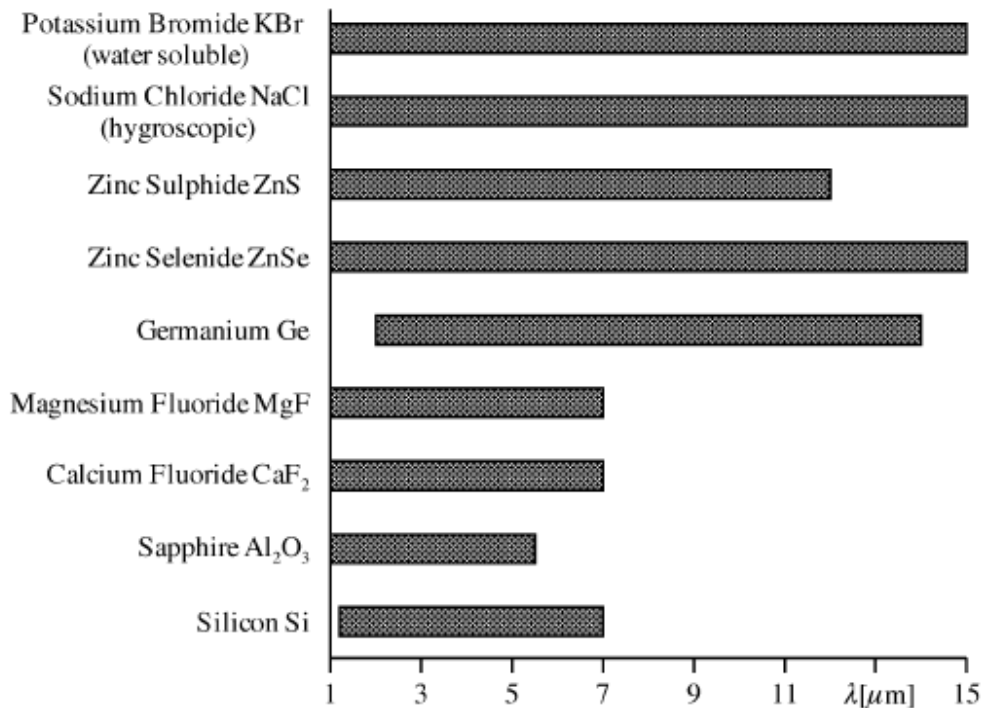
Εικόνα 2.1.4-1: Σαρωτής υπέρυθρου (66)

Οπτικό σύστημα

Το οπτικό σύστημα της θερμοκάμερας είναι παρόμοιο με αυτό μίας απλής θερμοκάμερας στο ορατό φάσμα. Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός τα υλικά που συνιστούν τα οπτικά στοιχεία πρέπει να είναι διάφανα στη υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα περισσότερα οπτικά γυαλιά που είναι διαφανή στο ορατό είναι συνήθως αδιαφανή στο υπέρυθρο φάσμα. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικά υλικά για τη κατασκευή των φακών. Τυπικά υλικά που εφαρμόζονται σε τέτοιου είδους περιπτώσεις είναι:

- Στο μέσο υπέρυθρο: πυρίτιο, σάπφειρος, φθοριούχο ασβέστιο, φθοριούχο μαγνήσιο
- για το μέσο και άπω υπέρυθρο: γερμάνιο, σεληνιούχος ψευδάργυρος, θειούχος ψευδάργυρος, χλωριούχο νάτριο, βρωμιούχο κάλιο.

Με εξαίρεση το πυρίτιο και το γερμάνιο, όλα τα παραπάνω υλικά είναι διαφανή και στο ορατό φάσμα. Οι φακοί θερμοκάμερας κατασκευάζονται κυρίως από πυρίτιο για το μέσο υπέρυθρο και από γερμάνιο για το άπω υπέρυθρο. (66)



Εικόνα 2.1.4-2: Μήκη κύματος διαφάνειας ορισμένων υλικών (66)

Ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας μετατρέπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία βρίσκεται εντός του μετρούμενου φάσματος, σε ηλεκτρικό σήμα. Συνήθως διακρίνονται σε δυο ευρείες κατηγορίες ανάλογα με τις φυσικές αρχές λειτουργίας τους:

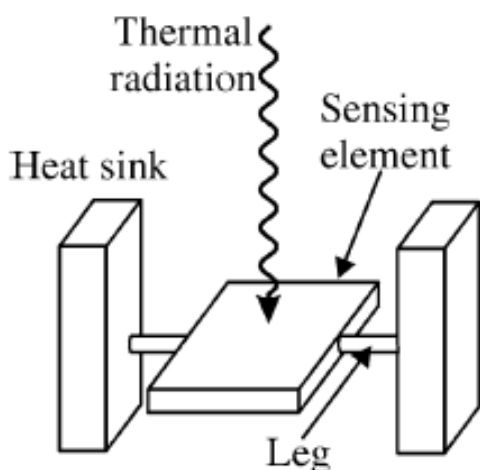
- στους θερμικούς ανιχνευτές: Η προσπίπτουσα ακτινοβολία αλλάζει μία ηλεκτρική ιδιότητα του ανιχνευτή εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του.
- και τους ανιχνευτές φωτονίων: Τα φωτόνια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλληλεπιδρούν άμεσα με τα ηλεκτρόνια των υλικών του ανιχνευτή.

Ενώ για του θερμικούς ανιχνευτές η ηλεκτρική απόκριση είναι ανάλογη της απορροφούμενης ενέργειας, για τους ανιχνευτές φωτονίων είναι ανάλογη με τον αριθμό των απορροφούμενων φωτονίων τα οποία αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια. (66)

Θερμικοί ανιχνευτές

Μια πολύ απλή απεικόνιση ενός θερμικού ανιχνευτή παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα). Το αισθητήριο στοιχείο αποτελείται από μία λεπτή ορθογώνια πλάκα με γνωστή θερμοχωρητικότητα $c(J/K)$, η οποία είναι συνδεδεμένη μέσω δύο σκελών

θερμικής αγωγιμότητας $g(W/K)$ με δύο απαγωγείς θερμότητας. τα δύο σκέλη χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν το ηλεκτρικό σήμα και να μειώνουν τη θερμοκρασία του αισθητήριου στοιχείου μέσω θερμικής αγωγής. Όπως γίνεται κατανοητό, μεταβάλλεται η θερμοκρασία του αισθητήριου στοιχείου εξαιτίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι η πλάκα αποκτά μία θερμοκρασία, η οποία εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ της μεταφοράς θερμότητας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και από την μεταφορά θερμότητας στις ψύκτρες μέσω αγωγής. Επίσης η πλάκα εκπέμπει θερμότητα προς το περιβάλλον. Προκειμένου να αυξηθεί ο συντελεστής απορρόφησης, η επιφάνεια της πλάκας συχνά καλύπτεται με ένα υλικό υψηλής απορροφητικότητας. Συνεπώς, η φασματική απόκριση είναι συνάρτηση της διαφάνειας του οπτικού συστήματος και της φασματικής απόκρισης της επικάλυψης. Οι θερμικοί ανιχνευτές συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, ωστόσο επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις ψύχοντας τον ανιχνευτή με απαγωγείς θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της πλάκας πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να εξασφαλιστεί η υψηλή ευαισθησία του ανιχνευτή. Παράλληλα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των σκελών πρέπει να πλησιάζει το μηδέν, ώστε οι θερμικές απώλειες μέσω αγωγής να είναι αμελητέες. Αυτό επιτρέπει να διατηρείται η μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας και κατά συνέπεια το μέγιστο σήμα. Ο προσδιορισμός της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήριου στοιχείου και των απαγωγέων θερμότητας πραγματοποιείται με τη χρήση δύο διαφορετικών τεχνικών: του θερμοζεύγους και του βολόμετρου.



Εικόνα 2.1.4-3: Θερμικός ανιχνευτής (66)

Το θερμοζεύγος χρησιμοποιήθηκε στην αρχή στον ανιχνευτή θερμότητας το Meloni (1833) και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Σήμερα οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι ανιχνευτές είναι τα βολόμετρα. Το βολόμετρο εισήχθη το 1880 από το Langley και σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασιακή μεταβολή συνεπάγεται τη διακύμανση της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήριου

στοιχείου. Το μειονέκτημα της χαμηλής ευαισθησίας και της σχετικά αργής απόκρισης αντιμετωπίστηκε με την ανάπτυξη συστοιχιών ανιχνευτών που βασίζονται σε μικρά βολόμετρα (μικροβολόμετρα). (66)

Ανιχνευτές φωτονίων

Οι ανιχνευτές φωτονίων μετασχηματίζουν την ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα. Η μετατροπή είναι δυνατή, επειδή τα φωτόνια τα οποία προσπίπτουν στο αισθητήριο στοιχείο, αν έχουν επαρκή ενέργεια, διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και μεταβάλλουν την ενεργειακή τους κατάσταση. Αυτή η διεργασία πραγματοποιείται μόνο, όταν η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό φάσμα E_g που απαιτείται για τη μεταπήδηση σε διαφορετική ενεργειακή στάθμη. Η ενέργεια ενός φωτονίου μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος. Συνεπώς για δεδομένο E_g υπάρχει ένα μέγιστο μήκος κύματος λ_0 πάνω από το οποίο δε λαμβάνει χώρα καμία μετάβαση.

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c_0}{E_g} \quad (2.1.4.1)$$

Το ενεργειακό χάσμα εξαρτάται από το υλικό του ανιχνευτή και γενικά μειώνεται με την ελάττωση της θερμοκρασίας. Όταν ο ανιχνευτής έχει ψυχθεί, τα ηλεκτρόνια του βρίσκονται στη ζώνη σθένους (χαμηλή ενεργειακή κατάσταση) και πρακτικά δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους, ώστε να μπορούν τα υλικά να φέρουν κάποιο φορτίο. Όταν υψηλής ενέργειας φωτόνια πέφτουν πάνω στον ανιχνευτή, διεγείρονται τα ηλεκτρόνια και μετακινούνται στη ζώνη αγωγιμότητας, ώστε το υλικό να μεταφέρει φωτορεύμα, ανάλογο στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Οι ανιχνευτές φωτονίων διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους φωτοαγωγίμους και τα φωτοβολταϊκά. Στην περίπτωση των φωτοαγωγίμων ανιχνευτών η προσπίπτουσα ακτινοβολία προκαλεί αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήριου στοιχείου, ενώ στα φωτοβολταϊκά δημιουργούν μία διαφορά δυναμικού. (66)

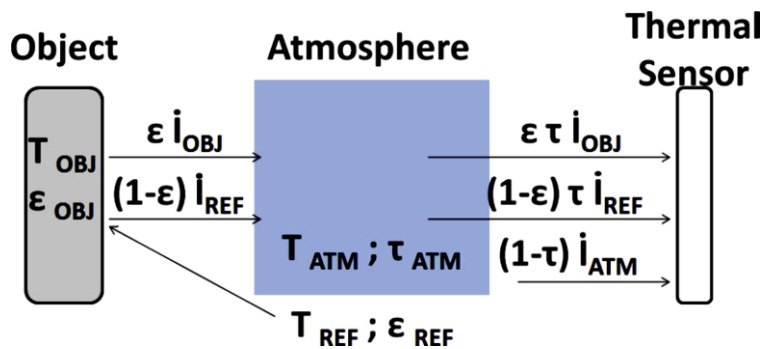
2.1.5 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της θερμοκάμερας και της επιφάνειας ελέγχου

Η υπέρυθρη θερμογραφία μετρά τη θερμική ενέργεια, η οποία εκπέμπεται από την επιφάνεια ελέγχου με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας σύμφωνα με το νόμο του Planck. Η μετρούμενη ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί σε θερμοκρασία με βάση την εξίσωση Stefan – Boltzmann. Προκειμένου η μετατροπή αυτή να γίνει με ακρίβεια, απαιτείται να κατανοηθούν οι διάφοροι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα μεταξύ της επιφάνειας και του ανιχνευτή της θερμοκάμερας. Η ενέργεια η οποία φτάνει στον ανιχνευτή δεν αποτελείται μόνο από την ενέργεια που εκπέμπεται από το αντικείμενο, αλλά και από την ενέργεια που

ανακλάται από το περιβάλλον. Η ακτινοβολία μάλιστα που ανιχνεύει η θερμοκάμερα είναι εξασθενημένη λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας. (Εικόνα 2.1.5-1) Έτσι η θερμική ενέργεια που φτάνει στον ανιχνευτή αποτελείται από τρεις όρους:

$$I_{MEAS} = I_{EM} + I_{REF} + I_{ATM} \quad (2.1.5.1)$$

όπου I_{MEAS} είναι η μετρούμενη ενέργεια, I_{EM} είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από το σώμα, I_{REF} η ενέργεια που ανακλάται από το περιβάλλον και I_{ATM} η ενέργεια που εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα. Για τον υπολογισμό της ενέργεια που εκπέμπεται από το αντικείμενο χρειάζεται να προσδιοριστεί ο συντελεστής εκπομπής του (ϵ). Για τον ορισμό της ανακλώμενης ενέργειας θεωρείται ότι η θερμοκρασία των σωμάτων του περιβάλλοντος είναι ίδια, ενώ σύμφωνα με το νόμο του Kirchhoff ο συντελεστής εκπομπής της γύρω περιοχής είναι ίσος με τη μονάδα. Τέλος, η εκπομπή της ατμόσφαιρας ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή διαπερατότητάς της (τ).



Εικόνα 2.1.5-1: Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ της θερμοκάμερας και της επιφάνειας ελέγχου (58)

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αδιαφανές σώμα με θερμοκρασία T_{OBJ} είναι ένα κλάσμα ϵ της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία I_{OBJ} . Έστω ότι ο συντελεστής της ατμόσφαιρας είναι τ , τότε η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σώμα και συλλέγεται από τη θερμοκάμερα είναι $\epsilon \tau I_{OBJ}$. Το περιβάλλον θεωρείται ότι έχει σταθερή θερμοκρασία T_{REF} και ότι συμπεριφέρεται σαν μέλαν σώμα. Έτσι το αντικείμενο ανακλά ένα τμήμα της ακτινοβολία που δέχεται από το περιβάλλον που είναι ίσο με $(1-\epsilon)I_{REF}$. Παράλληλα ένα μέρος της επιφάνειας αυτής απορροφάται από την ατμόσφαιρα, ώστε στον ανιχνευτή να φτάνει η ενέργεια $(1-\epsilon)\tau I_{REF}$. Ομοίως η ατμόσφαιρα έχει σταθερή θερμοκρασία T_{ATM} και συντελεστή εκπομπής $1-\tau$. Συνεπώς η ενέργεια που καταλήγει στη θερμοκάμερα είναι $(1-\tau)I_{ATM}$. Άρα η συνολική ροή ενέργειας που καταγράφει ο ανιχνευτής είναι:

$$I_{TOT} = \epsilon \cdot \tau \cdot I_{OBJ} + (1 - \epsilon) \cdot \tau I_{REF} + (1 - \tau)I_{ATM} \quad (2.1.5.2)$$

και η ενέργεια του αντικειμένου είναι ίση με:

$$I_{OBJ} = \frac{1}{\epsilon \cdot \tau} I_{TOT} - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} I_{REF} - \frac{1 - \tau}{\epsilon \cdot \tau} I_{ATM} \quad (2.1.5.3)$$

Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση οι απαιτούμενες παράμετροι για τον ακριβή ορισμό της θερμοκρασία της επιφάνειας ελέγχου είναι ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας, ο συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας και η θερμοκρασία ανάκλασης. Ο συντελεστής διαπερατότητας μπορεί να προσδιοριστεί από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και την απόσταση μεταξύ της επιφάνειας μελέτης και της θερμοκάμερας. (69)

Η θερμοκρασία ανάκλασης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη θερμοκάμερα, ώστε να μετρηθεί η μέση θερμοκρασία των επιφανειών που περιβάλλουν το αντικείμενο μελέτης, η οποία έχει διορθωθεί από τον παράγοντα θέασης των επιφανειών αυτών σε σχέση με το αντικείμενο. (70) Εναλλακτικά η θερμοκρασία ανάκλασης μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση ενός τσαλακωμένου φύλλου αλουμινίου, το οποίο τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια ελέγχου. Η θερμοκρασία ανάκλασης είναι η μέση θερμοκρασία του φύλλου που μετριέται από τη θερμοκάμερα με συντελεστή εκπομπής $\epsilon=1$. (69)

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι. Κατά την πρώτη μέθοδο μετριέται η θερμοκρασία της επιφάνειας ελέγχου με ένα θερμοζεύγος και στη συνέχεια προσαρμόζεται έτσι ο συντελεστής εκπομπής, ώστε η θερμοκρασία που καταγράφει το θερμοζεύγος να συμφωνεί με τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η δεύτερη μέθοδος είναι με τη χρήση μία μαύρης ταινίας, η οποία τοποθετείται στην επιφάνεια ελέγχου μέχρι να επέλθει θερμική ισορροπία. Η μαύρη ταινία έχει γνωστό συντελεστή εκπομπής $\epsilon=0,95$. Ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας ελέγχου προσαρμόζεται, έτσι ώστε η επιφάνεια ελέγχου και η μαύρη ταινία να έχουν ίση θερμοκρασία σύμφωνα με τα αποτελέσματα της θερμοκάμερας. (62), (69)

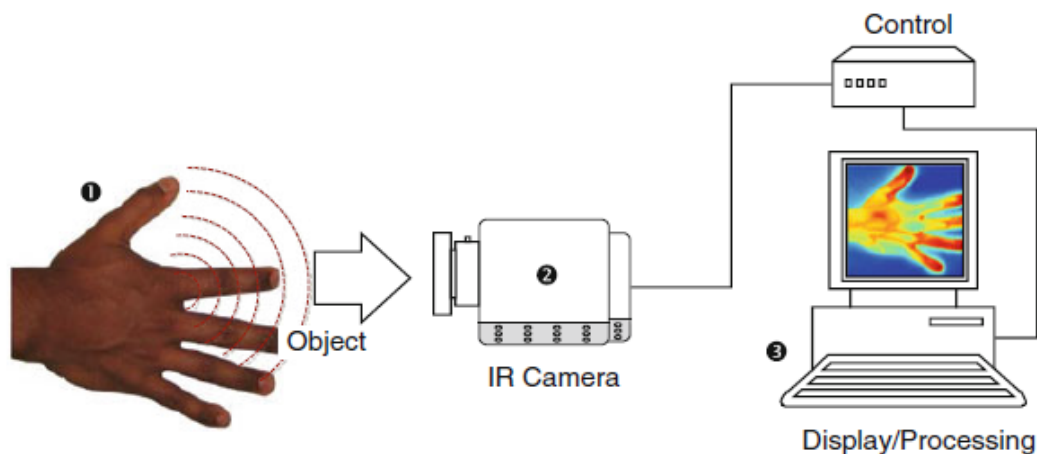
2.1.6 Προσεγγίσεις στη χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία διακρίνεται στην παθητική, κατά την οποία τα υλικά έχουν φυσικά διαφορετική θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος και την ενεργητική, όπου απαιτείται ένα εξωτερικό ερέθισμα για να προκληθεί θερμική διαφορά. (68)

Παθητική θερμογραφία

Όπως παρατηρείται στην ακόλουθη εικόνα, ένα αντικείμενο ή μία δομή που έχει διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον μπορεί να απεικονιστεί με τη χρήση μία θερμοκάμερας. Η παθητική προσέγγιση είναι συνήθως ποιοτική. Τυπικές εφαρμογές είναι η παρακολούθηση ηλεκτρονικών στοιχείων και ο εντοπισμός υγρασίας ή προβλημάτων μόνωσης στις κατασκευές. Παρόλα αυτά έχει και ποσοτικό χαρακτήρα σε περιπτώσεις ελέγχου κατασκευών με τη χρήση ηλιακών φορτίων,

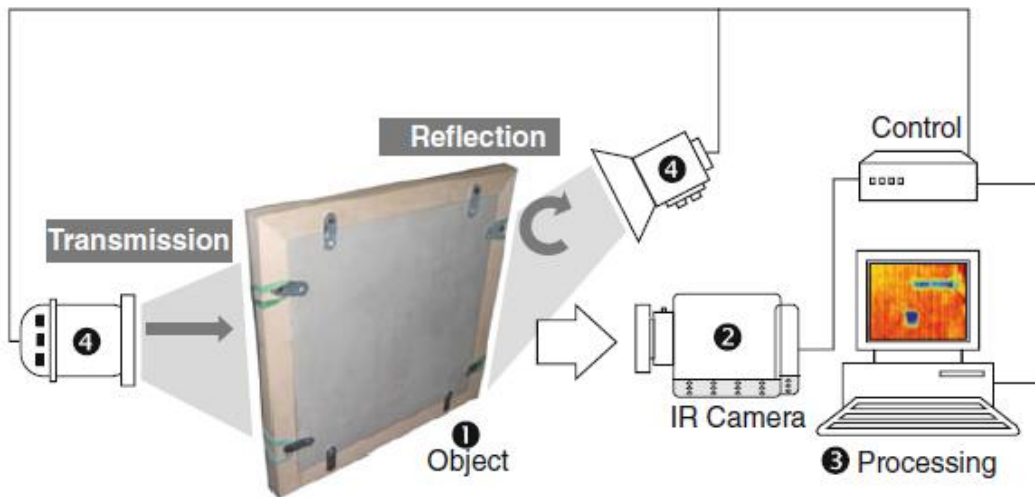
εντοπισμού εισροής νερού σε αεροσκάφη κατά την προσγείωση και αυτόματου ελέγχου ανθρώπων για την αναγνώριση παραπλανητικής συμπεριφοράς. (68)



Εικόνα 2.1.6-1: Παθητική θερμογραφία (68)

Ενεργητική θερμογραφία

Η ενεργητική θερμογραφία παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε είδος ενέργειας, που να προκαλεί μία θερμική διαφορά μεταξύ των ελαττωματικών και μη ελαττωματικών περιοχών ενός αντικειμένου. Επιπλέον μπορεί να πραγματοποιηθεί και ποσοτικός χαρακτηρισμός, επειδή ο χρόνος του απαιτούμενου εξωτερικού ερεθίσματος μπορεί να ελεγχθεί. Η πειραματική διάταξη της ενεργητικής θερμογραφίας είναι όμοια με τις παθητικής με τη διαφορά ότι απαιτείται μία πηγή ενέργειας για να προκαλέσει θερμική διαφορά στο σώμα. Η πηγή ενέργειας μπορεί να τοποθετηθεί στην ίδια πλευρά με αυτή που βρίσκεται η θερμοκάμερα (ανάκλαση) ή στην αντίθετη (διαβίβαση). Στην περίπτωση της ενεργούς θερμογραφίας είναι απαραίτητη η διόρθωση του σήματος για να βελτιώσει την αντίθεση και για την ποσοτικοποίηση. Γενικά η ανάκλαση είναι καταλληλότερη για τον εντοπισμό ατελειών που βρίσκονται κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια, ενώ η διαβίβαση επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών κοντά στην πίσω επιφάνεια, λόγω του φαινομένου εξάπλωσης του θερμικού μετώπου. Προφανώς, η μέθοδος της διαβίβασης δεν είναι πάντα εύκολο να εφαρμοστεί. (68)



Εικόνα 2.1.6-2: Ενεργητική θερμογραφία (68)

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά κάθε είδος ενεργειακής πηγής, για να προκαλέσει θερμική αντίθεση μεταξύ του υγιούς υλικού και της επιφανειακής ή της υποεπιφανειακής ατέλειας. Η ενέργεια μπορεί να προέρχεται από ένας από τους ακόλουθους μηχανισμούς: (68)

- αγωγή: θερμό/ψυχρό νερό, χιόνι, πάγος
- συναγωγή: θερμός/ψυχρός αέρας ή νερό
- ακτινοβολίας: λάμπες αλογόνου, φωτογραφικά φλας ξένον, υπέρυθρες θερμάστρες
- ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία: επαγωγική θέρμανση – θέρμανση με μικροκύματα
- μηχανική διέγερση: ηχητική ή υπερηχητική δόνηση
- χημικές μέθοδοι κλπ.

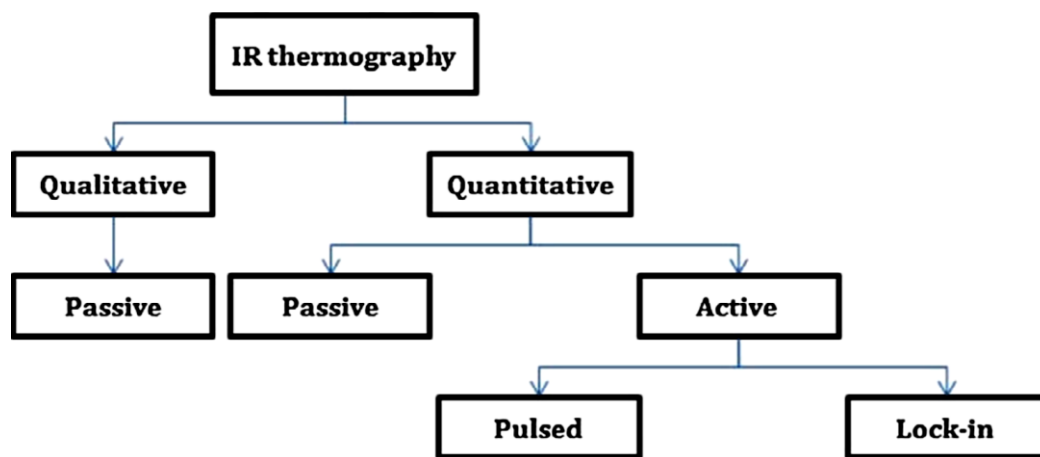
Ωστόσο είναι πολύ σημαντικό η ενεργειακή πηγή που θα επιλεγεί να επιτρέπει την αυτοματοποίηση και την επαναληψιμότητα. Για το λόγο αυτό τις περισσότερες φορές επιλέγονται θερμικές πηγές, η οποίες διακρίνονται σε: (68)

- οπτικές: φωτογραφικά φλας, λάμπες αλογόνου, λάμπες υπέρυθρου, φως
- μηχανικές: χρησιμοποιούνται μετατροπείς για να εισχωρήσουν ηχητικά ή υπερηχητικά κύματα στο δείγμα και να παραχθεί θερμότητα λόγω τριβής κυρίως στην ελαττωματική περιοχή. Αυτή η μέθοδος βοηθάει στην ομοιόμορφη θέρμανση και βελτιώνει την ορατότητα της ατέλειας.
- επαγωγή: ένα πηνίο χρησιμοποιείται για να παράγει ρεύματα αυτεπαγωγής σε βάθος αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που τα παράγει.
- μικροκύματα: χρονικά ελεγχόμενη πηγή μικροκυμάτων εισάγει θερμότητα στο δείγμα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό υποεπιφανειακών

στοιχείων που απορροφούν μικροκύματα (π.χ. περιοχές με νερό, μεταλλικά καλώδια ή ίνες).

Προτείνονται πολλές τεχνικές ενεργούς θερμογραφίας με τη χρήση ειδικών διατάξεων. Οι κυριότερες είναι: (58), (68)

- lock-in θερμογραφία (LT): χρησιμοποιείται περιοδική θέρμανση με δεδομένη συχνότητα σε μόνιμο καθεστώς για να μετρηθεί το πλάτος και η φάση καθυστέρησης της θερμικής απόκρισης.
- παλμική θερμογραφία (PT): Ένας σύντομος (για λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου) ενεργειακός παλμός χρησιμοποιείται για να θερμανθεί το αντικείμενο ελέγχου. Η επιφανειακή θερμοκρασία καταγράφεται με βάση την αρχή ότι οι ελαττωματικές πηγές ψύχονται με διαφορετικό ρυθμό από τις υγιείς.



Εικόνα 2.1.6-3: Τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας (58)

2.1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την υπέρυθρη θερμογραφία

Κατά την εφαρμογή της θερμογραφίας υπέρυθρου για τη μελέτη ενός υλικού ή μίας κατασκευής πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφορες φυσικές ιδιότητες. Η ιστορία του υλικού που εξετάζεται πρέπει επίσης να κατανοηθεί. Οι ιδιότητες αυτές και τα χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- Θερμικές ιδιότητες: αγωγιμότητα, διαχυτότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα
- Φασματικές ιδιότητες: συντελεστής εκπομπής, απορρόφησης, ανάκλασης, διαπερατότητας
- Άλλες ιδιότητες: πορώδες, ειδικός όγκος, φυσική περιεκτικότητα σε νερό.

Όλες τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικά στην κατανόηση του αποτελέσματος της θερμογραφίας. Για παράδειγμα, ένα υλικό με κενά ή πόρους έχει μειωμένη θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα, η θερμική διαχυτότητα

μεταβάλλεται και έτσι επηρεάζεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή μέσα στο υλικό. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2.1.7.1)$$

όπου α είναι η θερμική διαχυτότητα (m^2s^{-1}), k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), ρ η πυκνότητα (Kgm^{-3}) και C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Ένα άλλο παράδειγμα είναι, όταν το υλικό που εξετάζεται παρουσιάζει υγρασία. Σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλονται οι οπτικές ιδιότητες του υλικού, η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ώστε ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας να είναι πολύ χαμηλότερος σε μία περιοχή με υγρασία. Με άλλα λόγια, η ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας μίας περιοχής με υγρασία είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι σε μία ξηρή περιοχή. Αυτό φαίνεται και στην εξίσωση:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.1.7.2)$$

όπου Q (J) είναι η ενέργεια που απορροφάται, m (kg) η μάζα, C_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) η ειδική θερμοχωρητικότητα και ΔT (K) η μεταβολή της θερμοκρασίας. (71)

Οι B. Lehmann και άλλοι ερευνητές πραγματοποίησαν μία ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να διαπιστώσουν σε ποιο βαθμό επηρεάζεται η υπέρυθη θερμογραφία σε σχέση με τις κλιματικές παραμέτρους καταλήγοντας στα ακόλουθα συμπεράσματα: (72)

Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται εξαιτίας ηλιακής ακτινοβολίας ακόμα και πάνω από 30 K. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική μάζα που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, τόσο περισσότερη ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται στα επίπεδα κοντά στην επιφάνεια και για τόσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παραμένει η επιρροή ανιχνεύσιμη ακόμα και μετά τη δύση του ηλίου. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι σε τοιχοποιίες από σκυρόδεμα, οι οποίες ήταν εκτεθειμένες σε ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, χρειάστηκε να περάσουν ως και δύο μέρες με νεφελώδη καιρό, ώστε να εξαλειφθεί η επίδραση του φαινομένου.

Επίδραση ταχύτητας ανέμου

Λόγω της επίδρασης της στην μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής η ταχύτητα του ανέμου έχει άμεση επιρροή στην επιφανειακή θερμοκρασία μίας τοιχοποιίας. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου ήταν ίση με το μηδέν, οι επιφανειακές

Θερμοκρασίες έτειναν να είναι υψηλότερες σε σχέση με τις περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου ήταν μεγαλύτερη του μηδενός. Αυτό οφείλεται στην ήπια ψύξη των επιφανειών εξαιτίας του ψυχρότερου ανέμου. Η μεγαλύτερη επίδραση του ανέμου παρατηρείται σε ημέρες όπου ήταν υψηλή και η ηλιακή ακτινοβολία. Συνοπτικά μπορούμε να καταλήξουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- παλμική διέγερση ανέμου με ταχύτητα έως 2 m/s δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας
- η θερμοκρασιακές διαταράξεις εξαιτίας του ανέμου εξαλείφονται γρήγορα. Έτσι ο χρόνος αναμονής για τις μετρήσεις θερμογραφίας μπορεί να διαρκέσει μερικές ώρες από την πάροδο του φαινομένου.

Επίδραση της θερμοκρασίας του ουρανού και του παράγοντα θέασης

Η θερμογραφία υπέρυθρου εφαρμόζεται και για την αξιολόγηση της ενεργειακής κατάστασης των κτιρίων, αλλά και για την ανίχνευση ρωγμών στο κέλυφος της κατασκευής. Για να είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα τα αποτελέσματα πρέπει η επιφάνεια να προστατεύεται από διαταραχές, όπως είναι μία σημαντική ποσότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στον ουρανό. Για το λόγο αυτό, μία μέρα με νεφελώδη ουρανό είναι ιδανική για μετρήσεις, καθώς συνεπάγεται ότι η θερμοκρασία του ουρανού είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος. Παράλληλα η έκθεση του κτιρίου στον ουρανό, που εκφράζεται μέσω του παράγοντα θέασης παίζει ένα σημαντικό ρόλο, καθώς οι τιμές των επιπέδων ψύξης μία επιφάνειας αυξάνονται με την αύξηση του παράγοντα θέασης.

Επίδραση του ιστορικού της εξωτερικής θερμοκρασίας

Το ιστορικό της θερμοκρασία περιβάλλοντος για μία συγκεκριμένη περίοδο πριν τη διεξαγωγή μετρήσεων αποτελεί έναν επίσης σημαντικό παράγοντα. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει τις μετρήσεις ως εξής:

- Οι αποκλίσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας για τοίχους χωρίς μόνωση εξαφανίζεται με την απομάκρυνση της θερμοκρασιακής διαταραχής.
- Όσο το εύρος της εξωτερικής θερμοκρασιακής διαταραχής μένει κάτω από τους 8°C, τότε και η θερμοκρασιακή απόκλιση των τοίχων με θερμική μόνωση δεν είναι σημαντική. Αντίθετα, για μεγαλύτερα εύρη (πχ. 15°C) η απόκλιση διαρκεί αρκετές ώρες μετά τη διαταραχή. Ωστόσο τόσο μεγάλα εύρη μπορεί να παρουσιαστούν με τη συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας.

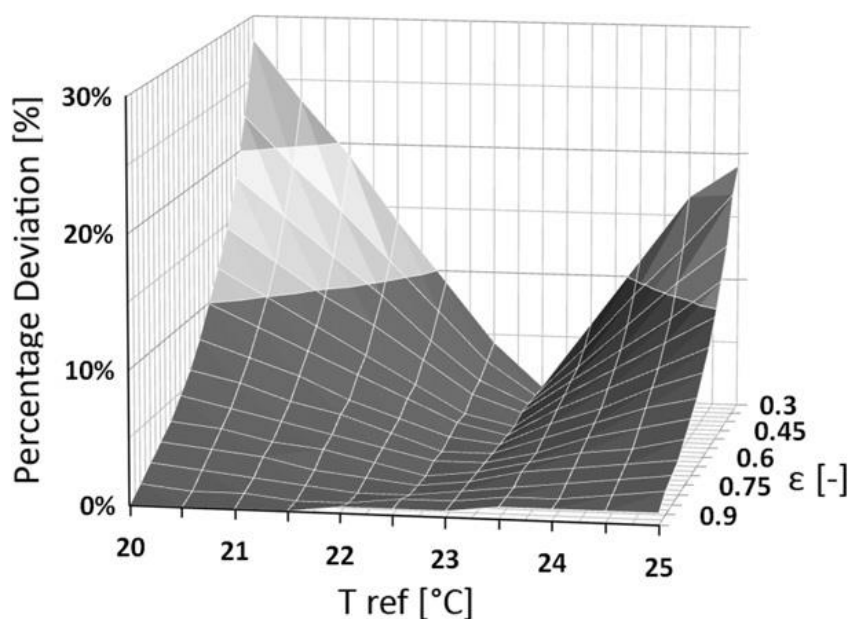
Επίδραση της βαθμίδας της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

Η αύξηση ή η μείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η μεταβολή της επιφάνειας εξαρτάται από την κατασκευή της τοιχοποιίας, την διάρκεια της έκθεσης και το μέγεθος της θερμοκρασιακής βαθμίδας. Για μεταβολή θερμοκρασίας με ρυθμός 0,4°C/h τοίχοι χωρίς μόνωση παρουσιάζουν θερμοκρασιακή μεταβολή περίπου 0,2°C/h.

Παράλληλα ο P.A. Fokaides και άλλοι ερευνητές πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας μίας επιφάνειας μέσω της υπέρυθρης θερμογραφίας. Συγκεκριμένα η μελέτη αφορούσε στη θερμοκρασία ανάκλασης T_{REF} , στο συντελεστή εκπομπής, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, στη σχετική υγρασία και στην απόσταση μεταξύ της επιφάνειας και της θερμοκάμερας. Η σχέση που εξετάστηκε είναι η ακόλουθη:

$$T_{MEAS} = f(T_{REF}, \varepsilon, T_{ATM}, RH, x) \quad (2.1.7.3)$$

Η επιρροή των δύο τελευταίων παραμέτρων βρέθηκε πως είναι αμελητέα για το τελικό αποτέλεσμα, καθώς μόνο ένα μικρό τμήμα της ακτινοβολίας απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Οι παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στην θερμοκρασία που μετράται είναι ο συντελεστής εκπομπής και η θερμοκρασία ανάκλασης. Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση. Η πραγματική θερμοκρασία ανάκλασης κατά τη διάρκεια της μέτρησης ήταν 22,6°C και ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου ήταν 0,93. Όπως παρατηρείται από την Εικόνα, μία απόκλιση 1°C στη θερμοκρασία ανάκλασης μπορεί να προκαλέσει σφάλμα στις μετρήσεις έως και 10%. (69)



Εικόνα 2.1.7-1: Επί τις εκατό απόκλιση της μετρούμενης θερμοκρασίας μίας επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας ανάκλασης και του συντελεστή εκπομπής (69)

2.1.8 Εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας

Η φύση της υπέρυθρης θερμογραφίας επιτρέπει την εφαρμογή της σε ένα ευρύ πεδίο. Οι σημαντικότερες από αυτές τις εφαρμογές είναι οι ακόλουθες.

Κατασκευές

Η θερμογραφία υπέρυθρου χρησιμοποιείται για τη διάγνωση της κατάστασης διατήρησης κατασκευών. Έτσι μπορεί να αποτιμηθεί η ενεργειακή κατάσταση των κτιρίων, ανιχνεύονται θερμικές γέφυρες και διαρροές αέρα, (70) διαπιστώνεται η έλλειψη ή η φθορά θερμικής μόνωσης (72) και εντοπίζεται πιθανή υγρασία. (73)



Εικόνα 2.1.8-1: Θερμικές γέφυρες μεταξύ της στέγης και της τοιχοποιίας (63)



Εικόνα 2.1.8-2: Ανίχνευση υγρασίας στην τοιχοποιία (73)

Προστασία μνημείων

Στον τομέα της προστασίας μνημείων η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται με επιτυχία για τη μελέτη των υλικών μνημείων αρχαιολογικής, ιστορικής και πολιτιστικής αξίας (74), για την αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης (71), για την παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης κτιρίων (75) και για την ψηφιακή απεικόνιση, την καταγραφή, την τεκμηρίωση και την αρχειοθέτηση. (74)

Η χρήση ασύμβατων υλικών για τη συντήρηση των μνημείων επιταχύνει τα φαινόμενα φθοράς. Επομένως, η αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης μέσω της θερμογραφίας υπέρυθρου, που είναι μη καταστρεπτική μέθοδος, παίζει σπουδαίο ρόλο. Ο συνδυασμός της θερμογραφίας υπέρυθρου με τα σύγχρονα

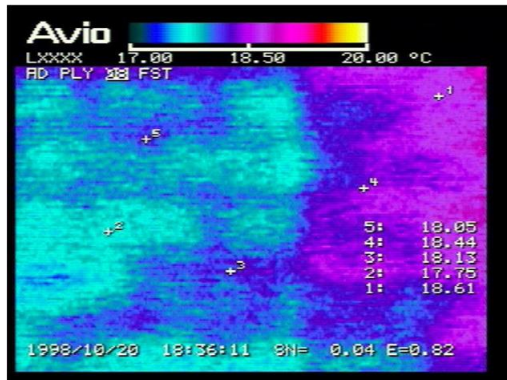
φωτογραμμετρικά μέσα, όπως το Laser Scanner, συμβάλλει στην οπτικοποίηση της θερμικής κατανομής και την ταυτοποίηση των ατελειών στο μνημείο. (74)

Πιο συγκεκριμένα η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των επεμβάσεων συντήρησης στις ακόλουθες περιπτώσεις: (71), (76), (77)

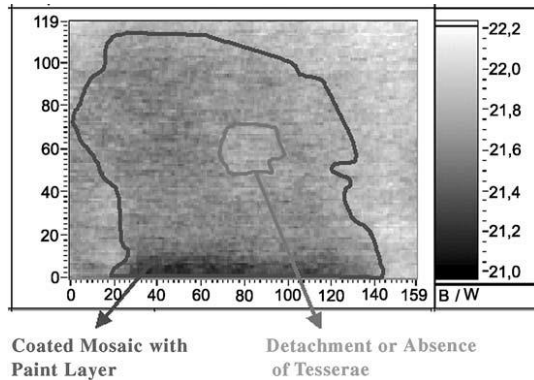
- Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού, με σκοπό την ανίχνευση υπολειμμάτων παστών και τον έλεγχο των επιπέδων υγρασίας στην επιφάνεια.
- Επιλογή συμβατών στερεωτικών υλικών, ώστε να διαπιστωθεί η φυσικοχημική συμβατότητα μεταξύ στερεωτικού και λίθου.
- Επιλογή συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης.
- Μελέτη ψηφιδωτών πάνω από τα οποία έχει τοποθετηθεί επίχρισμα. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος της ενεργητικής υπέρυθρης θερμογραφίας, ώστε να εντοπιστούν τα τμήματα των ψηφιδωτών που βρίσκονται κάτω από το επίχρισμα με σκοπό να αποκαλυφθούν.

Οι Εικόνες που ακολουθούν αποτελούν μερικά παραδείγματα εφαρμογών της υπέρυθρης θερμογραφίας στην προστασία μνημείων. Στην Εικόνα 14 παρατηρείται το θερμογράφημα μίας επιφάνειας από λίθο Καπανδρίτη, όπου στην δεξιά πλευρά έχει εφαρμοστεί υδροβολή με ελεγχόμενη πίεση και στην αριστερή πλευρά έχει εφαρμοστεί πάστα σηπιόλιθου με 15% w/v $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Από τη θερμική εικόνα διαπιστώνεται στην αριστερή πλευρά της επιφάνειας κατακράτηση υγρασίας εξαιτίας των υπολειμμάτων σηπιόλιθου, καθώς υπήρξε ατελής απομάκρυνσή του από τον πορώδη λίθο. Αντίθετα στην αριστερή πλευρά ο καθαρισμός με υδροβολή ήταν επιτυχής. (59)

Η Εικόνα 15 προέρχεται από θερμογράφημα καλυμμένου ψηφιδωτού από το Ναό της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη. Η επιφάνεια θερμάνθηκε με τη βοήθεια λάμπας και κατά την ψύξη έγινε λήψη της θερμικής εικόνας. Στο θερμογράφημα παρατηρείται το ψηφιδωτό που καλύπτεται από το επίχρισμα (περιοχή χρώματος σκούρου γκρι), ενώ εντοπίζεται και επιφάνεια από την οποία πιθανόν να έχουν αποκολληθεί οι ψηφίδες. (66)

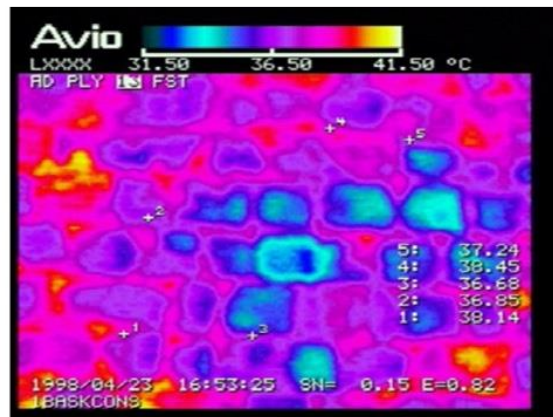


Εικόνα 2.1.8-3: Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε λίθο Καπανδρίτι στο ιστορικό κτίριο της Τράπεζας της Ελλάδος (59)



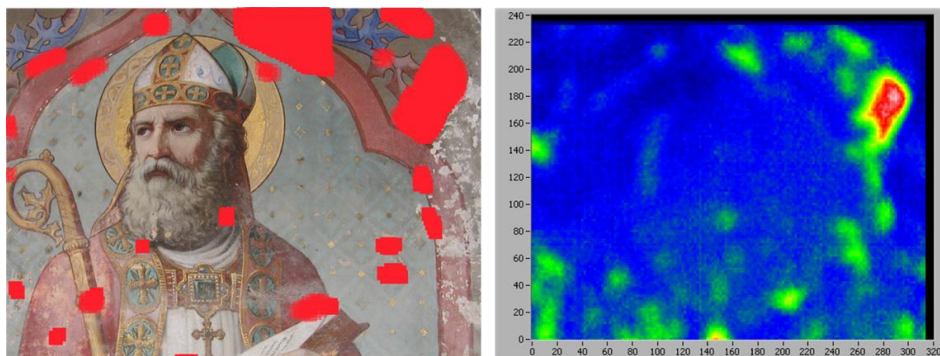
Εικόνα 2.1.8-4: Θερμογράφημα από ψηφιδωτό που έχει καλυφθεί από επίχρισμα από το Ναό της Αγίας Σοφίας (71)

Στην Εικόνα 16 εξετάζεται μία επιφάνεια από τα μεσαιωνικά τείχη του Ηρακλείου. Εκεί κατά το παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν τσιμενטיκά κονιάματα αποκατάστασης τα οποία προκάλεσαν προβλήματα συμβατότητας. Στο θερμογράφημα παρατηρούνται ψυχροί λίθοι και θερμά κονιάματα στους αρμούς. Αυτό συμβαίνει, επειδή τα ιστορικά κονιάματα παρουσίαζαν παρόμοιες θερμοκρασίες με αυτές των λίθων, ενώ τα τσιμενטיκά κονιάματα αποκατάστασης εμφανίζουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, επειδή είναι μη διαπερατά στα διαλυτά άλατα. (59)

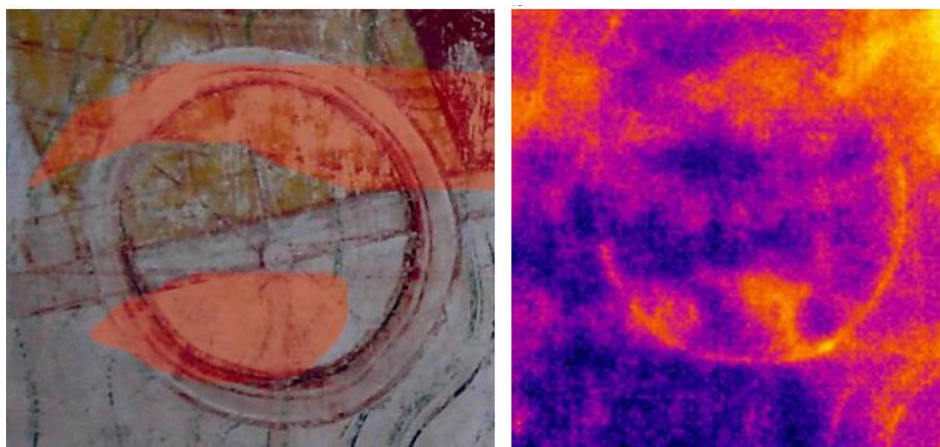


Εικόνα 2.1.8-5: Έλεγχος παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης στα μεσαιωνικά τείχη του Ηρακλείου της Κρήτης (59)

Στο πεδίο των τοιχογραφιών εφαρμόζεται η ενεργητική υπέρυθρη θερμογραφία για την ανίχνευση ασυνεχειών, ρηγματώσεων και κενών στο υπόστρωμα. (78) Μία νέα τάση είναι και ο υπολογισμός του πάχους της γυψοποιημένης κρούστας σε μάρμαρο με τη βοήθεια της παλμικής θερμογραφίας και μαθηματικού μοντέλου, ώστε να μην είναι απαραίτητα η δειγματοληψία και ο εργαστηριακός έλεγχος. (79)



Εικόνα 2.1.8-6: Εφαρμογή ενεργητικής υπέρυθρης θερμογραφίας για την ανίχνευση ατελειών στο υπόστρωμα της τοιχογραφίας (78)



Εικόνα 2.1.8-7: Εφαρμογή ενεργητικής θερμογραφίας. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που εντοπίζονται πιθανόν να οφείλονται σε ασυνέχεια μεταξύ υποστρώματος και τοιχογραφίας. (78)

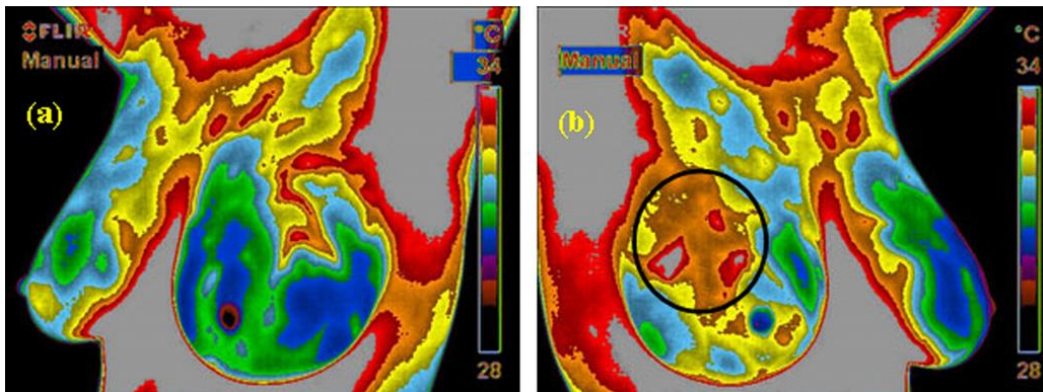
Ιατρικές εφαρμογές

Καθώς η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μία ασφαλής μέθοδος, που δίνει άμεσα αποτελέσματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με κλινικές μελέτες για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας του σώματος με σκοπό τη διάγνωση διάφορων ασθενειών. Η θερμογραφία υπέρυθρου βρίσκει εφαρμογή στους παρακάτω τομείς της ιατρικής: (80)

- Έλεγχος του μηχανισμού ομοιόστασης
- Διάγνωση καρκίνου του μαστού: Βασίζεται στο γεγονός ότι οι όγκοι παρουσιάζουν μία αυξημένη παροχή αίματος και υψηλότερο ρυθμό μεταβολισμού. Συνεπώς, παρατηρείται τοπικά υψηλή θερμοκρασία γύρω από τις περιοχές των όγκων.
- Διάγνωση διαβητικής νευροπάθειας και αγγειακών διαταραχών: Οι αγγειακές διαταραχές και η διαβητική νευροπάθεια μεταβάλλουν τη θερμοκρασία της επιδερμίδας. Η μεταβολή αυτή μπορεί να μελετηθεί με την υπέρυθρη θερμογραφία.
- Διάγνωση πυρετού

- **Οδοντιατρική:** Η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας του οδοντικού ιστού και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αποστείρωσης. Παράλληλα εφαρμόζεται για τη διάγνωση κρανιογναθικών διαταραχών και την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων μετεγχειρητικών φλεγμονών.
- **Δερματολογία:** Οι δερματολογικές παθήσεις προκαλούν γενικά φλεγμονές οι οποίες έχουν σαν συνέπεια τη παρατήρηση μη φυσιολογικών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του δέρματος. Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται στη διάγνωση της λέπρας, και του βασικοκυτταρικού καρκινώματος. Επιπλέον συμβάλει στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του laser, καθώς χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση του δέρματος το οποίο υπόκειται σε θεραπεία με laser για την αντιμετώπιση αγγειακών βλαβών και της τριχοφυΐας. Σημαντικός είναι ο ρόλος της μεθόδου και για την εκτίμηση του βάθους του εγκαύματος. Τέλος, χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της αποκατάστασης μακροχρόνιων ελκών.
- **Παρακολούθηση της πίεσης του αίματος**
- **Διάγνωση ρευματικών νόσων:** Η θερμογραφία υπερύθρου χρησιμοποιείται με επιτυχία και για την διάγνωση της ρευματοειδούς αρθρίτιδας, της οστεοαρθρίτιδας και του φαινομένου του Raynaud, ενώ συμβάλει και στην παρακολούθηση της επίδρασης αντιστεροειδών και αντιφλεγμονωδών φαρμάκων. Οι ασθενείς που πάσχουν από ρευματικές νόσους εμφανίζουν μη φυσιολογική θερμοκρασία πάνω από τις αρθρώσεις.
- **Διάγνωση ξηροφθαλμίας και οφθαλμικών νοσημάτων:** Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του οφθαλμού είναι υψηλότερη στα άτομα που πάσχουν από ξηροφθαλμία.
- **Διάγνωση ηπατικών νοσημάτων:** Στο 96% των ασθενών με χρόνιες ηπατικές παθήσεις τα θερμογραφήματα από την κοιλιακή περιοχή είναι μη φυσιολογικά.
- **Θεραπεία των νεφών:** Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται συμπληρωματικά με άλλες εξετάσεις για την διάγνωση ενδονεφρικών ή περινεφρικών διαταραχών και για την παρακολούθηση της λειτουργίας του μοσχεύματος.
- **Εγχείρηση καρδιάς:** Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση ασθενών που πάσχουν από νόσημα στεφανιαίας αρτηρίας και ασθενών που έχουν υποβληθεί σε μεταμόσχευση καρδιάς. Επιπλέον μπορεί να εντοπίσει τα αρχικά σημάδια της αθηροσκλήρωσης.
- **Γυναικολογία:** Εφαρμόζεται για την παρακολούθηση του πόνου μετά τον τοκετό.
- **Έλεγχος της προσωπικότητας και απεικόνιση του εγκεφάλου:** Η κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται από τα επίπεδα του άγχους, της συγκέντρωσης και των ψυχολογικών δραστηριοτήτων. Επίσης σύμφωνα με έρευνες οι όγκοι του

εγκεφάλου νευρογλοιακής προέλευσης παρουσιάζουν κατά 0,5 – 2 °C υψηλότερη θερμοκρασία από τους γειτονικούς ιστούς.

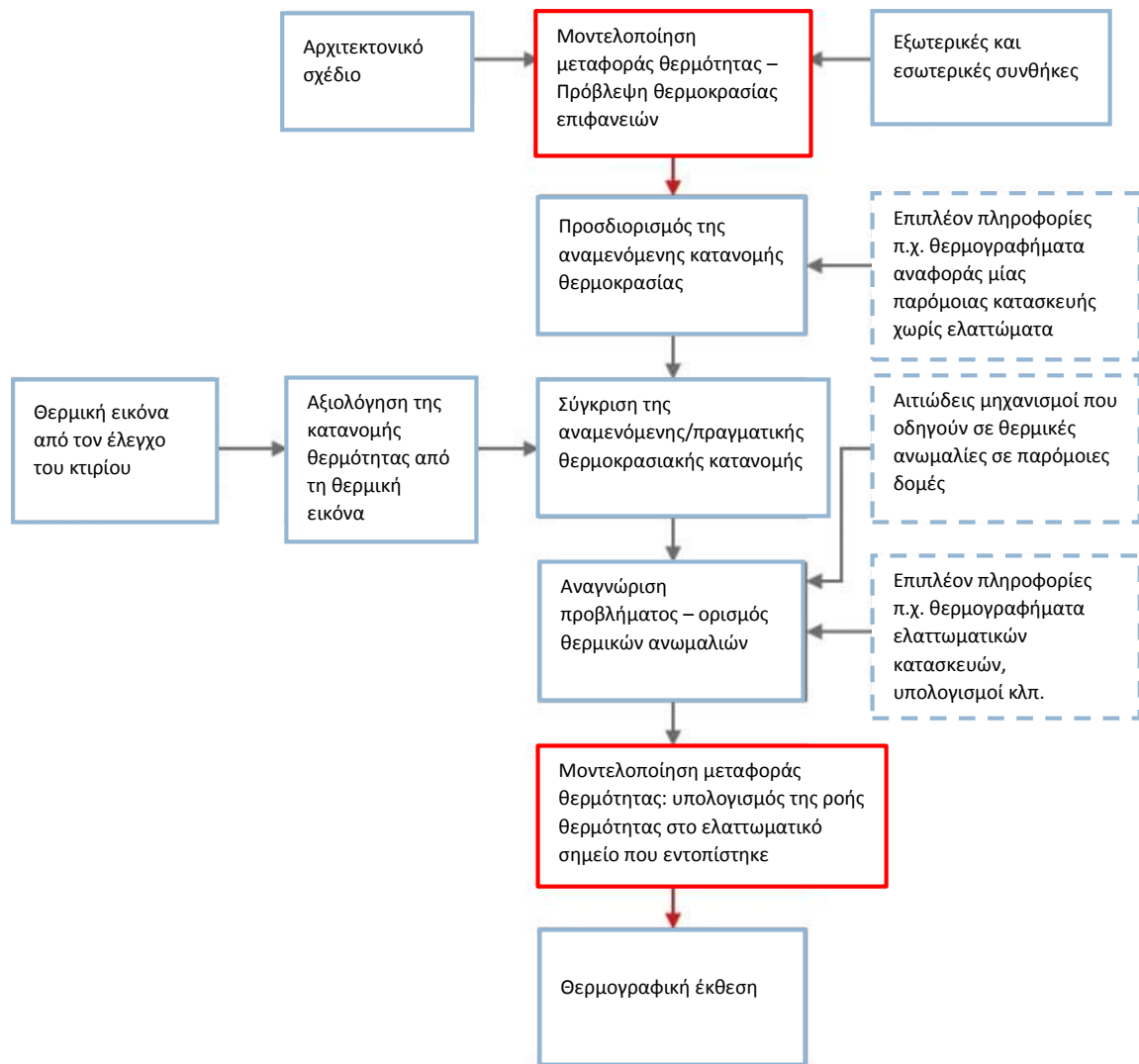


Εικόνα 2.1.8-8: Θερμογραφία υπέρυθρου για τη διάγνωση του καρκίνου του μαστού. Στο δεξί στήθος εντοπίζεται θερμή περιοχή, οποία οφείλεται στην ύπαρξη όγκου. (81)

2.1.9 Συνδυασμός υπέρυθρης θερμογραφίας και μοντέλων προσομοίωσης

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά παραδείγματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της υπέρυθρης θερμογραφίας με αποτελέσματα μοντέλων προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας. Στόχος των συγκρίσεων αυτών είναι ο εντοπισμός και η ακριβέστερη ποσοτική ανάλυση των ενεργειακών απωλειών σε κτίρια.

Ο T. Taylor και άλλοι ερευνητές (70) χρησιμοποίησαν εικόνες υπέρυθρης θερμογραφίας και τις συνδύασαν με τα μοντέλα προσομοίωσης HEAT3 και THERM προκειμένου να ελέγξουν την περιμετρική μόνωση σε ένα ξύλινο δάπεδο. Αρχικά λήφθηκαν θερμικές εικόνες αναφοράς επί τόπου, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα προσομοίωσης όπου δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον ορισμό των οριακών συνθηκών. Οι ερευνητές ακολούθησαν τη διαδικασία που προκύπτει από το BS EN 13187, η οποία παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 2.1.9-1: Τροποποιημένη διαδικασία για την ερμηνεία θερμικών εικόνων σύμφωνα με το BS EN 13187

Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετώπισαν κατά το συνδυασμό και τη σύγκριση των δύο μεθόδων ήταν ότι οι εξωτερικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των επί τόπου μετρήσεων μεταβάλλονταν συνεχώς π.χ. εξαιτίας της μεταβολής της ταχύτητας του αέρα ή της ηλιακής ακτινοβολίας κλπ. Έτσι 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. Για τον ορισμό των οριακών συνθηκών κατά τη μοντελοποίηση συμβουλευτήκαν το πρότυπο ISO 10211. 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 $T_{sol-air}$:

$$T_{sol-air} = T_e + (a \cdot I_{sol} - \Phi)R_{se} \quad (2.1.9.1)$$

όπου $T_{sol-air}$ είναι η θερμοκρασία ηλίου – περιβάλλοντος, T_e είναι η εξωτερική θερμοκρασία, a είναι ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας, I_{sol} η συνολική ηλιακή ακτινοβολία, Φ η θερμική ακτινοβολία του ουρανού και R_{se} η αντίσταση της εξωτερικής επιφάνειας. Η θερμοκρασία ηλίου – περιβάλλοντος περιλαμβάνει το φαινόμενο του ηλιακού θερμικού κέρδους στην επιφάνεια του κτιρίου και της θερμικής ακτινοβολίας του ουρανού. Είναι ίση με την κινητήρια δύναμη της ροής θερμότητας μέσω του δομικού στοιχείου. Σύμφωνα με το S.V. Szokolay η θερμική ακτινοβολία Φ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\Phi = 90\text{W/m}^2$ στην περίπτωση που ο ουρανός είναι καθαρός και $\Phi = 20\text{W/m}^2$, όταν ο ουρανός είναι νεφελώδης για οριζόντιες επιφάνειες. (82) Η συνήθης τιμή της αντίστασης εξωτερικής επιφάνειας R_{se} σύμφωνα με το ISO 6946 είναι $R_{se} = 0,04\text{m}^2\text{K/W}$. 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 (72) 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. Επίσης προσδιορίστηκε για κάθε πρόσοψη που εξετάστηκε η θερμοκρασία του αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία. Το χειμώνα του 2009 έως 2010 λαμβάνονταν κλιματικές και θερμικές πληροφορίες με τη βοήθεια της υπέρυθρης θερμογραφίας για αρκετές εβδομάδες. Στο δεύτερο στάδιο της μελέτης δημιουργήθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο που επαληθεύτηκε από τη σύγκριση των υπολογιστών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων.

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:

$$I_{rsky} = \sigma \cdot T_{sky}^4 = \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{ae}^4 \quad (2.1.9.2)$$

όπου T_{ae} είναι η απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος και T_{sky} είναι η θερμοκρασία ουρανού, η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος με την ίδια ροή ακτινοβολίας. Οι τιμές της ακτινοβολίας του ουρανού μπορούν να ληφθούν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

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.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ορίστηκε στο πρόγραμμα VOLTRA ίσος με $h_c = 3 + 2v_{wind} [W/(m^2K)]$, όπου v_{wind} είναι η ταχύτητα του ανέμου. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης που περιγράφει την εξάρτησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και της ταχύτητας του ανέμου έγινε με βάση εκτενείς μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για αυτό το σκοπό από διάφορους ερευνητές. (83), (84)

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.

$$\theta_{re} = \sqrt[4]{F_{sky}T_{sky}^4 + F_eT_e^4} - 273,16 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.1.9.3)$$

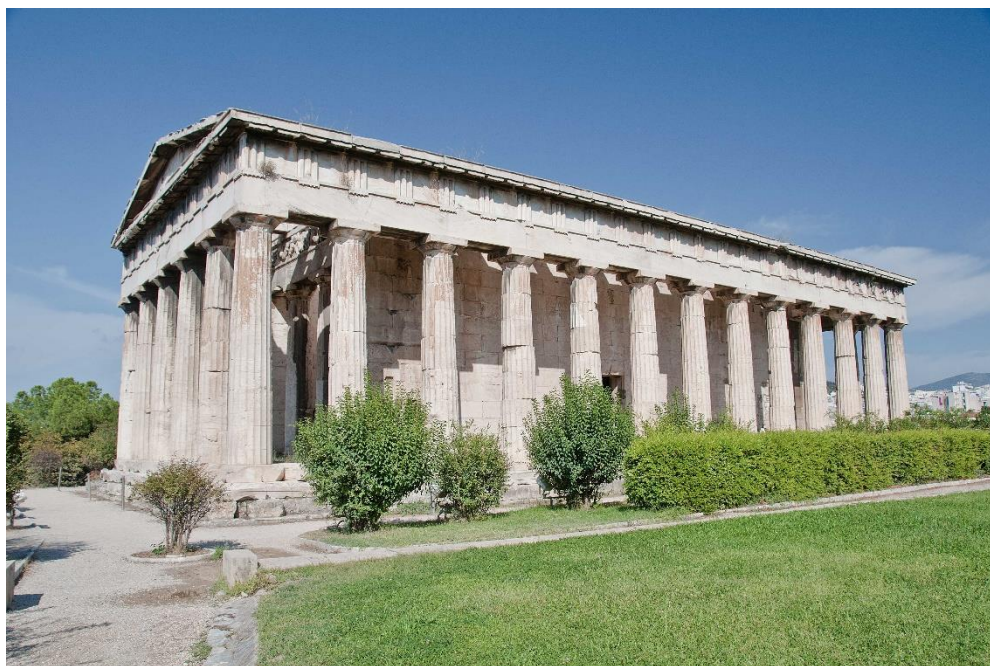
όπου θ_{re} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, F_{sky} και F_e ο παράγοντας θέασης του ουρανού και της πρόσοψης αντίστοιχα, T_{sky} η θερμοκρασία του ουρανού, η οποία μπορεί να βρεθεί από τα δεδομένα της μετεωρολογικής υπηρεσίας και T_e η θερμοκρασία του αέρα που μετρήθηκε από το μετεωρολογικό σταθμό που είχε εγκατασταθεί κοντά στο κτίριο.

- Η ηλιακή ακτινοβολία στους τοίχους ανάλογα με τον προσανατολισμό τους.
- Ο παράγοντας απορρόφησης για αδιαφανείς τοίχους εκτιμάται ότι είναι περίπου 60%.
- Η ταχύτητα του ανέμου, οι τιμές τις οποίες βρέθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό.
- Η μέση εσωτερική θερμοκρασία αέρα που ήταν περίπου ίση με 21,9°C.

Πίνακας 2.1.9-1: Συνοπτικός πίνακας μεθοδολογιών

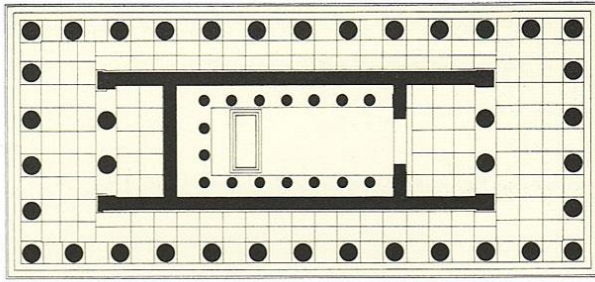
Ερευνητές	Σκοπός	Πρόγραμμα προσομοίωσης	Οριακές συνθήκες
T. Taylor, J. Counsell, S. Gill (70)	Έλεγχος περιμετρικής μόνωσης σε ξύλινο δάπεδο	HEAT3 & THERM	<u>Εσωτερικές οριακές συνθήκες:</u> Εσωτερική θερμοκρασία αέρα <u>Εξωτερικές οριακές συνθήκες:</u> διορθωμένη εξωτερική θερμοκρασία αέρα από το συντελεστή δT_e ή απλουστευμένη παραδοχή σύμφωνα με το ISO 10211
B. Lehmann, K. Ghazi Wakili, Th. Frank, B. Vera Collado, Ch. Tanner (72)	Ποσοτική ανάλυση της επιρροής διαφορετικών παραμέτρων στις θερμικές εικόνες	VOLTRA & RADCON	Εξωτερική θερμοκρασία αέρα κοντά στην πρόσοψη, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία, παράγοντας απορρόφησης, ταχύτητα του ανέμου, μέση εσωτερική θερμοκρασία αέρα

Είναι επίσης ο καλύτερα διατηρημένος ναός της αρχαιότητας, γεγονός που οφείλεται σε δύο παράγοντες. Πρώτον ότι η Αθήνα δε βρίσκεται σε ζώνη υψηλής σεισμικότητας και δεύτερον στη μετατροπή του από πολύ νωρίς (7^{ος} μ.Χ. αιώνας) σε χριστιανική εκκλησία. Έτσι ο ναός απέφυγε την κοινή μοίρα των περισσότερων αρχαίων κτιρίων, δηλαδή να χρησιμοποιηθεί από τους μεταγενέστερους ως πηγή άντλησης οικοδομικού υλικού. (86)



Εικόνα 2.2.1-2: Ο ναός του Ηφαίστου (νοτιοδυτική άποψη)

Η χρονολόγηση του ναού βασίζεται κυρίως στην αρχιτεκτονική του μορφή, στην τεχνοτροπία του γλυπτού διακόσμου, στην κεραμική που βρέθηκε στη θεμελίωση του κτιρίου και στη μορφή των τεκτονικών σημείων που είχαν χαραχτεί στη λίθινη οροφή για να διασφαλίσουν τη σωστή τοποθέτηση των φατνωμάτων. Ο ναός άρχισε μάλλον να χτίζεται στα μέσα του 5^{ου} αιώνα, πιθανόν όχι πριν το 460 και όχι αργότερα από το 450-448 π.Χ. Η οικοδόμησή του διήρκεσε επί μακρό χρονικό διάστημα, ίσως επειδή ο Παρθενώνας (447-432 π.Χ.) και τα Προπύλαια (437-432 π.Χ.) απασχολούσαν πάρα πολλούς τεχνίτες και γλύπτες στην Ακρόπολη και επειδή το 432/1 π.Χ. ξέσπασε ο Πελοποννησιακός πόλεμος. Η ανωδομή του κτιρίου φαίνεται πως δεν έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 420 π.Χ. περίπου, ενώ σύμφωνα με μία επιγραφή τα λατρευτικά αγάλματα τοποθετήθηκαν το 421-415 π.Χ. κατά τη διάρκεια μία προσωρινής διακοπής του πολέμου. Το Ηφαιστείο κατασκευάστηκε σχεδόν ολόκληρο από πεντελικό μάρμαρο. Μόνο στην κατώτερη βαθμίδα στις κρηπίδας χρησιμοποιήθηκε ασβεστόλιθος, ενώ για τον γλυπτό διάκοσμο και για τμήματα της οροφής προτιμήθηκε νησιωτικό μάρμαρο. Το κτίριο σώζεται μέχρι το ύψος της οροφής, που ήταν ξύλινη στο εσωτερικό του ναού, ενώ στο πτερό είχε κατασκευαστεί από μαρμάρινες δοκούς και φατνωματικές πλάκες. (86)

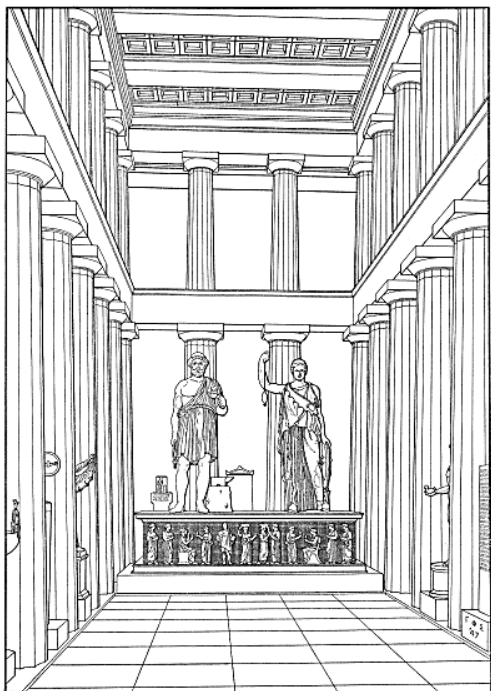


Εικόνα 2.2.1-3: Κάτοψη ναού του Ηφαίστου κατά την αρχαιότητα

Η οροφή είναι από τις πιο περίτεχνες και παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα. Τα φατνώματα στο κάτω τμήμα των δοκών έχουν λαξευτεί σε μεγάλο βάθος για να μειωθεί το φορτίο των δοκών, πρακτική που συναντάται σε πολλές λίθινες οροφές. Στην περίπτωση του ναού του Ηφαίστου οι ουρανοί των φατνωμάτων είχαν λαξευτεί ανεξάρτητα, ώστε να μπορούν να μετακινούνται. Αυτό πιθανόν να έγινε στην προσπάθεια για μείωση του βάρους των μελών, ενώ είναι σίγουρο ότι οι ουρανοί δεν προορίζονταν για να μετακινούνται ύστερα από την τοποθέτησή τους στην οροφή. Μάλιστα ο ουρανός κάθε φατνώματος είχε λαξευτεί προσεκτικά, ώστε να ταιριάζει μόνο σε ένα συγκεκριμένο φάτνωμα. (88)

Από τις εξήντα οκτώ μετόπες της δωρικής εξωτερικής ζωφόρου του ναού, μόνο οι δεκαοκτώ είναι διακοσμημένες με ανάγλυφες παραστάσεις και αποτελούνται από παριανό μάρμαρο. Στην ανατολική πλευρά, οι δέκα μετόπες παριστάνουν εννέα από τους άθλους του Ηρακλή, ενώ οι τέσσερις πρώτες μετόπες από τα ανατολικά της βόρειας και της νότιας πλευράς απεικονίζουν μύθους του Θησέα. Στον θριγκό του πρόναου και του οπισθόδομου παρατηρούνται ιωνικές ζωφόροι, που έχουν κατασκευαστεί επίσης από παριανό μάρμαρο. Η ιωνική ζωφόρος του οπισθόδομου αναπαριστά τη μάχη Λαπιθών και Κενταύρων. (89) Αετωματικά γλυπτά δεν υπάρχουν στο μνημείο, ωστόσο κατά τις ανασκαφές στην Αρχαία Αγορά βρέθηκαν τμήματα γλυπτών από πεντελικό και παριανό μάρμαρο που αποδόθηκαν στο γλυπτό διάκοσμο των αετωμάτων του ναού. (90)

Στο εσωτερικό του σηκού υπήρχε διπλή κιονοστοιχία δωρικού ρυθμού. Επίσης σύμφωνα με τον Πausanias μέσα στο ναό υπήρχαν δύο αγάλματα που στέκονταν το ένα δίπλα στο άλλο, του Ηφαίστου και της Αθηνάς. Από άλλη πηγή γίνεται γνωστό ότι τα αγάλματα ήταν κατασκευασμένα από χαλκό. Παράλληλα σε κάποια σημεία του τοίχου σώζεται επίχρισμα το οποίο αποτελείται από θηραϊκή γη, ασβέστη, λεπτόκοκκη άμμο και άχυρα. Το επίχρισμα είχε κοκκινωπό χρώμα και εφαρμόστηκε στον τοίχο ύστερα από την τοποθέτηση των κιόνων. Σύμφωνα με τους A.K. Orlando, I. Traulό και G.P. Stevens το κονίαμα χρονολογείται από τα τέλη του 5^{ου} αιώνα π.Χ. (91) Αντίθετα σύμφωνα με τον W.B. Dinsmoor το επίχρισμα είναι μεσαιωνικής προέλευσης. (92)



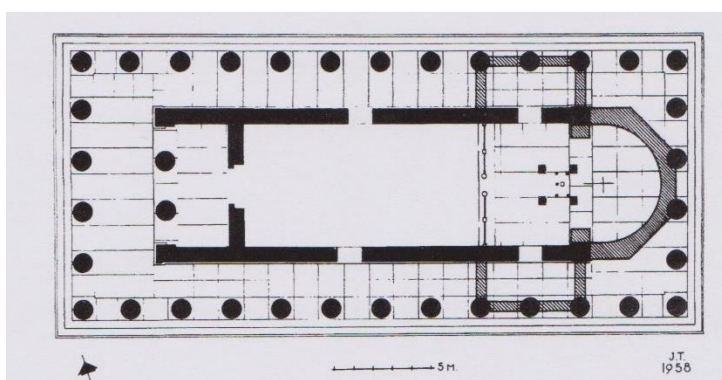
Εικόνα 2.2.1-4: Ο εσωτερικός χώρος του ναού του Ηφαίστου κατά την αρχαιότητα (91)

Οι ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν γύρω από το ναό αποκάλυψαν μία σειρά από λάκκων με πήλινες γλάστρες, ιδιαίτερα στη νότια όψη. Η διαμόρφωση αυτή έγινε τον 3^ο π.Χ. αιώνα και δημιούργησε δύο σειρές δενδρυλλίων και θάμνων κατά μήκος της βόρειας και της νότιας όψης και τρεις σειρές κατά μήκος της δυτικής όψης του ναού. (93)



Εικόνα 2.2.1-5: Λάκκοι και πήλινες γλάστρες κατά μήκος της νότιας όψης (90)

Τον 7^ο αιώνα ο ναός του Ηφαίστου μετατράπηκε σε χριστιανικό ναό. Για τη μετατροπή αυτή ήταν απαραίτητα η αλλαγή του προσανατολισμού του κτιρίου και η προσθήκη αψίδας. Οι αρχαίοι ναοί είχαν την είσοδό τους στην ανατολική πλευρά, η οποία αποτελούσε την κύρια όψη τους. Στους χριστιανικούς ναούς η πρόσβαση γινόταν από τα δυτικά, ενώ στην ανατολική πλευρά βρισκόταν το Ιερό Βήμα. Για να προσαρμοστεί επομένως το κτίριο στις νέες ανάγκες, ανοίχτηκε μία είσοδος στο δυτικό τοίχο του σηκού και στην ανατολική πλευρά κατασκευάστηκε αψίδα μετά την αφαίρεση των δύο κίωνων του πρόναου. Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίστηκε ο γλυπτός διάκοσμος του κτιρίου κατά τη διάρκεια της μετατροπής βοηθά να σχηματίσουμε κάποια εικόνα των αντιλήψεων των πρώτων χριστιανών. Για να παραμείνουν στο χριστιανικό ναό τα ειδωλολατρικά γλυπτά έπρεπε να ακρωτηριαστούν. (86)



Εικόνα 2.2.1-6: Κάτοψη του ναού του Ηφαίστου μετά τη μετατροπή του σε χριστιανικό ναό (86)

Οι πλευρικές θύρες που ανοίχτηκαν στη βόρεια και στη νότια όψη σφραγίστηκαν με κονίαμα και πλίνθους κατά την τουρκοκρατία. Κατά τη μεσοβυζαντινή περίοδο (9^{ος} έως 13^{ος} αιώνας) κατασκευάστηκε η κτιστή καμάρα, η οποία καλύπτει έως σήμερα το σηκό του ναού. Την περίοδο αυτή η αψίδα του ναού αντικαταστάθηκε από μία μικρότερη, η οποία παρέμεινε μέχρι το 1834. Από τότε έως την ανασκαφή της Αμερικάνικης Αρχαιολογικής Σχολής, ο ναός χρησιμοποιήθηκε για τη στέγαση αρχαιολογικής συλλογής, ενώ η αψίδα κατεδαφίστηκε και αντικαταστάθηκε από ευθύ τοίχο. Ο τοίχος αυτός κατεδαφίστηκε το 1936 από τον Α. Ορλάνδρο κατά την αναστήλωση των δύο κίωνων του πρόναου. (85) Κατά την κατεδάφιση του τοίχου βρέθηκαν εντοιχισμένα σημαντικά μέλη του μνημείου, όπως ένα μέρος του ανώτερου εσωτερικού επιστυλίου και δύο τμήματα από το βάθρο των λατρευτικών αγαλμάτων. (92)

Το 1939 πραγματοποιήθηκε ανασκαφή στο σηκό και στο περιστύλιο του ναού, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη τάφων στο εσωτερικό του ναού και στον περίβολο, που χρονολογούνται από την ύστερη βυζαντινή και τουρκική εποχή. Ο 6^{ος} και ο 7^{ος} κίονας από τα ανατολικά στη βόρεια πλευρά και ο 2^{ος} και 3^{ος} κίονας από τα δυτικά στη νότια πλευρά είχαν λαξευτεί με σκοπό τη διάνοιξη χώρου για την είσοδο σαρκοφάγων στο ναό. (92)



Εικόνα 2.2.1-7: Τάφοι στο εσωτερικό του σηκού (92)

2.2.2 Παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης

Το καλοκαίρι του 1953 ανέλαβε η Αμερικάνικη Σχολή Κλασικών σπουδών στην Αθήνα τον καθαρισμό της ανατολικής ιωνικής ζωφόρου. Η χημική ανάλυση των επικαθίσεων της ζωφόρου έδειξε ότι αποτελούνται από 2/3 ανθρακικού ασβεστίου και 1/3 πηλού, που πιθανότατα σχηματίστηκε από τη σταδιακή ροή από τις χαλαρές αρθρώσεις των φατνωμάτων της οροφής. Η δυτική ζωφόρος, που δεν καλύπτεται από την οροφή είναι απαλλαγμένη από επικαθίσεις εξαιτίας της συνεχούς έκθεσής της στη βροχή, ωστόσο έχουν απομειωθεί οι λεπτομέρειες των γλυπτών. Οι επικαθίσεις απομακρύνθηκαν με τη χρήση μεταλλικών εργαλείων, ενώ βοηθούσε και η ύγραση των επιφανειών πριν από τον καθαρισμό. Τα ίχνη χρωμάτων που εντοπίστηκαν κάτω από τις επικαθίσεις υπέδειξαν ότι το φόντος είχε μπλε απόχρωση, κάποιες από τις πτυχώσεις των υφασμάτων ήταν κόκκινες και πράσινοι ήταν οι βράχοι πάνω στους οποίους κάθονταν οι θεότητες. (94), (87)

Το 1973 η Εφορεία Αρχαιοτήτων Ακροπόλεως πραγματοποίησε εργασίες στους κίονες της βόρειας πλευράς του ναού, καθώς και στους κίονες, στον τοίχο και την οροφή της νότιας πλευράς. Το 1975 η ίδια Εφορεία Αρχαιοτήτων πραγματοποίησε εργασίες στους κίονες και στους τοίχους του σηκού της νότιας πλευράς του ναού, καθώς και στο αέτωμα και το επιστήλιο της δυτικής όψης.

Σε ορισμένες περιοχές του ναού έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες συντήρησης της επιφάνειας του μαρμάρου και του πωρόλιθου οι οποίες συνίστανται στη συμπλήρωση τμημάτων που λείπουν και στη σφράγιση των ρωγμών. Για τις εργασίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τσιμεντοκονιάματα και κονιάματα ποικίλης σύστασης, τα οποία σε αρκετά σημεία παρουσιάζουν φθορές, όπως απώλεια υλικού, συρρίκνωση και ρηγμάτωση. (85)



Εικόνα 2.2.2-1: Γλυπτός διάκοσμος στην ανατολική ζωφόρο πριν τον καθαρισμό (94)



Εικόνα 2.2.2-2: Γλυπτός διάκοσμος στην ανατολική ζωφόρο μετά τον καθαρισμό (94)

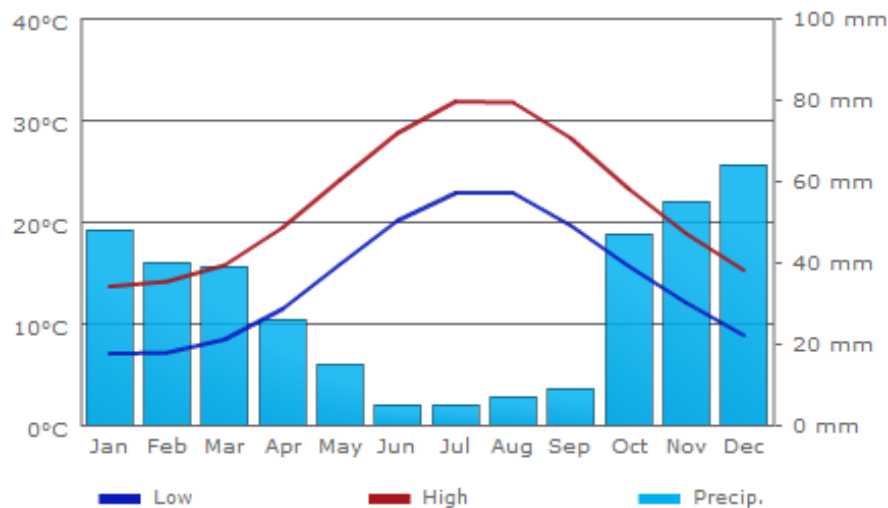
2.3 Περιβαλλοντικά δεδομένα για την πόλη της Αθήνας

2.3.1 Το κλίμα της Αθήνας

Το κλίμα της Αττικής είναι εύκρατο και εντάσσεται κλιματολογικά στον μεσογειακό τύπο κλίματος. Γενικά οι ηλιόλουστες ημέρες αποτελούν πολύ συνηθισμένο φαινόμενο ακόμα και τον χειμώνα. Βροχές σημειώνονται κυρίως από τον Οκτώβριο έως και τον Απρίλιο αλλά συνολικά ολόκληρο τον χρόνο τα ύψη βροχής είναι πολύ χαμηλά και δεν ξεπερνούν τα 400mm.

Πίνακας 2.3.1-1: Κλιματολογικά δεδομένα για την πόλη της Αθήνας (95)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	14	14	16	19	24	29	32	32	28	23	19	15
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	7	7	8	11	16	20	23	23	20	16	12	9
Μέση βροχόπτωση (mm)	48	40	39	26	15	5	5	7	9	47	55	64
Ημέρες βροχοπτώσεων	13	13	11	9	6	4	2	1	4	9	11	14
Ώρες ηλιοφάνειας	129	136	183	230	291	336	364	340	277	208	152	127

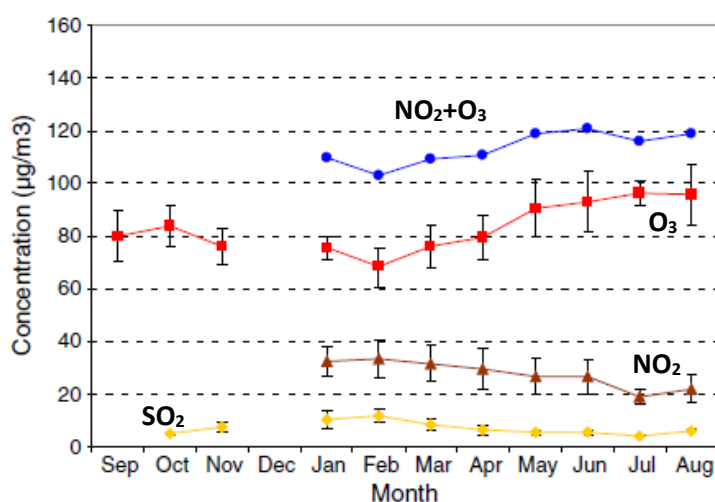


Διάγραμμα 2.3.1-1: Μεταβολή μέγιστων, ελάχιστων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων κάθε μήνα (95)

2.3.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα

Ο κύριος παράγοντας που δημιουργεί το νέφος είναι η υψηλή πυκνότητα του πληθυσμού σε συνδυασμό με την έντονη ρύπανση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (το 50% των οχημάτων της χώρας βρίσκεται στην Αθήνα, ενώ το 40% της βιομηχανικής δραστηριότητας της Ελλάδας λαμβάνει χώρα στην περιοχή του Θριασίου). Οι πιο σημαντικές πηγές ρύπων είναι η κίνηση των οχημάτων, και σε μικρότερο βαθμό επηρεάζει και η βιομηχανική δραστηριότητα. Επιπλέον τα πολύ ψηλά βουνά (μέχρι 1500m) που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο της Αττικής εμποδίζουν τη μετακίνηση αέριων μαζών, ενώ η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί την παραγωγή φωτοχημικών ρυπαντών. (96) Οι βασικότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι στην πόλη της Αθήνας είναι:

- Το διοξείδιο του θείου (SO_2) που παράγεται κυρίως από την κίνηση των οχημάτων, τους καυστήρες θέρμανσης, ενώ συμβάλουν και οι εκπομπές αερίων λόγω της βιομηχανικής δραστηριότητας. (96)
- Το διοξείδιο του αζώτου που προέρχεται κατά κύριο λόγο από τις εκπομπές των οχημάτων. (96)
- Το όζον (O_3) που σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των οξειδίων του αζώτου και των υδρογονανθράκων.
- Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που εκπέμπεται κυρίως από τους κινητήρες των οχημάτων (97)
- και τα αιωρούμενα σωματίδια (SPM) που εμφανίζονται εξαιτίας της επαναιώρησης σκόνης, της διάβρωσης του εδάφους, της μεταφοράς σκόνης από την Αφρική και ανθρωπογενών παραγόντων (98)



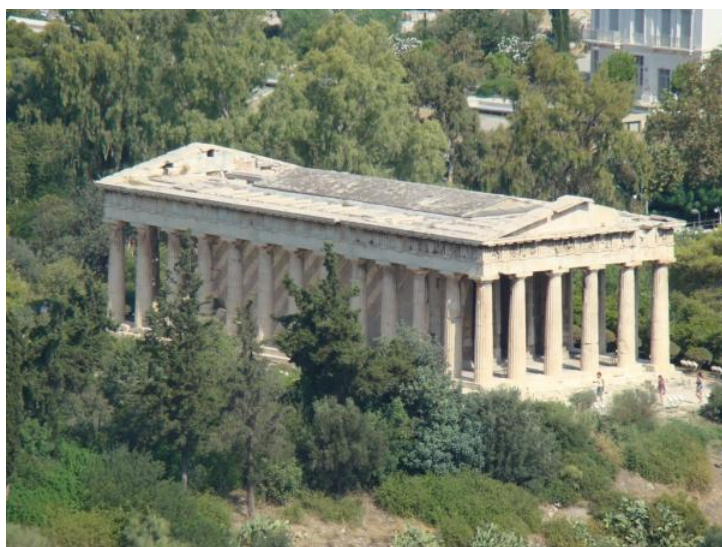
Διάγραμμα 2.3.2-1: Μέση συγκέντρωση ρύπων για ένα χρόνο για το λεκανοπέδιο της Αθήνας (96)

3. Πειραματικό μέρος

3.1 Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας

3.1.1 Εισαγωγή

Στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη της κατάστασης διατήρησης του ναού του Ηφαίστου με την μη καταστρεπτική μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η μελέτη χωρίζεται σε δύο βασικούς άξονες. Ο πρώτος άξονας είναι ο έλεγχος της επίδρασης των σημαντικότερων παραμέτρων, σε μία προσέγγιση προτυποποίησης της μεθόδου και ο δεύτερος άξονας είναι η εκτίμηση της συμβολής της υπέρυθρης θερμογραφίας στη διάγνωση του είδους και της έκτασης των επιφανειακών φθορών. Οι λόγοι που επιλέχθηκε το μνημείο για αυτή τη μελέτη – πέρα από την αρχαιολογική του αξία – είναι το γεγονός ότι αποτελείται κυρίως από ένα υλικό και η θέση του στο χώρο. Ο ναός βρίσκεται σε ανοιχτό χώρο, επομένως είναι εκτεθειμένος στον άνεμο και στην ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι ήταν δυνατό να εξεταστεί η επίδραση όλων των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Ταυτόχρονα ερευνήθηκε η συμβολή της θερμογραφίας στην παρακολούθηση του μνημείου (monitoring) και ποιες μεταβολές καταγράφει ανά εποχές. Τέλος, εντοπίστηκαν με την υπέρυθη θερμογραφία σημεία επιφανειακής φθοράς στο μνημείο.



Εικόνα 3.1.1-1: Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά

Κατά την πειραματική διαδικασία εφαρμόστηκε η παθητική υπέρυθη θερμογραφία στο ναό του Ηφαίστου από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον Ιούλιο του 2015. Εξετάστηκαν όλες οι όψεις του μνημείου, αφενός ώστε να προσδιοριστεί η θερμοκρασία της επιφάνειας του μαρμάρου σε σχέση με τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και αφετέρου για να μελετηθεί η επιφανειακή φθορά του κτιρίου. Στη νότια όψη υπήρχε η δυνατότητα να ληφθούν θερμικές εικόνες από διαφορετικές αποστάσεις, έτσι είναι δυνατό να εξεταστεί η επιρροή του παράγοντα

της απόστασης στα αποτελέσματα της θερμογραφίας. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις και διαδοχικές μέρες για να διαπιστωθούν μεταβολές της θερμοκρασίας.

3.1.2 Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων

Για το θερμοκρασιακό έλεγχο του μνημείου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη νότια όψη από τα 28, τα 24 και τα 3m, στην ανατολική όψη από τα 6m και στη βόρεια και στη δυτική όψη από τα 3m. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν στις 23 Ιανουαρίου 2015 μελετήθηκε η θερμοκρασία περιμετρικά των κιόνων της νότιας όψης από απόσταση 1,5m, ώστε να κατανοηθεί η διαφορά θερμοκρασίας σε επιφάνειες του ίδιου κίονα με διαφορετική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμογραφία υπεθύθη και για διαδοχικές μέρες (22 και 23 Ιανουαρίου, 7-10 Ιουλίου) για να διαπιστωθούν τυχόν μεταβολές στη θερμοκρασία του μνημείου.

Επιπλέον εξετάστηκε η επιφανειακή φθορά του μνημείου με σάρωση χαρακτηριστικών επιφανειών – που επιλέχθηκαν ύστερα από μακροσκοπική παρατήρηση – από απόσταση 1,5m στις 26 Μαΐου και στις 3, 7, 8, 9 και 10 Ιουλίου.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου και επιλέχθηκαν, επειδή με βάση τη βιβλιογραφία επιδρούν σημαντικά στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας. (72) Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στις ημερομηνίες που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα. Οι θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια ενός θερμο-υγρόμετρου. Οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου προέρχονται από τη βάση δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού του Ε.Μ.Π. (99) Η θερμοκρασία ανάκλασης ορίστηκε να έχει τιμή κατά ένα βαθμό χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος ο συντελεστής εκπομπής του μαρμάρου είναι ίσος με $\epsilon = 0,95$. (71)

Πίνακας 3.1.2-1: Ημερομηνίες μετρήσεων

Ημερομηνία	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Κατεύθυνση ανέμου
21/10/2014	22-33	23-59	550	1,6	S
19/11/2014	17-22	52-73	400	4,8	S
23/12/2014	14-19	37-45	480	0,8	SSW
22/01/2015	12-14	68-76	350	1,6	S
23/01/2015	8-12	51-75	400	8	SSW
13/02/2015	7-9	53-68	50	6	NNE
17/02/2015	8-19	35-58	151	8	NNE
20/03/2015	10-15	37-53	300	7,8	NNW
01/04/2014	17-23	40-66	710	8,3	SSW
29/04/2015	22-24	43-58	770	10	SSW
26/05/2015	25-32	25-40	650	9,7	SSW
03/07/2015	28-34	32-45	690	8,7	NNE
07/07/2015	31-40	23-40	820	9,2	N
08/07/2015	31-36	22-35	719	2,4	NNE
09/07/2015	30-37	24-44	807	2,9	SSW
10/07/2015	30-35	30-44	693	1,9	NNE

3.1.3 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. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμογραφικού συστήματος. (100)



Εικόνα 3.1.3-1: Θερμογραφικό σύστημα Flir B200 Western (100)

Πίνακας 3.1.3-1: 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) microbolometer

3.1.4 Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Ο ναός του Ηφαίστου μελετήθηκε αρχικά μακροσκοπικά, ώστε να αποκτηθεί μία εικόνα σχετικά με τους τύπους φθοράς που συναντώνται σε κάθε όψη και για να καθοριστούν οι επιφάνειες ελέγχου. Αρχικά ελέγχθηκε η ανωδομή και στη συνέχεια το κρηπίδωμα του μνημείου.

Ανωδομή

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι κίονες αποτελούνται κυρίως από πεντελικό μάρμαρο. Η παρατήρηση πραγματοποιήθηκε εξωτερικά, οπότε η αρίθμηση των κίωνων γίνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά.

Νότια όψη

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί περιληπτικά η κατάσταση διατήρησης των κίωνων της νότιας όψης για τον καθένα ξεχωριστά. Γενικά στις εσωτερικές όψεις των κίωνων παρατηρήθηκαν μαύρες επικαθίσεις, ενώ στις εξωτερικές όψεις εμφανίζονταν περιοχές πορτοκαλί χροιάς. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η νότια όψη του ναού.



Εικόνα 3.1.4-1: Η νότια όψη του ναού του Ηφαίστου

Κίονας 1: Παρατηρώντας τον 1^ο κίονα από τη δυτική γωνία διαπιστώνεται ότι έχει απωλέσει τις ραβδώσεις του. Επιπλέον είναι έντονη η απώλεια υλικού, ενώ υπάρχουν και ίχνη από σφαίρες με μορφή σπών.



Εικόνα 3.1.4-2: Απώλεια ραβδώσεων στον 1ο κίονα

Κίονας 2: Υπάρχει πλήθος ιχνών από σφαίρες, τα οποία παρατηρούνται και στο τμήμα του σηκού που βρίσκεται ακριβώς πίσω από τον κίονα. Παράλληλα παρατηρούνται ρηγματώσεις που πιθανώς να οφείλονται στην έκπλυση αργιλοπυριτικών προσμίξεων. Επιπλέον η βόρεια και η νότια όψη του κίονα εμφανίζουν διαφορετική επιδερμίδα.



Εικόνα 3.1.4-3: Επιδερμίδα στη νότια όψη του 2ου κίονα



Εικόνα 3.1.4-4: Επιδερμίδα στη βόρεια όψη του 2ου κίονα



Εικόνα 3.1.4-5: Ρηγματώσεις στον 2ο κίονα

Κίονας 3: Ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που έγιναν και για το 2^ο κίονα. Παράλληλα διακρίνονται περισσότερες προσμίξεις, καθώς και έντονες μαύρες επικαθίσεις.

Κίονας 4: Είναι εμφανής μία έντονη μετατόπιση πέντε σπονδύλων και μόνο ο 2^{ος} είναι στη θέση του. Επιπρόσθετα παρατηρούνται σημάδια από σφαίρες, προσμίξεις, αλλά και μικρορηγματώσεις και ρηγματώσεις εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων.

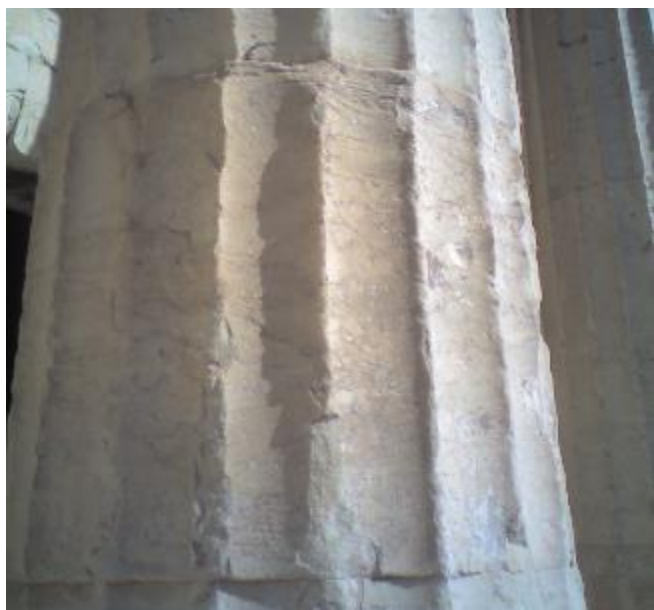


Εικόνα 3.1.4-6: Μετατόπιση σπονδύλων και σημάδια από σφαίρες στον 4ο κίονα

Κίονας 5: Στον 5^ο κίονα παρατηρείται επίσης μετατόπιση των σπονδύλων (εκτός των δύο ανώτερων). Επιπλέον είναι και εδώ εμφανή ίχνη από σφαίρες, απώλεια υλικού και φλεβώσεις.

Κίονας 6: Ο κίονας 6 παρουσιάζει έντονες ρηγματώσεις και οπές από σφαίρες. Ταυτόχρονα παρατηρείται απομείωση των ραβδώσεων στο κάτω μέρος του κίονα και απώλεια υλικού. Επιπλέον εμφανίζονται προσμίξεις και κονιάματα σφράγισης. Τέλος παρατηρείται μία μικρή μετατόπιση στο 2^ο και τον προτελευταίο σπόνδυλο.

Κίονας 7: Στον 7^ο κίονα εντοπίζονται φλεβώσεις και κονιάματα σφράγισης. Παράλληλα υπάρχουν σημάδια από βόλια, καθώς και απωμείωση των ραβδώσεων, απώλεια υλικού και μικρορηγματώσεις.



Εικόνα 3.1.4-7: Προσμίξεις στον 7ο κίονα

Κίονας 8: Εδώ παρουσιάζονται προσμίξεις καθώς και πολλά ίχνη από σφαίρες, ρηγματώσεις αλλά και απώλεια υλικού.

Κίονας 9: Για τον 9^ο κίονα ισχύει ότι και για τον 8^ο. Επιπλέον διακρίνεται μία μετατόπιση στον 3^ο και στον τελευταίο σπόνδυλο, ενώ είναι εμφανής και αποκόλληση υλικού.

Κίονας 10: Παρατηρούνται ρηγματώσεις ίχνη από σφαίρες και προσμίξεις. Επιπλέον ο 9^{ος} και ο 10^{ος} κίονας παρουσιάζουν έντονη απώλεια υλικού στο ίδιο ύψος της βόρειας όψης τους, που προφανώς προκλήθηκε σκόπιμα.



Εικόνα 3.1.4-8: Απώλεια υλικού στον 9ο κίονα



Εικόνα 3.1.4-9: Απώλεια υλικού στο 10ο κίονα

Κίονας 11: Παρατηρείται μετατόπιση του 4^{ου} σπονδύλου και ελάχιστη μετατόπιση του 2^{ου}. Επίσης υπάρχουν σημάδια από σφαίρες και έντονες επικαθίσεις στη βόρεια όψη του κίονα.

Κίονας 12: Υπάρχουν σημάδια από σφαίρες, ενώ εμφανίζονται και ρηγματώσεις, μικρορηγματώσεις και προσμίξεις. Επιπλέον εντοπίζεται ζαχαροειδής φθορά. Η αποφλοιώση που παρατηρείται οφείλεται πιθανότατα σε θερμική καταπόνηση. Στην εσωτερική πλευρά διακρίνεται σημάδι από βόλι καθώς και επικαθίσεις.

Κίονας 13: Στο 13^ο κίονα υπάρχουν επίσης σημάδια από σφαίρες. Επιπλέον διακρίνονται πάρα πολλές προσμίξεις (κυρίως αργιλοπυριτικές), ενώ η απουσία τους έχει προκαλέσει ρηγματώσεις, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν στερεωθεί με κάποιο κονίαμα (ίσως Mayer). Παρατηρούνται αποφλοιώσεις, καθώς ο κίονας έχει υποστεί θερμική καταπόνηση αντίστοιχα με το 12^ο κίονα. Επιπρόσθετα εντοπίζονται πολλές επικαθίσεις και ζαχαροειδής φθορά.



Εικόνα 3.1.4-10: Απώλεια προσμίξεων και ρηγματώσεις



Εικόνα 3.1.4-11: Συμπλήρωση με κονίαμα στα σημεία που έχουν εκπλυθεί οι προσμίξεις

Ανατολική όψη

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις για τους κίονες της ανατολικής όψης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανατολική όψη του ναού του Ηφαίστου.



Εικόνα 3.1.4-12: Η ανατολική όψη του ναού του Ηφαίστου

Κίονας 1: Είναι ο 13^{ος} κίονας της νότιας όψης.

Κίονας 2: Παρατηρείται ζαχαροειδής φθορά και η επιδερμίδα του μαρμάρου στη δυτική όψη είναι διαφορετική από ότι στην ανατολική. Υπάρχουν περισσότερες αποφλοιώσεις από ότι στον 1^ο κίονα. Στη βόρεια όψη διακρίνεται έντονη απομείωση της επιφάνειας, που μπορεί να οφείλεται στους ανέμους. Οι αρμοί ανάμεσα στους σπονδύλους δεν είναι εμφανείς.

Κίονας 3: Εμφανίζεται σαχαροειδής φθορά και η επιδερμίδα του μαρμάρου στη δυτική όψη είναι διαφορετική από ότι στην ανατολική. Επιπλέον διακρίνονται αποφλοιώσεις και γενιά εμφανίζονται αρκετές επικαθίσεις στη δυτική όψη του. Οι χαμηλοί σπόνδυλοι έχουν απωλέσει τις ραβδώσεις τους, ενώ στη βόρεια όψη έχουν απομειωθεί οι λεπτομέρειες.

Κίονας 4: Στον 4^ο κίονα είναι εμφανές σημάδι από βόλι, ενώ εμφανίζει και πολλές ρηγματώσεις. Στη βόρεια όψη του κίονα έχουν χαθεί οι ραβδώσεις πλήρως. Μία ρωγμή που σχηματίστηκε έχει συμπληρωθεί με κονίαμα. Τέλος, παρατηρείται ζαχαροειδής φθορά.

Κίονας 5: Στον 5^ο κίονα παρουσιάζονται προσμίξεις και ρηγματώσεις που έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα. Επιπλέον στη νότια όψη υπάρχει σημάδι από βόλι.

Κίονας 6: Παρατηρούνται ρηγματώσεις και απομείωση της επιφάνειας στη νότια όψη. Επιπλέον στη βόρεια όψη διακρίνονται έντονες ρηγματώσεις εξαιτίας της έκπλυσης προσμίξεων.



Εικόνα 3.1.4-13: Παρουσία προσμίξεων



Εικόνα 3.1.4-14: Ρηγματώσεις στη βόρεια πλευρά εξαιτίας της έκπλυσης προσμίξεων



Εικόνα 3.1.4-15: Μικρή μετατόπιση σπονδύλων λόγω προσμίξεων

Βόρεια όψη

Οι γενικές παρατηρήσεις για την κατάσταση της βόρειας όψης είναι ότι εμφανίζονται πολλές ρηγματώσεις και βελονοειδής διάβρωση. Επιπλέον από τον 4^ο κίονα και μετά δεν παρουσιάζονται επικαθίσεις, ενδεχομένως λόγω μικροκλίματος.

Κίονας 1: Είναι ο 6^{ος} κίονας της ανατολικής όψης.

Κίονας 2: Παρατηρείται βιοδιάβρωση, καθώς και ρηγματώσεις και βελονοειδής διάβρωση εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων. Ο κίονας εμφανίζει σημάδια από σφαίρες.

Κίονας 3: Στον 3^ο κίονα παρουσιάζεται βιοδιάβρωση, ενώ είναι εμφανής και έντονη απομείωση της επιφάνειας. Το μάρμαρο σε περιοχές εμφανίζει βελονοειδή διάβρωση λόγω απώλειας προσμίξεων. Ειδικά σε ενδιάμεσο σπόνδυλο παρατηρούνται ρηγματώσεις εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων. Εσωτερικά εντοπίζονται επικαθίσεις, ενώ διακρίνεται και ελάχιστη μετατόπιση σπονδύλων.



Εικόνα 3.1.4-16: Παρουσία βιοδιάβρωσης

Κίονας 4: Στον 4^ο κίονα είναι εμφανείς προσμίξεις, καθώς και ρηγματώσεις εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων. Επίσης είναι πιθανή η παρουσία βιοδιάβρωσης. Οι ρωγμές έχουν στερεωθεί με κονίαμα.

Κίονας 5: Για τον 5^ο κίονα ισχύει ό,τι και για τον 4^ο. Ωστόσο είναι εντονότερο το φαινόμενο της βελονοειδούς διάβρωσης. Στη δυτική όψη παρατηρείται μία μεγάλη ρωγμή.

Κίονας 6: Είναι εμφανείς προσμίξεις και ρηγματώσεις. Επίσης είναι ιδιαίτερα έντονο το φαινόμενο της βελονοειδούς φθοράς ιδιαίτερα στον 4^ο σπόνδυλο.

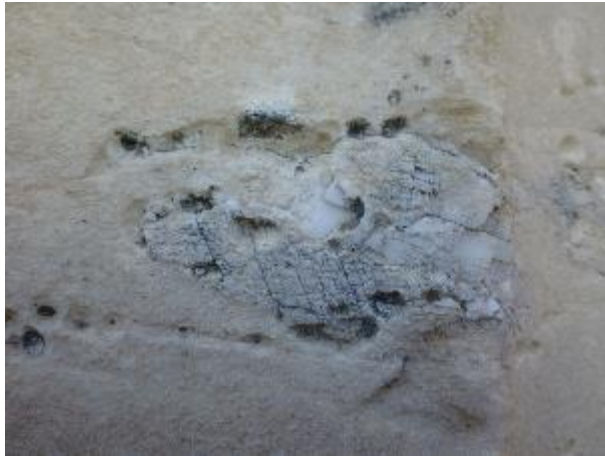
Κίονας 7: Ο 7^{ος} κίονας παρουσιάζει ρηγματώσεις, απώλεια υλικού και προσμίξεις. Είναι και σε αυτή την περίπτωση έντονο το φαινόμενο της βελονοειδούς φθοράς. Στον 4^ο σπόνδυλο υπάρχει ίχνος κονιάματος.



Εικόνα 3.1.4-17: Βελονοειδής διάβρωση λόγω έκλυσης προσμίξεων - Ενδολιθική βιοδιάβρωση

Κίονας 8: Ισχύει ό,τι και για τον 7^ο κίονα. Ειδικότερα στον τρίτο σπόνδυλο είναι έντονης η βελονοειδής διάβρωση. Στους τρεις πρώτους σπονδύλους στην ανατολική όψη παρατηρείται πλήρης απομείωση των ραβδώσεων.

Κίονας 9: Ισχύουν τα ίδια με τον 8^ο κίονα. Παρατηρείται πλήθος προσμίξεων και έντονη βελονοειδής διάβρωση, ενώ επιπλέον διακρίνεται απώλεια υλικού.



Εικόνα 3.1.4-18: Βελονοειδής διάβρωση

Κίονας 10: Στον 10^ο κίονα εντοπίζονται σημάδια από σφαίρες, προσμίξεις και απώλεια αυθεντικού υλικού. Στη νότια όψη είναι εμφανείς επικαθίσεις και μία οπή. Στο απέναντι τμήμα του σηκού, αλλά και στον 11^ο κίονα παρατηρούνται αντίστοιχες οπές.

Κίονας 11: Είναι εμφανείς προσμίξεις και ρηγματώσεις, αλλά και σημάδια από σφαίρες. Η ρωγμές είναι εκτεταμένες και μάλλον αυτό οφείλεται σε συνέργεια φαινομένων και όχι μόνο στην απώλεια προσμίξεων.

Κίονας 12: Είναι εκτεταμένο το φαινόμενο της βελονοειδούς διάβρωσης έως το πάνω μέρος του κίονα. Εμφανίζονται παράλληλα ρηγματώσεις αλλά και σημάδια από σφαίρες. Ταυτόχρονα εντοπίζονται σποραδικά και προσμίξεις.

Κίονας 13: Στον 4^ο σπόνδυλο παρατηρείται έντονη αποφλοίωση και βιοδιάβρωση. Επίσης υπάρχουν σημάδια από σφαίρες, προσμίξεις αλλά και βελονοειδής διάβρωση εξαιτίας της απώλειας των προσμίξεων. Γενικά έχει υποστεί φθορά σε μεγάλη έκταση.

Δυτική όψη

Τέλος, περιγράφεται η κατάσταση φθοράς της δυτικής όψης του ναού του Ηφαίστου που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.1.4-19: Η δυτική όψη του ναού του Ηφαίστου

Κίονας 1: Είναι ο 13^{ος} κίονας της βόρειας όψης.

Κίονας 2: Ο 2^{ος} κίονας παρουσιάζει φλεβώσεις, καθώς και ρηγματώσεις και μικρορηγματώσεις. Ταυτόχρονα υπάρχει σημάδι από βόλι. Στη βόρεια όψη υπάρχει έντονη απώλεια υλικού που πιθανώς να οφείλεται σε διαφορετική έκθεση στη θερμότητα εξαιτίας πυρκαγιάς (όπως και στον 1^ο κίονα). Γενικά και στο 2^ο κίονα είναι σοβαρές οι φθορές.

Κίονας 3: Εμφανίζει και αυτός μεγάλες φθορές. Παρατηρούνται σημάδια από σφαίρες, ρηγματώσεις και συμπληρώσεις με κονιάματα. Οι φθορές στον 3^ο κίονα φαίνεται να έχουν προκληθεί από συνέργεια φαινομένων.

Κίονας 4: Και ο 4^{ος} κίονας εμφανίζει έντονες φθορές. Παρατηρούνται επιπλέον ρηγματώσεις, μικρορηγματώσεις και προσμίξεις. Οι ραβδώσεις έχουν χαθεί, ενώ επί των ραβδώσεων παρατηρούνται και αποκολλήσεις.

Κίονας 5: Ο 5^{ος} κίονας παρουσιάζει καλύτερη κατάσταση διατήρησης από τους προηγούμενους. Στη δυτική όψη παρατηρείται απώλεια ραβδώσεων, ενώ στην ανατολική όχι. Επίσης υπάρχουν πολλά σημάδια από σφαίρες και διακρίνεται απώλεια υλικού.

Κίονας 6: Είναι ο 1^{ος} κίονας της νότιας όψης.



Εικόνα 3.1.4-20: Αποκόλληση επί των ραβδώσεων

Κρηπίδωμα

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το κρηπίδωμα αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες, οι κατώτερες αποτελούνται από πωρόλιθο και οι δύο ανώτερες από πεντελικό μάρμαρο.



Εικόνα 3.1.4-21: Κρηπίδωμα ανατολικής όψης

Δυτική όψη

Η 4^η βαθμίδα του κρηπιδώματος δεν είναι εμφανής. Επίσης εντοπίζονται πορτοκαλοκάστανες περιοχές στο κρηπίδωμα περιμετρικά του ναού, κυρίως χαμηλά, που πιθανώς να οφείλονται στην παρουσία βιοδιάβρωσης.



Εικόνα 3.1.4-22: Πορτοκαλοκάστανη κρούστα (μάλλον βιοδιάβρωση)

Συχνά διακρίνονται αρμολογήματα πιθανώς από τσιμέντο, που κατά τόπους έχουν χρησιμοποιηθεί για εκτεταμένες συμπληρώσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις φαίνεται ότι έχουν προστεθεί και χάλικες στο κονίαμα.



Εικόνα 3.1.4-23: Αρμολόγημα με κονίαμα τσιμέντου

Ακριβώς κάτω από κάθε κίονα, αλλά και στη μέση της απόστασης των κίωνων παρατηρούνται χαρακτηριστικές οπές ως προς τη γεωμετρία τους. Η χρησιμότητά τους ωστόσο δεν είναι σαφής. Στη βορειοδυτική γωνία εντοπίζεται απώλεια μαρμάρου.



Εικόνα 3.1.4-24: Οπές χαρακτηριστικής γεωμετρίας

Βόρεια όψη

Η 4^η βαθμίδα του κρηπιδώματος παρουσιάζει έντονη φθορά. Η 1^η βαθμίδα είναι διατηρημένη σε καλύτερη κατάσταση στη βόρεια όψη σε σύγκριση με τη δυτική. Ταυτόχρονα έχουν αναπτυχθεί φυτικοί οργανισμοί και βιοδιάβρωση. Στη βόρεια όψη η βιολογική φθορά είναι εντονότερη, γεγονός που αποδίδεται στην περιορισμένη έκθεση της όψης στην ηλιακή ακτινοβολία.

Στο κρηπίδωμα που βρίσκεται ανάμεσα στο 2^ο και τον 3^ο κίονα, τον 4^ο και τον 5^ο, τον 5^ο και τον 6^ο και τον 9^ο και το 10^ο κίονα υπάρχουν οι χαρακτηριστικές οπές.



Εικόνα 3.1.4-25: Φωλιές στη βόρεια όψη. Από το χρώμα των λίθων διαπιστώνεται και η εκτεταμένη βιοδιάβρωση σε αυτή την όψη.

Σε όλη την έκταση του κρηπιδώματος της βόρειας όψης έχει αναπτυχθεί βιολογική φθορά, με αποτέλεσμα να μη φαίνεται η επιφάνειά του. Ωστόσο στην 3^η βαθμίδα (ιδιαίτερα σε σημεία προς την ανατολή) έχει αποκαλυφθεί ο λίθος από το στρώμα της βιοδιάβρωσης και φαίνεται αρκετά συμπαγής.



Εικόνα 3.1.4-26: Βιοδιάβρωση στη βόρεια όψη



Εικόνα 3.1.4-27: Βιοδιάβρωση - Περιοχή που φαίνεται ο συμπαγής λίθος

Ανατολική όψη

Η ανατολική όψη παρουσιάζει περιορισμένη ανάπτυξη βιολογικής φθοράς, καθώς είναι περισσότερο εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Και σε αυτή την όψη είναι εμφανείς συμπληρώσεις με κονιάματα τσιμεντού. Επιπρόσθετα παρατηρούνται πορτοκαλοκάστανες και γκρίζες περιοχές.

Και σε αυτή την όψη εντοπίζεται χαρακτηριστική οπή κάτω από τον τρίτο κίονα. Επιπλέον είναι εμφανείς οι φυτικοί οργανισμοί, καθώς και περιπτώματα περιστεριών.



Εικόνα 3.1.4-28: Γκρίζα περιοχή



Εικόνα 3.1.4-29: Πορτοκαλοκάστανη και γκρίζα περιοχή

Νότια όψη

Από τον 1^ο έως τον 5^ο κίονα και από το 10^ο έως το 13^ο παρατηρούνται οπές κάτω από τους κίονες και στη μέση της απόστασή τους. Επιπλέον σε αυτή την όψη είναι εμφανείς και οι τέσσερις βαθμίδες του κρηπιδώματος, αντίθετα με τις υπόλοιπες όψεις που η 3^η και η 4^η βαθμίδα ήταν αρκετά διαβρωμένες. Ταυτόχρονα εντοπίζονται και εδώ φυτικοί οργανισμοί και βιοδιάβρωση μικρής έκτασης, εφόσον η όψη αυτή είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος, έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα (πιθανώς τσιμεντιτικής σύστασης) για τη συμπλήρωση των κενών.

4. Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

4.1 Αποτελέσματα θερμογραφίας υπέρυθρου ανά όψη

Το μνημείο εξετάστηκε με την υπέρυθρη θερμογραφία μακροσκοπικά, αλλά μελετήθηκαν και λεπτομερώς τα επιμέρους δομικά στοιχεία. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα υπέρυθρης θερμογραφίας ανά όψη και ανά εποχή. Επίσης θα εξεταστεί η επιρροή της απόστασης στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας.

4.1.1 Αποτελέσματα υπέρυθρης θερμογραφίας κατά τη μελέτη της νότιας όψης ανά εποχές

Στο πρώτο στάδιο παρουσιάζονται οι γενικές λήψεις της νότιας όψης από κάθε ημέρα μετρήσεων, για να διαπιστωθεί σε ποιες περιοχές του μνημείου εμφανίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες κάθε εποχή. Η νότια όψη επιλέχθηκε, αφενός επειδή υπήρχε η δυνατότητα λήψης θερμικών εικόνων από μεγάλη απόσταση και αφετέρου επειδή ακτινοβολείται για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στη μέρα. Οι λήψεις των εικόνων πραγματοποιήθηκαν όλες τις μέρες περίπου την ίδια ώρα, στις 11.00 π.μ. και στη 1.00 μ.μ. από απόσταση 24m. Οι θερμικές εικόνες αποτελούν προϊόν σύνθεσης περισσότερων από ενός θερμογραφήματων. Στις θερμικές εικόνες παρουσιάζονται οι ισόθερμες των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών.

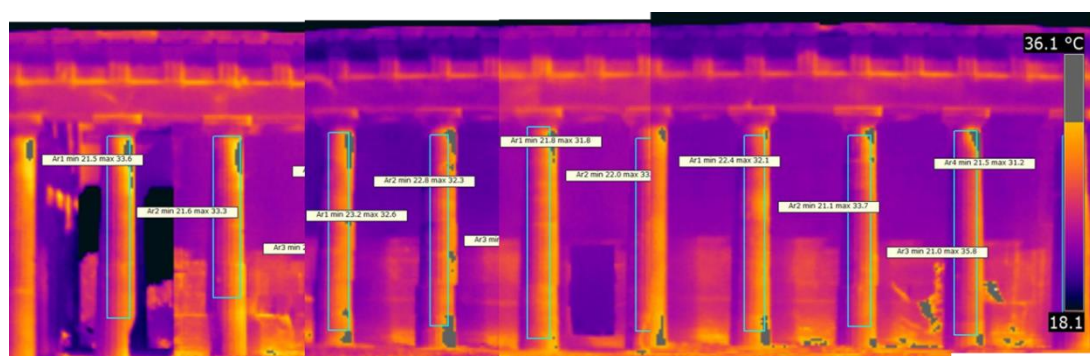
21 Οκτωβρίου 2014

Στις 21/10/2014 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις από τις 11.07 έως τις 11.40 π.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν $T_{env.} = 31^{\circ}C$, η σχετική υγρασία ήταν ίση με $RH = 24\%$, η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 1,6km/h με νότια κατεύθυνση και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν $550W/m^2$.

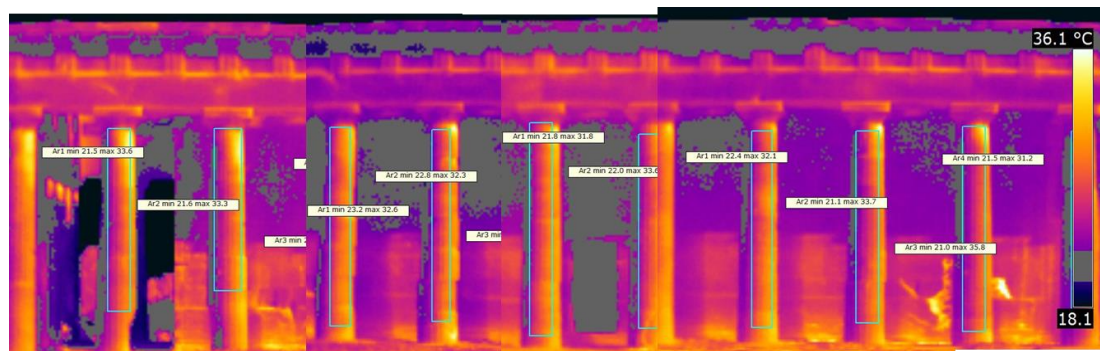
Το εύρος των θερμοκρασιών που καταγράφονται σε όλη την όψη είναι από $36,1^{\circ}C$ έως $18,1^{\circ}C$. Οι θερμότερες περιοχές (Θερμική εικόνα 4.1.1-1) εντοπίζονται στην ανατολική όψη των κίωνων λόγω της μεγάλης έκθεσης της πλευράς στην ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι οι υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στους πρώτους σπονδύλους και στα κιονόκρανα. Στα σημεία αυτά δημιουργούνται γωνίες μεταξύ του πρώτου σπονδύλου και του κρηπιδώματος και του τελευταίου σπονδύλου και του κιονόκρανου. Συνεπώς οι υψηλές τιμές της θερμοκρασίας στα σημεία αυτά μπορεί να οφείλονται σε ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της γεωμετρίας. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στους κίονες ανήκουν στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ $33^{\circ}C$ έως $35,8^{\circ}C$. Παράλληλα θερμά παρουσιάζονται και τα τμήματα στο κάτω μέρος των μετοπών με τη μέγιστη

θερμοκρασία να αγγίζει τους 30,6°C. Υψηλή θερμοκρασία παρουσιάζει και το κονίαμα στην τοιχοποιία πίσω από το 10^ο κίονα.

Οι ελάχιστες θερμοκρασίες (Θερμική εικόνα 4.1.1-2) εμφανίζονται κυρίως καθ' ύψος στη δυτική πλευρά των κίωνων γεγονός που οφείλεται στη μικρή έκθεση των επιφανειών αυτών στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των κίωνων βρίσκονται κοντά στους 21°C. Επιπλέον η άνω περιοχή των μετοπών και το γείσο εμφανίζουν ψυχρές περιοχές. Στο γείσο είναι έντονη η απώλεια υλικού, που στη θερμογραφία αποτυπώνεται με χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ στο άνω τμήμα των μετοπών δημιουργούνται σκιάσεις εξαιτίας των υπερκείμενων προεξοχών. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες στην περιοχή αυτή πλησιάζουν τους 20°C. Χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται και το άνω τμήμα του τοίχου εξαιτίας των σκιάσεων.



Θερμική εικόνα 4.1.1-1: Ισόθερμες μεγίστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 21/10/2014



Θερμική εικόνα 4.1.1-2: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 21/10/2014

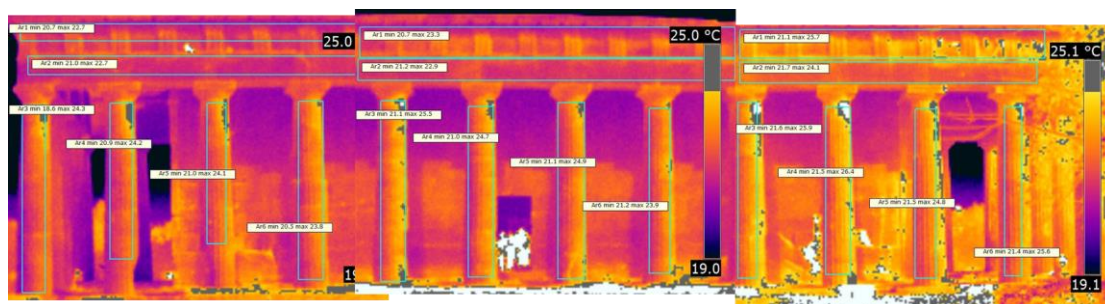
19 Νοεμβρίου 2014

Στις 19/11/2014 πραγματοποιήθηκε σάρωση της νότιας όψης σε δύο χρονικές περιόδους, στις 11.04 έως 11.15 π.μ. και στη 01.01 έως 01.05 μ.μ. Την πρώτη χρονική περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν ίση με 17°C και η σχετική υγρασία με 62%. Η μέση ταχύτητα του ανέμου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ήταν 4,8km/h με νότια κατεύθυνση και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 400W/m².

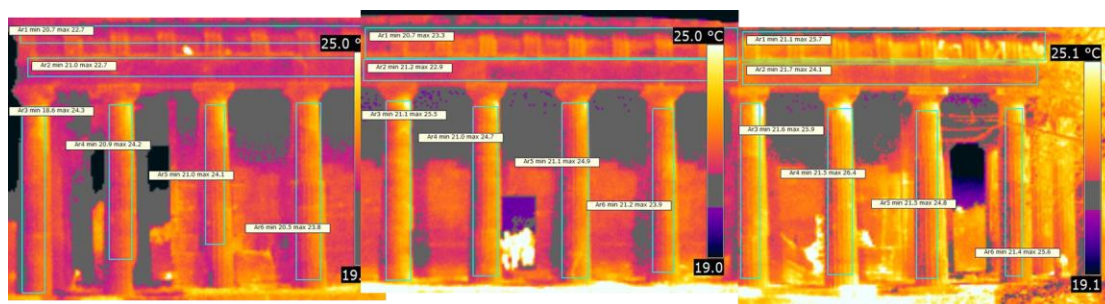
Η νότια όψη εμφανίζει θερμοκρασίες από 19,1°C έως 25,1°C. Οι θερμότερες επιφάνειες εμφανίζονται πάλι στις ανατολικές όψεις των κίωνων στις γωνίες που

σχηματίζουν ο πρώτος σπόνδυλος με το κρηπίδωμα και οι τελευταίοι σπόνδυλοι με τα κιονόκρανα. Ωστόσο από τον 9^ο κίονα και μετά παρουσιάζονται θερμές περιοχές και καθ' ύψος της ανατολικής όψης των κίωνων, επειδή τα σημεία αυτά είναι περισσότερο εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στους κίονες ανήκουν στο εύρος μεταξύ 24°C και 26°C. Επιπλέον υψηλές θερμοκρασίες εντοπίζονται στα τρίγλυφα και σε τμήματα της ζωφόρου. Στην περιοχή του θριγκού η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 25,7°C.

Οι ψυχρότερες περιοχές εντοπίζονται καθ' ύψος στη δυτική πλευρά των κίωνων η οποία δέχεται τη χαμηλότερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, στο γείσο και στον τοίχο του σηκού. Οι ελάχιστες τιμές των κίωνων βρίσκονται κοντά στους 19°C, ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία που καταγράφεται στο θριγκό είναι 20,4°C.



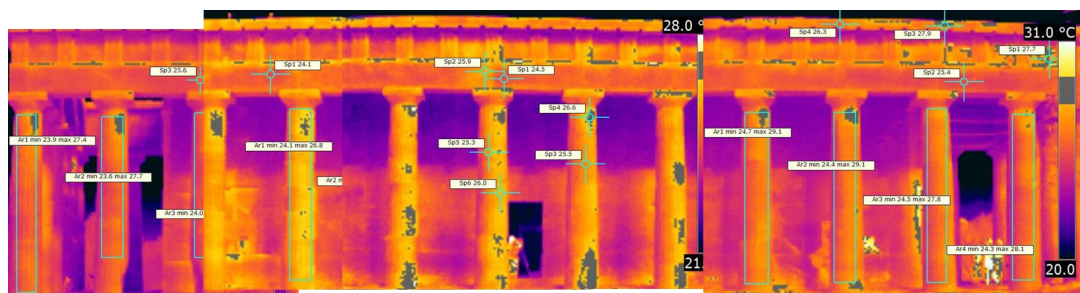
Θερμική εικόνα 4.1.1-3: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 19/11/2014 για την πρώτη χρονική περίοδο



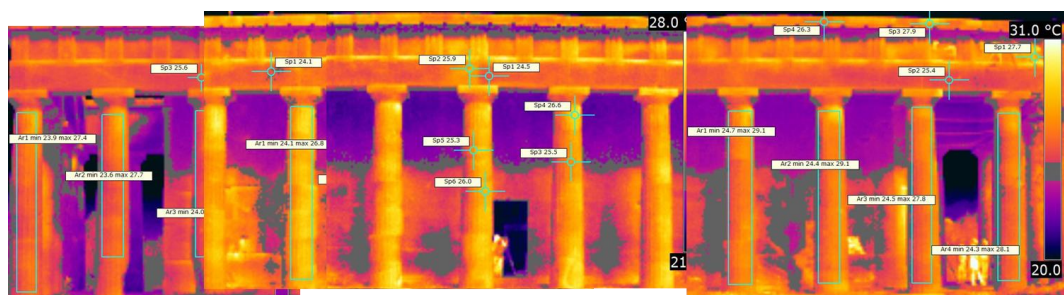
Θερμική εικόνα 4.1.1-4: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 19/11/2014 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη περίοδο, από τη 01.01 έως τη 01.05 μ.μ., η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι ίση με 17°C και η σχετική υγρασία με 60%. Παρατηρώντας τις θερμικές εικόνες διαπιστώνεται ότι οι θερμότερες περιοχές των κίωνων εμφανίζονται στην ανατολική όψη τους, στις γωνίες που σχηματίζουν οι κίονες με το κρηπίδωμα και τα κιονόκρανα. Παράλληλα ο 5^{ος}, ο 6^{ος} και ο 8^{ος} κίονας εμφανίζουν θερμές περιοχές και στη νότια όψη τους. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στους κίονες κυμαίνονται μεταξύ 27°C και 29°C. Στο κάτω μέρος των μετοπών, καθώς και σε σημεία των παραστάσεων της ζωφόρου παρατηρούνται επίσης υψηλές θερμοκρασίες έως και 30°C.

Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των κίωνων, που αποτυπώνονται στη Θερμική εικόνα 4.1.1-6, εμφανίζονται πάλι σε όλο το ύψος της δυτικής τους όψης και οι τιμές τους βρίσκονται ανάμεσα στους 23°C έως 24,7°C. Στην ανώτερη περιοχή των μετοπών που δημιουργούνται σκιάσεις εντοπίζονται, επίσης, ψυχρά σημεία, των οποίων η θερμοκρασία αγγίζει τους 22°C.



Θερμική εικόνα 4.1.1-5: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 19/11/2014 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



Θερμική εικόνα 4.1.1-6: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 19/11/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

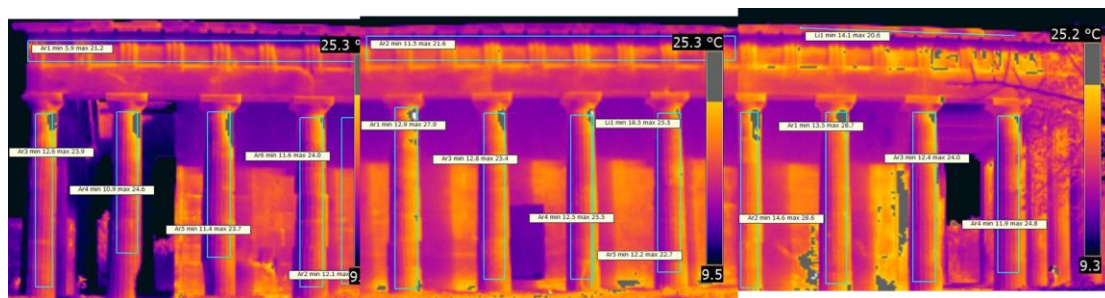
23 Δεκεμβρίου 2014

Στις 23/12/2014 έλαβε χώρα θερμογραφικός έλεγχος από τις 11.44 έως τις 11.55 π.μ. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 16°C, η σχετική υγρασία ήταν ίση με 45%, ο άνεμος ήταν νότιος νοτιοδυτικός με ταχύτητα 0,8km/h και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν ίση με 480W/m².

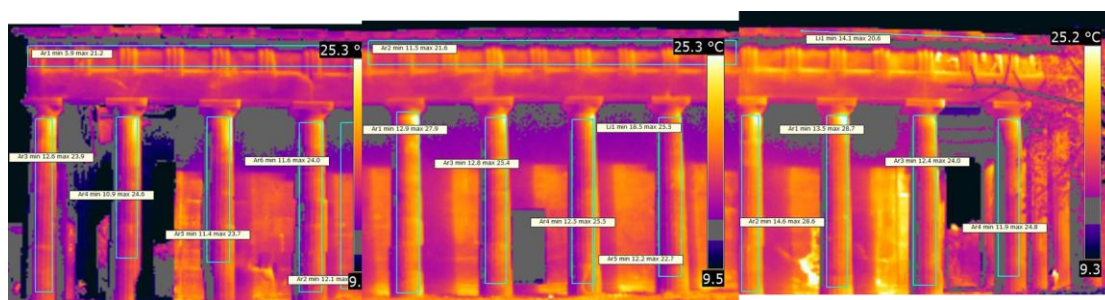
Η νότια όψη παρουσιάζει θερμοκρασίες από 9,3°C έως 25,2°C. Οι μέγιστες θερμοκρασίες της όψης εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση στην ανατολική όψη των κίωνων και συγκεκριμένα στις γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των τελευταίων σπονδύλων και των κιονόκρανων. Στον 5^ο και στο 10^ο κίονα παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες και στους πρώτους σπονδύλους. Οι τιμές των υψηλών θερμοκρασιών βρίσκονται μεταξύ 25°C και 28°C. Επιπρόσθετα θερμά σημεία παρατηρούνται και στο κάτω μέρος των μετοπών και σε περιοχές των παραστάσεων της ζωφόρου. Η μέγιστη θερμοκρασία του θριγκού είναι 29°C.

Οι ψυχρότερες περιοχές εντοπίζονται όπως και τις προηγούμενες φορές στις δυτικές όψεις των κίωνων σε όλο το ύψος τους με θερμοκρασίες από 11°C έως 14°C. Επιπλέον στο άνω τμήμα των μετοπών παρουσιάζονται ψυχρά σημεία με θερμοκρασία κοντά

στους 11,5°C, λόγω των σκιάσεων. Χαμηλές είναι και οι θερμοκρασίες στο άνω τμήμα του τοίχου, επειδή δεν εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία.



Θερμική εικόνα 4.1.1-7: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 23/12/2014



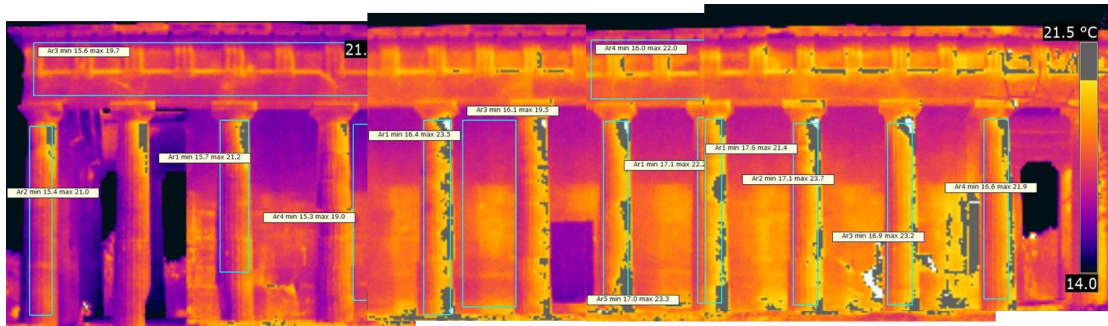
Θερμική εικόνα 4.1.1-8: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 23/12/2014

22 Ιανουαρίου 2015

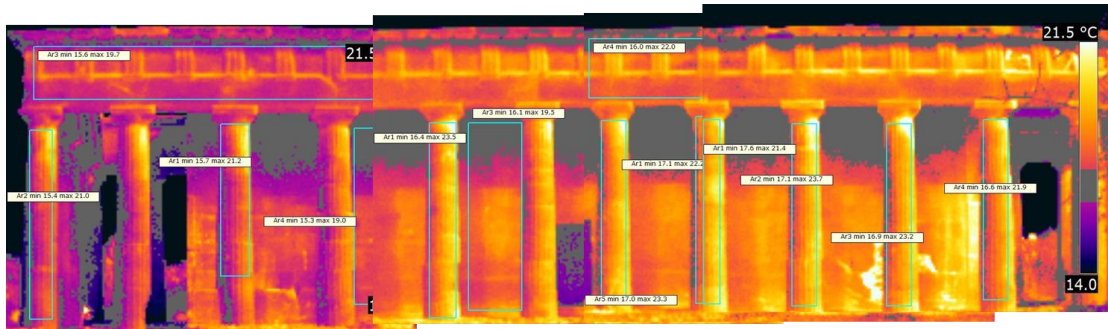
Στις 22/01/2015 σαρώθηκε η νότια όψη του ναού του Ηφαίστου από τις 11.48 έως τις 11.57 π.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 13°C, η σχετική υγρασία ήταν ίση με 76%, ο άνεμος ήταν νότιος με ταχύτητα 1,6km/h και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ανήλθε στα 350W/m².

Οι θερμότερες περιοχές εντοπίζονται από τον 5^ο έως τον 11^ο κίονα στην ανατολική όψη σε όλο το ύψος τους. Από τον 1^ο έως τον 4^ο κίονα παρουσιάζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες στις γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των κιονόκρανων και των τελευταίων σπονδύλων. Οι μέγιστες θερμοκρασίες των κιόνων ανήκουν στο εύρος μεταξύ 21°C και 23,7°C. Επίσης υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν και τα κάτω τμήματα των μετοπών, καθώς και η επιφάνεια του τοίχου πίσω από τον 11^ο κίονα. Η μέγιστη θερμοκρασία του θριγκού είναι 23°C.

Οι ψυχρότερες περιοχές παρατηρούνται και αυτή τη φορά στη δυτική όψη των κιόνων σε όλο το ύψος και παρουσιάζουν θερμοκρασίες μεταξύ 15,2°C και 17,6°C. Ψυχρές επιφάνειες εντοπίζονται και στο γείσο, όπου παρατηρείται απώλεια υλικού, αλλά και στο άνω τμήμα των μετοπών, όπου δημιουργούνται σκιές. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες στο θριγκό παίρνουν τιμές μεταξύ 15,6°C και 16°C. Ψυχρές είναι και οι επιφάνειες στο ανώτερο τμήμα του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-9: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 22/01/2015



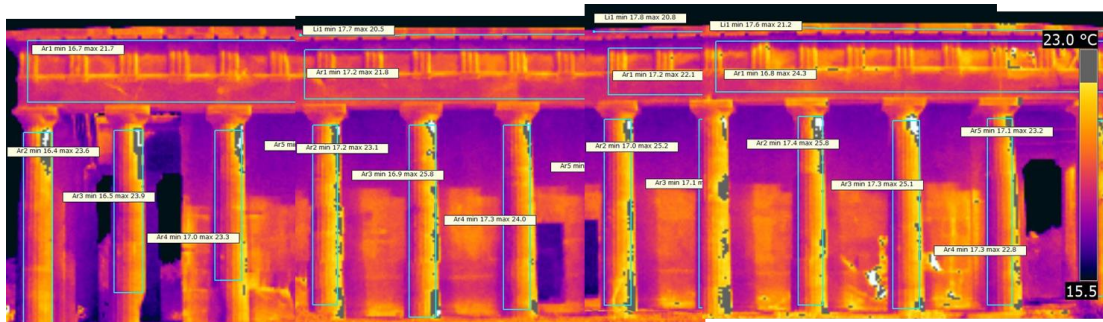
Θερμική εικόνα 4.1.1-10 Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 22/01/2015

23 Ιανουαρίου 2015

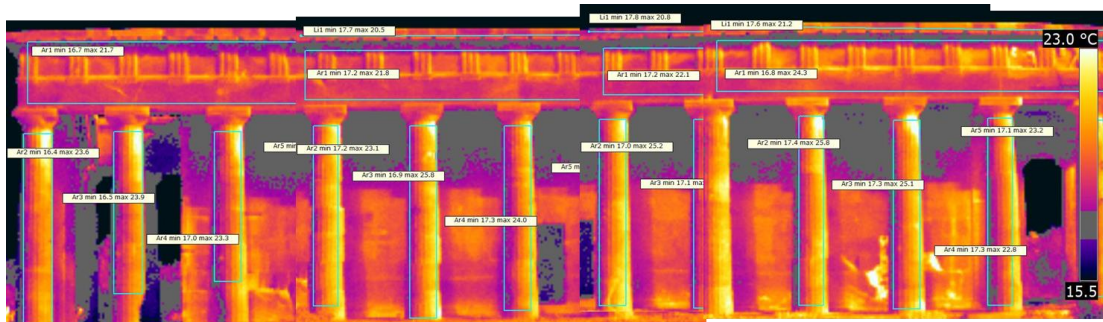
Στις 23/01/2015 οι μετρήσεις έλαβαν χώρα το χρονικό διάστημα από τις 11.39 έως τις 11.49 π.μ. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν ίση με 13°C και η σχετική υγρασία ίση με 75%. Ο άνεμος είχε μέση ταχύτητα 8km/h, η κατεύθυνσή του ήταν νότια νοτιοδυτική και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν ίση με 400W/m².

Οι θερμότερες περιοχές βρίσκονται στην ανατολική όψη των κίωνων, στο κάτω μέρος των μετοπών και στο κονίαμα της τοιχοποιίας πίσω από το 10^ο κίονα. Συγκεκριμένα στους κίονες 3-11 εκτείνονται θερμές επιφάνειες σε όλο το ύψος της ανατολική όψης. Αντίθετα στους κίονες 1 και 2 οι θερμές περιοχές εντοπίζονται στην γωνία που σχηματίζει ο τελευταίος σπόνδυλος με το κιονόκρανο. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στους κίονες κυμαίνονται μεταξύ 23,2°C και 25,8°C. Επιπλέον εντοπίζονται σημεία στο κάτω τμήμα των μετοπών με υψηλές θερμοκρασίες που αγγίζουν τους 26°C.

Επιπλέον οι ψυχρότερες περιοχές εμφανίζονται όπως και σε όλες τις προηγούμενες μετρήσεις στη δυτική όψη των κίωνων (16,4°C-17,2°C), στο άνω τμήμα των μετοπών (16,4°C-17,4°C) και στην ανώτερη περιοχή του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-11: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 23/01/2015



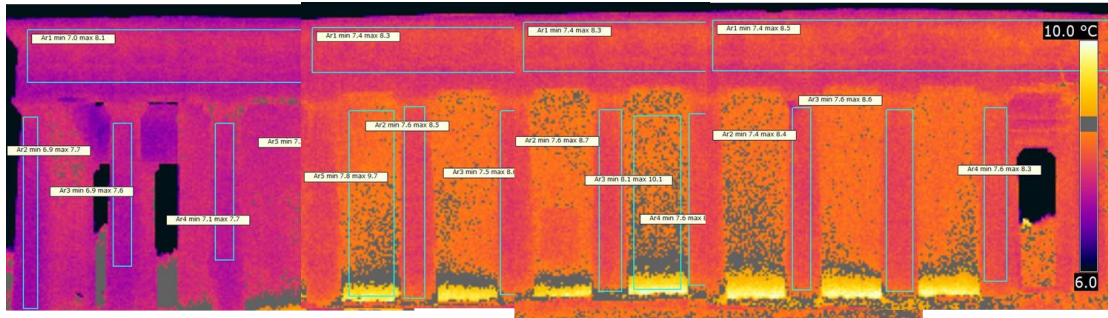
Θερμική εικόνα 4.1.1-12: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 23/01/2015

13 Φεβρουαρίου

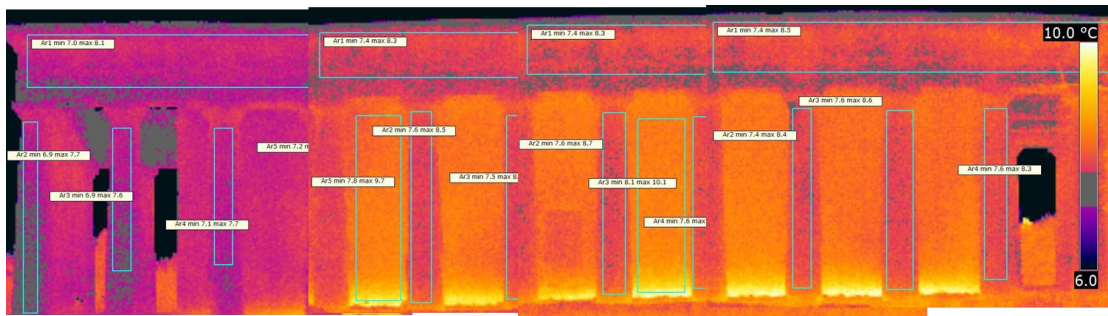
Στις 13/02/2015 πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος της νότιας όψης σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, από τις 10.50 έως τις 10.59 π.μ. και από τη 01.13 έως τη 01.18 μ.μ. Την πρώτη χρονική περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν ίση με 8°C και η σχετική υγρασία με 53%. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της ημέρας η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 6km/h με κατεύθυνση βόρεια βορειοανατολική και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 50W/m².

Οι θερμότερες περιοχές σε αυτή την περίπτωση δεν είναι εντοπισμένες στα ίδια σημεία. Συγκεκριμένα στους κίονες 1 έως 3 παρατηρούνται θερμές περιοχές στα κιονόκρανα, ενώ στους κίονες 4 έως 10 είναι θερμότερες οι επιφάνειες των πρώτων σπονδύλων. Οι μέγιστες θερμοκρασίες των κίωνων αγγίζουν τους 9°C. Παράλληλα εντοπίζονται θερμά σημεία στον τοίχο και ιδιαίτερα στις κατώτερες επιφάνειες, με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 10,1°C. Στο θριγκό δεν παρατηρούνται τμήματα με υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίστοιχα οι ψυχρές περιοχές κατανέμονται περισσότερο ομοιόμορφα σε όλους τους κίονες. Ωστόσο στους κίονες 1 έως 3 εμφανίζονται ψυχρές επιφάνειες μεγαλύτερης έκτασης. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες στους κίονες παίρνουν τιμές μεταξύ 5,1°C και 7,6°C. Επίσης παρουσιάζονται ψυχρά τμήματα στο γείσο και στο επιστύλιο, με θερμοκρασίες κοντά στους 7,4°C.



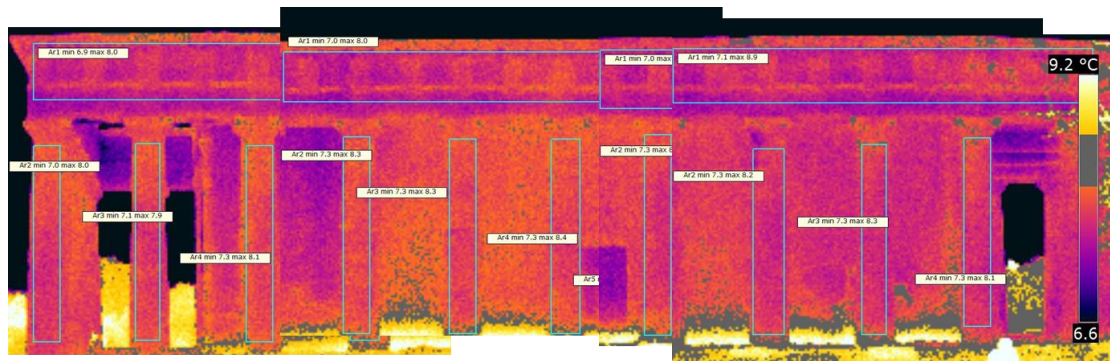
Θερμική εικόνα 4.1.1-13: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 13/02/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



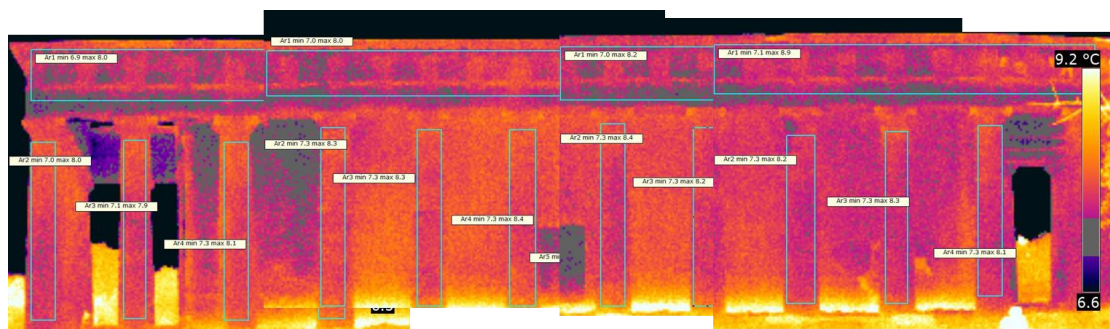
Θερμική εικόνα 4.1.1-14: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 13/02/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κατά τη δεύτερη χρονική περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος παρέμεινε στους 8°C, ενώ η σχετική υγρασία αυξήθηκε στο 61%. Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στα κιονόκρανα και στους πρώτους σπονδύλους σε όλους του κίονες της νότιας όψης. Παρόλα αυτά στον τρίτο κίονα κατανέμονται ομοιόμορφα οι υψηλές τιμές σε όλο το ύψος του. Η μέγιστη θερμοκρασία στους κίονες είναι 8,9°C. Επιπλέον διακρίνονται θερμά σημεία στο γείσο και στη ζωφόρο. Η μέγιστη θερμοκρασία του θριγκού είναι 8,8°C.

Από την άλλη πλευρά οι ελάχιστες θερμοκρασίες δεν εντοπίζονται σε συγκεκριμένα μέρη αλλά έχουν κατανεμηθεί ομοιογενώς στη νότια όψη όλων των κίωνων. Ωστόσο στον πρώτο και το δεύτερο κίονα παρατηρούνται ψυχρές περιοχές μεγαλύτερης έκτασης. Η ελάχιστη θερμοκρασία των κίωνων είναι περίπου 7°C. Επιπρόσθετα, το γείσο και οι μετόπες παρουσιάζουν ψυχρά σημεία, με θερμοκρασίες κοντά στους 7°C.



Θερμική εικόνα 4.1.1-15: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 13/02/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



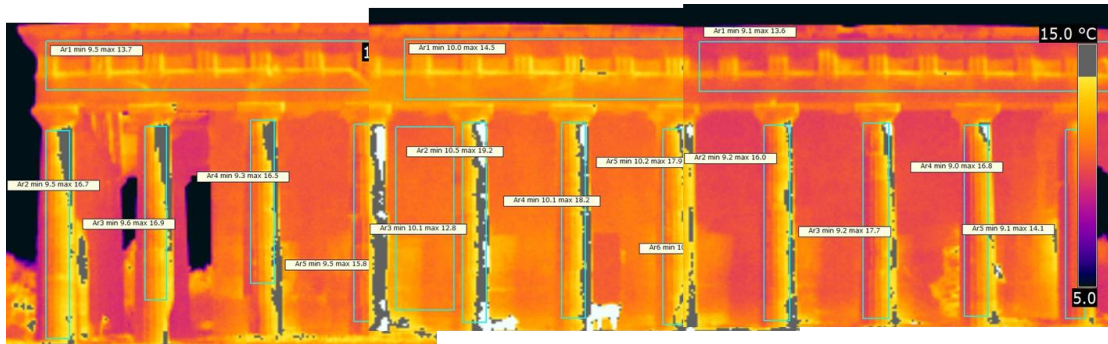
Θερμική εικόνα 4.1.1-16: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 13/02/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

17 Φεβρουαρίου 2015

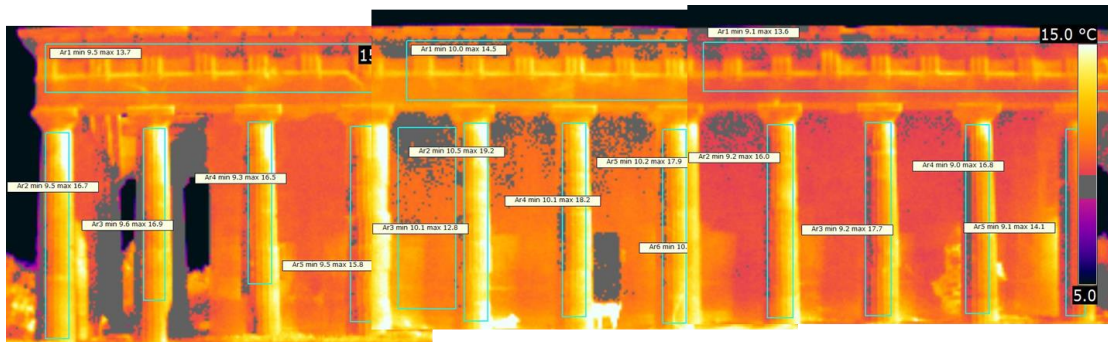
Στις 17/02/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.23 π.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 15°C και η σχετική υγρασία 46%. Ο άνεμος είχε κατεύθυνση βόρεια βορειοανατολική και ταχύτητα 8km/h. Η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 151W/m².

Οι θερμότερες περιοχές εμφανίζονται στην ανατολική όψη των κίωνων. Συγκεκριμένα από τον 2^ο έως τον 9^ο κίονα οι θερμές περιοχές κατανέμονται σε όλο το ύψος της ανατολικής όψης. Στον 1^ο και το 10^ο κίονα εντοπίζονται στις άνω και κάτω γωνίες. Οι μέγιστες θερμοκρασίες παίρνουν τιμές μεταξύ 16,5°C και 19°C.

Οι ψυχρές περιοχές εμφανίζονται σε όλο το ύψος των δυτικών όψεων των κίωνων με θερμοκρασίες μεταξύ 7,9°C και 9,5°C. Επιπλέον χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται και στην άνω επιφάνεια των μετοπών και στο γείσο (9°C-10°C)



Θερμική εικόνα 4.1.1-17: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 17/02/2015

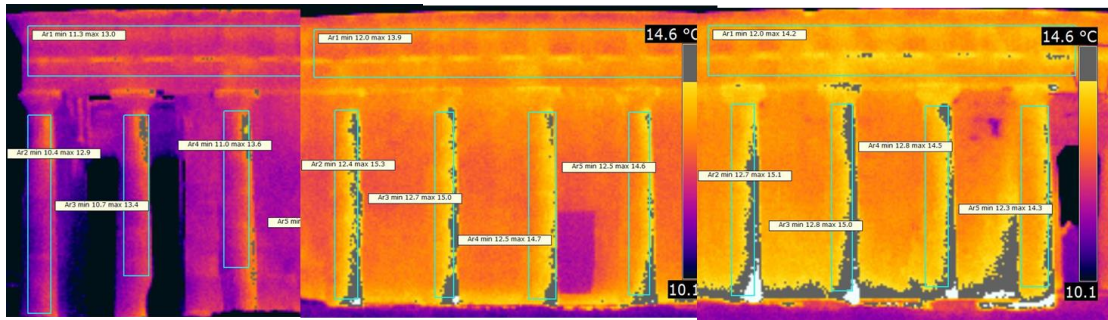


Θερμική εικόνα 4.1.1-18: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 17/02/2015

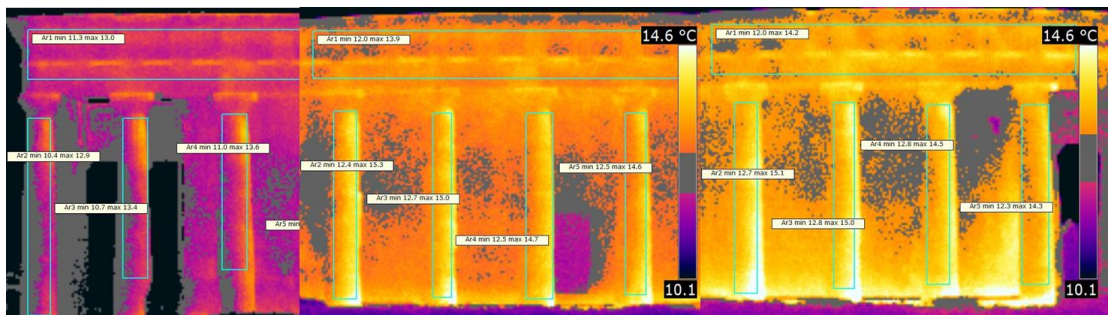
20 Μαρτίου 2015

Στις 20/03/2015 διεξήχθη θερμογραφικός έλεγχος της νότιας όψης σε δύο χρονικά διαστήματα, από τις 11.32 έως τις 11.38 π.μ. και από τη 01.18 έως τη 01.21 μ.μ. Στην πρώτη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 13°C και η σχετική υγρασία 44%. Η μέση ταχύτητα του ανέμου όλη τη μέρα ήταν 7,8km/h με κατεύθυνση βόρεια βορειοδυτική. Επίσης η μέση ηλιακή ακτινοβολία είχε τιμή 300W/m². Τη μέρα εκείνη σημειώθηκε μερική έκλειψη ηλίου από τις 10.40 π.μ. έως τις 12.50 μ.μ.

Η θερμότερες περιοχές εμφανίζονται στην ανατολική όψη των κίωνων κυρίως στις άνω και κάτω γωνίες τους. Επιπλέον στους κίονες 4 έως 11 οι υψηλές θερμοκρασίες κατανέμονται σε όλο το ύψος τους. Οι κίονες παρουσιάζουν μέγιστες θερμοκρασίες μεταξύ 12,9°C και 15,3°C. Ταυτόχρονα παρατηρούνται θερμά σημεία στο κάτω τμήμα των μετοπών με θερμοκρασίες που αγγίζουν τους 14,2°C. Επιπρόσθετα οι ψυχρές θερμοκρασίες εντοπίζονται σε όλο το ύψος των δυτικών όψεων των κίωνων (10,4°C-12,8°C), στο γείσο και στις μετόπες (13°C-14°C).



Θερμική εικόνα 4.1.1-19: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 20/03/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

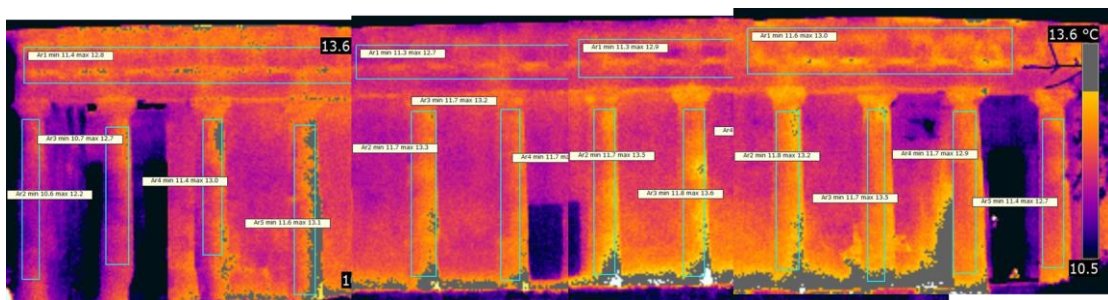


Θερμική εικόνα 4.1.1-20: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 20/03/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

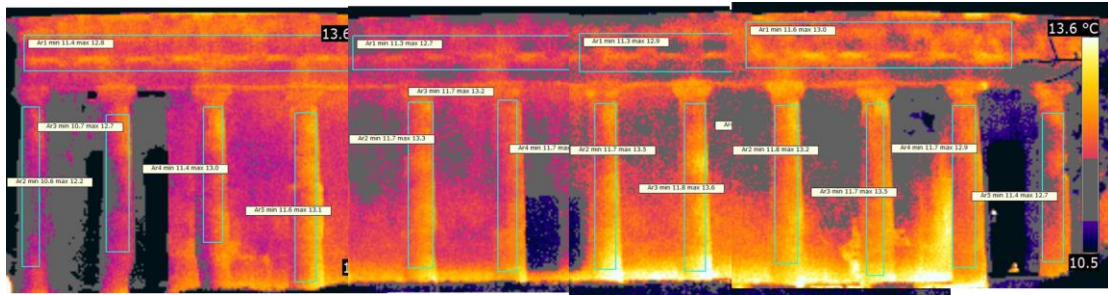
Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 10°C και η σχετική υγρασία 53%, ενώ οι μετρήσεις έλαβαν χώρα μετά την ολοκλήρωση του φαινομένου της μερικής έκλειψης.

Οι θερμές περιοχές παρατηρούνται κυρίως στις ανατολικές όψεις των κίωνων (12°C-13,6°C) και συγκεκριμένα στις άνω και κάτω γωνίες, εκτός από την περίπτωση του 4^{ου} κίονα όπου τα θερμά σημεία κατανέμονται σε όλο το ύψος. Επιπρόσθετα διακρίνονται θερμά σημεία στο κάτω μέρος των μετοπών και στο γείσο με θερμοκρασίες μεταξύ 12,7°C και 13°C.

Οι ψυχρές περιοχές βρίσκονται στη δυτική όψη των κίωνων (10,6°C-11,7°C), στο επιστύλιο, στις μετόπες και στο γείσο (11,3°C-11,6°C) καθώς και στο ανώτερο τμήμα του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-21: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 20/03/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



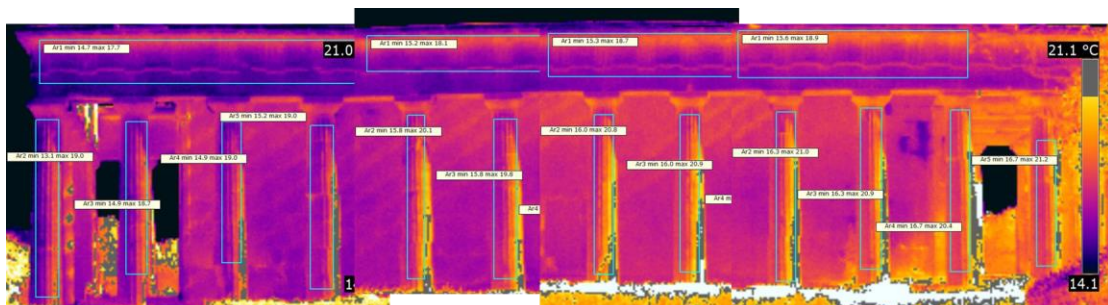
Θερμική εικόνα 4.1.1-22: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 20/03/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

1 Απριλίου 2015

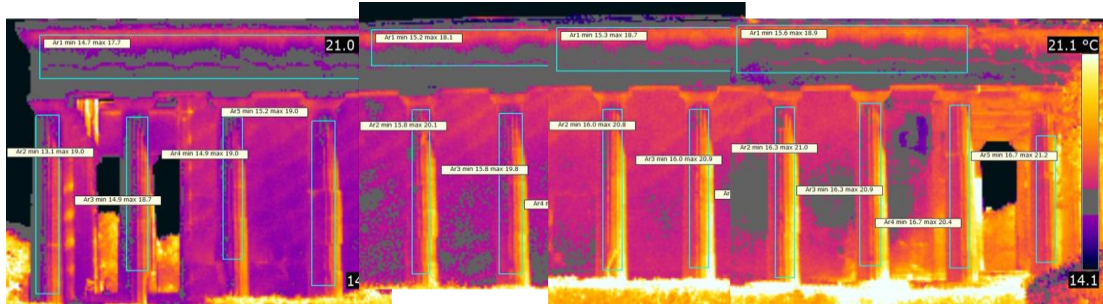
Την 01/04/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο χρονικές φάσεις, από τις 10.02 έως τις 10.11 π.μ. και από τις 02.15 έως τις 02.17 μ.μ. Στην πρώτη φάση η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 19°C και η σχετική υγρασία 54%. Κατά τη διάρκεια της ημέρα ο άνεμος ήταν νότιος νοτιοδυτικός με ταχύτητα 8,3km/h, ενώ η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 710W/m².

Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στις ανατολικές όψεις των κίωνων, στις γωνίες που σχηματίζουν οι πρώτοι σπόνδυλοι με το κρηπίδωμα και γενικότερα σε όλο το ύψος των κίωνων (18,7°C-21,2°C). Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες θερμικές εικόνες, στην περίπτωση αυτή δεν εντοπίζονται θερμές περιοχές στις γωνίες μεταξύ κίωνων και κιονόκρανων.

Οι ψυχρές περιοχές εμφανίζονται στους κίονες 1,2 ,3, 4, και 6 σε όλο το ύψος των δυτικών όψεων, ενώ στους υπόλοιπους κίονες παρατηρούνται χαμηλές θερμοκρασίες στις νότιες όψεις κάτω από τα κιονόκρανα (13,1°C-16°). Επίσης εντοπίζονται ψυχρά σημεία στο γείσο, τις μετόπες και το επιστύλιο με θερμοκρασίες από 14,7°C έως 15,6°C.



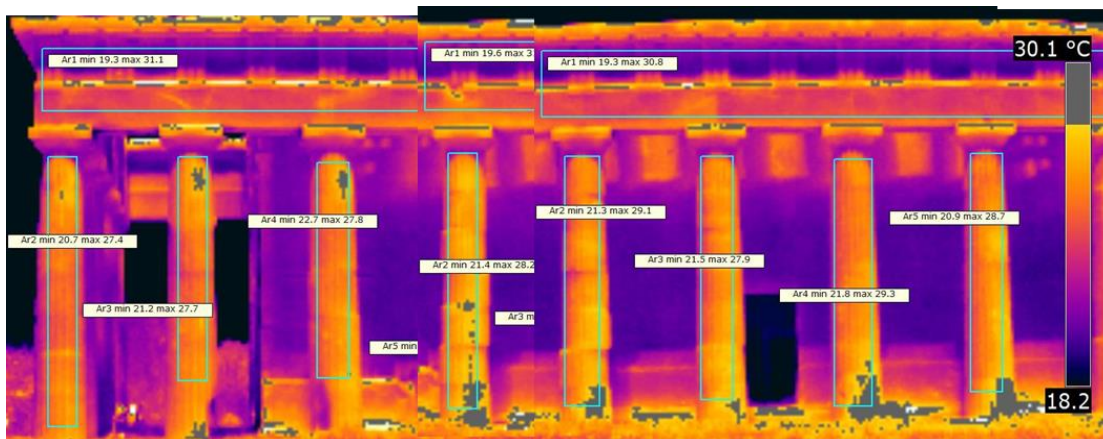
Θερμική εικόνα 4.1.1-23: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης την 01/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



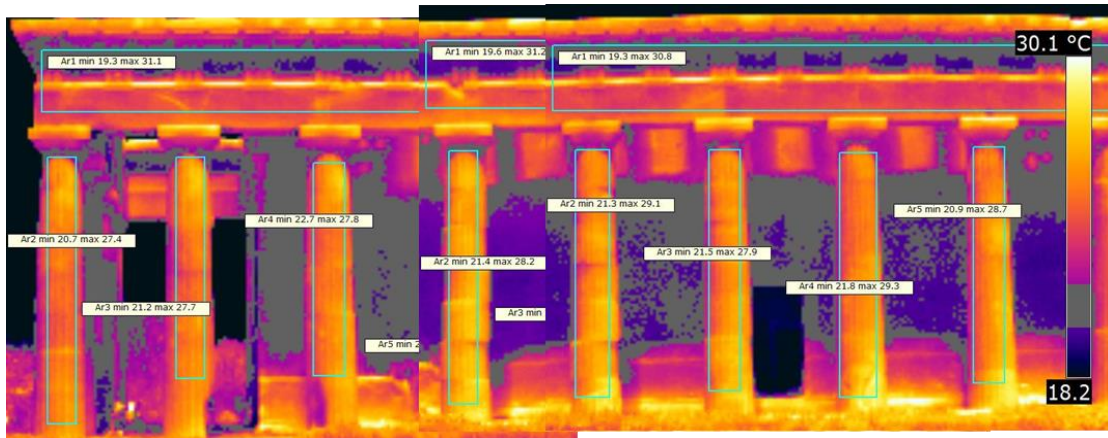
Θερμική εικόνα 4.1.1-24: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης την 01/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 23°C και η σχετική υγρασία 40%. Στις θερμικές εικόνες απεικονίζονται οι κίονες 1 έως 7, επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα να συνεχιστούν οι μετρήσεις. Οι θερμές περιοχές στη νότια όψη παρατηρούνται στις ανατολικές όψεις των κίωνων και συγκεκριμένα στους κίονες 1 έως 3 βρίσκονται στις άνω γωνίες. Από τον 4^ο έως τον 8^ο κίονα παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες στις ανατολικές γωνίες που σχηματίζουν οι πρώτοι σπόνδυλοι με το κρηπίδωμα. Παράλληλα στον 4^ο κίονα εντοπίζονται θερμές περιοχές στη νότια όψη στους σπονδύλους 1 έως 3. Οι μέγιστες θερμοκρασίες των κίωνων κυμαίνονται μεταξύ 27,4°C και 29,3°C. Θερμές επιφάνειες διακρίνονται και στο γείσο και την κάτω πλευρά των μετοπών. Η μέγιστη θερμοκρασία στο θριγκό πλησιάζει τους 31°C.

Επιπλέον οι ψυχρές περιοχές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο κάτω από τα κιονόκρανα – όπως συνέβη και στην πρώτη φάση των μετρήσεων – , στις μετόπες και στον τοίχο του σηκού. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των κίωνων παίρνουν τιμές από 20,7°C έως 22,7°C και στο θριγκό από 19,3°C έως 19,6°C.



Θερμική εικόνα 4.1.1-25: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης την 01/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



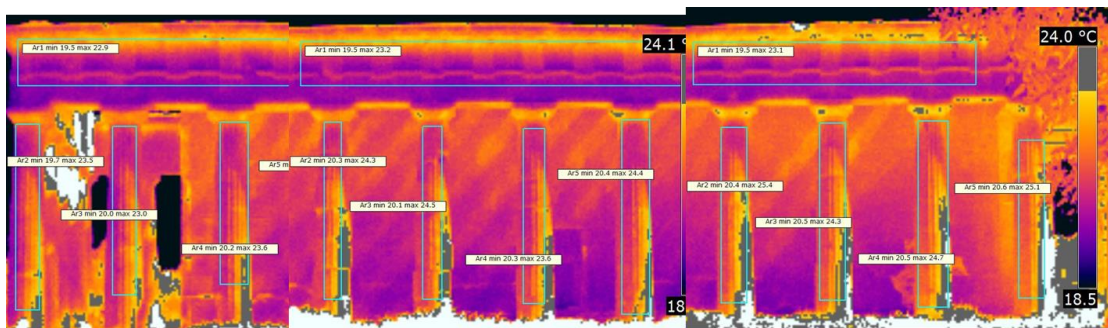
Θερμική εικόνα 4.1.1-26: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης την 01/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

29 Απριλίου 2015

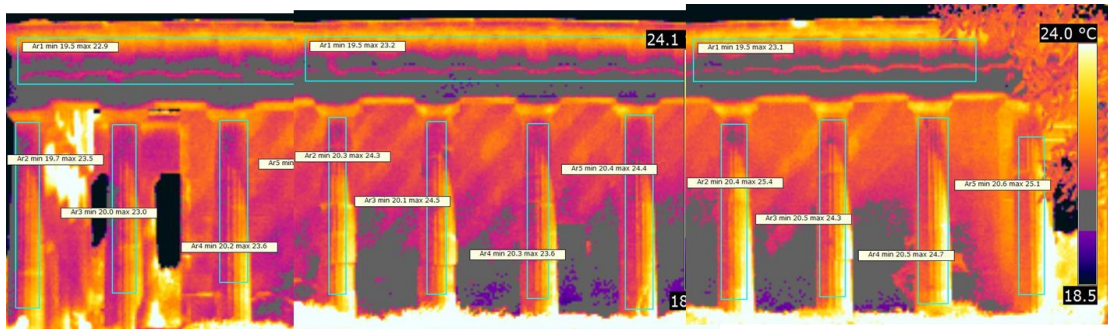
Στις 29/04/2015 διεξήχθησαν μετρήσεις σε τρεις χρονικές περιόδους, από τις 10.58 έως τις 11.02 π.μ., από τις 12.39 έως τις 12.51 μ.μ. και από τις 02.01 έως τις 02.07 μ.μ. Την πρώτη περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 24°C και η σχετική υγρασία 43%. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 10km/h με κατεύθυνση νότια νοτιοδυτική και η μέση ηλιακή ακτινοβολία 770W/m².

Οι θερμότερες περιοχές εντοπίζονται στις ανατολικές όψεις των κίωνων, κυρίως στη γωνία που σχηματίζεται από τον πρώτο σπόνδυλο και το κρηπίδωμα. Επίσης στους κίονες 4 έως 11 κατανέμονται οι υψηλές θερμοκρασίες σε όλο το ύψος. Οι μέγιστες θερμοκρασίες των κίωνων κυμαίνονται μεταξύ 23°C και 25,4°C. Επιπρόσθετα διακρίνονται θερμές επιφάνειες και στις μετόπες και το γείσο (22,9°C-23,1°).

Οι ελάχιστες θερμοκρασίες βρίσκονται στη δυτική όψη των κίωνων καθώς και στη νότια όψη τους κάτω από τα κιονόκρανα (19,7°C-20,5°C). Ψυχρές περιοχές εντοπίζονται και στις μετόπες τα επιστήλια και το γείσο (περίπου 19,5°C). Τέλος το κάτω μέρος του τοίχου παρουσιάζει χαμηλές θερμοκρασίες.



Θερμική εικόνα 4.1.1-27: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

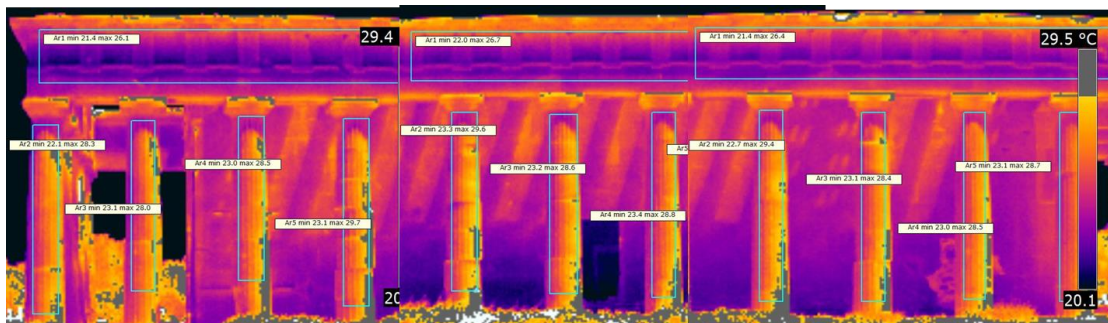


Θερμική εικόνα 4.1.1-28: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

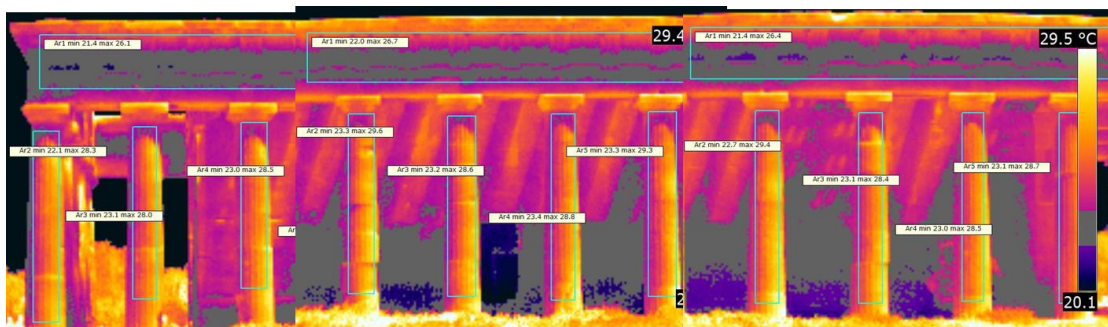
Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 23°C και η σχετική υγρασία ήταν 58%.

Επιπρόσθετα παρατηρώντας τις θερμικές εικόνες διαπιστώνεται ότι οι θερμές περιοχές εμφανίζονται γενικά στην ανατολική όψη των κίωνων κυρίως στις άνω και κάτω γωνίες τους. Παράλληλα εντοπίζονται στα σημεία μεταξύ των σπονδύλων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (2^{ος}, 3^{ος} και 8^{ος} κίονας) κατανέμονται και σε όλη την ανατολική όψη. Ταυτόχρονα διακρίνονται θερμά σημεία και στο γείσο.

Οι ελάχιστες θερμοκρασίες αντίθετα, βρίσκονται κυρίως στη νότια όψη των κίωνων, κάτω από τα κιονόκρανα (22,1°C-23,4°C). Επιπλέον ψυχρές επιφάνειες παρατηρούνται και στο γείσο, τις μετόπες και το επιστύλιο (21,4°C-22°C), καθώς και στο κάτω μέρος του τοίχου.



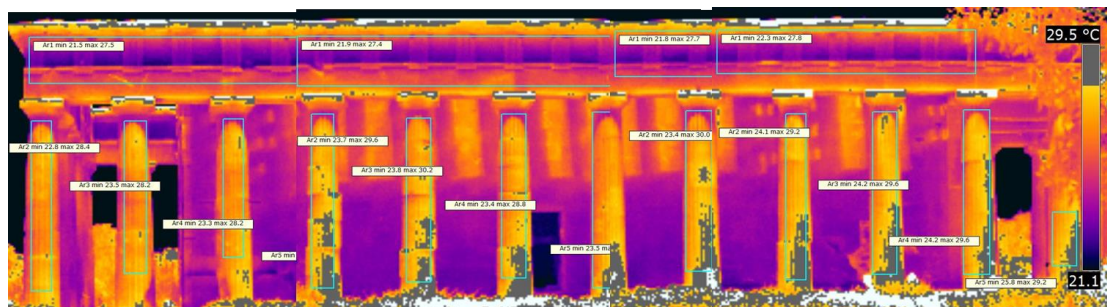
Θερμική εικόνα 4.1.1-29: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



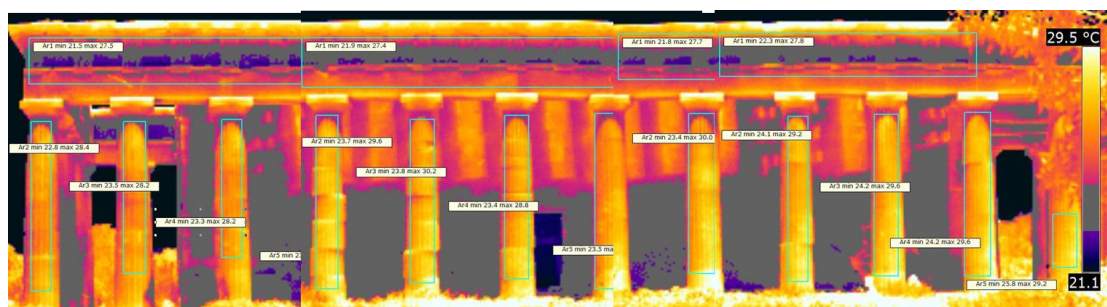
Θερμική εικόνα 4.1.1-30: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Την τρίτη χρονική περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 24°C και η σχετική υγρασία 44%. Οι θερμότερες περιοχές παρατηρούνται στην βάση των κιόνων, στα κιονόκρανα και – στην περίπτωση του 11^{ου} κίονα – στην ανατολική όψη. Το εύρος των μέγιστων θερμοκρασιών είναι από 28,2°C έως 30,2°C. Παράλληλα εμφανίζονται θερμές περιοχές στο γείσο.

Επιπλέον οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εντοπίζονται στις επιφάνειες κάτω από τα κιονόκρανα (22,8°C-24,2°C), στις μετόπες (21,5°C έως 22,3°C) και στο κάτω τμήμα του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-31: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο



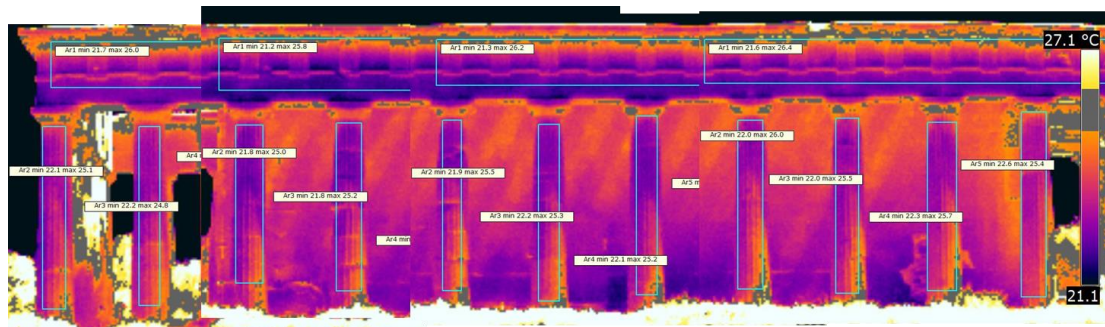
Θερμική εικόνα 4.1.1-32: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 29/04/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο

26 Μαΐου 2015

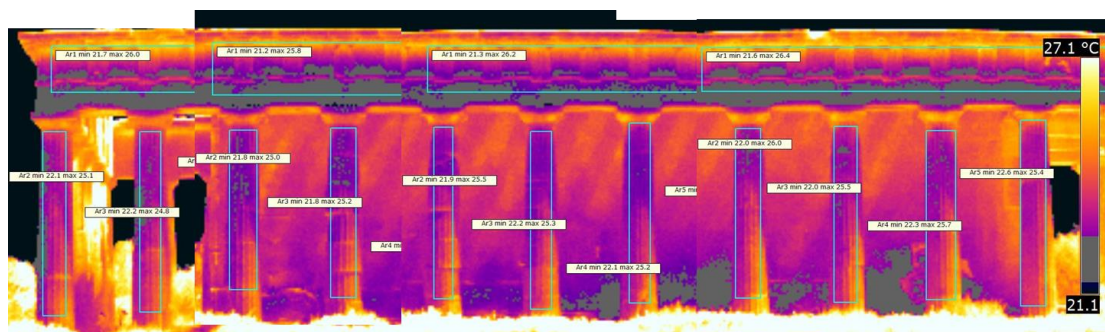
Στις 26/05/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο ναό του Ηφαίστου σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση διήρκησε από τις 11.38 έως τις 11.45 π.μ., η δεύτερη από τη 01.25 έως τη 01.31 μ.μ. και η τρίτη από τις 03.04 έως τις 03.07 μ.μ. Στην πρώτη περίοδο η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 26°C και η σχετική υγρασία 37%. Επίσης κατά τη διάρκεια της ημέρας η μέση ταχύτητα ανέμου ήταν 9,7km/h με κατεύθυνση νότια νοτιοδυτική.

Στη Θερμική εικόνα 4.1.1-33 παρατηρούνται θερμές επιφάνειες στους πρώτους σπονδύλους των κιόνων στην ανατολική όψη και στα κιονόκρανα με μέγιστες θερμοκρασίες από 24,8°C έως 26°C. Παράλληλα εντοπίζονται σημεία με υψηλές θερμοκρασίες στο άνω τμήμα των μετοπών, στο γείσο και στο επιστύλιο (25,8°C-26,4°C).

Οι ψυχρές περιοχές είναι κατανεμημένες στη νότια όψη των κίωνων, στους πάνω σπονδύλους (21,8°C-22,6°C), στο κάτω τμήμα των μετοπών και στο επιστύλιο (21,2°C-21,7°C).



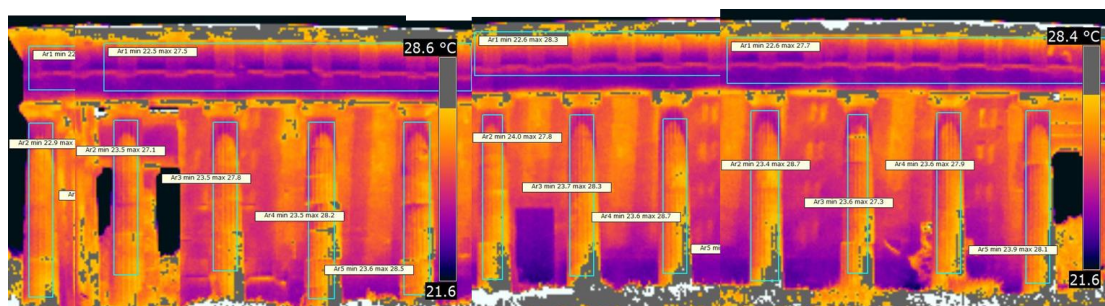
Θερμική εικόνα 4.1.1-33: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/05/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



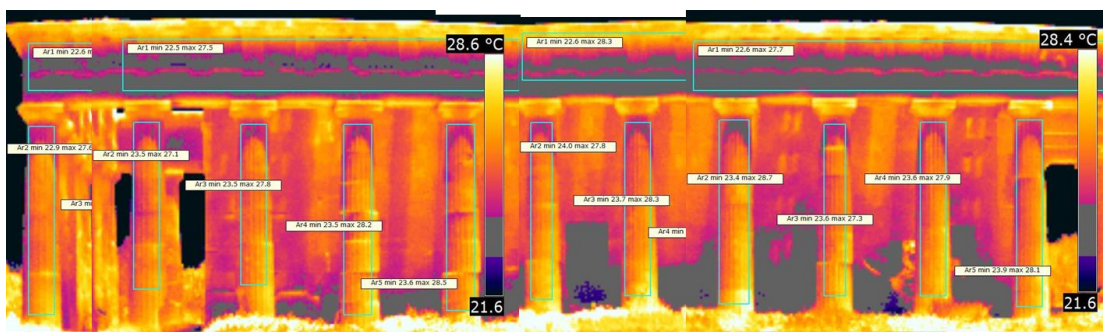
Θερμική εικόνα 4.1.1-34: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/5/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 27°C και η σχετική υγρασία παρέμεινε στο 31%. Μελετώντας τη Θερμική εικόνα 4.1.1-35 διαπιστώνεται ότι οι θερμές περιοχές της νότιας όψης εμφανίζονται στην ανατολική όψη των σπονδύλων 1-2, ανάμεσα στους σπονδύλους και στα κιονόκρανα (27,1°-28,5°). Επιπλέον υψηλές θερμοκρασίες εντοπίζονται και στο γείσο και το επιστήλιο.

Οι ψυχρές περιοχές διακρίνονται στους τελευταίους σπονδύλους, όπου δημιουργούνται σκιάσεις από τα κιονόκρανα (22,9°C-28,7°C), στα επιστύλια και στην κάτω όψη των μετοπών (22,5°C-22,6°C) και στο κάτω μέρος του τοίχου.



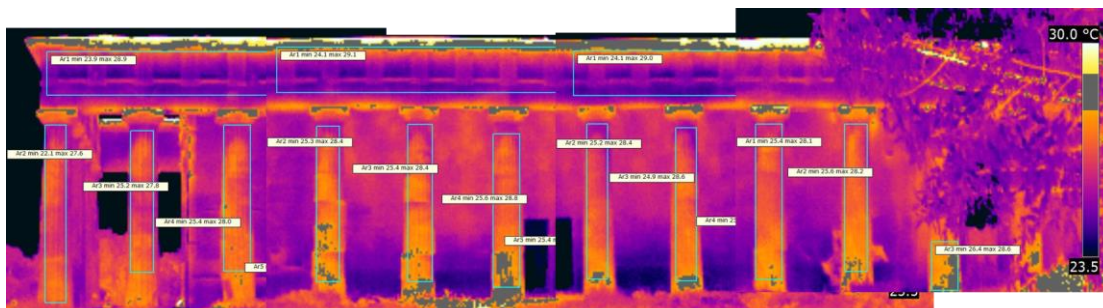
Θερμική εικόνα 4.1.1-35: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/05/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



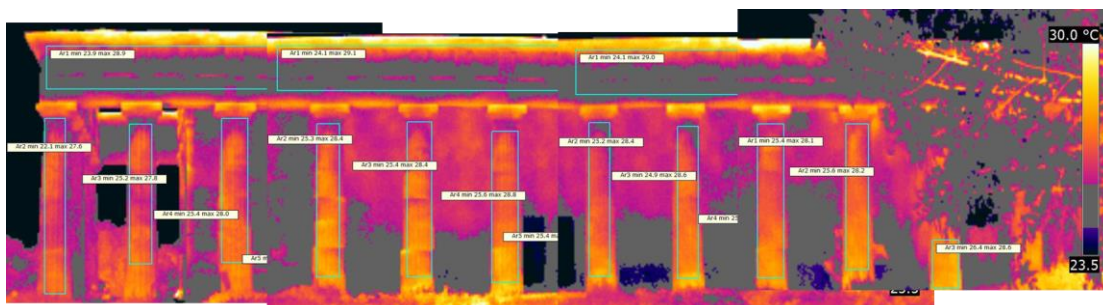
Θερμική εικόνα 4.1.1-36: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/05/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Την τρίτη χρονική περίοδο η θερμοκρασία έφτασε τους 31°C και η σχετική υγρασία μειώθηκε στο 25%. Καθώς αλλάζει η θέση του ηλίου μετά το μεσημέρι, οι θερμές περιοχές των κίωνων δεν εμφανίζονται πλέον στην ανατολική όψη τους, αλλά στη βάση της νότιας όψης τους και στα κιονόκρανα. Επιπλέον στον 4^ο, τον 5^ο και τον 6^ο κίονα διακρίνονται θερμές περιοχές και στη δυτική πλευρά τους. Το εύρος των μέγιστων τιμών των κίωνων είναι 27,6°C έως 28,6°C. Επιπρόσθετα υψηλές θερμοκρασίες καταγράφονται και στο γείσο.

Οι ψυχρές επιφάνειες εντοπίζονται στους τελευταίους σπονδύλους, όπου δημιουργούνται σκιάσεις από τα κιονόκρανα (22,1^ο-25,4^οC), στις μετόπες και στο επιστύλιο (23,9^οC-24,1^οC) και στο κάτω μέρος του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-37: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/05/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο



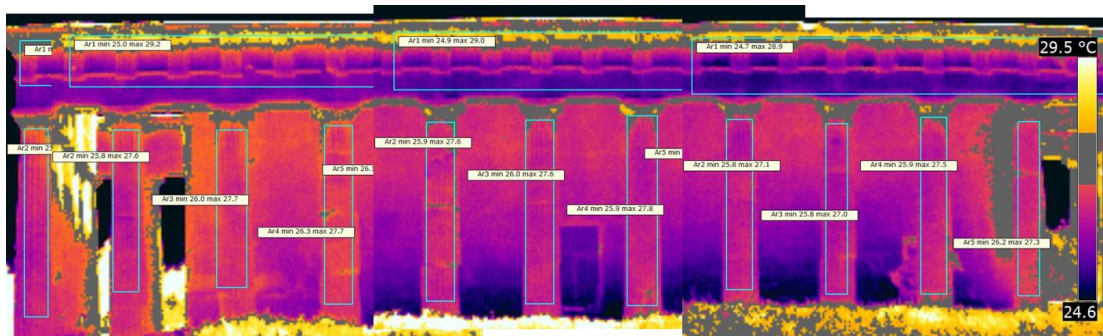
Θερμική εικόνα 4.1.1-38: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 26/05/2015 για την τρίτη περίοδο

3 Ιουλίου 2015

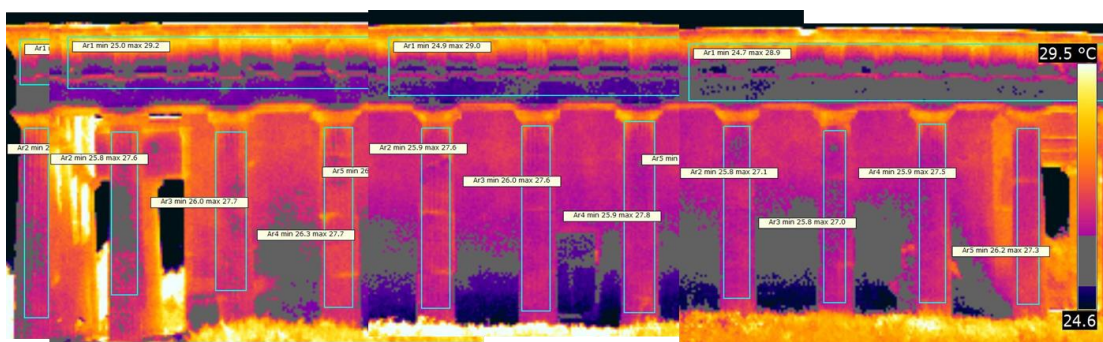
Στις 3/7/2015 πραγματοποιήθηκαν θερμογραφικές μετρήσεις σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση διήρκησε από τις 10.59 έως τις 11.07 π.μ. και η δεύτερη από τη 01.01 έως τη 01.03 μ.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης ήταν 33°C και η σχετική υγρασία 36%. Ο άνεμος είχε μέση ταχύτητα 8,7km/h και κατεύθυνση βόρεια βορειοανατολική και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 690W/m².

Οι θερμότερες επιφάνειες διακρίνονται κυρίως στα κιονόκρανα και στο επιστύλιο. Στον 4^ο και στον 5^ο κίονα είναι εμφανή θερμά σημεία στις επιφάνειες ανάμεσα στους σπονδύλους. Στον 6^ο, στον 10^ο και στον 11^ο κίονα παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες και στη βάση. Οι μέγιστες τιμές των θερμοκρασιών στους κίονες βρίσκονται μεταξύ 27°C και 27,8°C. Επιπλέον θερμές είναι και οι άνω επιφάνειες των μετοπών και το γείσο (28,9°C-29,2°C).

Οι ψυχρές επιφάνειες εμφανίζονται κυρίως στο επιστύλιο και στην κάτω επιφάνεια των μετοπών (24,7°C-25°C), καθώς και στο κάτω τμήμα του τοίχου. Στον 1^ο, το 2^ο τον 3^ο και τον 9^ο κίονα παρατηρούνται ψυχρές περιοχές μεγαλύτερης έκτασης, ενώ στους υπόλοιπους κίονες παρατηρούνται κατά τόπους σημεία με χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των κίωνων κυμαίνονται μεταξύ 25,8°C και 26,3°C.



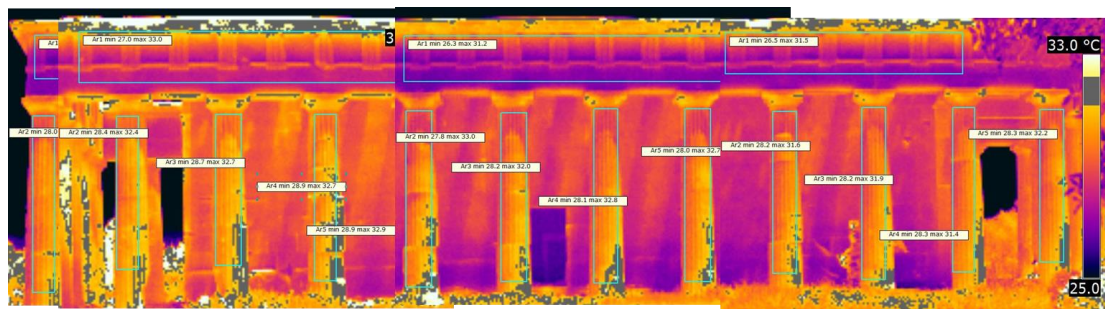
Θερμική εικόνα 4.1.1-39: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 03/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



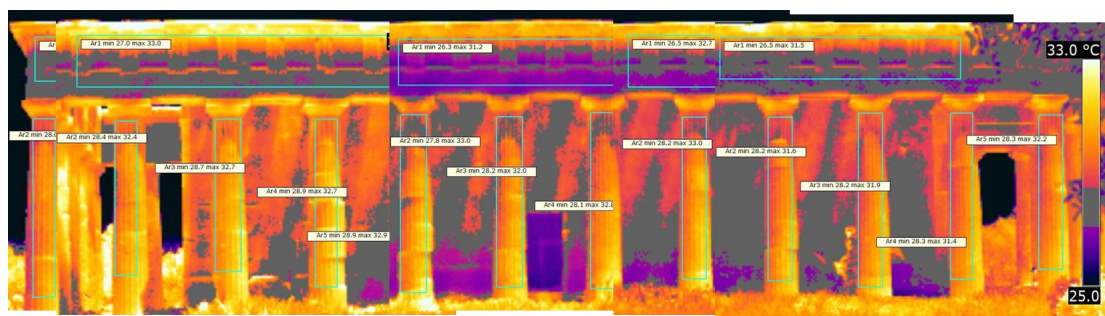
Θερμική εικόνα 4.1.1-40: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 03/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 30°C και η σχετική υγρασία 37%. Οι θερμές επιφάνειες παρατηρούνται στην ανατολική όψη των κίωνων και στα κιονόκρανα (31,4°-33°C). Επιπλέον υψηλές θερμοκρασίες

παρουσιάζει και το γείσο και τμήμα του επιστηλίου. Από τον 5^ο έως τον 11^ο κίονα είναι εμφανείς ψυχρές περιοχές στον τελευταίο σπόνδυλο. Επίσης στον 1^ο, το 2^ο και τον 5^ο κίονα διακρίνονται σημεία με χαμηλή θερμοκρασία στη δυτική όψη. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες των κίωνων βρίσκονται στο εύρος μεταξύ 28,1°C και 28,9°C. Στο επιστύλιο και στο κάτω τμήμα των μετοπών εμφανίζονται ψυχρές περιοχές με θερμοκρασίες από 26,3°C έως 27°C. Τέλος, διακρίνονται ψυχρές επιφάνειες στα σημεία του τοίχου που έχουν σχηματιστεί σκιές και στο κατώτερο τμήμα του.



Θερμική εικόνα 4.1.1-41: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης για τη δεύτερη χρονική περίοδο

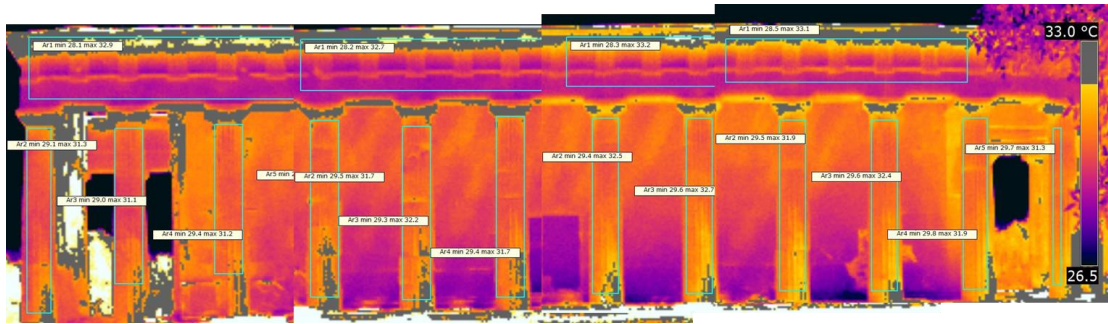


Θερμική εικόνα 4.1.1-42: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης για τη δεύτερη χρονική περίοδο

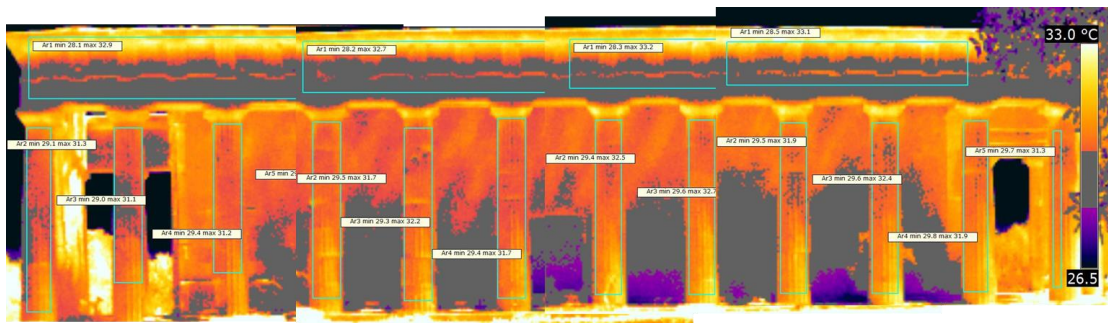
7 Ιουλίου 2015

Στις 07/07/2015 διεξήχθησαν μετρήσεις από τις 11.37 έως τις 11.47 π.μ. και από τη 01.37 έως τη 01.40 μ.μ. Στην πρώτη φάση των μετρήσεων οι θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 37°C και η σχετική υγρασία 24%. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ο άνεμος ήταν νότιος με μέση ταχύτητα 9,2km/h και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 820W/m².

Στη Θερμική εικόνα 4.1.1-43 παρατηρείται ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στην ανατολική όψη των κίωνων – κυρίως στους πρώτους σπονδύλους – και στα κιονόκρανα (31,1°C – 32,7°C). Επιπλέον εντοπίζονται θερμά σημεία στο επιστήλιο, στο γείσο και στην άνω επιφάνεια των μετοπών (32,7°C-33,2°C). Οι ψυχρές επιφάνειες διακρίνονται στο επιστύλιο και στα κάτω τμήματα των μετοπών (28,1°C-28,5°C). Επιπρόσθετα στον 1^ο και το 2^ο κίονα παρουσιάζονται ψυχρές περιοχές στη δυτική όψη, ενώ στους υπόλοιπους κίονες διακρίνονται ψυχρά τμήματα στους πάνω σπονδύλους (29,1°C-29,8°C).

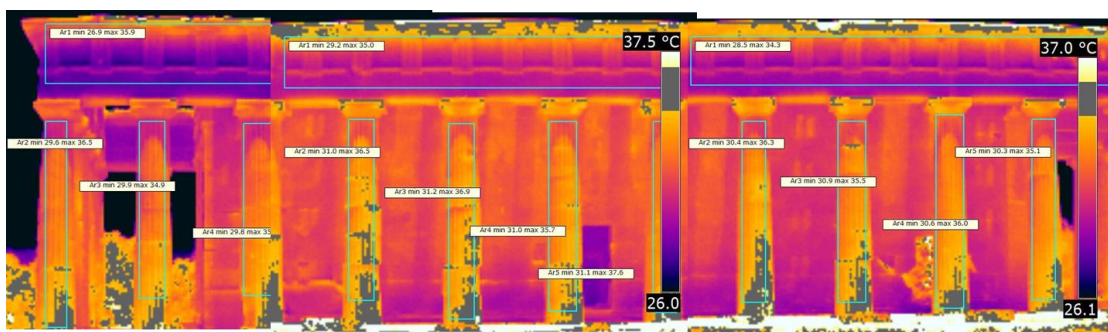


Θερμική εικόνα 4.1.1-43: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 07/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

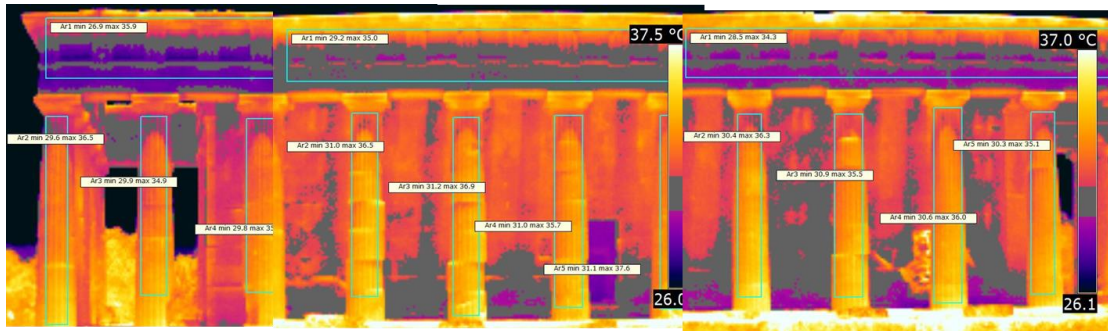


Θερμική εικόνα 4.1.1-44: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 07/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανέβηκε στους 37°C και η σχετική υγρασία έφτασε στο 24%. Οι θερμότερες επιφάνειες εντοπίζονται στους πρώτους σπονδύλους – ιδιαίτερα στην ανατολική όψη – , στις επιφάνειες μεταξύ τους και στα κιονόκρανα (34,9°C-36,5°C). Ταυτόχρονα παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες στο γείσο. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στους τελευταίους σπονδύλους, ακριβώς κάτω από τα κιονόκρανα (29,6°C-31,2°C), στο επιστύλιο και στο γείσο (26,9°C-29,2°C).



Θερμική εικόνα 4.1.1-45: Ισοθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 07/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



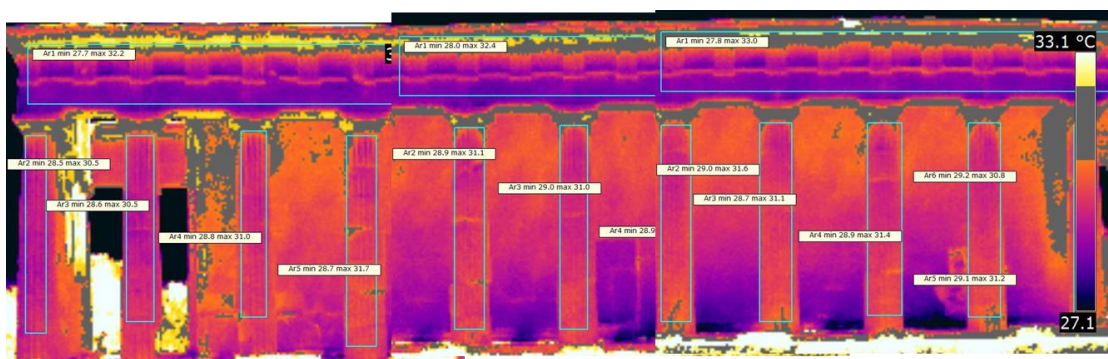
Θερμική εικόνα 4.1.1-46: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 07/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

8 Ιουλίου 2015

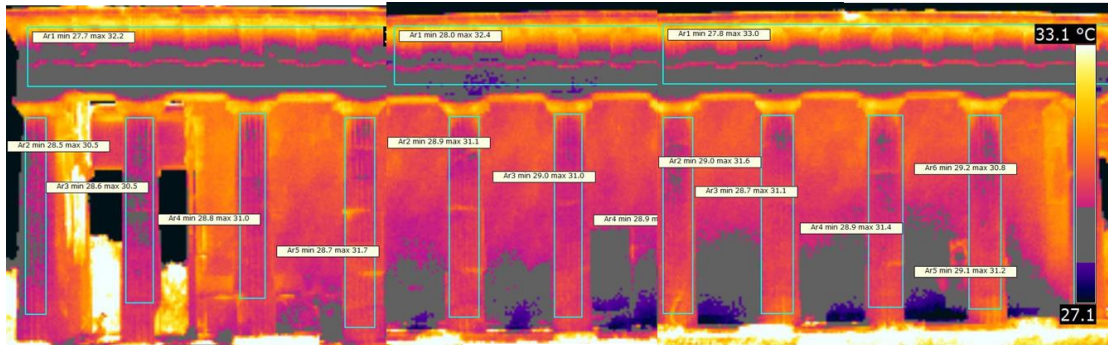
Στις 08/07/2015 πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος από τις 11.24 έως τις 11.35 π.μ. και από τη 01.29 έως τη 01.33 μ.μ. Στην πρώτη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 31°C και η σχετική υγρασία 35%. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 2,4km/h με κατεύθυνση βόρεια βορειοανατολική και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 719W/m².

Οι θερμότερες περιοχές της νότιας όψης εμφανίζονται στα κιονόκρανα, στις επιφάνειες μεταξύ των σπονδύλων (4^{ος} και 5^{ος} κίονας) και στους πρώτους σπονδύλους (5^{ος}, 7^{ος}, 8^{ος}, 9^{ος} και 10^{ος} κίονας). Οι μέγιστες θερμοκρασίες στους κίονες παίρνουν τιμές μεταξύ 30,5°C και 31,7°C. Παράλληλα υψηλές είναι και οι θερμοκρασίες στο γείσο και στην άνω επιφάνεια των μετοπών (32,2°C-33°C).

Οι ψυχρές περιοχές βρίσκονται στους τελευταίους σπονδύλους, ενώ στον 1^ο, το 2^ο και τον 7^ο κίονα παρατηρούνται χαμηλές θερμοκρασίες σε μεγαλύτερες επιφάνειες (28,5°C-29,2°C). Ψυχρές είναι και οι επιφάνειες του γείσου και του επιστυλίου (27,7°C-28°C).



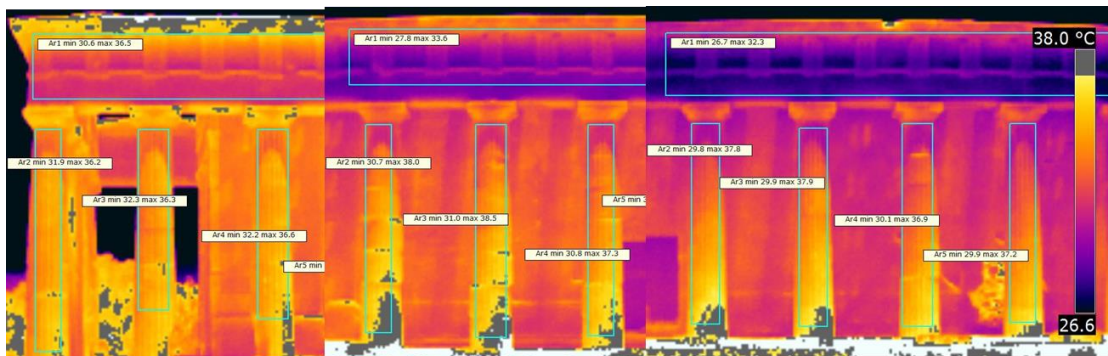
Θερμική εικόνα 4.1.1-47: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 08/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



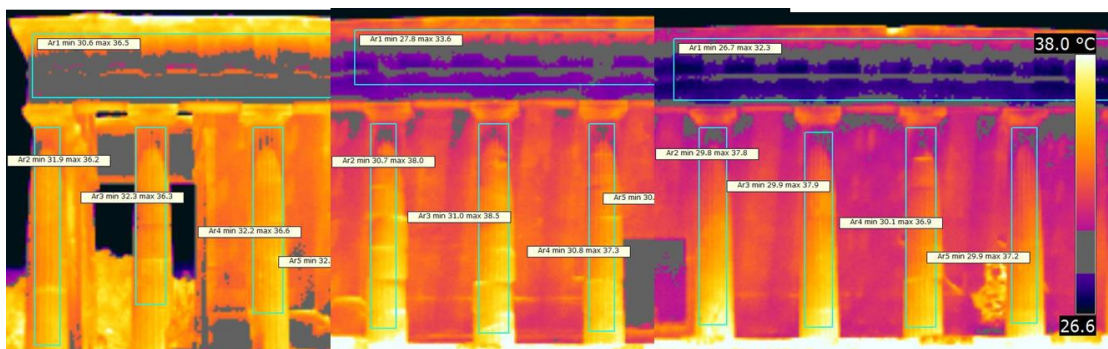
Θερμική εικόνα 4.1.1-48: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 08/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 35°C και η σχετική υγρασία στο 27%. Οι μέγιστες θερμοκρασίες στη νότια όψη παρουσιάζονται πάλι στην ανατολική όψη των πρώτων σπονδύλων και στις επιφάνειες μεταξύ τους (36,2°C-38,5°C), καθώς και στο γείσο.

Οι ψυχρές περιοχές βρίσκονται κάτω από τα κιονόκρανα (29,8°C-32,2°), στο επιστύλιο και στις κάτω επιφάνειες των μετοπών (26,7°C-30,6°C). Ταυτόχρονα παρατηρούνται ψηλά στον τοίχο ψυχρές επιφάνειες εξαιτίας της δημιουργίας σκιάσεων.



Θερμική εικόνα 4.1.1-49: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 08/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

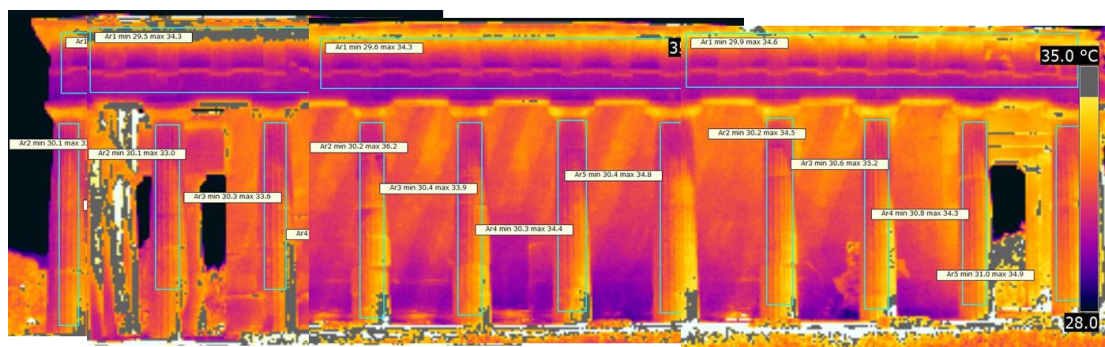


Θερμική εικόνα 4.1.1-50: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 08/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

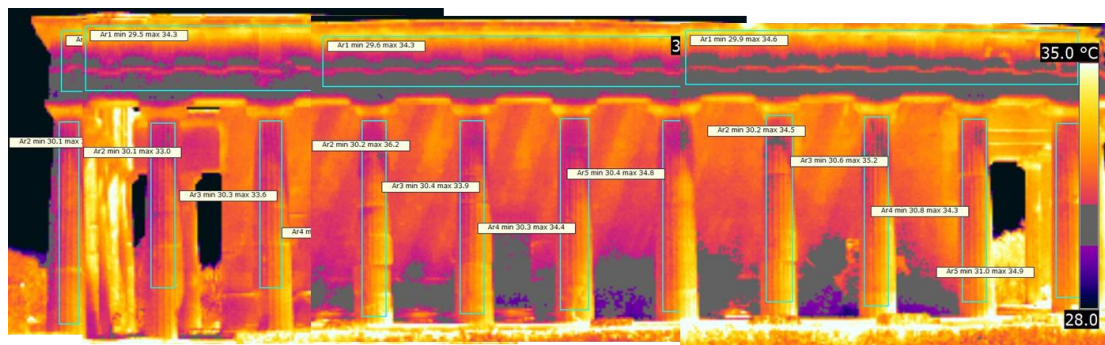
9 Ιουλίου 2015

Στις 09/07/2015 οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε δύο φάσεις, από τις 12.24 έως τις 12.25 μ.μ. και από τη 01.53 έως τη 01.55 μ.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην πρώτη φάση των μετρήσεων ήταν 32°C και η σχετική υγρασία 37%. Κατά το διάστημα των μετρήσεων ο άνεμος ήταν νότιος νοτιοδυτικός με μέση ταχύτητα 2,9km/h, ενώ η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 807W/m².

Οι θερμότερες επιφάνειες παρατηρούνται στην ανατολική όψη των πρώτων σπονδύλων και στα κιονόκρανα (33°C-36,8°C). Επιπλέον υψηλές είναι οι θερμοκρασίες στο γείσο και στις άνω επιφάνειες των μετοπών (34,3°C-34,6°C). Οι ψυχρές περιοχές της νότιας όψης εμφανίζονται στους τελευταίους σπονδύλους (30,1°C-31°C), στο επιστύλιο και στις κάτω επιφάνειες των μετοπών (29,5°C-29,9°C). Στο κατώτερο τμήμα του τοίχου παρουσιάζονται χαμηλές θερμοκρασίες εξαιτίας των σκιάσεων.

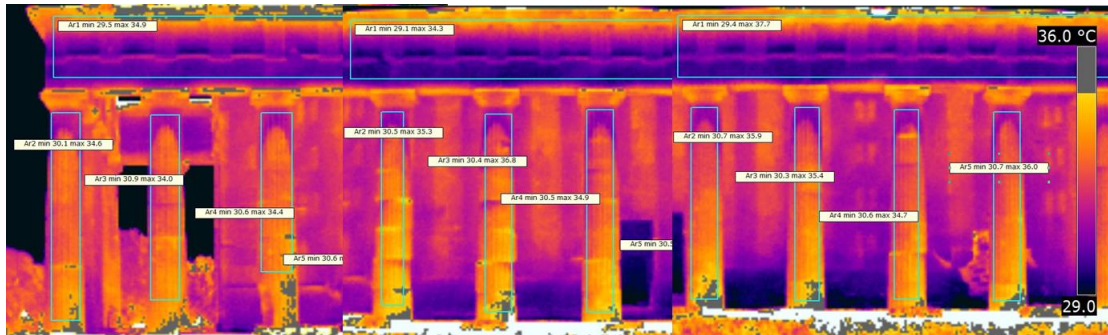


Θερμική εικόνα 4.1.1-51: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 09/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

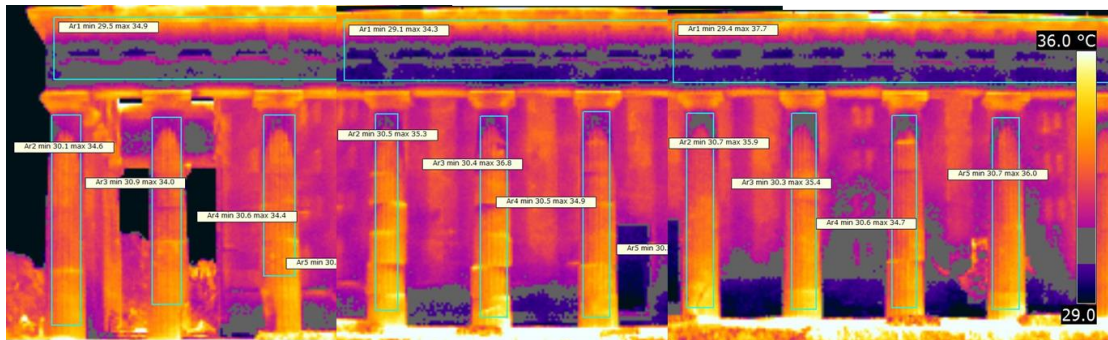


Θερμική εικόνα 4.1.1-52: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 09/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στο δεύτερο χρονικό διάστημα των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 37°C και η σχετική υγρασία 24%. Οι θερμότερες περιοχές διακρίνονται και πάλι στις ανατολικές όψεις των πρώτων σπονδύλων και στα κιονόκρανα (34,6°C-36,8°C), καθώς και στο γείσο (34,9°C-37,7°C). Οι ψυχρότερες περιοχές παρατηρούνται κάτω από τα κιονόκρανα (30,1°C-30,7°C), στο επιστύλιο και στις κάτω επιφάνειες των μετοπών (29,1°C-29,5°C). Παράλληλα καταγράφονται χαμηλές θερμοκρασίες και στο κατώτερο τμήμα του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-53: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 09/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

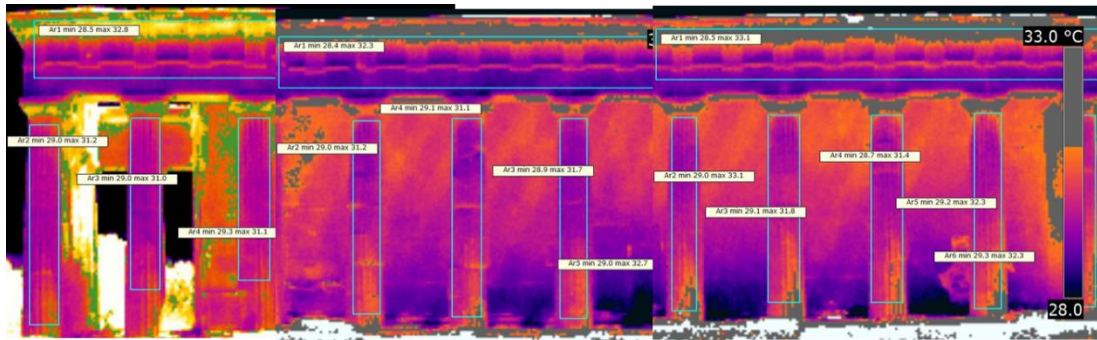


Θερμική εικόνα 4.1.1-54: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 09/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

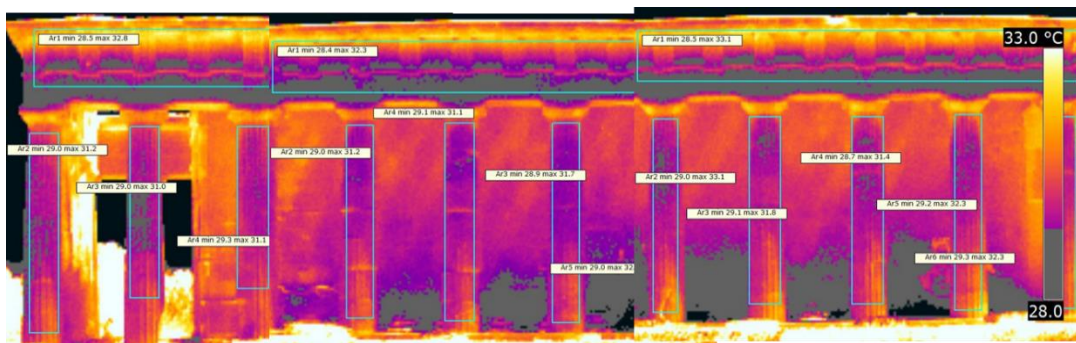
10 Ιουλίου 2015

Στις 10/07/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 11.37 έως τις 11.40 π.μ. και από τη 01.44 έως τη 01.46 μ.μ. Στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων ο άνεμος ήταν βόρειος βορειοανατολικός με μέση ταχύτητα 1,9km/h και η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 693W/m². Στην πρώτη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 30°C και η σχετική υγρασία 44%.

Οι θερμότερες επιφάνειες εμφανίζονται στην ανατολική όψη των πρώτων σπονδύλων και στα κιονόκρανα (31°C-33,1°C), στο γείσο και στις άνω επιφάνειες των μετοπών (32,3°C-33,1°C), καθώς και στο τοίχο πίσω από τον 3^ο και τον 11^ο κίονα. Οι ψυχρότερες περιοχές εντοπίζονται στη δυτική όψη του 1^{ου}, του 2^{ου} και του 7^{ου} κίονα και στους τελευταίους σπονδύλους των υπόλοιπων κίωνων (28,7°C-29,3°C). Επιπρόσθετα εμφανίζονται χαμηλές θερμοκρασίες στο επιστύλιο και στις κάτω επιφάνειες των μετοπών (περίπου 28,5°C), καθώς και στο κατώτερο τμήμα του τοίχου.



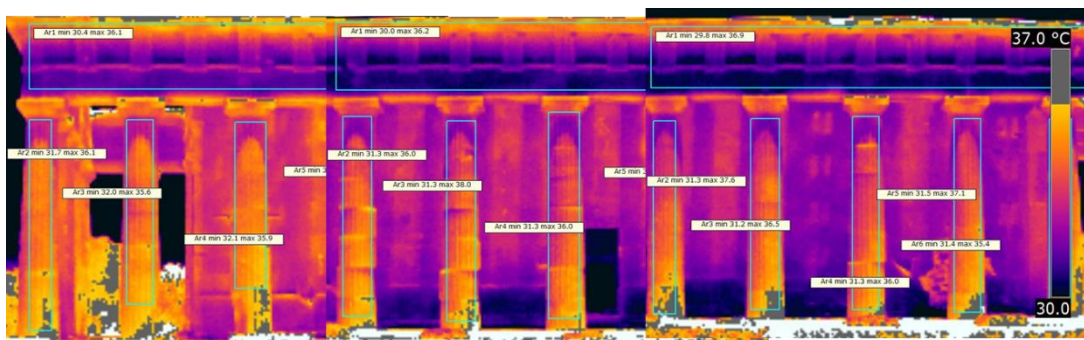
Θερμική εικόνα 4.1.1-55: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 10/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο



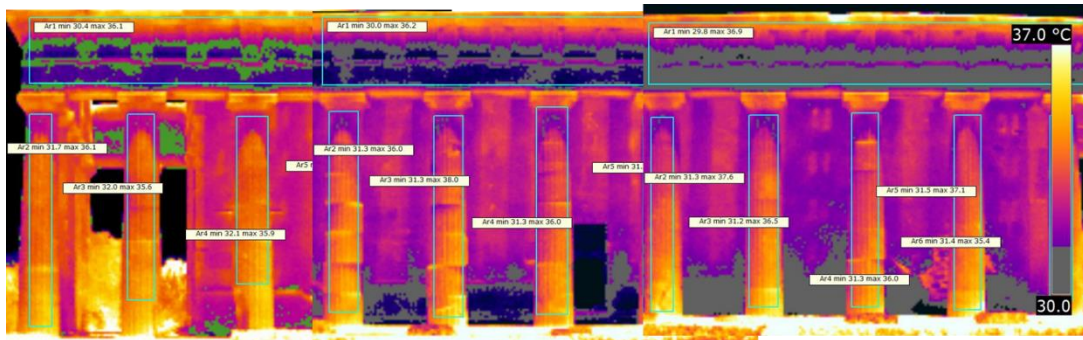
Θερμική εικόνα 4.1.1-56: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 10/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 34°C και η σχετική υγρασία 38%. Οι μέγιστες θερμοκρασίες εντοπίζονται στην ανατολική όψη των κιόνων και συγκεκριμένα στους πρώτους σπονδύλους (35,9°C-38°C) και στο γείσο (περίπου 36,9°C)

Από την άλλη πλευρά οι ψυχρότερες περιοχές βρίσκονται κάτω από τα κιονόκρανα (31,2°C-32°C), στο επιστύλιο και στις κάτω περιοχές των μετοπών (29,8°C-30,4°C). Τέλος, οι χαμηλές θερμοκρασίες είναι εμφανείς και στο κατώτερο τμήμα του τοίχου.



Θερμική εικόνα 4.1.1-57: Ισόθερμες μέγιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 10/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο



Θερμική εικόνα 4.1.1-58: Ισόθερμες ελάχιστων θερμοκρασιών της νότιας όψης στις 10/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Μερικά συμπεράσματα

Μετά τη λήψη των θερμογραφημάτων ανά εποχή στη νότια όψη ανά εποχή προέκυψαν τα εξής:

Φθινοπωρινοί μήνες

Το χρονικό διάστημα από τις 11.00 έως τις 11.30 π.μ. παρατηρήθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες του μνημείου στην ανατολική όψη των κιόνων – καθώς αυτή δέχεται τη μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας – και συγκεκριμένα στις γωνίες που δημιουργούνται από τον πρώτο σπόνδυλο και το κρηπίδωμα και από τον τελευταίο σπόνδυλο και το κιονόκρανο. Όπως προσπίπτει η ακτινοβολία στις γωνίες αυτές δημιουργούνται ανακλάσεις, επομένως είναι πιθανό να παρουσιάζονται τοπικά υψηλότερες θερμοκρασίες από τις πραγματικές. Οι ψυχρές θερμοκρασίες των κιόνων εντοπίζονται στη δυτική όψη τους που εκείνη τη χρονική στιγμή δεν ακτινοβολείται. Οι διαφορές της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν ήταν από 7°C έως 10°C. Υψηλές θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν και στο θριγκό και συγκεκριμένα στην κάτω επιφάνεια των μετοπών. Ταυτόχρονα στις άνω περιοχές των μετοπών εμφανίζονταν κατά 10°C χαμηλότερες θερμοκρασίες εξαιτίας των σκιάσεων που δημιουργούνται. Ψυχρότερο εμφανιζόταν και το γείσο που παρουσίαζε έντονη απώλεια υλικού.

Στη 01.00 μ.μ. ήταν εμφανείς θερμές περιοχές και στις νότιες όψεις των κιόνων, καθώς ο ήλιος απομακρυνόταν από την ανατολή. Ωστόσο οι δυτικές όψεις παρέμεναν ψυχρές. Οι διαφορά των μέγιστων θερμοκρασιών από τις ελάχιστες στους κίονες ήταν 5°C.

Χειμερινοί μήνες

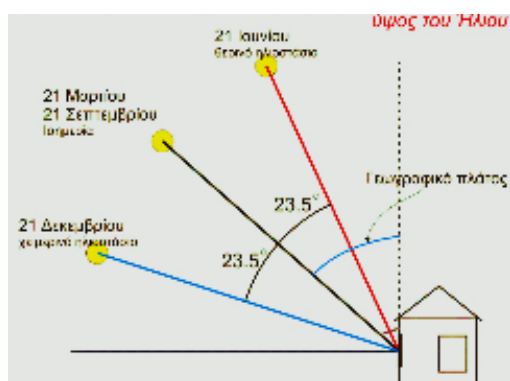
Τις ημέρες με ηλιοφάνεια τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας ήταν ίδια με αυτά του φθινοπώρου. Ωστόσο παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών από 7°C έως 15°C.

Τις ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια εντοπίστηκαν οι θερμότερες περιοχές της νότιας όψης στα κιονόκρανα, στους πρώτους σπονδύλους και στον τοίχο. Αντίθετα οι ψυχρές περιοχές στους κίονες δεν εμφανίζονταν σε συγκεκριμένες επιφάνειες, αλλά ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες. Οι θερμοκρασιακές διαφορές των θερμών και των ψυχρών περιοχών στους κίονες προσέγγιζαν τους $1,5^{\circ}\text{C}$. Επιπλέον μετά τη 01.00 μ.μ. δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Εαρινοί μήνες

Τις ημέρες με περιορισμένη ηλιοφάνεια ($300\text{W}/\text{m}^2$) οι θερμές περιοχές παρατηρήθηκαν στην ανατολική όψη των κίωνων και στην κάτω επιφάνεια των μετοπών, ενώ οι ψυχρές περιοχές εμφανίστηκαν στις δυτικές όψεις των κίωνων, στο γείσο και την άνω περιοχή των μετοπών. Οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ψυχρών και θερμών επιφανειών έφταναν τους 3°C .

Τις ημέρες με ηλιοφάνεια παρατηρήθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα τις πρωινές από τις μεσημβρινές ώρες. Τις πρωινές ώρες οι θερμές περιοχές της νότιας όψης διακρίνονταν στην ανατολική όψη των κίωνων (ιδιαίτερα στη γωνία μεταξύ κρηπιδώματος και πρώτου σπονδύλου), στα κιονόκρανα, στην άνω περιοχή των μετοπών και στο γείσο. Από την άλλη πλευρά οι ψυχρότερες περιοχές εμφανίζονταν στους τελευταίους σπονδύλους ακριβώς κάτω από τα κιονόκρανα, στο κάτω τμήμα των μετοπών και στο επιστύλιο. Τους χειμερινούς μήνες ήταν ψυχρότερη η άνω περιοχή των μετοπών και το γείσο, ενώ την άνοιξη συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ήλιος μετά την εαρινή ισημερία βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος με αποτέλεσμα να εκτίθενται διαφορετικά μέλη του θριγκού περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία (π.χ. το γείσο) και να δημιουργούνται νέες σκιάσεις. Επίσης κάτω από τα κιονόκρανα εμφανίζονται ψυχρές περιοχές, επειδή δημιουργούνται σκιάσεις εξαιτίας της αλλαγής της θέσης του ήλιου. Τις μεσημβρινές ώρες παρατηρούνται θερμές περιοχές και στη νότια όψη των κίωνων, καθώς ο ήλιος απομακρύνεται από την ανατολή, ενώ μετά τις 02.00 μ.μ. εμφανίζονται θερμές επιφάνειες και στη δυτική όψη των κίωνων. Οι θερμοκρασιακές διαφορές των ψυχρών από τις θερμές περιοχές κυμαίνονταν μεταξύ 4°C και 8°C .



Εικόνα 4.1.1-1: Το ύψος του ήλιου ανά εποχές στη νότια όψη (101)

Θερινοί μήνες

Τα αποτελέσματα της θερμογραφία τους θερινούς μήνες συμπίπτουν με αυτά των εαρινών μηνών για ημέρες με ηλιοφάνεια. Οι θερμοκρασιακές διαφορές των θερμών από τις ψυχρότερες επιφάνειες κυμαίνονταν μεταξύ 2,8°C και 8°C.

4.1.2 Επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας

Από τις θερμικές εικόνες της νότιας όψης που λήφθηκαν από απόσταση 24m προσδιορίστηκε η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση θερμοκρασία των κιώνων, ενώ υπολογίστηκε και ο μέσος όρος των τιμών αυτών και η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας κιώνων από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Έτσι ήταν δυνατό να μελετηθεί η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας ανά εποχές και οι κύκλοι θέρμανσης-ψύξης στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων. Οι κύκλοι θέρμανσης-ψύξης αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα φθοράς, καθώς από τη θερμική κόπωση δημιουργούνται μικρορηγματώσεις. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες για τις μέρες και τις ώρες των μετρήσεων.

Πίνακας 4.1.2-1: Περιβαλλοντικά δεδομένα για τις ημερομηνίες των μετρήσεων

Ημέρα	Α' περίοδος		Β' περίοδος		Γ' περίοδος		Solar rad. (W/m ²)	Wind speed (km/h)	Wind dir.
	Tenv. (°C)	Rh (%)	Tenv. (°C)	Rh (%)	Tenv. (°C)	Rh (%)			
21-Οκτ	31	24	-	-	-	-	550	1,6	S
19-Νοε	17	62	16,9	60,0	-	-	400	4,8	S
23-Δεκ	16	45	-	-	-	-	480	0,8	SSW
22-Ιαν	12,5	76	-	-	-	-	350	1,6	S
23-Ιαν	13,4	75	-	-	-	-	400	8	SSW
13-Φεβ	8	53	8,0	61,0	-	-	50	6	NNE
17-Φεβ	15	46	-	-	-	-	151	8	NNE
20-Μαρ	13	44	10,0	53,0	-	-	300	7,8	NNW
1-Απρ	19	54	23,0	40,0	-	-	710	8,3	SSW
29-Απρ	24	43	23,0	58,0	24,0	44,0	770	10	SSW
26-Μαΐ	26	37	27,0	31,0	31,0	25,0	650	9,7	SSW
3-Ιουλ	33	36	30,0	37,0	-	-	690	8,7	NNE
7-Ιουλ	31	40	37,0	24,0	-	-	820	9,2	N
8-Ιουλ	31	35	35,0	27,0	-	-	719	2,4	NNE
9-Ιουλ	32	37	37,0	24,0	-	-	807	2,9	SSW
10-Ιουλ	30	44	34,0	38,0	-	-	693	1,9	NNE

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε ημέρα ξεχωριστά.

21 Οκτωβρίου 2014

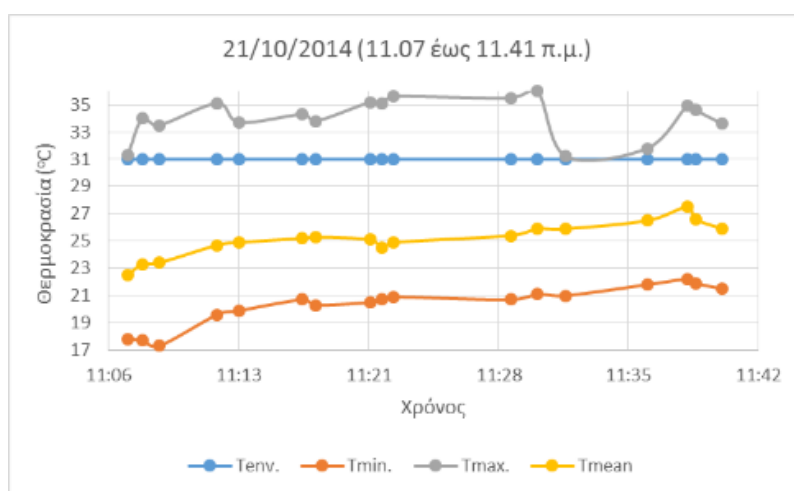
Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές των κιώνων που προέρχονται από τις θερμικές εικόνες. Από τα δεδομένα του

ακόλουθου πίνακα κατασκευάστηκε διάγραμμα με γ-άξονα τη θερμοκρασία των κίωνων και χ-άξονα το χρόνο.

Η μέση και η ελάχιστη τιμή των κίωνων είναι χαμηλότερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία τους είναι υψηλότερη, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Επιπλέον η διαφορά μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών στους κίονες ξεπερνά τους 10°C. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (31°C) είναι υψηλότερη από τη μέση θερμοκρασία (25,1°C) των κίωνων κατά 5,9°C.

Πίνακας 4.1.2-2: Δεδομένα μετρήσεων στις 21/10/2014

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
8978	11:07:49	17,8	31,3	22,5
8979	11:08:37	17,7	34	23,3
8981	11:09:33	17,3	33,5	23,4
8983	11:12:46	19,6	35,1	24,7
8985	11:14:00	19,9	33,7	24,9
8987	11:17:29	20,7	34,3	25,2
8989	11:18:14	20,3	33,8	25,3
8991	11:21:15	20,5	35,2	25,1
8993	11:21:52	20,7	35,1	24,5
8995	11:22:32	20,9	35,6	24,9
8997	11:29:00	20,7	35,5	25,4
8999	11:30:29	21,1	36	25,9
9001	11:32:04	21	31,2	25,9
9003	11:36:33	21,8	31,8	26,5
9007	11:38:45	22,2	34,9	27,5
9009	11:39:13	21,9	34,6	26,6
9011	11:40:42	21,5	33,6	25,9
Μέσος όρος		20,3	34,1	25,1



Διάγραμμα 4.1.2-1: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 21/10/2014

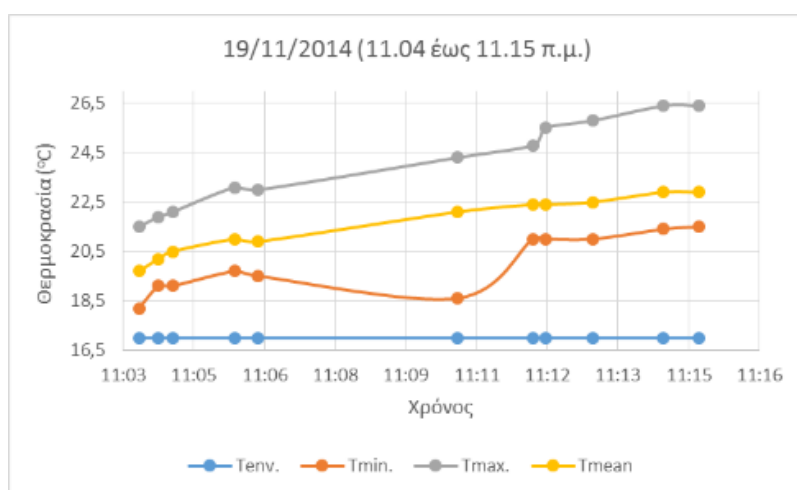
19 Νοεμβρίου 2014

Στις 19/11/2014 πραγματοποιήθηκε σάρωση της νότιας όψης σε δύο χρονικές περιόδους, στις 11.04 έως 11.15 π.μ. και στη 01.01 έως 01.05 μ.μ. Ακολουθούν ο πίνακας και το διάγραμμα με τις θερμοκρασίες των κίωνων την πρώτη χρονική περίοδο.

Πίνακας 4.1.2-3: Δεδομένα μετρήσεων στις 19/11/2014 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
9598	11:04:10	18,2	21,5	19,7
9599	11:04:34	19,1	21,9	20,2
9601	11:04:51	19,1	22,1	20,5
9603	11:06:07	19,7	23,1	21
9605	11:06:36	19,5	23	20,9
9617	11:10:39	18,6	24,3	22,1
9621	11:12:11	21	24,8	22,4
9623	11:12:27	21	25,5	22,4
9627	11:13:24	21	25,8	22,5
9631	11:14:51	21,4	26,4	22,9
9633	11:15:34	21,5	26,4	22,9
Μέσος όρος		20	24,1	21,6

Η μέση θερμοκρασία των κίωνων (21,6°C) είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 4,6°C. Παράλληλα δεν παρατηρούνται τόσο μεγάλες διαφορές μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών, όπως στις 21/10/2014. Η μέγιστες θερμοκρασίες είναι περίπου κατά 4°C υψηλότερες από τις ελάχιστες, ενώ η μέση διαφορά των μέσω θερμοκρασιών από τις ελάχιστες είναι 1,6°C.



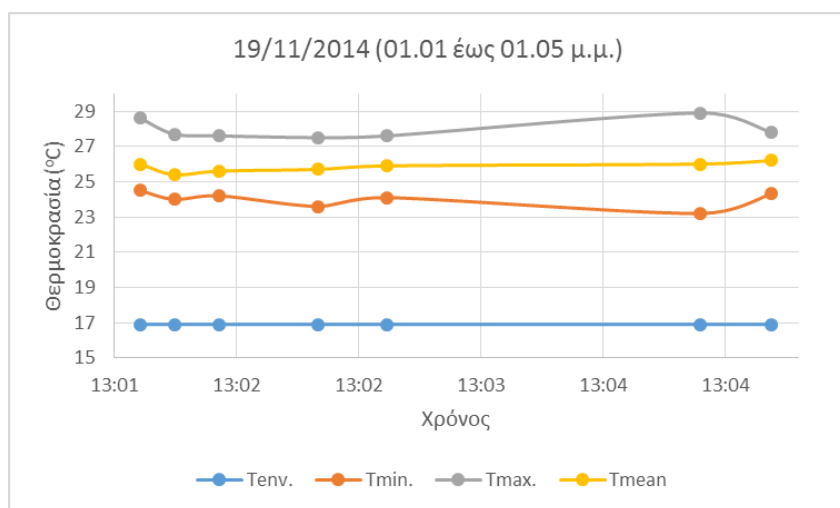
Διάγραμμα 4.1.2-2: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 19/11/2014 για την πρώτη χρονική περίοδο

Η δεύτερη περίοδος διήρκησε από τη 01.01 έως τη 01.05 μ.μ. Στον πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθούν καταγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το διάστημα αυτό.

Πίνακας 4.1.2-4: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 19/11/2014 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
10056	13:01:30	24,5	28,6	26
10058	13:01:42	24	27,7	25,4
10060	13:01:58	24,2	27,6	25,6
10062	13:02:33	23,6	27,5	25,7
10064	13:02:57	24,1	27,6	25,9
10072	13:04:48	23,2	28,9	26
10074	13:05:13	24,3	27,8	26,2
Μέσος όρος		24	28	25,8

Η μέση θερμοκρασία των κίωνων ισούται με 25,8°C και είναι υψηλότερη κατά 8,8°C. Όπως γίνεται αντιληπτό η θερμοκρασία των κίωνων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος παραμένει σταθερή, επομένως η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ηλιακή ακτινοβολία που είναι εντονότερη τις μεσημεριανές ώρες. Η διαφορά μεταξύ των ελαχίστων και των μέγιστων τιμών φτάνει τους 4°C κατά μέσο όρο, ενώ η μέση διαφορά της μέσης θερμοκρασίας από τις ελάχιστες τιμές δεν ξεπερνά τους 1,8°C.



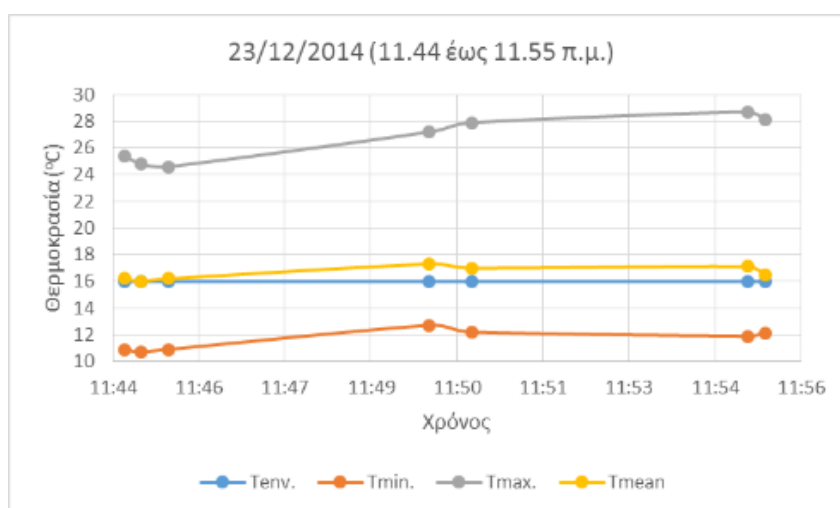
Διάγραμμα 4.1.2-3: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 19/11/2014 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

23 Δεκεμβρίου 2014

Στις 23/12/2014 έλαβε χώρα θερμογραφικός έλεγχος από τις 11.44 έως τις 11.55 π.μ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι τα εξής:

Πίνακας 4.1.2-5: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 23/12/2014

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
10626	11:44:56	10,9	25,4	16,2
10628	11:45:13	10,7	24,8	16
10630	11:45:40	10,9	24,6	16,2
10642	11:50:02	12,7	27,2	17,3
10646	11:50:45	12,2	27,9	17
10660	11:55:22	11,9	28,7	17,1
10662	11:55:39	12,1	28,1	16,5
Μέσος όρος		11,6	26,7	16,6



Διάγραμμα 4.1.2-4: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 23/12/2014

Η μέση θερμοκρασία των κιώνων είναι ίση με 16,6°C και είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 0,6°C. Παράλληλά παρατηρούνται μεγάλες διαφορές των μέγιστων από τις ελάχιστες και μέσες θερμοκρασίες, οι οποίες φτάνουν κατά μέσο όρο τους 15,1°C και 10,1°C αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να προκύπτει εξαιτίας της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τη χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι οι επιφάνειες που εκτίθενται περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή επιφανειακή θερμοκρασία.

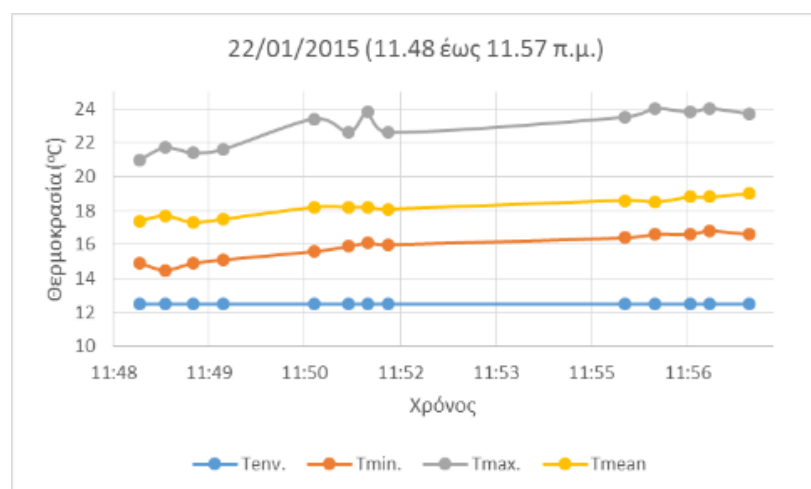
22 Ιανουαρίου 2015

Στις 22/01/2015 σαρώθηκε η νότια όψη του ναού του Ηφαίστου από τις 11.48 έως τις 11.57 π.μ. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Πίνακας 4.1.2-6: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 22/01/2015

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
12016	11:48:27	14,9	21	17,4
12018	11:48:50	14,5	21,7	17,7
12020	11:49:15	14,9	21,4	17,3
12022	11:49:42	15,1	21,6	17,5
12028	11:51:05	15,6	23,4	18,2
12030	11:51:36	15,9	22,6	18,2
12032	11:51:53	16,1	23,8	18,2
12034	11:52:11	16	22,6	18,1
12048	11:55:45	16,4	23,5	18,6
12050	11:56:12	16,6	24	18,5
12054	11:56:44	16,6	23,8	18,8
12056	11:57:02	16,8	24	18,8
12058	11:57:37	16,6	23,7	19
Μέσος όρος		15,8	22,9	18,2

Η μέση θερμοκρασία των κιώνων είναι ίση με 18,2°C και είναι κατά 5,7°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αξίζει να σημειωθεί πως η σχετική υγρασία είναι αρκετά υψηλή όπως συνέβη και στις 19/11/2014, όπου και τότε οι επιφάνειες των κιώνων είχαν μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συνεπώς η σχετική υγρασία είναι μία παράμετρος που πιθανόν να επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επιπρόσθετα η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες φτάνει τους 7,1°C, ενώ η μέση διαφορά των μέγιστων από τις μέσες θερμοκρασίες των κιώνων ανέρχεται στους 4,7°C.



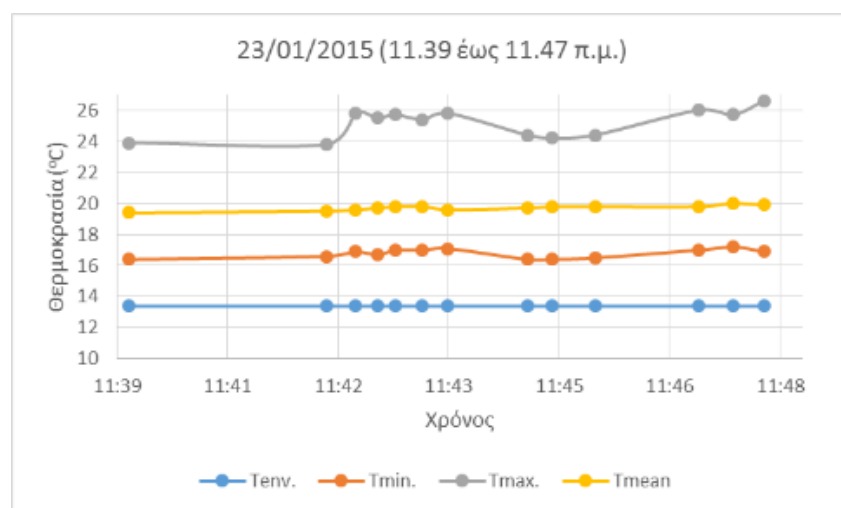
Διάγραμμα 4.1.2-5: Θερμοκρασία των κιώνων της νότιας όψης στις 22/01/2015

23 Ιανουαρίου 2015

Στις 23/01/2015 οι μετρήσεις έλαβαν χώρα το χρονικό διάστημα από 11.39 έως 11.49 π.μ. Οι καιρικές συνθήκες την 23^η Ιανουαρίου είναι παρόμοιες με αυτές της 22^{ης} Ιανουαρίου με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά είναι εντονότερη η επίδραση του ανέμου. Επιπλέον μπορεί να γίνει και μια περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών, διότι προέρχονται από μετρήσεις σε διαδοχικές μέρες.

Πίνακας 4.1.2-7: Αποτελέσματα των μετρήσεων στις 23/01/2015

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
13001	11:39:43	16,4	23,9	19,4
13002	11:42:17	16,6	23,8	19,5
13003	11:42:40	16,9	25,8	19,6
13004	11:42:57	16,7	25,5	19,7
13005	11:43:11	17	25,7	19,8
13006	11:43:32	17	25,4	19,8
13007	11:43:52	17,1	25,8	19,6
13009	11:44:54	16,4	24,4	19,7
13010	11:45:13	16,4	24,2	19,8
13011	11:45:47	16,5	24,4	19,8
13012	11:47:08	17	26	19,8
13013	11:47:35	17,2	25,7	20
13014	11:47:59	16,9	26,6	19,9
Μέσος όρος		16,8	25,2	19,7



Διάγραμμα 4.1.2-6: Θερμοκρασία των κιώνων της νότιας όψης στις 23/01/2015

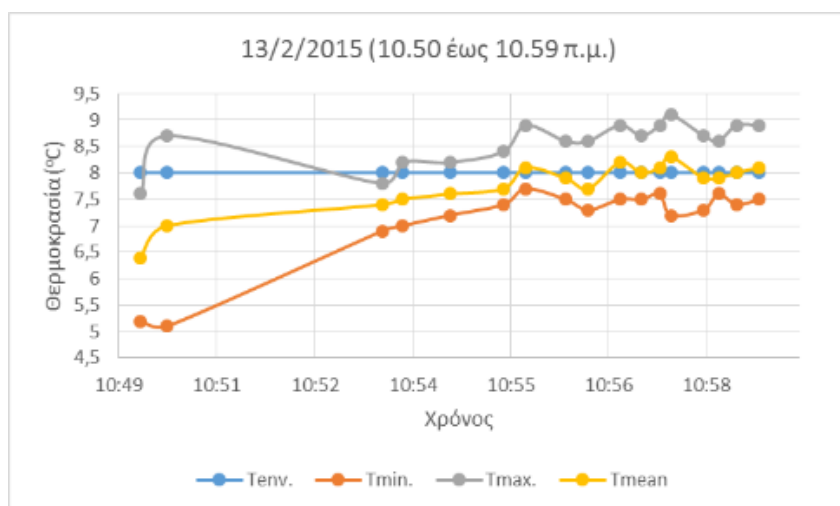
Η μέση θερμοκρασία των κιώνων είναι 19,7°C και είναι κατά 6,3°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι κατά 8,4°C και κατά 5,5°C υψηλότερες από τις ελάχιστες από τις μέσες θερμοκρασίες αντίστοιχα. Σε σχέση με τα αποτελέσματα της 22^{ης} Ιανουαρίου δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές εκτός από μία αύξηση της θερμοκρασίας των κιώνων.

13 Φεβρουαρίου 2015

Στις 13/02/2015 πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος της νότιας όψης σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, από τις 10.50 έως τις 10.59 π.μ. και από τη 01.13 έως τη 01.18 μ.μ. Τα αποτελέσματα του θερμογραφικού ελέγχου για την πρώτη χρονική περίοδο ήταν τα εξής:

Πίνακας 4.1.2-8: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 13/02/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
14034	10:50:03	5,2	7,6	6,4
14036	10:50:26	5,1	8,7	7
14040	10:53:36	6,9	7,8	7,4
14042	10:53:54	7	8,2	7,5
14044	10:54:36	7,2	8,2	7,6
14046	10:55:23	7,4	8,4	7,7
14048	10:55:43	7,7	8,9	8,1
14050	10:56:18	7,5	8,6	7,9
14052	10:56:38	7,3	8,6	7,7
14054	10:57:06	7,5	8,9	8,2
14056	10:57:25	7,5	8,7	8
14058	10:57:41	7,6	8,9	8,1
14060	10:57:51	7,2	9,1	8,3
14062	10:58:20	7,3	8,7	7,9
14064	10:58:33	7,6	8,6	7,9
14066	10:58:49	7,4	8,9	8
14068	10:59:09	7,5	8,9	8,1
Μέσος όρος		7,1	8,6	7,8



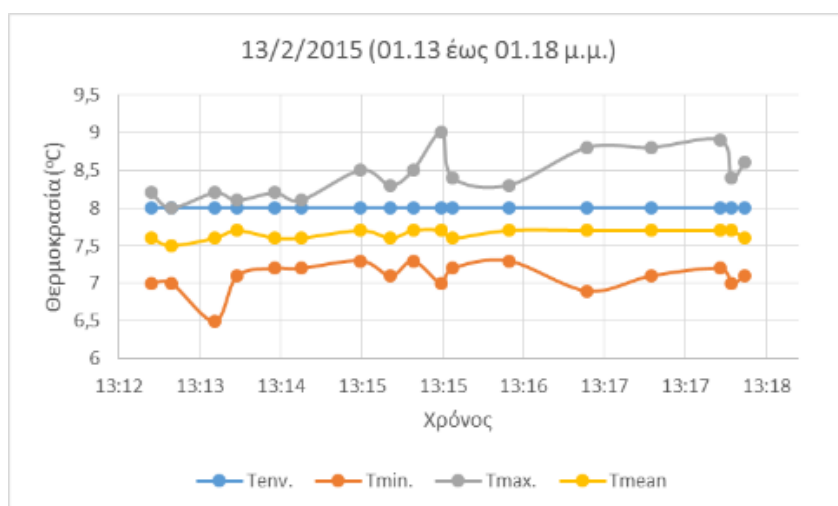
Διάγραμμα 4.1.2-7: Θερμοκρασία των κίωνων της νότιας όψης στις 13/02/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι οι θερμοκρασίες των κίωνων συμπίπτουν με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα η μέση θερμοκρασία κίωνων ισούται με 7,8°C και είναι κατά 0,2°C μικρότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης η μέση διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών φτάνει τον 1,5°C. Αιτία του φαινομένου αυτού είναι η χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως διαπιστώνεται σε πόσο μεγάλο βαθμό επηρεάζει αυτή η παράμετρος την επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου.

Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα από τη δεύτερη περίοδο των μετρήσεων που ακολουθούν οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι ελάχιστες σε σύγκριση με την πρώτη φάση. Η μέση θερμοκρασία των κίωνων (7,6°C) παρέμεινε σχεδόν ίδια με τις πρωινές ώρες και είναι κατά 0,4°C μικρότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα η διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών δεν ξεπερνά τους 2°C, ενώ η διαφορά των μέγιστων από τις μέσες θερμοκρασίες φτάνει τον 1°C. Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στους κίονες που παρατηρούνταν στις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην ηλιακή ακτινοβολία. Αντίθετα στις 13/02/2015 που τα ποσοστά νεφοκάλυψης είναι μεγάλα οι θερμοκρασία του μαρμάρου πλησιάζει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.1.2-9: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 13/02/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
14981	13:13:09	7	8,2	7,6
14982	13:13:20	7	8	7,5
14983	13:13:43	6,5	8,2	7,6
14984	13:13:55	7,1	8,1	7,7
14985	13:14:15	7,2	8,2	7,6
14986	13:14:29	7,2	8,1	7,6
14987	13:15:01	7,3	8,5	7,7
14988	13:15:17	7,1	8,3	7,6
14989	13:15:29	7,3	8,5	7,7
14990	13:15:44	7	9	7,7
14991	13:15:50	7,2	8,4	7,6
14992	13:16:20	7,3	8,3	7,7
14993	13:17:02	6,9	8,8	7,7
14994	13:17:36	7,1	8,8	7,7
14995	13:18:13	7,2	8,9	7,7
14996	13:18:19	7	8,4	7,7
14997	13:18:26	7,1	8,6	7,6
Μέσος όρος		7,1	8,4	7,6



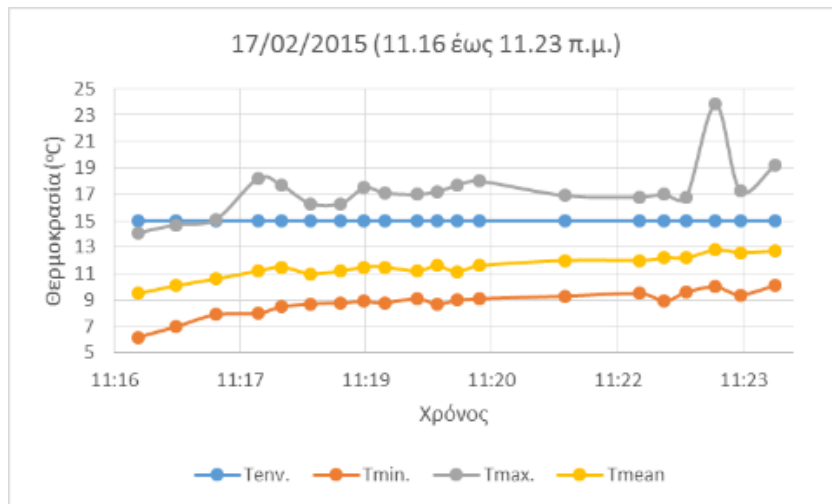
Διάγραμμα 4.1.2-8: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 13/02/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

17 Φεβρουαρίου 2015

Στις 17/02/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 11.16 έως τις 11.23 π.μ. και τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Πίνακας 4.1.2-10: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 17/02/2015

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
15018	11:16:39	6,2	14,1	9,5
15019	11:17:05	7	14,7	10,1
15021	11:17:32	7,9	15,1	10,6
15023	11:18:01	8	18,2	11,2
15025	11:18:17	8,5	17,7	11,5
15027	11:18:37	8,7	16,3	11
15029	11:18:58	8,8	16,3	11,2
15031	11:19:14	8,9	17,5	11,5
15033	11:19:28	8,8	17,1	11,5
15035	11:19:50	9,1	17	11,2
15037	11:20:04	8,7	17,2	11,6
15039	11:20:18	9	17,7	11,1
15041	11:20:33	9,1	18	11,6
15043	11:21:32	9,3	16,9	12
15045	11:22:23	9,5	16,8	12
15047	11:22:40	8,9	17	12,2
15049	11:22:55	9,6	16,8	12,2
15051	11:23:15	10	23,8	12,8
15053	11:23:32	9,4	17,3	12,6
15055	11:23:56	10,1	19,2	12,7
Μέσος όρος		8,8	17,2	11,5



Διάγραμμα 4.1.2-9: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 17/02/2015

Η μέση θερμοκρασία κιώνων είναι 11,5°C και διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά 3,5°C. Επιπλέον η μέση διαφορά των μεγίστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι 8,5°C. Και σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, επειδή η ηλιακή ακτινοβολία ήταν χαμηλή.

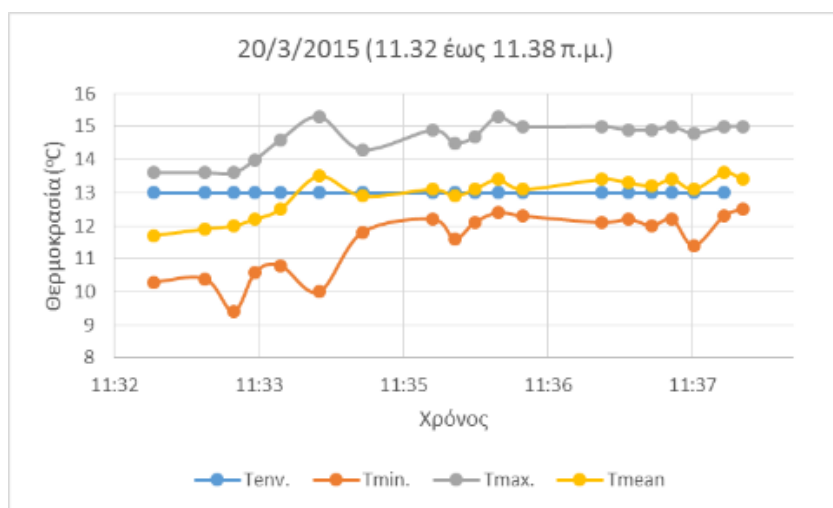
20 Μαρτίου 2015

Στις 20/03/2015 διεξήχθη θερμογραφικός έλεγχος της νότιας όψης σε δύο χρονικά διαστήματα, από τις 11.32 έως τις 11.38 π.μ. και από τη 01.18 έως τη 01.21 μ.μ. Τη μέρα εκείνη σημειώθηκε μερική έκλειψη ηλίου από τις 10.40 π.μ. έως τις 12.50 μ.μ.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης των μετρήσεων η μέση διαφορά των μεγίστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι 3,1°C, ενώ των μεγίστων από τις μέσες τιμές είναι 1,7°C. Η μέση θερμοκρασία των κιώνων είναι 12,9°C και διαφέρει κατά 0,1°C από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ενώ η μέση θερμοκρασία των κιώνων σχεδόν ταυτίζεται με αυτή του περιβάλλοντος. Το φαινόμενο αυτό, που παρατηρήθηκε και στις 13/02/2015, οφείλεται στη χαμηλή ηλιοφάνεια τη χρονική στιγμή εκείνη εξαιτίας της έκλειψης ηλίου.

Πίνακας 4.1.2-11: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 20/03/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
16181	11:32:36	10,3	13,6	11,7
16182	11:33:07	10,4	13,6	11,9
16184	11:33:24	9,4	13,6	12
16186	11:33:37	10,6	14	12,2
16188	11:33:52	10,8	14,6	12,5
16190	11:34:15	10	15,3	13,5
16192	11:34:41	11,8	14,3	12,9
16196	11:35:23	12,2	14,9	13,1
16198	11:35:36	11,6	14,5	12,9
16200	11:35:48	12,1	14,7	13,1
16202	11:36:02	12,4	15,3	13,4
16204	11:36:17	12,3	15	13,1
16206	11:37:04	12,1	15	13,4
16208	11:37:20	12,2	14,9	13,3
16210	11:37:34	12	14,9	13,2
16212	11:37:46	12,2	15	13,4
16214	11:37:59	11,4	14,8	13,1
16216	11:38:17	12,3	15	13,6
16218	11:38:28	12,5	15	13,4
Μέσος όρος		11,5	14,6	12,9



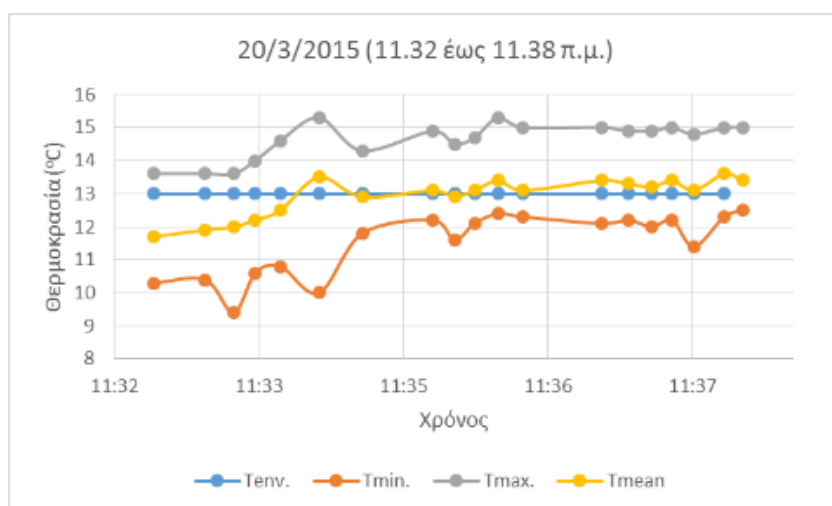
Διάγραμμα 4.1.2-10: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 20/03/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση οι μετρήσεις έλαβαν χώρα μετά την ολοκλήρωση του φαινομένου της μερικής έκλειψης.

Πίνακας 4.1.2-12: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 20/03/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
17081	13:18:18	10,6	13	11,2
17082	13:18:49	11,7	13,5	12,4
17083	13:18:56	11,7	13,4	12,3
17084	13:19:52	11,5	13,3	12,3
17085	13:20:10	11,4	13,4	12,4
17086	13:20:20	11,7	13,6	12,4
17087	13:20:33	11,3	13,6	12,4
17088	13:20:53	11,4	13,5	12,3
17089	13:21:00	11,4	13,3	12,1
17090	13:21:04	11,3	13,2	12,2
17091	13:21:23	11,7	13,4	12,4
17092	13:21:44	11,8	13,4	12,5
Μέσος όρος		11,5	14,3	12,2

Η μέση τιμή της διαφοράς ανάμεσα στις μέγιστες και τις ελάχιστες και τις μέσες τιμές είναι 1,9°C και 1,1°C αντίστοιχα. Η μέση θερμοκρασία κίωνων ανέρχεται στους 12,2°C και είναι υψηλότερη κατά 2,2°C από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η αύξηση αυτή αποδίδεται στην αύξηση της ηλιοφάνειας.



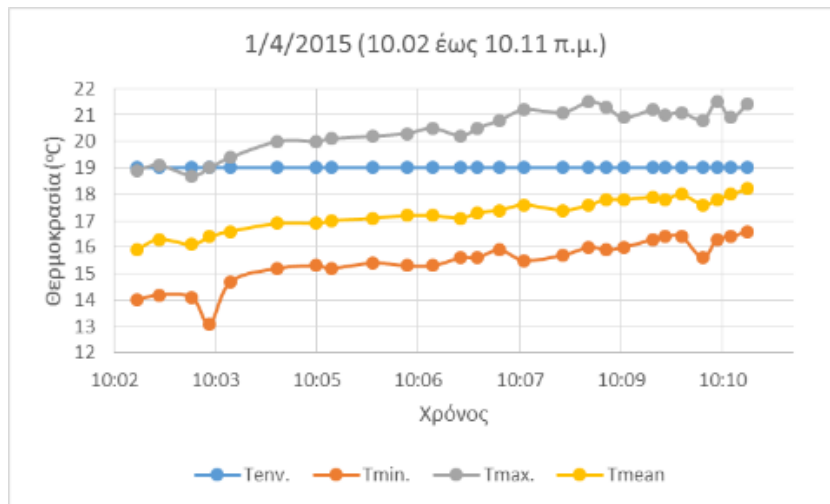
Διάγραμμα 4.1.2-11: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 20/03/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

1 Απριλίου 2015

Την 01/04/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο χρονικές φάσεις, από τις 10.02 έως τις 10.11 π.μ. και από τις 02.15 έως τις 02.17 μ.μ. Στη πρώτη φάση μέση θερμοκρασία του κίονα (17,3°C) είναι κατά 1,7°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι κατά μέσο όρο κατά 5°C υψηλότερες από τις ελάχιστες και κατά 3,2°C από τις μέσες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4.1.2-13: Αποτελέσματα μετρήσεων την 01/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
17144	10:02:32	14	18,9	15,9
17146	10:02:51	14,2	19,1	16,3
17148	10:03:19	14,1	18,7	16,1
17150	10:03:34	13,1	19	16,4
17152	10:03:52	14,7	19,4	16,6
17154	10:04:32	15,2	20	16,9
17156	10:05:05	15,3	20	16,9
17158	10:05:18	15,2	20,1	17
17160	10:05:53	15,4	20,2	17,1
17162	10:06:22	15,3	20,3	17,2
17164	10:06:44	15,3	20,5	17,2
17166	10:07:08	15,6	20,2	17,1
17168	10:07:22	15,6	20,5	17,3
17170	10:07:41	15,9	20,8	17,4
17172	10:08:02	15,5	21,2	17,6
17174	10:08:35	15,7	21,1	17,4
17176	10:08:57	16	21,5	17,6
17178	10:09:12	15,9	21,3	17,8
17180	10:09:27	16	20,9	17,8
17182	10:09:52	16,3	21,2	17,9
17184	10:10:02	16,4	21	17,8
17186	10:10:16	16,4	21,1	18
17188	10:10:34	15,6	20,8	17,6
17190	10:10:46	16,3	21,5	17,8
17192	10:10:58	16,4	20,9	18
17194	10:11:12	16,6	21,4	18,2
Μέσος όρος		15,5	20,4	17,3

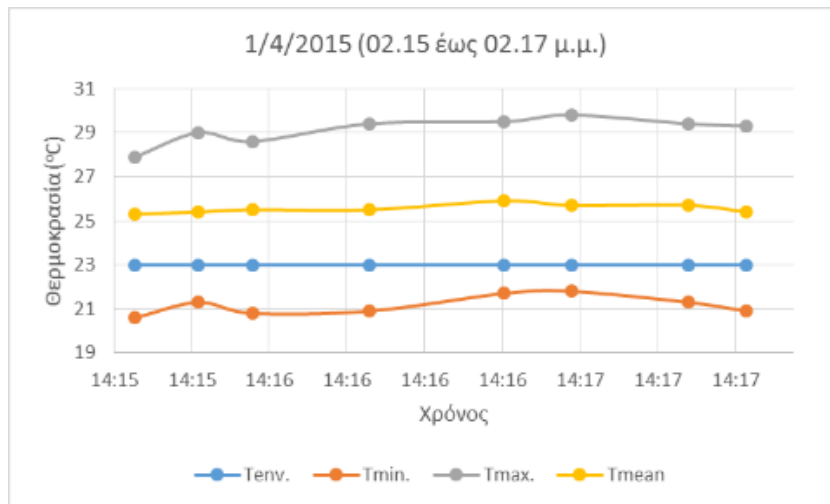


Διάγραμμα 4.1.2-12: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης την 01/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα που ακολουθούν, στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, η μέση θερμοκρασία αυξάνεται και φτάνει τους 25,6°C, ενώ είναι και κατά 2,6°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι 8°C και από τις μέσες 3,6°C. Γενικά παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών που συνάδει με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ η διεύρυνση της διαφοράς μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών μπορεί να αποδοθεί στη συνεχή έκθεση των επιφανειών στην ηλιακή ακτινοβολία.

Πίνακας 4.1.2-14: Αποτελέσματα μετρήσεων την 01/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
18548	14:15:35	20,6	27,9	25,3
18550	14:15:49	21,3	29	25,4
18552	14:16:01	20,8	28,6	25,5
18554	14:16:27	20,9	29,4	25,5
18556	14:16:57	21,7	29,5	25,9
18558	14:17:12	21,8	29,8	25,7
18560	14:17:38	21,3	29,4	25,7
18562	14:17:51	20,9	29,3	25,4
Μέσος όρος		21,2	29,1	25,6



Διάγραμμα 4.1.2-13: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης την 01/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

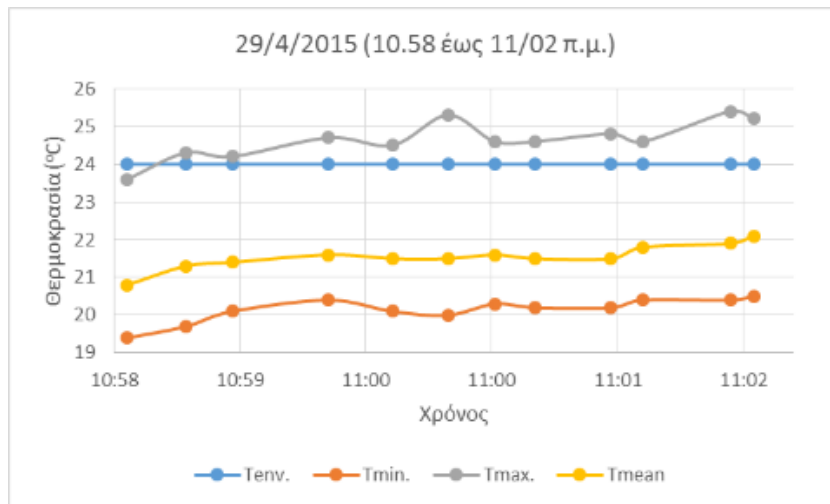
29 Απριλίου 2015

Στις 29/04/2015 διεξήχθησαν μετρήσεις σε τρεις χρονικές περιόδους, από τις 10.58 έως τις 11.02 π.μ., από τις 12.39 έως τις 12.51 μ.μ. και από τις 02.01 έως τις 02.07 μ.μ.

Στην πρώτη περίοδο η μέση θερμοκρασία κίωνων ισούται με 21,5°C και είναι κατά 2,5°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα έντονες θερμοκρασιακές διαφορές, καθώς η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες και από τις μέσες τιμές είναι 4,5°C και 3,1°C αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα οι μέγιστες θερμοκρασίες και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχουν πολύ κοντινές τιμές.

Πίνακας 4.1.2-15: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 29/04/2015 την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
48	10:58:44	19,4	23,6	20,8
50	10:59:04	19,7	24,3	21,3
52	10:59:20	20,1	24,2	21,4
54	10:59:53	20,4	24,7	21,6
56	11:00:15	20,1	24,5	21,5
58	11:00:34	20	25,3	21,5
60	11:00:50	20,3	24,6	21,6
62	11:01:04	20,2	24,6	21,5
64	11:01:30	20,2	24,8	21,5
66	11:01:41	20,4	24,6	21,8
68	11:02:11	20,4	25,4	21,9
70	11:02:19	20,5	25,2	22,1
Μέσος όρος		20,1	24,7	21,5

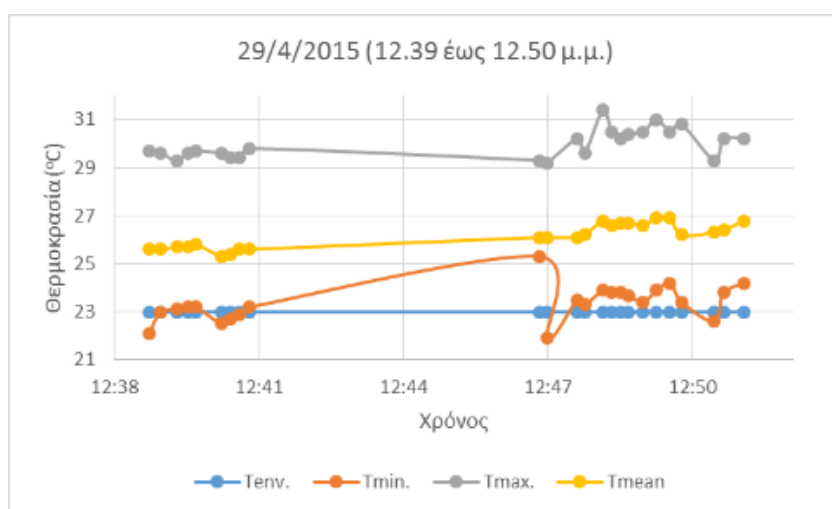


Διάγραμμα 4.1.2-14: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψεις στις 29/04/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η μέση θερμοκρασία των κίωνων είναι 26,2°C και είναι κατά 3,2°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα διευρύνεται η διαφορά μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών κατά μέσο όρο κατά 6,6°C. Όπως γίνεται αντιληπτό η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και πιθανός σε αυτό να συμβάλει η ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης η μέση τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.1.2-16: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 29/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
888	12:39:18	22,1	29,7	25,6
890	12:39:31	23	29,6	25,6
892	12:39:51	23,1	29,3	25,7
894	12:40:04	23,2	29,6	25,7
896	12:40:14	23,2	29,7	25,8
898	12:40:44	22,5	29,6	25,3
900	12:40:55	22,7	29,4	25,4
902	12:41:06	22,9	29,4	25,6
904	12:41:18	23,2	29,8	25,6
936	12:47:04	25,3	29,3	26,1
938	12:47:13	21,9	29,2	26,1
940	12:47:49	23,5	30,2	26,1
942	12:47:58	23,3	29,6	26,2
944	12:48:20	23,9	31,4	26,8
946	12:48:30	23,8	30,5	26,6
948	12:48:41	23,8	30,2	26,7
950	12:48:50	23,7	30,4	26,7
952	12:49:08	23,4	30,5	26,6
954	12:49:24	23,9	31	26,9
956	12:49:40	24,2	30,5	26,9
958	12:49:54	23,4	30,8	26,2
960	12:50:33	22,6	29,3	26,3
962	12:50:44	23,8	30,2	26,4
964	12:51:09	24,2	30,2	26,8
Μέσος όρος		23,4	30	26,2

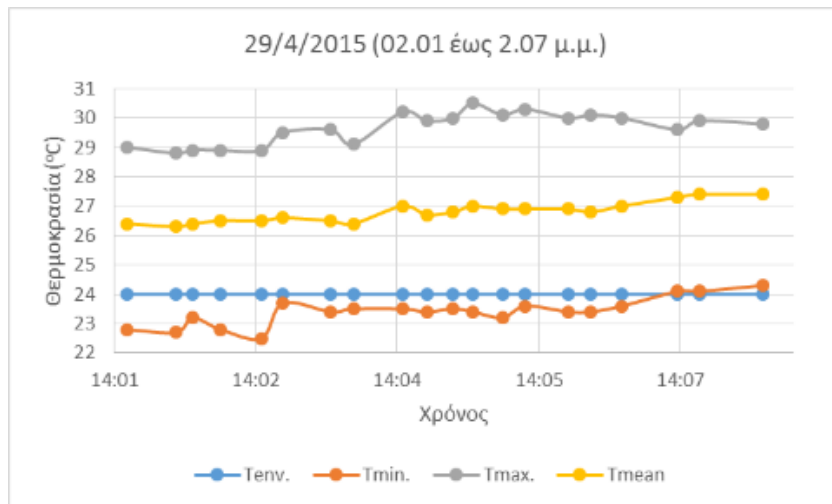


Διάγραμμα 4.1.2-15: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 29/04/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Την τρίτη χρονική περίοδο η μέση επιφανειακή θερμοκρασία είναι 26,8°C και ξεπερνά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά 2,8°C. Παράλληλα η διαφορά μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών είναι 6,2°C. Στην τρίτη φάση των μετρήσεων οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ίδιες με της πρώτης. Παρόλα αυτά στην πρώτη φάση η μέση θερμοκρασία είναι 21,5°C και κατά 2,5°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αντίθετα στην τρίτη φάση η μέση θερμοκρασία των κίωνων είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 2,8°C. Επομένως γίνεται προφανής η συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας στην αύξηση της θερμοκρασία με το χρόνο. Χωρίς να παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος η θερμοκρασία των κίωνων αυξάνεται και από τους 21,5°C φτάνει στους 26,2°C και καταλήγει στο 26,8°C.

Πίνακας 4.1.2-17: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 29/04/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
966	14:01:23	22,8	29	26,4
969	14:01:53	22,7	28,8	26,3
971	14:02:03	23,2	28,9	26,4
973	14:02:20	22,8	28,9	26,5
975	14:02:45	22,5	28,9	26,5
977	14:02:58	23,7	29,5	26,6
979	14:03:27	23,4	29,6	26,5
981	14:03:41	23,5	29,1	26,4
983	14:04:11	23,5	30,2	27
985	14:04:26	23,4	29,9	26,7
987	14:04:42	23,5	30	26,8
989	14:04:54	23,4	30,5	27
991	14:05:12	23,2	30,1	26,9
993	14:05:26	23,6	30,3	26,9
995	14:05:52	23,4	30	26,9
997	14:06:06	23,4	30,1	26,8
999	14:06:25	23,6	30	27
1001	14:06:59	24,1	29,6	27,3
1003	14:07:12	24,1	29,9	27,4
1005	14:07:51	24,3	29,8	27,4
Μέσος όρος		23,4	29,7	26,8



Διάγραμμα 4.1.2-16: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 29/04/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο

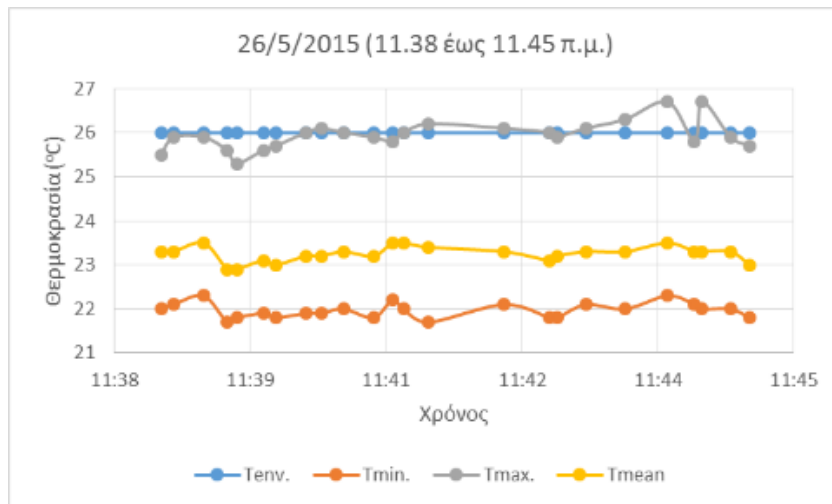
26 Μαΐου 2015

Στις 26/05/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο ναό του Ηφαίστου σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση διήρκησε από τις 11.38 έως τις 11.45 π.μ., η δεύτερη από τη 01.25 έως τη 01.31 μ.μ. και η τρίτη από τις 03.04 έως τις 03.07 μ.μ.

Στην πρώτη περίοδο η μέση διαφορά μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών είναι μόλις 4°C, ενώ η μέση θερμοκρασία φτάνει τους 23,2°C και είναι κατά 2,8°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.1.2-18: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 26/05/2014 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
1640	11:38:54	22	25,5	23,3
1641	11:39:02	22,1	25,9	23,3
1642	11:39:21	22,3	25,9	23,5
1643	11:39:36	21,7	25,6	22,9
1644	11:39:42	21,8	25,3	22,9
1645	11:39:59	21,9	25,6	23,1
1646	11:40:07	21,8	25,7	23
1647	11:40:26	21,9	26	23,2
1648	11:40:36	21,9	26,1	23,2
1649	11:40:50	22	26	23,3
1650	11:41:09	21,8	25,9	23,2
1651	11:41:21	22,2	25,8	23,5
1652	11:41:28	22	26	23,5
1653	11:41:44	21,7	26,2	23,4
1654	11:42:32	22,1	26,1	23,3
1655	11:43:01	21,8	26	23,1
1656	11:43:06	21,8	25,9	23,2
1657	11:43:24	22,1	26,1	23,3
1658	11:43:49	22	26,3	23,3
1659	11:44:16	22,3	26,7	23,5
1660	11:44:33	22,1	25,8	23,3
1661	11:44:38	22	26,7	23,3
1662	11:44:56	22	25,9	23,3
1663	11:45:08	21,8	25,7	23
Μέσος όρος		22	25,9	23,2

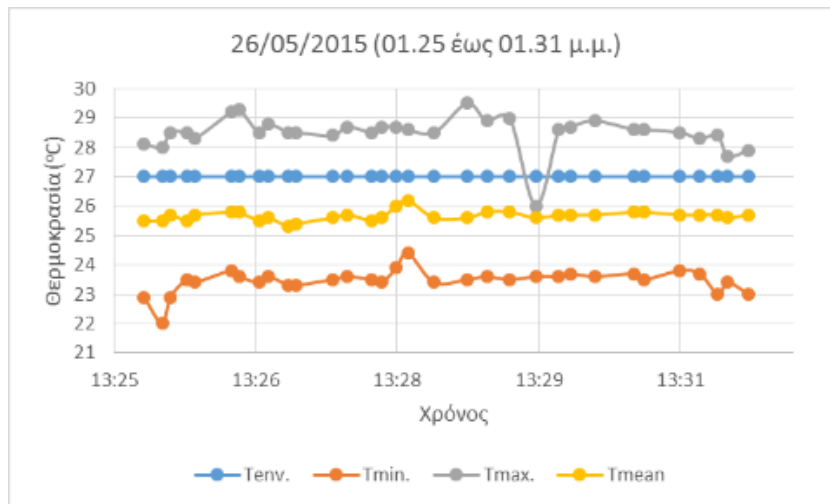


Διάγραμμα 4.1.2-17: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 26/05/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση η διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών αυξήθηκε ελάχιστα φτάνοντας τους 5°C. Η μέση θερμοκρασία των κιώνων αυξήθηκε στους 25,7°C και είναι κατά 1,3°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.1.2-19: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 26/05/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικών εικόνων	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
2385	13:25:42	22,9	28,1	25,5
2386	13:25:53	22	28	25,5
2387	13:25:58	22,9	28,5	25,7
2388	13:26:08	23,5	28,5	25,5
2389	13:26:13	23,4	28,3	25,7
2390	13:26:35	23,8	29,2	25,8
2391	13:26:40	23,6	29,3	25,8
2392	13:26:52	23,4	28,5	25,5
2393	13:26:58	23,6	28,8	25,6
2394	13:27:10	23,3	28,5	25,3
2395	13:27:15	23,3	28,5	25,4
2396	13:27:37	23,5	28,4	25,6
2397	13:27:46	23,6	28,7	25,7
2398	13:28:01	23,5	28,5	25,5
2399	13:28:07	23,4	28,7	25,6
2400	13:28:16	23,9	28,7	26
2401	13:28:23	24,4	28,6	26,2
2402	13:28:39	23,4	28,5	25,6
2403	13:28:59	23,5	29,5	25,6
2404	13:29:11	23,6	28,9	25,8
2405	13:29:25	23,5	29	25,8
2406	13:29:41	23,6	26	25,6
2407	13:29:55	23,6	28,6	25,7
2408	13:30:02	23,7	28,7	25,7
2409	13:30:17	23,6	28,9	25,7
2410	13:30:41	23,7	28,6	25,8
2411	13:30:47	23,5	28,6	25,8
2412	13:31:09	23,8	28,5	25,7
2413	13:31:21	23,7	28,3	25,7
2414	13:31:32	23	28,4	25,7
2415	13:31:38	23,4	27,7	25,6
2416	13:31:51	23	27,9	25,7
Μέσος όρος		23,5	28,5	25,7

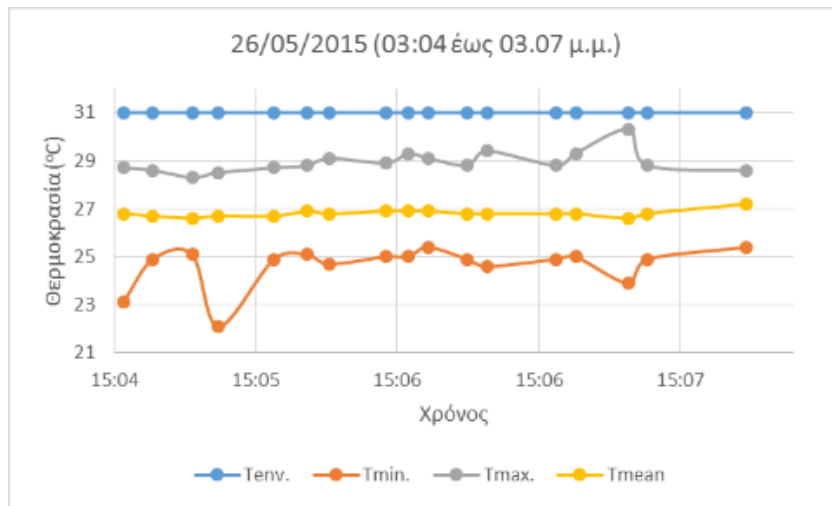


Διάγραμμα 4.1.2-18: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 26/05/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Την τρίτη χρονική περίοδο η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 31°C και η σχετική υγρασία μειώθηκε στο 25%. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας των κίωνων αυξάνεται στους 26,8°C και είναι μικρότερη κατά 4,2°C από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης η μέση διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών μειώθηκε στους 4,3°C.

Πίνακας 4.1.2-20: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 26/05/2015 για τη τρίτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
2581	15:04:48	23,1	28,7	26,8
2582	15:04:57	24,9	28,6	26,7
2583	15:05:09	25,1	28,3	26,6
2584	15:05:17	22,1	28,5	26,7
2585	15:05:34	24,9	28,7	26,7
2586	15:05:44	25,1	28,8	26,9
2587	15:05:51	24,7	29,1	26,8
2588	15:06:08	25	28,9	26,9
2589	15:06:15	25	29,3	26,9
2590	15:06:21	25,4	29,1	26,9
2591	15:06:33	24,9	28,8	26,8
2592	15:06:39	24,6	29,4	26,8
2593	15:07:00	24,9	28,8	26,8
2594	15:07:06	25	29,3	26,8
2595	15:07:22	23,9	30,3	26,6
2596	15:07:28	24,9	28,8	26,8
2597	15:07:58	25,4	28,6	27,2
Μέσος όρος		24,6	28,9	26,8



Διάγραμμα 4.1.2-19: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 26/05/2015 για την τρίτη χρονική περίοδο

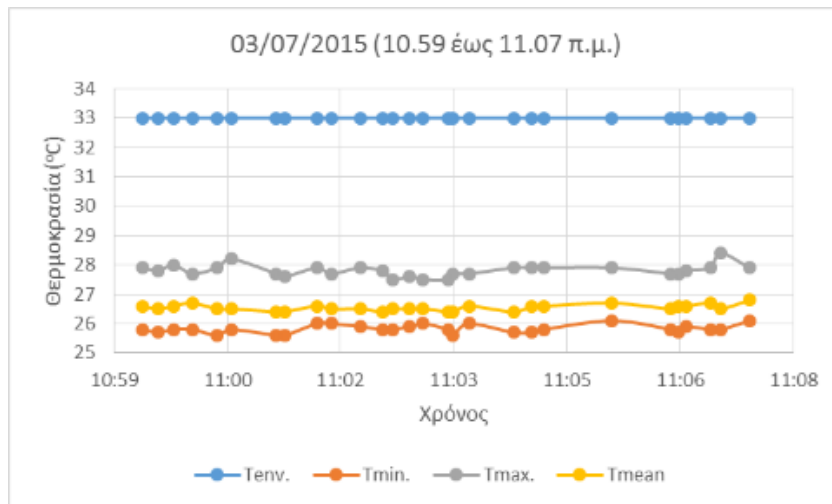
3 Ιουλίου 2015

Στις 3/7/2015 πραγματοποιήθηκαν θερμογραφικές μετρήσεις σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση διήρκησε από τις 10.59 έως τις 11.07 π.μ. και η δεύτερη από τη 01.01 έως τη 01.03 μ.μ. Τα αποτελέσματα της πρώτης περιόδου είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 4.1.2-21: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 03/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
2905	10:59:53	25,8	27,9	26,6
2906	11:00:05	25,7	27,8	26,5
2907	11:00:17	25,8	28	26,6
2908	11:00:31	25,8	27,7	26,7
2909	11:00:50	25,6	27,9	26,5
2910	11:01:01	25,8	28,2	26,5
2911	11:01:35	25,6	27,7	26,4
2912	11:01:42	25,6	27,6	26,4
2913	11:02:06	26	27,9	26,6
2914	11:02:17	26	27,7	26,5
2915	11:02:39	25,9	27,9	26,5
2916	11:02:56	25,8	27,8	26,4
2917	11:03:04	25,8	27,5	26,5
2918	11:03:17	25,9	27,6	26,5
2919	11:03:27	26	27,5	26,5
2920	11:03:46	25,8	27,5	26,4
2921	11:03:50	25,6	27,7	26,4
2922	11:04:02	26	27,7	26,6
2923	11:04:36	25,7	27,9	26,4
2924	11:04:50	25,7	27,9	26,6
2925	11:04:59	25,8	27,9	26,6
2926	11:05:51	26,1	27,9	26,7
2927	11:06:36	25,8	27,7	26,5
2928	11:06:42	25,7	27,7	26,6
2929	11:06:48	25,9	27,8	26,6
2930	11:07:06	25,8	27,9	26,7
2931	11:07:14	25,8	28,4	26,5
2932	11:07:36	26,1	27,9	26,8
Μέσος όρος		25,8	27,8	26,5

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασία περιβάλλοντος και των επιφανειακών θερμοκρασιών στους κίονες. Η μέση θερμοκρασία κίωνων φτάνει τους 26,5°C και είναι κατά 6,5°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον η διαφορά μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών αγγίζει τους 2°C.

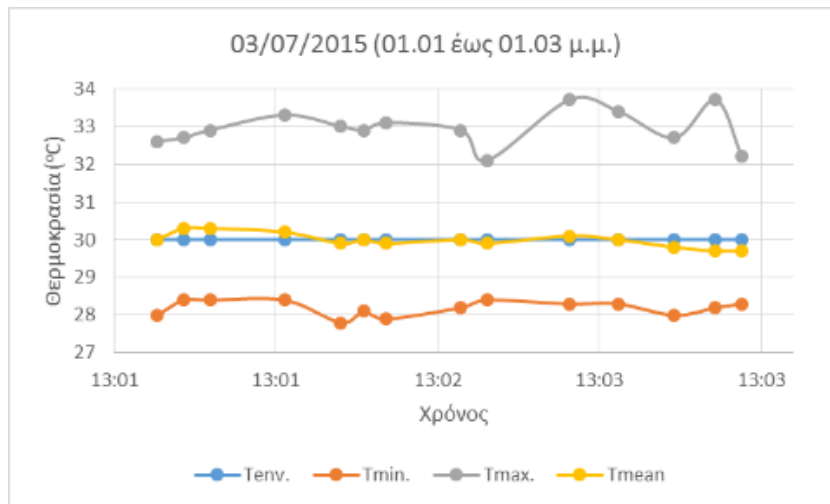


Διάγραμμα 4.1.2-20: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 03/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντός ήταν 30°C και η σχετική υγρασία 37%. Η μέση θερμοκρασία των κίωνων είναι 30°C και ταυτίζεται πλήρως με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η μέση διαφορά των μέγιστων θερμοκρασιών από τις ελάχιστες και τις μέσες είναι 4,7°C και 2,9°C αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1.2-22: Αποτελέσματα των μετρήσεων στις 03/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
3612	13:01:15	28	32,6	30
3613	13:01:22	28,4	32,7	30,3
3614	13:01:29	28,4	32,9	30,3
3615	13:01:49	28,4	33,3	30,2
3616	13:02:04	27,8	33	29,9
3617	13:02:10	28,1	32,9	30
3618	13:02:16	27,9	33,1	29,9
3620	13:02:36	28,2	32,9	30
3621	13:02:43	28,4	32,1	29,9
3622	13:03:05	28,3	33,7	30,1
3623	13:03:18	28,3	33,4	30
3624	13:03:33	28	32,7	29,8
3625	13:03:44	28,2	33,7	29,7
3626	13:03:51	28,3	32,2	29,7
Μέσος όρος		28,2	32,9	30



Διάγραμμα 4.1.2-21: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 03/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

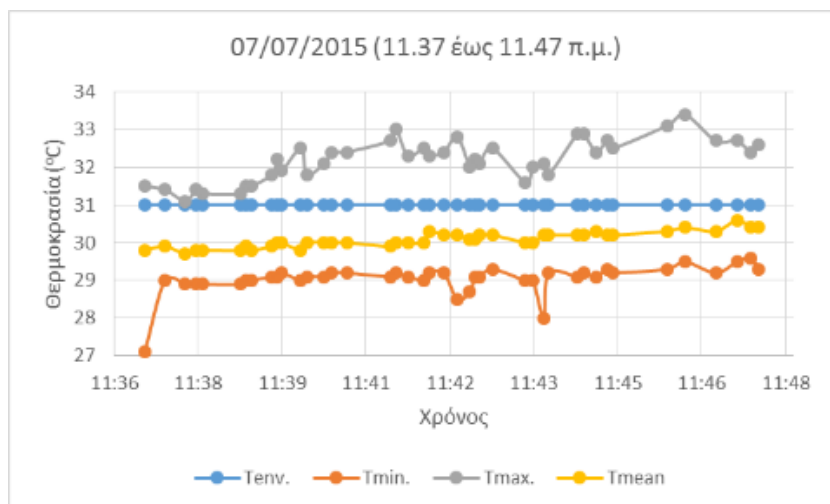
7 Ιουλίου 2015

Στις 07/07/2015 διεξήχθησαν μετρήσεις από τις 11.37 έως τις 11.47 π.μ. και από τη 01.37 έως τη 01.40 μ.μ. Στην πρώτη φάση των μετρήσεων οι θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 37°C και η σχετική υγρασία 24%. Η μέση θερμοκρασία κίωνων ισούται με 30,1°C και είναι κατά 0,9°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η μέση διαφορά ανάμεσα στις μέγιστες και τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι 3,2°C και ανάμεσα στις μέγιστες και τις μέσες είναι 2,1°C. Συνεπώς δεν υπάρχουν σημαντικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Πίνακας 4.1.2-23: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 07/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
3652	11:37:12	27,1	31,5	29,8
3653	11:37:33	29	31,4	29,9
3654	11:37:54	28,9	31,1	29,7
3655	11:38:05	28,9	31,4	29,8
3656	11:38:12	28,9	31,3	29,8
3657	11:38:51	28,9	31,3	29,8
3658	11:38:56	29	31,5	29,9
3659	11:39:02	29	31,5	29,8
3660	11:39:23	29,1	31,8	29,9
3661	11:39:29	29,1	32,2	30
3662	11:39:33	29,2	31,9	30
3663	11:39:53	29	32,5	29,8
3664	11:39:59	29,1	31,8	30
3665	11:40:17	29,1	32,1	30
3666	11:40:25	29,2	32,4	30
3667	11:40:40	29,2	32,4	30
3668	11:41:25	29,1	32,7	29,9

3669	11:41:31	29,2	33	30
3670	11:41:43	29,1	32,3	30
3671	11:42:00	29	32,5	30
3672	11:42:05	29,2	32,3	30,3
3673	11:42:20	29,2	32,4	30,2
3674	11:42:34	28,5	32,8	30,2
3675	11:42:47	28,7	32	30,1
3676	11:42:52	29,1	32,2	30,1
3677	11:42:57	29,1	32,1	30,2
3679	11:43:10	29,3	32,5	30,2
3680	11:43:44	29	31,6	30
3681	11:43:52	29	32	30
3682	11:44:03	28	32,1	30,2
3683	11:44:08	29,2	31,8	30,2
3684	11:44:38	29,1	32,9	30,2
3685	11:44:44	29,2	32,9	30,2
3686	11:44:57	29,1	32,4	30,3
3687	11:45:08	29,3	32,7	30,2
3688	11:45:14	29,2	32,5	30,2
3689	11:46:10	29,3	33,1	30,3
3690	11:46:28	29,5	33,4	30,4
3691	11:47:00	29,2	32,7	30,3
3692	11:47:22	29,5	32,7	30,6
3693	11:47:36	29,6	32,4	30,4
3694	11:47:44	29,3	32,6	30,4
Μέσος όρος		29	32,2	30,1



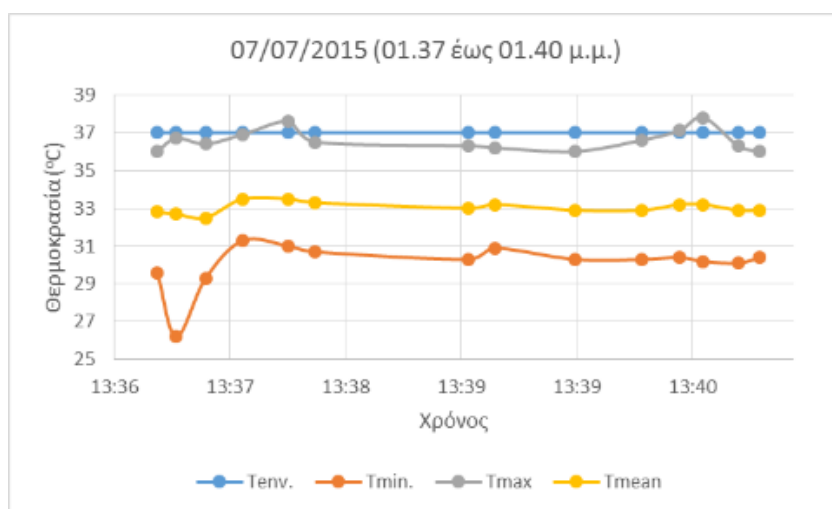
Διάγραμμα 4.1.2-22: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 07/07/.2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανέβηκε στους 37°C και η σχετική υγρασία έφτασε στο 24%.

Πίνακας 4.1.2-24: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 07/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
4280	13:37:11	29,6	36	32,8
4281	13:37:18	26,2	36,7	32,7
4282	13:37:29	29,3	36,4	32,5
4283	13:37:43	31,3	36,9	33,5
4284	13:38:00	31	37,6	33,5
4285	13:38:10	30,7	36,5	33,3
4289	13:39:07	30,3	36,3	33
4290	13:39:17	30,9	36,2	33,2
4291	13:39:47	30,3	36	32,9
4292	13:40:12	30,3	36,6	32,9
4293	13:40:26	30,4	37,1	33,2
4294	13:40:35	30,2	37,8	33,2
4295	13:40:48	30,1	36,3	32,9
4296	13:40:56	30,4	36	32,9
Μέσος όρος		30,1	36,6	33

Η μέση θερμοκρασία κίωνων (33°C) είναι κατά 4°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι όμοιες με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, ενώ η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες ξεπερνά τους 6°C.



Διάγραμμα 4.1.2-23: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 07/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

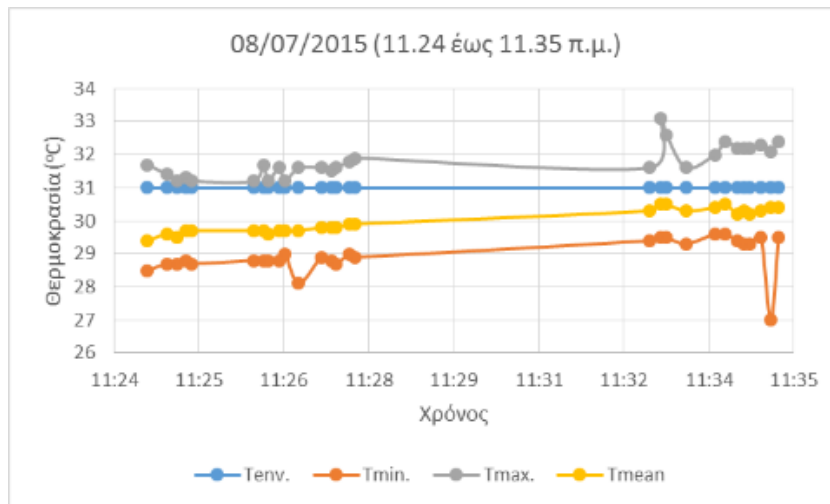
8 Ιουλίου 2015

Στις 08/07/2015 πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος από τις 11.24 έως τις 11.35 π.μ. και από τη 01.29 έως τη 01.33 μ.μ. Στην πρώτη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 31°C και η σχετική υγρασία 35%.

Πίνακας 4.1.2-25: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 08/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
4394	11:24:34	28,5	31,7	29,4
4395	11:24:54	28,7	31,4	29,6
4396	11:25:04	28,7	31,2	29,5
4397	11:25:13	28,8	31,3	29,7
4398	11:25:19	28,7	31,2	29,7
4399	11:26:22	28,8	31,2	29,7
4400	11:26:32	28,8	31,7	29,7
4401	11:26:37	28,8	31,2	29,6
4402	11:26:48	28,8	31,6	29,7
4403	11:26:54	29	31,2	29,7
4404	11:27:08	28,1	31,6	29,7
4405	11:27:31	28,9	31,6	29,8
4406	11:27:41	28,8	31,5	29,8
4407	11:27:46	28,7	31,6	29,8
4408	11:28:00	29	31,8	29,9
4409	11:28:05	28,9	31,9	29,9
4422	11:33:05	29,4	31,6	30,3
4423	11:33:16	29,5	33,1	30,5
4424	11:33:22	29,5	32,6	30,5
4425	11:33:42	29,3	31,6	30,3
4427	11:34:11	29,6	32	30,4
4428	11:34:22	29,6	32,4	30,5
4429	11:34:34	29,4	32,2	30,2
4430	11:34:41	29,3	32,2	30,3
4431	11:34:47	29,3	32,2	30,2
4432	11:34:58	29,5	32,3	30,3
4433	11:35:08	27	32,1	30,4
4434	11:35:16	29,5	32,4	30,4
Μέσος όρος		29	31,8	30

Η μέση θερμοκρασία των κιώνων (30°C) είναι κατά 1°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι 2,8°C. Όπως γίνεται αντιληπτό στην επιφάνεια του μαρμάρου δεν έχουν αναπτυχθεί μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές.

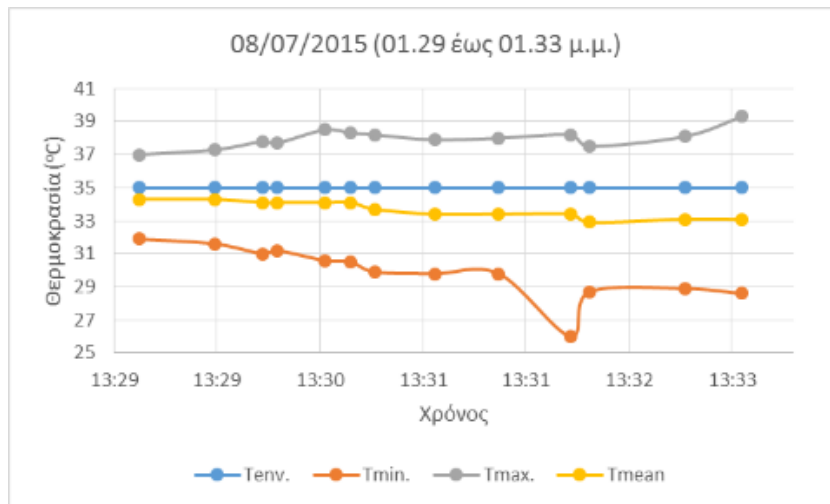


Διάγραμμα 4.1.2-24: Θερμοκρασίες κίωνων της νότιας όψης στις 08/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 35°C και η σχετική υγρασία στο 27%. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η μέση θερμοκρασία κίωνων (33,7°C) είναι κατά 1,3°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον διευρύνεται η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες και φτάνει τους 8,1°C. Αυτό συμβαίνει, επειδή η επιφάνεια έχει ακτινοβοληθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και έτσι αναπτύχθηκαν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των επιφανειών που είναι εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία και αυτών που προστατεύονται από αυτή.

Πίνακας 4.1.2-26: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 08/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
4952	13:29:10	31,9	37	34,3
4954	13:29:42	31,6	37,3	34,3
4955	13:30:02	31	37,8	34,1
4956	13:30:08	31,2	37,7	34,1
4957	13:30:28	30,6	38,5	34,1
4958	13:30:39	30,5	38,3	34,1
4959	13:30:49	29,9	38,2	33,7
4961	13:31:14	29,8	37,9	33,4
4965	13:31:41	29,8	38	33,4
4966	13:32:11	26	38,2	33,4
4967	13:32:19	28,7	37,5	32,9
4970	13:32:59	28,9	38,1	33,1
4971	13:33:23	28,6	39,3	33,1
Μέσος όρος		29,9	38	33,7



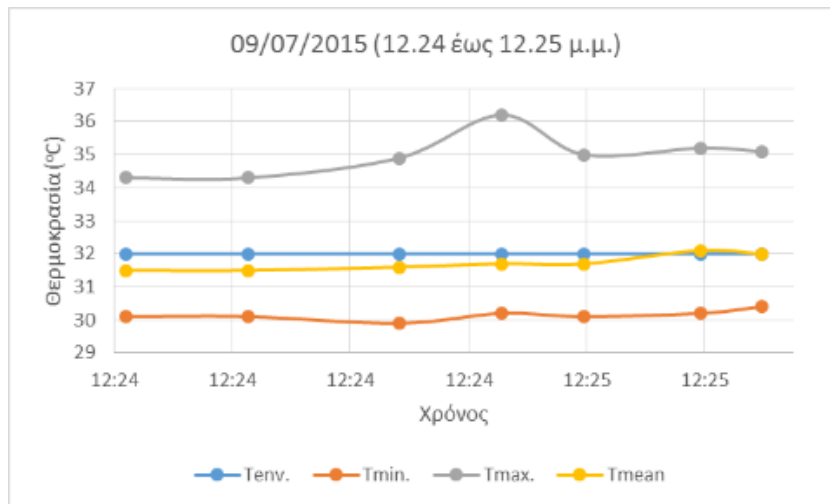
Διάγραμμα 4.1.2-25: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 08/09/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

09 Ιουλίου 2015

Στις 09/07/2015 οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε δύο φάσεις, από τις 12.24 έως τις 12.25 μ.μ. και από τη 01.53 έως τη 01.55 μ.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην πρώτη φάση των μετρήσεων ήταν 32°C και η σχετική υγρασία 37%. Η μέση θερμοκρασία των κιώνων (31,7°C) είναι κατά 0,3°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες είναι ίση με 4,9°C.

Πίνακας 4.1.2-27: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 09/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
5253	12:24:02	30,1	34,3	31,5
5255	12:24:20	30,1	34,3	31,5
5257	12:24:42	29,9	34,9	31,6
5259	12:24:57	30,2	36,2	31,7
5261	12:25:09	30,1	35	31,7
5263	12:25:26	30,2	35,2	32,1
5265	12:25:35	30,4	35,1	32
Μέσος όρος		30,1	35	32

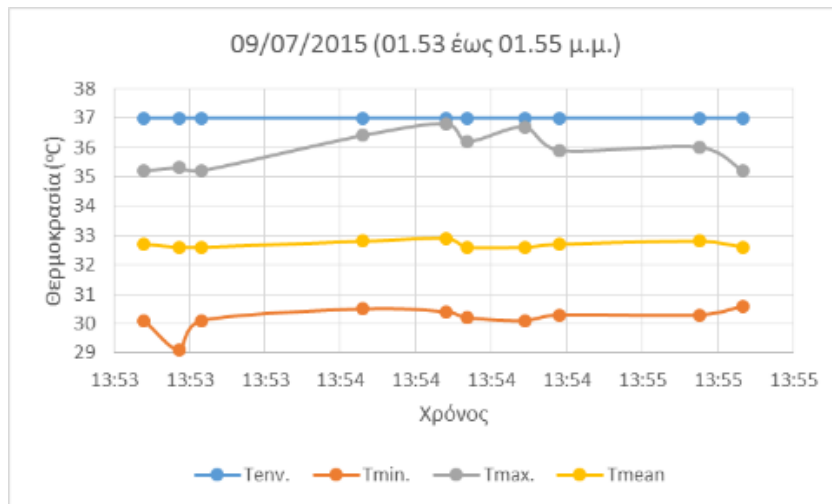


Διάγραμμα 4.1.2-26: Θερμοκρασίες των κιώνων της νότιας όψης στις 09/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Στο δεύτερο χρονικό διάστημα των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 37°C και η σχετική υγρασία 24%. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κατά 4,3°C υψηλότερη από τη μέση θερμοκρασία των κιώνων. Παράλληλα αυξήθηκε και η μέση διαφορά μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών που έφτασε τους 5,7°C. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι, ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξήθηκε κατά 5°C, η μέση θερμοκρασία των κιώνων αυξήθηκε μόλις κατά 0,7°C

Πίνακας 4.1.2-28: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 09/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
5814	13:53:18	30,1	35,2	32,7
5815	13:53:26	29,1	35,3	32,6
5816	13:53:31	30,1	35,2	32,6
5817	13:54:08	30,5	36,4	32,8
5818	13:54:27	30,4	36,8	32,9
5819	13:54:32	30,2	36,2	32,6
5820	13:54:45	30,1	36,7	32,6
5821	13:54:53	30,3	35,9	32,7
5823	13:55:25	30,3	36	32,8
5824	13:55:35	30,6	35,2	32,6
Μέσος όρος		30,2	35,9	32,7



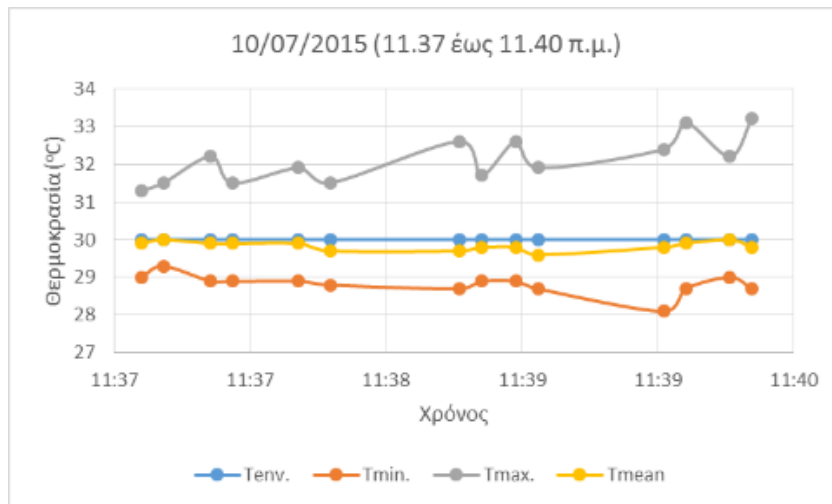
Διάγραμμα 4.1.2-27: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 09/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

10 Ιουλίου 2015

Στις 10/07/2015 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από τις 11.37 έως τις 11.40 π.μ. και από τη 01.44 έως τη 01.46 μ.μ. Στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 30°C και η σχετική υγρασία 44%.

Πίνακας 4.1.2-29: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 10/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
5831	11:37:15	29	31,3	29,9
5832	11:37:22	29,3	31,5	30
5833	11:37:37	28,9	32,2	29,9
5834	11:37:44	28,9	31,5	29,9
5835	11:38:05	28,9	31,9	29,9
5836	11:38:15	28,8	31,5	29,7
5837	11:38:56	28,7	32,6	29,7
5838	11:39:03	28,9	31,7	29,8
5839	11:39:14	28,9	32,6	29,8
5840	11:39:21	28,7	31,9	29,6
5842	11:40:01	28,1	32,4	29,8
5843	11:40:08	28,7	33,1	29,9
5844	11:40:22	29	32,2	30
5845	11:40:29	28,7	33,2	29,8
Μέσος όρος		28,8	32,1	29,8



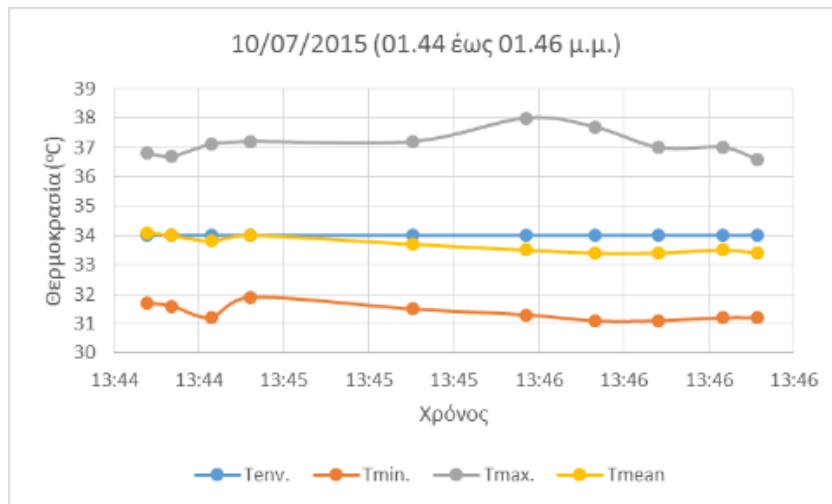
Διάγραμμα 4.1.2-28: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 10/07/2015 για την πρώτη χρονική περίοδο

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων η μέση θερμοκρασία των κίωνων (29,8°C) είναι κατά 0,2°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον η μέση διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες τιμές είναι μόλις 3,3°C.

Στη δεύτερη φάση του θερμογραφικού ελέγχου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν 34°C και η σχετική υγρασία 38%. Η μέση θερμοκρασία κίωνων (33,7°C) είναι κατά 0,3°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διαφορά των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και κίωνων το μεσημέρι είναι πολύ μικρή. Αυτό συμβαίνει επίσης στις 3 Ιουλίου και στις 8 Ιουλίου, που η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας δεν ξεπερνά τους 35°C. Αντίθετα στις 7 και στις 9 Ιουλίου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 37°C και η διαφορά της από αυτή των κίωνων είναι περίπου 4°C.

Πίνακας 4.1.2-30: Αποτελέσματα μετρήσεων στις 10/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

Κωδικός θερμικής εικόνας	Χρόνος	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)
6351	13:44:42	31,7	36,8	34,1
6352	13:44:47	31,6	36,7	34
6353	13:44:55	31,2	37,1	33,8
6354	13:45:03	31,9	37,2	34
6355	13:45:36	31,5	37,2	33,7
6356	13:45:59	31,3	38	33,5
6357	13:46:13	31,1	37,7	33,4
6358	13:46:26	31,1	37	33,4
6359	13:46:39	31,2	37	33,5
6360	13:46:46	31,2	36,6	33,4
Μέσος όρος		31,4	37,1	33,7

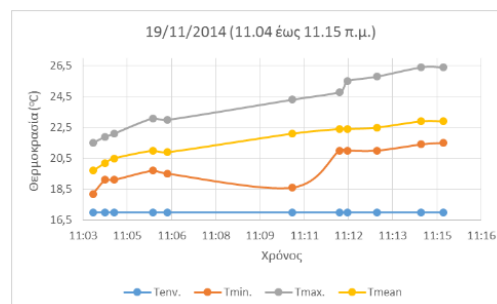
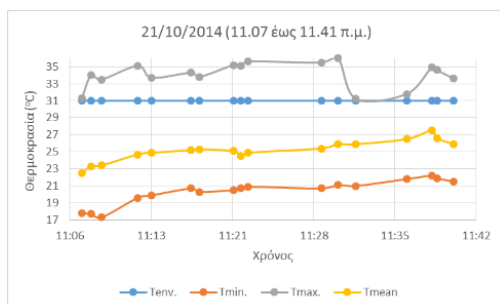


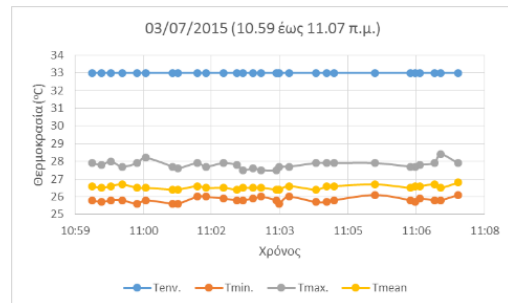
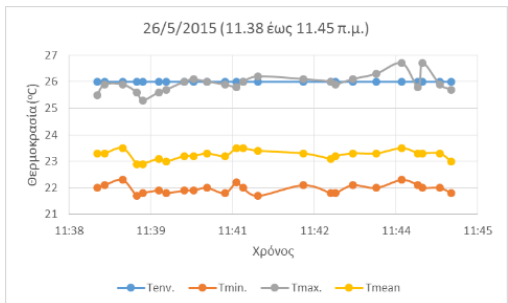
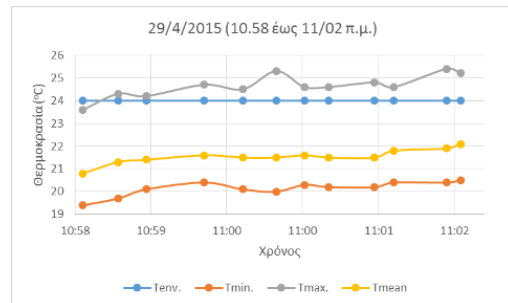
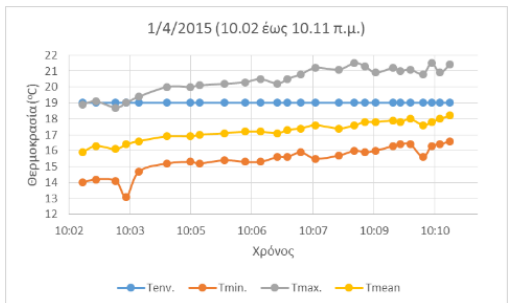
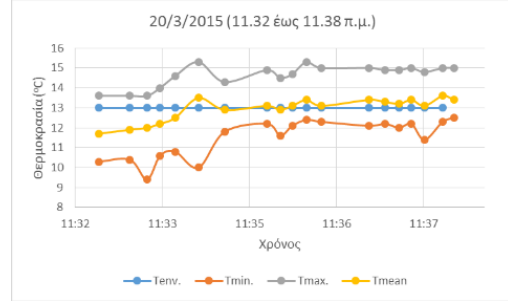
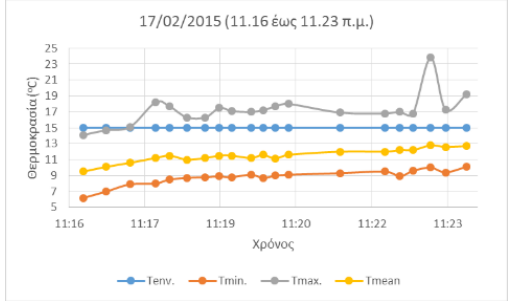
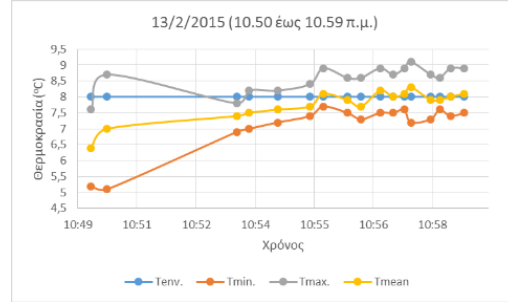
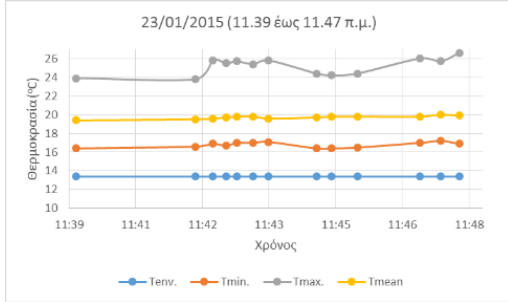
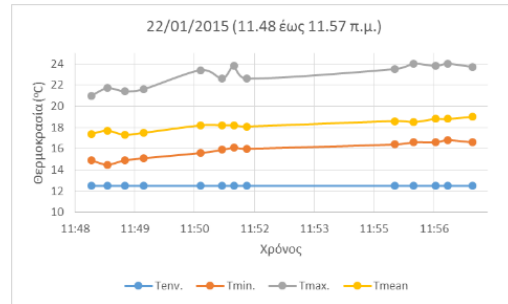
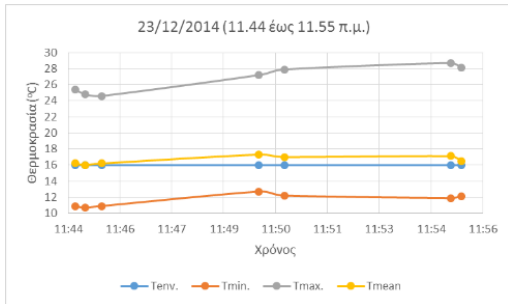
Διάγραμμα 4.1.2-29: Θερμοκρασίες των κίωνων της νότιας όψης στις 10/07/2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο

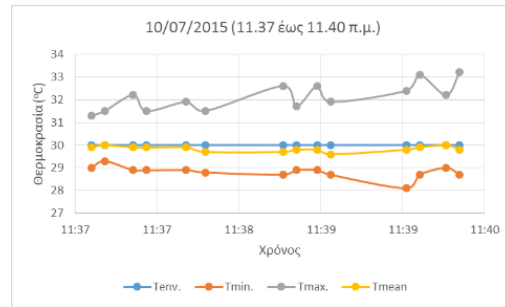
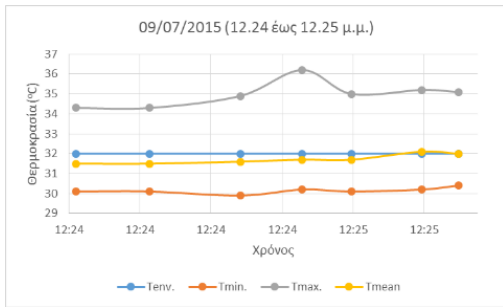
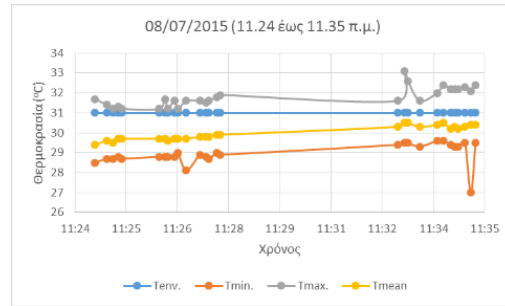
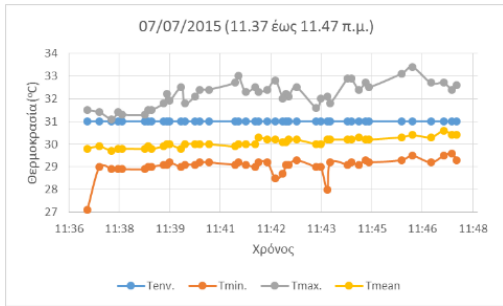
Μερικά συμπεράσματα

Ύστερα από το θερμογραφικό έλεγχο της νότιας όψης σε διαφορετικές ημέρες και κάτω από διαφορετικές καιρικές συνθήκες είναι δυνατό να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στη διαμόρφωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του μαρμάρου. Οι Πίνακες 4.1.2-31 και 32 που ακολουθούν παρουσιάζουν συνοπτικά τις θερμοκρασιακές μεταβολές που καταγράφηκαν στους κίονες της νότιας όψης για κάθε ημέρα ξεχωριστά. Ως ΔT ορίζεται η διαφορά της θερμοκρασία του περιβάλλοντος από τη μέση θερμοκρασία των κίωνων ($T_{env.} - T_{meanav.}$). Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται συγκεντρωτικά όλα τα διαγράμματα θερμοκρασιών – χρόνου από τις 11.00 π.μ. έως τις 12.30 μ.μ. για να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου







Πίνακας 4.1.2-31: Συνοπτικός πίνακας θερμοκρασιών τις πρωινές ώρες

Ημερομηνία	T _{minav.} (°C)	T _{maxav.} (°C)	T _{meanav.} (°C)	T _{env.} (°C)	Σχετική υγρασία (%)	ΔT (°C)
21-Οκτ	20,3	34,1	25,1	31	24	5,9
19-Νοε	20,0	24,1	21,6	17	62	-4,6
23-Δεκ	11,6	26,7	16,6	16	45	-0,6
22-Ιαν	15,8	22,9	18,2	12,5	76	-5,7
23-Ιαν	16,8	25,2	19,7	13,4	75	-6,3
13-Φεβ	7,1	8,6	7,8	8	53	0,2
17-Φεβ	8,8	17,2	11,5	15	46	3,5
20-Μαρ	11,5	14,6	12,9	13	44	0,1
1-Απρ	15,5	20,4	17,3	19	54	1,7
29-Απρ	20,1	24,7	21,5	24	43	2,5
26-Μαΐ	22,0	25,9	23,2	26	37	2,8
3-Ιουλ	25,8	27,8	26,5	33	36	6,5
7-Ιουλ	29,0	32,2	30,1	31	40	0,9
8-Ιουλ	29,0	31,8	30,0	31	35	1,0
9-Ιουλ	30,1	35,0	31,7	32	37	0,3
10-Ιουλ	28,8	32,1	29,8	30	44	0,2

Πίνακας 4.1.2-32: Συνοπτικός πίνακας θερμοκρασιών τις μεσημεριανές ώρες

Ημερομηνία	T _{minav.} (°C)	T _{maxav.} (°C)	T _{meanav.} (°C)	T _{env.} (°C)	Σχετική υγρασία (%)	ΔT (°C)
21-Οκτ	-	-	-	-	-	-
19-Νοε	24,0	28,0	25,8	16,9	60,0	-8,9
23-Δεκ	-	-	-	-	-	-
22-Ιαν	-	-	-	-	-	-
23-Ιαν	-	-	-	-	-	-
13-Φεβ	7,1	8,4	7,6	8,0	61,0	0,4
17-Φεβ	-	-	-	-	-	-
20-Μαρ	11,5	13,4	12,2	10,0	53,0	-2,2
1-Απρ	21,2	29,1	25,6	23,0	40,0	-2,6
29-Απρ	23,4	30,0	26,2	23,0	58,0	-3,2
26-Μαΐ	23,5	28,5	25,7	27,0	31,0	1,3
3-Ιουλ	28,2	32,9	30,0	30,0	37,0	0,0
7-Ιουλ	30,1	36,6	33,0	37,0	24,0	4,0
8-Ιουλ	29,9	38,0	33,7	35,0	27,0	1,3
9-Ιουλ	30,2	35,9	32,7	37,0	24,0	4,3
10-Ιουλ	31,4	37,1	33,7	34,0	38,0	0,3

Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας

Οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του μνημείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι η συναγωγή και η ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από τη διαφορά της επιφανειακής θερμοκρασία και της θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ενώ η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εξαρτάται από την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας και το συντελεστή απορρόφησης του υλικού. Τους χειμερινούς και τους εαρινούς μήνες, όταν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι χαμηλότερη από $300\text{W}/\text{m}^2$, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου είναι σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και δεν παρουσιάζονται διαφορές στις πρωινές και τις μεσημβρινές ώρες. Τότε ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή. Αντίθετα όταν η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από $300\text{W}/\text{m}^2$ (η μεταφορά θερμότητας γίνεται με συναγωγή και ακτινοβολία), καταγράφονται αυξήσεις στις επιφανειακές θερμοκρασίες τις μεσημβρινές ώρες από 1°C έως 8°C . Επιπρόσθετα τις πρωινές ώρες παρατηρούνται διαφορές της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας του μαρμάρου από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία από $2,5^\circ\text{C}$ έως $5,9^\circ\text{C}$. Επίσης τις πρωινές ώρες διαπιστώνονται υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές στις επιφάνειες (διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών) από 4°C έως 15°C . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιφάνειες που είναι περισσότερο εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν τοπικά υψηλότερη θερμοκρασία.

Επίδραση ιστορικού των περιβαλλοντικών συνθηκών

Ύστερα από την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας για τέσσερις διαδοχικές μέρες την περίοδο του Ιουλίου, που οι συνθήκες του περιβάλλοντος ήταν όμοιες και σχετικά σταθερές, διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία των επιφανειών τις πρωινές ώρες ήταν σχεδόν ίδια. Επίσης τις μεσημβρινές ώρες η μέση θερμοκρασία των κιόνων ήταν και τις τέσσερις μέρες όμοια ανεξάρτητα μάλιστα από την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, ενώ στις 7 και στις 9 Ιουλίου η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε τους 37°C , η επιφανειακή θερμοκρασία δε μεταβλήθηκε σε σχέση με τις άλλες δύο ημέρες. Εκείνες τις ημέρες δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών στις ίδιες επιφάνειες.

Ώρες των μετρήσεων

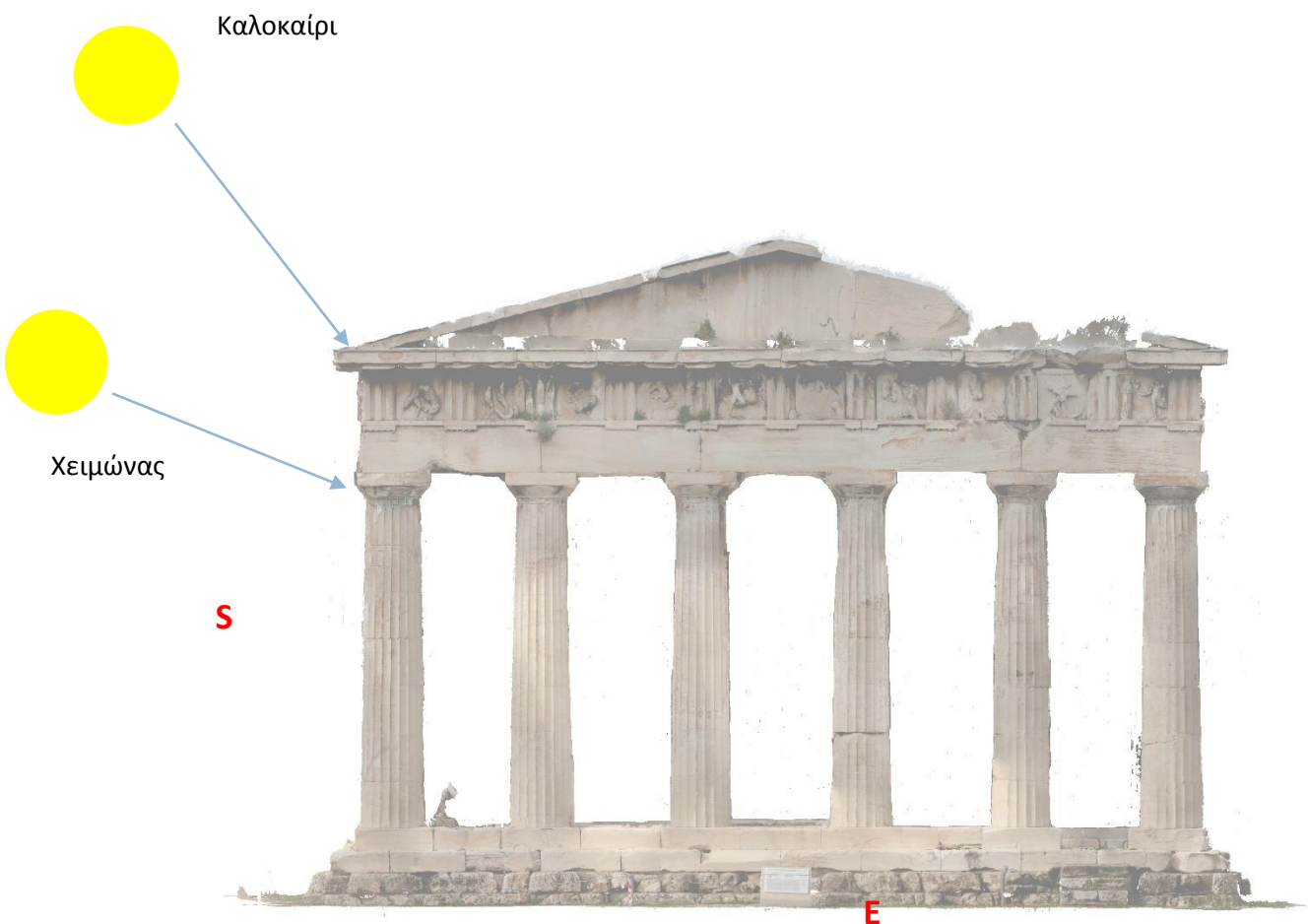
Οι μετρήσεις διεξήχθησαν τις περισσότερες φορές μεταξύ 11.00 π.μ. και 01.00 μ.μ. Εκείνες τις ώρες της ημέρας είναι έντονη η ηλιακή ακτινοβολία και μπορούν να παρατηρηθούν περισσότερες λεπτομέρειες στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Πριν τις 12.00 μ.μ. οι θερμότερες περιοχές παρατηρούνται στην ανατολική όψη, ενώ μετά τη 01.00 μ.μ. οι θερμές περιοχές μετατοπίζονται σταδιακά προς τη νότια όψη. Σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του μαρμάρου θα παρείχαν και οι βραδινές λήψεις, που δεν πραγματοποιήθηκαν, επειδή εκείνες τις ώρες δεν ήταν δυνατή η πρόσβαση στο μνημείο

Επίδραση θέσης του ήλιου

Η θέση του ήλιου μεταβάλλεται και ανά εποχές. Συγκεκριμένα τους θερινούς μήνες ο ήλιος βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος από τους χειμερινούς. Έτσι ανά εποχή ακτινοβολούνται διαφορετικά κάποια αρχιτεκτονικά μέλη, ενώ δημιουργούνται σκιές σε διαφορετικά σημεία. Το φαινόμενο αυτό επιδρά και στα αποτελέσματα της θερμογραφίας, καθώς παρατηρείται ότι επιφάνειες που εμφανίζονται ψυχρότερες το χειμώνα, τους θερινούς μήνες να είναι θερμότερες συγκριτικά με άλλα αρχιτεκτονικά στοιχεία. (Εικόνα 4.1.2-1)

Γεωμετρία του κτιρίου

Κάποια σημεία, όπως οι ανατολικές γωνίες που σχηματίζουν οι κίονες με το κρηπίδωμα και τα κιονόκρανα ενδέχεται να παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες από τις πραγματικές, όταν ακτινοβολούνται. Σε αυτές τις περιπτώσεις εξαιτίας της γεωμετρίας είναι πιο έντονα τα φαινόμενα ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παράλληλα υπάρχουν περιπτώσεις όπου εξαιτίας της θέσης του ήλιου και της γεωμετρίας του κτιρίου δημιουργούνται σκιάσεις, όπως συμβαίνει στις επιφάνειες κάτω από τα κιονόκρανα τους θερινούς μήνες. Αυτές οι επιφάνειες παρουσιάζονται ψυχρότερες.



Εικόνα 4.1.2-1: Ηλιακή ακτινοβολία στη νότια όψη το χειμώνα και το καλοκαίρι

Επίδραση σχετικής υγρασίας

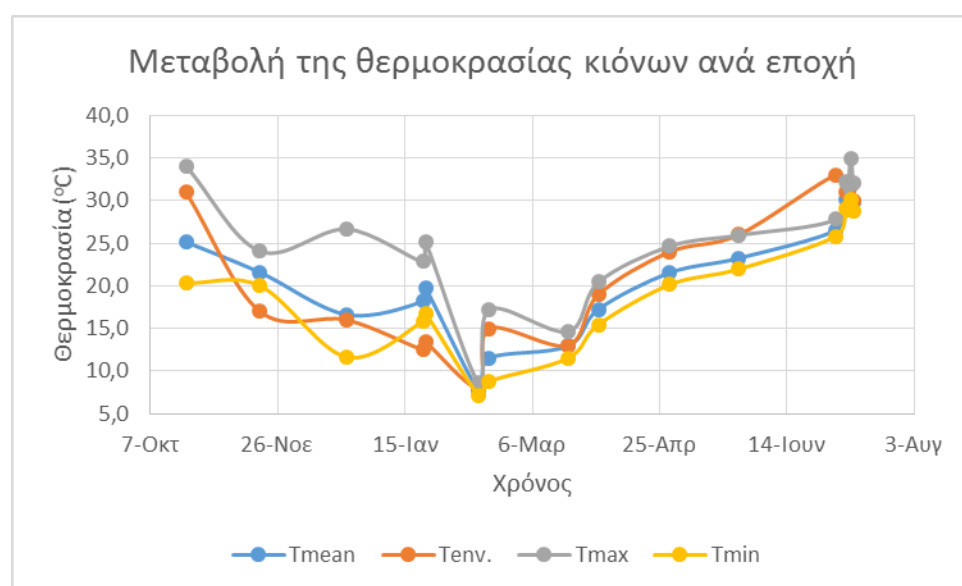
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία τα σωματίδια της υγρασίας απορροφούν ένα μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, έτσι ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας, που προσδιορίζεται από την υπέρυθη θερμογραφία, να είναι χαμηλότερη από την πραγματική. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν μέρες για τις μετρήσεις, όπου η σχετική υγρασία ήταν από 50% και κάτω.

Επίδραση ταχύτητας ανέμου

Τις μέρες με υψηλή ταχύτητα ανέμου δεν είναι δυνατή η λήψη θερμικών εικόνων, για αυτό το λόγο ο θερμογραφικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε ημέρες με ταχύτητα ανέμου έως 10km/h (μικρότερη από 2 μποφόρ).

Μεταβολή της μέσης θερμοκρασία κίωνων ανά εποχή

Από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον Ιούλιο του 2015 η μέση θερμοκρασία των κίωνων της νότιας όψης (στο διάστημα μεταξύ 11.00 π.μ. και 12.30 μ.μ.) πήρε τιμές από 7,6°C έως 33,7°C. Επιπλέον στην επιφάνεια ενός κίονα έχουν αναπτυχθεί θερμοκρασιακές διαφορές κατά μέσο όρο από 1,5°C έως και 15,1°C.



Διάγραμμα 4.1.2-30: Μεταβολή της θερμοκρασία κίωνων ανά εποχή

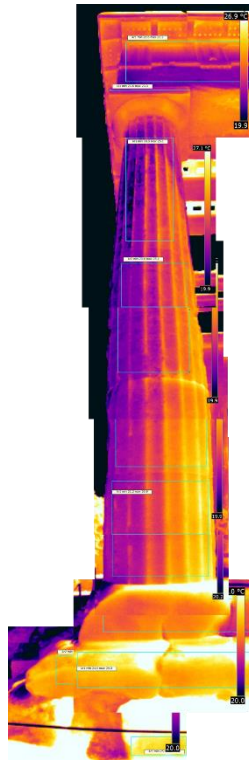
4.1.3 Θερμοκρασιακός έλεγχος σε κάθε όψη του μνημείου

Προκειμένου να μελετηθεί η θερμοκρασία των όψεων του ναού, σαρώθηκαν η νότια, η βόρεια και η δυτική όψη από απόσταση 3m – επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα λήψης θερμογραφημάτων από μεγαλύτερη απόσταση – και η ανατολική όψη από απόσταση 6m. Οι αποστάσεις πρέπει να είναι ίδιες, για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Ωστόσο στην ανατολική όψη οι θερμικές εικόνες λήφθηκαν από μεγαλύτερη απόσταση, η οποία όμως δεν αλλοιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ημερομηνίες των μετρήσεων και τα περιβαλλοντικά δεδομένα που επικρατούσαν.

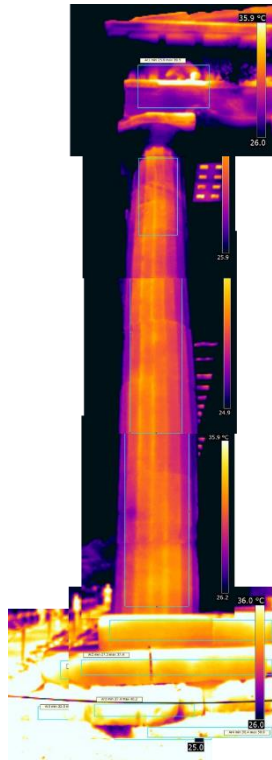
Πίνακας 4.1.3-1: Ημερομηνίες των μετρήσεων και περιβαλλοντικές συνθήκες

Ημερομηνία	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Κατεύθυνση ανέμου
21/10/2014	22-33	23-59	550	1,6	S
23/12/2014	14-19	37-45	480	0,8	SSW
22/01/2015	12-14	68-76	350	1,6	S
13/02/2015	7-9	53-68	50	6	NNE
20/03/2015	10-15	37-53	300	7,8	NNW
29/04/2015	22-24	43-58	770	10	SSW
26/05/2015	25-32	25-40	650	9,7	SSW
10/07/2015	30-35	30-44	693	1,9	NNE

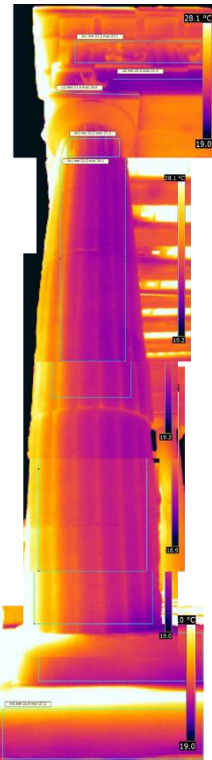
Από τη σάρωση κάθε όψης προέκυψαν θερμικές εικόνες, οι οποίες έδιναν πληροφορίες για τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση θερμοκρασία. (Σαν παράδειγμα των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται οι θερμικές εικόνες 4.1.3-1 έως 4.1.3-4, που αποτελούν σύνθεση περισσότερων θερμογραφημάτων και απεικονίζουν τη θερμοκρασιακή κατάσταση των 1^{ων} κίωνων κάθε όψης στις 29/04/2015.) Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών των θερμοκρασιών για κάθε όψη ξεχωριστά. Οι θερμοκρασίες αυτές καταγράφηκαν στον ακόλουθο πίνακα. Ως ΔΤ ορίζεται η διαφορά της θερμοκρασία του περιβάλλοντος από τη μέση θερμοκρασία της κάθε όψης ($T_{env} - T_{mean}$). Για να κατανοηθούν περισσότερο τα αποτελέσματα κατασκευάστηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση θερμοκρασία ανά όψη.



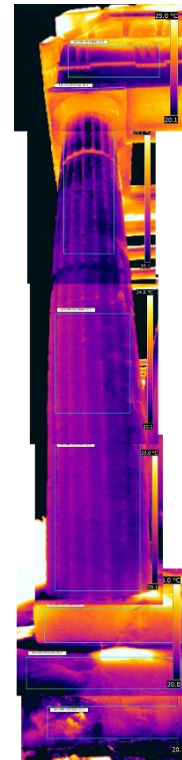
Θερμική εικόνα 4.1.3-1:
1^{ος} κίονας της νότιας
όψης στις 29/04/2015



Θερμική εικόνα 4.1.3-2:
1^{ος} κίονας της ανατολικής
όψης στις 29/04/2015



Θερμική εικόνα 4.1.3-3:
1^{ος} κίονας της βόρειας
όψης στις 29/04/2015



Θερμική εικόνα 4.1.3-4:
1^{ος} κίονας της δυτικής
όψης στις 29/04/2015

Στις 21 Οκτωβρίου η ανατολική όψη παρουσιάζει τη μέγιστη μέση θερμοκρασία, η οποία διαφέρει κατά 2,7°C από τη μέση θερμοκρασία της νότιας όψης. Στην ανατολική και τη νότια όψη ο ναός δέχεται τη μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας, γεγονός που επηρεάζει την επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου, ενώ αυτό φαίνεται και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αυτών των δύο όψεων. Από την άλλη πλευρά η μέση θερμοκρασία της βόρειας όψης είναι σχεδόν ίση με αυτή της δυτικής, ενώ διαφέρει μόνο κατά 2,3°C από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αντίθετα η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας της δυτικής όψης από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος φτάνει τους 13°C.

Στις 23 Δεκεμβρίου η μέση θερμοκρασία της νότιας όψης είναι αρκετά υψηλότερη από τις θερμοκρασίες των υπόλοιπων πλευρών, ενώ η μικρότερη μέση θερμοκρασία εμφανίζεται στη βόρεια όψη. Μάλιστα η βόρεια όψη είναι κατά περίπου 7°C ψυχρότερη από την ανατολική και κατά 11°C από τη νότια. Επίσης η μέση θερμοκρασία της νότιας όψης είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες των υπόλοιπων όψεων.

Στις 22 Ιανουαρίου μειώνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των όψεων. Η θερμότερη όψη είναι η νότια, η οποία μαζί με την ανατολική παρουσιάζουν τις υψηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αντίστοιχα οι θερμοκρασίες της βόρειας και της δυτικής όψης διαφέρουν μόλις κατά

0,8°C. Γενικά η μέση θερμοκρασία των επιφανειών όλων των όψεων είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κάθε όψης.

Στις 13 Φεβρουαρίου η μέση θερμοκρασία της νότιας όψης ταυτίζεται σχεδόν με τις θερμοκρασίες της ανατολικής και της βόρειας όψης, οι οποίες είναι υψηλότερες από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον η δυτική όψη είναι κατά 2°C και κατά 0,8°C χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες των υπόλοιπων πλευρών και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αντίστοιχα. Οι μικρές διακυμάνσεις των θερμοκρασιών αποδίδονται στη μικρή συμβολή της μεταφοράς θερμότητας μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στις 20 Μαρτίου σημειώθηκε μερική έκλειψη ηλίου, συνεπώς ήταν ασθενής η ηλιακή ακτινοβολία. Στο γεγονός αυτό οφείλεται ότι οι όψεις είναι μόλις κατά 0,3°C έως 0,9°C θερμότερες από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον η μέση θερμοκρασία της νότιας όψης είναι σχεδόν ίση με αυτή της ανατολικής, ενώ η βόρεια όψη είναι κατά σχεδόν 2°C θερμότερη από τη δυτική.

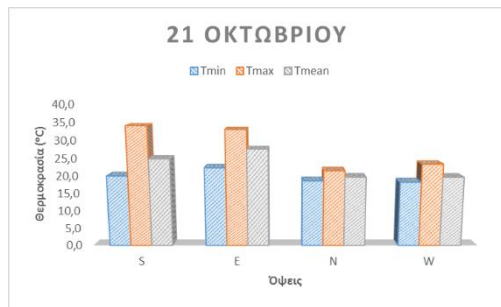
Στις 29 Απριλίου η μέγιστη μέση θερμοκρασία εμφανίζεται στην ανατολική όψη. Οι επιφάνειες της νότιας και ανατολικής όψης παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος. Παράλληλα η μέση θερμοκρασία της βόρειας όψης είναι κατά 1°C υψηλότερη από της δυτικής. Επιπλέον οι επιφάνειες της βόρειας όψης έχουν σχεδόν ίδια θερμοκρασία με την ατμοσφαιρική.

Στις 26 Μαΐου η ανατολική όψη είναι η θερμότερη, ενώ η μέση θερμοκρασία της βόρειας όψης είναι ίση με αυτή της νότιας. Η θερμοκρασία της ανατολικής, της βόρειας και της νότιας όψης είναι υψηλότερες με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αντίθετα η θερμοκρασία στη δυτική όψη είναι κατά 8,8°C χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι οι επιφάνειες της δυτικής όψης παρουσιάζουν τη χαμηλότερη θερμοκρασία παρόλο που το χρονικό διάστημα του θερμογραφικού ελέγχου στην πλευρά αυτή σημειώθηκε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας.

Στις 10 Ιουλίου οι θερμοκρασίες της ανατολικής και της νότιας όψης είναι υψηλότερες από την ατμοσφαιρική. Η θερμότερη όψη είναι η ανατολική με μέση θερμοκρασία περίπου 37°C. Επιπλέον οι θερμοκρασίες της νότιας, της βόρειας και της δυτικής όψης διαφέρουν ελάχιστα.

Πίνακας 4.1.3-2: Θερμοκρασίες των όψεων του ναού του Ηφαίστου

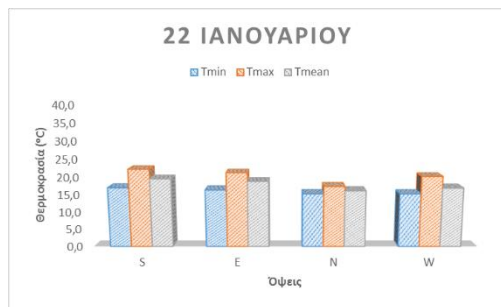
Ημερομηνία	Όψη	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{mean} (°C)	T _{env.} (°C)	ΔT (°C)
21-Οκτ	S	20,0	34,0	24,8	31	6,2
	E	22,3	33,0	27,5	33	5,5
	N	18,6	21,5	19,7	22	2,3
	W	18,2	23,3	19,6	33	13,4
23-Δεκ	S	15,4	27,3	21,1	19	-2,1
	E	12,1	23,5	17,2	19	1,8
	N	8,9	11,9	9,9	14	4,1
	W	9,6	15,5	11,0	16	5,0
22-Ιαν	S	17,0	22,2	19,5	14	-6,0
	E	16,3	21,2	18,8	13	-6,0
	N	15,2	17,3	16,1	13	-3,2
	W	15,2	20,2	16,9	14	-2,9
13-Φεβ	S	8,6	9,7	9,1	7	-1,8
	E	8,7	9,8	9,2	9	-0,2
	N	8,7	9,7	9,2	8	-1,2
	W	6,5	10,3	7,2	8	0,8
20-Μαρ	S	13,4	15,6	14,5	13	-0,9
	E	13,0	15,0	14,1	13	-0,3
	N	11,6	12,9	12,2	13	0,8
	W	9,5	11,5	10,5	10	-0,5
29-Απρ	S	21,9	27,7	24,2	22	-2,3
	E	26,2	33,1	30,3	23	-7,3
	N	21,4	24,6	22,8	23	0,2
	W	20,8	23,7	21,9	23	1,1
26-Μαϊ	S	24,7	29,5	26,5	25	-1,5
	E	25,9	32,9	30,4	25	-5,4
	N	25,2	28,6	26,5	25	-1,5
	W	21,4	25,1	23,2	32	8,8
10-Ιουλ	S	31,6	35,0	33,0	31	-2,0
	E	32,4	39,7	37,4	32	-5,4
	N	32,5	35,0	33,8	35	1,2
	W	30,6	33,4	32,1	34	1,9



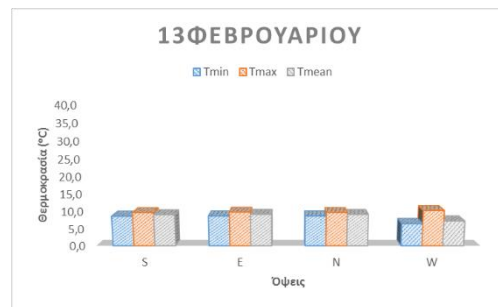
Διάγραμμα 4.1.3-1



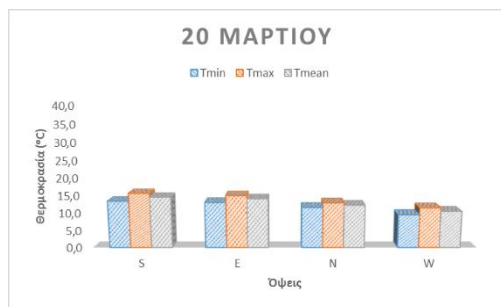
Διάγραμμα 4.1.3-2



Διάγραμμα 4.1.3-3



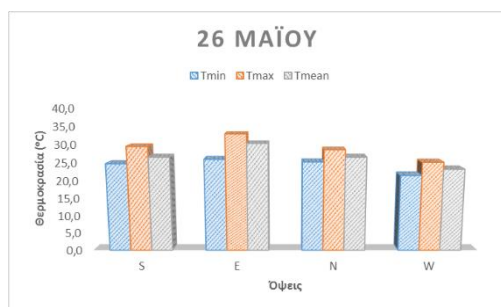
Διάγραμμα 4.1.3-4



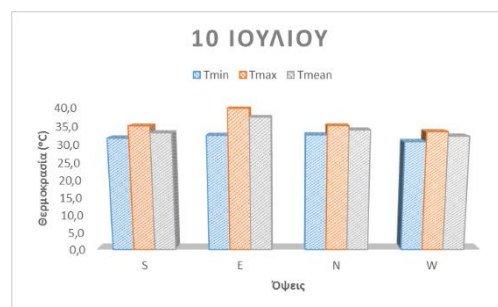
Διάγραμμα 4.1.3-5



Διάγραμμα 4.1.3-6



Διάγραμμα 4.1.3-7



Διάγραμμα 4.1.3-8

Μερικά Συμπεράσματα

Από το θερμογραφικό έλεγχο των όψεων λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση του μικροκλίματος του ναού στις επιφανειακές θερμοκρασίες. Γενικά οι όψεις που δέχονται τη μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία είναι η νότια και η ανατολική, γεγονός που αποτυπώνεται και στις υψηλές θερμοκρασίες των επιφανειών τους τις ημέρες με υψηλή ηλιοφάνεια. Αντίστοιχα λιγότερο εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η βόρεια και η δυτική όψη. Μάλιστα η

ανατολική όψη εμφανίζει τις υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες επιφανειών τις περισσότερες μέρες των μετρήσεων και συγκεκριμένα τις μέρες με ηλιοφάνεια, ενώ η δυτική ήταν η όψη με τις ψυχρότερες επιφάνειες. Αναλυτικότερα, μπορούμε να καταλήξουμε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα για τις θερμοκρασίες των όψεων ανάλογα με την εποχή και τις καιρικές συνθήκες.

Φθινοπωρινοί μήνες

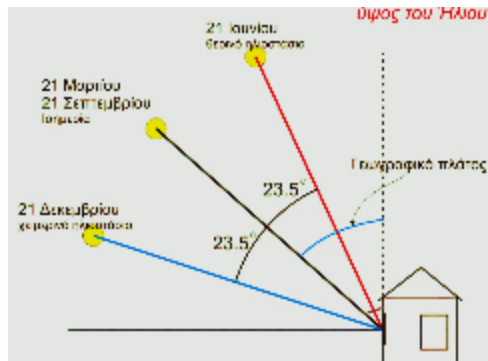
Οι θερμοκρασίες της ανατολικής (27,5°C) και της νότιας όψης (24,8°C) έχουν μικρή διαφορά, ενώ της βόρειας και της δυτικής είναι σχεδόν ίσες. Η μέγιστες θερμοκρασίες καταγράφονται στην ανατολική όψη εξαιτίας της ηλιοφάνειας. Επίσης για τον ίδιο λόγο παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών στην ανατολική (22,3°C-33°C) και στη νότια όψη (20°C-34°C).

Χειμερινοί μήνες

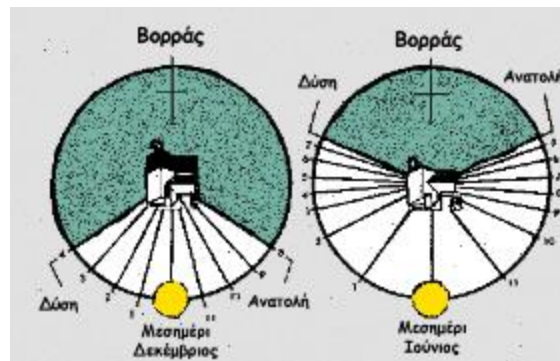
Τις ημέρες με ηλιοφάνεια παρουσιάζονται έντονες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των όψεων. Συγκεκριμένα η ανατολική (17,2°C-18,8°C) και η νότια όψη (19,5°C-21,1°C) είναι αρκετά θερμότερες από τη βόρεια (9,9°C-16,1°C) και τη δυτική (11°C-16,9°C). Επιπλέον η διαφορά των μέγιστων από τις ελάχιστες θερμοκρασίες στην ανατολική και νότια όψη φτάνουν τους 11°C. Τις ημέρες με έντονη νεφοκάλυψη οι θερμοκρασίες των όψεων είναι σχεδόν ίδιες μεταξύ τους, αλλά και με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Γίνεται, συνεπώς, για άλλη μία φορά αντιληπτό ότι η συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στη μεταφορά θερμότητας στις επιφάνειες είναι καθοριστική.

Εαρινοί μήνες

Τις ημέρες με ηλιοφάνεια παρατηρούνται μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της νότιας (24,2°C-26,5°C), της βόρειας (22,8°C-26,5°C) και της δυτικής όψης (21,9°C-23,2°C). Η αλλαγή αυτή μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή της θέσης και του ύψους του ηλίου μετά την εαρινή ισημερία. Επειδή ο ήλιος βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος, αυξάνεται η έκθεση της βόρειας και της δυτικής όψης στην ακτινοβολία. Παράλληλα αυξάνεται η διαφορά της θερμοκρασίας της ανατολικής όψης (30,4°C) από τις υπόλοιπες, καθώς και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τις ημέρες με ασθενή ηλιοφάνεια οι θερμοκρασίες της νότιας και της ανατολικής όψης είναι σχεδόν ίσες – συγκεκριμένα η μέση θερμοκρασία της νότιας όψης είναι κατά 0,4°C υψηλότερη), ενώ της βόρειας και της δυτικής πλευρά έχουν διαφορά 1,7°C. Επιπλέον οι διαφορές των επιφανειακών θερμοκρασιών από αυτές του περιβάλλοντος είναι μεταξύ 0,3°C και 0,9°C.



Εικόνα 4.1.3-1: Το ύψος του ήλιου τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες (101)

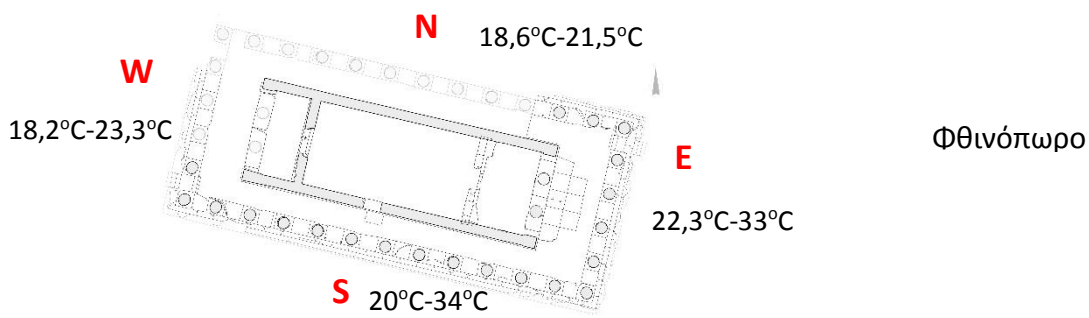


Εικόνα 4.1.3-2: Η θέση του ήλιου το χειμώνα και το καλοκαίρι (101)

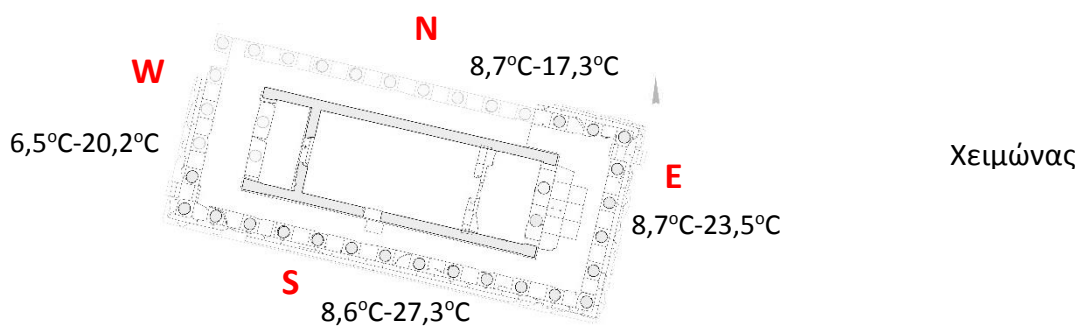
Θερινοί μήνες

Τους θερινούς μήνες καταγράφονται πάλι μικρές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των επιφανειών της νότιας (33°C), της βόρειας ($33,8^{\circ}\text{C}$) και της δυτικής όψης ($32,1^{\circ}$), για τους ίδιους λόγους που περιγράφονται παραπάνω. Επίσης στην ανατολική όψη παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες ($37,4^{\circ}\text{C}$), ενώ σημαντική είναι η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας επιφανειών από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($-5,4^{\circ}$). Οι διαφορές μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών είναι περίπου $2,5^{\circ}\text{C}$ για τη βόρεια, τη νότια και τη δυτική όψη και 7°C για την ανατολική.

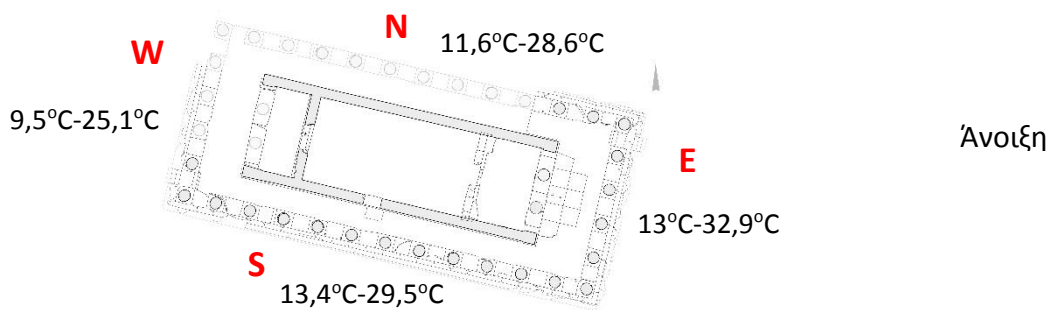
Στις ακόλουθες εικόνες καταγράφονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες που εμφανίζει κάθε όψη ανά εποχή.



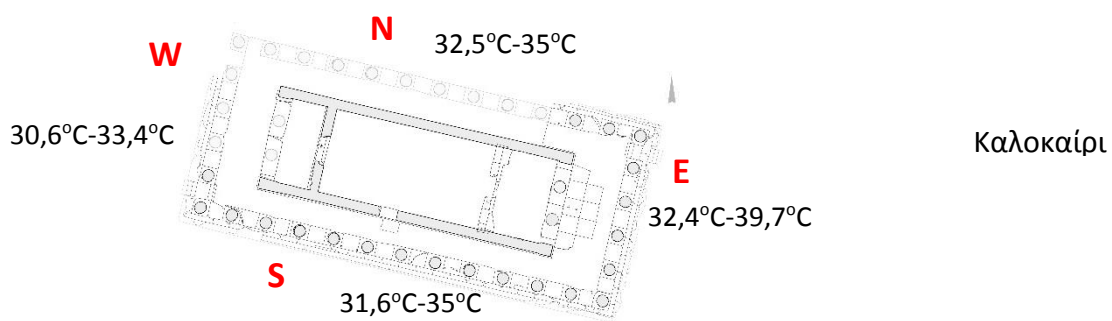
Εικόνα 4.1.3-3: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανά όψη το φθινόπωρο



Εικόνα 4.1.3-4: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανά όψη το χειμώνα



Εικόνα 4.1.3-5: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανά όψη την άνοιξη



Εικόνα 4.1.3-6: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανά όψη το καλοκαίρι

4.1.4 Επίδραση της απόστασης στο θερμογραφικό έλεγχο

Επειδή υπήρχε η δυνατότητα στη νότια όψη να ληφθούν θερμικές εικόνες από διαφορετικές αποστάσεις, μελετήθηκε η επίδραση της απόστασης στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας. Έτσι λήφθηκαν θερμογραφήματα από αποστάσεις 28, 24 και 3m, που έδιναν πληροφορίες σχετικά με τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση θερμοκρασία των κίωνων. Οι ημερομηνίες των μετρήσεων καθώς και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν παρουσιάζονται στην ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.1.4-1: Ημερομηνίες των μετρήσεων

Ημερομηνία	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Κατεύθυνση ανέμου
19/11/2014	17-22	52-73	400	4,8	S
22/01/2015	12-14	68-76	350	1,6	S
13/02/2015	7-9	53-68	50	6	NNE
20/03/2015	10-15	37-53	300	7,8	NNW
29/04/2015	22-24	43-58	770	10	SSW
26/05/2015	25-32	25-40	650	9,7	SSW

Από τα δεδομένα αυτά κατασκευάστηκε ο παρακάτω πίνακας που δίνει πληροφορίες για τη μέση θερμοκρασία του κάθε κίονα για κάθε απόσταση ξεχωριστά. Εξαιτίας της παρουσίας ενός δέντρου δεν ήταν δυνατή η λήψη του 12^{ου} και 13^{ου} κίονα από τις αποστάσεις 28 και 24m. Για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες αυτών των κίωνων.

Στις 19 Νοεμβρίου οι θερμοκρασίες από την απόσταση των 3m T_{mean3} είναι μεγαλύτερες από τις θερμοκρασίες από απόσταση 24 (T_{mean24}) και 28 (T_{mean28}) μέτρων με διαφορές από 2,5-4°C. Παράλληλα οι θερμοκρασίες των κίωνων 1 έως 5 από απόσταση 24m είναι 0 έως 0,7°C υψηλότερες από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες στα 28m. Ωστόσο στους κίονες 6 έως 8 οι θερμοκρασίες από απόσταση 28m είναι κατά περίπου 1,5°C μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία στα 24m.

Στις 22 Ιανουαρίου μειώνονται οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών των κίωνων από απόσταση 28m και 24m, με τις πρώτες να είναι κατά 0 έως 1,5°C μεγαλύτερες από τις δεύτερες. Ταυτόχρονα οι θερμοκρασίες των κίωνων από τα 3m είναι κατά 0,1 έως 3°C υψηλότερες από τις θερμοκρασίες των 24m, ωστόσο στους κίονες 1, 10, 11 και 12 οι T_{mean3} είναι χαμηλότερες κατά 0,2 έως 0,9°C από τις T_{mean28} .

Στις 13 Φεβρουαρίου, που ήταν ασθενής η ηλιοφάνεια, διαπιστώνονται σε γενικές γραμμές μικρές διαφορές στις θερμοκρασίες από τις διαφορετικές αποστάσεις. Οι T_{mean28} είναι από 0 έως 1,3°C υψηλότερες από τις T_{mean24} , ενώ οι θερμοκρασίες των

κίωνων από απόσταση 3m είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες από απόσταση 24m από 0,8 έως 2°C.

Πίνακας 4.1.4-2: Μέση θερμοκρασία κίωνων για διαφορετικές αποστάσεις

Ημερομηνία	Κίονας	T _{mean28} (°C)	T _{mean24} (°C)	T _{mean3} (°C)
19-Νοε	1	21,7	21,9	24,4
	2	22,0	22,1	25,2
	3	22,1	22,2	25,5
	4	22,1	22,1	25,9
	5	22,0	22,7	26,6
	6	23,8	22,3	26,3
	7	23,8	22,3	26,3
	8	24,0	22,3	26,5
	9	23,1	22,6	26,1
	10	23,2	22,5	26,3
	11	23,3	22,5	26,2
	12	23,2	22,2	26,0
22-Ιαν	1	18,7	17,3	17,8
	2	18,8	17,4	19,1
	3	19,1	17,5	19,9
	4	19,2	17,7	20,7
	5	18,9	18,9	20,6
	6	19,4	18,5	20,5
	7	19,4	18,7	20,6
	8	19,3	18,5	19,5
	9	19,6	18,9	19,0
	10	19,6	18,9	19,0
	11	19,3	18,7	19,1
13-Φεβ	1	8,0	6,7	8,7
	2	8,1	7,0	9,0
	3	8,2	7,3	9,1
	4	8,3	7,3	9,1
	5	8,3	8,1	9,1
	6	8,2	8,0	9,1
	7	8,3	8,1	8,9
	8	8,3	8,0	9,2
	9	8,0	8,0	9,3
	10	8,0	8,0	9,1
	11	7,9	7,9	9,1

Πίνακας 4.1.4-3: Μέση θερμοκρασία κίωνων για διαφορετικές αποστάσεις (συνέχεια)

Ημερομηνία	Κίονας	T _{mean28} (°C)	T _{mean24} (°C)	T _{mean3} (°C)
20-Μαρ	1	12,9	11,4	13,4
	2	13,1	11,8	13,6
	3	13,6	12,0	13,9
	4	13,8	12,4	14,4
	5	13,8	13,2	14,8
	6	13,5	13,0	14,8
	7	13,6	12,9	15,1
	8	13,6	13,5	14,9
	9	14,2	13,4	14,8
	10	14,0	13,3	14,9
	11	13,8	12,9	14,9
29-Απρ	1	22,0	21,2	20,2
	2	21,7	21,1	21,4
	3	22,0	21,3	23,8
	4	22,0	21,4	24,4
	5	21,8	21,4	24,2
	6	22,4	21,3	24,0
	7	22,4	21,5	24,0
	8	22,3	21,6	24,4
	9	22,4	21,5	24,3
	10	22,5	21,5	24,6
	11	22,6	21,5	25,0
26-Μαΐ	1	23,4	23,2	25,3
	2	23,3	23,2	24,7
	3	23,4	23,2	25,1
	4	23,6	23,5	25,8
	5	23,5	23,2	26,0
	6	23,5	23,1	26,0
	7	23,5	23,0	26,3
	8	23,5	23,0	26,6
	9	23,5	23,2	26,7
	10	23,6	23,3	26,9
	11	23,7	23,4	27,6

Στις 20 Μαρτίου, που σημειώθηκε μερική έκλειψη ηλίου, παρατηρούνται επίσης μικρές θερμοκρασιακές διαφορές στους κίονες ανάλογα με την απόσταση λήψης της θερμικής εικόνας. Οι T_{mean28} είναι κατά 0,1 έως 1,6°C υψηλότερες από τις T_{mean24}, ενώ οι θερμοκρασίες από απόσταση 3m είναι κατά 1,4 έως 2,2°C υψηλότερες από τις θερμοκρασίες από απόσταση 24m.

Τον Απρίλιο οι διαφορές στις θερμοκρασίες από απόσταση 3 και 24m φτάνουν κατά μέσο όρο τους 2,4°C και οι θερμοκρασίες από τα 28m είναι κατά 0,4 έως 1,1°C μεγαλύτερες από τις θερμοκρασίες στα 24m. Στον 1^ο κίονα παρατηρείται ότι η $T_{\text{mean}3}$ είναι χαμηλότερη από την $T_{\text{mean}24}$ και την $T_{\text{mean}28}$ κατά 1 και 1,8°C αντίστοιχα.

Στις 26 Μαΐου καταγράφονται διαφορές των 0,3°C κατά μέσο όρο μεταξύ των $T_{\text{mean}28}$ και $T_{\text{mean}24}$. Επιπλέον αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών από απόσταση 3m και των θερμοκρασιών από τα 24m, που φτάνει τους 2,9°C κατά μέσο όρο.

Μερικά συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση της απόστασης στη διαμόρφωση των επιφανειακών θερμοκρασιών, καθώς οι συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερές. Συνεπώς τα αποτελέσματα της θερμογραφίας επηρεάζονται και από άλλες παραμέτρους εκτός από την απόσταση. Ωστόσο μπορούν να γίνουν κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τη μέση διαφορά θερμοκρασιών που παρατηρείται ανά μήνα και για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες από απόσταση 28m διαφέρουν κατά μέσο όρο από 0,3 έως 0,9°C από τις θερμοκρασίες των 24m κάθε μήνα. Η μικρότερη μέση διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών $T_{\text{mean}28}$ και $T_{\text{mean}24}$ σημειώθηκε στις 26 Μαΐου. Ωστόσο μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι θερμοκρασίες των 28m είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες στα 24m. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ένα μέρος της ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα υλικά απορροφάται από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες που καταγράφονται να είναι μικρότερες από τις πραγματικές. (62) Ωστόσο οι διαφορές που εντοπίζονται είναι κάτω από τους 2°C που είναι η ακρίβεια του θερμογραφικού συστήματος.

Παράλληλα οι θερμοκρασίες από την απόσταση των 3m είναι κατά μέσο όρο κατά 1,3 έως 3,6°C υψηλότερες από τις θερμοκρασίες στα 24m. Είναι λογικό καθώς αυξάνεται η διαφορά των αποστάσεων να αυξάνεται και η διαφορά των θερμοκρασιών. Επιπλέον, όταν η απόσταση είναι αρκετά μικρότερη, απορροφάται μικρότερη ποσότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα που παρεμβάλλεται. Η μικρότερη μέση διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών $T_{\text{mean}3}$ και $T_{\text{mean}24}$ καταγράφηκε στις 13 Φεβρουαρίου, που η ηλιοφάνεια ήταν ασθενής.

4.2 Επιμέρους μελέτη αρχιτεκτονικών στοιχείων

4.2.1 Θερμογραφικός έλεγχος γύρω από τους κίονες της νότιας όψης

Στις 23 Ιανουαρίου πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος σε κάθε πλευρά όλων των κίωνων της νότιας όψης με σκοπό να παρατηρηθεί πως μεταβάλλεται η επιφανειακή θερμοκρασία στις όψεις του ίδιου κίονα ανάλογα με το βαθμό έκθεσης του στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα από τις 12.00 μ.μ. έως τις 03.34 μ.μ. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα για τη συγκεκριμένα ημέρα παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2.1-1: Περιβαλλοντικά δεδομένα στις 23/01/2015

Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Κατεύθυνση ανέμου
8-12	51-75	400	8	SSW

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λήφθηκαν θερμικές εικόνες οι οποίες έδιναν πληροφορίες σχετικά με τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση θερμοκρασία κάθε όψης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διαφορά της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος από τη μέση θερμοκρασία κάθε όψης (ΔT_{av}) και ύστερα κατασκευάστηκαν οι επόμενοι πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία κάθε όψης για κάθε κίονα ξεχωριστά.

Στον 1^ο κίονα η θερμότερη όψη είναι η ανατολική με μέση θερμοκρασία 21,1°C και η ψυχρότερη η δυτική με μέση θερμοκρασία 16,7°C. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.2.1-1 οι θερμοκρασίες της βόρειας, της βορειοδυτικής και της δυτικής όψης έχουν πολύ κοντινές τιμές. Η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώνεται στο 1^ο κίονα είναι 23,5°C και η ελάχιστη 14,3°C.

Στον 2^ο κίονα η όψη με τη μέγιστη μέση θερμοκρασία είναι η νοτιοανατολική με $T_{meanav} = 22,8^\circ\text{C}$ και με την ελάχιστη θερμοκρασία η δυτική και η νοτιοδυτική όψη με $T_{meanav} = 19,2^\circ\text{C}$. Στο Διάγραμμα 4.2.1-2 παρατηρείται ότι η βόρεια, η βορειοδυτική, η δυτική και η νοτιοδυτική όψη παρουσιάζουν θερμοκρασίες με πολύ μικρές διαφορές. Η μέγιστη θερμοκρασία του κίονα είναι 25°C και η ελάχιστη 14,4°C.

Η θερμότερη όψη του 3^{ου} κίονα είναι η νοτιοανατολική με μέση θερμοκρασία 23,9°C, ενώ η ψυχρότερη είναι η νοτιοδυτική με μέση θερμοκρασία 19,8°C. Στο Διάγραμμα 4.2.1-3 είναι εμφανές ότι η μέση θερμοκρασία της νοτιοανατολικής και της ανατολικής όψης διαφέρουν ελάχιστα. Το ίδιο ισχύει και για τη δυτική και τη νοτιοδυτική όψη που οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν μόλις κατά 0,1°C. Η υψηλότερη θερμοκρασία στον 3^ο κίονα ισούται με 26,3°C και η χαμηλότερη με 16,4°C.

Η μέγιστη μέση θερμοκρασία στον 4^ο κίονα εντοπίζεται στη νοτιοανατολική όψη του (24,9°C), ενώ η ελάχιστη στη δυτική όψη (20,6°C). Στο Διάγραμμα 4.2.1-4 παρατηρείται ότι η νότια, η νοτιοανατολική και η ανατολική όψη παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες μέσες θερμοκρασίες. Παράλληλα η βόρεια και η βορειοδυτική όψη παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες θερμοκρασίες, ενώ η δυτική και η νοτιοδυτική όψη έχουν θερμοκρασιακή διαφορά μόλις 0,4°C. Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται στον 4^ο κίονα είναι 27,2°C και η ελάχιστη 17,3°C.

Στον 5^ο κίονα η θερμότερη όψη είναι η νοτιοανατολική με μέση θερμοκρασία 25,8°C και η ψυχρότερη είναι η νοτιοδυτική με μέση θερμοκρασία 20,9°C. Οι διαφορές θερμοκρασίας της βόρειας από τη βορειοδυτική πλευρά και της νοτιοδυτικής από τη δυτική πλευρά είναι μόλις 0,2°C. Επιπλέον η μέγιστη θερμοκρασία στον 5^ο κίονα είναι 29,2°C και η ελάχιστη 19°C.

Στον 6^ο κίονα η μέγιστη μέση θερμοκρασία είναι 25°C και βρίσκεται στη νοτιοανατολική όψη, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία είναι 20,8°C και βρίσκεται στη δυτική όψη. Στο Διάγραμμα 4.2.1-6 παρατηρείται ότι οι μέσες θερμοκρασίες της βορειοδυτικής, της δυτικής και της νοτιοδυτικής όψης έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές. Η μέγιστη θερμοκρασία του κίονα είναι 27°C και η ελάχιστη 18,7°C.

Η μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία που καταγράφεται στον 7^ο κίονα είναι 25,3°C και βρίσκεται στη νοτιοανατολική όψη, ενώ η χαμηλότερη ισούται με 20,8°C και βρίσκεται στη δυτική όψη του. Η βόρεια, η βορειοδυτική και η δυτική όψη παρουσιάζουν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.2.1-7. Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία του κίονα είναι 27,9°C και 18,7°C αντίστοιχα.

Και στην περίπτωση του 8^{ου} κίονα η μέγιστη μέση θερμοκρασία είναι 25,5°C και βρίσκεται στη νοτιοανατολική όψη, ενώ παράλληλα η ελάχιστη μέση θερμοκρασία είναι 21°C και βρίσκεται στη δυτική. Η βόρεια, η βορειοδυτική, η δυτική και η νοτιοδυτική όψη του κίονα παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται στον κίονα είναι 28,6°C και η ελάχιστη είναι 19,4°C.

Στον 9^ο κίονα η θερμότερη όψη είναι νοτιοανατολική με μέση θερμοκρασία 24,9°C και η ψυχρότερη είναι η δυτική με 21,4°C. Στον Διάγραμμα 4.2.1-9 παρατηρούνται έντονες θερμοκρασιακές διαφορές στη βορειοανατολική, τη βόρεια, τη βορειοδυτική και τη δυτική όψη. Η μέγιστη θερμοκρασία στον κίονα είναι 27,9°C και η ελάχιστη 19,3°C.

Πίνακας 4.2.1-2: Θερμοκρασίες των διαφορετικών όψεων στους κίονες της νότιας όψης

Κίονας	Όψη	T _{minav} (°C)	T _{maxav} (°C)	T _{meanav} (°C)	ΔT _{av} (°C)
κίονας 1	S	14,5	22,1	19,3	-6,6
	SE	18,5	23,5	21,0	-8,3
	E	18,1	23,5	21,1	-8,4
	NE	16,7	22,4	19,4	-6,7
	N	15,5	20,2	17,8	-5,1
	NW	15,3	19,2	17,3	-4,6
	W	14,3	19,0	16,7	-4,0
	SW	15,3	22,5	18,3	-5,6
κίονας 2	S	18,1	24,5	21,3	-8,6
	SE	20,1	25,0	22,8	-10,1
	E	19,3	24,6	22,1	-9,4
	NE	18,6	23,9	20,9	-8,2
	N	18,1	22,2	19,4	-6,7
	NW	17,6	20,4	19,4	-6,7
	W	14,4	21,0	19,2	-6,5
	SW	16,3	22,3	19,2	-6,5
κίονας 3	S	18,7	25,4	22,4	-9,7
	SE	21,4	26,3	23,9	-11,2
	E	20,7	25,7	23,3	-10,6
	NE	20,5	24,6	22,1	-9,4
	N	20,2	23,3	21,7	-9,0
	NW	17,6	22,4	20,5	-7,8
	W	16,4	23,6	19,9	-7,2
	SW	15,9	23,0	19,8	-7,1
κίονας 4	S	19,8	25,9	23,5	-10,8
	SE	21,6	27,2	24,9	-12,2
	E	21,0	26,6	23,9	-11,2
	NE	20,4	25,9	22,4	-9,7
	N	20,1	22,7	21,2	-8,5
	NW	18,3	23,2	21,0	-8,3
	W	17,3	22,9	20,2	-7,5
	SW	18,7	24,1	20,6	-7,9
κίονας 5	S	21,1	27,2	24,3	-12,7
	SE	22,0	29,0	25,8	-14,2
	E	21,4	29,2	24,8	-13,2
	NE	21,2	27,1	23,1	-11,5
	N	19,0	23,5	22,1	-10,5
	NW	19,2	23,6	21,9	-10,3
	W	18,6	23,0	21,1	-9,5
	SW	19,1	24,4	20,9	-9,3

Πίνακας 4.2.1-3: Θερμοκρασίες των διαφορετικών όψεων στους κίονες της νότιας όψης (συνέχεια)

Κίονας	Όψη	T _{minav} (°C)	T _{maxav} (°C)	T _{meanav} (°C)	ΔT _{av} (°C)
κίονας 6	S	20,9	27,0	24,1	-12,5
	SE	22,5	26,7	25,0	-13,4
	E	21,3	26,3	23,8	-12,2
	NE	20,9	25,2	22,2	-10,6
	N	20,7	22,5	21,5	-9,9
	NW	19,1	22,3	21,2	-9,6
	W	18,7	22,4	20,8	-9,2
	SW	19,6	24,1	21,2	-9,6
κίονας 7	S	21,3	27,9	24,8	-14,8
	SE	22,4	27,5	25,3	-15,3
	E	21,6	27,0	24,2	-14,2
	NE	21,1	25,5	22,5	-12,5
	N	20,7	22,5	21,5	-9,9
	NW	19,1	22,3	21,2	-9,6
	W	18,7	22,4	20,8	-9,2
	SW	20,2	25,0	21,8	-11,8
κίονας 8	S	21,7	27,4	24,8	-14,8
	SE	22,7	27,6	25,5	-15,5
	E	21,9	28,6	24,3	-14,3
	NE	21,2	25,3	22,4	-12,4
	N	19,6	23,1	21,5	-11,5
	NW	19,6	23,6	21,8	-11,8
	W	19,4	23,1	21,0	-11,0
	SW	20,0	25,2	21,8	-11,8
κίονας 9	S	21,9	27,9	24,6	-14,6
	SE	22,0	27,8	24,9	-14,9
	E	21,6	27,1	23,5	-13,5
	NE	21,1	25,3	22,7	-12,7
	N	21,3	24,9	23,2	-13,2
	NW	19,3	24,7	22,5	-12,5
	W	19,5	23,9	21,4	-11,4
	SW	20,3	25,0	22,0	-12,0
κίονας 10	S	23,2	28,1	25,6	-16,4
	SE	22,0	28,1	24,7	-15,7
	E	19,8	23,9	21,6	-13,3
	NE	19,2	18,9	21,2	-12,9
	N	19,6	22,7	21,2	-12,9
	NW	18,8	23,4	20,8	-12,5
	W	19,8	24,2	21,3	-13,0
	SW	20,6	26,2	23,1	-14,8

Ο θερμογραφικός έλεγχος σταμάτησε στη 01.30 μ.μ. και συνεχίστηκε στις 02.46 μ.μ. Με την πάροδο του χρόνου αλλάζει και η θέση του ήλιου, καθώς μετακινείται προς τη δύση. Σε αυτό το γεγονός ενδεχομένως να αποδίδονται και οι αλλαγές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα του 10^{ου} κίονα σε σχέση με των προηγούμενων. Συγκεκριμένα η θερμότερη όψη είναι η νότια με θερμοκρασία 25,6°C, ενώ η ψυχρότερη όψη είναι η βορειοδυτική με μέση θερμοκρασία 20,8°C. Στο Διάγραμμα 4.2.1-10 είναι σαφές ότι οι θερμοκρασίες της ανατολικής, της βορειοανατολικής, της βόρειας, της βορειοδυτικής και της δυτικής όψης έχουν πολύ μικρές διαφορές. Επιπλέον η μέγιστη θερμοκρασία του κίονα ισούται με 28°C και η ελάχιστη με 18,8°C.

Πίνακας 4.2.1-4: Θερμοκρασίες των διαφορετικών όψεων στους κίονες της νότιας όψης (συνέχεια)

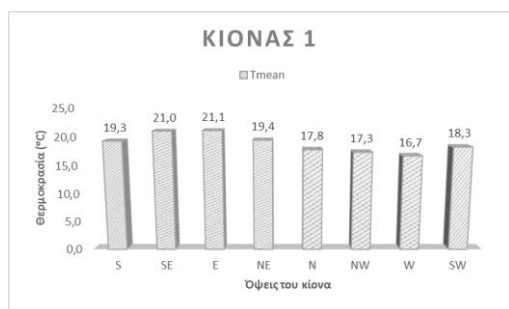
Κίονας	Όψη	T _{minav} (°C)	T _{maxav} (°C)	T _{meanav} (°C)	ΔT _{av} (°C)
κίονας 11	S	21,4	26,1	24,2	-15,9
	SE	19,4	25,2	22,5	-14,2
	E	18,8	23,6	20,8	-12,5
	NE	18,8	21,7	20,3	-12,0
	N	19,2	22,3	21,0	-12,7
	NW	18,5	22,4	20,6	-12,3
	W	19,3	23,8	20,9	-12,6
	SW	19,8	25,4	22,4	-14,1
κίονας 12	S	20,9	26,2	24,0	-15,7
	SE	18,5	24,5	21,4	-13,1
	E	18,4	23,0	20,0	-11,7
	NE	17,7	20,4	19,1	-10,8
	N	18,2	20,1	19,3	-11,0
	NW	18,1	21,6	19,9	-11,6
	W	19,0	23,3	20,2	-11,9
	SW	19,8	25,1	22,2	-13,9
κίονας 13	S	20,7	25,5	23,9	-15,6
	SE	17,3	24,8	22,0	-13,7
	E	16,9	22,2	18,7	-10,4
	NE	16,7	18,9	17,9	-9,6
	N	16,8	19,5	18,4	-10,1
	NW	17,2	20,5	19,0	-10,7
	W	18,4	22,7	21,2	-12,9
	SW	19,4	25,0	22,3	-14,0

Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα στον 11^ο κίονα. Η μέγιστη μέση θερμοκρασία βρίσκεται στη νότια όψη και είναι ίση με 24,2°C. Μάλιστα αυξάνεται η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας της νότιας όψης από της νοτιοανατολικής κατά 1,7°C. Η ελάχιστη μέση θερμοκρασία είναι 20,3°C και βρίσκεται στη βορειοανατολική όψη του κίονα. Η βορειοδυτική και η δυτική όψη παρουσιάζουν πολύ κοντινές μέσες θερμοκρασία, ενώ η μέση θερμοκρασία της νοτιοδυτικής όψης είναι κατά 1,5°C

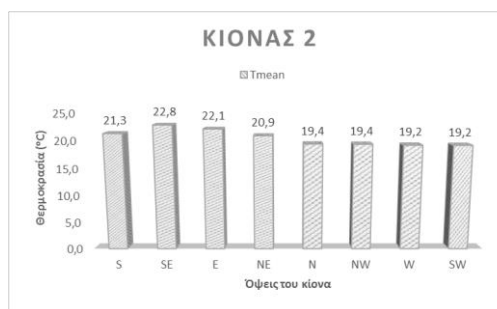
υψηλότερη από αυτή της δυτικής. Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται στον 11^ο κίονα είναι 26,1°C και η ελάχιστη 18,5°C.

Η θερμότερη όψη του 12^{ου} κίονα είναι η νότια με μέση θερμοκρασία 24°C και η ψυχρότερη είναι η βορειοανατολική με μέση θερμοκρασία 19,1°C. Στο Διάγραμμα 4.2.1-12 παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες των όψεων μειώνονται σταδιακά, πηγαίνοντας από τη νότια στη βορειοανατολική και τη βόρεια όψη, ενώ από τη βόρεια όψη προς την νοτιοδυτική παρατηρείται κλιμακωτή αύξηση των επιφανειακών θερμοκρασιών. Επιπλέον η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία του κίονα είναι 26,2°C και 17,7°C αντίστοιχα.

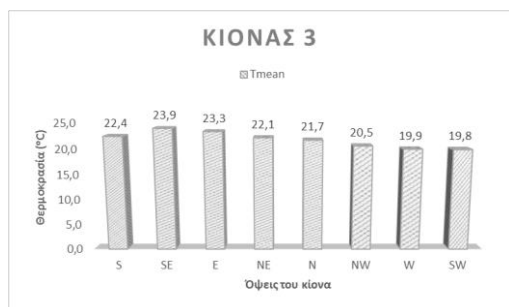
Τέλος, όμοια είναι και η κατάσταση στον 13^ο κίονα. Η θερμότερη όψη είναι η νότια με μέση θερμοκρασία 23,9°C και η ψυχρότερη είναι η βορειοανατολική όψη με θερμοκρασία 17,9°C. Στο Διάγραμμα 4.2.1-13 παρατηρείται επίσης η σταδιακή μείωση της θερμοκρασία από τη νότια προς τη βορειοανατολική όψη και στη συνέχεια η αύξησή της από τη βόρεια όψη προς τη νοτιοδυτική. Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκαν στον 13^ο κίονα ήταν 25,5°C και 16,7°C αντίστοιχα.



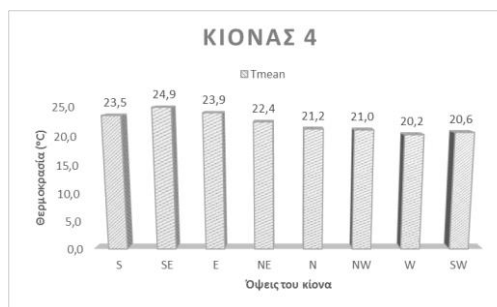
Διάγραμμα 4.2.1-1: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 1ου κίονα



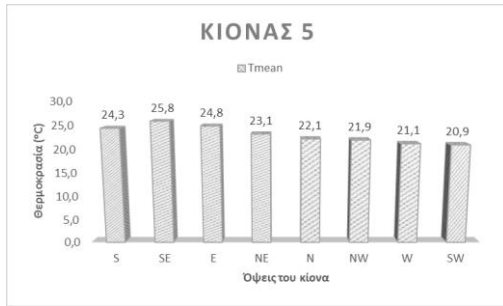
Διάγραμμα 4.2.1-2: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 2ου κίονα



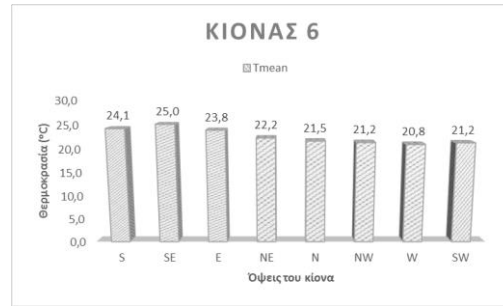
Διάγραμμα 4.2.1-3: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 3ου κίονα



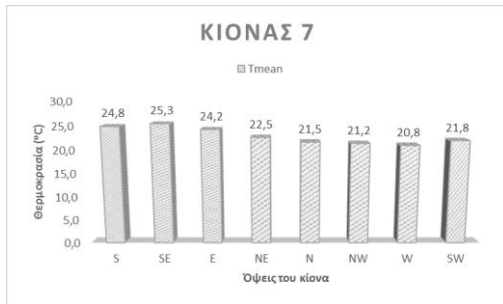
Διάγραμμα 4.2.1-4: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 4ου κίονα



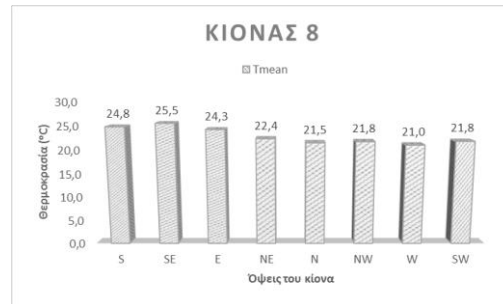
Διάγραμμα 4.2.1-5: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 5ου κίονα



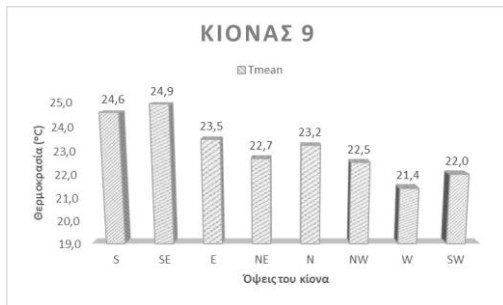
Διάγραμμα 4.2.1-6: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 6ου κίονα



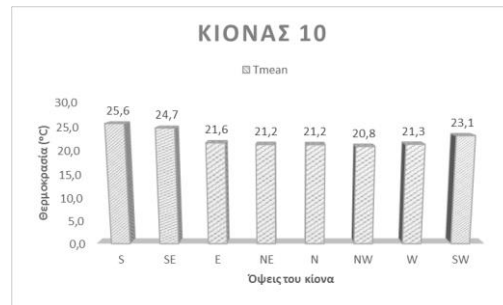
Διάγραμμα 4.2.1-7: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 7ου κίονα



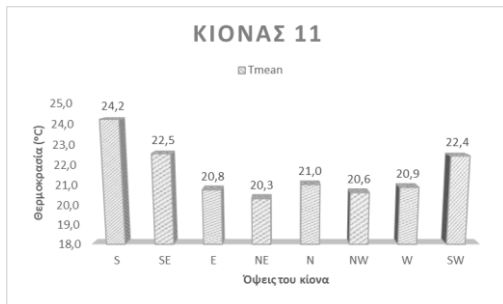
Διάγραμμα 4.2.1-8: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 8ου κίονα



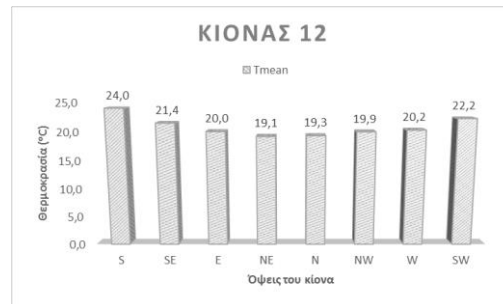
Διάγραμμα 4.2.1-9: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 9ου κίονα



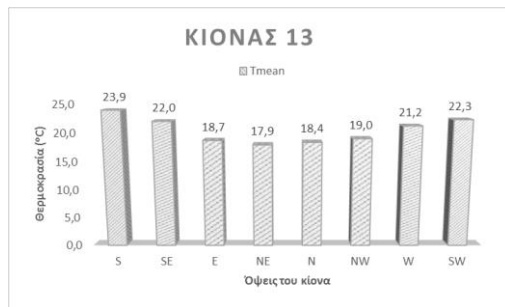
Διάγραμμα 4.2.1-10: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 9ου κίονα



Διάγραμμα 4.2.1-11: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 11ου κίονα



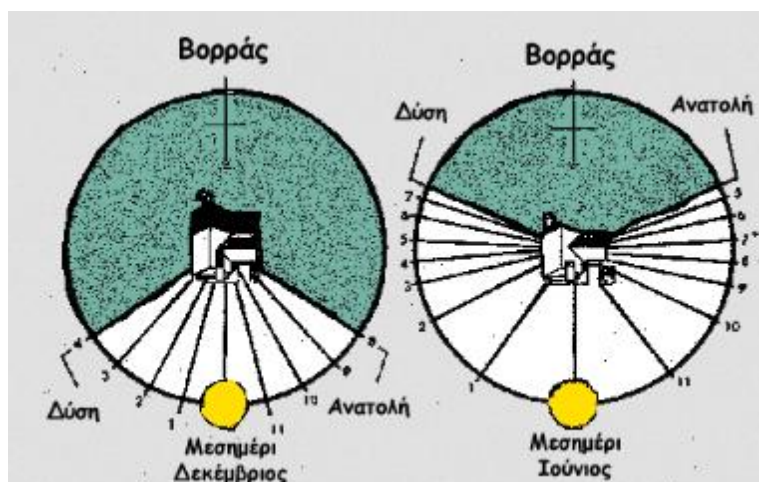
Διάγραμμα 4.2.1-12: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 12ου κίονα



Διάγραμμα 4.2.1-13: Μέση θερμοκρασία των όψεων του 13ου κίονα

Μερικά συμπεράσματα

Όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τη θέση του ήλιου. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 12.00 μ.μ έτσι η θερμότερη επιφάνεια από τον 1^ο έως τον 5^ο κίονα ήταν η νοτιοανατολική και οι ψυχρότερες ήταν η νοτιοδυτική και η δυτική, καθώς δεν ήταν εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 4.2.1-1). Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι οι όψεις που δεν ακτινοβολούνταν από τον ήλιο (βόρεια, βορειοδυτική, δυτική και νοτιοδυτική) δεν παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία τους. Από τον 6^ο έως τον 9^ο κίονα η νοτιοδυτική όψη είναι θερμότερη από τη δυτική, επειδή ο ήλιος με την πάροδο του χρόνου κινείται δυτικότερα και αρχίζει να θερμαίνεται περισσότερο η πρώτη. Στη 01.30 μ.μ. διακόπηκαν οι μετρήσεις και συνέχισαν στις 02.46 μ.μ. Ο ήλιος στο διάστημα της διακοπής είχε μετακινηθεί περισσότερο προς τη δύση και έτσι ακτινοβολούσε περισσότερο τις νοτιοδυτικές και τις δυτικές όψεις. Αυτό αποτυπώθηκε και στα αποτελέσματα, αφού η θερμότερες όψεις από το 10^ο έως το 13^ο κίονα ήταν οι νότιες, ενώ οι ψυχρότερες όψεις ήταν οι βορειοδυτικές και οι βορειοανατολικές.



Εικόνα 4.2.1-1: Η θέση του ήλιου στη διάρκεια της ημέρας (101)

Μία άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι στον ίδιο κίονα αναπτύσσονται θερμοκρασιακές διαφορές της τάξης των 10°C. Συνεπώς διαπιστώνεται για άλλη μία φορά η συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του μαρμάρου, ενώ κατανοείται και πόσο καθοριστική είναι η θερμική κόπωση ως παράγοντας των επιφανειακών φθορών.

4.2.2 Μελέτη επιφανειακής φθοράς με την υπέρυθρη θερμογραφία

Η παθητική θερμογραφία υπέρυθρου εφαρμόστηκε και για τη μελέτη της επιφανειακής φθοράς στο ναό του Ηφαιστού, καθώς προσφέρει πολύ καλή αίσθηση του ανάγλυφου της επιφάνειας. Οι μετρήσεις έγιναν στις 26 Μαΐου και στις 3, 7, 8, 9 και 10 Ιουλίου από απόσταση 1,5m. Χρησιμοποιήθηκε ο φακός με γωνία 25° και ο ευρυγώνιος φακός με γωνία 45°. Ακολουθεί πίνακας με τα περιβαλλοντικά δεδομένα στις ημέρες των μετρήσεων.

Πίνακας 4.2.2-1: Περιβαλλοντικά δεδομένα για τις ημερομηνίες των μετρήσεων

Ημερομηνία	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Κατεύθυνση ανέμου
26/05/2015	25-32	25-40	650	9,7	SSW
03/07/2015	28-34	32-45	690	8,7	NNE
07/07/2015	31-40	23-40	820	9,2	N
08/07/2015	31-36	22-35	719	2,4	NNE
09/07/2015	30-37	24-44	807	2,9	SSW
10/07/2015	30-35	30-44	693	1,9	NNE

Θα μελετηθούν τα αποτελέσματα του θερμογραφικού ελέγχου για κάθε όψη του μνημείου ξεχωριστά.

Νότια όψη

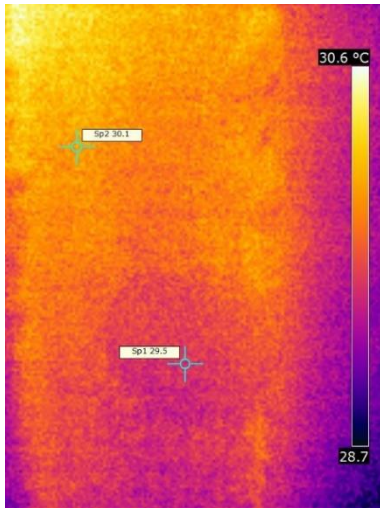
Η νότια όψη εξετάστηκε στις 03/07/2015, στις 07/07/2015, στις 08/07/2015 και στις 09/07/2015 με τον ευρυγώνιο φακό και στις 26/05/2015 και στις 10/07/2015 με το φακό γωνίας 25°. Ακολουθούν οι θερμικές εικόνες που είναι αντιπροσωπευτικές των τύπων φθοράς στους κίονες, στο σηκό και στο κρηπίδωμα.

Επιφανειακή φθορά στους κίονες

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-1 παρουσιάζονται περιοχές με διαφορετικές αποχρώσεις και υφές στην επιφάνεια του μαρμάρου. Παρατηρείται μία περιοχή πορτοκαλί απόχρωσης, που τοπικά έχει απομακρυνθεί με αποτέλεσμα να εμφανίζεται τμήμα μαρμάρου με λευκό χρώμα. Η επιφάνεια του μαρμάρου που αποκαλύφθηκε είναι κατά 0,5°C ψυχρότερη από τη θερμοκρασία της πορτοκαλί επιφάνειας.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-2 είναι εμφανείς οι οριζόντιες μικρορηγματώσεις που προέκυψαν λόγω της απομάκρυνσης προσμίξεων. Οι ρηγματώσεις είναι ψυχρότερες σχεδόν κατά 1°C από την υπόλοιπη επιφάνεια.

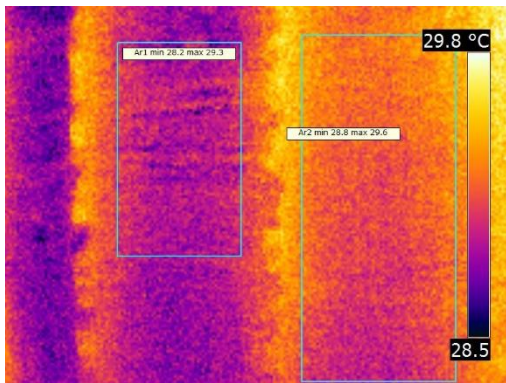
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-3 εντοπίζονται επιφάνειες, από τις οποίες πιθανώς να έχει απομακρυνθεί η επιδερμίδα του μαρμάρου. Οι λευκές επιφάνειες που έχουν αποκαλυφθεί έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 1,5°C από την επιδερμίδα του μαρμάρου.



Θερμική εικόνα 4.2.2-1 (2981) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



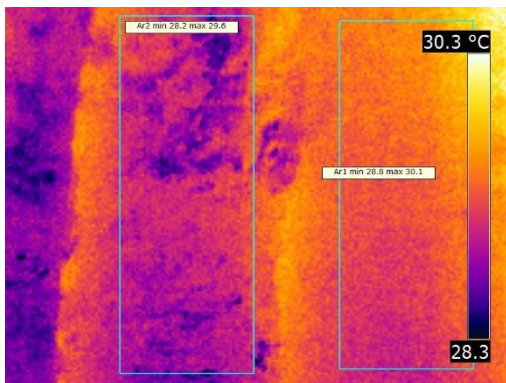
Εικόνα 4.2.2-1



Θερμική εικόνα 4.2.2-2 (2983) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



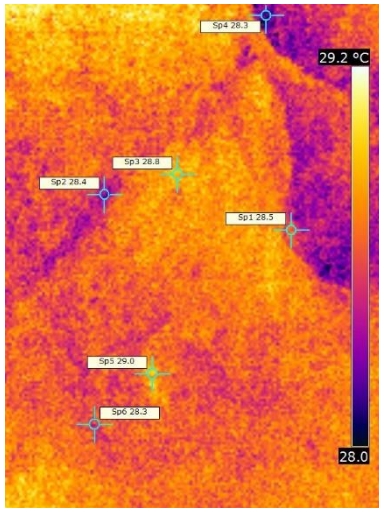
Εικόνα 4.2.2-2



Θερμική εικόνα 4.2.2-3 (2985) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



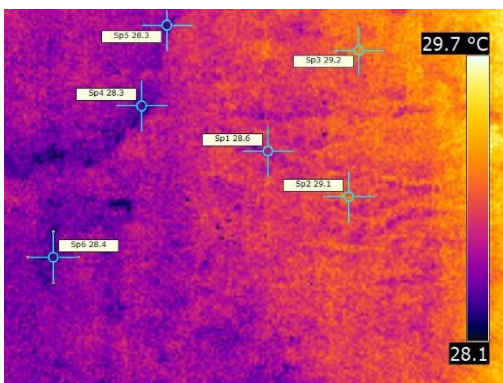
Εικόνα 4.2.2-3



Θερμική εικόνα 4.2.2-4 (3001) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός Εικόνα 4.2.2-4

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-4 μελετάται μία επιφάνεια στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα για συμπλήρωση μικρών ρωγμών. Η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι 28,8°C, ενώ του κονιάματος είναι 28,4°C.

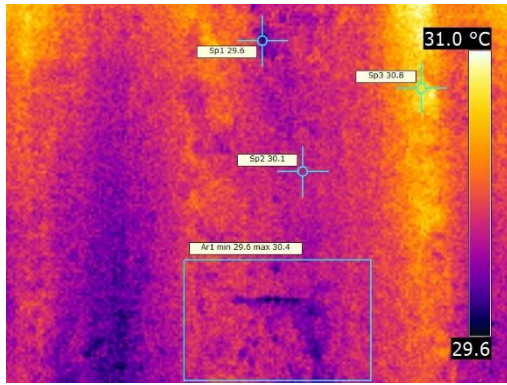
Κονίαμα συμπλήρωσης έχει χρησιμοποιηθεί και στην επιφάνεια ελέγχου της Θερμικής εικόνα 4.2.2-5. Σε αυτή την περίπτωση το κονίαμα έχει θερμοκρασία 28,3°C, ενώ η επιφάνεια του μαρμάρου έχει θερμοκρασία 29,2°C. Παράλληλα παρατηρούνται και μικρορηγματώσεις εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων, οι οποίες είναι κατά 0,6°C ψυχρότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου. Στα σημεία που εμφανίζονται οι περιοχές μπεζ απόχρωσης, δεν παρατηρείται διαφορά στη θερμοκρασία.



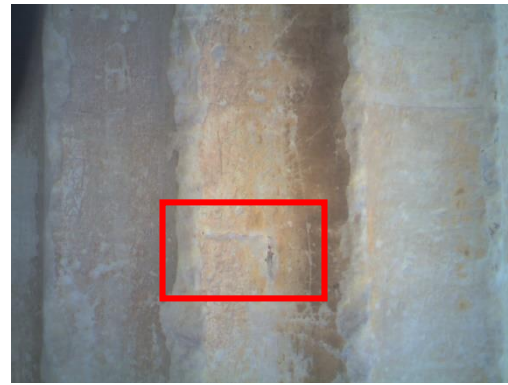
Θερμική εικόνα 4.2.2-5 (3003) 03/07/2015 – ευρυγώνιος φακός

Εικόνα 4.2.2-5

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-6 ελέγχεται επιφάνεια πορτοκαλί χροιάς, που κατά τόπους παρουσιάζει ασυνέχειες. Τα τμήματα του μαρμάρου που έχουν αποκαλυφθεί παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία από την πορτοκαλί περιοχή κατά 0,5°C. Παράλληλα στην επιφάνεια έχουν σχηματιστεί χαράγματα τα οποία είναι κατά 0,8°C ψυχρότερα.



Θερμική εικόνα 4.2.2-6 (3033) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

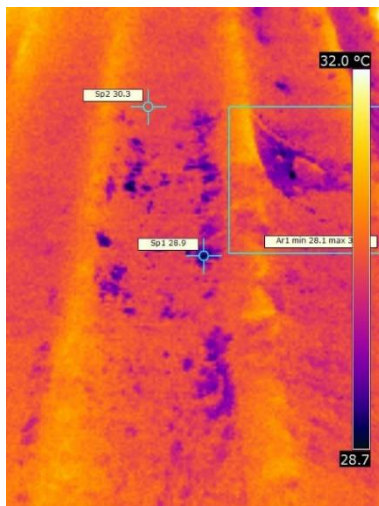


Εικόνα 4.2.2-6

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-7 μελετάται ανάγλυφη καστανή περιοχή, όπου παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιφάνεια του μαρμάρου. Συγκριμένα οι καστανοί σχηματισμοί έχουν θερμοκρασία 28,1°C και η θερμοκρασία της υπόλοιπης επιφάνειας είναι 31,3°C.

Στους κίονες της νότιας όψης είναι έντονη η παρουσία ιχνών από σφαίρες. Οι οπές εμφανίζονται ψυχρότερες με θερμοκρασία 29,3°C, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια έχει θερμοκρασία 31°C. (Θερμική εικόνα 4.2.2-8)

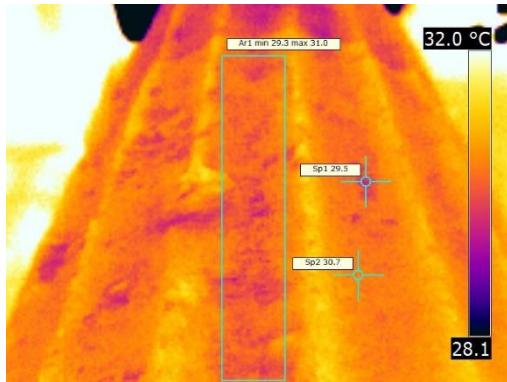
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-9 ελέγχεται περιοχή πορτοκαλί χροιάς και διαπιστώνεται ότι στα σημεία, από τα οποία έχει αποκολληθεί η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη κατά 0,8°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-7 (3047) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



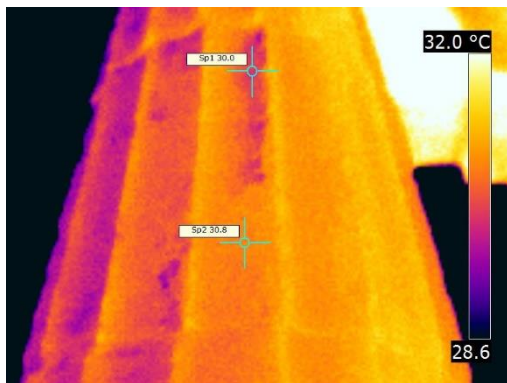
Εικόνα 4.2.2-7



Θερμική εικόνα 4.2.2-8 (3049) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-8



Θερμική εικόνα 4.2.2-9 (3063) 7/7/2015 ευρυγώνιος φακός

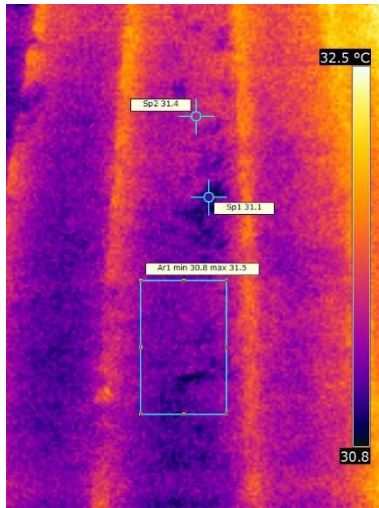


Εικόνα 4.2.2-9

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-10 εξετάζονται οι φλεβώσεις του μαρμάρου. Αυτές εμφανίζονται ψυχρότερες από την υπόλοιπη επιφάνεια κατά 0,7°C.

Επιπλέον στην Εικόνα 4.2.2-11 εντοπίζονται επιφάνειες με διαφορετικές αποχρώσεις και υφές, καθώς δίπλα στην πορτοκαλοκάστανη περιοχή του κίονα εμφανίζεται καστανέρυθρη επιφάνεια. Από τη Θερμική εικόνα 4.2.2-11 διαπιστώνεται ότι στην περιοχή της καστανέρυθρης επιφάνειας υπάρχουν κατά τόπους ψυχρότερες περιοχές με θερμοκρασία περίπου 31,7°C, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή η θερμοκρασία είναι περίπου 32,2°C. Παράλληλα η πορτοκαλοκάστανη περιοχή που βρίσκεται παραπλεύρως εμφανίζεται ψυχρότερη από την επιφάνεια του μαρμάρου με θερμοκρασία 30,8°C.

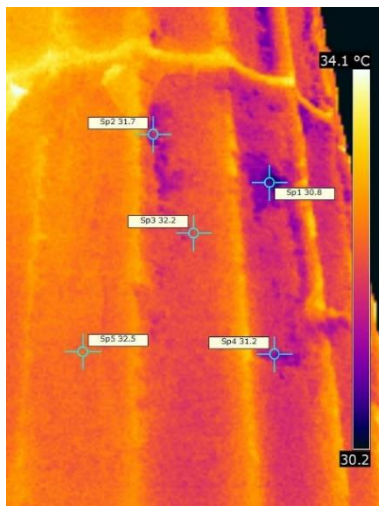
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-12 παρατηρείται ότι ο 3^{ος} σπόνδυλος του τρίτου κίονα παρουσιάζει θερμοκρασιακή διαφορά από το 2^ο κατά περίπου 0,5°C.



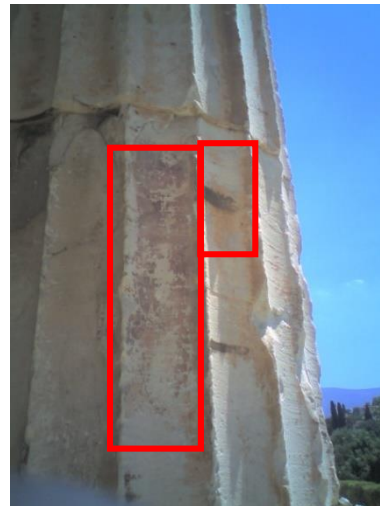
Θερμική εικόνα 4.2.2-10 (3065) 3/7/2015 – ευρυγώνιος



Εικόνα 4.2.2-10



Θερμική εικόνα 4.2.2-11 (5540) 9/7/2015 – ευρυγώνιος



Εικόνα 4.2.2-11

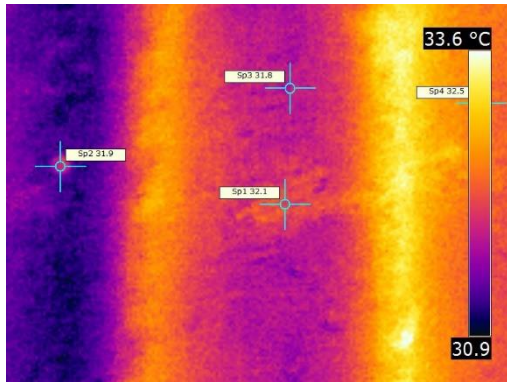


Θερμική εικόνα 4.2.2-12 (3107) 3/7/2015 – ευρυγώνιος



Εικόνα 4.2.2-12

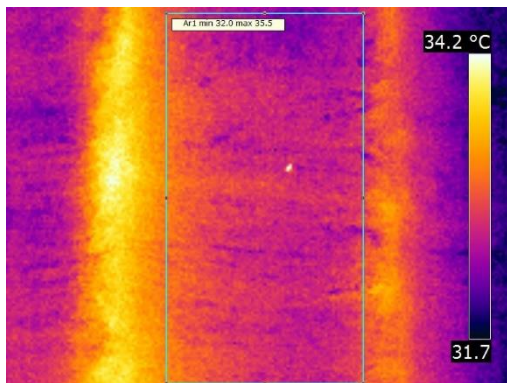
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-13 μελετώνται οι φλεβώσεις στην επιφάνεια του μαρμάρου που έχουν θερμοκρασία 32,1°C, ενώ η επιφάνεια χωρίς φλεβώσεις έχει θερμοκρασία 31,8°C. Φλεβώσεις εξετάζονται και στη Θερμική εικόνα 4.2.2-14, οι οποίες εμφανίζουν μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά περίπου 3°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-13 (5886) 10/7/2015 – φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-13

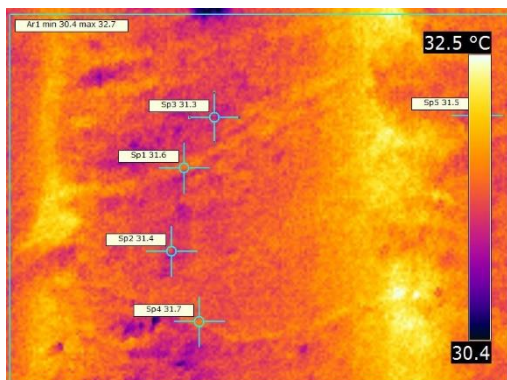


Θερμική εικόνα 4.2.2-14 (5888) 10/7/2015 – φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-14

Η Θερμική εικόνα 4.2.2-15 παρουσιάζει μία περιοχή του 4^{ου} κίονα με φλεβώσεις και μικρορηγματώσεις που προκλήθηκαν από την έκπλυση των προσμίξεων. Οι ρηγματώσεις εμφανίζονται θερμότερες με θερμοκρασία περίπου 31,7°C.

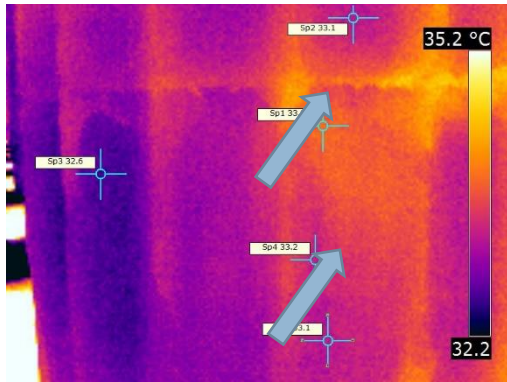


Θερμική εικόνα 4.2.2-15 10/7/2015 – φακός 25°

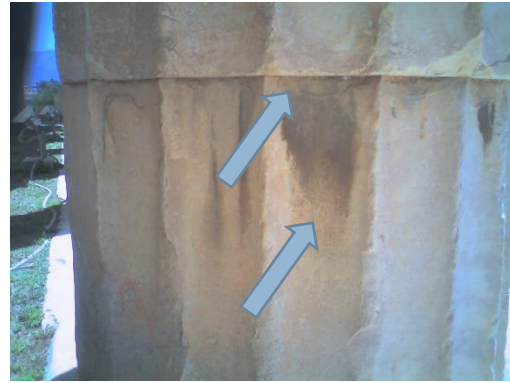


Εικόνα 4.2.2-15

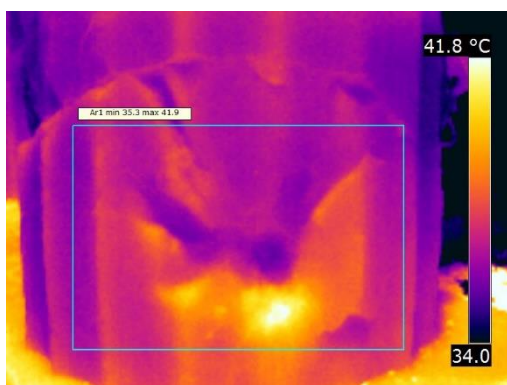
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-16 εξετάζεται περιοχή μαύρων επικαθίσεων που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του κίονα. Η θερμοκρασία στις μαύρες επικαθίσεις είναι 33,9°C, ενώ η επιφάνεια του μαρμάρου γύρω από αυτές είναι παρουσιάζει θερμοκρασία περίπου 33,2°C. Επιπλέον παρατηρούνται διαφορετικές διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας ανάλογα με τις χρωματικές διαφορές στη μαύρη περιοχή. Τα σημεία, που η απόχρωση των επικαθίσεων είναι καστανή, εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τις φαιόμαυρες περιοχές που είναι θερμότερες.



Θερμική εικόνα 4.2.2-16 (5590) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-16

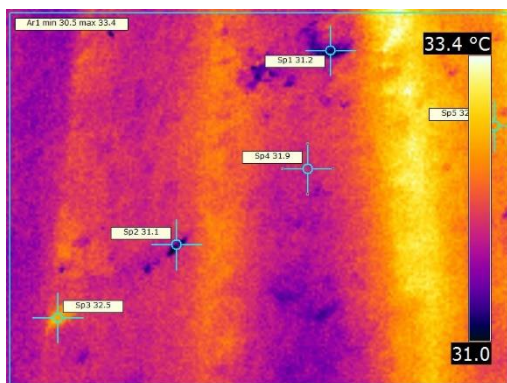


Θερμική εικόνα 4.2.2-17 (5606) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-17

Στη συνέχεια εξετάζεται σημάδι από βόλι. Η περιοχή αυτή εξαιτίας του ανάγλυφου της παρουσιάζει θερμοκρασίες μεταξύ 35,3 και 41,9°C. (Θερμική εικόνα 4.2.2-17)



Θερμική εικόνα 4.2.2-18 (5928) 10/7/2015 – φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-18

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-18 παρατηρείται ότι η καστανή περιοχή πάνω στο μάρμαρο είναι ψυχρότερη από την υπόλοιπη επιφάνεια του μαρμάρου (31,9°C) με θερμοκρασία 31,2°C. Ταυτόχρονα παρατηρείται περιοχή χαραγματος με θερμοκρασία 31,1°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-19 ελέγχονται με την υπέρυθρη θερμογραφία μαύρες επικαθίσεις. Παρατηρείται ότι η φαιόμαυρη επιφάνεια είναι θερμότερη από την υγιή επιφάνεια κατά σχεδόν 0,5°C.

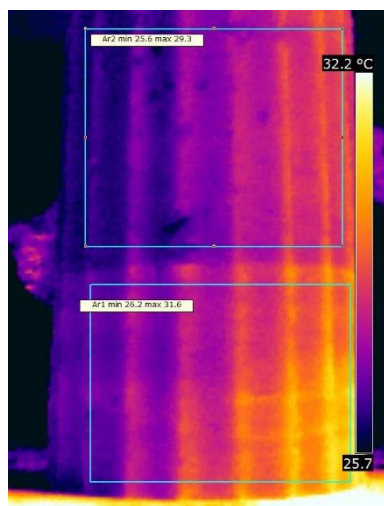


Θερμική εικόνα 4.2.2-19 (3277) 3/7/215 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-19

Ο 1^{ος} σπόνδυλος του 10^{ου} κίονα παρουσιάζει υψηλότερη θερμοκρασία από το 2^ο. Συγκεκριμένα η μέση θερμοκρασία του 1^{ου} σπονδύλου είναι 28,4°C, ενώ του 2^{ου} ισούται με 27,4°C. Επιπλέον θερμότερες εμφανίζονται και οι προσμίξεις στον 1^ο σπόνδυλο. (Θερμική εικόνα 4.2.2-20)



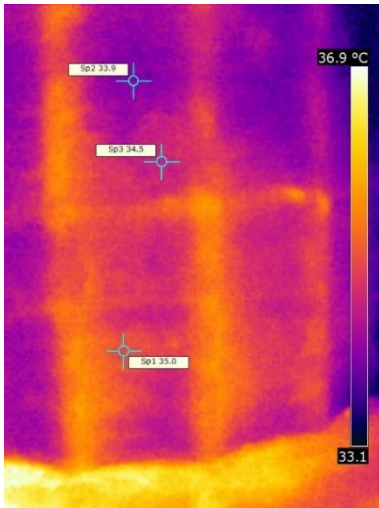
Θερμική εικόνα 4.2.2-20 (1868) 26/5/2015 – φακός 25° – απόσταση 3m



Εικόνα 4.2.2-20

Η Θερμική εικόνα 4.2.2-21 εξετάζει την πορτοκαλί επιφάνεια στον 1^ο σπόνδυλο του 10^{ου} κίονα. Είναι εμφανές ότι οι περιοχές πορτοκαλί χροιάς είναι θερμότερες από τις υπόλοιπες και συγκεκριμένα κατά περίπου 0,5°C.

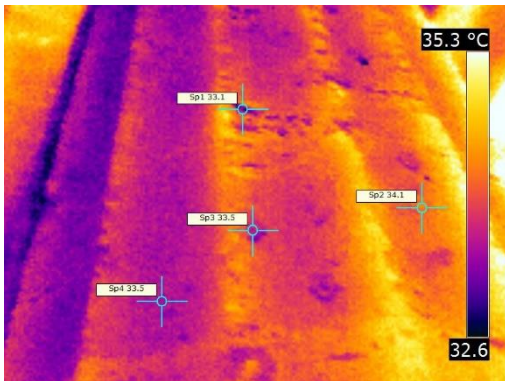
Η Θερμική εικόνα 4.2.2-22 μελετά ανάγλυφη καστανή περιοχή. Η περιοχή παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία (33,1°C) από τη μαρμάρινη επιφάνεια (33,5°C). Επιπλέον τα σημάδια από τις σφαίρες εμφανίζονται ψυχρότερα.



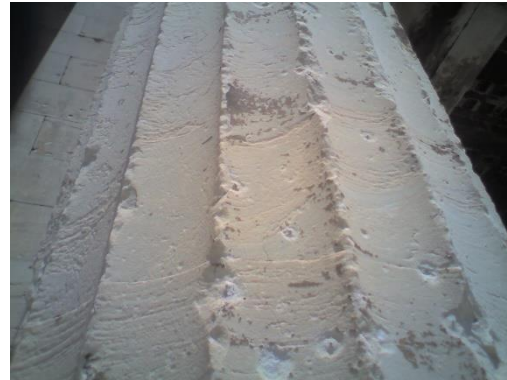
Θερμική εικόνα 4.2.2-21 (3299) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-21

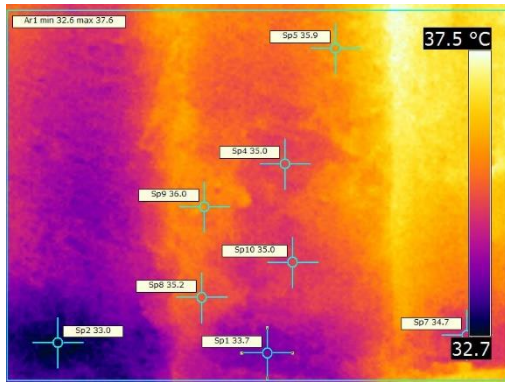


Θερμική εικόνα 4.2.2-22 (5730) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-22

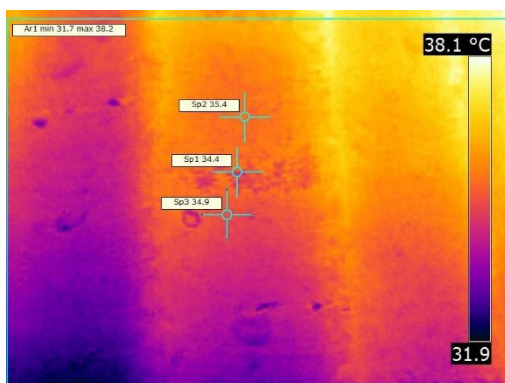
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-23 μελετάται η πορτοκαλί περιοχή στη βάση του κίονα . Η επιφάνεια αυτή έχει θερμοκρασία 36°C, ενώ η γειτονική λευκή επιφάνεια είναι κατά 1°C ψυχρότερη. Επιπλέον παρουσιάζεται η καστανή περιοχή που βρίσκεται στη νότια όψη του 11^{ου} κίονα στη Θερμική εικόνα 4.2.2-24. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία της περιοχής αυτής είναι 34,4°C, ενώ η επιφάνεια του μαρμάρου παραπλεύρως έχει θερμοκρασία 35,4°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-23 (5988) 10/7/2015 –φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-23

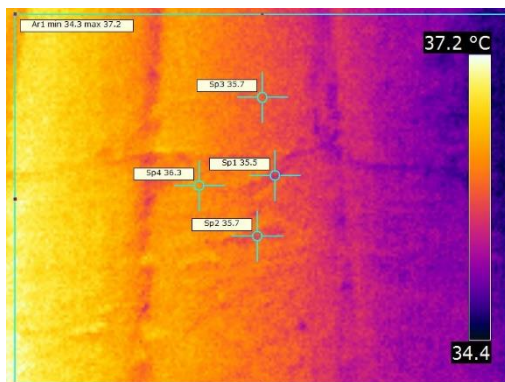


Θερμική εικόνα 4.2.2-24 (5990) 10/7/2015 –φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-24

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-25 παρατηρούνται μικρορηγματώσεις οι οποίες έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα. Το κονίαμα εμφανίζεται να έχει θερμοκρασία 35,5°C, ενώ η διπλανή επιφάνεια του μαρμάρου έχει θερμοκρασία 36,3°C.

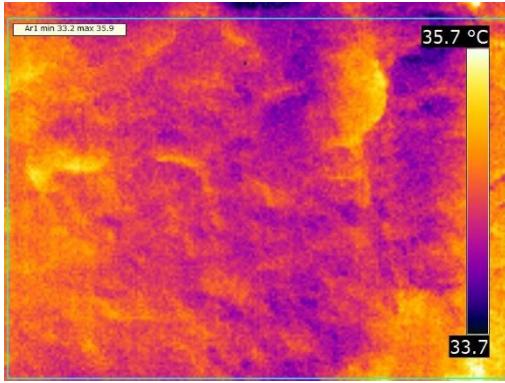


Θερμική εικόνα 4.2.2-25 (5798) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-25

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-26 εξετάζεται η δυτική όψη του 1^{ου} σπονδύλου του 13^{ου} κίονα, η οποία παρουσιάζει εκτεταμένη φθορά, πιθανώς λόγω πυρκαγιάς. Η περιοχή ελέγχου εξαιτίας του έντονου ανάγλυφου της εμφανίζει θερμοκρασίες μεταξύ 33,2°C έως 35,9°C.

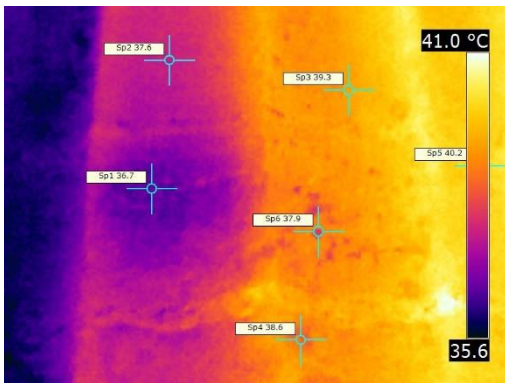


Θερμική εικόνα 4.2.2-26 (5810) 9/7/2015
ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-26

Στην επιφάνεια ελέγχου της Θερμικής εικόνας 4.2.2-27 έχει απομακρυνθεί η επιδερμίδα του μαρμάρου και εμφανίζεται λευκή περιοχή με ζαχαροειδή φθορά. Η επιφάνεια αυτή εμφανίζει θερμοκρασία 36,7°C, ενώ η διπλανή περιοχή έχει θερμοκρασία 37,9°C.



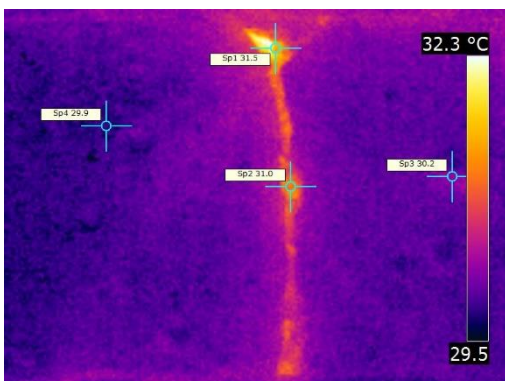
Θερμική εικόνα 4.2.2-27 (6020) 10/7/2015 – φακός 25



Εικόνα 4.2.2-27

Επιφανειακή φθορά στον τοίχο του σηκού

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται κάποια θερμογραφήματα από αντιπροσωπευτικά είδη φθοράς στον τοίχο της νότιας όψης.



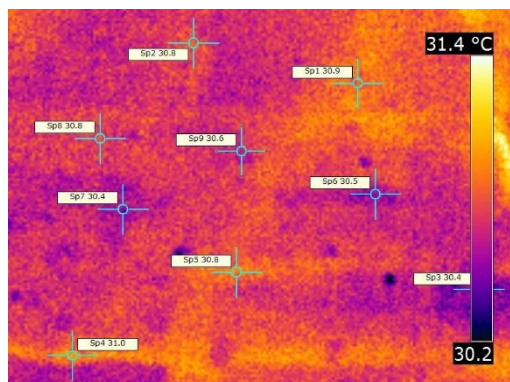
Θερμική εικόνα 4.2.2-28 (5111) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



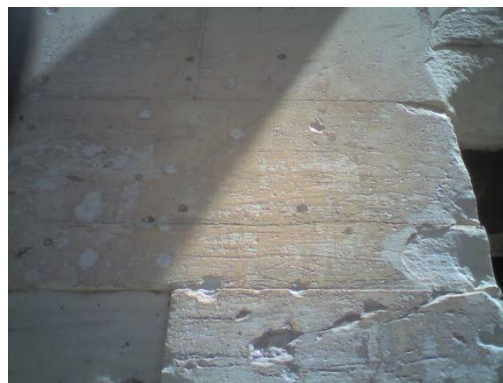
Εικόνα 4.2.2-28

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-28 παρατηρείται ρωγμή σε ένα δομόλιθο, η οποία έχει συμπληρωθεί με κάποιο κονίαμα. Το κονίαμα έχει θερμοκρασία 31°C, ενώ η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι περίπου 30°C.

Η Θερμική εικόνα 4.2.2-29 εξετάζει μία επιφάνεια πορτοκαλί χροιάς, η οποία κατά τόπους έχει απομακρυνθεί. Η πορτοκαλί περιοχή είναι κατά 0,2 έως 0,4°C θερμότερη από τα τμήματα, από τα οποία απουσιάζει.

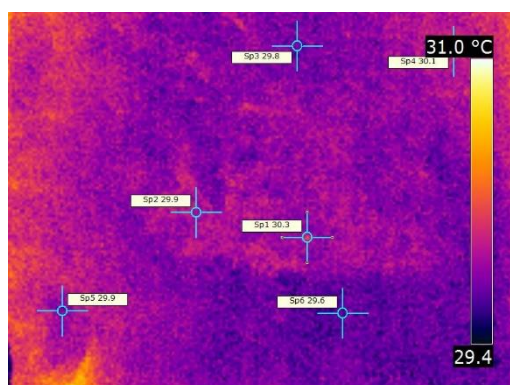


Θερμική εικόνα 4.2.2-29 (5131) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-29

Και στη Θερμική εικόνα 4.2.2-30 παρουσιάζεται περιοχή πορτοκαλί χροιάς, η οποία έχει θερμοκρασία από 29,9°C έως 30,3°C, ενώ η θερμοκρασία στην επιφάνεια του μαρμάρου ισούται με 29,6°C.



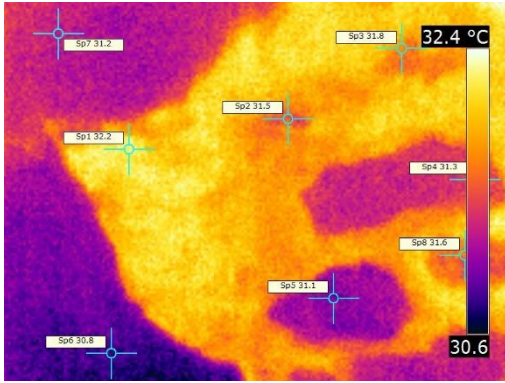
Θερμική εικόνα 4.2.2-30 (5141) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-30

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-31 παρουσιάζεται μία από τις πλάγιες θύρες, η οποία έχει σφραγιστεί με κονίαμα, λίθους και πλίνθους. Η θερμοκρασία του μαρμάρου στη θύρα είναι 31°C, περίπου ίση με τη θερμοκρασία κάποιων από τους λίθους. Η θερμοκρασία του κονιάματος είναι ίση με 31,8°C, ενώ οι πλίνθοι δεν είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτοι στο θερμογράφημα, αφού η θερμοκρασία τους (32,2°C) διαφέρει ελάχιστα από αυτή του κονιάματος.

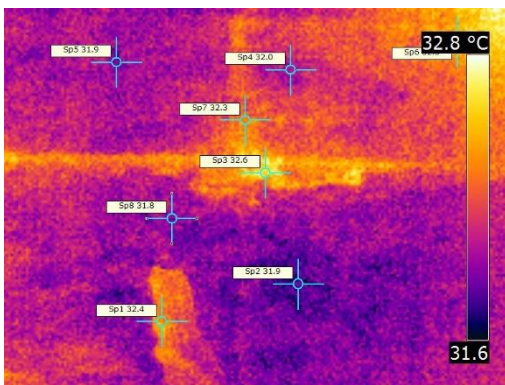
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-32 εμφανίζεται περιοχή με ρηγματώσεις, πιθανόν εξαιτίας της απώλειας προσμίξεων, οι οποίες είναι κατά 0,8°C θερμότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου.



Θερμική εικόνα 4.2.2-31 (5177) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-31

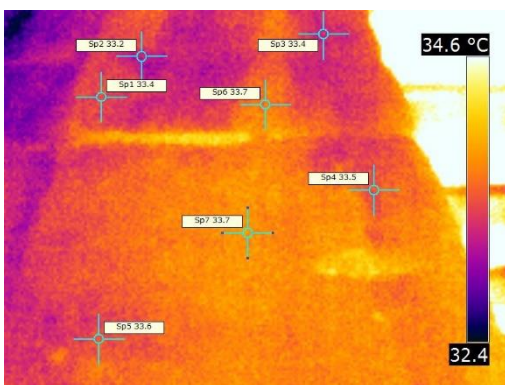


Θερμική εικόνα 4.2.2-32 (5179) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-32

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-33 παρατηρείται επιφάνεια με μαύρες επικαθίσεις. Η θερμοκρασία των μαύρων επικαθίσεων είναι υψηλότερη από αυτή της υπόλοιπης επιφάνειας. Συγκεκριμένα η φαιόμαυρη περιοχή εμφανίζει θερμοκρασία ίση με 33,7°C, ενώ η παράπλευρη επιφάνεια έχει θερμοκρασία περίπου 33,4°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-33 (5199) 9/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

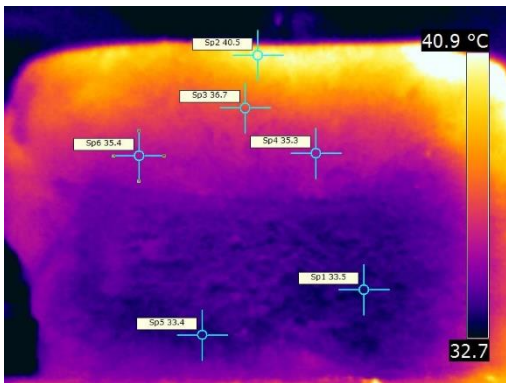


Εικόνα 4.2.2-33

Επιφανειακή φθορά στο κρηπίδωμα

Οι ακόλουθες εικόνες είναι χαρακτηριστικές της φθοράς που παρατηρείται στο κρηπίδωμα της νότιας όψης.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-34 παρατηρείται πορώδης λίθους που εμφανίζει μία φαιόμαυρη και μία πορτοκαλί περιοχή. Πιθανώς και οι δύο να είναι αποτελέσματα βιολογικής διάβρωσης. Η φαιόμαυρη επιφάνεια είναι θερμότερη με θερμοκρασία από 35,3°C έως 36,7°C και η πορτοκαλί εμφανίζει θερμοκρασία περίπου 33,5°C.

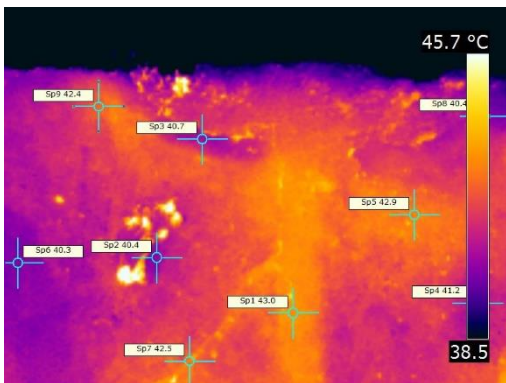


Θερμική εικόνα 4.2.2-34 (4439) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-34

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-35 έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα τσιμέντου για να συμπληρώσει το κενό μεταξύ δύο πωρόλιθων. Η θερμοκρασία του κονιάματος είναι 43°C, ενώ η θερμοκρασία των λίθων ισούται με 40,4°C.



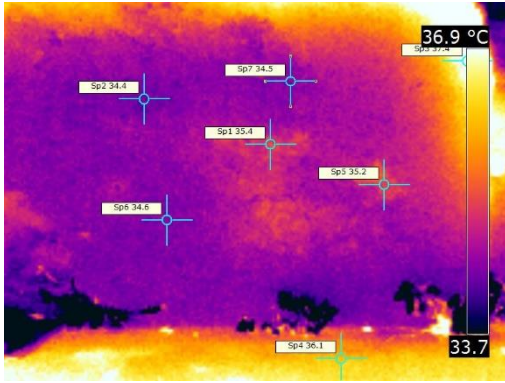
Θερμική εικόνα 4.2.2-35 (4477) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-35

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-36 μελετάται επιφάνεια μαρμάρου στην οποία εμφανίζονται γκρίζοι σχηματισμοί. Αυτοί οι σχηματισμοί παρουσιάζουν θερμοκρασία ίση με 35,4°C, ενώ η θερμοκρασία του μαρμάρου ισούται με 34,5°C.

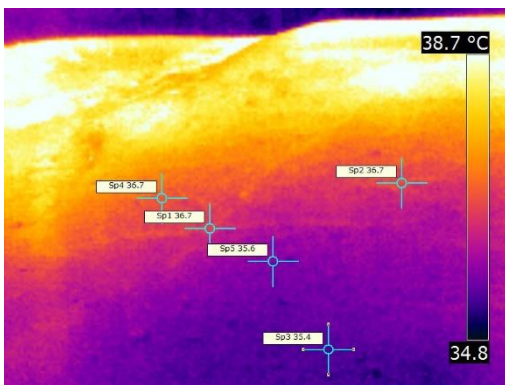
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-37 παρατηρούνται πάνω στην επιφάνεια του μαρμάρου μικρορηγματώσεις μαύρης απόχρωσης, η οποίες ίσως να οφείλονται σε βιοδιάβρωση. Η θερμοκρασία των ρηγματώσεων είναι ίση με 36,7°C, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι ίση με 35,6°C.



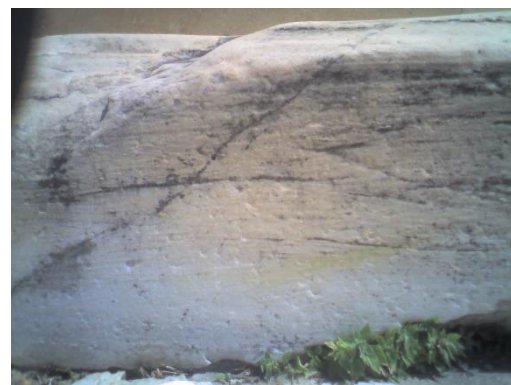
Θερμική εικόνα 4.2.2-36 (4487) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-36

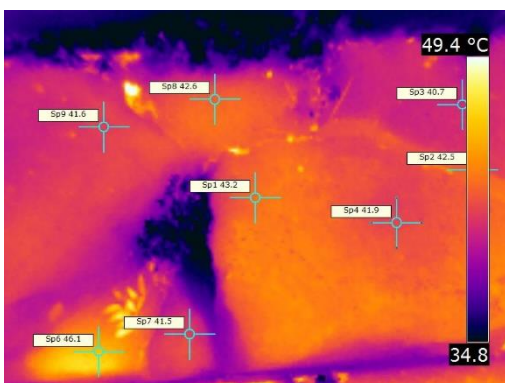


Θερμική εικόνα 4.2.2-37 (4507) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-37

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-38 έχει χρησιμοποιηθεί τσιμεντιτικό κονίαμα για να καλύψει το κενό που έχει σχηματιστεί μεταξύ των πωρόλιθων. Η θερμοκρασία του κονιάματος είναι ίση με 42,6°C, ενώ οι λίθοι είναι περίπου κατά 1°C έως 2°C ψυχρότεροι.

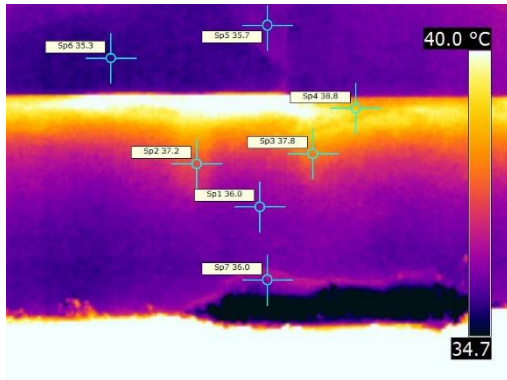


Θερμική εικόνα 4.2.2-38 (4515) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-38

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-39 είναι εμφανείς φαιόμαυρες περιοχές πάνω στην επιφάνεια του μαρμάρου, οι οποίες πιθανώς να προέρχονται από τη δράση μικροοργανισμών. Η θερμοκρασία των επιφανειών αυτών είναι περίπου 37,2°C και η θερμοκρασία του μαρμάρου ισούται με 36°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-39 (4535) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός

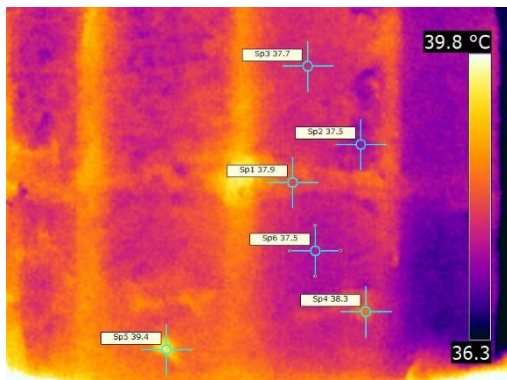


Εικόνα 4.2.2-39

Ανατολική όψη

Προκειμένου να μελετηθούν οι επιφανειακές φθορές, εφαρμόστηκε η υπέρυθρη θερμογραφία στην ανατολική όψη στις 07/07/2015, στις 08/07/2015 και στις 09/07/2015 με τη χρήση του ευρυγώνιου φακού και στις 10/07/2015 με τη χρήση του φακού 25°. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

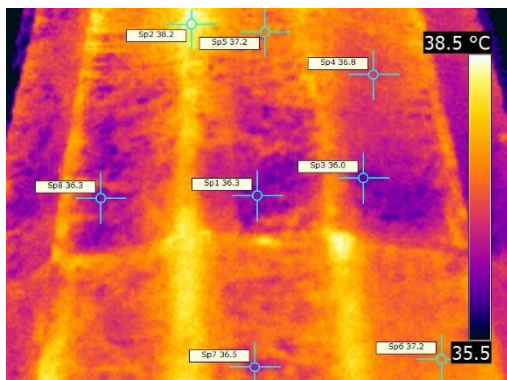
Επιφανειακή φθορά στους κίονες



Θερμική εικόνα 4.2.2-40 (3804) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



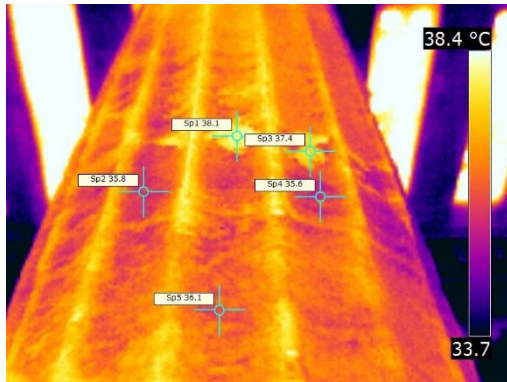
Εικόνα 4.2.2-40



Θερμική εικόνα 4.2.2-41 (3806) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-41



Θερμική εικόνα 4.2.2-42 (3854) 7/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



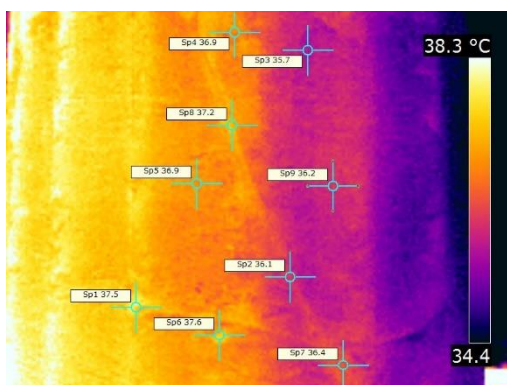
Εικόνα 4.2.2-42

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-40 παρατηρούνται προσμίξεις στην επιφάνεια του μαρμάρου, οι οποίες εμφανίζονται θερμότερες από την υπόλοιπη περιοχή. Η θερμοκρασία των προσμίξεων είναι περίπου 37,9°C, ενώ η επιφάνεια του μαρμάρου έχει θερμοκρασία 37,5°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-41 εμφανίζονται λευκές περιοχές με ζαχαροειδή φθορά στην επιφάνεια του μαρμάρου. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν θερμοκρασία ίση με 36,3°C, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια έχει θερμοκρασία 36,8°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-42 παρατηρούνται ανάγλυφες καστανές περιοχές στο μάρμαρο, οι οποίες είναι θερμότερες από την υπόλοιπη επιφάνεια του κίονα κατά 2,3°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-43 παρουσιάζονται ρωγμές σε κίονα, οι οποίες έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα. Το κονίαμα εμφανίζει θερμοκρασίες μεταξύ 36,1°C έως 37,2°C, ανάλογα με την έκθεσή του στον ήλιο, ενώ η θερμοκρασία του κίονα στη σκιερή πλευρά είναι 36,2°C και στην πλευρά που εκτίθεται στον ήλιο είναι 36,9°C.



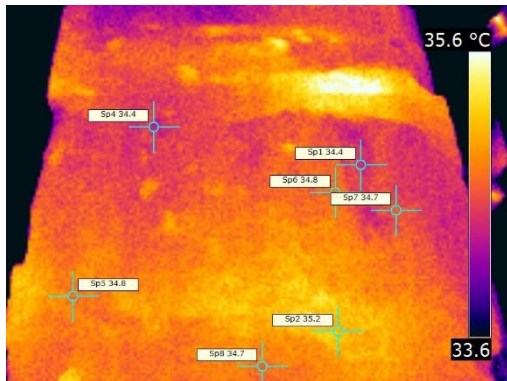
Θερμική εικόνα 4.2.2-43 (3904) 7/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-43

Επιφανειακή φθορά στον τοίχο του σηκού

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-44 παρουσιάζεται επιφάνεια μαύρων επικαθίσεων, τμήμα της οποίας έχει αποκολληθεί. Η επιφάνεια που αποκαλύφθηκε παρουσιάζει θερμοκρασία 34,4°C, ενώ η φαιόμαυρη περιοχή είναι θερμότερη κατά 0,4°C.

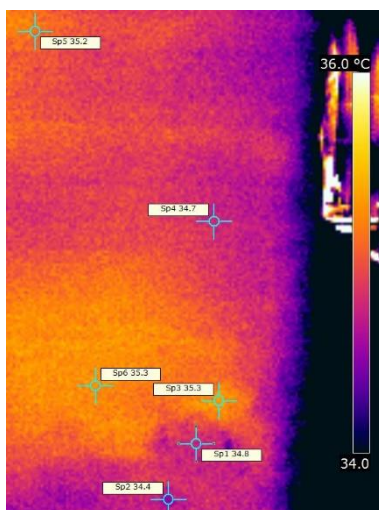


Θερμική εικόνα 4.2.2-44 (5215) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-44

Όμοια είναι και η κατάσταση που παρουσιάζεται στη Θερμική εικόνα 4.2.2-45. Η επιφάνεια των μαύρων επικαθίσεων εμφανίζει θερμοκρασία ίση με 35,3°C και η περιοχή που αποκαλύφθηκε είναι ψυχρότερη κατά 0,5°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-45 (5227) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



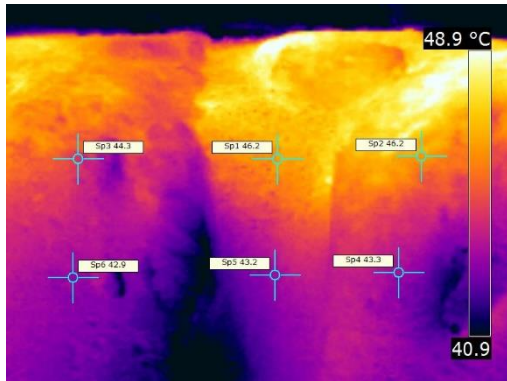
Εικόνα 4.2.2-45

Επιφανειακή φθορά στο κρηπίδωμα

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-46 ελέγχεται περιοχή, όπου έχει χρησιμοποιηθεί κονιάμα τσιμέντου για αρμολόγηση. Η θερμοκρασία του κονιάματος και των λίθων παρουσιάζουν μικρές διαφορές περίπου κατά 0,1°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-47 παρατηρούνται προσμίξεις στην επιφάνεια του μαρμάρου, οι οποίες είναι θερμότερες κατά 0,4°C.

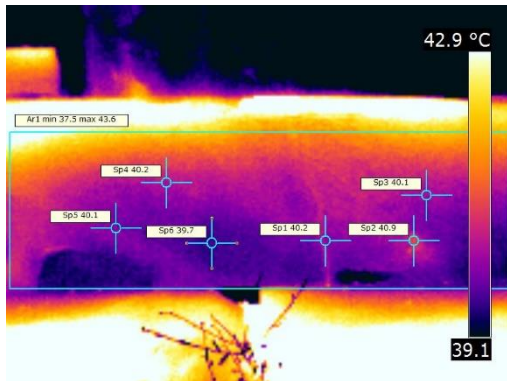
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-48 εξετάζεται επιφάνεια γκρίζας απόχρωσης, η οποία ενδεχομένως να έχει δημιουργηθεί από τη δράση μικροοργανισμών. Η γκρίζα επιφάνεια παρουσιάζεται θερμότερη από το υγιές μάρμαρο σχεδόν κατά 1°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-46 (4812) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



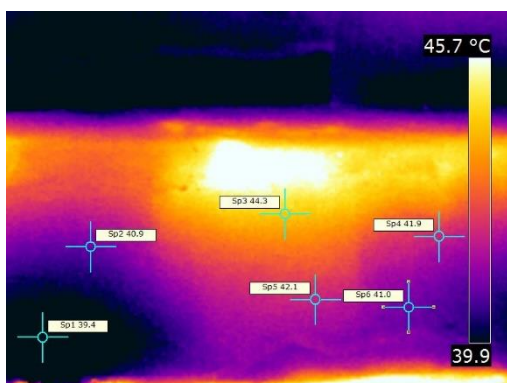
Εικόνα 4.2.2-46



Θερμική εικόνα 4.2.2-47 (4820) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-47



Θερμική εικόνα 4.2.2-48 (4852) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



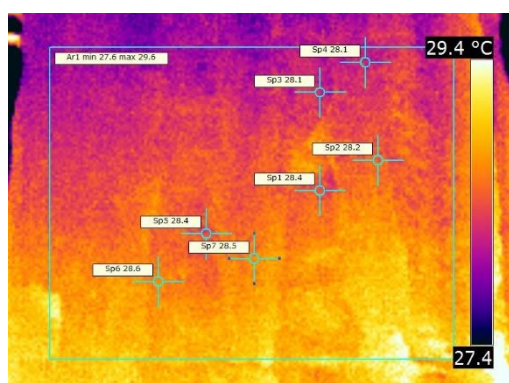
Εικόνα 4.2.2-48

Βόρεια όψη

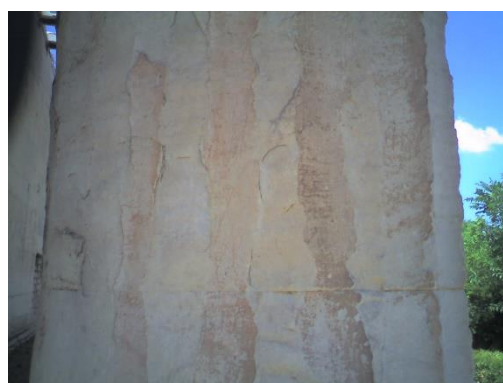
Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόστηκε για τη μελέτη των λεπτομερειών στη βόρεια όψη από τις 03/07/2015 έως τις 09/07/2015 με τη χρήση του ευρυγώνιου φακού και στις 10/07/2015 με τη χρήση του φακού 25°. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες θερμικές εικόνες που απεικονίζουν χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς.

Επιφανειακή φθορά στους κίονες

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-49 παρατηρούνται περιοχές πορτοκαλί χροιάς παράλληλες με τις ραβδώσεις του κίονα, οι οποίες είναι κατά 0,1°C ψυχρότερες από τα γειτονικά τμήματα του μαρμάρου.

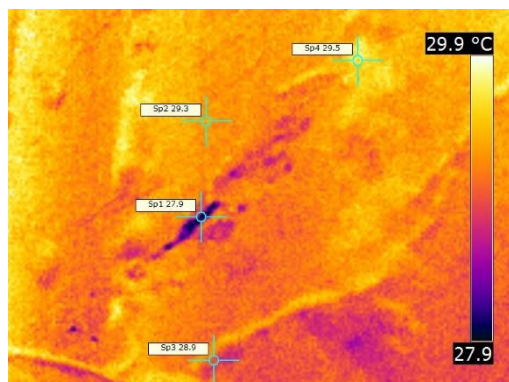


Θερμική εικόνα 4.2.2-49 (3432) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-49

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-50 εξετάζονται ρηγματώσεις, οι οποίες έχουν συμπληρωθεί με διαφορετικά κονιάματα, ένα λευκό και ένα γκρίζο. Το λευκό κονίαμα έχει θερμοκρασία 27,9°C, το γκρίζο κονίαμα 28,9°C και η επιφάνεια του μαρμάρου 29,3°C.

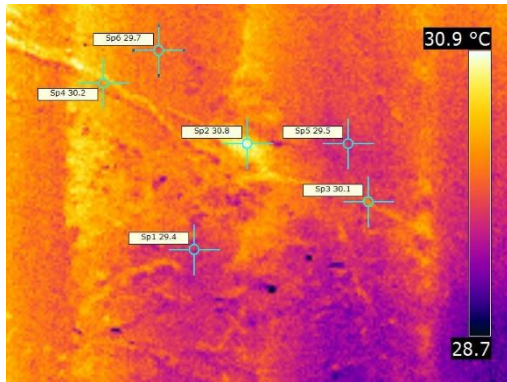


Θερμική εικόνα 4.2.2-50 (3444) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-50

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-51 είναι έντονη η παρουσία ρηγματώσεων και βελονοειδούς φθοράς που μπορεί να σχετίζεται είτε με την έκπλυση και την απομάκρυνση προσμίξεων, είτε με τη δράση μικροοργανισμών. Οι ρηγματώσεις έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα, η θερμοκρασία του οποίου ισούται με 30,2°C, ενώ το μάρμαρο εμφανίζεται κατά 0,5°C ψυχρότερο.

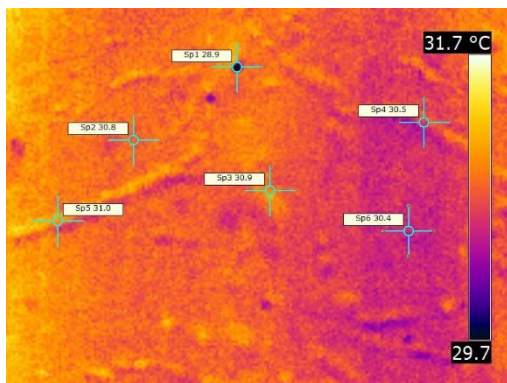


Θερμική εικόνα 4.2.2-51 (3488) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

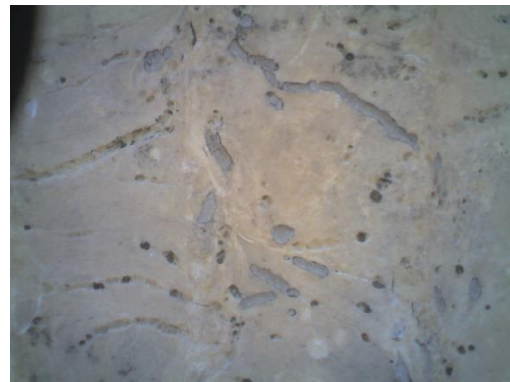


Εικόνα 4.2.2-51

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-52 εξετάζεται επιφάνεια με βελονοειδή διάβρωση, η οποία ίσως προέρχεται από βιοδιάβρωση. Μερικές από τις οπές που έχουν προκληθεί έχουν καλυφθεί με κονίαμα το οποίο είναι θερμότερο από το μάρμαρο κατά 0,5°C.

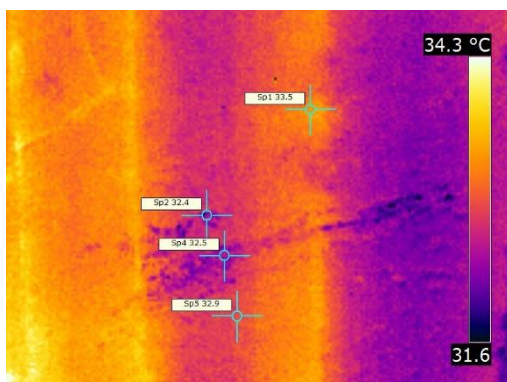


Θερμική εικόνα 4.2.2-52 (3506) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

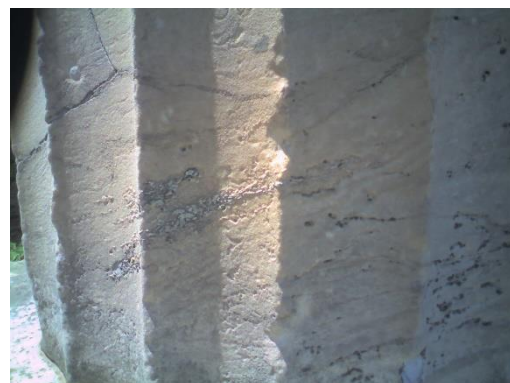


Εικόνα 4.2.2-52

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-53 μελετώνται λευκοί ανάγλυφοι σχηματισμοί, οι οποίοι παρουσιάζονται ψυχρότεροι από το μάρμαρο σχεδόν κατά 0,5°C.

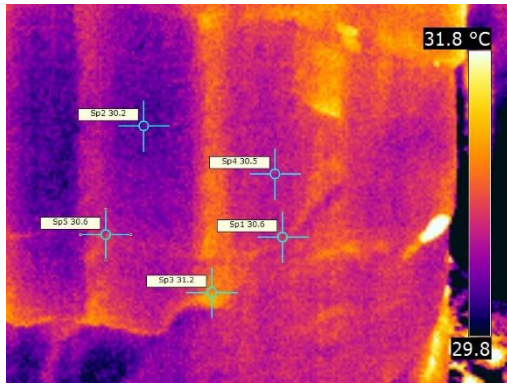


Θερμική εικόνα 4.2.2-53 (3578) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-53

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-54 είναι έντονη η παρουσία ρωγμών, ενώ ο κίονας εμφανίζει γενικά εκτεταμένες φθορές. Οι ρωγμές έχουν πληρωθεί με κονίαμα, του οποίου η θερμοκρασία διαφέρει περίπου 0,1°C από αυτή του μαρμάρου

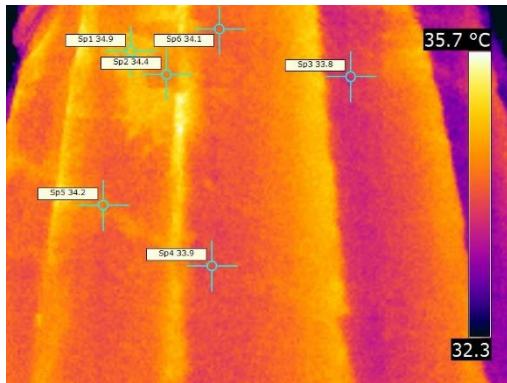


Θερμική εικόνα 4.2.2-54 (3602) 3/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-54

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-55 παρατηρείται περιοχή μεζ απόχρωσης, η οποία έχει θερμοκρασία 34.9°C, ενώ η θερμοκρασία του μαρμάρου ισούται με 34,4°C.

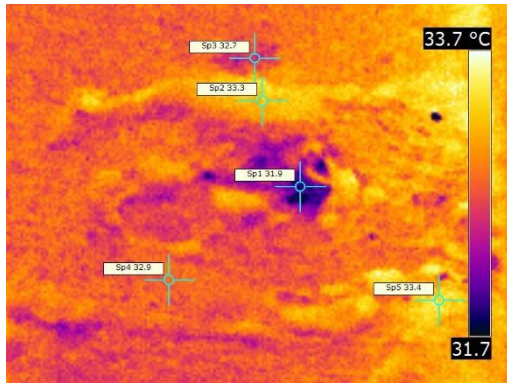


Θερμική εικόνα 4.2.2-55 (4120) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

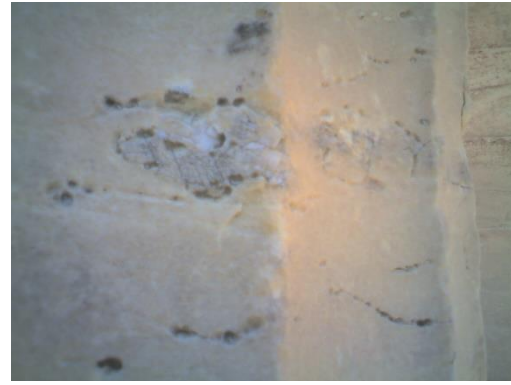


Εικόνα 4.2.2-55

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-56 είναι έντονη η απώλεια υλικού εξαιτίας της βελονοειδούς διάβρωσης, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στην απομάκρυνση προσμίξεων, είτε στη βιοδιάβρωση. Στο εσωτερικό των σπών παρατηρούνται μαύροι σχηματισμοί. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της βελονοειδούς διάβρωσης είναι 31,9°C, ενώ το μάρμαρο είναι κατά 1°C θερμότερο.

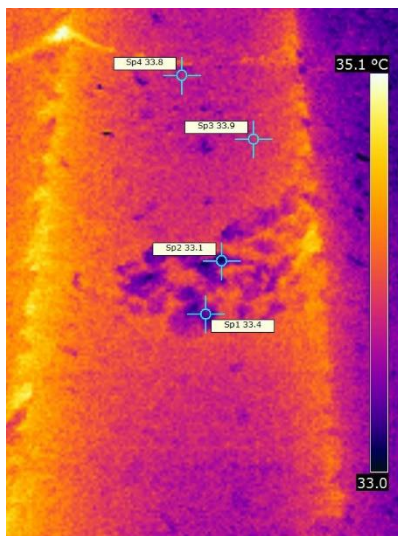


Θερμική εικόνα 4.2.2-56 (6195) 10/7/2015 –φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-56

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-57 μελετάται μαύρος σχηματισμός στην επιφάνεια του μαρμάρου που ίσως είναι προϊόν βιοδιάβρωσης. Η θερμοκρασία της μαύρης περιοχής είναι 33,1°C και η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι 33,9°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-57 (6255) 10/7/2015 –φακός 25°



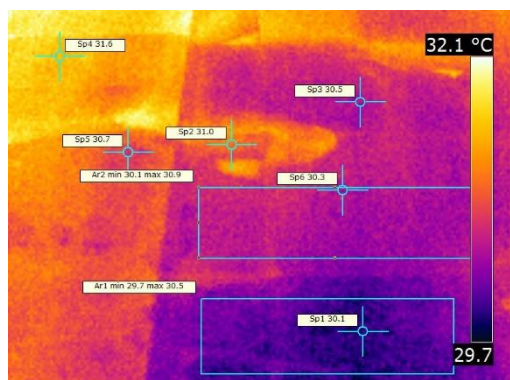
Εικόνα 4.2.2-57

Επιφανειακή φθορά στον τοίχο του σηκού

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-58 παρατηρείται τμήμα από το βόρειο τοίχο του σηκού. Στα σημεία που ενώνονται οι μαρμάρيني λίθου εμφανίζεται απώλεια υλικού με συγκεκριμένη γεωμετρία. Τα κενά έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα θερμοκρασίας 31°C, ενώ η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι 30,3°C. Παράλληλα οι λίθοι εμφανίζουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Αριστερά οι λίθοι είναι θερμότεροι, με θερμοκρασία περίπου 31,6°C, ενώ δεξιά οι λίθοι είναι κατά 1,3°C ψυχρότεροι.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-59 μελετάται καστανέρυθρη επιφάνεια που αποτελεί ίχνος τοιχογραφίας. Αυτή παρουσιάζεται ψυχρότερη περίπου κατά 0,4°C από την επιφάνεια του μαρμάρου. Εντός του πλαισίου διακρίνεται ψυχρότερη περιοχή, χωρίς να εντοπίζεται κάποια διαφορά στην αντίστοιχη εικόνα.

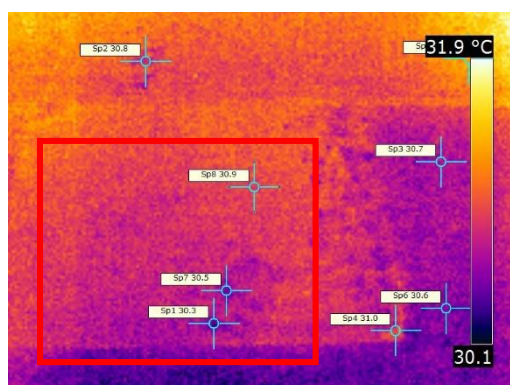
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-60 εμφανίζονται φαιόμαυροι σχηματισμοί, οι οποίοι ίσως να οφείλονται στη βιοδιάβρωση. Οι σχηματισμοί είναι θερμότεροι από το μάρμαρο κατά 0,7°C.



Θερμική εικόνα 4.2.2-58 (5326) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



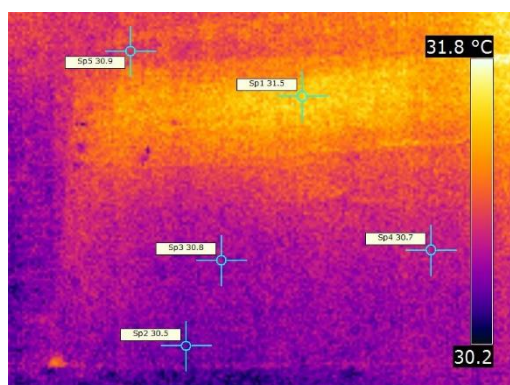
Εικόνα 4.2.2-58



Θερμική εικόνα 4.2.2-59 (5344) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-59



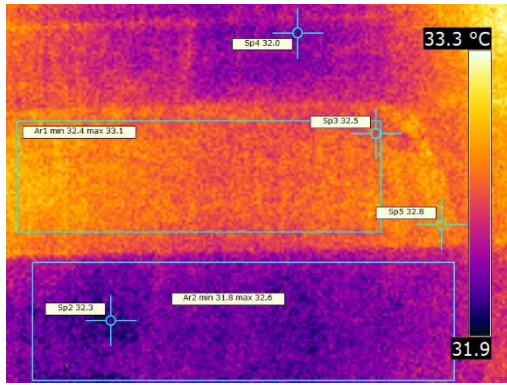
Θερμική εικόνα 4.2.2-60 (5354) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-60

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-61 παρατηρούνται λίθοι με διαφορετική θερμοκρασία, καθώς ο υπερκείμενος λίθος κατά 0,5°C θερμότερος.

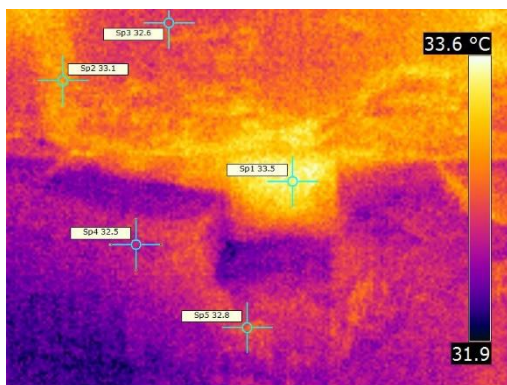
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-62 εμφανίζεται λίθος, του οποίου το γωνιακό τμήμα έχει απομακρυνθεί. Το κενό που δημιουργήθηκε συμπληρώθηκε με κονίαμα το οποίο είναι κατά 1°C θερμότερο από το μάρμαρο.



Θερμική εικόνα 4.2.2-61 (5408) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-61



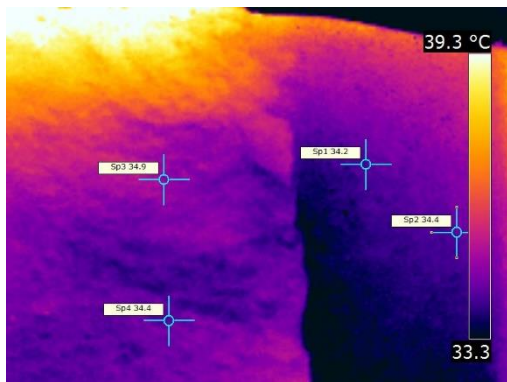
Θερμική εικόνα 4.2.2-62 (5440) 9/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-62

Επιφανειακή φθορά στο κρηπίδωμα

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-63 παρατηρείται ότι έχει χρησιμοποιηθεί κονιάμα για αρμολόγηση μεταξύ δύο πωρόλιθων. Η θερμοκρασία του κονιάματος (34,2°C) είναι σχεδόν 0,7°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του λίθου (34,9°C).

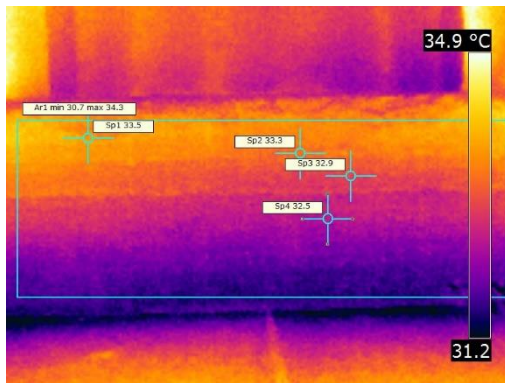


Θερμική εικόνα 4.2.2-63 (4642) 8/7/2015 - Εικόνα 4.2.2-63
ευρυγώνιος φακός



Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-64 παρατηρείται ότι στην επιφάνεια του μαρμάρου έχουν δημιουργηθεί ρηγματώσεις μαύρου χρώματος, οι οποίες εμφανίζουν κατά 0,4°C

χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του μαρμάρου. Οι ρωγμές αυτές ίσως προέρχονται από τη δράση μικροοργανισμών.

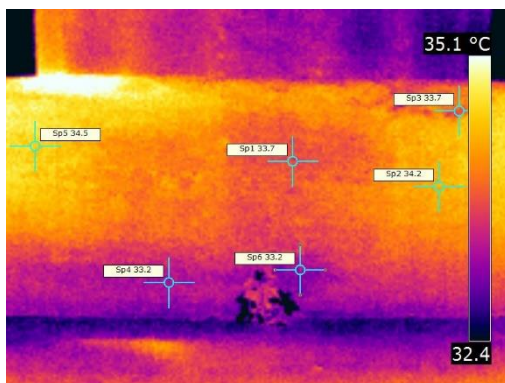


Θερμική εικόνα 4.2.2-64 (4652) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-64

Στην Εικόνα 4.2.2-65 παρατηρείται ότι στην πρώτη βαθμίδα το μάρμαρο είναι καλυμμένο από μία επιφάνεια μαύρης απόχρωσης. Η επιφάνεια αυτή ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα βιοδιάβρωσης. Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-65 φαίνεται ότι στα σημεία που έχει απομακρυνθεί η μαύρη περιοχή η θερμοκρασία είναι σχεδόν 0,5°C χαμηλότερη.



Θερμική εικόνα 4.2.2-65 (4684) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-65

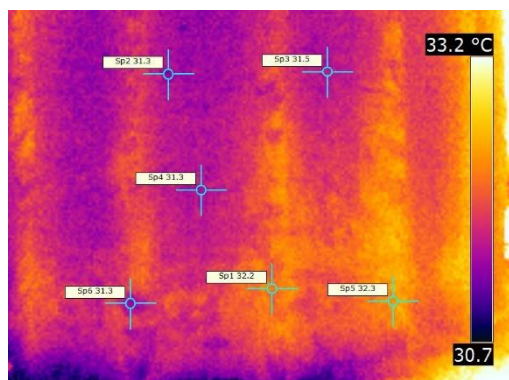
Δυτική όψη

Ο θερμογραφικός έλεγχος για την επιμέρους μελέτη των αρχιτεκτονικών στοιχείων στη δυτική όψη διεξήχθη από τις 07/07/2015 και 08/07/2015 με τον ευρυγώνιο φακό και στις 10/07/2015 με το φακό 25°.

Επιφανειακή φθορά στους κίονες

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-66 παρατηρείται περιοχή πορτοκαλί χροιάς στη βάση ενός κίονα, οποία είναι θερμότερη κατά 0,8°C από την υπόλοιπη επιφάνεια με θερμοκρασία 32,3°C.

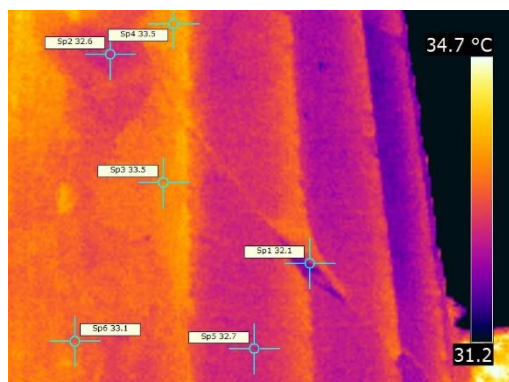
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-67 παρουσιάζεται ρωγμή η οποία έχει συμπληρωθεί με κονίαμα. Η θερμοκρασία του κονιάματος είναι χαμηλότερη από αυτή του μαρμάρου κατά 0,6°C.



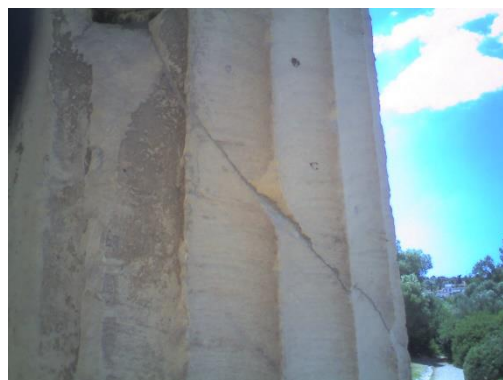
Θερμική εικόνα 4.2.2-66 (4170) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-66



Θερμική εικόνα 4.2.2-67 (4194) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός

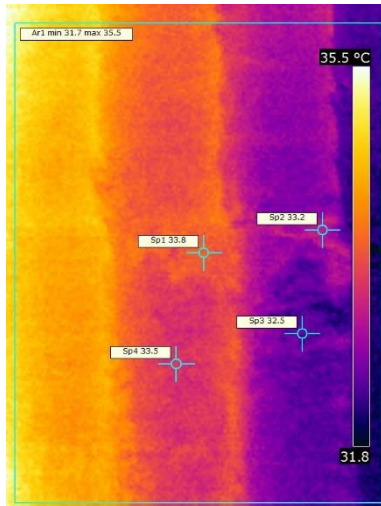


Εικόνα 4.2.2-67

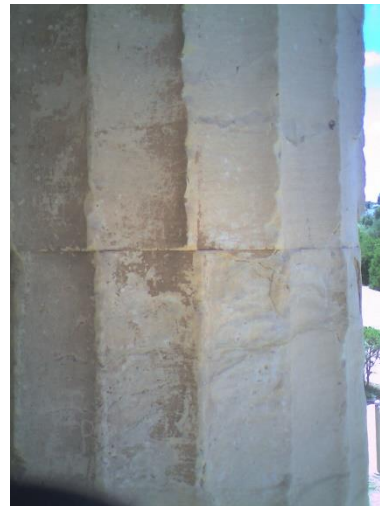
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-68 παρατηρείται καστανή περιοχή στην επιφάνεια του κίονα. Η θερμοκρασία αυτής της περιοχής είναι ίση με 33,8°C, ενώ η γειτονική επιφάνεια έχει θερμοκρασία 33,5°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-69 ελέγχεται μία περιοχή με μεγάλη έκταση φθοράς. Οι ρωγμές και οι μικρορηγματώσεις που έχουν σχηματιστεί έχουν στερεωθεί με κονίαμα, το οποίο όπως φαίνεται στο θερμογράφημα, είναι κατά 0,3°C ψυχρότερο από την επιφάνεια του μαρμάρου.

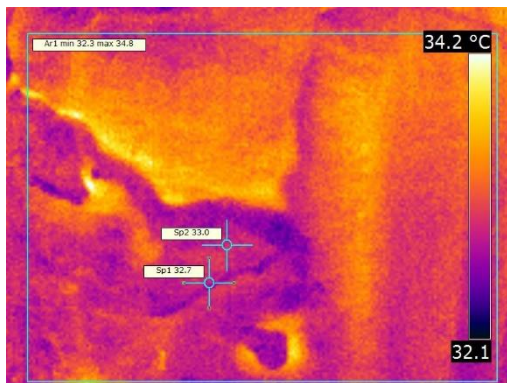
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-70 εξετάζεται περιοχή πορτοκαλί χροιάς. Όπως είναι εμφανές στα σημεία που έχει απομακρυνθεί η πορτοκαλί περιοχή η θερμοκρασία είναι κατά 0,6°C χαμηλότερη.



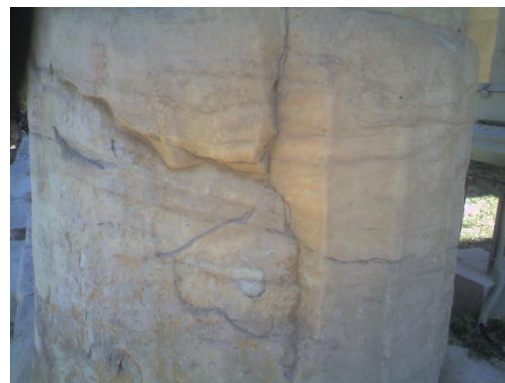
Θερμική εικόνα 4.2.2-68 (4236) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



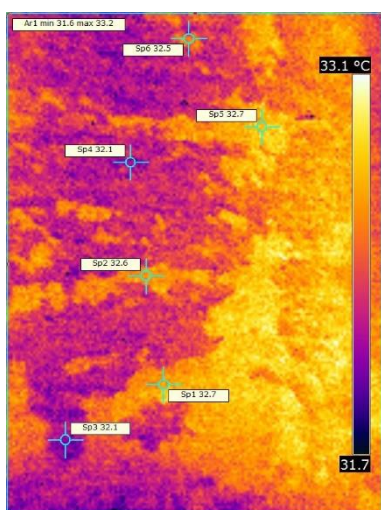
Εικόνα 4.2.2-68



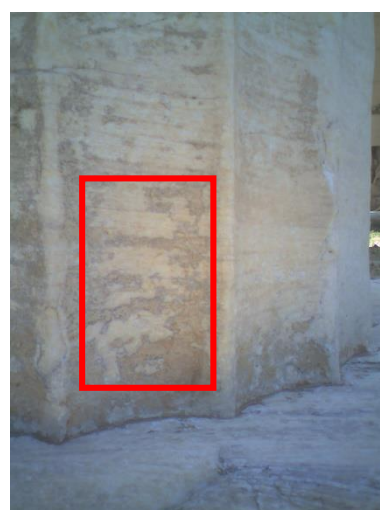
Θερμική εικόνα 4.2.2-69 (4258) 7/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-69



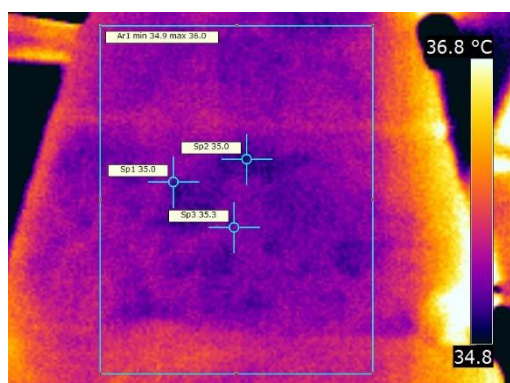
Θερμική εικόνα 4.2.2-70 (6295) 10/7/2015 – φακός 25°



Εικόνα 4.2.2-70

Επιφανειακή φθορά στον τοίχο του σηκού και την εσωτερική ζωφόρο

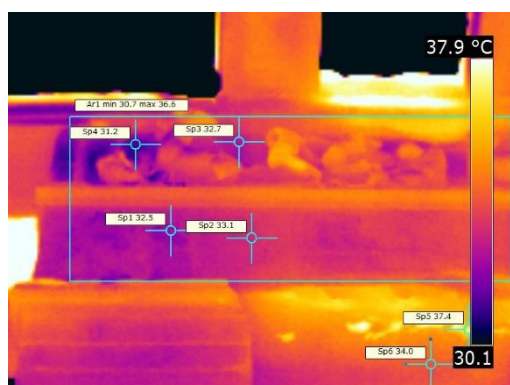
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-71 εξετάζονται ίχνη τοιχογραφίας κόκκινης απόχρωσης, τα οποία εμφανίζονται κατά 0,3°C ψυχρότερα από την επιφάνεια του μαρμάρου.



Θερμική εικόνα 4.2.2-71 (5067) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



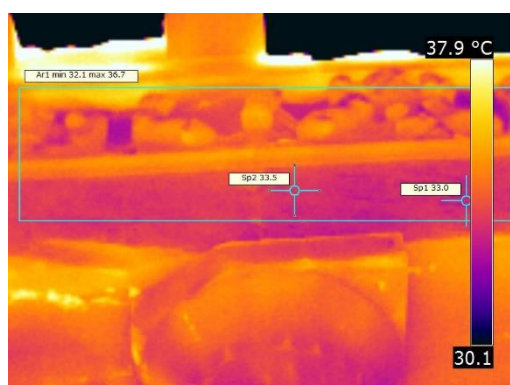
Εικόνα 4.2.2-71



Θερμική εικόνα 4.2.2-72 (5091) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-72



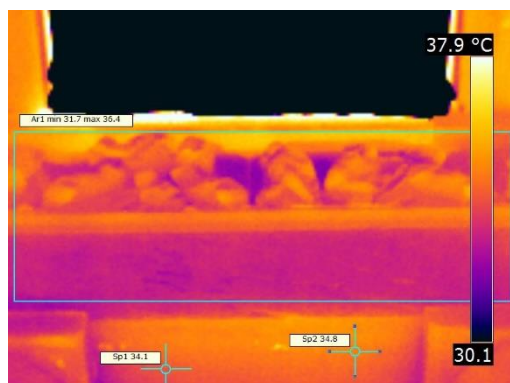
Θερμική εικόνα 4.2.2-73 (5093) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-73

Οι Θερμικές εικόνες 4.2.2-72 έως 4.2.2-75 εξετάζουν την εσωτερική ζωφόρο της δυτικής όψης, η οποία δεν προστατεύεται από την οροφή. Η περιοχή της ζωφόρου παρουσιάζει θερμοκρασίες από 30,7°C έως 37,5°C. Στο επιστύλιο κάτω από τη

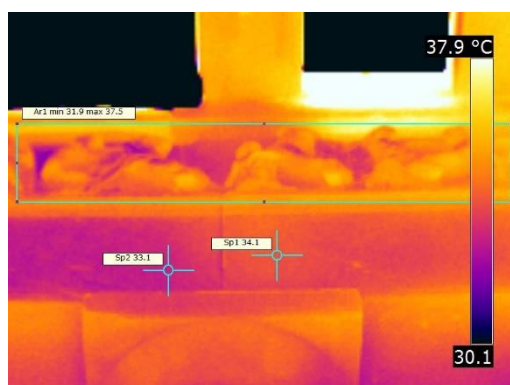
ζωφόρο παρατηρούνται κατά τόπους γκριζες περιοχές, οι οποίες είναι κατά 0,5°C έως 1°C θερμότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου.



Θερμική εικόνα 4.2.2-74 (5095) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-74



Θερμική εικόνα 4.2.2-75 (5097) 8/7/2015 - ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-75

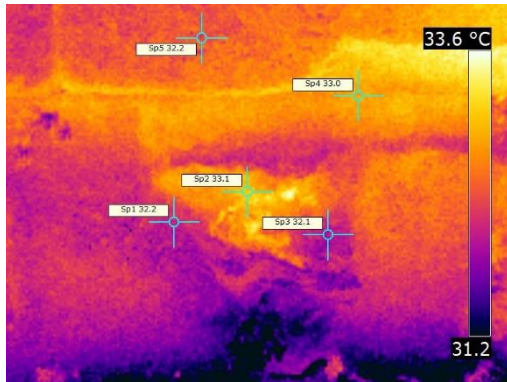
Επιφανειακή φθορά στο κρηπίδωμα

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-76 παρουσιάζεται μία περιοχή στο κρηπίδωμα που έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα τσιμέντου για αρμολόγηση. Η θερμοκρασία του μαρμάρου είναι 33,1°C και η θερμοκρασία του κονιάματος ισούται με 32,1°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-77 έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα τσιμέντου στον αρμό μεταξύ δύο πωρόλιθων. Η θερμοκρασία των λίθων είναι 33,9°C και του κονιάματος είναι 32,3°C.

Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-78 εμφανίζεται γκριζα περιοχή στην πρώτη βαθμίδα, η οποία είναι ψυχρότερη από την επιφάνεια του μαρμάρου.

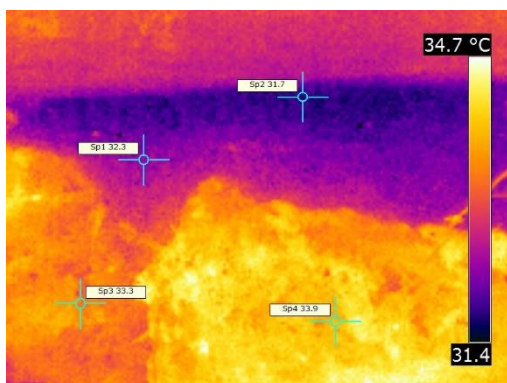
Στη Θερμική εικόνα 4.2.2-79 παρατηρείται περιοχή πορτοκαλί χροιάς πάνω στην επιφάνεια του μαρμάρου, η οποία πιθανώς να σχετίζεται με τη δράση μικροοργανισμών. Η πορτοκαλί περιοχή είναι κατά 0,5°C θερμότερη από την επιφάνεια του μαρμάρου.



Θερμική εικόνα 4.2.2-76 (4876) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



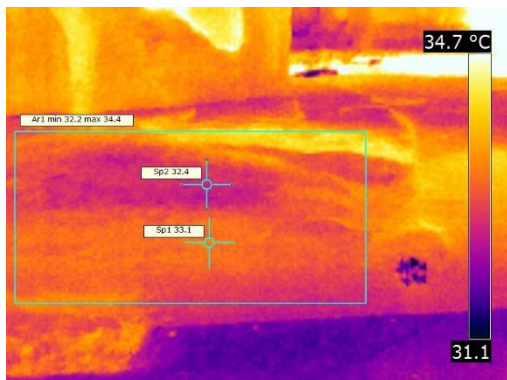
Εικόνα 4.2.2-76



Θερμική εικόνα 4.2.2-77 (4917) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



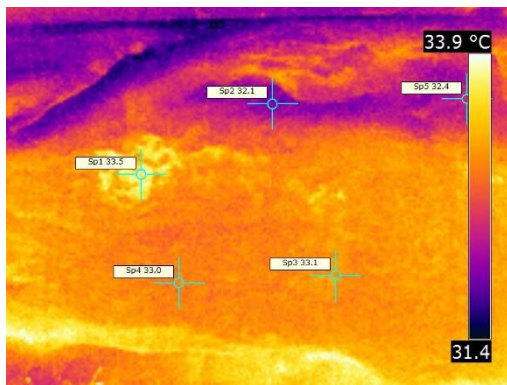
Εικόνα 4.2.2-77



Θερμική εικόνα 4.2.2-78 (4928) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-78



Θερμική εικόνα 4.2.2-79 (4934) 8/7/2015 – ευρυγώνιος φακός



Εικόνα 4.2.2-79

Μερικά συμπεράσματα

Με την εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου για τη μελέτη των επιμέρους αρχιτεκτονικών μελών, ήταν δυνατό να ελεγχθούν επιφάνειες με διαφορετικούς τύπους φθοράς, να εντοπιστούν σπόνδυλοι και μαρμάρيني λίθοι με διαφορετικές θερμοκρασίες και να μελετηθούν οι θερμοκρασίες των κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στους κίονες και στο κρηπίδωμα. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που εντοπίστηκαν μπορεί να οφείλονται είτε στη φθορά των υλικών και τη μεταβολή των ιδιοτήτων τους, είτε στη χρήση διαφορετικών υλικών.

Η επιφανειακή φθορά στο ναό του Ηφαίστου οφείλεται στη συνέργεια ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Στους ενδογενείς παράγοντες ανήκουν οι φλεβώσεις του μαρμάρου που περιέχουν προσμίξεις, οι οποίες όταν εκπλένονται από το νερό της βροχής, απομακρύνονται και δημιουργούν ρηγματώσεις. Στους εξωγενείς παράγοντες συγκαταλέγονται η ατμοσφαιρική ρύπανση, που προκαλεί επιφανειακές κρούστες διαφορετικών αποχρώσεων και υφών, η υγρασία που συμβάλλει δραστικά στην ανάπτυξη της βιοδιάβρωσης, οι κύκλοι θέρμανσης – ψύξης, οι οποίοι προκαλούν θερμική κόπωση στο υλικό και απώλεια συνοχής και οι παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης εξαιτίας της χρήσης ασύμβατων υλικών.

Νότια όψη

Στους κίονες της νότιας όψης ήταν έντονη η παρουσία περιοχών πορτοκαλί απόχρωσης, οι οποίες εμφανίζονταν θερμότερες περίπου κατά 0,5°C από τη θερμοκρασία της κύριας μάζας του μαρμάρου. Η επιδερμίδα του μαρμάρου σε πολλές περιπτώσεις είχε απομακρυνθεί κατά τόπους, με αποτέλεσμα το σχηματισμό λευκών περιοχών με ζαχαροειδή φθορά. Οι περιοχές αυτές ήταν σχεδόν κατά 1°C ψυχρότερες από την επιδερμίδα του μαρμάρου. Συχνή ήταν και η παρουσία φλεβώσεων, που εμφανίζονταν στα θερμογραφήματα θερμότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου. Στις περιπτώσεις που οι προσμίξεις είχαν εκπλυθεί παρατηρούνται μικρορηγματώσεις, οι οποίες τις περισσότερες φορές είχαν συμπληρωθεί με κονίαμα. Το κονίαμα συμπλήρωσης ήταν ψυχρότερο κατά περίπου

0,5°C από την επιφάνεια των κιώνων. Κυρίως στις εξωτερικές όψεις των κιώνων διακρίνονταν ανάγλυφες καστανές περιοχές, οι οποίες στις θερμικές εικόνες εμφανίζονταν κατά 1°C ψυχρότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου. Στις εσωτερικές πλευρές των κιώνων που προστατεύονται από το νερό της βροχής παρατηρούνταν περιοχές μαύρων επικαθίσεων. Οι περιοχές αυτές ήταν θερμότερες κατά 0,5°C έως 0,7°C από την κύρια μάζα του μαρμάρου. Παράλληλα εντοπίστηκαν σπόνδυλοι, που ήταν κατά 0,5°C ψυχρότεροι από τους υπόλοιπους.

Στο κρηπίδωμα διακρίνονταν μαύρες και πορτοκαλί επιφάνειες που πιθανώς να προέκυψαν από συνέργεια παραγόντων φθοράς, όπως η βιοδιάβρωση και οι επικαθίσεις. Οι μαύρες περιοχές του κρηπιδώματος ήταν θερμότερες από τις υπόλοιπες. Επιπλέον στην επιφάνεια του μαρμάρου παρατηρούνταν μικρορηγματώσεις μαύρης απόχρωσης, οι οποίες εμφανίζονταν στα θερμογραφήματα θερμότερες από την υγιή επιφάνεια του μαρμάρου. Για αρμολόγηση χρησιμοποιήθηκε κονίαμα τσιμέντου που εμφανίζεται θερμότερο από τις επιφάνειες των μαρμάρων και των πωρόλιθων.

Ανατολική όψη

Στην ανατολική όψη ήταν επίσης έντονη η παρουσία φλεβώσεων οι οποίες εμφανίζονταν κατά 0,5°C θερμότερες από τις διπλάνες επιφάνειες του μαρμάρου. Κατά τόπους στην επιφάνεια των κιώνων παρατηρούνται τμήματα ζαχαροειδούς φθοράς που είναι κατά 0,5°C ψυχρότερα από την επιδερμίδα του μαρμάρου. Οι μαύρες επικαθίσεις στις προστατευμένες περιοχές εμφανίζονται θερμότερες κατά 0,5°C. Τα κονιάματα συμπλήρωσης των μικρορηγματώσεων είναι θερμότερα από την κύρια μάζα των κιώνων. Επιπλέον παρατηρήθηκαν καστανές περιοχές που ήταν θερμότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου.

Στο κρηπίδωμα παρατηρήθηκαν γκρίζες επιφάνειες με υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του μαρμάρου. Αυτές οι επιφάνειες πιθανώς να οφείλονται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών. Το κονίαμα που έχει χρησιμοποιηθεί στους αρμούς μεταξύ των λίθων παρουσιάζει όμοια θερμοκρασία με αυτούς.

Βόρεια όψη

Στη βόρεια όψη είναι έντονη η παρουσία μικρορηγματώσεων και βελοειδούς φθοράς, που ίσως προκλήθηκαν και από την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Οι οπές και οι ρηγματώσεις έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα, το οποίο παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία από των κιώνων. Παράλληλα εμφανίζονται περιοχές πορτοκαλί χροιάς με χαμηλότερη θερμοκρασία. Στην επιφάνεια του μαρμάρου παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί μαύροι σχηματισμοί που εμφανίζονται ψυχρότεροι από την κύρια μάζα του κίονα.

Το κρηπίδωμα είναι σχεδόν πλήρως καλυμμένο από μαύρη επιφάνεια, πιθανώς εξαιτίας της ανάπτυξης βιοδιάβρωσης. Η επιφάνεια αυτή είναι θερμότερη από τις λευκές περιοχές του μαρμάρου. Τα κονιάματα στους αρμούς εμφανίζουν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές από τους λίθους.

Δυτική όψη

Στη δυτική όψη παρατηρούνται κατά μήκος των ραβδώσεων των κιόνων πορτοκαλί περιοχές, οι οποίες είναι θερμότερες από την υπόλοιπη επιφάνειά τους. Οι μικρορηγματώσεις έχουν συμπληρωθεί με κονίαμα, που εμφανίζει χαμηλότερη θερμοκρασία από το μάρμαρο. Τα ίχνη της τοιχογραφίας που διακρίνονται παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του τοίχου. Στην εσωτερική ζωφόρο η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη θερμοκρασία είναι 7°C.

Στο κρηπίδωμα εντοπίζονται πορτοκαλί περιοχές με υψηλότερη θερμοκρασία από του μαρμάρου. Επιπλέον το κονίαμα που έχει χρησιμοποιηθεί στους αρμούς είναι κατά 1°C ψυχρότερο από τους πωρόλιθους.

5. Τελικά συμπεράσματα – Προοπτικές

Σε αυτή την ερευνητική εργασία εφαρμόστηκε η μη καταστρεπτική τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας στο ναό του Ηφαίστου. Οι βασικοί άξονες μελέτης είναι οι εξής:

- η εκτίμηση της επίδρασης των σημαντικότερων παραμέτρων που επιδρούν στα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας, σε μία προσπάθεια προτυποποίησης της μεθόδου
- και η αξιολόγηση της συμβολής της μεθόδου στον έλεγχο του είδους και της έκτασης των επιφανειακών φθορών στο αρχαίο μάρμαρο.

Για το λόγω αυτό πραγματοποιήθηκε θερμογραφικός έλεγχος του μνημείου από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον Ιούλιο του 2015. Οι παράμετροι, των οποίων η επίδραση εξετάστηκε χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- περιβαλλοντικές παράμετροι (ατμοσφαιρική θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου)
- παράμετροι που σχετίζονται με το ίδιο του κτίριο (υλικά, γεωμετρία, μικροκλίμα)
- παράμετροι που σχετίζονται με τη λήψη των θερμικών εικόνων (ώρα, γωνία, απόσταση),

Έτσι πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά εποχές και σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες, π.χ. με ισχυρή και ασθενή ηλιοφάνεια, με υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Καθώς είναι γνωστό ότι τα υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασία και οι ισχυροί άνεμοι αλλοιώνουν τα αποτελέσματα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε μέρες που η σχετική υγρασία ήταν περίπου 50% και η ταχύτητα του ανέμου χαμηλότερη από 2 μποφόρ.

Από το διαφορετικό ύψος του ήλιου μέσα στο χρόνο μελετάται και η επιρροή της γεωμετρίας του κτιρίου στα αποτελέσματα, εφόσον δημιουργούνται διαφορετικές σκιάσεις το χειμώνα και το καλοκαίρι, ενώ η επίδραση του μικροκλίματος εξετάστηκε με τη σάρωση όλων των όψεων του μνημείου κάθε εποχή. Επιπλέον το γεγονός ότι το κτίριο αποτελείται κυρίως από ένα υλικό, καθιστά ευκολότερη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Για να μελετηθεί η επίδραση των παραγόντων που σχετίζονται με τη λήψη εφαρμόστηκε η υπέρυθρη θερμογραφία σε διαφορετικές αποστάσεις και διαφορετικές ώρες μέσα στη μέρα. Οι θερμικές εικόνες πρέπει να λαμβάνονται κάθετα σε σχέση με την επιφάνεια ελέγχου, ωστόσο στις περιπτώσεις που δεν υπήρχε η δυνατότητα αυτή, έγινε λήψη θερμογραφήμάτων υπό γωνία.

Από τον παραμετρικό έλεγχο διαπιστώθηκε ότι:

- Το περιβάλλον ανταλλάσσει θερμότητα με το μνημείο με τους μηχανισμούς της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Ο ατμοσφαιρικός αέρας ανταλλάσσει θερμότητα με την επιφάνεια του μαρμάρου με συναγωγή. Ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από τη διαφορά της επιφανειακής θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τις μέρες που ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς είναι η συναγωγή (δηλαδή είναι ασθενής η ηλιοφάνεια), η επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου είναι σχεδόν ίση με αυτή της ατμόσφαιρας, αντίθετα τις ημέρες με υψηλή ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας καταγράφονται σημαντικές διαφορές της επιφανειακής θερμοκρασίας του μαρμάρου από την ατμοσφαιρική, διότι μεταφέρεται θερμότητα και μέσω ακτινοβολίας. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη μεταβολή των θερμοκρασιών είναι τόσο έντονη που διαπιστώνονται σε κάθε κίονα θερμοκρασιακές μεταβολές της τάξης των 10°C εξαιτίας της ανομοιόμορφης ακτινοβολήσης των πλευρών.
- Η γεωμετρία του κτιρίου επηρεάζει τα αποτελέσματα του θερμογραφικού ελέγχου, προκαλώντας τοπικά εντονότερα φαινόμενα ανάκλασης, όπως στις ανατολικές γωνίες που σχηματίζουν οι σπόνδυλοι με το κρηπίδωμα και τα κιονόκρανα. Ταυτόχρονα δημιουργούνται και σκιάσεις ανάλογα με τη θέση του ήλιου.
- Από το θερμοκρασιακό έλεγχο των όψεων μελετήθηκε η επίδραση του μικροκλίματος. Το φθινόπωρο και το χειμώνα η νότια και η ανατολική όψη, που ακτινοβολούνται περισσότερο, παρουσιάζουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από τη βόρεια και τη δυτική. Αντίθετα την άνοιξη και το καλοκαίρι η νότια, η βόρεια και η δυτική όψη εμφάνισαν μικρές διαφορές στη θερμοκρασία, ενώ η ανατολική ήταν θερμότερη εξαιτίας της ακτινοβολίας του ήλιου. Επειδή μετά την εαρινή ισημερία αυξάνεται το ύψος του ήλιου, ακτινοβολούνται περισσότερο η βόρεια και η δυτική όψη με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μέση επιφανειακή θερμοκρασία τους. Τις ημέρες με ασθενή ηλιοφάνεια οι θερμοκρασίες των όψεων είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους και με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Η ώρα του θερμογραφικού ελέγχου είναι εξίσου σημαντική. Καθώς ο ήλιος μετακινείται από την ανατολή στη δύση, μετατοπίζονται οι θερμότερες περιοχές του μνημείου, από την ανατολική όψη στη νότια. Αξιόλογες πληροφορίες θα παρείχε και η σάρωση του μνημείου μετά τη δύση του ήλιου, ωστόσο ο χώρος δεν ήταν προσβάσιμος εκείνες τις ώρες.
- Στις θερμικές εικόνες που λαμβάνονται από μικρές αποστάσεις καταγράφονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, επειδή όσο αυξάνεται η απόσταση αυξάνεται και η ποσότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που απορροφάται από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας.

- Σε διαδοχικές ημέρες με σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες δεν παρατηρούνται έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Από τη μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας επιφανειών μέσα στο χρόνο και από τις θερμοκρασιακές διαφορές που αναπτύσσονται στα αρχιτεκτονικά μέλη διαπιστώνεται η ένταση του φαινομένου της θερμικής κόπωσης, που σχετίζεται άμεσα με την επιφανειακή φθορά.

Για την εξέταση της επιφανειακής φθοράς στο μνημείο λήφθηκαν θερμικές εικόνες από κοντινές αποστάσεις τον Μάιο και τον Ιούλιο του 2015. Μάλιστα τα αποτελέσματα της θερμογραφίας παρουσίαζαν επαναληψιμότητα.

Η επιφανειακή φθορά του μαρμάρου οφείλεται στη συνέργεια ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Στους ενδογενείς παράγοντες ανήκουν οι φλεβώσεις, οι οποίες περιέχουν προσμίξεις. Όταν εκπλένονται οι προσμίξεις από το νερό της βροχής προκαλούνται μικρορηγματώσεις. Οι εξωγενείς παράγοντες φθοράς είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση που οδηγεί στο σχηματισμό επιφανειών διαφορετικών αποχρώσεων και υφών, η υγρασία που μέσω της βροχής προκαλεί την απόπλυση των επιφανειών και την απομείωση των λεπτομερειών, ενώ συμβάλει δραστικά και στην ανάπτυξη της βιοδιάβρωσης και οι κύκλοι θέρμανσης – ψύξης οι οποίοι προξενούν θερμική κόπωση στο υλικό. Τέλος, οι ασύμβατες επεμβάσεις συντήρησης μπορούν να προκαλέσουν απώλεια συνοχής.

Με την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας για την εξέταση των επιμέρους αρχιτεκτονικών μελών, ελέγχθηκαν επιφάνειες με διαφορετικούς τύπους φθοράς, σπόνδυλοι και μαρμάρيني λίθοι με διαφορετικές θερμοκρασίες και μελετήθηκαν κονιάματα που είχαν χρησιμοποιηθεί στους κίονες και το κρηπίδωμα. Σε όλη την επιφάνεια του μνημείου παρατηρούνται φλεβώσεις, οι οποίες αποδίδονται με υψηλότερες θερμοκρασίες. Όταν οι προσμίξεις έχουν απομακρυνθεί, σχηματίζονται μικρορηγματώσεις, που συχνά συμπληρώνονται με κονίαμα. Το κονίαμα αυτό εμφανίζεται ψυχρότερο από την κύρια μάζα του μαρμάρου. Έντονη είναι και η παρουσία πορτοκαλί επιφανειών και πορτοκαλοκάστανων περιοχών με έντονο ανάγλυφο. Οι πρώτες εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες και οι δεύτερες χαμηλότερες από την επιφάνεια του μαρμάρου. Στα τμήματα του μνημείου που προστατεύονται από το νερό της βροχής έχουν σχηματιστεί μαύρες επικαθίσεις, οι οποίες στις θερμικές εικόνες αποδίδονται με υψηλότερη θερμοκρασία. Σε αρκετές περιοχές κατά τόπους έχει απομακρυνθεί η επιδερμίδα του μαρμάρου και εντοπίζονται τμήματα με ζαχαροειδή φθορά, που είναι ψυχρότερα από την επιδερμίδα. Έντονη είναι και η παρουσία φαιόμαυρων περιοχών που πιθανώς να σχετίζονται με τη βιολογική φθορά στη βόρεια όψη και εμφανίζονται θερμότερες. Στη ίδια όψη παρατηρείται και βελονοειδής διάβρωση που πιθανώς να σχηματίζεται από τη συνέργεια παραγόντων φθοράς (π.χ. βιοδιάβρωση). Στον τοίχο του σηκού διακρίνονται ίχνη από δύο τοιχογραφίες, οι οποίες πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Τέλος, στο κρηπίδωμα έχει εφαρμοστεί κονίαμα (πιθανότατα

τσιμεντιτικής σύστασης) για αρμολόγηση, το οποίο ανάλογα με την έκθεση στην ακτινοβολία εμφανίζει υψηλότερη ή σχεδόν ίση θερμοκρασία με αυτή των μαρμάρων.

Τελικά, αποδεικνύεται ότι η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μία πολύ χρήσιμη μέθοδος για την παρακολούθηση των θερμοκρασιακών μεταβολών του μαρμάρου σε μία προσπάθεια προτυποποίησής της, ενώ είναι καθοριστική και η συμβολή της στη διαγνωστική μελέτη της επιφανειακής φθοράς.

Προοπτικές

Προκειμένου να αποκτήσουμε μία περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση διατήρησης του ναού του Ηφαίστου:

- Είναι απαραίτητη η μικροδειγματοληψία από αντιπροσωπευτικές επιφάνειες φθοράς, ώστε να μελετηθεί η ακριβής σύστασή τους.
- Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η μαθηματική μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στην κλίμακα του μνημείου και ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων.
- Χρειάζονται να διερευνηθούν περαιτέρω οι επιφάνειες των τοιχογραφιών και των αρχιτεκτονικών μελών με μη καταστρεπτικές μεθόδους.
- Τέλος, αναγκαίος είναι και ο έλεγχος της κατάστασης διατήρησης των γλυπτών στη δυτική και ανατολική ιωνική ζωφόρο.

Βιβλιογραφία

1. **Α. Κορωναίος, Γ.Ι. Πουλάκος.** *Τεχνικά Υλικά.* Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2006. Τόμ. 4.
2. **Σκουλικίδης, Θ.Ν.** *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων.* Ηράκλειο : Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 2000. σσ. 20-23, 137-195.
3. **Α. Μοροπούλου, Γ. Μπατής.** *Δομικά υλικά .* Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2012.
4. **Δάβη, Ε.Ν.** *Πετρολογία.* Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
5. **Δελέγκου, Α.** *Διδακτορική διατριβή: " Κριτήρια & μεθοδολογία αποτίμησης υλικών & στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες επιφάνεις μνημείων".* Αθήνα : s.n., 2011.
6. **Τσιραμπίδης, Α.Ε.** *Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα.* Θεσσαλονίκη : University studio press, 1996.
7. **Σ.Η. Σαπουντζής, Θ.Γ. Χριστοφορίδης.** *Ορυκτολοδιαγνωστική.* s.l. : University Studio Press, 1985.
8. **Α. Μοροπούλου, Κ. Bisbikou, Κ. Torfs, R. Van Grieken, F. Zezza, F. Macri.** Oring and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. *Atmospheric Environment.* 1998, 32.
9. **Jorge Sanjurjo-Sánchez, Carlos Alves.** Pollutant-Induced Decay of Building Materials. [συγγρ. βιβλίου] E. Lichtfouse et al. *Remediation of Air and Water Pollution.* s.l. : Springer, 2012.
10. **Α. Μοροπούλου, Κ. Labropoulos, Α. Konstanti, Κ. Roumpopoulos, Α. Bakolas, Ρ. Michailidis.** Susceptibility of buiding stones to environmental loads: Evaluation, performance, repair strategies. [συγγρ. βιβλίου] S.Κ. Kourkoulis. *Fracture and Failure of Natural Building Stones.* s.l. : Springer, 2006.
11. **R. Buginia, M. Laurenzi Tabasso, M. Realinia.** Rate of formation of black crusts on marble. A case study. *Journal of Cultural Heritage.* 2000, 1.
12. **Á. Török, T. Licha, K. Simon, S. Siegesmund.** Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation. *Environ Earth Sci.* 2011.
13. **Ruwim Berkowitz, Finn Palmgren, Ole Hertel, Elisabetta Vignati.** Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality - meterological analysis and model calculations. *The Science of the Total Environment.* Elsevier, 1996, 189.
14. **N.L. Gilberta, S. Woodhouse, D.M. Stieb, J.R. Brook.** Ambient nitrogen dioxide and distance from a major highway. *Science of The Total Environment.* 2003, 312.
15. **Olga V. Taseiko, Sergey V. Mikhailuta, Anne Pitt, Anatoly A. Lezhenin, Yuri V. Zakharov.** Air pollution dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment.* Elsevier, 2009, 43.
16. **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.* 2012, 37.

17. **D. Camuffo, M. Del Monte, C. Sabbioni, O. Vittori.** Wetting deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmospheric Environment*. 1981, 16.
18. **A. Moropoulou, E.T. Delegou, V. Vlahakis, E. Karaviti.** Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces. *Materials Characterization*. 2007, 58.
19. **Th. Warscheid, J. Braams.** Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Elsevier, 2000, 46.
20. **G. Amoroso, V. Fassina.** Wet and dry deposition of air pollutants on stone and the formation of black scabs. *Stone decay and conservation* . Elsevier, 1983.
21. **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, 40.
22. **P. Maravelaki-Kalaitzaki, D. Anglos, V. Kilikoglou, V. Zafiropulos.** Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*. Elsevier, 2001, 56.
23. **Sabbioni, Cristina.** Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers. *The Science of the Total Environment*. Elsevier, 1995, 167.
24. **Maravelaki-Kalaitzaki, P.** Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin. *Analytica Chimica Acta*. 2005, 58.
25. **A. Μαρέτση, Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Α. Μοροπούλου.** Διπλωματική εργασία: Διάγνωση της φθοράς διακοσμητικής αρχιτεκτονικής επιφάνειας της πρόσοψης του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως. Αθήνα : s.n., 2014.
26. **T. Skoulikidis, P. Vassiliou, K. Tsakona.** Surface Consolidation of Pentelic Marble. Criteria for the selection of methods and materials. The Acropolis case. *Environ Sci & Pollut Res*. 2005, 12.
27. **Nahon, D.B.** *Introduction to the petrology of soils and chemical weathering*. New York : John Wiley, 1991.
28. **Verges-Belmin, V.** Pseudomorphism of gypsum after calcite, a new textural feature accounting for the marble sulfation mechanism. *Atmospheric Environment*. Pergamon, 1994, 28.
29. **Patriarchate, Conservation Department Israel Antiquities Authority and The Technical Office Greek Orthodox.** *Conservation of the bell tower of the Holy Sepulchre Jerusalem-Final Report*. Jerusalem : s.n., 2001 - 2003.
30. **C. Sabbioni, G. Zappia.** Oxalate patinas on ancient monuments: the biological hypothesis. *Aerobiologia*. Springer, 1991, 7.
31. **Fassina, V.** New findings on past treatments carried out on stone and marble monuments' surfaces. *Science of The Total Environment*. 1995, 167.

32. **M. Garcia-Vallès, M. Vendrell-Saz, J. Molera, F. Blazquez.** Interaction of rock and atmosphere: patinas on Mediterranean monuments. *Environmental Geology*. Springer, 1998, 36.
33. **A. Danin, G. Caneva.** Deterioration of limestone walls in Jerusalem and marble monuments in Rome caused by cyanobacteria and cyanophilous lichens. *International Biodeterioration*. 1990, 20.
34. **J. Martín-Gil, F.J. Martín-Gil, M. del Carmen 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, 12.
35. **A. Moropoulou, Th. Tsiourva, K. Bisbikou, V. Tsantila, G. Biscontin, G. Longega, M. Groggia, E. Dalaklis, A. Petritaki.** Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the center of Athens. *Building and Environment*. 2002, 37.
36. **H. Siedel, S. Siegesmund.** Characterisation of stone deterioration on buildings. [συγγρ. βιβλίου] R. Snethlage S. Siegesmund. *Stone in architecture*. s.l. : Springer, 2011, σσ. 347-410.
37. **E. Sassoni, E. Franzoni.** Sugaring marble in the Monumental Cemetery in Bologna (Italy): characterization of naturally and artificially weathered samples and first results of consolidation by hydroxyapatite. *Applied Physics A*. 2014, 117, σσ. 1893-1906.
38. **Trinkley, M.** Marble and its deteriorations. *AGS Quarterly*. 2013, 37, σσ. 1-24.
39. **M.A. de la Torre, G. Gomez-Alarcon, P. Melgarejo, C. Saiz-Jimenez.** Fungi in weathered sandstone from Salamanca cathedral, Spain. *The Science of the Total Environment*. Elsevier, 1991, 107.
40. **M.A. de la Torre, G. Gomez - Alarcon, C. Vizcaino, M.T. Garcia.** Biochemical mechanisms of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. *Biogeochemistry*. Kluwer Academic Publishers, 1993, 19.
41. **C.C. Gaylard, L.H. Glyn Morton.** Deteriogenic biofilms on buildings and their control: A Review. *Biofouling*. 1999, 14.
42. **E. Diakumaku, A.A. Gorbushina, W.E. Krumbein, L. Panina, S. Soukharjevski.** Black fungi in marble and limestones - an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments. *The Science of the Total Environment*. Elsevier, 1995, 167.
43. **Parisa Mohammadi, Wolfgang E. Krumbein.** Biodeterioration of ancient stone materials from the Persepolis monuments (Iran). *Aerobiologia* . Springer, 2008, 24.
44. **J.J. Ortega-Calvo, M. Hernandez-Marine, C. Saiz-Jimenez.** Biodeterioration of building materials by cyanobacteria and algae. *International Biodeterioration*. 1991, 28.
45. **C. Gaylarde, M. Ribas Silva, Th. Warscheid.** Microbial impact on building materials: an overview. *Materials and Structures*. Rilem, 2003, 36.
46. **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.

47. **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, 25.
48. **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*. 1993, 11.
49. **J. Mandl, A. Grauer, G. Neuberg.** Solubilization of insoluble matter in nature. II. The part played by salts of organic and inorganic acids occurring in nature. *Biochemica et Biophysica Acta*. Elsevier, 1953, 10.
50. **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, 28.
51. **T.W. Becker, W.E. Krumbein, Th. Warscheid, M.A. Resende.** Investigations into Microbiology. [συγγρ. βιβλίου] H.K. Bianchi. *Investigations into devices against Environmental Attack on Stones*. 1994.
52. **Keller, W.D.** *Principles of chemical weathering*. Columbia, Missouri : Lucas Brothers Publishers, 1957.
53. **E.B. Sohalscha, H. Appelt, A. Schatz.** Chelation as a weathering mechanism—I. Effect of complexing agents on the solubilization of iron from minerals and granodiorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Elsevier, 1967, 31.
54. **M.E.K. Henderson, R.B. Duff.** The release of metallic and silicate ions from minerals, rocks and soils by fungal activity. *Journal of Soil Science*. 1963, 14.
55. **M.A. de la Torre, G. Gomez-Alarcon.** Manganese and iron oxidation by fungi isolated from building stone. *Microbial Ecology*. Springer, 1994, 27.
56. **W.G. Characklis, K.E. Cooksey.** Biofilm and microbial fouling. [συγγρ. βιβλίου] Allen I. Laskin. *Advances in applied microbiology*. New York : Academic Press, 1983.
57. **E. Zanardini, P. Abbruscato, L. Scaramelli, E. Onelli, M. Realini, G. Patrignani, C. Sorlini.** Red stains on carrara marble: A case study of the Certosa of Pavia, Italy. [συγγρ. βιβλίου] Victoria H. Koestler, A. Elena Charola, Fernando E. Nieto-Fernandez Robert J. Koestler. *Art, Biology, and Conservation: Biodeterioration of Works of Art*. New York : The Metropolitan Museum of Art, 2003.
58. **A. Kyrilili, P.A. Fokaidis, P. Christou, S.A. Kalogirou.** Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*. 2014, 134, σσ. 531-549.
59. **A. Moropoulou, K.C. Labropoulos, E.T. Delegou, M. Karoglou, A. Bakolas.** Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*. 2013, 48, σσ. 1222-1239.
60. **J.P. Balayssac, S. Laurens, G. Arliguie, D. Breyse, V. Garnier, X. Dérobert, B. Piwakowski.** Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods. *Construction and Building Materials*. 2012, 35, σσ. 131-138.

61. **Μοροπούλου, Α.** Έλεγχος ποιότητας δομικών υλικών και έργων. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2012. σσ. 108-113.
62. **E. Barreira, V.P. de Freitas, J.M.P.Q. Delgado, N.N.M. Ramos.** Thermography applications in the study of buildings hygrothermal behaviour. [συγγρ. βιβλίου] R.V. Prakash. *Infrared thermography*. Rijeka : InTech, 2012, σσ. 171-192.
63. **FLIR Systems.** *Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications*. s.l. : FLIR Systems, 2011. σσ. 8-9.
64. —. *User's manual FLIR K-Series*. Wilsonville : FLIR Systems, 2014. σσ. 41-43.
65. **Δ.Ι. Ασημακόπουλος, Β.Ι. Λυγερού, Γ.Α. Αραμπατζής.** Μεταφορά Θερμότητας. Αθήνα : Παπασωτηρίου, 2009. σσ. 387-446.
66. **T. Astarita, G.M. Carlomagno.** *Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics*. Napoli : Springer, 2013. σσ. 5-48.
67. **Μοροπούλου, Α.** Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων & μη καταστρεπτικών τεχνικών. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2012. σσ. 403-415.
68. **C. Ibarra-Castanedo, X.P.V. Maldague.** Infrared thermography. [συγγρ. βιβλίου] H. Czichos. *Handbook of technical diagnostics*. Berlin : Springer, 2013, σσ. 175-216.
69. **P.A. Fokaides, S.A. Kalogirou.** Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*. 2011, 88, σσ. 4358-4365.
70. **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.
71. **N.P. Avdelidis, A. Moropoulou.** Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*. 2004, 5, σσ. 119-127.
72. **B. Lehmann, K. Ghazi Wakili, Th. Frank, B. Vera Collado, Ch. Tanner.** Effects on individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*. 2013, 110, σσ. 29-43.
73. **J.L. Lerma, M. Cabrelles, C. Portalés.** Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. *Construction and Building Materials*. 2011, 25, σσ. 2190-2197.
74. **D. Sidiropoulou-Velidou, A. Georgopoulos, J.L. Lerma.** Exploitation of thermal imagery for the detection of pathologies in monuments. *4th International Conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29 –November 3, 2012, Proceedings*. 2012, σσ. 97-108.
75. **E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti.** Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*. 2002, 3, σσ. 21-29.
76. **P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, E. Cheilakou, M. Kouli.** Quantitative analysis of plastered mosaics by means of active infrared thermography. *Construction and Building Materials*. 2014, 73, σσ. 417-425.

77. **A. Moropoulou, A. Bakolas, M. Karoglou, E. T. Delegou, K.C. Labropoulos, N.S. Katsiotis.** Diagnostics and protection of Hagia Sophia mosaics. *Journal of Cultural Heritage*. 2013, 14S, σσ. 133-139.
78. **J.L. Bodnar, J.C. Candore, J.L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, J.M. Vallet.** Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT&E International*. 2012, 49, σσ. 40-46.
79. **P. Bison, F. Clarelli, A. Vannozzi.** Pulsed thermography for depth profiling in marble sulfation. *International Journal of Thermophysics*. 2014.
80. **B.B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, J. Philip.** Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology*. 2012, 55, σσ. 221-235.
81. **Amalu, W.C.** Breast thermography. [Ηλεκτρονικό] 2012. [Παραπομπή: 24 September 2015.] http://www.breastthermography.com/case_studies.htm.
82. **Szokolay, S.V.** *Introduction to architectural science: The basis to sustainable design*. 2. Oxford : Elsevier, 2008.
83. **J.A. Palyvos.** A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2008, 28.
84. **T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet.** Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*. 2011, 52.
85. **Β. Λαμπρόπουλος, Χ. Βομβογιάννη.** Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά: μορφές φθορών και προτάσεις προστασίας. *Αρχαιολογία & τέχνες*. 73.
86. **Camp, John.** *Η Αρχαία Αγορά της Αθήνας. Οι ανασκαφές στην καρδιά της κλασικής πόλης*. Αθήνα : Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 2004.
87. **Tompson, H.A.** Excavations in the Athenian Agora: 1953. *Hesperia*. 1954.
88. **W.F. Wyatt, C.N. Edmonson.** The ceiling of the Hephaisteion. *American Journal of Archeology*. 1984, 88.
89. **Morgan, C.H.** The sculptures of Hephaisteion I. *Hesperia* . 1962.
90. **Thompson, H.A.** The pedimental sculpture of the Hephaisteion. *Hesperia*. 1949.
91. **Stevens, G.P.** Some remarks upon the interior of the Hephaisteion. *Hesperia*. 1950.
92. **Dinsmoor, W.B.** Observations on the Hephaisteion. *Hesperia*. 1941, 5.
93. **Hephaistos, The Garden of.** D.B. Thompson. *Hesperia*. 1937.
94. **Frantz, A.** The Hephaisteion revisited. *Archeology*. 1954, 4.
95. **climatedata.eu. climatedata.eu.** [Ηλεκτρονικό] <http://www.climatedata.eu>.
96. **P.D. Kalabokas, A.D. Papayannis, G. Tsaknakis, I. Ziomas.** A study on the atmospheric concentrations of primary and secondary air pollutants in the Athens basin performed by DOAS and DIAL measuring techniques. *Science of the Total Environment*. 2012.

- 97. A. Duci, A. Chaloulakou.** Exposure to carbon monoxide in the Athens urban area during commuting. *Science of Total Environment*. 2003.
- 98. G. Grivas, A. Chaloulakou, P. Kassomenos.** An overview of the PM10 pollution problem, in the Metropolitan Area of Athens, Greece. Assessment of controlling factors and potential impact of long range transport. *Science of The Total Environment*. 2008.
- 99. Hydrological Observatory of Athens. [Ηλεκτρονικό] NTUA.** <http://hoa.ntua.gr/>.
- 100. FLIR Systems Co., Ltd. Flir Systems. [Ηλεκτρονικό]** www.flir.com.
- 101. Wildwaterwall. Wildwaterwall. [Ηλεκτρονικό]**
<https://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/eliake-geometria>.