ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA, CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

Αξιοποίηση θερμικών λήψεων για τον εντοπισμό παθολογίας στα μνημεία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Σιδηροπούλου – Βελίδου Δάφνης

Επιβλέποντες : *Ανδρέας Γεωργόπουλος, καθηγητής Ε.Μ.Π.*
José Luis Lerma García, καθηγητής U.P.V.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA,
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

Αξιοποίηση θερμικών λήψεων για τον εντοπισμό παθολογίας στα μνημεία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Σιδηροπούλου – Βελίδου Δάφνης

Επιβλέποντες : *Ανδρέας Γεωργόπουλος, καθηγητής Ε.Μ.Π.*
José Luis Lerma García, καθηγητής U.P.V.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

(Υπογραφή)

.....

ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟΥ ΒΕΛΙΔΟΥ ΔΑΦΝΗ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2012 – All rights reserved

Η Διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε ως συνεργασία του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με το Universidad Politécnica de Valencia στο πλαίσιο του προγράμματος LLP- Erasmus

Περίληψη

Η μελέτη και τεκμηρίωση των ιστορικών μνημείων πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια με διαφορετικές τεχνικές και εργαλεία της Φωτογραμμετρίας και της Τηλεπισκόπησης. Ανάμεσα στις εργασίες αποτύπωσης ενός μνημείου συμπεριλαμβάνονται και εργασίες για την ανίχνευση παθολογιών με σκοπό να ορισθούν οι απαιτούμενες ενέργειες για τη συντήρηση και την αποκατάστασή τους και να αποφευχθούν μη συμβατά υλικά και επεξεργασίες. Στις όψεις των ιστορικών κτιρίων εμφανίζονται διαφόρων τύπων βλάβες, ανάμεσα στις οποίες η αποσάθρωση, η διάβρωση, λειχήνες και μύκητες και, κύρια, η υγρασία. Οι πολυφασματικές τεχνικές βοηθούν στην ανίχνευση και τη χαρτογράφηση των βλαβών αυτών. Η θερμογραφία έχει εισέλθει στις διαδικασίες παρακολούθησης και καταγραφής μνημείων την τελευταία δεκαετία. Είναι μία μη καταστροφική μέθοδος ελέγχου η οποία προσφέρεται για την αναγνώριση των υλικών του μνημείου, τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομή τους, του σχήματος και της επιφάνειάς τους. Ταυτόχρονα, δίνει τη δυνατότητα να εντοπισθούν και να περιγραφούν αλλοιώσεις και προβλήματα στα υλικά αυτά. Έχει το πλεονέκτημα να καλύπτει απρόσιτα σημεία του αντικειμένου αλλά και περιοχές κάτω από την επιφάνειά του, σε μικρό βάθος. Ωστόσο, πέρα από προβλήματα υγρασίας, η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει ακόμα προβλήματα στον ορισμό του είδους και της αιτίας των παθολογιών.

Για την εφαρμογή μεθόδων υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούνται διαφορετικές θερμοκάμερες, ανάλογα με την εφαρμογή, αποκτώνται δεδομένα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή και περιόδους, ενώ τα δεδομένα μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικές φωτογραφικές λήψεις του αντικειμένου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκεται η ανίχνευση παθολογιών σε όψεις δύο ιστορικών κτιρίων, μέσω θερμικής ανάλυσης σε διαφορετικές ώρες και συνδυασμό πολυφασματικών δεδομένων. Οι όψεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή είναι ο Καθεδρικός Ναός και η Βασιλική Virgen de los Desamparados στο ιστορικό κέντρο της Βαλένθια, στην Ισπανία. Περιγράφονται μέθοδοι και εργαλεία πολυφασματικής ανάλυσης, τα οποία βοηθούν στην αναγνώριση των υλικών και των παθολογιών των ιστορικών κτιρίων.

Abstract

Through the last years, study and documentation of historic monuments has been carried out with different techniques and tools of Photogrammetry and Teledetection. Monument documentation includes the detection of alterations, in order to define the proper actions for the protection and preservation of the monument. Several pathologies appear on building façades, such as moisture, detachments, leaks and replacements. Multispectral techniques help the detection and determination of these alterations. Thermography is commonly used in these studies during the last decade. It is a non-intrusive imaging technique that allows the inspection of different materials, as well as possible problems, based on their surface temperature. It has the advantage of reaching unapproachable points and parts under the surface, in small depth of the object. However, apart from moisture, thermography is still having problems defining the type and cause of other kinds of alterations.

In thermography, depending on the application, different thermal cameras are used to capture multitemporal images, which can also be combined with conventional images of the same object.

The present diploma thesis presents an approach based on multitemporal thermal imagery to detect alterations on building façades. It is an application on the Cathedral and the Basilic Virgen de los Desamparados, in the historic centre of Valencia, Spain. Methods and tools of multispectral analysis, which help the detection of the problems described above, are presented.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δύο επιβλέποντες καθηγητές της εργασίας αυτής José Luis Lerma García και Ανδρέα Γεωργόπουλο για την προθυμία τους να εκπονηθεί αυτή η εργασία σε συνεργασία του Universidad Politécnica de Valencia και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και για τη βοήθεια και τη στήριξη σε της όλα τα στάδια.

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή 17

1.1 Εισαγωγή και στόχος 17

1.2 Δομή και Περιεχόμενο 18

1.3 Τα δύο μνημεία 19

1.3.1 Basílica de la Virgen de los Desamparados 19

1.3.2 Catedral de Santa Maria de Valencia 22

Θεωρητικό Υπόβαθρο 25

2.1 Θερμική Ακτινοβολία 25

2.1.1 Το μέλαν σώμα 27

2.1.2 Πραγματικά σώματα 29

2.2 Υπέρυθρη Θερμογραφία 30

2.2.1 Εισαγωγή στην υπέρυθρη θερμογραφία 30

2.2.2 Βασικές αρχές υπέρυθρης θερμογραφίας 31

2.2.3 Τεχνικές θερμογράφησης 34

2.2.4 Θερμογραφικά απεικονιστικά συστήματα 35

2.3 Παθητική θερμογραφία 40

2.3.1 Θερμοκάμερα 42

2.3.2 Συστήματα επεξεργασίας υπέρυθρων εικόνων 44

2.4 Εφαρμογές της θερμογραφίας 46

2.5 Εφαρμογή της Θερμογραφίας στην τεκμηρίωση μνημείων 49

Δεδομένα 53

3.1 Μηχανές συλλογής ψηφιακών δεδομένων - Κάμερες 53

3.2 Επεξεργασία δεδομένων 58

3.2.1 Προεπεξεργασία εικόνων 58

3.2.2 Μεθοδολογία 60

3.2.3 Επεξεργασία εικόνων 60

Εφαρμογή 63

4.1 Ρωμανική Πύλη 63

4.1.1 Λήψεις 64

4.1.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων 66

4.1.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών 66

4.1.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας 69
4.1.3.1 Έγχρωμα σύνθετα 70
4.1.3.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση 72
4.1.3.3 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών 74
4.1.3.4 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση 77
4.1.4 Μετρήσεις θερμοκρασιών – διαγράμματα 78
4.1.5 Συμπεράσματα 88
***4.2 Όψη Ρωμανικής Πύλης* 89**
4.2.1 Λήψεις 90
4.2.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων 91
4.2.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών 92
4.2.3 Συνσδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας 94
4.2.3.1 Έγχρωμα Σύνθετα 95
4.2.3.2 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση 97
4.2.3.3 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών 101
4.2.3.4 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση 105
4.2.5 Συμπεράσματα 111
***4.3 Όψη Virgen* 113**
4.3.1 Λήψεις 114
4.3.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων 114
4.3.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών_ α 115
4.3.2.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών _ β 117
4.3.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας 118
4.3.3.1 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση 119
4.3.3.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών 122
4.3.3.3 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση 123
4.3.4 Ανάλυση Λεπτομερειών 124
4.3.5 Συμπεράσματα 131
***4.4 Πύλη Virgen* 131**
4.4.1 Λήψεις 132
4.4.2 Ανάλυση Θερμικών εικόνων 133
4.4.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών 133

4.4.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων και Συμβατικής 139
4.4.3.1 Έγχρωμα σύνθετα 139
4.4.3.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση 142
4.4.3.3 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών 146
4.4.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας 150
4.4.5 Συμπεράσματα 162
4.5Παρουσίαση των αποτελεσμάτων *165*
4.5.1 Ρωμανική Πύλη Καθεδρικού Ναού 165
4.5.2 Νοτιοανατολική Όψη Ρωμανικής Πύλης Καθεδρικού Ναού 166
4.5.3 Πύλη Virgen 167
4.5.4 Ανατολική Όψη Virgen 168
Σύνοψη και Συμπεράσματα 169
5.1 Συμπεράσματα *169*
5.2 Προτάσεις για βελτίωση *174*
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 176

Εικόνες

Εικόνα 1 : Χάρτης Ισπανίας 20
Εικόνα 2 : Ιστορικό κέντρο Βαλένθια 20
Εικόνα 3 : Δυτική όψη Basilica de la Virgen 21
Εικόνα 4 : Ανατολική όψη Basilica de la Virgen 21
Εικόνα 5 : Catedral de Valencia 22
Εικόνα 6 : Puerta de l' Almoina 23
Εικόνα 7 : Γοτθικό παράθυρο 23
Εικόνα 8 : Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 26
Εικόνα 9 : Το μέλαν σώμα απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται 27
Εικόνα 10 : Ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας 36
Εικόνα 11 : Ραδιόμετρο σημείου, ραδιόμετρο σειράς (ή λωρίδας) και ραδιόμετρο επιφανείας 38
Εικόνα 12 : Εξάρτηση της ακρίβειας των μετρήσεων από το IFOV 39
Εικόνα 13 : Γεωμετρική ανάλυση θερμοκάμερας 39
Εικόνα 14 : Παράμετροι θερμογραφικής λήψης 40

Εικόνα 15 : Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία σε δεδομένη περιοχή 45
Εικόνα 16 : Σημεία μέγιστης θερμοκρασίας 46
Εικόνα 17 : Θερμογραφία σε εξωτερικό τοίχο κτιρίου 47
Εικόνα 18 : Θερμογραφία σε εναέρια γραμμή μεταφοράς 48
Εικόνα 19 : Θερμογραφία σε καρδιακή χώρα 48
Εικόνα 20 : ThermaCAM B4 54
Εικόνα 21 : Sigma SD15 55
Εικόνα 22: Παλέτα grey 59
Εικόνα 23 : Παλέτα iron hi 59
Εικόνα 24 : Παλέτα rain 59
Εικόνα 25 : Παλέτα yellow 59
Εικόνα 26 : Εικόνα 507 Εικόνα 27 : Εικόνα 517 64
Εικόνα 28 : Εικόνα 531 Εικόνα 29 : Εικόνα 541 64
Εικόνα 30 : Εικόνα 546 65
Εικόνα 31 : Εικόνες εισόδου 507, 517, 531, 546 65
Εικόνα 32 : Διάγραμμα ιδιοτιμών 66
Εικόνα 33 : PC 1 67
Εικόνα 34 : PC 2 68
Εικόνα 35 : PC 3 69
Εικόνα 36 : PC 4 69
Εικόνα 37 : Σύνθετο 1 70
Εικόνα 38 : Σύνθετο 2 71
Εικόνα 39 : Σύνθετο 3 71
Εικόνα 40 : Σύνθετο 4 71
Εικόνα 41 : Περιοχές εκπαίδευσης 73
Εικόνα 42 : Ταξινομημένη εικόνα 73
Εικόνα 43: Διάγραμμα ιδιοτιμών 74
Εικόνα 44 : Εικόνες κυρίων συνιστωσών 75
Εικόνα 45 : PC 2 76
Εικόνα 46 : PC 3 76
Εικόνα 47 : Ταξινομημένη εικόνα 77
Εικόνα 48 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασίας 79

Εικόνα 49 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασιών 83
Εικόνα 50 : Εικόνες 508, 534, 543, 547 90
Εικόνα 51 : Εικόνες εισόδου 508, 534, 543, 547 91
Εικόνα 52 : Διάγραμμα ιδιοτιμών 92
Εικόνα 53 : PC 1 93
Εικόνα 54 : PC 2 93
Εικόνα 55 : PC 3 94
Εικόνα 56: Συμβατική εικόνα 94
Εικόνα 57 : Σύνθετο 1 95
Εικόνα 58 : Σύνθετο 2 95
Εικόνα 59 : Σύνθετο 3 96
Εικόνα 60 : Σύνθετο 4 96
Εικόνα 61 : Περιοχές εκπαίδευσης 98
Εικόνα 62 : Ταξινομημένη εικόνα 99
Εικόνα 63 : Διάγραμμα ιδιοτιμών 101
Εικόνα 64: PC 1 102
Εικόνα 65 : PC 2 103
Εικόνα 66 : PC 3 104
Εικόνα 67 : PC 4 104
Εικόνα 68 : Ταξινομημένη εικόνα PC 1 σε 5 κλάσεις 105
Εικόνα 69 : Ταξινομημένη εικόνα PC 1 σε 6 κλάσεις 105
Εικόνα 70 : Ταξινομημένη εικόνα PC 3 106
Εικόνα 71 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης 107
Εικόνα 72 : Εικόνες 512, 522, 540, 552 114
Εικόνα 73 : Εικόνες εισόδου 512, 522, 540, 552 114
Εικόνα 74 : διάγραμμα ιδιοτιμών 115
Εικόνα 75 : PC 1 116
Εικόνα 76 : PC 2 116
Εικόνα 77 : PC 3 117
Εικόνα 78 : PC 4 117
Εικόνα 79 : διάγραμμα ιδιοτιμών 117
Εικόνα 80 : PC 1 118

Εικόνα 81 : PC 2 118
Εικόνα 82 : Συμβατική εικόνα 119
Εικόνα 83 : περιοχές εκπαίδευσης 121
Εικόνα 84 : Ταξινομημένη εικόνα 121
Εικόνα 85 : διάγραμμα ιδιοτιμών 122
Εικόνα 86: PC 1 Εικόνα 87 : PC 2 122
Εικόνα 88 : Ταξινομημένη εικόνα επιβλεπόμενης ταξινόμησης 123
Εικόνα 89 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασιών 129
Εικόνα 90: Εικόνες 511, 521, 539, 551 132
Εικόνα 91 : εικόνες εισόδου 133
Εικόνα 92 : διάγραμμα ιδιοτιμών 134
Εικόνα 93: PC 1 135
Εικόνα 94 : PC 2 136
Εικόνα 95 : PC 3 137
Εικόνα 96 : PC 4 138
Εικόνα 97 : συμβατική εικόνα 139
Εικόνα 98 : Σύνθετο 1 139
Εικόνα 99 : Σύνθετο 2 140
Εικόνα 100 : Σύνθετο 3 141
Εικόνα 101 : Σύνθετο 4 141
Εικόνα 102 : Σύνθετο 5 141
Εικόνα 103 : Σύνθετο 6 142
Εικόνα 104 : Σύνθετο 7 142
Εικόνα 105 : περιοχές εκπαίδευσης 143
Εικόνα 106 : Ταξινομημένη εικόνα 145
Εικόνα 107 : διάγραμμα ιδιοτιμών 147
Εικόνα 108 : PC 1 147
Εικόνα 109 : PC 2 148
Εικόνα 110 : PC 3 149
Εικόνα 111 : PC 4 149
Εικόνα 112 : Χάρτης Παθολογιών Ρωμανικής Πύλης 165
Εικόνα 113 : Χάρτης Παθολογιών Όψης Καθεδρικού 166

Εικόνα 114 : Χάρτης Παθολογιών Πύλης Virgen 167

Εικόνα 115 : Χάρτης Παθολογιών Όψης Virgen 168

Πίνακες

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά ThermaCAM B4 54

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά Sigma SD15 56

Πίνακας 3 : Πίνακας λήψεων Ρωμανικής Πύλης 64

Πίνακας 4 : Πίνακας διακύμανσης 66

Πίνακας 5: Πίνακας διακύμανσης 74

Πίνακας 6 : Μετρήσεις θερμοκρασιών τοίχου 80

Πίνακας 7 : Θερμοκρασίες πόρτας 83

Πίνακας 8 : Πίνακας λήψεων όψης 90

Πίνακας 9: Πίνακας διακύμανσης 92

Πίνακας 10 : Πίνακας ιδιοτιμών 101

Πίνακας 11 : Μετρήσεις θερμοκρασιών 108

Πίνακας 12 : Πίνακας λήψεων όψης Virgen 113

Πίνακας 13 : Πίνακας διακύμανσης 115

Πίνακας 14 : Πίνακας διακύμανσης 117

Πίνακας 15 : Πίνακας διακύμανσης 122

Πίνακας 16 : Μετρήσεις θερμοκρασιών 129

Πίνακας 17 : Πίνακας λήψεων πύλης Virgen 132

Πίνακας 18 : πίνακας διακύμανσης 134

Πίνακας 19 : Πίνακας διακύμανσης 147

Πίνακας 20 : Θερμοκρασίες ξύλου 150

Πίνακας 21 : Θερμοκρασίες κηλίδας δεξιά 153

Πίνακας 22 : Θερμοκρασίες μαύρης κηλίδας αριστερά 156

Πίνακας 23: θερμοκρασίες παραστάδων 158

Πίνακας 24 : θερμοκρασίες αριστερής παραστάδας 160

Πίνακας 25: θερμοκρασίες επιπέδου Α 161

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1 : Θερμοκρασίες στα κάτω τμήματα του τοίχου 80
Διάγραμμα 2 : Θερμοκρασίες τοίχου 81
Διάγραμμα 3: Θερμοκρασίες εξωτερικών ακμών 84
Διάγραμμα 4 : Θερμοκρασίες εσωτερικών ακμών 85
Διάγραμμα 5 : Θερμοκρασίες σκούρων τμημάτων 86
Διάγραμμα 6 : Θερμοκρασίες τόξων 87
Διάγραμμα 7 : Θερμοκρασίες τζαμιού 108
Διάγραμμα 8 : Θερμοκρασίες τοιχοποιίας 109
Διάγραμμα 9 : Θερμοκρασίες τοιχοποιίας 129
Διάγραμμα 10 : θερμοκρασίες ξύλου 152
Διάγραμμα 11 : θερμοκρασίες δεξιά της παραστάδας 154
Διάγραμμα 12 : θερμοκρασίες παραστάδας 154
Διάγραμμα 13 : θερμοκρασίες αριστερά της παραστάδας 155
Διάγραμμα 14 : θερμοκρασίες κηλίδας δεξιά 155
Διάγραμμα 15 : θερμοκρασίες αριστερά της παραστάδας 157
Διάγραμμα 16 : θερμοκρασίες στην εσωτερική γωνία 157
Διάγραμμα 17 : συγκεντρωτικό διάγραμμα 158
Διάγραμμα 18 : Θερμοκρασίες δεξιάς παραστάδας 159
Διάγραμμα 19 : θερμοκρασίες αριστερής παραστάδας 160
Διάγραμμα 20 : θερμοκρασίες επιπέδου Α 161

1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή και στόχος

Η θερμογραφία, τα τελευταία χρόνια, έχει χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο λειτουργίας μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και στην ανίχνευση παθολογιών σε κτίρια. Τα προβλήματα αυτά είναι ποικίλα και μερικά από τα κυριότερα είναι η υγρασία, η διάβρωση και αποσάθρωση των λίθων, η ανάπτυξη βρύων, λειχήνων και μυκήτων στην επιφάνεια των τοίχων. Η παρουσία υγρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποτελεί την αιτία για μια σειρά από άλλες παθολογίες που εμφανίζονται στα κτίρια. Επομένως, είναι σημαντικός ο εντοπισμός της και η αποκατάσταση των προβλημάτων αυτών.

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου με το οποίο μπορούν να διαγνωσθούν αλλοιώσεις στις όψεις των κτιρίων αλλά και στα επιμέρους στοιχεία τους. Βοηθά στον εντοπισμό της υγρασίας αλλά και μπορεί να προσδιορίσει τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος άλλων ειδών παθολογιών.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν οι δυνατότητες μιας θερμικής ανάλυσης στις όψεις δύο ιστορικών κτιρίων, του Καθεδρικού Ναού και της Βασιλικής Virgen de los Desmparados της Βαλένθια, στην Ισπανία. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν θερμικές εικόνες για τα αντικείμενα αυτά σε διαφορετικές ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και συμβατικές φωτογραφικές εικόνες των αντικειμένων. Σκοπός της εργασίας ήταν, μέσω της θερμικής ανάλυσης από διαφορετικές ώρες και τον συνδυασμό των δεδομένων να εντοπισθούν και να περιγραφούν οι πιθανές παθολογίες που υπάρχουν στις όψεις των κτιρίων που εξετάσθηκαν. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων και για κάθε μία από αυτές αξιολογήθηκε η ποιότητα και η σημασία των

αποτελεσμάτων που έδωσαν. Τέλος, σημειώθηκαν και παρουσιάσθηκαν τα προβλήματα τα οποία ενδέχεται να προκύψουν στην εν λόγω ανάλυση και με ποιο τρόπο μπορούν να αντιμετωπισθούν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ήταν :

- Περιγραφή των υλικών των όψεων και της κατάστασής τους
- Συμπεράσματα για τη θέση και το σχήμα των παθολογιών που υπάρχουν και, κατά περίπτωση, το είδος τους
- Χάρτες παθολογιών για τα αντικείμενα που εξετάσθηκαν

Τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν, αλλά και οι χάρτες των παθολογιών αποτελούν ένα τελικό προϊόν το οποίο, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αρχιτέκτονες, αρχαιολόγους και συντηρητές. Είναι παράγωγα χρήσιμα σε αυτούς στην περίπτωση εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης των μνημείων, καθώς βοηθούν στον εντοπισμό και την ταυτοποίηση των υπαρχόντων προβλημάτων.

1.2 Δομή και Περιεχόμενο

Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφοντα οι βασικές αρχές της θερμικής ακτινοβολίας, της υπέρυθρης θερμογραφίας και οι εφαρμογές της. Παρουσιάζεται η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων και ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της εφαρμογής της ανάλυσης. Τέλος, διατυπώνονται τα συμπεράσματα από τη διαδικασία.

Αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα και το στόχο της εργασίας και περιγράφεται η δομή των περιεχομένων της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θερμικής ακτινοβολίας και της υπέρυθρης θερμογραφίας. Περιλαμβάνεται μια παρουσίαση των θερμοκαμερών και, τέλος, παρατίθενται τα πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας, με έμφαση στην τεκμηρίωση μνημείων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτογραφικών μηχανών που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εφαρμογή και οι διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων.

Το τέταρτο κεφάλαιο διακρίνεται σε τέσσερις ενότητες, κάθε μία από τις οποίες αφορά σε κάθε ένα από τα αντικείμενα που εξετάσθηκαν. Το κεφάλαιο αυτό περιέχει την εφαρμογή της ανάλυσης με όλες τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα αντικείμενα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα και τα προβλήματα που προέκυψαν στη διαδικασία.

Επισυνάπτονται δύο παραρτήματα. Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία των ταξινομήσεων και της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών που παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Στο παράρτημα Β αναλύονται συνοπτικά οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν και το αντίστοιχο λογισμικό.

1.3 Τα δύο μνημεία

1.3.1 Basílica de la Virgen de los Desamparados

Η Basilica de la virgen de los desamparados βρίσκεται στο τμήμα της παλιάς πόλης της Βαλένθια στην Ισπανία. Διακρίνεται ως το παρεκκλήσι της Παναγίας των απροστάτευτων, προστάτιδα της Βαλένθια και όλου του αρχαίου βασιλείου της, σημερινή Βαλενθιανή Κοινότητα.

Η Basilica de la Virgen de los Desamparados βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της πόλης. Μαζί με τον Καθεδρικό ναό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αξιοθέατα του ιστορικού κέντρου της πόλης. Συγκεκριμένα, βρίσκεται στην Plaza de la Virgen, μπροστά από το σιντριβάνι του ποταμού Turia. Δύο από τις πόρτες της βλέπουν σε αυτή την πλατεία και μία τρίτη στο πέρασμα που χωρίζει τη Βασιλική από τον Καθεδρικό ναό, οι οποίοι ενώνονται με ένα τόξο.

Ανασκαφές στην Almoina δείχνουν ότι η ζώνη στην οποία βρίσκεται η Βασιλική αντιστοιχεί στην Ρωμαϊκή Αγορά της πόλης της Βαλένθια.

Εικόνα 1 : Χάρτης Ισπανίας

Εικόνα 2 : Ιστορικό κέντρο Βαλένθια

Προσέγγιση του ύφους

Η Εκκλησία είναι χτισμένη μεταξύ του 16^{ου} και του 20^{ου} αιώνα. Υπάρχουν πέντε κατασκευαστικά-υφολογικά στάδια. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η χρωματική εξέλιξη των εξωτερικών όψεων. Οι διαδοχικές φάσεις που από την αρχή της κατασκευής της το 1652 μέχρι σήμερα συνεχίζουν να εξελίσσονται, ξεκινούν από ένα μετα – Αναγεννησιακό στυλ με κλασικά στοιχεία του 1667, σε ένα στυλ μπαρόκ, που αναπτύχθηκε με τις επεμβάσεις διακόσμησης, στο εσωτερικό του Camarin το 1964 και φτάνει στη μέγιστη έκφρασή της με τη ζωγραφική στον οβάλ θόλο, από τον Antonio Palomino το 1701. Συνέχισε με ένα ύφος ακαδημαϊκό με τις ροκοκό προσθήκες το 1768 μέχρι το 1824, ένα ύφος νεοκλασικό.

Τα υλικά αποτελούν πέτρες, τούβλα και χρωματισμένος γύψος παρόλο που από το 1920 τα τούβλα επενδύθηκαν με τσιμέντο τοιχοποιίας. Σήμερα είναι δυνατό να ταυτοποιηθούν, ανάμεσα σε άλλα, τα ακόλουθα στοιχεία της τοιχοποιίας : πέτρα, χρωματισμένο τσιμεντοκονίαμα, ξύλο και γυαλί (Lerma, 2005).

Εικόνα 3 : Δυτική όψη Basilica de la Virgen

Εικόνα 4 : Ανατολική όψη Basilica de la Virgen

1.3.2 Catedral de Santa Maria de Valencia

Ο Καθεδρικός ναός της Βαλένθια βρίσκεται στο ιστορικό κέντρο της Βαλένθια, δίπλα στην Basilica de la Virgen. Ιδρύθηκε το 1238. Θεμελιώνεται πάνω στο προγενέστερο τζαμί Belansiya, το οποίο με τη σειρά του είχε χτιστεί πάνω στον αρχαίο καθεδρικό ναό των Βησιγότθων.

Εικόνα 5 : Catedral de Valencia

Το μεσογειακό γοτθικό στοιχείο είναι το κυρίαρχο κατασκευαστικό στοιχείο αυτού του καθεδρικού, παρόλο που επίσης περιλαμβάνει στοιχεία ρωμανικά, γοτθικά της Γαλλίας, αναγεννησιακά, μπαρόκ και νεοκλασικά.

Περιέχει κάποιες από τις πρώτες και καλύτερες ζωγραφιές του 14^{ου} αιώνα σε όλη την Ιβηρική χερσόνησο, τα οποία έφτασαν από τη Ρώμη, μέσω καλλιτεχνών που είχαν προσληφθεί από τον Alejandro VI.

Puerta de l' Almoina

Η Puerta de l' Almoina, ονομαζόμενη έτσι λόγω της γειτνίασης με το σπίτι της Almoina, όπου δίνονταν φροντίδα σε αυτούς που είχαν ανάγκη, είναι η παλαιότερη του Καθεδρικού. Είναι επίσης γνωστή ως Puerta del Palau λόγω γειτνίασης με την Αρχιεπισκοπή. Σε στυλ Ρωμανικό, αποτελεί ένα στοιχείο σαφώς διαχωρίσιμο από το υπόλοιπο του καθεδρικού, που είναι κυρίως γοτθικός. Κάποιοι συγγραφείς την θεωρούν του 1262-1270, έργο του Arnau Vidal, ενώ άλλοι την τοποθετούν στο 1240, αμέσως μετά την κατάκτηση του Βασιλείου της Βαλένθια το 1238. Το γεγονός ότι είναι προσανατολισμένη στην ανατολή, βλέποντας προς τη Μέκκα, υποδεικνύει ότι εκεί ακριβώς βρίσκονταν το Μιχράμπ του παλαιού τζαμιού.

Εικόνα 6 : Puerta de l' Almoina

Το Ρωμανικό ύφος με επιρροές Μουδέχαρ είναι τύπου leridano (περιοχή της Βόρειας Ισπανίας). Στην πραγματικότητα, λόγω της ομοιότητάς της με την puerta dels Fillols του Καθεδρικού της Λέριδα, κατασκευασμένη γύρω στο 1220, κάποιοι αποδίδουν την κατασκευή της σε κάποιο λεριδιανό τεχνίτη.

Η puerta de l' Almoina, η οποία σχηματίζει ένα σώμα προεξέχον σε σχέση με τον τοίχο του Καθεδρικού, περιλαμβάνει ένα σύνολο έξι ομόκεντρων ημικυκλικών τόξων σε υποβάθμιση (από το μεγαλύτερο στο μικρότερο), τα οποία στηρίζονται σε λεπτές κολώνες με κιονόκρανα, όμορφα διακοσμημένα με σκηνές από τη Γένεση στην αριστερή πλευρά και από την Έξοδο στα δεξιά. Η διακόσμηση των τόξων αποτελείται από μοτίβα φυτικά και γεωμετρικά.

Πάνω από την πόρτα παρατηρείται ένα γοτθικό παράθυρο και ένα ακόμη στα δεξιά του, τα οποία ήταν κρυμμένα μέχρι την τελευταία αναστήλωση του Καθεδρικού. Το τοξωτό παράθυρο, αποτελείται από τρείς ομόκεντρες καμάρες, οι οποίες ακουμπούν πάνω σε άλλες στήλες. Η αποτύπωση της Ρωμανικής αυτής Πύλης του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια, αποτέλεσε αντικείμενο προγενέστερης Διπλωματικής Εργασίας (Σταθοπούλου, 2010).

Εικόνα 7 : Γοτθικό παράθυρο

2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Θερμική Ακτινοβολία

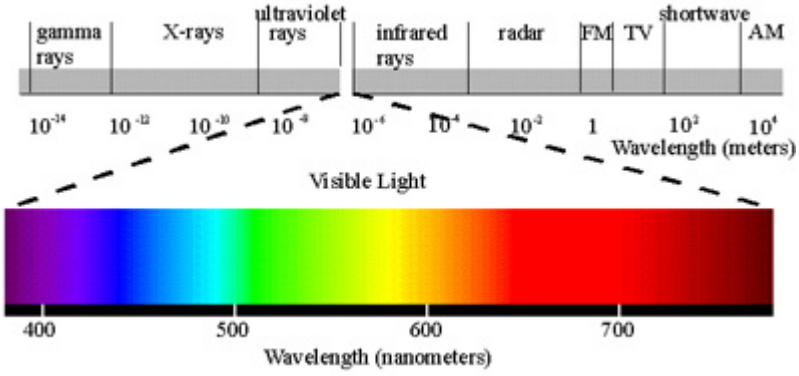
Όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία, δηλαδή ηλεκτρομαγνητικά κύματα, εξαιτίας της ίδιας τους της θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται θερμική ακτινοβολία. Παράλληλα με την εκπομπή, όλα τα σώματα απορροφούν ακτινοβολία από το περιβάλλον τους. Αν ένα σώμα είναι θερμότερο από το περιβάλλον του τότε εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από ό,τι απορροφά και ψύχεται. Στην αντίθετη περίπτωση απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από ό,τι εκπέμπει και το σώμα αυτό θερμαίνεται. Τελικά θα έρθει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του, μία κατάσταση όπου οι ρυθμοί εκπομπής και απορρόφησης ακτινοβολίας είναι ίσοι. Η ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους τρείς τρόπους μετάδοσης θερμότητας.

Το φάσμα συχνοτήτων της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας ενός στερεού σώματος είναι συνεχές. Το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται διαφέρει για κάθε συχνότητα και εξαρτάται τόσο από την δομή του σώματος όσο και από το υλικό του. Οι συχνότητες αυτές αναφέρονται ως φάσμα του σώματος και συχνά συγκεντρώνει το ενδιαφέρον όχι μόνο το εύρος τους αλλά και η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υποσύνολο του φάσματος. Συγκεκριμένα, έχει ενδιαφέρον να βρεθεί η συχνότητα εκείνη στην οποία εκπέμπεται η περισσότερη ακτινοβολία από το σώμα, δηλαδή το κυρίαρχο σημείο του φάσματος συχνοτήτων. Είναι λογικό ότι το αποτέλεσμα της προηγούμενης αναζήτησης θα εξαρτάται από το υλικό και την θερμοκρασία του σώματος.

Τα περισσότερα σώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή ο άνθρωπος έχουν κυρίαρχη συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στο υπέρυθρο φως και επομένως η ακτινοβολία τους δεν

είναι ορατή. Παρ' όλα αυτά, όσο η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπεται. Επίσης η κυρίαρχη συχνότητα μεταφέρεται προς το ορατό φως και άρα γίνεται ορατή από τους ανθρώπους. Συνήθως, όταν το σώμα θερμαίνεται, η κυρίαρχη συχνότητα μεταφέρεται από το βαθύ κόκκινο στο φωτεινό κίτρινο και τελικά στο λευκό φως (Αϊβαλιώτης – Θεοφράστου, 2008).

Η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο φάσμα τοποθετούνται ως μικρότερη συνότητα στην προέκταση της κόκκινης ορατής ακτινοβολίας, εξ ου και το όνομα «υπέρυθρες» (υπό του ερυθρού). Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από το 1 χιλιοστό έως τα 700 νανόμετρα, όπου ξεκινά το ορατό φάσμα[1].



Εικόνα 8 : Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
Πηγή : http://asep2012.blogspot.com/2010/10/blog-post_2608.html

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ακτινοβολία εξαρτάται από την θερμοκρασία αλλά και την σύσταση του σώματος. Για παράδειγμα, στους *2000 K*, μια γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια από βολφράμιο εκπέμπει ακτινοβολία με ρυθμό *23.5 Watt/cm*^{2}, την ώρα που για το μολυβδαίνιο ο αντίστοιχος ρυθμός είναι *19.2 Watt/cm*^{2}. Σε κάθε περίπτωση ο ρυθμός αυξάνεται όταν οι επιφάνειες δεν είναι γυαλισμένες αλλά τραχιές. Η εξάρτηση από το υλικό των σωμάτων κάνει το πρόβλημα ακόμα πιο πολύπλοκο. Ευτυχώς, η βοήθεια έρχεται από τις δυσκολίες που υπήρξαν στην περιγραφή των αερίων.

Αέρια με διαφορετική ατομική σύσταση έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Τα πιο βασικά σημεία της συμπεριφοράς τους θα μπορούσαν να γίνουν πιο κατανοητά με τη χρήση της έννοιας του ιδανικού αερίου. Το ιδανικό αέριο είναι εύκολο στην μελέτη του και μπορεί αργότερα να χρησιμοποιηθεί για την, καταρχήν, κατανόηση άλλων πιο σύνθετων αερίων. Στην πραγματικότητα είναι μια εξιδανίκευση ή προσέγγιση των βασικών ιδεών που αφορούν στην συμπεριφορά των αερίων. Ομοίως, στο πρόβλημα της θερμικής ακτινοβολίας, είναι χρήσιμο να εισαχθεί η έννοια του ιδανικού πομπού. Για το συγκεκριμένο σώμα, το φάσμα της εκπεμπόμενης

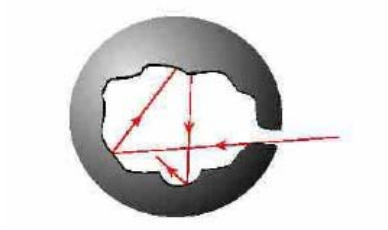
[1] www.wikipedia.org

θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του σώματος και όχι από το υλικό του και την φύση της επιφάνειάς του.

2.1.1 Το μέλαν σώμα

Στην πραγματικότητα, ένα αέριο που συμπεριφέρεται περίπου όπως το ιδανικό μπορεί να προσεγγιστεί από ένα αέριο μονοατομικών στοιχείων όπως το ήλιο, το νέον κλπ., σε όχι τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Αντίστοιχα, η ιδανική πηγή μπορεί να προσεγγιστεί από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια μικρή τρύπα ενός κοίλου σώματος σε κάποια θερμοκρασία. Η ακτινοβολία αντανακλάται στα εσωτερικά τοιχώματα της κοιλότητας και αλλάζει αρκετά πριν καταφέρει να βρει την μικρή τρύπα και ξεφύγει. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα, η ακτινοβολία να μην εξαρτάται τελικά από το υλικό και την φύση της επιφάνειας του σώματος. Στην βιβλιογραφία αυτή αναφέρεται ως ακτινοβολία κοιλότητας.

Ας αναλυθεί τώρα η αντίστροφη διαδικασία, όταν δηλαδή η ακτινοβολία απορροφάται από το σώμα και όχι όταν εκπέμπεται. Σύμφωνα με αυτή μια μικρή τρύπα με μια σκούρα κοιλότητα στο εσωτερικό, απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται, ανεξαρτήτως του υλικού του σώματος. Συχνά, η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται ακτινοβολία μέλανος σώματος.



Εικόνα 9 : Το μέλαν σώμα απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται

Η έννοια "μέλαν σώμα" διατυπώθηκε από τον Gustav Kirchhoff το 1896. Η ονομασία αυτή έχει δοθεί διότι στη συνηθισμένη θερμοκρασία τα σώματα είναι μαύρα (ή μελανά), επειδή ακριβώς απορροφούν όλα τα μήκη κύματος ακόμη και στην ορατή περιοχή. Η πλησιέστερη προσέγγιση ενός μέλανος σώματος είναι μια ισοθερμοκρασιακή κοιλότητα. Ένα μέλαν σώμα εκπέμπει ακτινοβολία που αυξάνει, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του, και φυσικά ένα μέρος της μπορεί να βρίσκεται και στην ορατή περιοχή του φάσματος, όταν η θερμοκρασία του είναι αρκετά υψηλή. Η διάδοση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι ισοτροπική. Η θερμική ακτινοβολία του μέλανος σώματος ακολουθεί μερικούς νόμους.

Ο νόμος του Planck είναι από τους πιο σημαντικούς. Περιγράφει την κατανομή της εκπεμπόμενης ενέργειας συναρτήσει του μήκους κύματος για μια θερμοκρασία. Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα σταθερής κλίσης είναι:

$$E = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \mathrm{T}} \right) - 1 \right]}$$

Πριν τον νόμο του Planck αναπτύχθηκαν δύο σχέσεις για συγκεκριμένα, όμως, μήκη κύματος.

Ο πρώτος νόμος του Wien ισχύει για μικρά μήκη κύματος και περιγράφεται από την εξίσωση :

$$E = c_1 \frac{1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda \mathrm{T}} \right)$$

Για μεγάλα μήκη κύματος ο νόμος των Rayleigh-Jeans επιβεβαιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα. Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι η:

$$E = \frac{c_1}{c_2} \frac{\mathrm{T}}{\lambda^4}$$

Η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι για μεγάλα μήκη κύματος υπάρχει γραμμική εξάρτηση ανάμεσα στην εκπεμπόμενη ενέργεια και στην θερμοκρασία.

Ο νόμος μετατόπισης του Wien συνδέει την θερμοκρασία του σώματος με το μήκος κύματος *λmax*, στο οποίο το μέλαν σώμα εκπέμπει το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολουμένης ισχύος. Μάλιστα τα δύο αυτά μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα και το γινόμενο τους είναι μια σταθερά ίση με $2.9 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K$. Ο νόμος του Wien λοιπόν είναι:

$$\lambda_{\max} \cdot \mathrm{T} = 2,9 \cdot 10^{-3}\, m \cdot K$$

Με βάση αυτό το νόμο, όταν το μέλαν σώμα βρίσκεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, το λmax είναι μεγάλο. Άρα θα βρίσκεται στην υπέρυθρη (μη ορατή) περιοχή του φάσματος. Όταν η θερμοκρασία αυξηθεί, τότε το λmax θα μετατοπισθεί προς χαμηλότερες τιμές π.χ. του ερυθρού χρώματος. Κι αν αυξηθεί ακόμη περισσότερο η θερμοκρασία, τότε το λmax θα μετατοπισθεί στην περιοχή του ιώδους. Με την βοήθεια του νόμου προσδιορίστηκε η θερμοκρασία της επιφανείας του ήλιου, περίπου *6000 K*.

Οι Stefan - Boltzmann, διαπίστωσαν ότι η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής *q* που είναι το πηλίκο της συνολικής ακτινοβολούμενης ισχύος ενός μέλανος σώματος προς το εμβαδόν της επιφάνειάς του S, είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος:

$$q = \sigma \mathrm{T}^4$$

όπου *σ* είναι μία θεμελιώδης φυσική σταθερά, γνωστή ως σταθερά των Stefan-Boltzmann. Η σταθερά Stefan-Boltzmann ισούται με $5.67 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$. Ο νόμος αυτός προέκυψε από

πειράματα τόσο του Stefan όσο και του Boltzmann, που δούλευαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο.

2.1.2 Πραγματικά σώματα

Τα πραγματικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα από την στιγμή που η απορροφώμενη ακτινοβολία (*Φα*) είναι μόνο ένα τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (*Φi*). Ένα άλλο τμήμα ροής ανακλάται (*Φr*) και ένα τελευταίο διαπερνά την επιφάνεια και μεταδίδεται στον χώρο (*Φt*). Ισχύει:

$$\Phi i = \Phi r + \Phi \alpha + \Phi t$$

Γενικότερα, τα τμήματα αυτά εξαρτώνται από το μήκος κύματος, την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία και την ποιότητα της επιφάνειας. Η ανακλώμενη επιφάνεια δεν επηρεάζει το σώμα ενώ η απορροφημένη αυξάνει την εσωτερική θερμική ενέργεια και συνεπώς την θερμοκρασία του σώματος. Έτσι συμπληρώνεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η ενέργεια που προσπίπτει είναι ίση με την ενέργεια που ανακλάται, απορροφάται και διαπερνά το σώμα.

Κάποια σώματα έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Στα αδιαφανή υλικά, η μεταδιδόμενη ενέργεια ισούται με μηδέν. Η ανάκλαση και η απορρόφηση είναι επιφανειακά φαινόμενα. Στους τέλειους καθρέφτες όλη η ενέργεια ανακλάται ενώ στα μέλανα σώματα απορροφάται.

Η απορρόφηση εξαρτάται από δύο παράγοντες, το χρώμα και την τραχύτητα της επιφάνειας. Όσο πιο μαύρο είναι το χρώμα της επιφάνειας τόσο περισσότερο απορροφά την ακτινοβολία. Γι' αυτό και είναι συνήθης τακτική να βάφεται με μαύρο χρώμα μια επιφάνεια, ώστε να δεσμεύει μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας. Ακόμα, μια ματ ή τραχεία επιφάνεια απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από μια γυαλιστερή επιφάνεια, ανεξάρτητα από το χρώμα τους.

Στην περίπτωση της πραγματικής επιφάνειας, η οποία δεν απορροφά όλη την ενέργεια που δέχεται, εισάγεται ο παράγοντας του συντελεστή εκπομπής (ε). Ο συντελεστής εκπομπής είναι μια ιδιότητα της επιφάνειας που αναφέρεται στην ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας. Είναι στην πράξη, ο λόγος της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια ακτινοβολίας, προς την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στις ίδιες συνθήκες. Ο συντελεστής εκπομπής παίρνει τιμές από *0* μέχρι *1* και γενικά δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτή η εξάρτηση οδήγησε στον συντελεστή εκπομπής φάσματος- διεύθυνσης. Για σώμα με θερμοκρασία επιφάνειας *T* που εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος λ με κατεύθυνση *(θ,φ)* ισούται με:

$$\varepsilon\left(\lambda, T, \theta, \phi\right) = \frac{L\left(\lambda, \mathrm{T}, \theta, \phi\right)}{L_b\left(\lambda, \mathrm{T}\right)}$$

με τον παρονομαστή να αφορά το μέλαν σώμα γι' αυτό και χρησιμοποιείται ο δείκτης b.

Για τα μέταλλα ο συντελεστής αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ παραμένει σταθερός στην αύξηση της τιμής της γωνίας (θ), μέχρι ενός σημείου. Αντίθετα για τα μη-μέταλλα ο συντελεστής εκπομπής αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της συγκεκριμένης γωνίας.

Στην πράξη δεν είναι απαραίτητη πάντα η ενασχόληση με όλους αυτούς τους παράγοντες. Υπάρχουν σώματα που είναι ειδικές περιπτώσεις π.χ. τα σώματα που ο συντελεστής εκπομπής τους δεν επηρεάζεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ονομάζονται γκρίζα σώματα. Η αμφιβολία σχετικά με την ακριβή τιμή του συντελεστή εκπομπής αποτελεί σημείο έντονου ενδιαφέροντος στην υπέρυθρη θερμογραφία. Η τελευταία βασίζεται στην μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτεί γνώση του συντελεστή εκπομπής και το αντίστροφο (Αϊβαλιώτης – Θεοφράστου, 2008).

2.2 Υπέρυθρη Θερμογραφία

2.2.1 Εισαγωγή στην υπέρυθρη θερμογραφία

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύονται τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζονται και ερμηνεύονται οι θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται σε υλικά και εφαρμογές (πχ μηχανολογικού εξοπλισμού), εν γένει, και εξάγονται συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή τους. Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος που σκοπό έχει την πρόληψη και την έγκυρη επιδιόρθωση ενός προβλήματος. Οι υπέρυθρες (IR) τεχνικές χρησιμοποιούνται κοινώς σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογίας, της ιατρικής και άλλων που θα αναφερθούν παρακάτω.

Η υπέρυθρη θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι **κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου μηδενός, εκπέμπει ενέργεια υπό τη μορφή ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις**. Η θερμογραφία ή η υπέρυθρη φωτογράφηση, ανιχνεύει την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και προκύπτει οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν μετράται απ'ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες στο υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες.

Ένα θερμογραφικό σύστημα ανιχνεύει τα φωτόνια που διαφεύγουν από το υπό εξέταση αντικείμενο. Φωτόνια γεννώνται σε όλο τον όγκο του σώματος, αλλά η πιθανότητα να διαφύγουν του σώματος αυξάνεται όσο πιο κοντά στην επιφάνεια γεννώνται, γι' αυτό και συχνά η θερμογραφία αναφέρεται ως επιφανειακό φαινόμενο αν και στη πραγματικότητα είναι ογκομετρικό**.**

Εντός κάποιων περιορισμών, η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται εξ αποστάσεως, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και έχει τη δυνατότητα ποιοτικής ή ποσοτικής πληροφόρησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και τον καθορισμό του μεγέθους ενός μεγάλου εύρους ατελειών, σφαλμάτων, διαρροών σε διάφορα αντικείμενα ή εφαρμογές.

Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν μια υπέρυθρη κάμερα συνδεδεμένη με ένα υπέρυθρο ανιχνευτή που απεικονίζει τις διαφορές θερμικής ακτινοβολίας. Η εικόνα λαμβάνεται από τη θερμοκάμερα και ο τεχνικός εκτιμάει την κατάσταση στον υπολογιστή. Σύγχρονα θερμικά συστήματα χρησιμοποιούν αλγορίθμους για να παρέχουν ακριβή χαρακτηρισμό των ατελειών. Η θερμογραφική απεικόνιση μπορεί να περιλαμβάνει ενεργητικές ή παθητικές πηγές, όπως θερμάστρες ή ηλιακή ακτινοβολία.

Οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας είναι οι εξής τρεις: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι ο τρόπος που ενδιαφέρει στις περισσότερες των εφαρμογών, από την άποψη της μη καταστροφικής εξέτασης, καθώς οι IR κάμερες ανιχνεύουν την ακτινοβολούμενη θερμότητα.

2.2.2 Βασικές αρχές υπέρυθρης θερμογραφίας

Όπως προαναφέρθηκε, όλα τα υλικά σε μια θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια – θερμική ακτινοβολία, η οποία μεταδίδεται στο χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας, το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες), οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία. Ο

ρυθμός εκπομπής ενέργειας, Φ, ανά μονάδα επιφανειακής περιοχής του υλικού σχετίζεται με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας Τ, με βάση το νόμο των Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \varepsilon\sigma T4$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και ε η εκπεμπτικότητα του υλικού.

Ενώ σύμφωνα με το νόμο εκτοπίσματος του Wien :

$$\lambda \max = b/T$$

λ max: μήκος κύματος της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας (μm)

και b: σταθερά εκτοπίσματος Wien (2.897 μm/K)

που συσχετίζει την επιφανειακή θερμοκρασία με το μέγιστο μήκος κύματος της εκπεμφθείσας ενέργειας.

Οι επιφανειακές θερμοκρασιακές μεταβολές, προκαλούμενες από εσωτερικές ανωμαλίες στο σώμα, εξαρτώνται από τον τύπο, το μέγεθος και το βάθος των ανωμαλιών. Η επιφανειακή θερμοκρασία μετράται μέσω μέτρησης της εκπεμφθείσας ακτινοβολίας. Η ακριβής μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εξαρτάται από την επιφάνεια και τα χαρακτηριστικά του υλικού, όπως η εκπεμπτικότητα και από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η μεταγωγή, η θερμότητα ψύξης, η ατμοσφαιρική εξασθένιση και άλλες πηγές παρέμβασης.

Παράμετροι υπέρυθρης θερμογραφίας

Παράμετροι ακτινοβολίας σώματος

1. εκπεμπτικότητα **ε**: η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας
2. απορροφητικότητα **α** : η ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας
3. διαπερατότητα **τ**: η ικανότητα προσπέλασης της ακτινοβολίας μέσα από το σώμα
4. ανακλαστικότητα **ρ**: η ικανότητα ανάκλασης της ακτινοβολίας

Από το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα ισχύει : **ε+ρ+τ=1**.

Οι πιο κρίσιμες παράμετροι ακτινοβολίας είναι η εκπεμπτικότητα **ε** και η ανακλαστικότητα **ρ.** Για αυτό και επιβάλλεται πάντα ο προσδιορισμός τους. Η διαπερατότητα **τ** συνήθως είναι μικρή έως μηδενική και δεν λαμβάνεται υπόψη μιας και τα σώματα που εξετάζονται συνήθως είναι αδιαφανή. Σε αντίθετη περίπτωση όμως πρέπει να υπολογίζεται γιατί επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις.

Εξωτερικές-Περιβαλλοντικές παράμετροι

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η ύπαρξη εξωτερικών θερμικών πηγών στο χώρο των μετρήσεων, όπως θερμαντικά σώματα. Έτσι μετρήσεις κάτω από πολύ δυνατή ηλιοφάνεια είναι δυσχερείς, μιας και το ποσοστό των ανακλάσεων είναι πολύ υψηλό και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, με αποτέλεσμα αυτό που μετράται να μην είναι αυτό που πραγματικά εκπέμπει το σώμα. Πολλές φορές, η χρήση εξωτερικών θερμικών πηγών βοηθάει στη λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων (ενεργητική θερμογραφία). Αντίστοιχα, μετρήσεις κάτω από ισχυρή ψύξη (ισχυροί άνεμοι, σώματα κλιματισμού) μας οδηγούν σε εσφαλμένη εκτίμηση της θερμοκρασιακής κατάστασης του σώματος λόγω της βεβιασμένης ψύξης του.

Προσδιορισμός εκπεμπτικότητας ε

Η αρχή του Stefan-Boltzmann σχετίζει την επιφανειακή θερμοκρασία ενός αντικειμένου με την εκπεμφθείσα από αυτό ακτινοβολία. Η ικανότητα ακτινοβολίας είναι μια ιδιότητα επιφάνειας που εξαρτάται κυρίως από το υλικό, την τραχύτητα, την ύπαρξη επιφανειακών στρωμάτων και τον βαθμό πόλωσης της επιφάνειας. Η εκπεμπτικότητα είναι ο λόγος της ακτινοβολίας ενός σώματος σε μία δοσμένη θερμοκρασία προς την ακτινοβολία ενός σώματος που απορροφά όλη την ακτινοβολία, στην ίδια θερμοκρασία και κυμαίνεται μεταξύ 0 (για έναν τέλειο ανακλαστήρα) και 1 (για έναν τέλειο πομπό, το αποκαλούμενο μέλαν σώμα).

Επιφάνειες με χαμηλή ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας, λειτουργούν ως καθρέφτες και καθιστούν τις μετρήσεις δύσκολες, δεδομένου ότι οι εξωγενείς ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα θερμά γειτονικά σώματα διαταράσσουν τις μετρήσεις μέσω των ανακλάσεων. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για να λύσουν το πρόβλημα της χαμηλής εκπεμπτικότητας ε. Συνηθέστερη όλων είναι η κάλυψη της επιθεωρούμενης επιφάνειας με ένα χρώμα υψηλής ικανότητας ακτινοβολίας (συντελεστής εκπομπής 0.8 και άνω).

Στα μη μεταλλικά αντικείμενα η θερμογράφηση είναι εύκολη λόγω της υψηλής εκπεμπτικότητας των υλικών. Αντίθετα στα μεταλλικά και γυάλινα αντικείμενα είναι δύσκολη λόγω της χαμηλής και εξαρτώμενης από το μήκος κύματος εκπεμπτικότητας.

Έτσι είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός του ε, πριν από κάθε θερμογράφηση, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις στη θερμοκάμερα, βάσει των οποίων θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Η απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη

τεχνική από τους θερμογράφους είναι αυτή με τη χρήση μιας μαύρης ταινίας. Σύμφωνα μ' αυτήν την τεχνική τοποθετείται μια μαύρη ταινία στην επιφάνεια του σώματος που ενδιαφέρει και μετράται πάνω της με τη θερμοκάμερα η θερμοκρασία της, όπου είναι γνωστό ότι το ε=1 (ορισμός μέλανος σώματος). Έπειτα εστιάζει η θερμοκάμερα στην ακάλυπτη περιοχή πάνω στην επιφάνεια του σώματος και αλλάζει η εκπεμπτικότητα στο όργανο καταγραφής, μέχρι αυτό να μας δείξει την ίδια θερμοκρασία που μετρήθηκε και στην ταινία. Η εκπεμπτικότητα ε, που προκύπτει για την ίδια θερμοκρασία Τ που βρέθηκε στη μαύρη ταινία, είναι η ζητούμενη εκπεμπτικότητα του σώματος. Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι το ε κατά τη θερμογράφηση μεταβάλλεται αλλάζοντας τη γωνία θερμογράφησης του αντικειμένου, δηλαδή το ε που μετράται πάντα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη γωνία.

2.2.3 Τεχνικές θερμογράφησης

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τεχνικές, την ενεργητική και την παθητική. Η παθητική θερμογραφία εξετάζει τα υλικά και τις δομές που σε φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζουν διαφορετική (συχνά υψηλότερη) θερμοκρασία από το περιβάλλον, ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογράφησης, είναι απαραίτητο ένα εξωτερικό ερέθισμα για να προκαλέσει τις σχετικές θερμικές διαφορές. Η παθητική θερμογραφία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε πλήθος εφαρμογών της βιομηχανίας, της προληπτικής συντήρησης, ιατρικής, δασικής πυρανίχνευσης, γεωργίας, βιολογίας, ανίχνευσης αερίων και στη μη καταστρεπτική δοκιμή. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, εντοπίζονται ασυνήθιστες θερμοκρασίες σε σχέση με το περιβάλλον και υποδεικνύουν σημεία που πιθανόν χρήζουν προσοχής.

Αντίθετα με την παθητική θερμογραφία, στην ενεργητική, απαιτείται ένα εξωτερικό ερέθισμα για να παραγάγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας που σε φυσιολογικές συνθήκες δεν υπάρχουν. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος (π.χ. χρόνος t_0 που εφαρμόζεται) επιτρέπουν ποσοτικούς χαρακτηρισμούς, όπως παραδείγματος χάριν το βάθος της ανιχνευόμενης ατέλειας. Ανάλογα με το είδος του εξωτερικού ερεθίσματος έχουν αναπτυχθεί τα εξής είδη ενεργητικής θερμογραφίας:

. *θερμογραφία παλμού*, όπου το ερέθισμα είναι ένας παλμός (κυρίως για λεπτά υλικά - πρόσκαιρη θερμογράφηση)

. *θερμογραφία βήματος*, όπου το ερέθισμα είναι ένα τετραγωνικό κύμα, είτε σε μορφή βήματος είτε σε περιοδική διαδικασία.

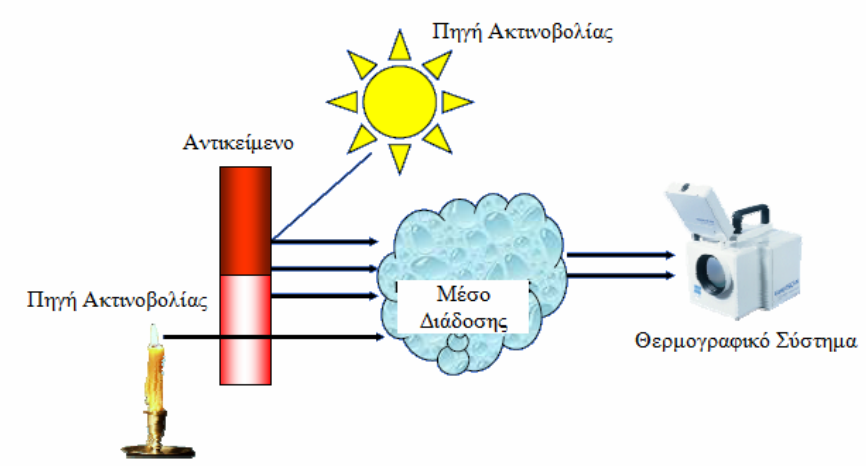
. *Lockin θερμογραφία*, όπου ένα κύμα χαμηλής συχνότητας παράγεται στην επιφάνεια του δείγματος χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη λάμπα, ώστε αυτό το κύμα να πολλαπλασιάζεται και να διαχέεται μέσα σε όλο το υλικό.

. *Viobrothermography*, όπου το ερέθισμα είναι μηχανικές δονήσεις που εφαρμόζονται πάνω στο σώμα σε σταθερές συχνότητες.

Γενικά η παθητική θερμογραφία είναι απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, από την άλλη όμως, η ενεργητική θερμογραφία επεμβαίνει σε περιπτώσεις όπου η παθητική θερμογράφηση είναι αδύνατη, ενώ επίσης παρέχει τη δυνατότητα για ποσοτικούς προσδιορισμούς του σφάλματος.

2.2.4 Θερμογραφικά απεικονιστικά συστήματα

Ένας υπέρυθρος θερμικός απεικονιστής είναι μια φωτογραφική μηχανή που ανιχνεύει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ακτινοβολείται στην υπέρυθρη (IR) φασματική ζώνη από ένα αντικείμενο (του οποίου η θερμοκρασία πρέπει να μετρηθεί) και την μετατρέπει σε ένα ηλεκτρονικό σήμα που καταγράφεται ψηφιακά. Συγκεκριμένα η ενέργεια ακτινοβολείται από το αντικείμενο μέσω ενός μέσου (συνήθως τον αέρα) και εν συνεχεία προσλαμβάνεται από το αισθητήριο σύστημα, όπου περνά πρώτα απ' τον φακό, το φίλτρο και τελικά καταλήγει σ' έναν υπέρυθρο ανιχνευτή ή σ' έναν επιφανειακό εστιακό αισθητήρα - Focal Plane Array (FPA), οι οποίοι μετατρέπουν την ακτινοβολία σε ηλεκτρονικό σήμα. Τα υπέρυθρα συστήματα πρώτης γενιάς, που είναι εξοπλισμένα με έναν απλό ενιαίο ανιχνευτή, χρησιμοποιούν επίσης έναν επιπλέον μηχανισμό σάρωσης και για αυτόν τον λόγο καλούνται συμβατικά υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης (IR Scanning Radiometer-IRSR). Αντίθετα οι υπέρυθρες φωτογραφικές μηχανές με αισθητήρια στοιχεία FPA, αν και δεν περιλαμβάνουν μηχανισμό σάρωσης, εντούτοις παρέχουν εικόνες αντίστοιχες με αυτές από ηλεκτρονική σάρωση, γι' αυτό και αναφέρονται συνήθως ως IRSR.



Εικόνα 10 : Ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι μετρήσεις που γίνονται με τη βοήθεια των φασματικών ραδιόμετρων είναι γενικά βασισμένες στον νόμο του Planck που αναλύθηκε παραπάνω. Στις υπέρυθρες φωτογραφικές μηχανές αν και χαρακτηρίζονται συχνά ως ραδιόμετρα συνολικής ακτινοβολίας, η ικανότητα αίσθησης των ανιχνευτών τους περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο πλάτος του υπέρυθρου φάσματος.

Στην πραγματικότητα, οι υπέρυθροι ανιχνευτές εκτελούν μετρήσεις σε δύο διαφορετικές περιοχές της υπέρυθρης ζώνης: στην περιοχή μικροκύματος (short wave-SW) και σ' αυτήν των μακρών κυμάτων (long wave-LW). Η επιλογή της κατάλληλης φασματικής ζώνης (SW ή LW) εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες. Μερικές επιφάνειες έχουν υψηλότερη ικανότητα ακτινοβολίας στη περιοχή SW. Χαμηλού κόστους ανιχνευτές καθώς και θερμοηλεκτρικά ψυχόμενοι ανιχνευτές είναι επίσης διαθέσιμοι σε αυτήν την ζώνη. Εντούτοις, παρά το σχετικά υψηλό ατμοσφαιρικό συντελεστή μετάδοσης, συνήθως η περιοχή SW παρέχει μετρήσεις υψηλότερης ακριβείας για αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός μέτρου. Από την άλλη στην περιοχή των μακροκυμάτων (LW) λόγω των υψηλών θερμικών διαφορών που παρουσιάζονται επιτυγχάνονται καλύτερες αποδόσεις των θερμογραφικών συστημάτων.

Ο ανιχνευτής είναι ο πυρήνας του θερμογραφικού συστήματος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι ανιχνευτές είναι οι αποκαλούμενοι ανιχνευτές φωτονίων, στους οποίους η δημιουργία ή η μεταφορά των ηλεκτρονίων συνδέεται άμεσα με την απορρόφηση φωτονίων. Το βασικό χαρακτηριστικό των ανιχνευτών φωτονίων είναι ότι έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (της τάξης των μικροδευτερολέπτων) αλλά απαιτούν ψύξη αρκετά κάτω από την περιβαλλοντική θερμοκρασία, ώστε να έχουν υψηλή

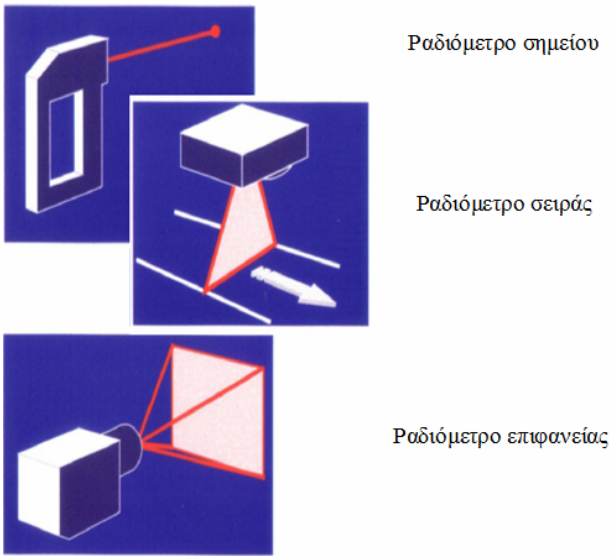
ευαισθησία και γρήγορη ανίχνευση (εάν είναι απαραίτητο). Η ψύξη των αισθητήρων γίνεται συνήθως με υγρό άζωτο.

Όταν το αισθητήριο στοιχείο είναι ένας απλός ανιχνευτής ή ανιχνευτής σημείου, προκειμένου να λάβει την ενέργεια από διαφορετικά μέρη του οπτικού πεδίου (δηλ. για να ανιχνεύσει το αντικείμενο), πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος ηλεκτρομηχανικός μηχανισμός ανίχνευσης. Αυτός ο μηχανισμός ανίχνευσης μπορεί να αποτελείται από μετακινούμενους καθρέφτες ή από διαθλαστικά στοιχεία (όπως πρίσματα) ή από ένα συνδυασμό και των δύο. Για τη δισδιάστατη απεικόνιση, ένας τέτοιος μηχανισμός επιτρέπει την ανίχνευση του αντικειμένου και στις κάθετες και στις οριζόντιες κατευθύνσεις. Τα υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης που ανιχνεύουν το αντικείμενο μόνο σε μια κατεύθυνση (μονοδιάστατο IRSR) είναι κατάλληλα είτε κατά τη μέτρηση των θερμοκρασιών αντικειμένων που κινούνται σε μία κάθετη κατεύθυνση ως προς την ανίχνευση, είτε λόγω της πολύ υψηλής ταχύτητας ανίχνευσης που παρουσιάζουν στη μελέτη των γρήγορων παροδικών φαινόμενων.

Πριν φθάσει στον ανιχνευτή, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνά μέσω των ειδικά σχεδιασμένων φακών. Τα υλικά των φακών που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλή διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία όπως το γερμάνιο, το πυρίτιο, ή ο σάπφειρος. Επιπλέον, οι φακοί πρέπει να επικαλυφθούν με ένα κατάλληλο υλικό για να επιτρέψουν τη μέγιστη δυνατή μετάδοση IR. Η χρήση φίλτρων επιτρέπει, επίσης, να γίνεται απεικόνιση μέσω ειδικών συνθηκών ή να μετράται η θερμοκρασία επιφάνειας αντικειμένων όπως το γυαλί, το πλαστικό, ή ακόμα και των φλογών. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ανάλογα την περίπτωση είτε χαμηλοπερατά είτε υψηλοπερατά.

Το εύρος των τιμών θερμοκρασίας που μετράει ένα τυπικό θερμογραφικό σύστημα κυμαίνεται περίπου από -20 ως 800 °C, και μπορεί να επεκταθεί μέχρι 1500-2000 °C με τη χρηη ειδικών φίλτρων. Κάθε θερμοκάμερα προτού φτάσει στον αγοραστή πρέπει να τίθεται σε διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) από τον κατασκευαστή. Η βαθμονόμηση είναι μια ειδική διαδικασία που γίνεται από τον κατασκευαστή με τη χρήση μελανών σωμάτων αναφοράς και προσδιορίζει μέχρι ποια τιμή θερμοκρασίας μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια η θερμοκάμερα. Πέρα από τη θερμοκρασία της βαθμονόμησης η θερμοκάμερα συνεχίζει να καταγράφει τιμές αλλά με μειωμένη ακρίβεια. Σε κάθε παραγγελία θερμογραφικού συστήματος ο ενδιαφερόμενος πρέπει να ζητάει από τον κατασκευαστή το πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

Τα τρία βασικά είδη υπέρυθρων ραδιομέτρων όσον αφορά τη σάρωση φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 11 : Ραδιόμετρο σημείου, ραδιόμετρο σειράς (ή λωρίδας) και ραδιόμετρο επιφανείας

Γεωμετρική ανάλυση

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο κάθε απεικονιστικού συστήματος είναι η χωρική ανάλυση της παραγόμενης εικόνας. Η γεωμετρική ανάλυση εικόνας είναι η ικανότητα ενός συστήματος θερμικής απεικόνισης που ανιχνεύει και που μετρά ακριβώς τη θερμοκρασία, να απεικονίζει μικρά κομμάτια της επιφάνειας του αντικειμένου. Η ανάλυση καθορίζεται γενικά από χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, όπως το μέγεθός του και για τα συστήματα ανίχνευσης από το χρόνο απόκρισης.

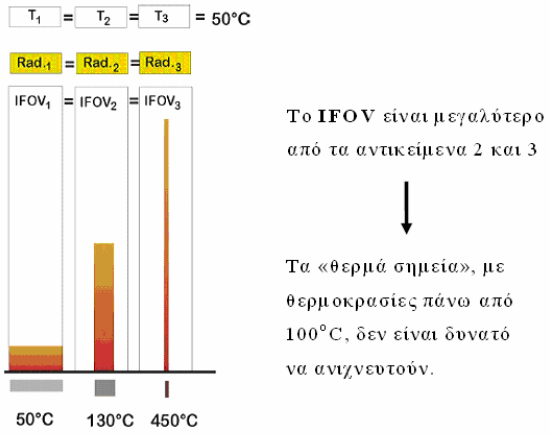
Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί δύο σημαντικών παραμέτρων της γεωμετρικής ανάλυσης ενός συστήματος του IFOV και FOV.

Το **IFOV** (Instantaneous Field of View) σε ένα θερμόμετρο ακτινοβολίας καθορίζει το μέγεθος των σημείων-στόχων σε μία σάρωση γραμμής και αντιπροσωπεύει ένα pixel σε μια γραμμή ανίχνευσης ή θερμογράμματος και είναι μέτρο της χωρικής ανάλυσης (Αϊβαλιώτης-Θεοφράστου, 2008). Το IFOV καθορίζεται από το οπτικό σύστημα του οργάνου, το μέγεθος του αισθητήρα και από τον τρόπο της σάρωσης (Μαργιώτης, 2007).

Το **FOV** (Field of View) εκφράζει το οπτικό πεδίο μέσα στο όποιο, το όργανο θα μετρήσει όλη την εισερχόμενη ενέργεια ακτινοβολίας. Το FOV σ' έναν υπέρυθρο ανιχνευτή καθορίζει τη γωνία σάρωσης και το μέγεθος του συνολικού πεδίου μιας εικόνας.

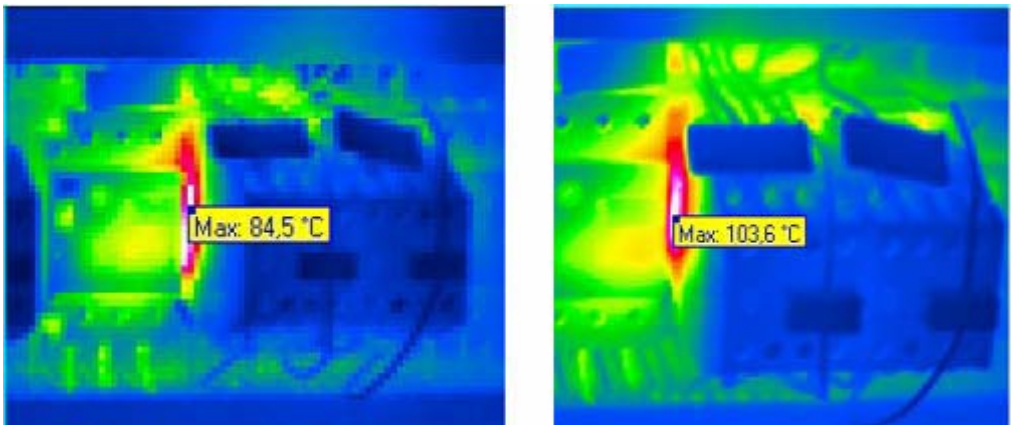
Όσο μεγαλύτερη είναι η γεωμετρική ανάλυση ενός συστήματος τόσο πιο ακριβή είναι τα θερμογράμματα. Αυξάνοντας την απόσταση από το αντικείμενο, αυξάνει και η

συνολική επιφάνεια (FOV) που «βλέπει» η θερμοκάμερα, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο κάθε pixel του αισθητηρίου, δηλαδή μειώνεται αναλογικά η δυνατότητα της θερμοκάμερας να «δει» λεπτομέρειες. Γενικά για ακρίβεια στις μετρήσεις πρέπει το IFOV να είναι πάντα μικρότερο (ή το πολύ ίσο) από το μέγεθος του αντικείμενου. Σε διαφορετική περίπτωση, επειδή η θερμοκάμερα μετράει το μέσο όρο των θερμοκρασιών που αντιστοιχούν στο IFOV, μπορεί να προκύψουν εσφαλμένες μετρήσεις, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 12 : Εξάρτηση της ακρίβειας των μετρήσεων από το IFOV

Παρατηρείται ότι το θερμογραφικό σύστημα μετράει και τα τρία αντικείμενα στους 50°C, αφού τα αντικείμενα 2 και 3 είναι μικρότερα από το IFOV και δεν μπορεί να μετρηθεί η πραγματική τους θερμοκρασία.

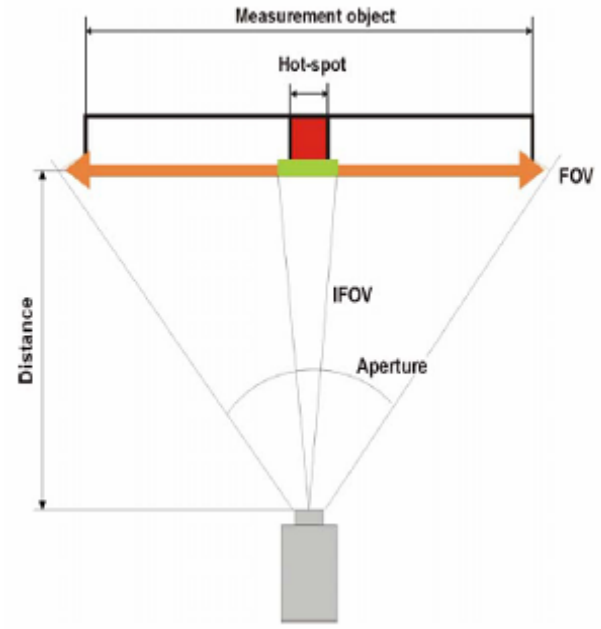


Ανιχνευτής 160 * 120 pixels Ανιχνευτής 320 * 240 pixels

Εικόνα 13 : Γεωμετρική ανάλυση θερμοκάμερας

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης με την αύξηση της γεωμετρικής (χωρικής) ανάλυσης.

Απαιτήσεις ακριβούς μέτρησης



Εικόνα 14 : Παράμετροι θερμογραφικής λήψης

- Η απόσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της ελάχιστης απόστασης εστίασης
- Ακριβής εστίαση
- Σωστή επιλογή θερμοκρασιακής κλίμακας (αυτόματα ή χειροκίνητα)
- Το FOV πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του μεγέθους του μετρούμενου αντικειμένου
- Το IFOV πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το 1/2.5 του μεγέθους του θερμού σημείου για ακριβείς μετρήσεις (Αϊβαλιώτης-Θεοφράστου, 2008)

2.3 Παθητική θερμογραφία

Η στατική (παθητική) θερμογραφία είναι βασισμένη στις μετρήσεις θερμοκρασίας με χρήση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας των αντικειμένων που εξετάζονται. Κατά την παθητική μέθοδο καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας.

Σε μερικές περιπτώσεις με τη γνώση της θερμοκρασίας, η διανομή του παράγοντα ικανότητας ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό της επιφάνειας των αντικειμένων. Η παθητική υπέρυθρη θερμογραφία λειτουργεί σε 2 σειρές

μήκους κύματος, 3-5 μm (SWIR) και 8-12 μm (LWIR). Η υπέρυθρη ενέργεια ακτινοβολίας (IR) εξαρτάται από την επιλεγμένη σειρά μήκους κύματος για τα χαμηλής θερμοκρασίας αντικείμενα και είναι πολύ υψηλότερη για μεγάλα μήκη κύματος. Δεδομένου ότι τα αρχιτεκτονικά μνημεία έχουν σχεδόν την περιβαλλοντική θερμοκρασία, ο εξοπλισμός LWIR IR θεωρείται κατάλληλος. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές IR αποτελεσματικά, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

- κατάσταση της επιφάνειας,
- υλική σύσταση του αντικειμένου, θερμοκρασία,
- υγρασία,
- ζωντανοί οργανισμοί όπως τα βακτηρίδια και τα μανιτάρια, χημικές και βιολογικές διαδικασίες όπως η ζύμωση (Νικολάου-Στεργίου, 2009).

Η υπέρυθρη κάμερα βρίσκεται σε κάποια απόσταση από τα υπό εξέταση αντικείμενα και αναζητά θερμοκρασιακές ανωμαλίες. Καθώς δεν υπάρχει εξωτερική πηγή θερμότητας, τα εξαρτήματα που χρειάζονται για μια θερμογράφηση είναι:

1. Υπέρυθρη κάμερα.
2. Οπτικά εξαρτήματα (τηλεσκόπια, μηχανισμοί εστίασης και ζουμ).
3. Τρίποδας στήριξης.
4. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα και εξοπλισμός ανάλυσης.
5. Συσκευή μαγνητοσκόπησης (σε ορισμένες περιπτώσεις).
6. Ηλεκτρονικός υπολογιστής (αν και η επεξεργασία εικόνας μπορεί να γίνει σε κάποια άλλη στιγμή).
7. Γεννήτρια (σε ορισμένες περιπτώσεις).
8. Σύστημα ψύξης (αν η κάμερα δεν έχει ενσωματωμένο σύστημα και απαιτεί τακτική ψύξη) .

Οι σημαντικές εφαρμογές της παθητικής προσέγγισης είναι στην παραγωγή, προληπτική συντήρηση, ιατρική, πυρανίχνευση, προγράμματα θερμικής αποδοτικότητας κτιρίων, έλεγχος οδικής κυκλοφορίας, γεωργία και βιολογία, ανίχνευση αερίου και μη καταστρεπτικές δοκιμές. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, μη κανονικά θερμοκρασιακά αποτελέσματα δείχνουν ένα πιθανό πρόβλημα που πρέπει να προσεχθεί. Βασικά, η παθητική θερμογραφία είναι περισσότερο ποιοτική προσέγγιση καθώς ο στόχος της είναι απλά να αναδείξει κάποια ανωμαλία και όχι να αποσπάσει περαιτέρω πληροφορίες

Τα περισσότερα από τα αρχιτεκτονικά αντικείμενα αποτελούνται από πολυστρωματικές δομές. Φαίνεται ότι λόγω των θερμικών φαινομένων, τα εσωτερικά στρώματα μπορούν να

ασκήσουν επίδραση στη κατανομή της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια. Εξαρτάται από το πάχος και τις θερμικές ιδιότητες του πρώτου στρώματος, καθώς επίσης και τη θερμική ικανότητα των στρωμάτων από μέσα. Τα πυκνά υλικά μπορούν να συσσωρεύσουν τη θερμότητα για πολύ, κάτι που μπορεί να είναι ορατό στην επιφάνεια, ακόμα κι αν προέρχεται από το εσωτερικό. Στην πράξη, το θερμαινόμενο αντικείμενο κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να ελεγχθεί θερμικά τη νύχτα. Τέτοια έρευνα μπορεί να οδηγήσει στο να καθοριστεί π.χ. το πάχος, η ηλικία και το υλικό περιεχόμενο του ασβεστοκονιάματος (Ρογκότης, 2012).

2.3 Η Θερμοκάμερα

2.3.1 Θερμοκάμερα

Η θερμοκάμερα είναι μια ανιχνευτική διάταξη η οποία μετράει την ακτινοβολία που προσπίπτει στον φακό και με κατάλληλες βαθμονομήσεις την "μεταφράζει" σε θερμοκρασία. Πρακτικά, παρουσιάζει την επιφανειακή θερμοκρασία των σωμάτων στα οποία εστιάζει.

Σημαντικό στοιχείο μιας θερμοκάμερας είναι ο ανιχνευτής θερμότητας. Συχνά αναφέρεται και ως οπτικός δέκτης. Αποτελεί την καρδιά κάθε συστήματος που μετρά την υπέρυθρη ακτινοβολία και συνεπώς χρησιμοποιείται σε κάθε θερμογραφική εργασία. Η αγορά των ανιχνευτών ακτινοβολίας υπολογίζεται ότι πλησιάζει τα 10 δισεκατομμύρια δολάρια (μέτρηση 1999) και αυξάνει κατά 30% κάθε χρόνο. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους, επιγραμματικά, είναι η εσωτερική αντίσταση του δέκτη, ο χρόνος απόκρισής του, ο λόγος ισχύος-θορύβου, ο λόγος θερμοκρασιακής διαφοράς-θορύβου, η παρατηρησιμότητα, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη θερμοκρασιακή διαφορά (γνωστή και ως ευαισθησία), η συνάρτηση γραμμικής εξάπλωσης και η υποβάθμιση του σήματος.

Οι ανιχνευτές θερμότητας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους θερμικούς και τους φωτονικούς.

Στους θερμικούς ανιχνευτές, η προσπίπτουσα ακτινοβολία θερμαίνει την ευαίσθητη επιφάνεια και η θέρμανση επηρεάζει κάποια ιδιότητα του υλικού όπως η θερμική αγωγιμότητα. Αυτό το γεγονός μεταφράζεται ως μια διακύμανση στο σήμα εξόδου. Σημαντικό χαρακτηριστικό των θερμικών δεκτών είναι η ανεξαρτησία από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Γι’ αυτό και όταν κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι το επιθυμητό, είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί κάποιο φίλτρο που θα απορρίπτει τις ακτινοβολίες με διαφορετικά, από το επιθυμητό, μήκη κύματος. Παραδείγματα

θερμικών ανιχνευτών είναι τα βολόμετρα, οι θερμοσωροί, οι πυροηλεκτρικοί δέκτες και οι υγροί κρύσταλλοι.

Στους φωτονικούς ανιχνευτές, το σήμα λαμβάνεται από την απευθείας μέτρηση της διέγερσης που προκαλείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Με την σειρά τους, οι φωτονικοί ανιχνευτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους φωτοεκπεμπόμενους και τους κβαντικούς.

Από την μέχρι τώρα εξέταση των ανιχνευτών ακτινοβολίας προκύπτει ότι στην έξοδό τους καταλήγει ένα σήμα εξαρτώμενο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον φακό. Από το συγκεκριμένο σήμα τελικά θα προκύψει μια οπτική αναπαράσταση. Παράγεται, λοιπόν, μια σειρά σημείων (είναι ευρέως γνωστά και ως pixel) είτε σε μία, είτε σε δύο διαστάσεις. Παρόλη την ύπαρξη ειδικών φιλμ για απεικόνιση των υπέρυθρων εικόνων, στην πράξη, τα φιλμ δεν έχουν μεγάλη αξία. Στις μη καταστρεπτικές εφαρμογές προτιμάται η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο.

Υπάρχουν δύο βασικές διαδικασίες για τον σχηματισμό της εικόνας. Ο άμεσος σχηματισμός εικόνας (πχ με πυροηλεκτρικό δέκτη ή με φιλμ) και ο σχηματισμός εικόνας με χρήση ενός δέκτη και ενός ηλεκτρομηχανικού σαρωτή της σκηνής.

Δύο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν, άμεσα, την εικόνα μιας θερμοκάμερας είναι η ευαισθησία και η ανάλυση (θερμοκρασιακή και χωρική).

Η ευαισθησία μετράται σε βαθμούς κελσίου και εκφράζει την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ποσότητα θερμοκρασίας. Θερμοκάμερες με καλή ευαισθησία αναγνωρίζουν θερμοκρασιακές διαφορές ακόμα και $0.025^{o}C$.

Η θερμοκρασιακή ανάλυση είναι ανάλογη του αριθμού των χρωμάτων σε μια οθόνη υπολογιστή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση τόσο πιο ομαλά θα παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές. Αν ένα σώμα έχει ξαφνικές θερμοκρασιακές μεταβολές αυτές θα οφείλονται στο ίδιο το σώμα και όχι στην κάμερα.

Η χωρική ανάλυση της θερμοκάμερας εξαρτάται από των αριθμό των pixel της κάμερας. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στη ψηφιακή φωτογραφία. Όπως μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με 4 Megapixel βγάζει πιο ακριβείς εικόνες από μια μηχανή με 2 Megapixel έτσι και στην περίπτωση της θερμογραφίας, η χωρική ανάλυση αποτελεί μια παράμετρο κλειδί.

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να επισημανθεί είναι το δυναμικό εύρος. Το δυναμικό εύρος εξαρτάται από την ψηφιοποίηση της θερμικής εικόνας. Όσο περισσότερα bits χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της θερμοκρασίας-χρώματος για κάθε pixel

τόσο καλύτερη θεωρείται η θερμοκάμερα. Το δυναμικό εύρος αντικατοπτρίζει, λοιπόν, την θερμοκρασιακή λεπτομέρεια που αποθηκεύεται για κάθε pixel.

Επανάσταση στην υπέρυθρη τεχνολογία αποτέλεσαν οι συστοιχίες εστιακού επιπέδου (FPA κάμερες).

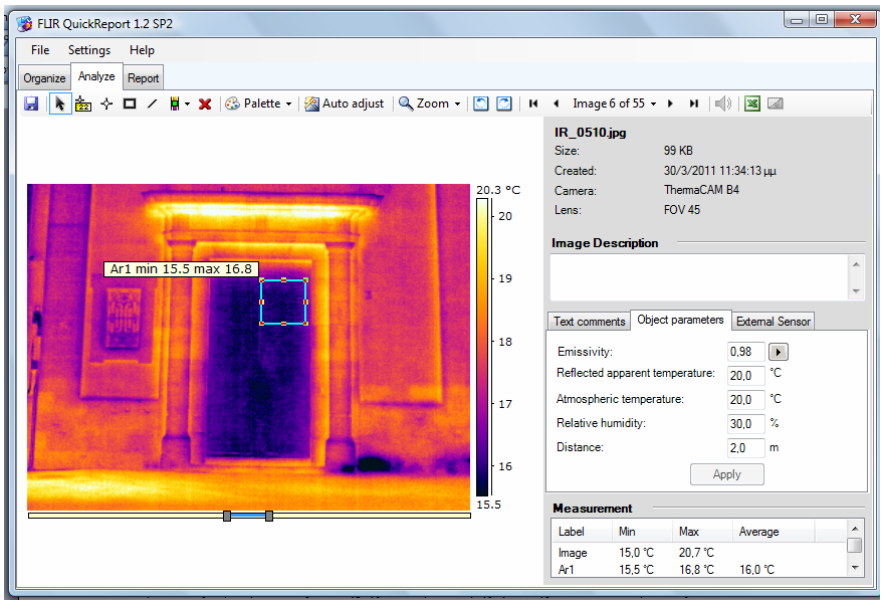
Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στην αρχή της επόμενης δεκαετίας, εμφανίστηκε μια νέα συσκευή απεικόνισης που έφερε την επανάσταση στην επιστημονική κοινότητα. Η χρήση συστοιχιών μεγάλων διαστάσεων απλοποίησε την κατασκευή υπέρυθρων καμερών. Με αυτή την τεχνολογία, το μόνο που χρειάζεται για να κατασκευαστεί μια υπέρυθρη κάμερα, είναι τα οπτικά μέσα, η συστοιχία εστιακού επιπέδου, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και για κάποια ήδη καμερών, ένα σύστημα ψύξης. Όμοια με τα συμβατικά CCD (charge-coupled device) για βίντεο, τα chip της τεχνολογίας FPA, δεν απαιτούν μηχανισμό ηλεκτρομηχανικού σαρωτή για τον σχηματισμό εικόνας. Ακόμα, δεν είναι τόσο εύθραυστα όσο οι πυροηλεκτικοί σωλήνες ούτε δέχονται ανάλογες επιβαρύνσεις. Η βασική δυσκολία που υπάρχει στην κατασκευή καλής ποιότητας καμερών FPA είναι τα υλικά κατασκευής των αισθητήρων (η ίδια δυσκολία συναντάται σε όλες τις κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας). Η χρήση της σιλικόνης, η οποία είναι κλασσικό υλικό κατασκευής, δεν δίνει αποτελέσματα καθώς είναι ευαίσθητη μόνο στο ορατό φως. Μια λύση είναι το κράμα υδράργυρος-κάδμιο-τελούριο ενώ έχουν αναπτυχθεί και πολλές άλλες. Με την λύση του προβλήματος, αναπτύχθηκαν μια σειρά από τεχνολογίες γύρω από την κατασκευή των καμερών FPA. Μοντέρνες κάμερες έχουν φτάσει να παράγουν εικόνες με αναλύσεις 2048x2048 pixel ενώ είναι στην παραγωγή ακόμα μεγαλύτερες αναλύσεις. Μικρότερες αναλύσεις είναι διαθέσιμες και οικονομικά προσιτές για το ευρύ κοινό (Ρογκότης, 2010).

2.3.2 Συστήματα επεξεργασίας υπέρυθρων εικόνων

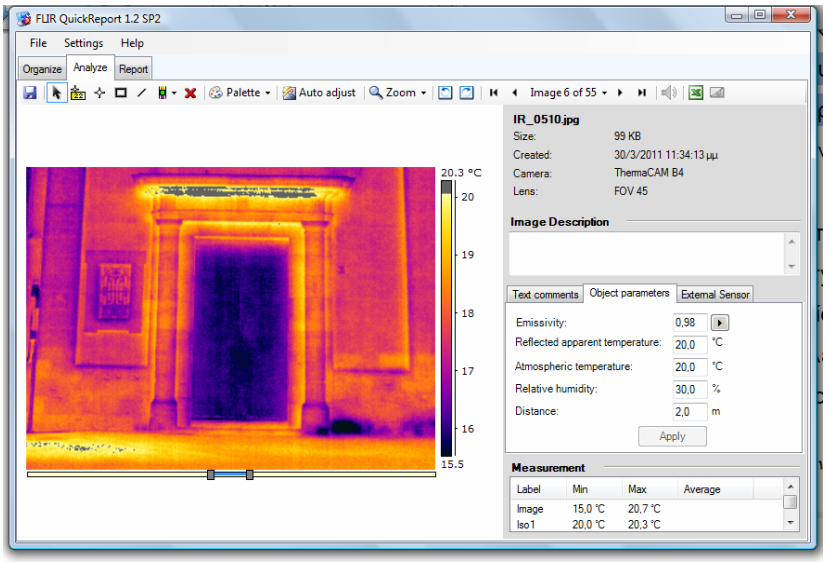
Η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από κάποιο σώμα ενισχύεται και μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρονικό οπτικό σήμα από μια μονάδα επεξεργασίας και παρουσιάζεται σε οθόνη. Αυτή η μονάδα εκτελεί όλους τους λειτουργικούς ελέγχους της υπέρυθρης- IR φωτογραφικής μηχανής. Οι θερμικές εικόνες μπορούν να καταγράφονται συνεχώς από ένα αναλογικό ή ψηφιακό όργανο καταγραφής βιντεοταινίας. Μετά από τη δοκιμή, τα καταγραμμένα στοιχεία μπορούν να επαναληφθούν από το playback και, εάν είναι απαραίτητο, να μετατραπούν από έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα. Η πλήρως αυτοματοποιημένη τεχνολογία απεικόνισης IR επιτρέπει επίσης απευθείας (on line) ψηφιοποίηση και επεξεργασία της καταγραφής. Η εμφάνιση και επεξεργασία των

εικόνων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν ρύθμιση των σαρωτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, εξασφαλίζοντας κατά συνέπεια μεγαλύτερη ακρίβεια ανάλυσης. Μετά από την αναλογική-ψηφιακή μετατροπή, τα καταγραφέντα στοιχεία φορτώνονται σ' έναν υπολογιστή για πολυπλοκότερη ποσοτική ανάλυση.

Κατά το συσχετισμό της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τους ανιχνευτές που εκπέμπεται από τις τρεις βασικές πηγές (αντικείμενο, γειτονικά σώματα και ατμόσφαιρα), το λογισμικό επεξεργασίας εικόνων λαμβάνει υπόψη, μεταξύ άλλων, τις ακόλουθες παραμέτρους: θερμικό επίπεδο, συντελεστής ικανότητας ακτινοβολίας επιφάνειας, τύπος φακών, απόσταση λήψης, αέρας και περιβαλλοντική θερμοκρασία. Ο βασικός τρόπος παρουσίασης των εικόνων μέσω του υπολογιστή είναι γενικά μια χρωματισμένη εικόνα, όπου κάθε χρώμα συσχετίζεται με ένα εύρος θερμοκρασίας. Επίσης φαίνονται οι ισόθερμες καμπύλες, οι οποίες είναι γραμμές στο όριο μεταξύ δύο χρωμάτων που απεικονίζουν σημεία που έχουν την ίδια θερμοκρασία. Το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας μας παρέχει θερμικά σχεδιαγράμματα, ιστόγραμμα συχνότητας θερμοκρασίας σε μια δεδομένη περιοχή, τις διαφορές θερμοκρασίας από διαφορετικές εικόνες, τα σημεία με τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία καθώς επίσης και δυνατότητα μεγέθυνσης και φιλτραρίσματος μιας εικόνας (Αϊβαλιώτης-Θεοφράστου, 2008).



Εικόνα 15 : Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία σε δεδομένη περιοχή



Εικόνα 16 : Σημεία μέγιστης θερμοκρασίας

2.4 Εφαρμογές της θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές, όπου είναι δυνατόν μετρώντας από απόσταση τη θερμοκρασία να εντοπισθούν προβληματικές περιπτώσεις, ή περιπτώσεις που χρήζουν περισσότερης μελέτης εκεί που παρουσιάζεται θερμοκρασιακή διαφορά και απόκλιση από τις επιθυμητές ή προβλεπόμενες τιμές. Αποτελεί την κυριότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου και αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της .Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής της.

Κατασκευές:

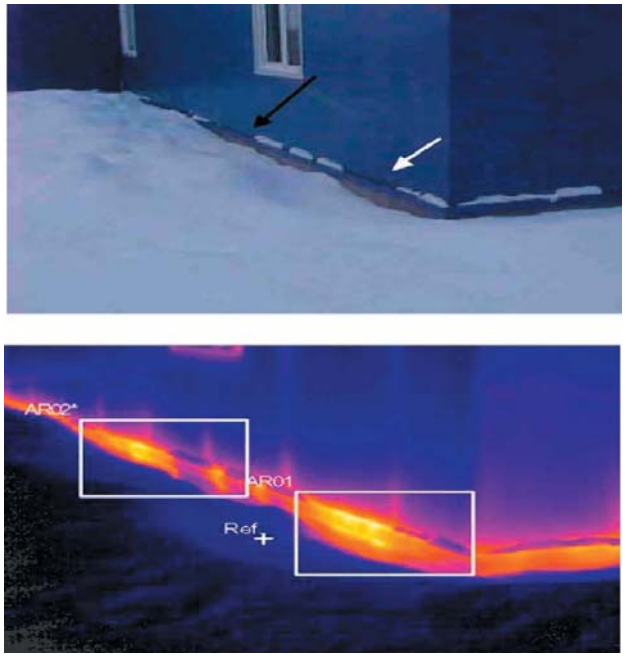
- Κτηριακές εγκαταστάσεις

Η θερμογραφία χρησιμοποιείται στην μελέτη των κατασκευών και των κτηριακών εγκαταστάσεων και βοηθά στον εντοπισμό θερμογεφυρών κακής μόνωσης, διαφυγών θερμού αέρα μέσα από την κατασκευή και κενών ή ρωγμών σε επιφάνειες. Επίσης συμβάλλει στην ανίχνευση υγρασίας και διαρροής νερού και σημείων πιθανής ανάπτυξης μούχλας μέσα στους τοίχους και ειδικά σε στέγες σπιτιών ή βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Χρησιμοποιείται από μηχανικούς για να προσδιορίσουν την ευστάθεια του τσιμέντου και των στρωμάτων του σε κατασκευές όπως γέφυρες ή σε περιπτώσεις που πίσω από μία ενιαία επιφάνεια υπάρχουν διαφορετικά υλικά (πχ ξύλο, πέτρα ή σκυρόδεμα κάτω από μια ενιαία επιχρισμένη επιφάνεια) .

Ακόμη, καταλυτική είναι η χρησιμοποίηση της υπέρυθρης θερμογραφίας στην θερμική επιθεώρηση των κτηριακών εγκαταστάσεων προσδιορίζοντας τη θερμική κατάστασή τους,

τις διαρροές αέρα, καταστραμμένες μονώσεις και υγρασία οπότε τελικά και τις απώλειες θερμότητας και ενέργειας. Δίνει έτσι τη δυνατότητα να επισκευαστεί το πρόβλημα πριν να επεκταθεί και να μελετηθεί η θερμική θωράκιση των κτηρίων. Τα προβλήματα θερμομόνωσης οφείλονται, κυρίως, σε μικρά κενά στις ενώσεις των κατασκευαστικών μελών μεταξύ τους. Οι ατέλειες στη θερμομόνωση και την αεροστεγανότητα ενός κτιρίου δε συνεπάγονται απλώς αυξημένες δαπάνες θέρμανσης και συντήρησης, αλλά επιπλέον δημιουργούν κακές συνθήκες διαβίωσης στους εσωτερικούς χώρους, οπότε πρέπει να γίνει κάθε δυνατή προσπάθεια για επιδιόρθωση (Βούλγαρη, 2011).

- Θερμογραφία σε δομικές κατασκευές, όπως κτήρια, πόρτες κλπ, με σκοπό τον εντοπισμό σφαλμάτων τα οποία προκαλούν θερμικές απώλειες και τυχόν ατελειών των μονώσεων. Επίσης, εφαρμογή της μεθόδου σε γέφυρες μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό τυχόν ρωγμών, ακόμα και υγρασίας στο εσωτερικό των επιφανειών, που μπορεί με το πέρασμα του χρόνου να οδηγήσουν μέχρι και σε πτώση της γέφυρας (Γκαϊτατζή-Οτουζμπίρ, 2011).



Εικόνα 17 : Θερμογραφία σε εξωτερικό τοίχο κτιρίου

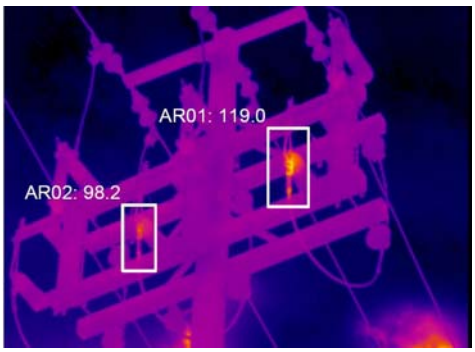
Αρχαιολογία:

- Αποστρωματοποίηση τοιχογραφιών, εντοπισμός ευρημάτων.

Συντήρηση:

- Έλεγχος ανεμιστήρα, συμπιεστή, αγωγών, παγίδων ατμού, διαρροή αερίου (Ρογκότης, 2010).

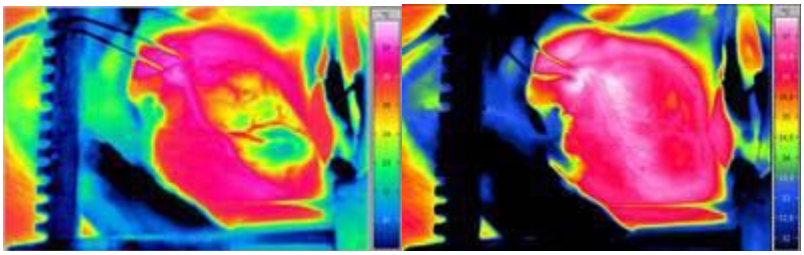
- Θερμογραφία σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, συγκεκριμένα σε τριφασικούς μετασχηματιστές, εναέριες γραμμές μεταφοράς, καλώδια, ηλεκτρικούς κινητήρες ακόμα και στους ηλεκτρικούς πίνακες των σπιτιών.



Εικόνα 18 : Θερμογραφία σε εναέρια γραμμή μεταφοράς

Ιατρική:

- Με τη χρήση θερμοκάμερας μπορεί να γίνει μέτρηση της θερμότητας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του δέρματος του ασθενή. Η διάγνωση των καρδιοπαθειών είναι σήμερα πιο ακριβής από ποτέ χάρη σε αναίμακτες μεθόδους , ενώ νέες τεχνικές, όπως η θερμογραφία που δείχνει μέσω μέτρησης της θερμοκρασίας των αθηρωματικών πλακών ποιες από αυτές είναι επικίνδυνες για πρόκληση εμφράγματος , σώζουν πολλούς ασθενείς (Γκαϊτατζή-Οτουζμπίρ, 2011).



Εικόνα 19 : Θερμογραφία σε καρδιακή χώρα

- θερμική αγγειογραφία της στεφανιαίας αρτηρίας, αλλεργικές αντιδράσεις, όγκοι στο στήθος, ρευματολογία, νευρομυικές διαταραχές, τραυματισμοί ιστών, ροή του αίματος (Ρογκότης, 2010).

Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Συντελεί στον εντοπισμό των περιοχών ταφής αποβλήτων. Χρησιμεύει επίσης στη θερμική καταγραφή θαλάσσιας μόλυνσης των ποταμών (πχ από θερμά πυρηνικά απόβλητα υγρής μορφής) και της παράκτιας μόλυνσης. Μπορεί να εντοπίσει και την ρύπανση των χωματερών και των βιομηχανικών και αστικών περιοχών, αλλά και τις διαρροές πετρελαίου σε εργοστάσια και πλοία .

Γεωργία – Γεωπονία

- Μια θερμική κάμερα μπορεί να παρέχει πολυδιάστατη γνώση για τη διαδικασία της δημιουργίας και εξάπλωσης πάγου στον πυρήνα των καρπών ή των λουλουδιών, των καρποφόρων δέντρων και άλλων ευαίσθητων στον πάγο φυτών. Επίσης, χρησιμοποιείται στη γεωργία, στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας των φυτών και της ωριμότητας των φρούτων και στην ανίχνευση παθογόνων ασθενειών (Βούλγαρη, 2011).

Δημόσιες χρήσεις:

- Ανίχνευση φωτιάς σε δάσος, εντοπισμός ανθρώπων το βράδυ ή σε φωτιές, έλεγχος της κίνησης στους δρόμους, εντοπισμός στόχου (χρησιμοποιείται στον στρατό).

Διάφορες διαδικασίες:

- Αεροστεγή σφράγιση κουτιών, ικανότητα του συστήματος φρένων αυτοκινήτων, διάχυση θερμότητας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, ταυτοποίηση της διαδικασίας ανακύκλωσης, διαδικασία συγκόλλησης, χύτευση μετάλλων.
- Επιθεώρηση της κατασκευής των αεροσκαφών, επιθεώρηση της διαδικασίας συγκόλλησης, ποιότητα συγκόλλησης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, ανίχνευση της χαλάρωσης μπουλονιών, έλεγχος πλαστικού σωλήνα, έρευνα της δομής του ραντάρ.
- Υποβάθμιση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων EPROM, έλεγχος της δομής χαρτιού.

Εντοπισμός ελαττωμάτων και χαρακτηρισμός τους:

- Διάβρωση μετάλλου, εντοπισμός ρωγμών, επίδραση ζημιών σε ενισχυμένο με ανθρακονιάματα πλαστικό, προβλήματα σε λεπίδες στροβίλου, χαρακτηρισμός υποεπιφανειακών ελαττωμάτων (βάθος, μέγεθος, ιδιότητες).
- Φθορά της επίστρωσης, τεστ κόπωσης.

Ιδιότητες:

- Πάχος σε κεραμικά, έρευνα δοκιμής σύνθλιψης.
- Θερμοφυσικές ιδιότητες, χαρακτηρισμός ανισοτροπικού υλικού, υγρασία.
- Μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας σε πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονίματα (Ρογκότης, 2010).

2.5 Εφαρμογή της Θερμογραφίας στην τεκμηρίωση μνημείων

Η μελέτη ιστορικών μνημείων συνήθως πραγματοποιείται με σχετικά διαφορετικά είδη τεχνικών και αρχών, με σκοπό να εξετάσουμε τις αντιδράσεις τους και τις απαιτούμενες ενέργειες ώστε να διατηρηθούν ή να αποκατασταθούν για τις επόμενες γενιές , ως κομμάτι της ανθρώπινης κληρονομιάς.

Στην πραγματικότητα, η αναγνώριση υλικών, η χωρική κατανομή τους, το σχήμα και η επιφάνεια που καλύπτουν στην αρχιτεκτονική πρόσοψη είναι μία από τις πιο σημαντικές και χρονοβόρες εργασίες στην τεκμηρίωση, διατήρηση και αναστήλωση μνημειακών κτιρίων. Μέχρι πρόσφατα, οι εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης γίνονταν με οπτική και άμεση επιθεώρηση στο πεδίο, σχεδιάζοντας στο χέρι τα υλικά ή τα χαρακτηριστικά που αναγνωρίζονταν άμεσα στην πρόσοψη. Επιπλέον, αυτές οι εργασίες ήταν σχετικά χρονοβόρες και απαιτούμενες πριν την επέμβαση για συντήρηση[2].

Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητό να εφαρμόζεται μια μέθοδος βασισμένη στις εικόνες για την εκτίμηση των ζημιών , η οποία επίσης καλύπτει απρόσιτα σημεία της επιφάνειας του κτιρίου. Θα πρέπει επίσης να παρέχει δεδομένα για περαιτέρω ανάλυση και ταξινόμηση των υπαρχόντων παθολογιών. Η προσέγγιση της θερμογραφίας προσφέρει καλές προϋποθέσεις για την αυτοματοποίηση της ανίχνευσης των παθολογιών. Εκτός από τη δομή της επιφάνειας πρέπει να ανιχνευθούν οι συνθήκες πίσω από αυτή και ειδικά οι αλλαγές τους. Σημαντικές βλάβες στις επιφάνειες των κτιρίων είναι η αποσάθρωση, διάβρωση, εμφάνιση αλάτων και βιολογικές αλλαγές, όπως βρύα, λειχήνες, μύκητες και υγρασία. Η ποσοτική μέτρηση της υγρασίας έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού οι περισσότερες από τις υπόλοιπες βλάβες σχετίζονται με την περιεχόμενη υγρασία.

Οι πολυφασματικές τεχνικές προσφέρουν την δυνατότητα της ανίχνευσης βλαβών σε επιφάνειες κτιρίων. Περιοχές της εικόνας μπορούν να αντιστοιχηθούν σε διαφορετικά επηρεασμένες (πχ από υγρασία ή βλάστηση) περιοχές της επιφάνειας. Η διάσταση της κατεστραμμένης περιοχής μπορεί να μετρηθεί ποσοτικά. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα μιας πολυφασματικής ανάλυσης μπορούν να χρησιμεύσουν ως μια βάση για την χαρτογράφηση των παθολογιών, αποδίδοντας ποσοτικά αποτελέσματα της κατεστραμμένης περιοχής και σχετικά με τη φύση της παθολογίας (Αργιαλάς, 1999).

Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται εδώ και 30 χρόνια στην παρακολούθηση κτηρίων, σε ποιοτική ή ποσοτική θεώρηση (Lerma, 2005). Την τελευταία δεκαετία, οι φασματικές απεικονίσεις έχουν κερδίσει έδαφος στο πεδίο της συντήρησης. Βασιζόμενες στις εκτενείς εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας (IRR) στη μελέτη των πινάκων ζωγραφικής, οι φασματικές απεικονίσεις έχουν διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες της υπέρυθρης θερμογραφίας, κύρια με τη χρήση φίλτρων. Αυτή η μη επεμβατική μέθοδος έρευνας, που επιτρέπει την ταυτόχρονη συλλογή φασματικής και χωρικής πληροφορίας επεκτείνοντας τις ικανότητες της διάγνωσης μέσω της απεικόνισης, έχει αποδειχθεί ότι είναι μια χρήσιμη τεχνική για τους συντηρητές. Πρώτα χρησιμοποιήθηκε για επιστημονικές έρευνες πινάκων ζωγραφικής

[2] http://www.thermograph.gr/index.php?/thermograph/

και στη συνέχεια εφαρμόστηκε με επιτυχία στη μελέτη αρχείων, την αξιολόγηση επεξεργασιών συντήρησης και ψηφιακής απεικόνισης για τεκμηρίωση.

Αν και η θερμογραφία είναι μια μέθοδος σχετικά πρόσφατη, οι δυνατότητές της έχουν ήδη εντοπιστεί, μέσα από μελέτες, στις οποίες, για παράδειγμα, έχουν αποδοθεί και ερμηνευθεί ζωγραφικοί πίνακες, έχουν διαχωριστεί και ταυτοποιηθεί χρωστικές ουσίες και μελάνια και έχουν αποκαλυφθεί, ενισχυθεί και μελετηθεί σημαντικά δυσανάγνωστα κείμενα. Το χρώμα, επίσης, έχει αναπαραχθεί ακριβώς σε πολλές περιπτώσεις. Η φασματική απεικόνιση έχει αποφέρει μη επεμβατικές τεχνικές, όπως η υπέρυθρη θερμογραφία, που χρησιμοποιούνται για την μελέτη και συντήρηση αντικειμένων.

Τρείς βασικές κατηγορίες στις οποίες έχει εφαρμοστεί η φασματική απεικόνιση είναι :

- Μελέτη υλικών αρχαιολογικής, πολιτιστικής και ιστορικής αξίας
- Παρακολούθηση και αξιολόγηση μεθόδων συντήρησης
- Ψηφιακή απεικόνιση για τεκμηρίωση και αρχειοθέτηση (Lerma, 2000)

Σχετικά με τις επεμβάσεις συντήρησης και αναστήλωσης σε μνημεία, έχουν υπάρξει πολλά παραδείγματα όπου η χρήση μη συμβατών υλικών ή επεξεργασιών επιτάχυνε την καταστροφή στην ιστορική δομή. Για αυτό το λόγο, επομένως, η ανάπτυξη και χρήση τεχνικών αξιολόγησης για την καταλληλότητα μιας επεξεργασίας συντήρησης είναι επίσης απαραίτητη.

3

Δεδομένα

3.1 Μηχανές συλλογής ψηφιακών δεδομένων - Κάμερες

Συλλογή δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία είναι θερμικές και συμβατικές εικόνες των υπό εξέταση όψεων και αντικειμένων. Για τις θερμικές εικόνες έγιναν λήψεις με την κάμερα ThermaCAM^{TM} B4 και για τις συμβατικές με την Sigma SD15, με φακό εστιακής απόστασης 40mm. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των μηχανών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Η ThermaCAM^{TM} είναι μια θερμική κάμερα η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για επιθεωρήσεις κτιρίων. Η μηχανή Sigma SD15 έχει αισθητήρα Foveon X3. Πρόκειται για μια ακόμη εναλλακτική μορφή αισθητήρα, ο οποίος χρησιμοποιεί έναν υπο-αισθητήρα τριών επιπέδων για το κάθε εικονοστοιχείο (pixel). Το κάθε επίπεδο παράγει ένα από τα τρία βασικά χρώματα RGB. Έτσι, ο υπο-αισθητήρας περιέχει ήδη την πλήρη χρωματική πληροφορία και δεν χρειάζεται η μαθηματική παρεμβολή που εφαρμόζεται στην έξοδο των αισθητήρων Bayer αλλά ούτε και το φίλτρο αντιαλίασης (Βούλγαρη, 2011).

Η λήψη των εικόνων πραγματοποιήθηκε στις 31 Μαρτίου 2011, με ηλιοφάνεια σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Εδώ σημειώνεται ότι είναι προτιμότερη μια μέρα με συννεφιά, ώστε να αποφευχθεί η επιρροή έντονης ηλιοφάνειας ή σκιάς, όμως ο εξοπλισμός ήταν διαθέσιμος τη συγκεκριμένη ημερομηνία. Η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί θερμικές λήψεις όλη τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε να καταγραφούν οι μεταβολές της θερμοκρασίας των υλικών στη διάρκεια αυτή, καθώς μεταβάλλεται και η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ανάλυση των δεδομένων βασίζεται στην μελέτη της μεταβολής των θερμοκρασιών και για το σκοπό αυτό οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές ώρες μέσα στη μέρα, με κατά το δυνατόν ίση χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων. Συγκεκριμένα, οι ώρες αυτές ήταν 23:20, 08:34 το επόμενο πρωί,

13:55, 16:45 και 21:00 περίπου. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις, φαινόμενα σκιάς κατέστησαν υποχρεωτική την εξαίρεση κάποιων από αυτές τις εικόνες από τη διαδικασία και έτσι, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες, η επεξεργασία έγινε με τέσσερις και όχι και με τις πέντε διαθέσιμες εικόνες. Η ύπαρξη σκιάς στις εικόνες εμποδίζει τη σωστή ανάγνωση και ερμηνεία της εικόνας, απεικονίζει μια θερμοκρασία η οποία είναι έντονα επηρεασμένη από το φαινόμενο και δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση του υλικού. Επομένως, με τη συμμετοχή της μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό είναι υποχρεωτικό να μην εισαχθεί στη διαδικασία.

Όσον αφορά στις συμβατικές εικόνες ήταν απαραίτητη μια εικόνα για κάθε ένα από τα αντικείμενα. Η εικόνα αυτή πρέπει να περιλαμβάνει το αντικείμενο στο σύνολό του, χωρίς εμπόδια και με την ελάχιστη δυνατή ύπαρξη σκιάς. Έτσι, ανάλογα με τον προσανατολισμό κάθε όψης ή αντικειμένου η αντίστοιχη εικόνα τραβήχτηκε διαφορετική ώρα της ημέρας, όταν ελαχιστοποιούνταν η ύπαρξη σκιάς.

Ταυτόχρονα με την λήψη εικόνων καταγράφονταν οι καιρικές συνθήκες, οι οποίες δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά στη διάρκεια της ημέρας, και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Θερμική Κάμερα

ThermaCAM *TM* B4

Εικόνα 20 : ThermaCAM B4

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά ThermaCAM B4

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Οπτικό πεδίο / ελάχιστη απόσταση εστίασης	23°x17°/0.3m
Θερμική ευαισθησία	0.10°C έως 30°C
Εστίαση	Χειροκίνητη
Είδος αισθητήτρα	Focal Plane Array (FPA), ψυχόμενο μικροβολόμετρο 320x240 pixels

Φασματικό εύρος	7.5 to 13μm
Ψηφιακό ζουμ	1x, 2x or 4x
ΜΕΤΡΗΣΗ	
Θερμοκρασιακό εύρος	-20°C to +100°C
Ακρίβεια	±2ºC, ±2%
Επαναληψιμότητα	±1ºC, ±1%
Διορθώσεις μετρήσεων	συντελεστής εκπομπής από 0.01 έως 1.0
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ	
Φορμάτ	Standard JPEG
ΦΑΚΟΙ (ΠΡΟΑΙΡΕΤΙΚΑ)	
2 x τηλεσκόπιο	14º x 10º / 0.5 m
0.5 ευρυγώνιος	41º x 31º / 0.2 m
ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	
Τύπος	Li-Ion, rechargeable, field replaceable
Χρόνος λειτουργίας	2 ώρες συνεχούς λειτουργίας
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-15°C έως +50°C
Υγρασία	Λειτουργία και αποθήκευση 20% έως 80%
ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Βάρος	< 800g, inc. battery
Μέγεθος	272mm x 80mm x 105 mm

Πηγή : www.flir.com

Φωτογραφική μηχανή

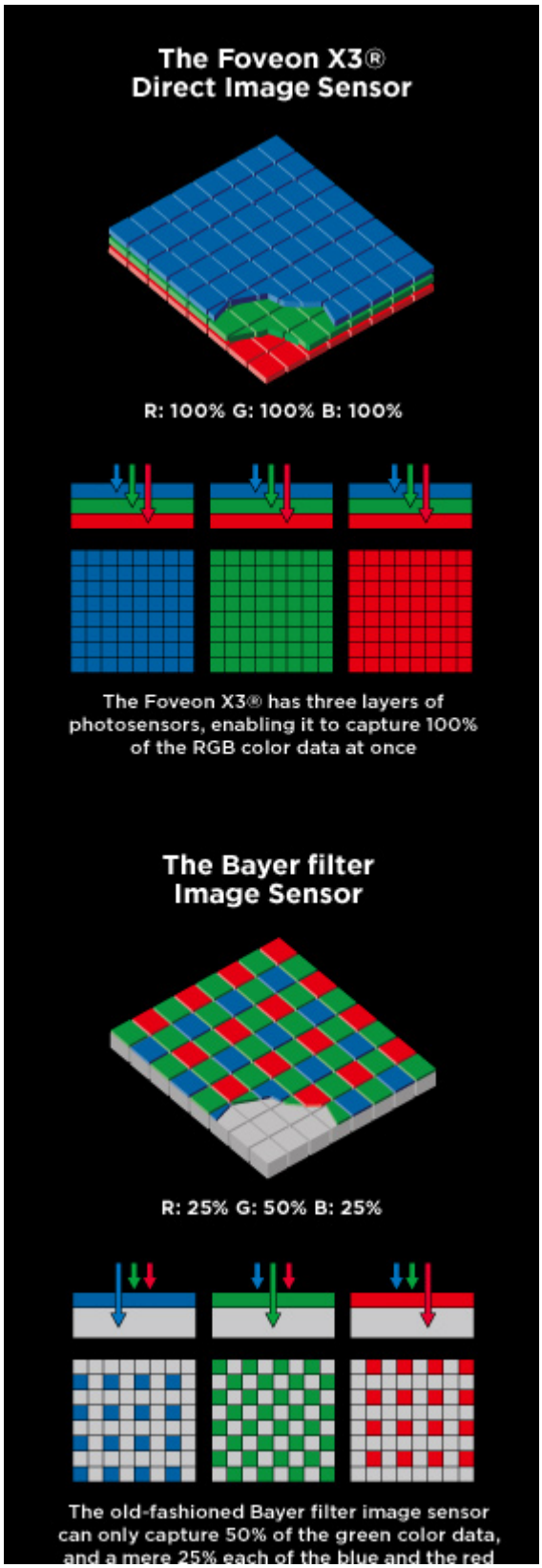
Sigma SD15

Εικόνα 21 : Sigma SD15

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά Sigma SD15

ΣΩΜΑ	mid-size SLR = SLR μεσαίου φορμάτ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	
Μέγιστη Ανάλυση	2640 x 1760
Άλλες αναλύσεις	1776 x 1184, 1296 x 864
Λόγος εικόνας πλάτος : ύψος	3 : 2
Ανιχνευτές αισθητήρα	14.1 megapixels
Μέγεθος αισθητήρα	APS-C (20.7 x 13.8 mm)
Είδος αισθητήρα	CMOS (Foveon x3)
Επεξεργαστής	True II
ΕΙΚΟΝΑ	
ISO	100, 200, 400, 800, 1600 (50 and 3200 with boost)
Επίπεδα ποιότητας JPEG	Fine, normal, basic
ΟΠΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΣΤΙΑΣΗ	
Ψηφιακό ζουμ	όχι
Χειροκίνητη εστίαση	ναι
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΙΚΟΝΑΣ	
Ελάχιστη ταχύτητα κλείστρου	30 sec
Μέγιστη ταχύτητα κλείστρου	1/4000 sec

Πηγή : www.dpreview.com



Πηγή : www.dpreview.com

Ο αισθητήρας Foveon της Sigma SD 15, αντί για ένα μοναδικό ανιχνευτή σε κάθε θέση pixel, έχει ένα πολυεπίπεδο σχηματισμό, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα κόκκινο, ένα πράσινο και ένα μπλε ανιχνευτή σε κάθε θέση pixel. Αυτό σημαίνει ότι αντί να χρειάζεται να γίνει παρεμβολή

των τιμών των γειτονικών pixel, ο αισθητήρας X3 «βλέπει» πλήρες χρώμα σε κάθε θέση pixel, δίνοντας ως αποτέλεσμα λεπτομερείς εικόνες.

3.2 Επεξεργασία δεδομένων

3.2.1 Προεπεξεργασία εικόνων

Στόχος

Για την παρουσίαση της διαδικασίας ανάλυσης που ακολουθήθηκε είναι απαραίτητο να υπενθυμιστεί ο στόχος της διαδικασίας αυτής. Στόχος, λοιπόν, της εργασίας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με παθολογίες σε όψεις κτιρίων, μέσω της θερμογραφίας. Μέσω μιας multi – temporal ανάλυσης, επιδιώχθηκε να εντοπισθούν πιθανές προβληματικές περιοχές σε όψεις δύο ιστορικών κτιρίων. Στις θερμικές εικόνες απεικονίζονται οι εν λόγω όψεις για τις οποίες μελετήθηκαν ανωμαλίες που είναι ορατές στην επιφάνειά τους αλλά και η παρουσία πιθανών ανωμαλιών και προβλημάτων στην επιφάνεια και κάτω από αυτή, σε μικρό βάθος, οι οποίες δεν είναι ορατές στην όψη, με το ανθρώπινο μάτι. Με την ανάλυση θα εντοπισθούν και θα ορισθούν οι περιοχές όπου εμφανίζονται τέτοιου είδους προβλήματα. Ακόμη, όπου είναι δυνατόν, θα μελετηθεί η αιτία του προβλήματος και η έντασή του. Τέλος, τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε κάθε εικόνα, παράγοντας ένα χάρτη παθολογιών του υπό εξέταση αντικειμένου.

Προ-επεξεργασία εικόνων

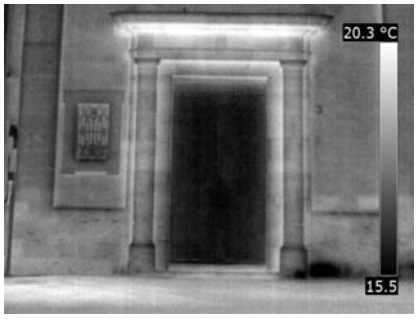
Πριν την εισαγωγή των εικόνων λήψης στη διαδικασία της ανάλυσης και επεξεργασίας, πραγματοποιήθηκε σε αυτές μια προ-επεξεργασία.

Αρχικά, σε όλες τις εικόνες εφαρμόστηκε ισοδυναμοποίηση ιστογράμματος (histogram equalization). Ο στόχος της ισοδυναμοποίησης είναι να επιτευχθεί ίδια συχνότητα για όλους τους τόνους του γκρίζου και έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της αντίθεσης. Η εικόνα εξόδου έχει τύχει επεξεργασίας έτσι ώστε να ενισχυθεί η αντίθεση εκείνων των στοιχείων που ενδιαφέρουν στην ερμηνεία. Η επέκταση του ιστογράμματος έγινε χειροκίνητα στο λογισμικό FLIR Quick Report.

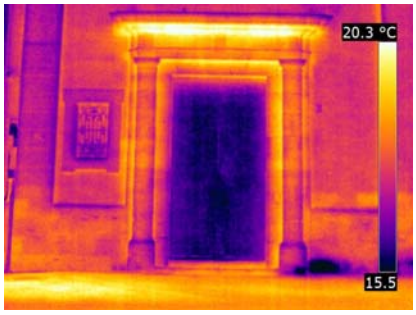
Για τις εικόνες, στο ίδιο λογισμικό, επιλέχθηκε η παλέτα grey(εικόνα 22), καθώς κρίθηκε ότι με αυτήν διακρίνονται ευκολότερα τα διάφορα στοιχεία και οι ραδιομετρικές διαφορές.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι θερμικές εικόνες αποτελούνται από ένα κανάλι και ως τέτοιες εξάγονται μετά από αυτές τις επεξεργασίες.

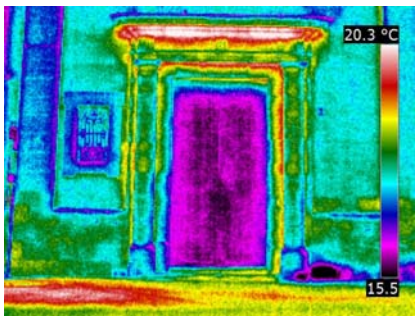
Παραδείγματα παλέτας



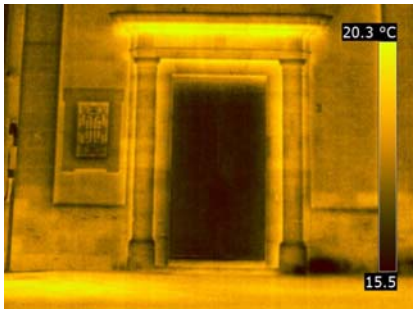
Εικόνα 22: Παλέτα grey



Εικόνα 23 : Παλέτα iron hi



Εικόνα 24 : Παλέτα rain



Εικόνα 25 : Παλέτα yellow

Στη συνέχεια, οι εικόνες αυτές υπέστησαν έναν προβολικό μετασχηματισμό αναγωγής, με τη χρήση κανάβου. Ο μετασχηματισμός αυτός έγινε στο Photoshop (Transform - perspective). Μετά την αναγωγή, οι εικόνες κόπηκαν και διατηρήθηκε από αυτές το τμήμα το οποίο ενδιαφέρει στην ερμηνεία και περιέχει το υπό εξέταση αντικείμενο. Οι παραπάνω εργασίες πραγματοποιήθηκαν ώστε να μπορούν οι εικόνες, οι οποίες απεικονίζουν την ίδια περιοχή, να επιτεθούν η μια πάνω στην άλλη και να σχηματίσουν μια πολυφασματική εικόνα.

Για τη δημιουργία της πολυφασματικής εικόνας, χρειάστηκε, επίσης, να αλλάξει το μέγεθος των εικόνων, ώστε να είναι κοινό για όλες και να γίνει η επίθεση. Σημειώνεται εδώ, ότι στις πολυφασματικές εικόνες που αποτελούνταν μόνο από θερμικές λήψεις, οι εικόνες άλλαξαν τις διαστάσεις τους στις διαστάσεις της μεγαλύτερης από αυτές. Στις πολυφασματικές εικόνες με τη συμμετοχή της συμβατικής φωτογραφίας, η τελική εικόνα είχε το μέγεθος αυτής, η οποία είχε και την μεγαλύτερη ανάλυση. Η αλλαγή του μεγέθους, έγινε στο λογισμικό ENVI.

Με την ολοκλήρωση της προ-επεξεργασίας αυτής, το ίδιο pixel σε κάθε μία από τις εικόνες απεικονίζει το ίδιο τμήμα του αντικειμένου και οι εικόνες είναι έτοιμες να εισαχθούν σε όλες τις διαδικασίες της ανάλυσης.

3.2.2 Μεθοδολογία

Η ανάλυση των εικόνων πραγματοποιήθηκε, για κάθε αντικείμενο, σε δύο ενότητες των οποίων τα συμπεράσματα συνδυάστηκαν για να διατυπωθούν τα τελικά. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι κοινές και στις δύο αυτές ενότητες. Η διαφορά τους έγκειται στο είδος των εικόνων που περιελήφθησαν σε κάθε μία. Η πρώτη είναι ανάλυση η οποία περιλαμβάνει μόνο τις θερμικές εικόνες. Η δεύτερη περιλαμβάνει τόσο τις θερμικές όσο και τις συμβατικές.

Σχετικά και με τις δύο ενότητες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν είναι, συνοπτικά, :

- Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών,
- Μη επιβλεπόμενη και επιβλεπόμενη ταξινόμηση,
- μετρήσεις θερμοκρασιών πάνω στις εικόνες

Το βασικό στοιχείο της ανάλυσης είναι ο σχηματισμός πολυφασματικών εικόνων, είτε με τη συμμετοχή μόνο θερμικών εικόνων, είτε και με τη συμμετοχή των καναλιών της συμβατικής εικόνας.

Ο σχηματισμός πολυφασματικής εικόνας με θερμικές εικόνες διαφορετικής ώρας λήψης βοηθά στην ενίσχυση και στον εντοπισμό ανωμαλιών και αλλοιώσεων οι οποίες βρίσκονται σε κάποια περιοχή ενός υλικού και δεν είναι ορατές στη συμβατική φωτογραφία. Οι αλλοιώσεις αυτές απεικονίζονται σε όλες τις λήψεις και η επίθεση των εικόνων διευκολύνει τον εντοπισμό τους.

Ο συνδυασμός μιας θερμικής εικόνας με τη συμβατική βοηθά στον διαχωρισμό των υλικών, καθώς αυξάνεται ο βαθμός αναγνώρισης ανάμεσα σε διαφορετικά υλικά και αλλοιώσεις (Lerma, 2000). Από την άλλη, η επίθεση μιας θερμικής εικόνας επάνω σε μία συμβατική, η οποία εκτός από υφή έχει και πολύ καλύτερη ανάλυση, διευκολύνει την παρουσίαση και τη θέαση των φαινομένων επάνω στην «πραγματική» όψη του αντικειμένου.

3.2.3 Επεξεργασία εικόνων

Σε όλη την ενότητα, έγινε προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα για τα υλικά και τις πιθανές παθολογίες της υπό εξέταση όψης. Για αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν διάφορα δεδομένα και εργαλεία.

Αρχικά, έγιναν παρατηρήσεις πάνω στις λήψεις, δηλαδή στα πρωτογενή δεδομένα, τόσο τα θερμικά όσο και τα συμβατικά. Στις θερμικές εικόνες παρατηρήθηκαν οι θερμοκρασίες όλων των υλικών και των περιοχών κάθε εικόνας και η μεταβολή τους με το πέρασμα του χρόνου και τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Επισημάνθηκαν οι θερμοκρασίες των διάφορων υλικών αλλά και θερμοκρασιακές ανομοιομορφίες ανάμεσα στο ίδιο υλικό. Στη συμβατική εικόνα περιγράφηκαν τα υλικά που εμφανίζονται στο αντικείμενο αλλά και παθολογίες που είναι ορατές με το ανθρώπινο μάτι. Επίσης, η εικόνα αυτή βοήθησε στην ερμηνεία των θερμικών εικόνων, στις οποίες δεν είναι πάντα διακριτά τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Έτσι, και με αυτή την εικόνα ως δεδομένο, συσχετίστηκαν οι πληροφορίες από τα δύο είδη εικόνων.

Στη συνέχεια, οι θερμικές εικόνες, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, με επίθεση σχημάτισαν μια πολυφασματική εικόνα με αριθμό καναλιών όσες και οι θερμικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν. Εδώ σημειώνεται ότι κάθε θερμική εικόνα αποτελείται από ένα κανάλι. Η εικόνα αυτή χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω ανάλυση.

Το πρώτο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (PCA Principal Components Analysis). Αυτή εφαρμόστηκε στην πολυφασματική εικόνα και από τις παράγωγες εικόνες προέκυψαν επιπλέον πληροφορίες για το αντικείμενο και τα χαρακτηριστικά του. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέχθηκε η ανάλυση κυρίων συνιστωσών να δώσει τέσσερις παράγωγες εικόνες.

Στη συνέχεια, εισήχθηκε στη διαδικασία και η συμβατική εικόνα. Με τα τρία κανάλια (R G B) αυτής της εικόνας και τα προηγούμενα θερμικά σχηματίστηκε μια νέα πολυφασματική εικόνα με συνολικό αριθμό καναλιών τρία συν τον αριθμό των θερμικών εικόνων. Με συνδυασμούς αυτών των καναλιών, ανά τρία, δημιουργήθηκαν διάφορα έγχρωμα σύνθετα, κάθε ένα από τα οποία προσφέρει κάποια πληροφορία για τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου.

Επόμενη επεξεργασία ήταν η ταξινόμηση της πολυφασματικής εικόνας. Πραγματοποιήθηκε επιβλεπόμενη ταξινόμηση με τον αλγόριθμο της μέγιστης πιθανοφάνειας και τον αλγόριθμο του παραλληλεπιπέδου, κατά περίπτωση, και η εικόνα ταξινομήθηκε σε αριθμό κλάσεων ανάλογα με τα υλικά που εντοπίσθηκαν επάνω στην όψη. Η ταξινόμηση αυτή βοήθησε στην κατηγοριοποίηση των υλικών που απαρτίζουν το αντικείμενο αλλά και τη διάκριση στοιχείων των ίδιων υλικών τα οποία, όμως, βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση.

Ανάλυση κυρίων συνιστωσών πραγματοποιήθηκε επίσης στη νέα πολυφασματική εικόνα. Η ανάλυση ήταν αντίστοιχη με την προηγούμενη, με τη διαφορά ότι εδώ υπήρχε και πληροφορία από την οπτική εικόνα. Έτσι, πληροφορίες που εξάγονται από τις θερμικές εικόνες αποτυπώνονται διακριτά επάνω στην όψη του αντικειμένου. Ταυτόχρονα, ενισχύεται η εμφάνιση παθολογιών που είναι ορατές τόσο στις θερμικές όσο και στη συμβατική εικόνα. Η ανάλυση έγινε ξανά παράγοντας τέσσερις εικόνες. Στη συνέχεια, ωστόσο, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε

παράγοντας συνολικά δύο εικόνες κυρίων συνιστωσών με σκοπό όλη η πληροφορία που δίνεται να είναι περισσότερο συγκεντρωμένη στις δύο εικόνες αυτές.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, από τις εικόνες των κυρίων συνιστωσών επιλέχθηκαν αυτές που περιείχαν τις πιο χρήσιμες πληροφορίες και την καλύτερη ανάλυση και ταξινομήθηκαν. Η ταξινόμηση ήταν μη επιβλεπόμενη και χρησιμοποιήθηκαν, κατά περίπτωση, οι αλγόριθμοι K-Means και ISO DATA. Έγιναν περισσότερες από μία δοκιμές ώστε να επιλεγεί ο αριθμός κλάσεων που θα απέδιδε καλύτερα τα υλικά του αντικειμένου.

Τέλος, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασιών σε ενδεικτικά σημεία, για τις περιοχές που από όλα τα παραπάνω είχε υποτεθεί κάποια παθολογία, σε όλες τις θερμικές λήψεις. Οι θερμοκρασίες προέκυψαν ως μέσος όρος των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν σε ισοκατανεμημένα σημεία σε όλη την έκταση του φαινομένου. Οι μετρήσεις, έπειτα, μπήκαν σε διάγραμμα και συγκρίθηκαν οι τιμές τους και οι μεταβολές τους στο χρόνο. Από εκεί είτε επιβεβαιώθηκαν είτε απορρίφθηκαν υποθέσεις για παθολογίες που είχαν διατυπωθεί προηγούμενα.

Τα αποτελέσματα από όλες τις παραπάνω διαδικασίες συνδυάστηκαν και διατυπώθηκαν τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα στο τέλος κάθε μιας από τις τέσσερις ενότητες.

Παραγωγή χαρτών παθολογιών

Τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα που διατυπώθηκαν σε κάθε μία από τις τέσσερις ενότητες σχεδιάστηκαν και αποδόθηκαν πάνω στη συμβατική εικόνα του αντικειμένου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός χάρτη παθολογιών. Με τη βοήθεια όλων των δεδομένων που καταγράφηκαν, αποτυπώθηκαν, με υπόβαθρο τη συμβατική εικόνα, οι θέσεις και τα όρια των προβληματικών περιοχών του κάθε αντικειμένου.

4

Εφαρμογή

4.1 Ρωμανική Πύλη

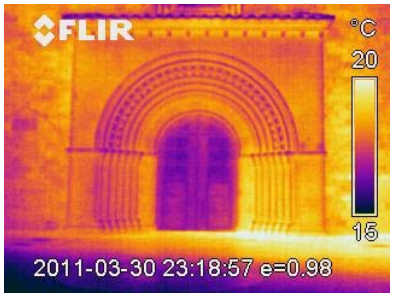
Το αντικείμενο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα είναι η Ρωμανική Πύλη στη νοτιοανατολική πλευρά του Καθεδρικού ναού. Η πύλη αυτή έχει δαντελωτές πέτρινες διακοσμήσεις, οριζόντιες και τοξωτές καθώς και οξυκόρυφα περιθυρώματα. Τα όρια της μελέτης αφορούν μόνο στην κατασκευή της πύλης και όχι στον τοίχο στο πίσω επίπεδο. Επιπλέον, σημειώνεται ότι από τη μελέτη της ξύλινης πόρτας θα εξαιρεθούν τα δύο φύλλα της, τα οποία ανοίγουν και κλείνουν. Αυτό διότι σε κάποιες από τις λήψεις αυτά είναι ανοιχτά ενώ σε άλλες κλειστά, καθώς η εκκλησία ήταν ανοιχτή για το κοινό και δεν στάθηκε δυνατό να γίνουν όλες οι λήψεις με κλειστή πόρτα. Έτσι, για το τμήμα αυτό δεν υπάρχουν πλήρη δεδομένα.

Στον πίνακα που ακολουθεί περιέχονται οι ακριβείς ώρες λήψης κάθε εικόνας καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος την ώρα της λήψης.

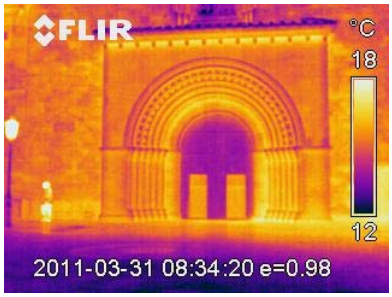
Πίνακας 3 : Πίνακας λήψεων Ρωμανικής Πύλης

Θερμική εικόνα	Ώρα λήψης	Εξωτερική θερμοκρασία (ºC)
507	23:19	17.2
517	08:34	13.4
531	13:55	21.5
546	20:57	21.5

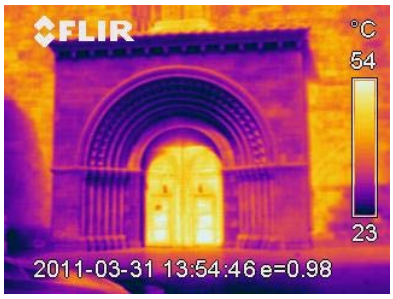
4.1.1 Λήψεις



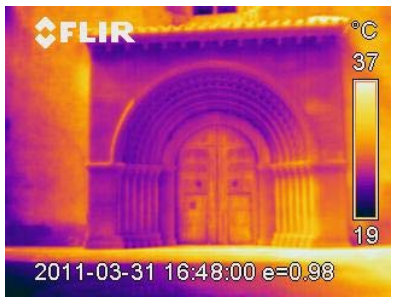
Εικόνα 26 : Εικόνα 507



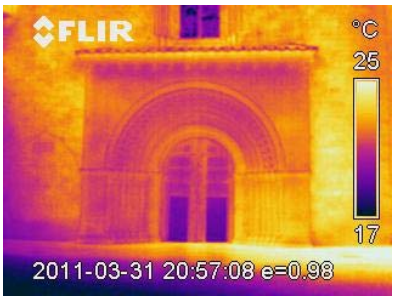
Εικόνα 27 : Εικόνα 517



Εικόνα 28 : Εικόνα 531



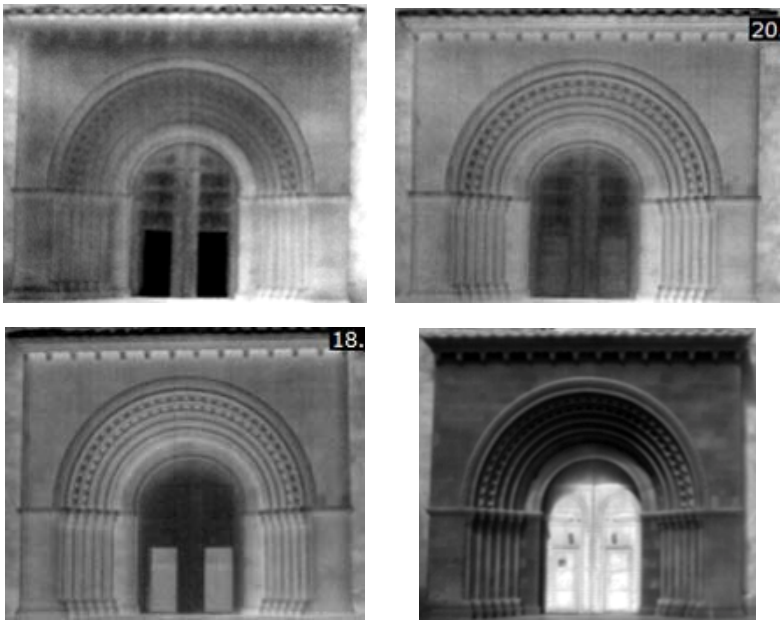
Εικόνα 29 : Εικόνα 541



Εικόνα 30 : Εικόνα 546

Εικόνες εισόδου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες μετά από την προεπεξεργασία. Σε αυτές τις εικόνες έχει εφαρμοσθεί ισοδυναμοποίηση ιστογράμματος, αναγωγή, έχει διατηρηθεί και από τις τέσσερις το ίδιο τμήμα το οποίο ενδιαφέρει και έχουν αποκτήσει κοινό μέγεθος 220 x 180 pixels.



Εικόνα 31 : Εικόνες εισόδου 507, 517, 531, 546

Στο κομμάτι της επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν όλες οι λήψεις εκτός της 541. Η εικόνα αυτή εξαιρέθηκε διότι είχε μεγάλη επίδραση από σκιά, λόγω της γωνίας πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός. Παρατηρείται η διαφορά ανάμεσα στα δύο τμήματα εκατέρωθεν της πόρτας (Εικόνα 29).

4.1.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων

Πολυφασματική εικόνα

Η πολυφασματική εικόνα προέκυψε από την επίθεση των τεσσάρων θερμικών εικόνων και απαρτίζεται από τα εξής τέσσερα κανάλια αντίστοιχα :

Κανάλι 1 : εικόνα 507

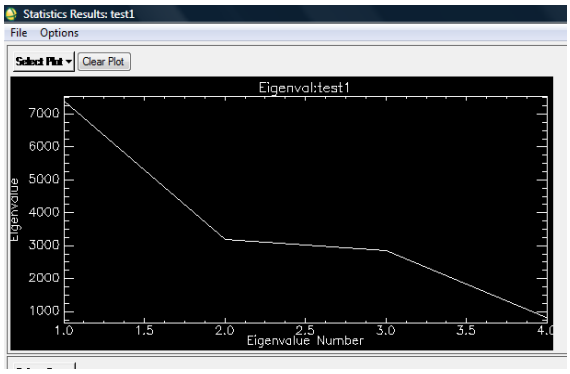
Κανάλι 2 : εικόνα 517

Κανάλι 3 : εικόνα 531

Κανάλι 4 : εικόνα 546

4.1.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Στην πολυφασματική εικόνα πραγματοποιήθηκε ανάλυση κυρίων συνιστωσών και αναλύθηκε συνολικά σε τέσσερις εικόνες. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ιδιοτιμών και μεταβλητοτήτων. Οι τιμές της μεταβλητότητας προκύπτουν διαιρώντας κάθε ιδιοτιμή με το άθροισμα όλων των ιδιοτιμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παράγωγες εικόνες και οι παρατηρήσεις που έγιναν σε αυτές.



Εικόνα 32 : Διάγραμμα ιδιοτιμών

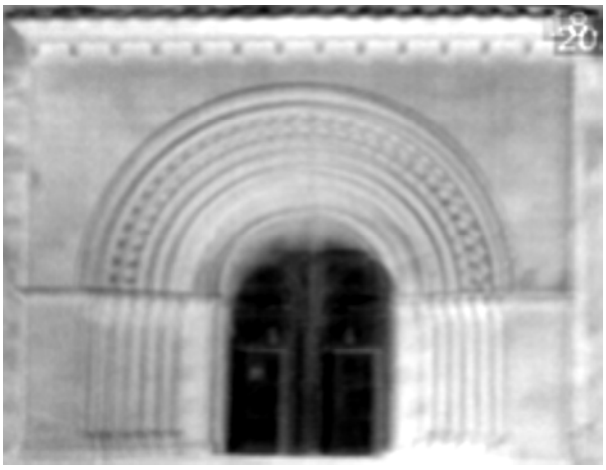
Πίνακας 4 : Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	4668	0,5454
2	2844	0,3323
3	807	0,0943
4	240	0,0280

Στον παραπάνω πίνακα περιέχονται οι ιδιοτιμές του πίνακα διασποράς, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το ποσοστό της διασποράς που ερμηνεύεται από το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα (Αργιαλάς, 1999). Παρατηρείται ότι η πρώτη εικόνα των συνιστωσών ερμηνεύει το 55 % της συνολικής διασποράς και μαζί με τη δεύτερη, η οποία έχει ένα αντίστοιχο ποσοστό 33 % , εκφράζουν το μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνόλου των δεδομένων. Όπως είναι αναμενόμενο οι δύο τελευταίες εικόνες εκφράζουν πολύ μικρότερα ποσοστά τα οποία είναι ίσα με 9 % και 2.8 % αντίστοιχα. Αυτό, ωστόσο, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οι πληροφορίες που περιέχουν δεν είναι χρήσιμες. Αυτό θα αξιολογηθεί στην ανάλυση των εικόνων παρακάτω.

Σχόλια στις εικόνες των PC

PC 1



Εικόνα 33 : PC 1

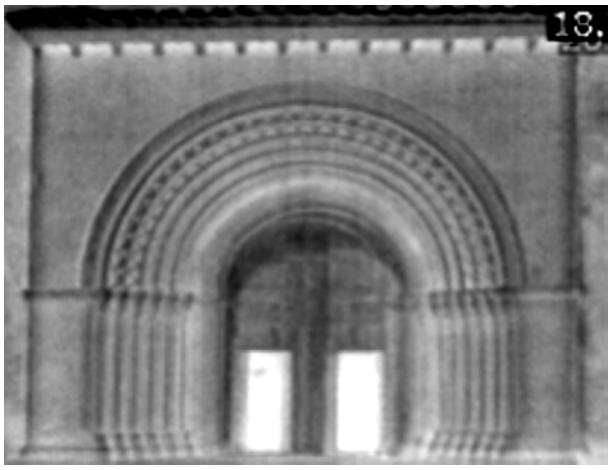
- Στην επιφάνεια της πόρτας παρατηρούνται ανομοιομορφίες. Περιοχές σε όλο το ύψος εκατέρωθεν του χωρίσματος των δύο φύλλων και στο ανώτερο τμήμα της πόρτας έχουν διαφορετική όψη από το υπόλοιπο τμήμα.
- Ανάλογα, μικρές περιοχές στο εσωτερικό είναι πιο σκούρες από τις γειτονικές.
- Από τη συνολική επιφάνεια της τοιχοποιίας, υπάρχει ένα τμήμα πάνω και αριστερά το οποίο απεικονίζεται με διαφορετικό τόνο, συγκεκριμένα είναι πιο ανοιχτόχρωμο.
- Το δεξιό τμήμα με τα κολωνάκια απεικονίζεται διαφορετικά από το αριστερό. Ωστόσο, το γεγονός αυτό οφείλεται στην θερμότητα που έχει απορροφήσει στην διάρκεια όλης της ημέρας το τμήμα αυτό, λόγω της γωνίας πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός. Το τμήμα αυτό εκτίθεται στη διάρκεια της ημέρας πολύ περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία από ότι το αριστερό. Κατά συνέπεια, η απεικόνιση αυτή δεν πρέπει να οδηγήσει στο συμπέρασμα μιας προβληματικής περιοχής.
- Το τμήμα κάτω από το οριζόντιο γείσο και ανάμεσα στις κεφαλές έχει διαφορετική όψη από την υπόλοιπη τοιχοποιία, παρόλο που αποτελούνται από το ίδιο υλικό.

PC 2

Εικόνα 34 : PC 2

- Αντίστοιχες ανομοιομορφίες με πριν παρουσιάζονται στην επιφάνεια της πόρτας.
- Πάλι, το τμήμα κάτω από το οριζόντιο γείσο είναι έντονα διαφοροποιημένο από την υπόλοιπη τοιχοποιία
- Η περιοχή της τοιχοποιίας που αναφέρθηκε παραπάνω ως πιο ανοιχτόχρωμη εντοπίζεται κι εδώ, πιο σκούρα ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση από τις γειτονικές περιοχές. Εμφανίζονται, ακόμη, και κάποιες άλλες περιοχές οι οποίες φαίνονται να έχουν την ίδια συμπεριφορά. Αυτές είναι στο δεξιό τμήμα, η πρώτη στο μέσο περίπου του μήκους της καμπύλης του τόξου και η δεύτερη λίγο ψηλότερα από το έδαφος.

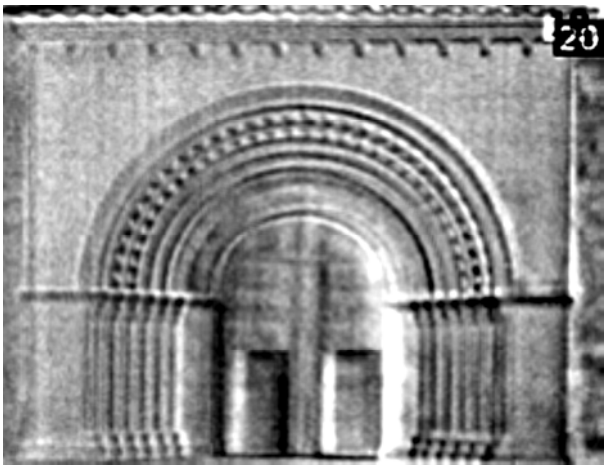
PC 3



Εικόνα 35 : PC 3

• Η εικόνα της τρίτης συνιστώσας δεν περιέχει σημαντική πληροφορία πέρα από το γεγονός ότι επιβεβαιώνει τη διαφορετική συμπεριφορά του τοίχου στην λωρίδα κάτω από το οριζόντιο γείσο.

PC 4



Εικόνα 36 : PC 4

4.1.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας

Δημιουργία πολυφασματικής εικόνας

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια νέα πολυφασματική εικόνα, η οποία προέκυψε επιθέτοντας στην προηγούμενη τα τρία κανάλια της συμβατικής εικόνας. Έτσι, προκύπτει μια νέα πολυφασματική εικόνα αποτελούμενη από συνολικά επτά κανάλια, τέσσερα θερμικά και τα R – G – B της συμβατικής. Το μέγεθος της εικόνας είναι 2124 x 1620 pixel, ίσο με το μέγεθος της συμβατικής εικόνας που προστέθηκε. Η δομή των καναλιών της εικόνας είναι η παρακάτω :

κανάλι 1 : θερμική εικόνα 546

κανάλι 2 : θερμική εικόνα 531

κανάλι 3 : θερμική εικόνα 517

κανάλι 4 : θερμική εικόνα 507

κανάλι 5 : red κανάλι συμβατικής

κανάλι 6 : green κανάλι συμβατικής

κανάλι 7 : blue κανάλι συμβατικής

4.1.3.1 Έγχρωμα σύνθετα

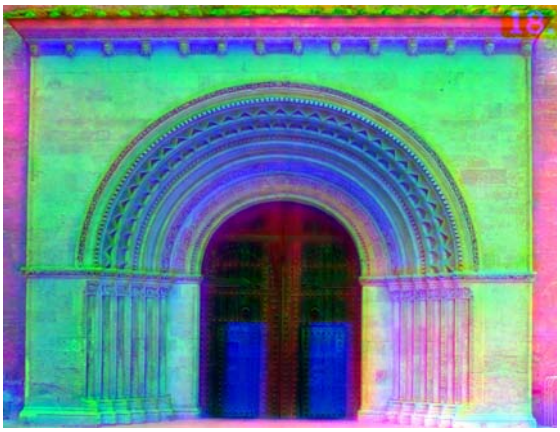
Η δημιουργία έγχρωμων σύνθετων με τη συμμετοχή υπέρυθρων καναλιών και καναλιών της συμβατικής εικόνας δίνει τη δυνατότητα οι πληροφορίες που καταγράφονται στα θερμικά κανάλια, να αποτυπωθούν και να εντοπιστούν πάνω στην όψη του αντικειμένου. Έτσι διευκολύνεται η ερμηνεία αυτής της πληροφορίας και η οριοθέτηση των παθολογιών.

- Κανάλι 1 : κανάλι 1 πολυφασματικής εικόνας

  Κανάλι 2 : κανάλι 6 πολυφασματικής εικόνας

  Κανάλι 3 : κανάλι 3 πολυφασματικής εικόνας

Το διπλανό έγχρωμο σύνθετο απεικονίζει ανομοιομορφίες στο επίπεδο της ξύλινης πόρτας. Οι μεγαλύτερες ανομοιομορφίες εντοπίζονται στο ανώτερο τμήμα της πόρτας. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια ζώνη η οποία ακολουθεί το τόξο της πόρτας, η οποία διακρίνεται από την υπόλοιπη επιφάνεια. Η ζώνη αυτή έχει και επεκτάσεις στο μέσο αλλά και στα άκρα. Έτσι, σχηματίζονται δύο ακόμη περιοχές. Η πρώτη είναι, ξανά, στο άνω τμήμα, εκατέρωθεν του χωρίσματος των δύο φύλλων της πόρτας και η δεύτερη αποτελείται από δύο κατακόρυφες ζώνες στο δεξί αλλά και αριστερό όριο της πόρτας, έως το έδαφος.



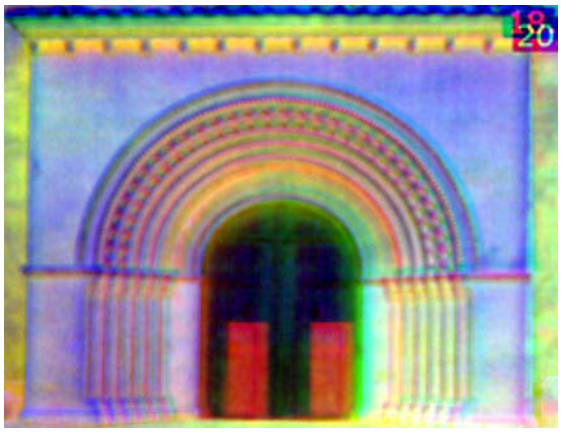
Εικόνα 37 : Σύνθετο 1

- Κανάλι 1 : κανάλι 3 πολυφασματικής εικόνας

  Κανάλι 2 : κανάλι 4 πολυφασματικής

  Κανάλι 3 : κανάλι 5 πολυφασματικής

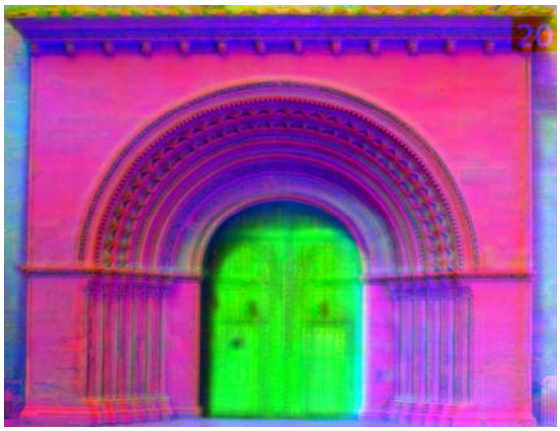
Αντίστοιχες ανομοιομορφίες με παραπάνω στην επιφάνεια της πόρτας. Εδώ είναι ακόμη πιο καθαρά τα όρια της προβληματικής περιοχής. Σχηματικά, εμφανίζονται δύο ζώνες ημικυκλικές που συνεχίζουν μέχρι το όριο της πόρτας με το έδαφος.



Εικόνα 38 : Σύνθετο 2

Επιπλέον, εδώ παρατηρείται ξανά, η διαφοροποίηση του τμήματος κάτω από το οριζόντιο γείσο με την υπόλοιπη τοιχοποιία. Το τμήμα αυτό απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, σε αντίθεση με το γαλάζιο του τοίχου.

- Κανάλι 1 : κανάλι 5 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 2 πολυφασματικής
  Κανάλι 3 : κανάλι 4 πολυφασματικής

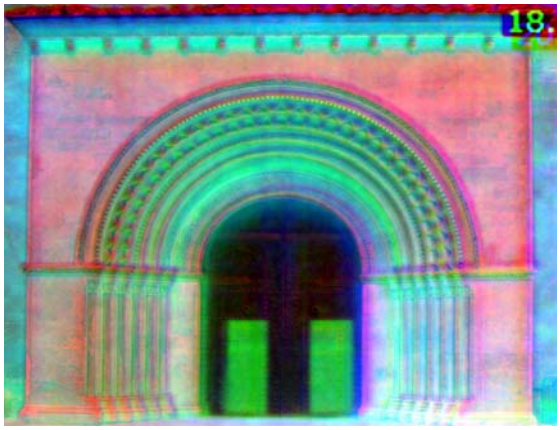


Εικόνα 39 : Σύνθετο 3

Η εικόνα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για να σημανθούν ανομοιομορφίες και πιθανές προβληματικές περιοχές όσον αφορά στη συνολική επιφάνεια της τοιχοποιίας.

Σε γενικές γραμμές, η επιφάνεια του τοίχου απεικονίζεται με ροζ χρώμα. Ωστόσο, υπάρχουν διασκορπισμένες περιοχές, μικρότερες και μεγαλύτερες, οι οποίες αποδίδονται με αποχρώσεις πιο κοντά στο άσπρο. Η πιο μεγάλη από αυτές βρίσκεται στο αριστερό τμήμα, στο μέσο περίπου του ύψους του τόξου έως την ακμή του τοίχου. Μικρότερη, αλλά εξίσου έντονη, είναι μια περιοχή στο δεξιό τμήμα σε λίγο χαμηλότερο ύψος αντίστοιχα. Ανάλογες περιοχές επισημαίνονται ακόμα, στα κομμάτια από την οριζόντια γιρλάντα στο μέσο του τοίχου και έως κάτω, στα τμήματα του τοίχου.

- Κανάλι 1 : κανάλι 7 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 3 πολυφασματικής
  Κανάλι 3 : κανάλι 4 πολυφασματικής



Εικόνα 40 : Σύνθετο 4

Ακόμη πιο έντονα από πριν, εδώ είναι εμφανείς οι ίδιες ανομοιομορφίες στην τοιχοποιία, οι οποίες επισημάνθηκαν στο προηγούμενο έγχρωμο σύνθετο. Με γκρίζο χρώμα απεικονίζονται εδώ οι περιοχές που διαχωρίζονται από την γενική τοιχοποιία.

Επιπλέον, εμφανίζονται κάποια άλλα τμήματα, τα οποία απεικονίζονται με αποχρώσεις κοντά στο λευκό και αφορούν στην τοιχοποιία. Πιο έντονα το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στα δεξιά, κοντά στην αλληλοτομία του τοίχου με το έδαφος και πιο εξασθενημένο στο αντίστοιχο αριστερό τμήμα.

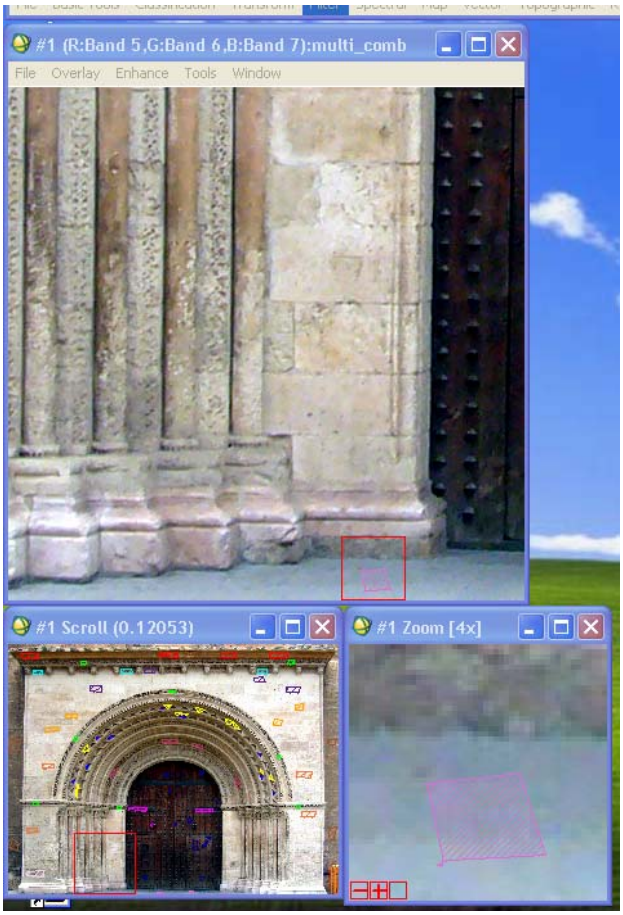
4.1.3.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρώντας 14 κλάσεις. Οι περιοχές εκπαίδευσης φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

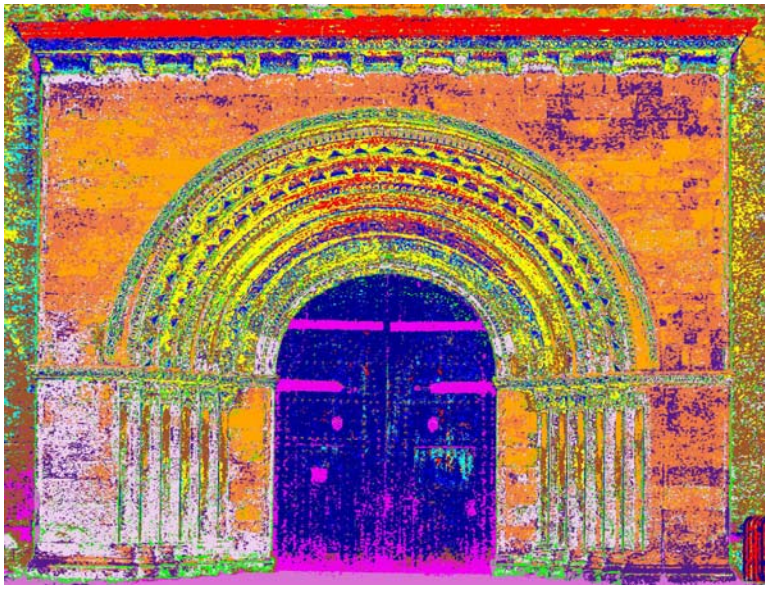
Οι κλάσεις που θεωρήθηκαν είναι οι εξής :

1. άσπρη πέτρα λεία : οι άσπροι και λείοι (σε καλή κατάσταση) λίθοι της τοιχοποιίας
2. σκούρα πέτρα : οι σκούροι λίθοι της τοιχοποιίας
3. οξεία πέτρα : ελαφρώς διαβρωμένοι λίθοι
4. οξεία πέτρα (2) : έντονα διαβρωμένοι λίθοι
5. ξύλο : το ξύλο της πόρτας
6. μέταλλο : τα μεταλλικά στοιχεία της πόρτας
7. επιγραφή : οι επιγραφές ανάμεσα στις κεφαλές
8. οροφή : το οριζόντιο γείσο κάτω από τη σκεπή
9. γιρλάντα : η πρώτη διακοσμητική ταινία με ανάγλυφα, οριζόντια και αψιδωτή
10. γιρλάντα σκούρα : οι εσοχές που δημιουργούν οι γιρλάντες
11. γιρλάντα (2) : η δεύτερη και η τρίτη γιρλάντα (που σχηματίζουν τριγωνικές και ημικυκλικές εσοχές αντίστοιχα)
12. γιρλάντα (3) : οι τελευταίες εσωτερικές γιρλάντες
13. τοίχος : το πίσω τμήμα του τοίχου, από το οποίο προεξέχει η όψη της πύλης
14. μάρμαρο γκρι : το μάρμαρο του εδάφους μπροστά από την πύλη

άσπρη πέτρα λεία	
σκούρα πέτρα	
οξεία πέτρα	
οξεία πέτρα (2)	
ξύλο	
μέταλλο	
επιγραφή	
οροφή	
γιρλάντα	
γιρλάντα σκούρα	
γιρλάντα (2)	
γιρλάντα (3)	
τοίχος	
μάρμαρο γκρι	



Εικόνα 41 : Περιοχές εκπαίδευσης



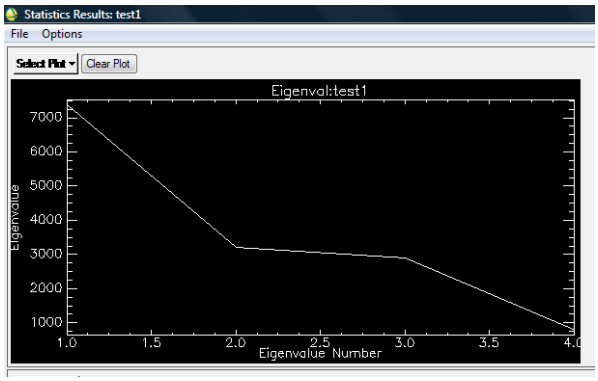
Εικόνα 42 : Ταξινομημένη εικόνα

Παραπάνω φαίνεται η ταξινομημένη εικόνα. Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση που πραγματοποιήθηκε, με τα παραπάνω δεδομένα εκπαίδευσης έδωσε μια εικόνα που περιγράφει πολύ ικανοποιητικά τα υλικά της υπό εξέταση τοιχοποιίας και τις παθολογίες τους. Συγκεκριμένα, διακρίνονται όλα τα είδη λίθου στην όψη, τα οποία είτε είναι διαφορετικοί λίθοι είτε ίδιο υλικό, σε διαφορετική, όμως, κατάσταση. Από την ταξινόμηση είναι προφανές ότι, παρόλο που η τοιχοποιία της όψης αποτελείται στο σύνολό της από το ίδιο υλικό, υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις στο εσωτερικό της. Χαρακτηριστικό είναι τα τμήματα από το έδαφος έως την οριζόντια γιρλάντα στο μέσο. Το δεξί με το αριστερό κομμάτι έχουν ταξινομηθεί σε διαφορετικές θεματικές κατηγορίες, *οξεία πέτρα 2* και *οξεία πέτρα* αντίστοιχα. Αυτό είναι χαρακτηριστικό της διαφορετικότητας των λίθων. Η κατάσταση στην οποία βρίσκονται και τα προβλήματα τα οποία ενδέχεται να παρουσιάζουν ποικίλλουν. Ταξινομείται το ξύλο και το μέταλλο, με ορισμένες αδυναμίες σε ένα τμήμα του, για λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Διαχωρίζονται οι γιρλάντες που είναι φτιαγμένες από διαφορετικά υλικά και επισημαίνονται τα σημεία εσοχής σε αυτά, όπου δημιουργούνται σκιές. Τέλος, η ταξινομημένη εικόνα παρουσιάζει στο σύνολό της μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας.

4.1.3.3 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών

Πίνακας 5: Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	7370	0,5165
2	3212	0,2251
3	2886	0,2022
4	802	0,0562



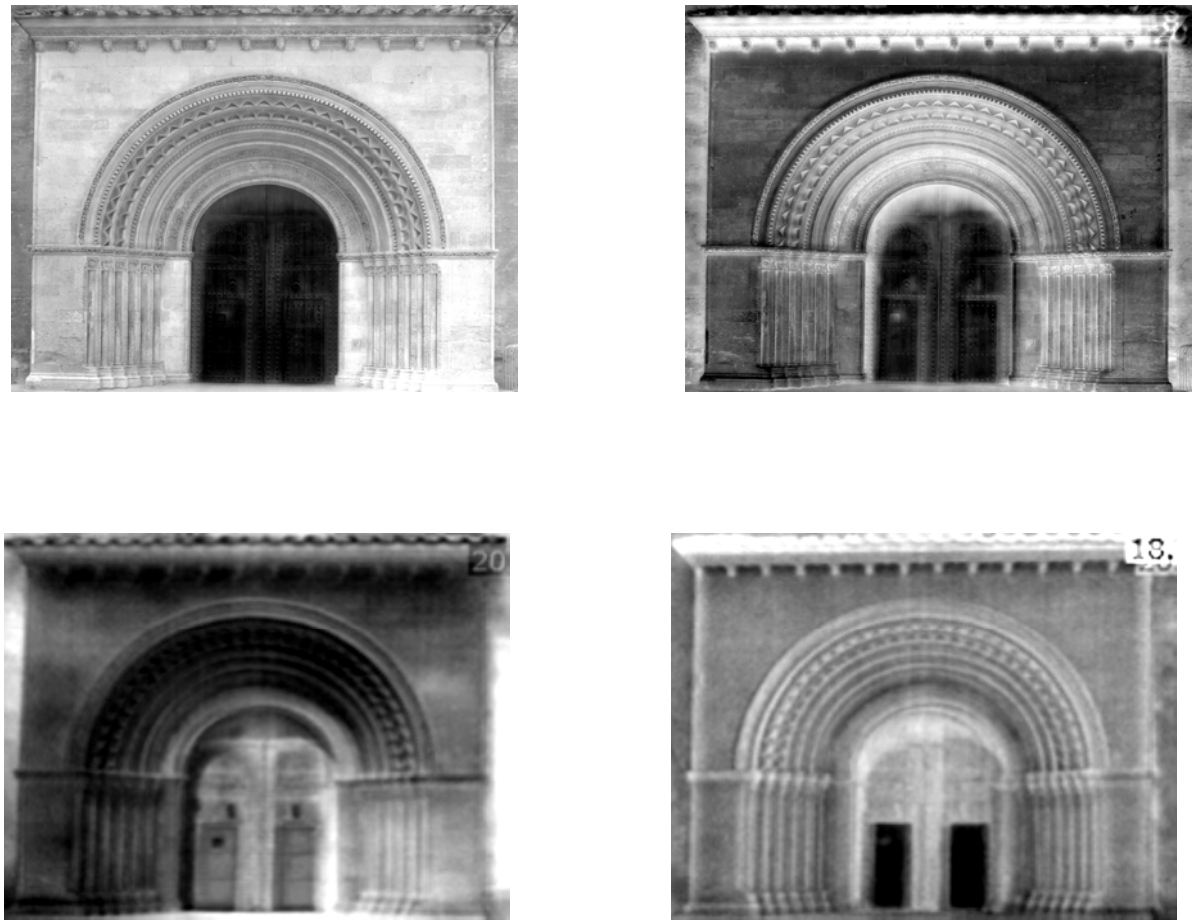
Εικόνα 43: Διάγραμμα ιδιοτιμών

Εδώ, η πολυφασματική εικόνα αναλύθηκε σε τέσσερις εικόνες κυρίων συνιστωσών. Σύμφωνα με τον πίνακα των ιδιοτιμών, η πρώτη εικόνα περιγράφει το 52 % της συνολικής

διασποράς και είναι μια εικόνα η οποία περιγράφει το αντικείμενο με μεγάλη λεπτομέρεια, εκμεταλλευόμενη τα δεδομένα από τα τρία κανάλια της συμβατικής εικόνας. Ωστόσο, δεν είναι μια εικόνα που προσφέρει πληροφορίες για τις παθολογίες και τις προβληματικές περιοχές του αντικειμένου.

Η δεύτερη εικόνα έχει ποσοστό διακύμανσης 22.5 % και ενώ είναι περίπου ίσο με το μισό τη πρώτης, είναι μια εικόνα η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον εντοπισμό και την περιγραφή των ανωμαλιών.

Από τις υπόλοιπες δύο, μόνο η τρίτη εικόνα δίνει κάποια αξιοποιήσιμη πληροφορία.



Εικόνα 44 : Εικόνες κυρίων συνιστωσών

PC 2

Εικόνα 45 : PC 2

Η εικόνα αυτή δίνει τη δυνατότητα παρατήρησης επάνω στην ορατή εικόνα (δηλαδή στο αντικείμενο) την εικόνα της θερμικής καταγραφής, χωρίς θόρυβο. Χαρακτηριστικά, παρατηρείται :

- ανομοιομορφία στον τόνο, στις διάφορες περιοχές της τοιχοποιίας. Περιοχές, όπως αριστερά επάνω και δεξιά κάτω είναι περισσότερο ανοιχτόχρωμες, σημεία όπου είχε επισημανθεί πέτρα πιο σκούρα ή τραχειά, με πιθανή διάβρωση
- ανομοιομορφία στον τόνο στο ξύλο της πόρτας. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, το κάτω τμήμα της πόρτας αποτελείται από ξύλο πιο καταπονημένο από το υπόλοιπο. Πιθανώς επηρεασμένο από εισχώρηση νερού από το έδαφος. Ωστόσο, παρατηρείται ότι και το ψηλότερο τμήμα της πόρτας μαζί με τμήματα της περιμέτρου έχουν διαφορετική απόκριση από το σύνολο της ξύλινης επιφάνειας, γεγονός που δεν ερμηνεύεται από την ορατή εικόνα.
- Είναι φανερό πόσο διαφορετική θερμοκρασία παρουσιάζει το οριζόντιο γείσο της οροφής , καθώς και τα τμήματα ανάμεσα στις κεφαλές , σε σχέση με τον υπόλοιπο τοίχο.
- Διαφορετικές αποκρίσεις στα διαφορετικά υλικά στις γιρλάντες, με πιο έντονη τη διαφορά στις εσωτερικές.
- Διαφορά τοιχοποιίας με τις κολώνες και κυρίως τα κιονόκρανα

PC 3

Εικόνα 46 : PC 3

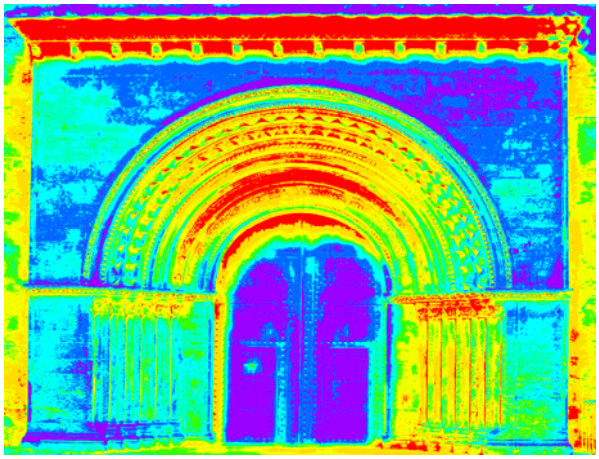
Στην εικόνα αυτή διακρίνονται ακόμη μία φορά, όπως και στις προηγούμενες παραγράφους οι περιοχές της τοιχοποιίας οι οποίες διαφοροποιούνται από το σύνολο. Εδώ εμφανίζονται πιο ανοιχτόχρωμες από τις γειτονικές, ενώ τα όριά τους έχουν περιγραφεί και παραπάνω.

Επιπλέον, είναι εμφανής και η

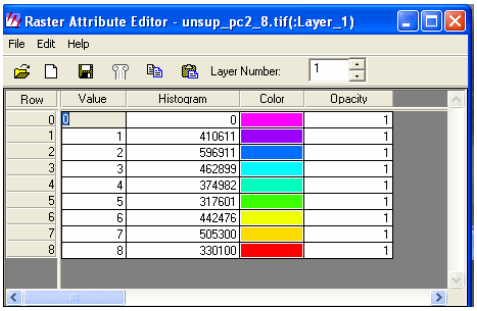
διαφορά του τμήματος στην κάτω δεξιά γωνία από τον υπόλοιπο τοίχο, στην οποία η διαφοροποίηση είναι ακόμη πιο έντονη από τις περιοχές του ανώτερου τμήματος.

4.1.3.4 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Εφαρμόστηκε μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση στην εικόνα της δεύτερης συνιστώσας, θεωρώντας οχτώ κλάσεις. Η ταξινόμηση αυτή δεν έχει καταφέρει να ταξινομήσει ικανοποιητικά όλα τα στοιχεία του αντικειμένου. Ωστόσο, είναι χρήσιμη διότι έχει κατανείμει τις διαφορετικές περιοχές της τοιχοποιίας που αποτελούνται από το ίδιο υλικό αλλά βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση. Έτσι, οι περιοχές αυτές έχουν αποδοθεί σε τέσσερις διαφορετικές κλάσεις, με χρώματα γαλάζιο, μπλε, μοβ και πράσινο. Τα στοιχεία της κατηγορίας γαλάζιου χρώματος περιλαμβάνουν τις προβληματικές περιοχές που έχουν περιγραφεί στο επάνω κομμάτι του τοίχου και από τις δύο πλευρές των τόξων, αλλά και τα τμήματα κάτω από την οριζόντια διακοσμητική ταινία, τα οποία έχουν μία διαφοροποιημένη συμπεριφορά από το άνω τμήμα. Στην κατηγορία μπλε χρώματος αποδόθηκαν τα "υγιή" στοιχεία της τοιχοποιίας ενώ με μοβ ορισμένες λεπτομέρειες ανωμαλιών με μικρή κατάληψη στο άνω τμήμα. Τέλος, με πράσινο στην κάτω δεξιά γωνία, τμήμα που έχει διαφοροποιηθεί έντονα από τα υπόλοιπα, όπως έχει καταδειχθεί και σε προηγούμενες παραγράφους.



Εικόνα 47 : Ταξινομημένη εικόνα



Row	Value	Histogram	Color	Opacity
0	0	0		1
1	1	410611		1
2	2	596911		1
3	3	462899		1
4	4	374982		1
5	5	317601		1
6	6	442476		1
7	7	505300		1
8	8	330100		1

4.1.4 Μετρήσεις θερμοκρασιών – διαγράμματα

Για τη διερεύνηση των προβληματικών περιοχών η μελέτη έγινε σε δύο ομάδες. Η πρώτη αφορά στην περιοχή της τοιχοποιίας και στα προβληματικά σημεία που εντοπίστηκαν εκεί. Η δεύτερη αναφέρεται στην περιοχή της ξύλινης πόρτας.

Στις εικόνες φαίνονται ενδεικτικές θέσεις των σημείων μέτρησης θερμοκρασιών, για τις δύο ομάδες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε περιοχή (στήλη του πίνακα) δεν μετρήθηκε σημειακά μόνο μία θερμοκρασία. Μετρήθηκαν περισσότερες, καλύπτοντας όλη την έκταση του φαινομένου, σε ισοκατανεμημένα σημεία και λήφθηκε, τελικά, ο μέσος όρος. Στην εικόνα τα σημεία που φαίνονται είναι ενδεικτικά και όχι όλα όσα μετρήθηκαν. Στον πίνακα, ανάλογα με την έκταση του φαινομένου μπορεί να έχουν θεωρηθεί δύο κατηγορίες για την ίδια περιοχή. Έτσι ερευνάται αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις και στο εσωτερικό της. Αν διαπιστωθεί πως δεν υπάρχουν, όπως και συνέβη, οι δύο στήλες ενώνονται σε μία, θεωρώντας το μέσο όρο τους. Έτσι, και η σύγκριση των τιμών αυτών με άλλες γίνεται πιο εύκολη και κατανοητή.

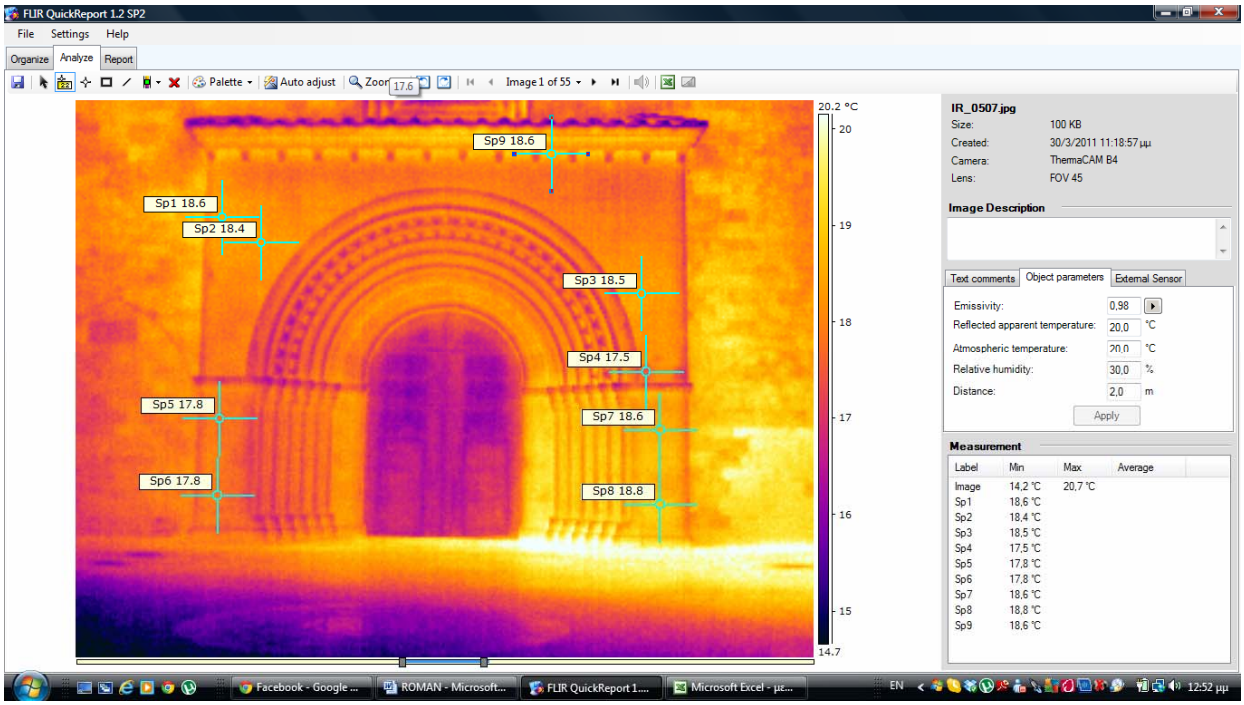
Για την περιοχή της τοιχοποιίας επιλέχθηκε να μετρηθούν θερμοκρασίες, πρώτα, στις περιοχές που εμφανίζονταν διαφοροποιημένες στο πάνω τμήμα του τοίχου. Αυτές ήταν τρεις στο σύνολο. Η μεγαλύτερη στα αριστερά, όπως έχει οριοθετηθεί και προηγουμένως. Λόγω της μεγάλης έκτασης γι' αυτήν θεωρήθηκαν δύο μέσοι όροι. Ένας που αναφέρεται στο ψηλότερο τμήμα της και ένας για το χαμηλότερο. Μετά τις μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι αυτές οι δύο υποπεριοχές παρουσίαζαν ίδιες τιμές, επομένως συγχωνεύτηκαν σε μία. Σε αυτή την κατηγορία είχαν εντοπιστεί, ακόμη, δύο περιοχές στα δεξιά. Οι περιοχές αυτές είναι αρκετά μικρότερες, επομένως για κάθε μία από αυτές λήφθηκε ένας μέσος όρος. Οι θέσεις μέτρησης για τις περιοχές αυτές φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Η αντίστοιχη κατηγορία του πίνακα είναι οι άσπρες περιοχές.

Στη συνέχεια, λήφθηκε ο μέσος όρος των θερμοκρασιών των τμημάτων ανάμεσα στις κεφαλές, στο ψηλότερο κομμάτι του τοίχου, οι οποίες έχει παρατηρηθεί ότι έχουν σταθερά διαφορετικές θερμοκρασίες από αυτόν. Το όνομα αυτής της στήλης στον πίνακα είναι επιγραφές.

Κατόπιν, μελετήθηκε το τμήμα κάτω από την οριζόντια γιρλάντα, η οποία βρίσκεται, στο μέσο περίπου του ύψους του τοίχου. Αυτά τα τμήματα, τόσο δεξιά όσο και αριστερά, έχει παρατηρηθεί ότι έχουν διαφορετική συμπεριφορά στο εσωτερικό τους, αλλά και σε σύγκριση με την υπόλοιπη τοιχοποιία. Έτσι, μετρήθηκαν για κάθε τμήμα, δεξιά και αριστερά, θερμοκρασίες θεωρώντας δύο υποπεριοχές πάνω και κάτω. Στον πίνακα η κατηγορία αυτή αναφέρεται ως κάτω τμήμα.

Τέλος, η κατηγορία άνω τμήμα περιέχει το μέσο όρο των τιμών της γενικής τοιχοποιίας, στην οποία δεν έχουν παρατηρηθεί ανωμαλίες.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας των μετρήσεων και οι τιμές αυτές σε διάγραμμα, ώστε να συγκριθούν.



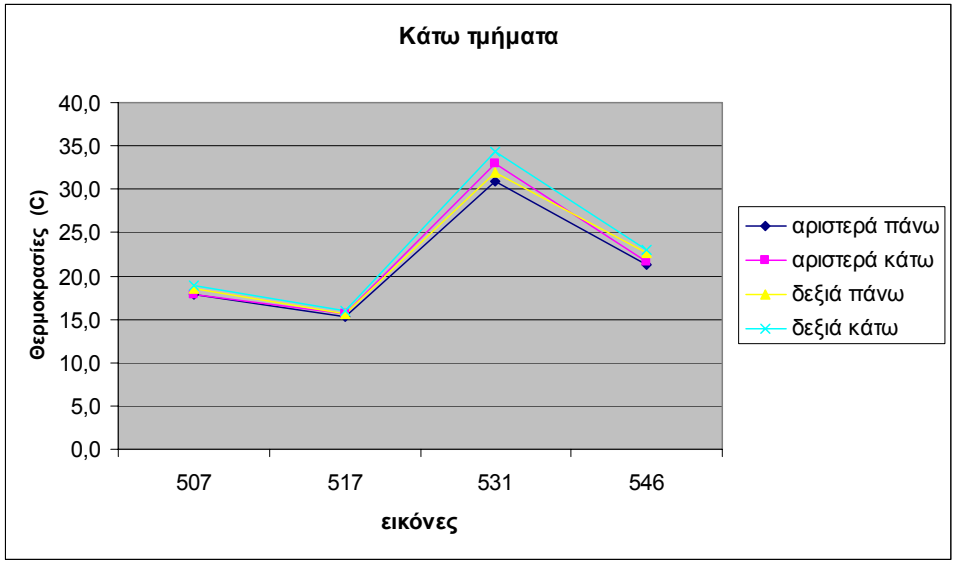
Εικόνα 48 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασίας

Πίνακας 6 : Μετρήσεις θερμοκρασιών ου

ΤΟΙΧΟΣ

	άσπρες περιοχές				μο	κάτω τμήμα				μο	
εικόνα	**αριστερά 1**	**αριστερά 2**	**δεξιά πάνω**	**δεξιά κάτω**	**άνω τμήμα**	**αριστερά πάνω**	**αριστερά κάτω**	**δεξιά πάνω**	**δεξιά κάτω**	**επιγραφές**	**αριστερα μο**
507	18,6	18,4	18,5	17,5	17,7	17,8	17,8	18,6	18,8	18,6	18,5
517	15,2	15,2	15,2	14,7	15,2	15,3	15,6	15,6	15,9	16,8	15,2
531	31,0	32,0	35,6	35,7	29,5	30,9	33,0	32,0	34,4	23,4	31,5
546	22,1	22,3	22,6	22,0	21,3	21,3	21,6	22,6	23,0	21,4	22,2

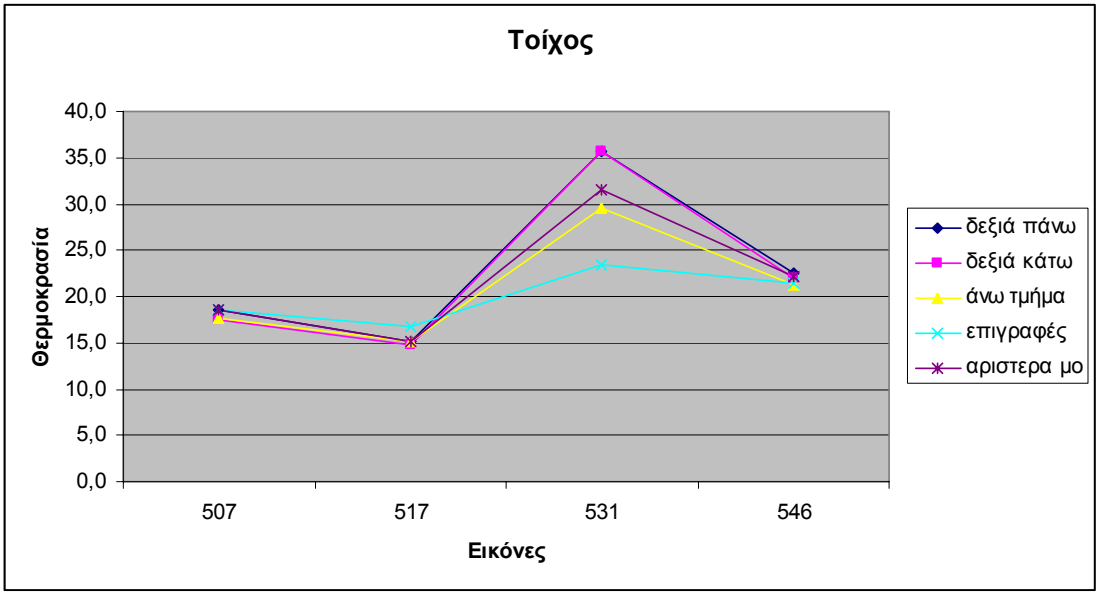
Το πρώτο διάγραμμα προκύπτει από τις τιμές των στηλών που αναφέρονται στο κάτω τμήμα.



Διάγραμμα 1 : Θερμοκρασίες στα κάτω τμήματα του τοίχου

Από το διάγραμμα των θερμοκρασιών του κάτω τμήματος μπορούν να συγκριθούν τόσο για κάθε πλευρά ξεχωριστά το άνω με το κάτω τμήμα της, όσο και τα αντίστοιχα πάνω και κάτω των δύο πλευρών. Σε γενικές γραμμές οι διαφοροποιήσεις είναι μικρές. Ωστόσο, ομαδοποιούνται σε δύο ζεύγη οι θερμοκρασίες των άνω και των κάτω τμημάτων, δεξιά και αριστερά. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο άνω τμήματα έχουν κοινή συμπεριφορά μεταξύ τους. Το ίδιο συμβαίνει και με τα δύο κάτω. Συγκεκριμένα, τα χαμηλότερα έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε αντίθεση με τα χαμηλότερα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αφορούν κυρίως στις εικόνες 531 και 546, εικόνες μέσα και με το πέρας της ημέρας.

Το επόμενο διάγραμμα αφορά στα υπόλοιπα στοιχεία των μετρήσεων που δεν εισήχθησαν στον προηγούμενο πίνακα. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να συγκριθούν η γενική τοιχοποιία, με τις περιοχές που διαφοροποιούνται και τα τμήματα ανάμεσα στις κεφαλές.



Διάγραμμα 2 : Θερμοκρασίες τοίχου

Στο διάγραμμα παρουσιάζονται οι μεταβολές των θερμοκρασιών όλων των στοιχείων της τοιχοποιίας πάνω από την οριζόντια γιρλάντα. Έτσι, με κίτρινο απεικονίζεται η μέση θερμοκρασία της «υγιούς» περιοχής και με τα υπόλοιπα χρώματα οι πιθανές προβληματικές περιοχές. Πράγματι, όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες παρουσιάζουν έντονα διαφορετική συμπεριφορά από το γενικό τμήμα. Οι διαφορές αυτές, βέβαια, δεν είναι διακριτές σε όλη τη διάρκεια. Από την ώρα λήψης της εικόνας 507 έως και αυτή της 517 οι θερμοκρασίες είναι κοντινές. Οι έντονες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται από εκείνη την ώρα λήψης και έπειτα και ξαναφθάνουν να πλησιάσουν στη βραδινή λήψη 546.

Πρώτα, η κατηγορία *επιγραφές* είναι η μοναδική η οποία, σε ορισμένες εικόνες, έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το γενικό τμήμα αλλά και από όλες τις υπόλοιπες. Ταυτόχρονα

έχει και πολύ μικρότερες διακυμάνσεις από όλες τις υπόλοιπες. Αυτή η περιγραφή, ωστόσο, δεν μαρτυρά, κατά πάσα πιθανότητα, μια προβληματική περιοχή. Αυτό διότι, λόγω γεωμετρίας της κατασκευής, το τμήμα αυτό βρίσκεται μεγάλο διάστημα της ημέρας υπό σκιά και άρα, θερμαίνεται σημαντικά λιγότερο από τις υπόλοιπες περιοχές.

Από όλες τις υπόλοιπες περιοχές, αυτή που είναι πλησιέστερα στο γενικό τμήμα, παρουσιάζοντας βέβαια σημαντικές διαφορές, είναι η *αριστερά*. Η περιοχή αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία της πιο έντονα από το γενικό τμήμα.

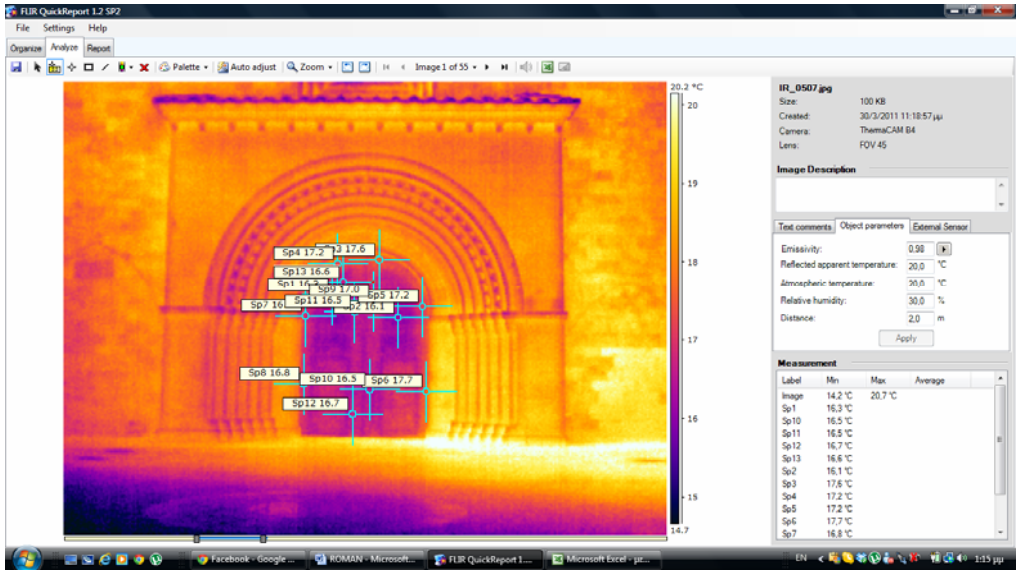
Ακόμη πιο έντονα αυξάνουν τη θερμοκρασία τους οι υπόλοιπες δύο περιοχές, *δεξιά πάνω* και *δεξιά κάτω*. Είναι οι πιο «απομακρυσμένες» θερμοκρασιακά από το γενικό τμήμα, ανάμεσα σε αυτές που έχουν υψηλότερη γενικά θερμοκρασία από αυτό. Σημαντικό είναι ότι οι δύο αυτές κατηγορίες έχουν όμοια συμπεριφορά και από το διάγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συναποτελούν υποπεριοχές της ίδιας θεματικής κατηγορίας.

Για την περιοχή της πόρτας μετρήθηκαν θερμοκρασίες θεωρώντας 5 κατηγορίες. Η πρώτη είναι οι σκούρες περιοχές που εντοπίσθηκαν στην επιφάνεια της πόρτας. Έπειτα, ξεχωριστά για το δεξιό και αριστερό φύλλο, τα δύο «τόξα» που σχηματίζονται στο ψηλότερο τμήμα της. Για τις κατακόρυφες ζώνες που επίσης σχηματίζονται στις εξωτερικές αλλά και εσωτερικές πλευρές των φύλλων της πόρτας, θεωρήθηκαν από δύο υποπεριοχές. Τέλος, λήφθηκε ο μέσος όρος των θερμοκρασιών του τμήματος που δεν παρουσιάζει ανωμαλίες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7 : Θερμοκρασίες πόρτας

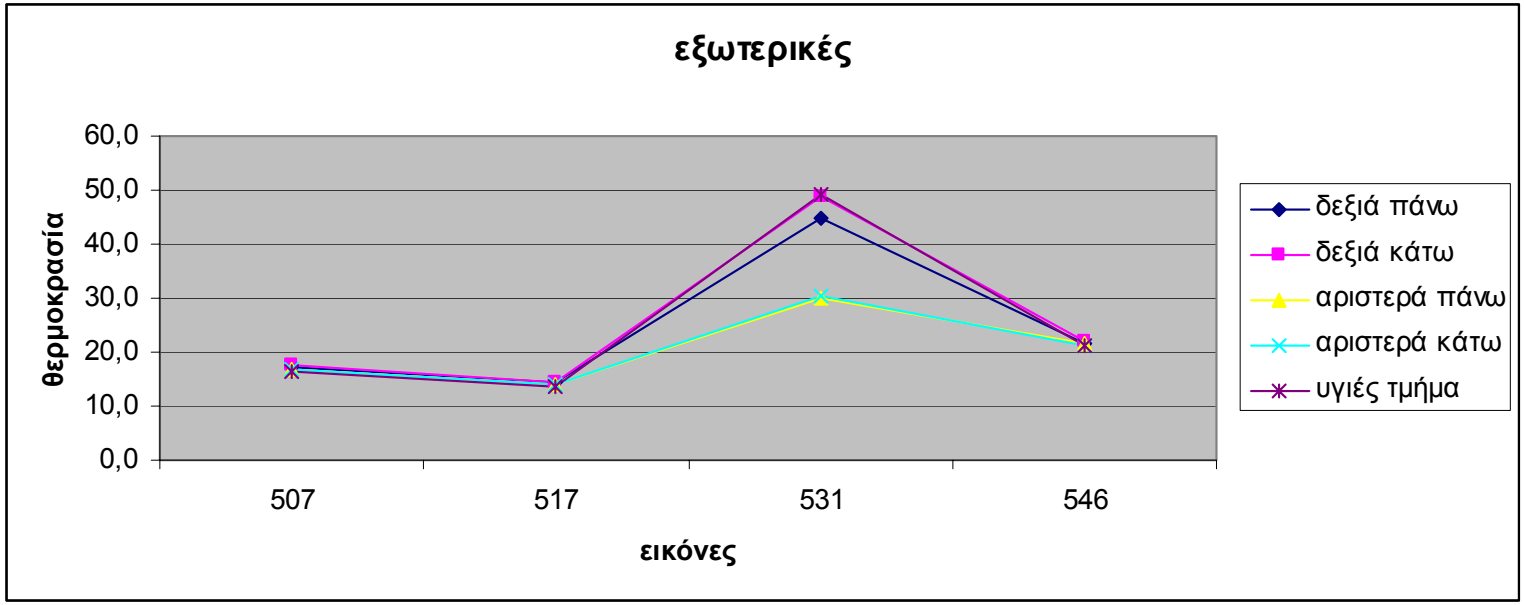
ΠΟΡΤΑ

	μο	τόξα πάνω		εξωτερικές κατακόρυφες γραμμές				εσωτερικές κατακόρυφες γραμμές				μο
εικόνα	**μαύρα**	**δεξιά**	**αριστερά**	**δεξιά πάνω**	**δεξιά κάτω**	**αριστερά πάνω**	**αριστερά κάτω**	**δεξιά πάνω**	**δεξιά κάτω**	**αριστερά πάνω**	**αριστερά κάτω**	**υγιές τμήμα**
507	16,2	17,3	17,3	17,2	17,6	16,8	16,8	17,0	16,5	16,5	16,7	16,6
517	13,3	14,5	14,7	14,3	14,3	14,2	14,0	13,7	13,7	13,5	13,7	13,6
531	45,0	30,0	30,0	45,0	49,0	30,0	30,5	47,0	51,4	50,9	53,6	49,2
546	20,9	21,7	21,6	21,7	21,9	21,5	21,4	21,9	21,3	21,6	21,5	21,4



Εικόνα 49 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασιών

Για την πιο εύκολη μελέτη των στοιχείων, σε πρώτο στάδιο, δημιουργήθηκε διάγραμμα για κάθε μία κατηγορία ξεχωριστά μαζί με το υγιές τμήμα.

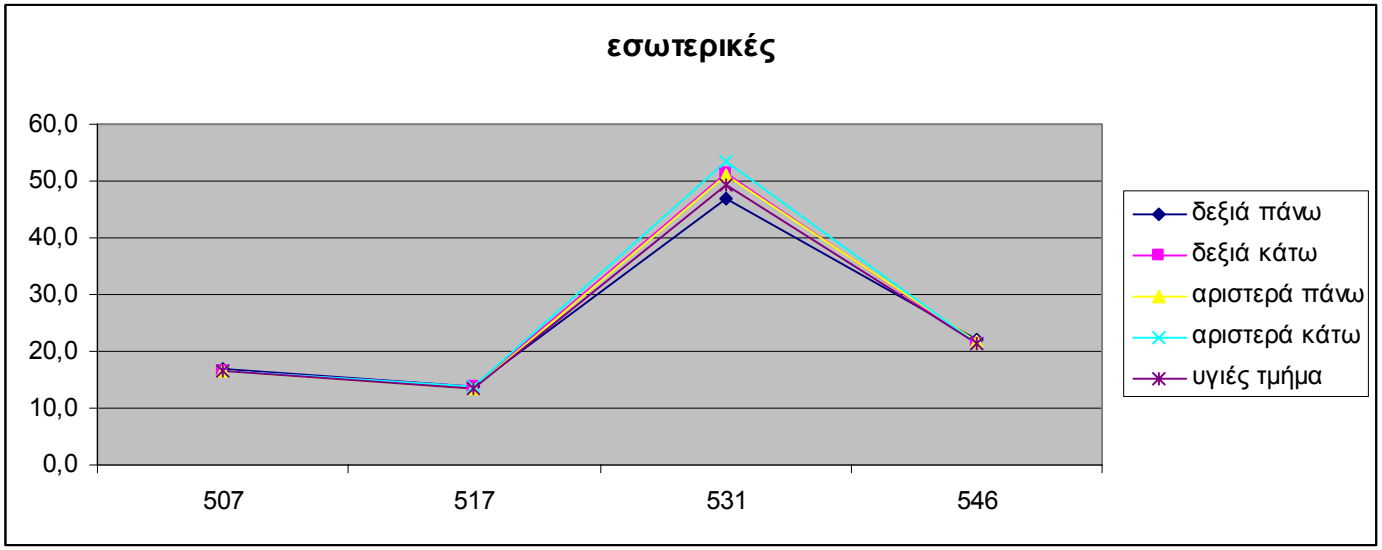


Διάγραμμα 3: Θερμοκρασίες εξωτερικών ακμών

Στον πρώτο πίνακα εξετάζονται οι δύο κατακόρυφες ζώνες που σχηματίζονται παράλληλα με τις εξωτερικές ακμές της πόρτας, σε ταυτόχρονη σύγκριση με το υγιές τμήμα της πόρτας.

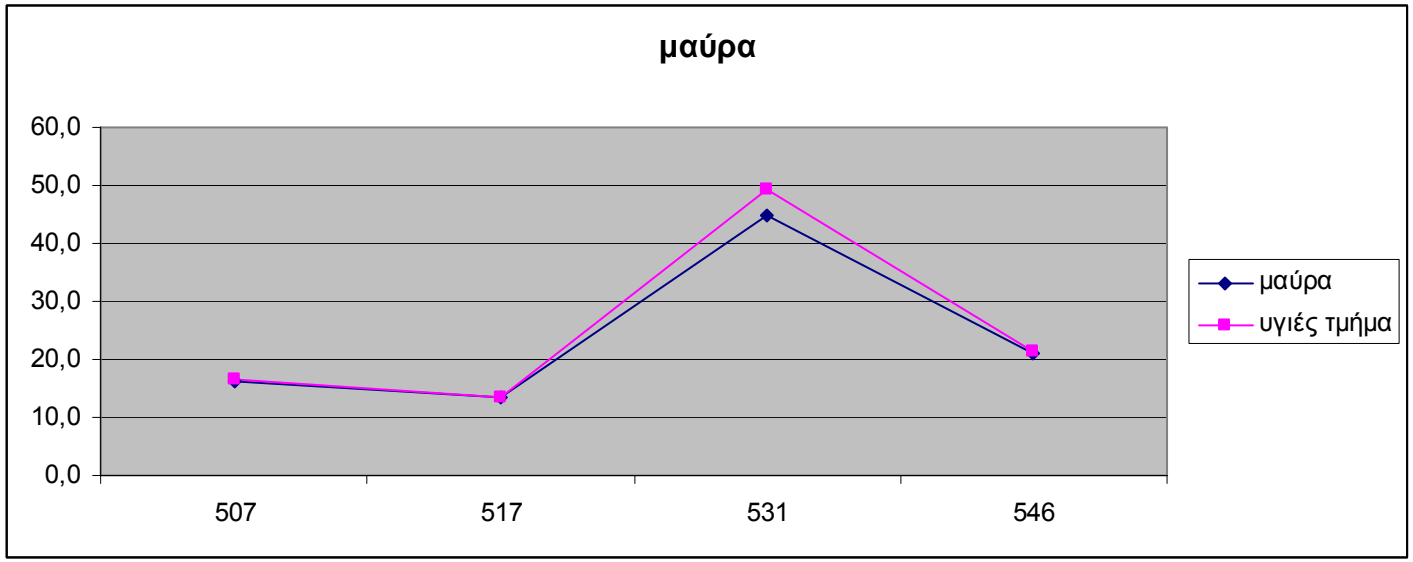
Ως πρώτη παρατήρηση, οι δύο ζώνες, δεξιά και αριστερή διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, τα δύο μέρη που συναποτελούν κάθε μία από αυτές δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους, με ιδιαίτερη ομοιότητα στην αριστερή ζώνη. Η τελευταία παρουσιάζει πολύ μικρότερες θερμοκρασίες και διακυμάνσεις από την άλλη. Επομένως, δεν μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι σε αυτές τις δύο περιοχές συμβαίνει το ίδιο φαινόμενο.

Σημαντικό είναι ότι η πορεία της θερμοκρασίας του υγιούς τμήματος της πόρτας είναι σχεδόν όμοια με αυτή του φαινομένου στη δεξιά ζώνη και ιδιαίτερα στο ψηλό της τμήμα.



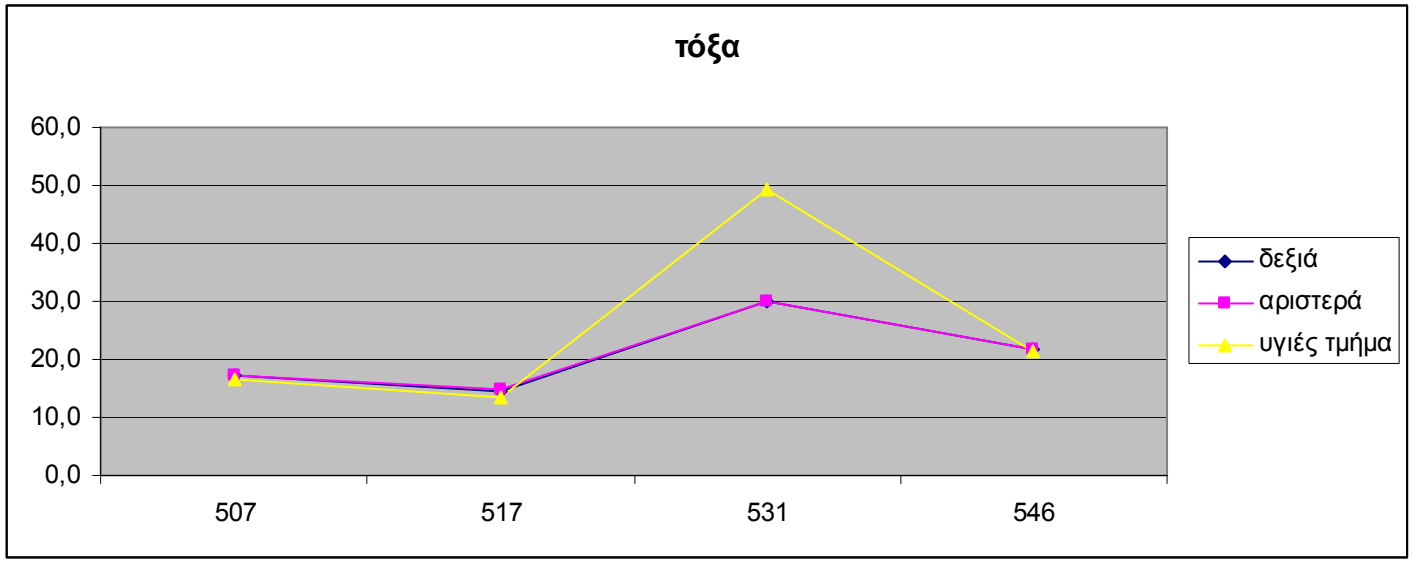
Διάγραμμα 4 : Θερμοκρασίες εσωτερικών ακμών

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές των ζωνών που σχηματίζονται εκατέρωθεν του χωρίσματος των δύο φύλλων, καθώς και αυτή του υγιούς τμήματος. Εδώ , μπορούμε να πούμε ότι το φαινόμενο είναι διαχωρίσιμο από το υγιές τμήμα της πόρτας. Ωστόσο, τα τμήματα άνω και κάτω στα δεξιά δεν ακολουθούν την ίδια πορεία και φαίνονται να μην οριοθετούν ένα συνεχές φαινόμενο. Δεν συμβαίνει το ίδιο και με τα τμήματα στα αριστερά.



Διάγραμμα 5 : Θερμοκρασίες σκούρων τμημάτων

Εδώ φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας των σκούρων τμημάτων που έχουν εντοπιστεί στην πόρτα σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές τους. Είναι προφανές ότι αυτές οι περιοχές συμπεριφέρονται διαφορετικά από το υπόλοιπο σχήμα τους. Το στοιχείο αυτό μαζί με το σχήμα της απεικόνισής τους, παραπέμπει, πιθανώς, σε κάποια ανοίγματα τα οποία δεν χρησιμοποιούνται πια και έχουν καλυθφθεί, ή σχηματισμούς από την εσωτερική πλευρά της πόρτας.



Διάγραμμα 6 : Θερμοκρασίες τόξων

Στις περισσότερες εικόνες υπάρχει ένας σχηματισμός στο ανώτερο τμήμα της πόρτας, σε σχήμα τόξου, όμοια στα δεξιά τόσο και στα αριστερά. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται σε αυτό το διάγραμμα, πάλι συγκριτικά με το υγιές τμήμα. Η μορφή του διαγράμματος είναι ξεκάθαρη και τονίζει τη διαφοροποίηση αυτών των τμημάτων από την υπόλοιπη πόρτα.

Αρχικά, τα δύο τμήματα αυτά έχουν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Επομένως, μπορεί να υποτεθεί ότι αποτελούν τμήματα του ίδιου φαινομένου. Η διακύμανση της θερμοκρασίας τους είναι πολύ μικρότερη από αυτή του γενικού τμήματος, ενώ οι θερμοκρασίες του είναι εν γένει χαμηλότερες σε σύγκριση με το τελευταίο.

4.1.5 Συμπεράσματα

Η μελέτη της Ρωμανικής Πύλης διαχωρίστηκε σε δύο τμήματα. Το πρώτο αφορά στην τοιχοποιία και όλα τα διακοσμητικά στοιχεία της όψης και το δεύτερο στην ξύλινη πόρτα.

Ήδη από την όψη της πύλης στη συμβατική εικόνα παρατηρήθηκαν ορισμένες παθολογίες στους λίθους που την αποτελούν. Η πρώτη αφορά σε ορισμένους λίθους οι οποίοι έχουν διαβρωμένη όψη και ιδιαίτερα τραχεία επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση στα κατώτερα τμήματα της όψης, δηλαδή κάτω από την οριζόντια γιρλάντα. Ιδιαίτερα έντονο είναι το φαινόμενο στην αριστερή πλευρά. Πέρα από αυτήν την περιοχή υπάρχουν επίσης καταπονημένοι λίθοι και σε άλλα σημεία, κυρίως στα δεξιά πάνω από την οριζόντια γιρλάντα. Το φαινόμενο αυτό έγινε ιδιαίτερα διακριτό και από το αποτέλεσμα της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, όπου λίθοι του ίδιου υλικού ταξινομήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές θεματικές κατηγορίες, ανάλογα με την κατάστασή τους.

Πέρα από τη διάβρωση, υπάρχουν πέτρες οι οποίες, μολονότι έχουν λεία επιφάνεια, παρουσιάζουν διαφορετική όψη από αυτή των υπολοίπων. Η διαφοροποίησή τους αυτή εντοπίσθηκε και στις θερμικές εικόνες, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι συγκεκριμένοι λίθοι βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση, απ' ό,τι το σύνολο. Οι λίθοι αυτοί βρίσκονται στο άνω κομμάτι της πύλης και στη συμβατική εικόνα είναι αυτές που έχουν σκουρότερο χρώμα.

Στη συνέχεια, από τις διάφορες επεξεργασίες των εικόνων, οριοθετήθηκαν νέες προβληματικές περιοχές και επιβεβαιώθηκαν ήδη παρατηρημένες. Η βασική ανωμαλία που παρατηρήθηκε είναι μεγαλύτερες και μικρότερες περιοχές της τοιχοποιίας οι οποίες συμπεριφέρονται διαφορετικά από την όψη γενικά. Η πιο εκτεταμένη από αυτές τις περιοχές βρίσκεται στα αριστερά, πάνω από την οριζόντια γιρλάντα και στο μέσο περίπου του ημικυκλικού τόξου της πύλης. Εκτείνεται, δε, από το τόξο έως την ακμή του τοίχου. Αντίστοιχες περιοχές υπάρχουν και από τα δεξιά, με μικρότερη έκταση εδώ. Η μεγαλύτερη από αυτές βρίσκεται στο ίδιο ύψος με την προηγούμενη. Εντοπίζονται δύο ακόμη, μικρότερες. Η πρώτη, στην γωνία του τόξου με την οριζόντια γιρλάντα και η δεύτερη στο σημείο που η οριζόντια γιρλάντα φθάνει στην ακμή του τοίχου. Από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας επιβεβαιώθηκε ότι αυτά τα τμήματα πράγματι συμπεριφέρονται διαφορετικά από το γενικό τμήμα, το οποίο θεωρήθηκε ως υγιές. Παράλληλα, ενώ δεν έχουν τις ίδιες θερμοκρασίες, οι μεταβολές τους ακολουθούν αντίστοιχη πορεία.

Τα σημεία της όψης τα οποία έχουν σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά από το γενικό τμήμα είναι τα τμήματα ανάμεσα στις κεφαλές, κάτω από το οριζόντιο γείσο, με έμφαση στα τμήματα με επιγραφές. Ωστόσο, λόγω της θέσης τους, τα τμήματα αυτά βρίσκονται το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας υπό σκιά. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τη χαμηλότερη θερμοκρασία τους. Επομένως, δεν μπορούν τα τμήματα αυτά να θεωρηθούν προβληματικά, εφόσον υπάρχει το πρόβλημα της σκιάς το οποίο δεν έχει εξαλειφθεί.

Υπάρχει ένα ακόμη φαινόμενο το οποίο σχολιάστηκε παραπάνω, ως συμπέρασμα από την φωτοερμηνεία της συμβατικής εικόνας. Ωστόσο, από την επεξεργασία αυτής και των θερμικών εικόνων, προέκυψε ένα στοιχείο ακόμη. Αυτό που είχε παρατηρηθεί είναι ότι τα τμήματα κάτω από την οριζόντια γιρλάντα αποτελούνται από γενικά πιο διαβρωμένες πέτρες απ' ό,τι το υπόλοιπο τμήμα. Από τις επεξεργασμένες εικόνες και τις μετρήσεις των θερμοκρασιών προέκυψε ότι αυτά τα τμήματα αποτελούνται από δύο υποπεριοχές το καθένα. Συγκεκριμένα, μπορεί σε αυτά τα τμήματα να διαχωριστεί το άνω από το κάτω τμήμα τους, όσον αφορά στις θερμοκρασιακές μεταβολές τους. Τα χαμηλότερα τμήματα παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες και μικρότερες διακυμάνσεις από τα ανώτερα.

Το δεύτερο τμήμα της μελέτης αφορά στην πόρτα. Από όλα τα στάδια της επεξεργασίας προέκυψαν διάφορες ανωμαλίες στο αντικείμενο αυτό. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ανωμαλίες αυτές δεν είναι ορατές στη συμβατική εικόνα.

Το πρώτο φαινόμενο που παρατηρήθηκε είναι διάφοροι σχηματισμοί, σχεδόν ορθογώνιοι, στο πάνω τμήμα της πόρτας, σε αμφότερα τα φύλλα. Οι περιοχές αυτές είχαν στις εικόνες διαφορετική απεικόνιση από τα υπόλοιπα τμήματα. Το σχήμα τους οδηγεί στην υπόθεση ότι αυτά τα τμήματα είναι κάποια ανοίγματα τα οποία πλέον δεν χρησιμοποιούνται.

Ένα από τα πιο έντονα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στα όρια της πόρτας είναι δύο περιοχές, αντίστοιχες στα δύο φύλλα. Είναι δύο περιοχές με σχήμα ημικυκλικού τόξου, με μεγάλο πάχος, στο ανώτερο σημείο της πόρτας. Το ίδιο φαινόμενο φαίνεται να εκτείνεται και σε άλλες κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, σε τέσσερις κατακόρυφες ζώνες στις ακμές των δύο φύλλων της πόρτας και σε δύο ακόμη εκατέρωθεν του χωρίσματος των δύο φύλλων. Ωστόσο, εδώ πρέπει να δοθεί προσοχή, διότι ορισμένα από αυτά τα τμήματα έχουν μεγάλη διάρκεια έκθεσης σε σκιά, και άρα είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Αυτό ισχύει πρώτα για τα δύο τόξα που περιγράφηκαν αλλά και για τη δεξιά από τις εξωτερικές ζώνες. Η διάκριση αυτή των δύο εξωτερικών ζωνών προκύπτει και από τη μέτρηση των θερμοκρασιών. Το ίδιο δεν ισχύει για τις δύο εσωτερικές ζώνες, οι οποίες δεν βρίσκονται σε σκιά.

4.2 Όψη Ρωμανικής Πύλης

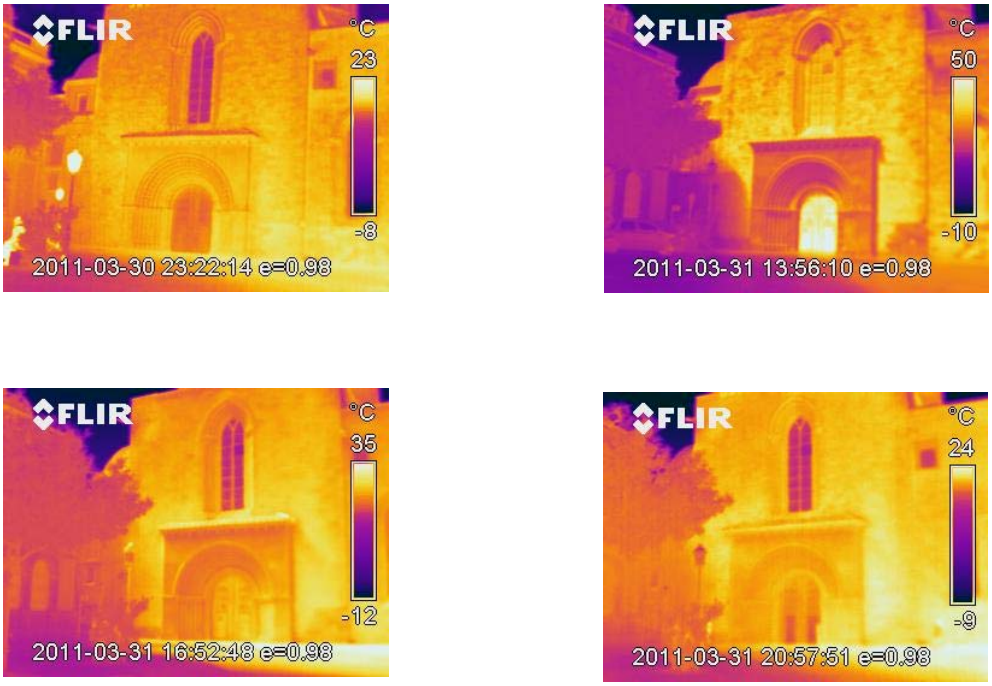
Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται όλη η όψη της Ρωμανικής Πύλης που εξετάσθηκε προηγουμένως. Η όψη αυτή αποτελείται από μια λίθινη τοιχοποιία, τη Ρωμανική Πύλη και ένα γοτθικό παράθυρο με κατακόρυφες ραβδώσεις. Το παράθυρο διακοσμούν βιτρό. Λόγω εμποδίου (δέντρο) από την ανάλυση εξαιρέθηκε μια μικρού πλάτους κατακόρυφη λωρίδα στα αριστερά της όψης και, τελικά, τα όρια του αντικειμένου που υπέστησαν επεξεργασία είναι αυτά που

φαίνονται στις εικόνες μετά την προ-επεξεργασία. Εδώ, θα εστιαστεί το ενδιαφέρον στην τοιχοποιία αλλά και στην κατασκευή του παραθύρου, εφ' όσον έχει γίνει ξεχωριστή μελέτη για την Πύλη.

Πίνακας 8 : Πίνακας λήψεων όψης

Θερμικές εικόνες	Ώρα λήψης	Εξωτερική Θερμοκρασία (ºC)
508	23:22	17.2
534	13:56	21.5
543	16:52	24.0
547	20:57	21.5

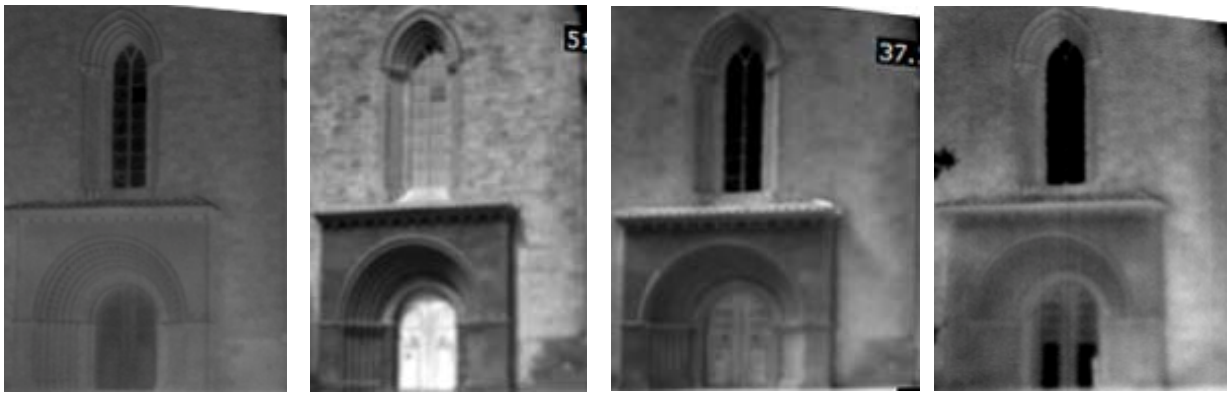
4.2.1 Λήψεις



Εικόνα 50 : Εικόνες 508, 534, 543, 547

Εικόνες μετά από επεξεργασία

Κατά την προ-επεξεργασία, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι εικόνες απέκτησαν κοινό μέγεθος 170 x 190 pixel.



Εικόνα 51 : Εικόνες εισόδου 508, 534, 543, 547

4.2.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων

Παρατηρήσεις σχετικά με τις λήψεις

- Στην όψη που εξετάζεται παρατηρούνται ήδη με το ανθρώπινο μάτι δύο φαινόμενα. Πρώτον, στο δεξί τμήμα του τοίχου και σε όλο του το ύψος, η λιθοδομή είναι καταπονημένη, με πέτρες διαβρωμένες και αποκολλημένες. Δεύτερον, στην ίδια πλευρά, στο κατώτερο τμήμα της υπάρχει διαφορετικό υλικό, πιθανώς προσθήκη πετρών οι οποίες αντικατέστησαν το προηγούμενο υλικό, λόγω βλαβών. Παρακάτω, ανάμεσα στις παρατηρήσεις, θα μελετηθεί εάν και με ποιο τρόπο τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται στις θερμικές λήψεις και θα αναφέρονται ως *φαινόμενο 1* και *φαινόμενο 2*, αντίστοιχα.
- Σε όλες τις λήψεις, η κλίμακα της θερμοκρασίας έχει μεγάλο εύρος και, ταυτόχρονα, περιλαμβάνει και θερμοκρασίες υπό το μηδέν. Είναι προφανές ότι, πρώτον, το εύρος των θερμοκρασιών που αναφέρεται στο αντικείμενο προς εξέταση είναι μικρότερο. Αυτό διότι οι ακραίες θερμοκρασίες αντιστοιχούν σε αντικείμενα που δεν λαμβάνονται υπ' όψη στην μελέτη. Δεύτερον, οι θερμοκρασίες υπό το μηδέν αντιστοιχούν στο κομμάτι του ουρανού, και κατά συνέπεια είναι πλασματικές.

Δημιουργία Πολυφασματικής εικόνας

Η πολυφασματική εικόνα προέκυψε από την επίθεση των τεσσάρων θερμικών εικόνων και απαρτίζεται από τα εξής τέσσερα κανάλια αντίστοιχα :

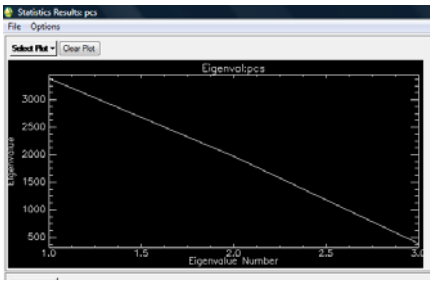
Κανάλι 1 : εικόνα 508

Κανάλι 2 : εικόνα 534

Κανάλι 3 : εικόνα 543

Κανάλι 4 : εικόνα 547

4.2.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών



Εικόνα 52 : Διάγραμμα ιδιοτιμών

Πίνακας 9: Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	3380	0,5739
2	1972	0,3348
3	392	0,0666

Από τις ιδιοτιμές των κυρίων συνιστωσών προκύπτει ότι η PC1 εκφράζει την πλειονότητα της διασποράς των πρωτογενών δεδομένων (57.39 %). Ωστόσο, και η δεύτερη εικόνα εκφράζει σημαντικό ποσοστό της διασποράς, το οποίο ανέρχεται στο 33.5 %. Επομένως, η πληροφορία που συλλέχθηκε από τις τέσσερις θερμικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, συμπυκνώθηκε κυρίως σε δύο εικόνες, οι οποίες είναι οι εικόνες της πρώτης και της δεύτερης κύριας συνιστώσας αντίστοιχα.

Επίσης, οι συνιστώσες 1 και 2 εξηγούν το μεγαλύτερο κομμάτι της διασποράς της εικόνας, αφού το άθροισμα των μεταβλητοτήτων τους είναι 57.4+33.5=90.9 % .

Το ποσοστό της διασποράς της τρίτης συνιστώσας είναι ιδιαίτερα μικρό. Μπορεί να εξαχθεί σαν συμπέρασμα ότι η τρίτη εικόνα περιλαμβάνει πληροφορία όχι χρήσιμη, αλλά που πιθανότερα είναι θόρυβος.

Σχόλια στις εικόνες των κύριων συνιστωσών

Γενικά, σημειώνεται ότι η αναστροφή των τόνων στις συνιστώσες 1 και 2 δείχνει έλλειψη συσχέτισης μεταξύ των εικόνων των κύριων συνιστωσών (Αργιαλάς, 1999).

PC 1

Εικόνα 53 : PC 1

- Περιγράφονται καθαρά το φαινόμενο 1 και 2. Αυτό το γεγονός επισημαίνει ότι οι περιοχές αυτές πράγματι συμπεριφέρονται διαφορετικά από το σύνολο, παρότι αποτελούνται από το ίδιο υλικό.
- Φαίνεται, επίσης, η διαφορετική συμπεριφορά των λίθων σε όλη την έκταση της τοιχοποιίας. Είτε είναι διαφορετικές πέτρες είτε έχουν επηρεαστεί διαφορετικά από τις εξωτερικές συνθήκες.
- Τονίζεται η διαφορά στο ένα τζάμι του παραθύρου που επισημάνθηκε και παραπάνω
- Διαφορετική απεικόνιση έχει και το κάτω και δεξιά τμήμα της πύλης, ιδιαίτερα στα κολωνάκια

PC 2

- Χαρακτηριστική είναι η διαφορά στην απεικόνιση λωρίδας του οριζόντιου γείσου, το οποίο είναι ιδιαίτερα ανοιχτόχρωμο
- Αντίστοιχη διαφορά, όπως και στην εικόνα της πρώτης κύριας συνιστώσας, στα κολωνάκια στο δεξί μέρος της πύλης
- Περιγράφεται το φαινόμενο 2 με πιο σκούρο τόνο
- Πιο αχνό εμφανίζεται το φαινόμενο 1
- Υπάρχει ένα τμήμα στην εξωτερική καμπύλη της πύλης, στο ακραίο αριστερό τμήμα που έχει διαφορετική καταγραφή από το υπόλοιπο σύνολο.

Εικόνα 54 : PC 2

- Παρόλο που η PC 2 έχει μικρότερο ποσοστό διασποράς από την PC1 , καταδεικνύει ορισμένα φαινόμενα τα οποία δεν είναι τόσο εμφανή στην πρώτη συνιστώσα. Συγκεκριμένα, η ανομοιομορφία του τμήματος δεξιά της πύλης σχετικά με την υπόλοιπη δομή, το οποίο είναι έντονο σε αυτή την εικόνα.

PC 3

Εικόνα 55 : PC 3

- Η εικόνα της τρίτης συνιστώσας περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο θόρυβο και έχει μικρότερο βαθμό λεπτομέρειας. Χαρακτηριστικό είναι ότι είναι πιο τραχειά από τις δύο προηγούμενες εικόνες.
- Κάποια φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στις προηγούμενες εικόνες εμφανίζονται κι εδώ, ωστόσο με λιγότερη σαφήνεια. Γι αυτό το λόγο , δεν επιλέγεται αυτή η εικόνα για περαιτέρω ανάλυση.

4.2.3 Συνσδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας

Δημιουργία πολυφασματικής εικόνας

Η νέα πολυφασματική εικόνα δημιουργήθηκε με την επιπλέον επίθεση των τριών καναλιών της συμβατικής εικόνας. Το μέγεθος αυτής της εικόνας, ίσο με αυτό της συμβατικής, είναι 1236 x 1610 pixel και η δομή της η παρακάτω :

κανάλι 1 : θερμική εικόνα 508

κανάλι 2 : θερμική εικόνα 534

κανάλι 3 : θερμική εικόνα 543

κανάλι 4 : θερμική εικόνα 547

κανάλι 5 : red κανάλι συμβατικής

κανάλι 6 : green κανάλι συμβατικής

Εικόνα 56: Συμβατική εικόνα

4.2.3.1 Έγχρωμα Σύνθετα

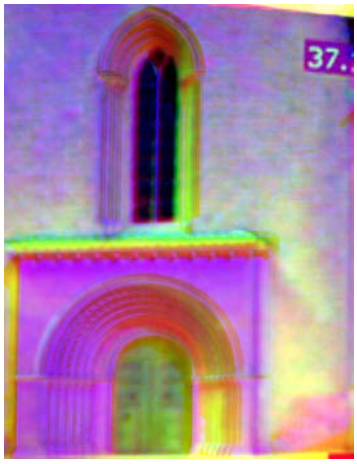
- Κανάλι 1 : κανάλι 1 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 2 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 3 : κανάλι 7 πολυφασματικής εικόνας

Εικόνα 57 : Σύνθετο 1

Στο σύνθετο αυτό συμμετέχουν δύο θερμικές εικόνες και το μπλε κανάλι της συμβατικής. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε αρκετή θερμική πληροφορία η οποία ταυτόχρονα απεικονίζεται πάνω στο αντικείμενο με τη βοήθεια της πληροφορίας από τη θερμική εικόνα. Στο σύνθετο αυτό κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις :

- Εντοπίζεται ξανά το τζάμι του παραθύρου με τη διαφορετική θερμική απόκριση (μπλε χρώμα)
- Περιγράφεται μια ευρύτερη περιοχή στο δεξί κομμάτι της πύλης, η οποία δεν είναι ομοιόμορφη με την υπόλοιπη δομή, παρόλο που αποτελούνται από το ίδιο υλικό (πορτοκαλί χρώμα).
- Εντοπίζεται η διαφορετική συμπεριφορά της περιοχής του φαινομένου 2 , από την υπόλοιπη τοιχοποιία.
- Διαγράφεται περιοχή του φαινομένου 1. Επιπλέον, παρατηρείται ότι και σε σημεία έξω από τα όρια του φαινομένου υπάρχει όμοια πληροφορία.

- Κανάλι 1 : κανάλι 1 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 3 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 3 : κανάλι 7 πολυφασματικής εικόνας



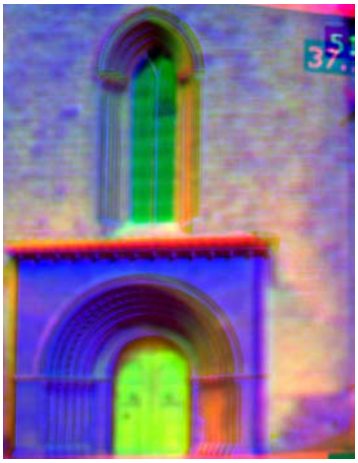
Εικόνα 58 : Σύνθετο 2

- Εμφανές το φαινόμενο 1
- Εμφανίζεται ξανά το τμήμα που περιγράφηκε προηγουμένως στο δεξί τμήμα της πύλης
- Σε αυτό το σύνθετο εντοπίζεται τμήμα της εξωτερικής καμπύλης, στα αριστερά, που είναι διαχωρισμένο ως προς τη θερμοκρασία από τα υπόλοιπα

Παρακάτω θα αναφέρονται επιγραμματικά φαινόμενα που καταγράφονται στα σύνθετα και έχουν παρατηρηθεί αντίστοιχα και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

- Κανάλι 1 : κανάλι 3 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 2 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 3 : κανάλι 6 πολυφασματικής εικόνας

  - Φαινόμενο 1
  - Φαινόμενο 2
  - Τζάμι
  - Δεξί τμήμα πύλης



Εικόνα 59 : Σύνθετο 3

- Κανάλι 1 : κανάλι 7 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 2 : κανάλι 2 πολυφασματικής εικόνας
  Κανάλι 3 : κανάλι 4 πολυφασματικής εικόνας

Εικόνα 60 : Σύνθετο 4

  - Φαινόμενο 1, εξαπλωμένο και σε σημεία σε όλη την τοιχοποιία (ανοιχτό γαλάζιο χρώμα)
  - Τζάμι (δεν είναι πράσινο όπως τα υπόλοιπα τζάμια)
  - Φαινόμενο 2
  - Δεξί τμήμα πύλης. Εδώ το φαινόμενο εμφανίζεται λίγο πιο διευρυμένο προς τα πάνω

4.2.3.2 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση

Αλγόριθμος : Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρήθηκαν είκοσι κλάσεις, όπως περιγράφονται παρακάτω :

Οι κλάσεις 1-4 αφορούν στην τοιχοποιία

1. Ανοιχτόχρωμη πέτρα : οι πέτρες με άσπρο ή πολύ ανοιχτά χρώματα που είναι κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια του τοίχου
2. Σκούρα πέτρα : οι σκούρες πέτρες που βρίσκονται σε όλο το ύψος της δεξιάς πλευράς του τοίχου
3. γκρι πέτρα : οι πέτρες με γκρι χρώματα που είναι κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια του τοίχου
4. άσπρη πέτρα : οι πέτρες άσπρου χρώματος που έχουν προστεθεί στην κάτω δεξιά γωνία της όψης
5. ξύλο : το ξύλο της πόρτας εισόδου
6. βιτρό : τα τζάμια – βιτρό που αποτελούν το παράθυρο
7. μέταλλο : τα μεταλλικά στοιχεία της πόρτας
8. οροφή : το οριζόντιο γείσο της οροφής της κατασκευής της πύλης
9. γιρλάντα γείσου : η εξωτερική γιρλάντα στο πλαίσιο του παραθύρου

κατασκευή της πύλης

10. γιρλάντα 1 : το εξωτερικό διακοσμητικό τόξο της πύλης
11. γιρλάντα 1 σκιασμένη : οι εξωτερικές δαντελωτές διακοσμήσεις στα τόξα της πύλης, στα τμήματα όπου είναι υπό σκιά
12. γιρλάντα σκούρα : οι εσοχές που δημιουργούν οι διακοσμήσεις στα τόξα της πύλης
13. γιρλάντα σκούρα σκιασμένη : οι εσοχές που δημιουργούν οι διακοσμήσεις στα τόξα της πύλης και βρίσκονται υπό σκιά
14. σκούρος τοίχος : οι περιοχές της τοιχοποιίας της πύλης με σκούρα πέτρα
15. σκούρος τοίχος σκιά : οι περιοχές της τοιχοποιίας της πύλης με σκούρα πέτρα που βρίσκονται υπό σκιά. Συγκεκριμένα, είναι τα κολωνάκια στα δεξιά της πύλης
16. τοίχος ανοιχτόχρωμος : οι περιοχές της τοιχοποιίας της πύλης με ανοιχτόχρωμη πέτρα

ανοιχτόχρωμη πέτρα	
σκούρα πέτρα	
γκρι πέτρα	
άσπρη πέτρα	
ξύλο	
βιτρώ	
μέταλλο	
οροφή	
γιρλάντα γείσου	
γιρλάντα 1	
γιρλάντα 1 σκιασμένη	
γιρλάντα σκούρα	
γιρλάντα σκούρα σκιασμένη	
σκούρος τοίχος	
σκούρος τοίχος σκιά	
τοίχος ανοιχτόχρωμος	
τοίχος ανοιχτόχρωμος σκιά	
γείσο	
γείσο σκιασμένο	
γείσο σκιασμένο 2	

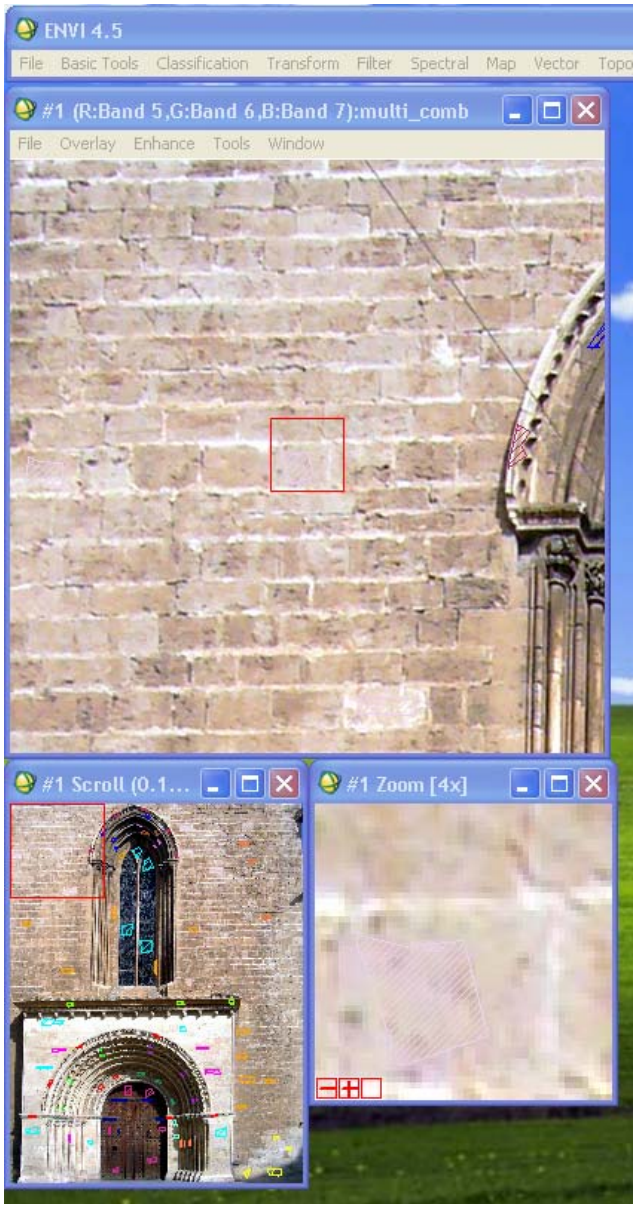
17. τοίχος ανοιχτόχρωμος σκιά : οι περιοχές της τοιχοποιίας της πύλης με ανοιχτόχρωμη πέτρα, υπό σκιά. Συγκεκριμένα, είναι στη δεξιά παραστάδα της πόρτας

κατασκευή παραθύρου

18. γείσο : οι αψιδωτές ραβδώσεις του παραθύρου
19. γείσο σκιασμένο : οι αψιδωτές ραβδώσεις του παραθύρου υπό σκιά
20. γείσο σκιασμένο 2 : οι εσωτερικές αψιδωτές ραβδώσεις του παραθύρου

Για τους λόγους που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενη ενότητα ήταν κι εδώ απαραίτητο, για την ορθότερη λειτουργία της ταξινόμησης, να θεωρηθούν δύο διαφορετικές κλάσεις για το ίδιο υλικό, όταν αυτό εμφανίζεται και υπό σκιά σε κάποια τμήματα της εικόνας.

Στη διπλανή εικόνα φαίνονται οι περιοχές εκπαίδευσης που ορίσθηκαν για κάθε θεματική κατηγορία.



Εικόνα 61 : Περιοχές εκπαίδευσης

Ταξινομημένη εικόνα

Αποτελέσματα επιβλεπόμενης ταξινόμησης

Εικόνα 62 : Ταξινομημένη εικόνα

Παρακάτω, επιδιώκεται να εκτιμηθεί η ορθότητα και η ακρίβεια της ταξινόμησης φωτοερμηνευτικά, δηλαδή παρατηρώντας την ταξινομημένη εικόνα και ταυτόχρονα συγκρίνοντάς την με την συμβατική. Ελέγχεται αν τα αποτελέσματα που έδωσε η επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι σωστά και ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Εάν, δηλαδή, οι θεματικές κλάσεις αντιστοιχούν στις «πραγματικές» κλάσεις που θεωρήθηκαν πάνω στο αντικείμενο.

Στην περίπτωση που υπάρχει κάποια αναντιστοιχία εξετάζεται ο λόγος για τον οποίο προέκυψε, ενώ ταυτόχρονα ερευνάται εάν αυτή η αναντιστοιχία μπορεί να μαρτυρά κάποια παθολογία του αντικειμένου.

Τοιχοποιία

Στο μεγαλύτερο τμήμα της τοιχοποιίας έχουν ταξινομηθεί ικανοποιητικά οι λίθοι που ανήκουν στις κλάσεις *ανοιχτόχρωμη πέτρα* και *γκρι πέτρα*. Συγκεκριμένα, στις περιοχές αριστερά και δεξιά του παραθύρου, ως τα όρια του φαινομένου 1 , τα αντικείμενα έχουν ταξινομηθεί στις κλάσεις που πρέπει. Ωστόσο, παρατηρείται ότι στο άνω και δεξιά τμήμα ορισμένοι λίθοι έχουν ταξινομηθεί στην κατηγορία *τοίχος ανοιχτόχρωμος σκιά* και *τοίχος ανοιχτόχρωμος*, οι οποίες αφορούν στην κατασκευή της πύλης και όχι στην δεδομένη τοιχοποιία. Συγκεκριμένα, λιγότεροι έχουν ταξινομηθεί στην κλάση *τοίχος ανοιχτόχρωμος* και λίγο περισσότεροι στην κλάση *τοίχος ανοιχτόχρωμος σκιά*. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ορισμένες από τις ανοιχτόχρωμες πέτρες του τοίχου έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτές της κατασκευής της πύλης. Με δεδομένο αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί ακριβής ταξινόμηση των υλικών αυτών σε διαφορετικές κλάσεις και, έτσι, η ταξινόμηση αυτή γίνεται αποδεκτή. Για τον ίδιο λόγο, αργότερα θα επισημανθεί η αντίστοιχη «σύγχυση» των ίδιων κλάσεων στο τμήμα της πύλης.

Όσον αφορά στην επιφάνεια του φαινομένου 1, φαίνεται ότι, πέρα από την πλειονότητα των λίθων, που εμφανίζονται σωστά ταξινομημένοι, υπάρχουν σημεία που έχουν ταξινομηθεί στην κλάση *γείσο* (μπλε χρώμα). Σχετικά με το άνω τμήμα, τα στοιχεία που έχουν ταξινομηθεί στην κλάση που προαναφέρθηκε, είναι, αρχικά, λίγες και μικρές επιφάνειες λίθων, οι οποίες έχουν προβλήματα στην επιφάνεια, διάβρωση, αποκόλληση κλπ. Κατά δεύτερο, το μεγαλύτερο ποσοστό των άστοχα ταξινομημένων αντικειμένων δεν είναι επιφάνεια πέτρας αλλά οι αρμοί που τους περιβάλλουν. Το «πρόβλημα» αυτό στην ταξινόμηση υποδεικνύει το πρόβλημα που ήδη έχει εντοπιστεί σε εκείνη την περιοχή. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη συνδεσμολογία των πετρών, ανάμεσα στις οποίες πλέον υπάρχουν κενά, απώλεια συνδετικού υλικού και ασυνέχεια λιθοδομής.

Η περιοχή του φαινομένου 1 αναμένεται να έχει ταξινομηθεί στην κλάση άσπρη πέτρα και αυτό πράγματι έχει προκύψει για το μεγαλύτερο τμήμα της. Ωστόσο, υπάρχει μια ζώνη, σχεδόν περιμετρική, η οποία έχει ταξινομηθεί στην κατηγορία τοίχος ανοιχτόχρωμος. Το πρόβλημα αυτό ήταν αναμενόμενο. Από τη μία πλευρά, στην κάτω δεξιά γωνία η φωτογραφία είναι σκισμένη κι επομένως υπάρχει πρόβλημα στην ταύτιση του υλικού. Έτσι, η σκιασμένη περιοχή δεν λαμβάνεται υπόψη. Από την άλλη πλευρά, στην περίμετρο οι πέτρες δεν είναι τόσο «καθαρές», έχουν «φαγώματα» και δεν είναι διακριτό το όριο με την υπόλοιπη, διαφορετική λιθοδομή.

Τοιχοποιία πύλης

Έχει ταξινομηθεί σωστά το θεματικό επίπεδο *τοίχος ανοιχτόχρωμος*. Έχουν, επίσης, ταξινομηθεί σωστά τα στοιχεία της κλάσης *τοίχος σκούρος*. Εδώ, και πάλι, για τους λόγους δύσκολου διαχωρισμού των λίθων που αναφέρθηκαν και παραπάνω, ορισμένα τμήματα του τοίχου έχουν συγχυστεί με τα στοιχεία της κλάσης *τοίχος ανοιχτόχρωμος σκιά*. Αντί, δηλαδή να ταξινομηθούν στην κλάση τοίχος σκούρος, λόγω παρεμφερούς απόχρωσης, ταξινομήθηκε στην κλάση που προαναφέρθηκε. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η σύγχυση που δημιουργήθηκε ανάμεσα στις πέτρες δεν οφείλεται μόνο στις κοντινές αποχρώσεις και αλλά και στην ταυτότητα των υλικών. Τα υλικά είναι λίθοι της ίδιας οικογένειας και, κατά συνέπεια, έχουν παρόμοια συμπεριφορά, η οποία καταγράφεται στις θερμικές εικόνες, οι οποίες συμμετείχαν στην ταξινόμηση.

Τόξα

Η ταξινόμηση στα θεματικά επίπεδα των τόξων δεν είναι επιτυχημένη. Το μοναδικό θεματικό επίπεδο που αντιστοιχήθηκε σωστά με το φασματικό είναι η *σκούρα γιρλάντα*. Η κλίμακα της εικόνας, εδώ, δεν βοηθά στην ανάλυση των συγκεκριμένων περιοχών. Ωστόσο, η μελέτη της περιοχής αυτής που ενδιαφέρει έχει πραγματοποιηθεί στην προηγούμενη ενότητα, όπου η κλίμακα και η κάλυψη της εικόνας είναι αυτές που απαιτούνται. Επομένως, δεν υπάρχει έλλειψη στην πληροφορία. Το ίδιο ισχύει και για τα στοιχεία της πόρτας.

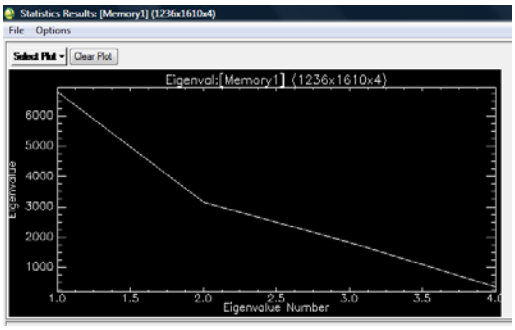
Οριζόντιο γείσο

Το οριζόντιο γείσο κάτω από τη σκεπή, πάνω από την πύλη ταξινομήθηκε σωστά, στην φασματική κατηγορία οροφή.

Παράθυρο

Εξολοκλήρου ταξινομήθηκαν τα τζάμια στην κλάση βιτρό. Σωστά, επίσης, ταξινομήθηκαν και τα διαφορετικά επίπεδα που είχαν θεωρηθεί για τις αψιδωτές ραβδώσεις, στα σκιασμένα και μη τμήματά τους.

4.2.3.3 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών



Εικόνα 63 : Διάγραμμα ιδιοτιμών

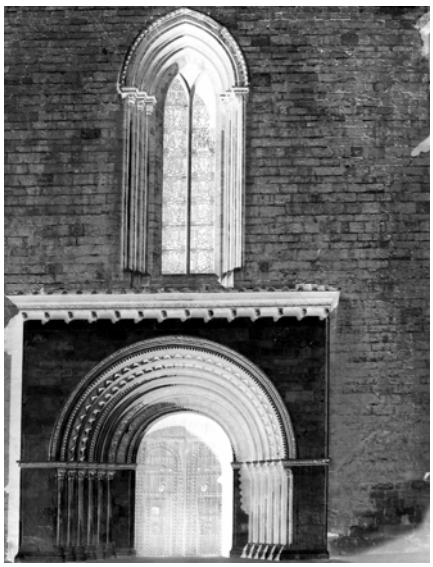
Πίνακας 10 : Πίνακας ιδιοτιμών

PC	eigenvalue	variance
1	6781	0,5598
2	3149	0,2600
3	1824	0,1506
4	359	0,0296

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η πρώτη εικόνα εκφράζει την πλειονότητα της διασποράς των δεδομένων., με ποσοστό 56 %. Ακολουθούν οι υπόλοιπες τρεις με ποσοστά 26, 15 και 3% αντίστοιχα. Το ποσοστό της τρίτης εικόνας μαρτυρά ότι είναι μια εικόνα που δεν περιέχει ιδιαίτερα αξιοποιήσιμη πληροφορία. Περιέχει, κατά κύριο λόγο, θόρυβο από τις εικόνες που συμμετείχαν στην ανάλυση.

Παρατηρήσεις πάνω στις εικόνες των κύριων συνιστωσών

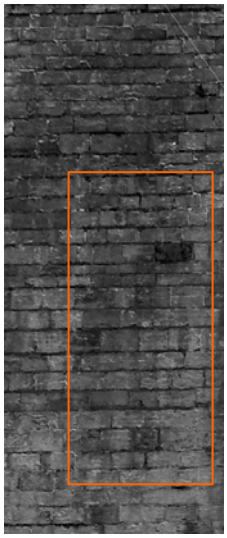
PC 1



Εικόνα 64: PC 1

Η εικόνα της πρώτης κύριας συνιστώσας περιέχει άφθονη πληροφορία, με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια, για το αντικείμενο. Στην κύρια τοιχοποιία διακρίνονται καθαρά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που έχουν οι πέτρες, ακόμη και αυτές που κατατάσσονται στο ίδιο υλικό. Γενικά, είναι διακριτές οι πέτρες που έχουν διαβρωμένη όψη και είναι πιο τραχείες σε σχέση με το σύνολο.

Στο αριστερό τμήμα του παραθύρου, περιγράφεται ένα φαινόμενο, σαν σκιά, το οποίο πιθανώς υποδεικνύει μια περιοχή υγρασίας. Το στοιχείο αυτό δεν ήταν διακριτό στις πρωτογενείς εικόνες. Με τη βοήθεια, όμως, της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών, αποτυπώθηκε και αναγνωρίσθηκε πάνω στην εικόνα.



Στην ίδια πλευρά του παραθύρου παρατηρείται μία ακόμη παθολογία, η οποία δεν ήταν τόσο εμφανής στα πρωτογενή δεδομένα. Σε όλο αυτό το τμήμα και ιδιαίτερα στο ψηλότερο κομμάτι, φαίνονται προβλήματα στη σύνδεση των λίθων. Ανάμεσα στους λίθους υπάρχουν ασυνέχειες και κενά, τα οποία κατά πάσα πιθανότητα προέκυψαν από την καταπόνηση του συνδετικού υλικού. Το ίδιο πρόβλημα εμφανίζεται και στα δεξιά του παραθύρου ακόμη πιο έντονο. Υπάρχει, επιπλέον, στην ίδια περιοχή, μια ομάδα λίθων οι οποίες διαφοροποιούνται από τις υπόλοιπες. Είναι η ομάδα αυτή που εμφανίζεται με πιο σκούρο τόνο.

Ταυτόχρονα, περιγράφεται καθαρά το φαινόμενο 1, το οποίο αντιπροσωπεύει σοβαρά προβλήματα στην επαφή και σύνδεση των λίθων, πιο έντονο από οποιοδήποτε άλλο σημείο και εκτείνεται σε όλο το ύψος της δεξιάς πλευράς του τοίχου. Εκτός από τα προβλήματα των αρμών, διακρίνεται και διαφορά στο χρώμα σε τμήματα της πλευράς αυτής. Στην επιφάνεια, οι όψεις δεν είναι όμοιες καθώς υπάρχουν περιοχές σκούρες και περιοχές πιο ανοιχτόχρωμες. Το γεγονός αυτό μπορεί να αφορά στην εξωτερική κατάσταση του υλικού αλλά και σε προβλήματα κάτω από την επιφάνειά του, που τελικά επηρεάζουν και την όψη. Χαρακτηριστικά στην δεξιά πλευρά από την αρχή του

φαινομένου 1 ψηλά, φαίνεται μια άσπρη «σκιά», μια ομάδα ανοιχτόχρωμων λίθων δηλαδή, που «κινείται» μέχρι κάτω. Αν υποθέσουμε ότι το πρόβλημα αυτό είναι πρόβλημα υγρασίας, η «κίνηση» αυτή δικαιολογείται από μια κίνηση νερού.

Ένα χαρακτηριστικό που φαίνεται στην αρχική φωτογραφία αλλά είναι ακόμη πιο έντονο εδώ βρίσκεται στα δεξιά της κατασκευής της πύλης, και σε μια λωρίδα από την οροφή μέχρι το έδαφος. Σε αυτή την περιοχή τα όρια των λίθων δεν είναι διακριτά. Φαίνεται σαν η όψη να έχει λειανθεί ή να έχει αλλοιωθεί το χρώμα της και έχουν χαθεί τα όρια της λιθοδομής.

Όσον αφορά στην κατασκευή της πύλης, εκεί επίσης διακρίνονται λίθοι με διαφορετική συμπεριφορά από το σύνολο. Το ότι τα τόξα εμφανίζονται φωτεινότερα στο δεξιό κομμάτι οφείλεται στην σκιά που υπάρχει στην συμβατική εικόνα και δεν πρέπει να θεωρηθεί σαν παθολογία στην ανάλυση.

Τέλος, χαρακτηριστικό είναι εδώ πόσο διαφορετική συμπεριφορά έχει το υλικό του φαινομένου 2. Η άσπρη σκιά στη γωνία και εδώ οφείλεται σε σκιά και δεν λαμβάνεται υπ' όψη.

Από σκιά επίσης προέρχεται η λευκή ζώνη στα αριστερά της κατασκευής της πύλης.

PC 2

Εικόνα 65 : PC 2

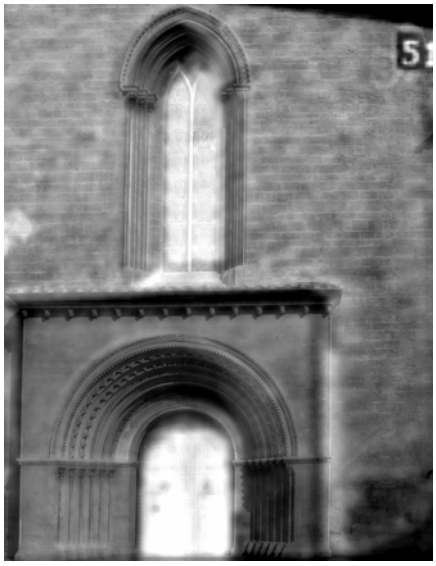
Η εικόνα της δεύτερης κύριας συνιστώσας είναι πολύ πιο θολή από την πρώτη και περιλαμβάνει πολύ μικρότερο βαθμό λεπτομέρειας. Ωστόσο, η εικόνα αυτή καταδεικνύει κάποια χαρακτηριστικά που δεν εμφανίζονται στην προηγούμενη.

Το πιο έντονο από αυτά είναι η μαύρη κηλίδα πάνω από το φαινόμενο 2. Η πηγή του φαινομένου αυτού δεν μπορεί να υποτεθεί, όμως είναι σίγουρο πως ορισμένοι παράγοντες το εξαναγκάζουν να ανταποκρίνεται διαφορετικά από τα υπόλοιπα στοιχεία του ίδιου υλικού. Οι παράγοντες αυτοί, κατά πάσα πιθανότητα προέρχονται κάτω από την επιφάνεια του υλικού, εφ' όσον το φαινόμενο δεν είναι αναγνωρίσιμο με το ανθρώπινο μάτι στο εξωτερικό.

Στη συνέχεια, σε μια πλατιά λωρίδα πάνω από αυτή την περιοχή και σε μια ακόμη οριζόντια πάνω από την κατασκευή της πύλης οι τοιχοποιία εμφανίζεται με διαφορετικό τόνο απ' ότι η υπόλοιπη. Ωστόσο, οπτικά, αυτό δεν δικαιολογείται απόλυτα από το διαφορετικά χρώματα ή υλικά. Πράγματι, στην περιοχή η οποία περιγράφεται πιο σκούρα ορισμένες πέτρες έχουν

διαφορετική όψη από τις υπόλοιπες. Από την άλλη, το φαινόμενο εδώ, περιγράφεται πολύ πιο έντονο από αυτό που διακρίνεται στην συμβατική εικόνα.

PC 3



Εικόνα 66 : PC 3

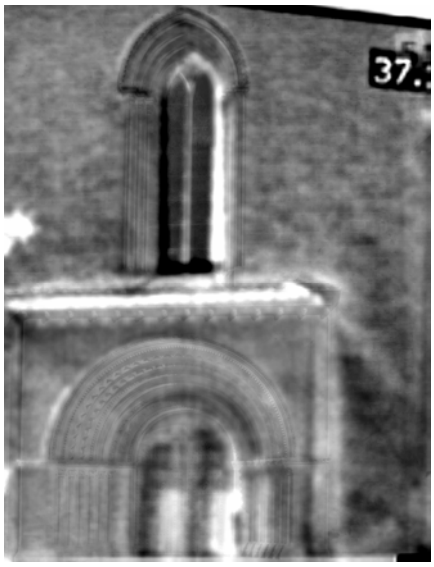
Η εικόνα της τρίτης κύριας συνιστώσας είναι ακόμη μια εικόνα, όπως και η πρώτη, με ιδιαίτερη λεπτομέρεια, στην οποία διακρίνονται τα διάφορα στοιχεία της όψης. Το βασικότερο χαρακτηριστικό που εξάγεται από την εικόνα αυτή είναι οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις πέτρες της τοιχοποιίας. Αυτή η περίπτωση είναι περίπτωση ανομοιομορφίας ανάμεσα στο ίδιο υλικό, το οποίο εδώ είναι οι συγκεκριμένοι λίθοι.

Ένα στοιχείο που πρώτη φορά εμφανίζεται σε αυτή τη συνιστώσα είναι μια διακριτή λεπτή λωρίδα πλάι ακριβώς στην δεξιά ακμή της κατασκευής της πύλης.

Τέλος, η άσπρη σκιά στην αριστερή πλευρά είναι σφάλμα που οφείλεται στην παρουσία δέντρου στην εικόνα 547.

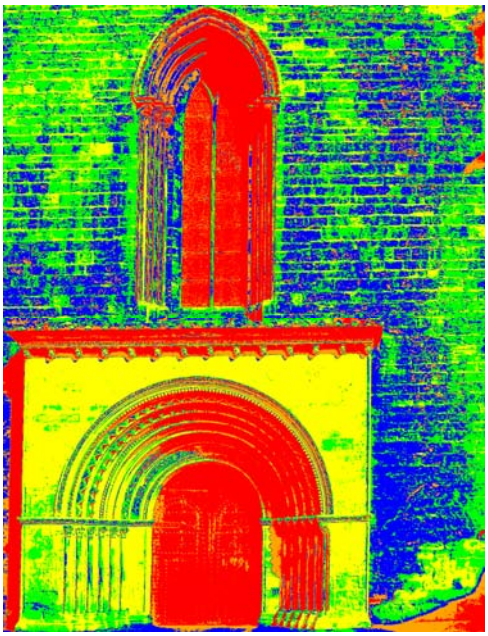
PC 4

Η κύρια συνιστώσα 4, όπως προαναφέρθηκε, μάλλον απεικονίζει κάτι παραπάνω από το θόρυβο των εικόνων. Κατά συνέπεια, δεν δίνει κάποια παραπάνω στοιχεία για την ανάλυση που επιδιώκεται.



Εικόνα 67 : PC 4

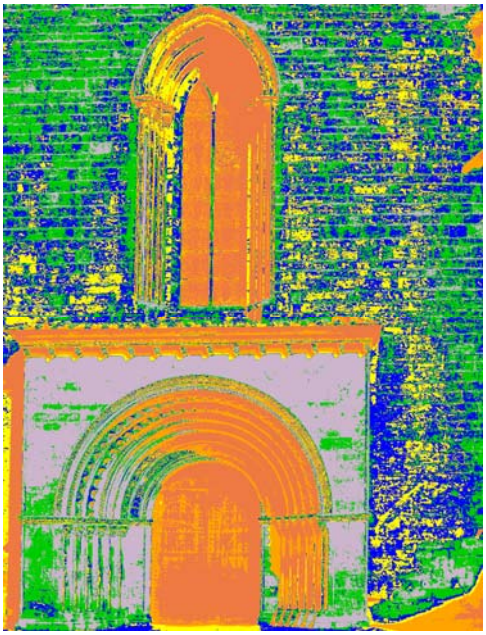
4.2.3.4 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση



Εικόνα 68 : Ταξινομημένη εικόνα PC 1 σε 5 κλάσεις

Ταξινομήθηκε η πρώτη κύρια συνιστώσα και θεωρήθηκαν πέντε κλάσεις. Η ταξινόμηση ήταν μη επιβλεπόμενη και ο αλγόριθμος ο K-Means. Η ταξινομημένη εικόνα αυτή βοηθά, σε πρώτο στάδιο, να ορισθούν δύο ομάδες της τοιχοποιίας, αυτή που απεικονίζεται με μπλε χρώμα και αυτή με πράσινο. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι πέτρες του ίδιου υλικού, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται, σχηματίζουν δύο διακριτές ομάδες.

Επαναλήφθηκε η ίδια ταξινόμηση, θεωρώντας αυτή τη φορά μία θεματική κατηγορία παραπάνω, δηλαδή έξι κλάσεις. Στην έκτη κλάση που προστέθηκε αναμένονταν να ταξινομηθούν οι πέτρες του φαινομένου 1. Πράγματι, στην κλάση αυτή ταξινομήθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των πετρών. Ταυτόχρονα, στην κατηγορία αυτή ταξινομήθηκαν ορισμένες πέτρες στο τμήμα πάνω από την κατασκευή της πύλης. Οι λίθοι αυτοί ενδεχομένως αντιμετωπίζουν τα αντίστοιχα προβλήματα με αυτούς του φαινομένου 1.



Εικόνα 69 : Ταξινομημένη εικόνα PC 1 σε 6 κλάσεις

Row	Value	Histogram	Color	Opacity
0	0	34541		1
1	1	218478		1
2	2	172504		1
3	3	126977		1
4	4	113229		1
5	5	146898		1
6	6	174115		1
7	7	183637		1
8	8	161034		1
9	9	178144		1
10	10	170499		1
11	11	143625		1
12	12	166279		1

Εικόνα 70 : Ταξινομημένη εικόνα PC 3

Εδώ ταξινομήθηκε η τρίτη από τις εικόνες των κυρίων συνιστωσών και θεωρήθηκαν δώδεκα κλάσεις.

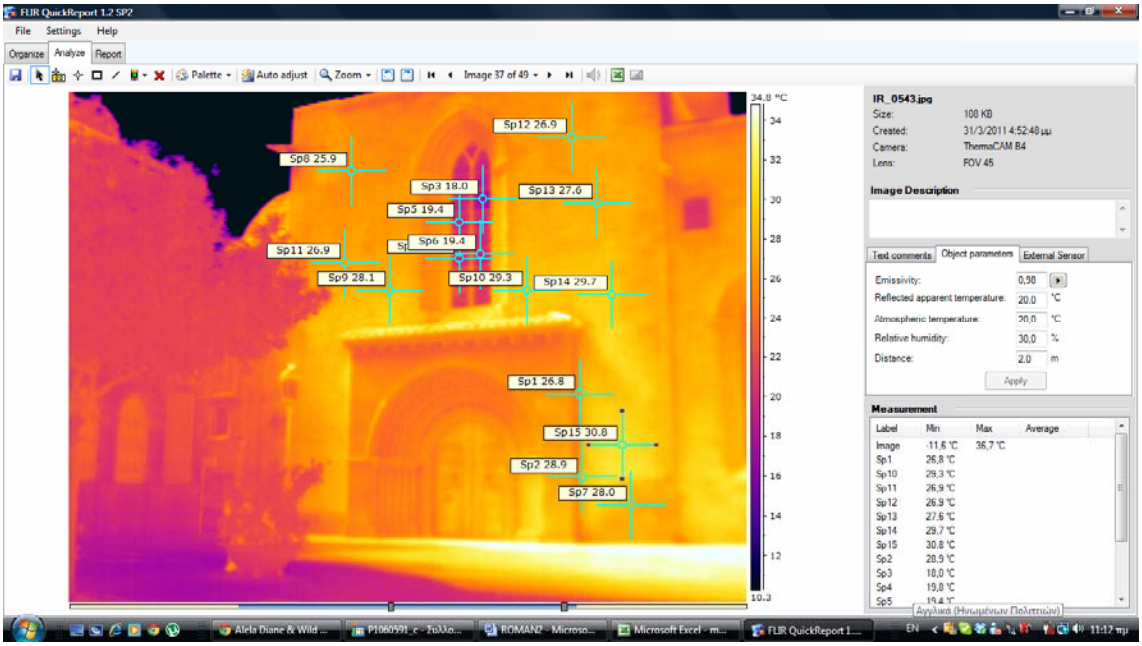
Η ταξινόμηση αυτή είναι από τις λίγες μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις από τις οποίες εξάγονται ορισμένα χρήσιμα στοιχεία.

Το χαρακτηριστικό που αναδεικνύει αυτή η ταξινομημένη εικόνα είναι ότι ενώ η τοιχοποιία είναι κατασκευασμένη όλη από το ίδιο υλικό, η θερμική συμπεριφορά των συστατικών της δεν είναι ομοιόμορφη. Αν θεωρήσουμε ότι με μοβ χρώμα ταξινομείται το φαινόμενο δύο, υπολογίζονται άλλες τέσσερις θεματικές κατηγορίες με τις οποίες έχει αποδοθεί ο τοίχος. Οι θεματικές αυτές κατηγορίες αντιστοιχούν στο κίτρινο, πορτοκαλί, τιρκουάζ και μπλε χρώμα.

Με αυτά τα δεδομένα, μπορούν να θεωρηθούν δύο βασικά τμήματα του τοίχου. Το ένα είναι στη δεξιά πλευρά, που έχει ύψος από το τέλος του φαινομένου 2 μέχρι το ύψος της μέσης του παραθύρου. Το κομμάτι αυτό απεικονίζεται με μπλε και τιρκουαζ. Το δεύτερο είναι το υπόλοιπο, με πιο ομοιόμορφα χαρακτηριστικά αριστερά του παραθύρου. Τα χρώματα με τα οποία περιγράφεται είναι το κίτρινο και το πορτοκαλί. Σημειώνεται, επίσης, ότι το πρώτο τμήμα «εισχωρεί» σε ένα βαθμό στο δεύτερο, στο κομμάτι δεξιά και αριστερά της βάσης του παραθύρου.

Τα χαρακτηριστικά αυτά θα επιδιωχθεί παρακάτω να συσχετισθούν με τις παθολογίες που αναλύθηκαν σε όλη την ενότητα και που προέκυψαν από τις πρωτογενείς εικόνες και τα παράγωγά τους.

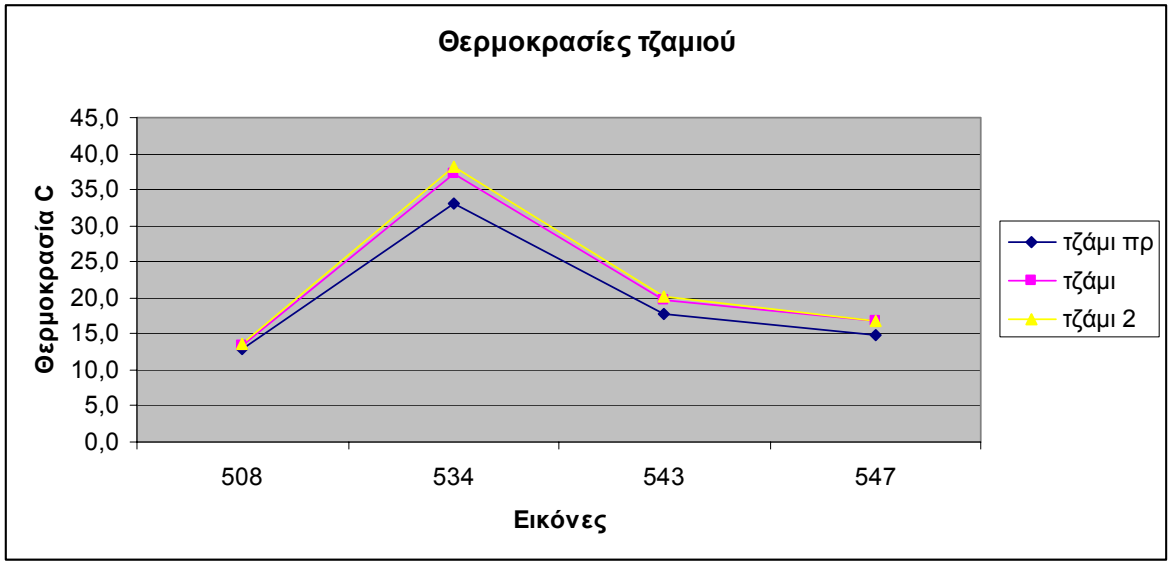
4.2.4 Μετρήσεις Θερμοκρασίας



Εικόνα 71 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης

λήψη	τζάμι πρ	τζάμι	τζάμι 2	φ1 πάνω α	φ1 πάνω β	φ1 κάτω	φ2	λέιο τμήμα α	λείο τμήμα β	σκούρες πέτρες	ανοιχτόχρωμες πέτρες	μαύρη κηλίδα	άσπρη σκιά
508	12,8	13,3	13,6	16,8	17,4	18,6	19,3	18,0	18,4	17,9	16,9	19,0	16,7
534	33,1	37,3	38,1	38,0	37,7	42,0	32,2	41,6	41,7	40,0	35,5	42,0	37,7
543	17,8	19,7	20,3	26,9	27,5	29,5	27,6	26,8	28,9	28,7	25,9	30,8	26,9
547	14,9	16,8	16,7	21,6	22,0	22,9	23,0	22,9	22,9	22,4	21,1	23,8	21,7

Πίνακας 11 : Μετρήσεις θερμοκρασιών

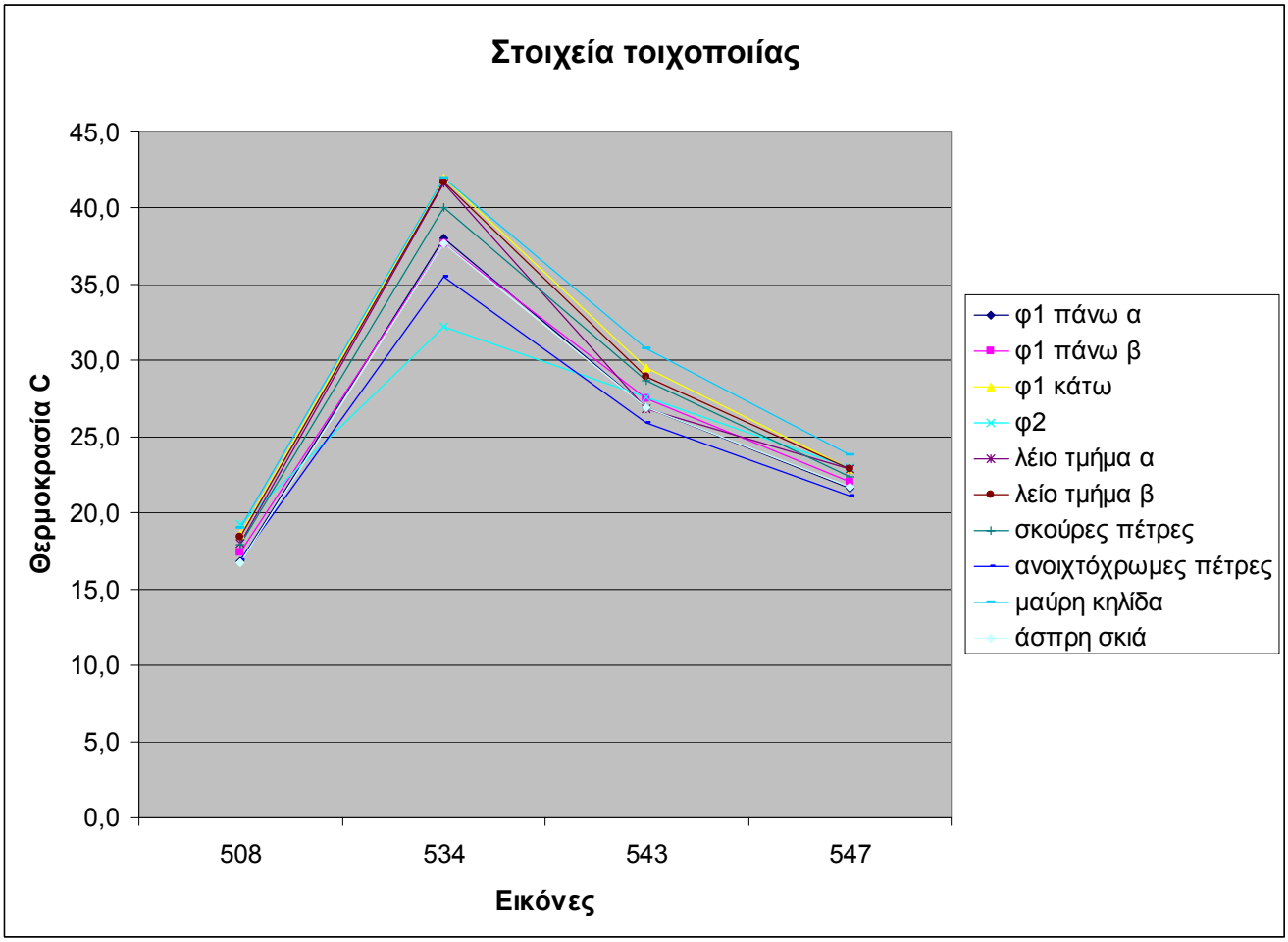


Διάγραμμα 7 : Θερμοκρασίες τζαμιού

Σχόλια

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του τζαμιού που διακρίνονταν από τα υπόλοιπα μετρήθηκε, σε πρώτη φάση η θερμοκρασία του σε όλες τις λήψεις. Στη συνέχεια μετρήθηκε η θερμοκρασία του ακριβώς διπλανού τζαμιού, με την οποία η προηγούμενη θα έπρεπε να είναι πολύ κοντινή, έτσι ώστε να συγκριθούν. Τέλος, μετρήθηκαν θερμοκρασίες σε όλο το εύρος του παραθύρου για να αποτυπωθούν οι γενικές θερμοκρασιακές συνθήκες του τζαμιού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται διαγραμματικά παραπάνω.

Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι πράγματι το υπό εξέταση τζάμι έχει διαφορετικές θερμοκρασίες, σχεδόν σε όλες τις εικόνες και ώρες λήψης από το διπλανό του και από το σύνολο των τζαμιών του παραθύρου. Η θερμοκρασία του είναι γενικά χαμηλότερη. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται από 1.9 έως 4.2 C° στις εικόνες 534 έως 547. Επομένως, διαπιστώνεται κι εδώ ότι για κάποιους λόγους το τζάμι αυτό δεν συμπεριφέρεται ανάλογα με τα υπόλοιπα και άρα δεν βρίσκεται στην ίδια κατάσταση. Τέλος, στο διάγραμμα φαίνεται ότι το διπλανό τζάμι συμπεριφέρεται ανάλογα με τα υπόλοιπα.



Διάγραμμα 8 : Θερμοκρασίες τοιχοποιίας

Σχόλια

Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνονται οι θερμοκρασίες και οι μεταβολές όλων των στοιχείων της τοιχοποιίας που εξετάστηκαν. Ως γενική παρατήρηση αναφέρεται ότι όλα τα στοιχεία αυτά έχουν αντίστοιχες μεταβολές στο χρόνο και στη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Το μόνο στοιχείο του οποίου οι μεταβολές δεν ακολουθούν τη ίδια πορεία είναι το φαινόμενο 2. Έτσι, επιβεβαιώνεται ότι το υλικό που έχει προστεθεί σε εκείνο το σημείο δεν έχει τις ίδιες ιδιότητες με το υλικό της υπόλοιπης τοιχοποιίας.

Ξεκινώντας από την εικόνα 508, οι θερμοκρασιακές διαφορές όλων των κατηγοριών είναι οι μικρότερες σε σύγκριση με τις διαφορές που εμφανίζουν σε όλες τις υπόλοιπες εικόνες. Η εικόνα αυτή έχει ληφθεί στις 23:10 το βράδυ. Αντίστοιχα μικρές είναι και οι διαφορές στην εικόνα 547, η οποία έχει ληφθεί στις 20:57 το βράδυ.

Στην εικόνα 534, με ώρα λήψης 13:56, οι διαφορές παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους. Η μέγιστη διαφορά που καταγράφεται είναι 9.2 C° και αφορά στις κατηγορίες μαύρη κηλίδα και φ2, οι οποίες σημειώνεται ότι είναι γειτονικές.

Μικρότερες, αλλά ακόμα σημαντικές, είναι οι διαφορές στην εικόνα 543. Η μέγιστη διαφορά εμφανίζεται ανάμεσα στις κατηγορίες μαύρη κηλίδα και ανοιχτόχρωμες πέτρες και είναι ίση με 4.9°C.

Παραπάνω σχολιάστηκαν οι σχετικές διαφορές των θερμοκρασιών των κατηγοριών. Στη συνέχεια θα εξεταστούν και θα συγκριθούν οι απόλυτες θερμοκρασίες των υλικών.

Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι κατηγορίες που θεωρήθηκαν, στην πρώτη εικόνα έχουν θερμοκρασίες που δεν απέχουν πολύ. Στη συνέχεια, στη δεύτερη εικόνα, οι κατηγορίες αρχίζουν να διακρίνονται, καθώς διαφοροποιούνται οι θερμοκρασίες τους. Η εικόνα αυτή έχει ώρα λήψης τις 13:56. Αυτό σημαίνει ότι τα αντικείμενα, με αρχική τη θερμοκρασία που είχαν τις βραδινές ώρες, έχουν απορροφήσει όλη τη θερμότητα από το πρωί μέχρι αυτή την ώρα και έχει μεταβληθεί η θερμοκρασία τους αντίστοιχα για κάθε αντικείμενο. Εδώ υπάρχουν ορισμένες κατηγορίες οι οποίες έχουν κοντινές θερμοκρασίες. Τέτοιες «ομάδες» σχηματίζουν το *λείο τμήμα β* με το *φ1 κάτω* και τη *μαύρη κηλίδα*. Άλλη ομάδα είναι το *φ1 πάνω α* με την *άσπρη σκιά* και το *φ1 πάνω β*. Οι υπόλοιπες τρεις κατηγορίες, δηλαδή οι *σκούρες πέτρες*, το *φ1 πάνω α* και το *φ2*, έχουν μοναδικές θερμοκρασίες.

Από τις παρατηρήσεις αυτές και από τις ομάδες που περιγράφηκαν, μπορούν να ορισθούν στην όψη κάποια γενικευμένα τμήματα. Συγκεκριμένα, η πρώτη από τις παραπάνω ομάδες, η οποία περιλαμβάνει το *λείο τμήμα β,* το *φ1 κάτω* και τη *μαύρη κηλίδα*, περιγράφει στην όψη μια συνεχόμενη επιφάνεια. Επομένως, πέρα από τις κατηγορίες που θεωρήθηκαν πριν για να μετρηθούν θερμοκρασίες, ορίζεται μια ευρύτερη επιφάνεια στην κάτω δεξιά γωνία της όψης με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά και συνάμα διακριτά από την υπόλοιπη όψη. Από τη δεύτερη ομάδα, ξεχωρίζουν οι κατηγορίες *φ1 πάνω α* και *φ1 πάνω β*, οι οποίες επίσης είναι γειτονικές και

σχηματίζουν το φαινόμενο 1 στο σύνολό του. Άρα, το φαινόμενο 1 έχει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά στο σύνολό του και δεν διαιρείται σε δύο μέρη.

Όσον αφορά στο μέγεθος της θερμοκρασίας, τη μεγαλύτερη θερμοκρασία εμφανίζει η πρώτη ομάδα, όπως ορίσθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ακολουθούν έπειτα οι *σκούρες πέτρες*, η δεύτερη ομάδα που περιγράφηκε, οι *ανοιχτόχρωμες πέτρες* και το *φ2*, με αυτή τη σειρά.

Στην τρίτη εικόνα, την 543, με ώρα λήψης τις 16:52, υπάρχει μια συνολική μείωση των θερμοκρασιών όλων των υλικών. Η δεύτερη ομάδα συνεχίζει να διατηρεί πολύ κοντινές θερμοκρασίες. Το ίδιο συμβαίνει και στην πρώτη ομάδα, με μια εξαίρεση την *μαύρη κηλίδα* η οποία διατηρεί τη θερμοκρασία της λίγο χαμηλότερα από τις άλλες δύο κατηγορίες της ομάδας.

Στην τελευταία εικόνα, η οποία είναι βραδινή, στις 20:57, οι θερμοκρασίες όλων των κατηγοριών πάλι πλησιάζουν , όπως και στην επίσης βραδινή εικόνα 508.

4.2.5 Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην ενότητα αυτή θα διατυπωθούν συμπεράσματα για την τοιχοποιία και τα υπόλοιπα στοιχεία της όψης, εξαιρώντας την κατασκευή της πύλης, η οποία εξετάσθηκε λεπτομερώς στην προηγούμενη ενότητα.

Από όλες τις επεξεργασίες που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι η τοιχοποιία δεν έχει ομοιόμορφη θερμική συμπεριφορά σε όλη την έκτασή της. Υπάρχουν τμήματα μικρότερα ή μεγαλύτερα τα οποία είναι διαχωρίσιμα μεταξύ τους. Ως πρώτη γενική παρατήρηση, υπάρχει ένας διαχωρισμός του πάνω με το κάτω τμήμα της. Αυτό διότι εν γένει το άνω τμήμα εμφανίζεται πάντα θερμότερο σε σχέση με το κάτω.

Εστιάζοντας πιο κοντά, μέσα στη γενική ανομοιομορφία των τμημάτων της τοιχοποιίας, μπορούν να θεωρηθούν δύο περιοχές οι οποίες διαχωρίζονται από το περιβάλλον τους, αλλά τα στοιχεία που τις απαρτίζουν έχουν κοινά χαρακτηριστικά, η καθεμία χωριστά. Η πρώτη ομάδα βρίσκεται στην κάτω και δεξιά γωνία του τοίχου. Περιλαμβάνει όλο το τμήμα από την κάτω δεξιά γωνία μέχρι, περίπου το ύψος στο μέσο της πύλης. Τα όριά της φαίνονται στην εικόνα. Η ομάδα αυτή, σε σύγκριση με όλα τα στοιχεία της τοιχοποιίας, εμφανίζει τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες αλλά και τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Η δεύτερη ομάδα βρίσκεται στην ίδια πλευρά του τοίχου, δηλαδή τη δεξιά, αλλά ψηλότερα. Οριοθετείται από ένα περίπου ορθογώνιο τρίγωνο, με πλευρές τις δύο ακμές του τοίχου. Το τμήμα αυτό, όπως δείχνουν κάποιες εικόνες παρουσιάζει σίγουρα και μία παθολογία επιφανειακή, η οποία αφορά στην επιφανειακή κατάσταση των λίθων και σε προβλήματα στους αρμούς τους. Οι θερμοκρασίες αυτής της ομάδας είναι γενικά, μικρότερες από αυτές της προηγούμενης. Ταυτόχρονα , είναι μικρότερες και οι μεταβολές της. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Αν υποθέσουμε ότι η ομάδα 1 που περιγράφηκε πριν, εμφανίζει παθολογία μόνο επιφανειακά, ενώ εσωτερικά είναι υγιής, αυτό

μπορεί να σημαίνει κάτι για την ομάδα δύο , η οποία αποτελείται από το ίδιο υλικό. Μια επιφάνεια, επομένως, του ίδιου υλικού, η οποία, ωστόσο, μεταβάλλει λιγότερο τη θερμοκρασία της με την μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες, είναι υποψήφια για ύπαρξη υγρασίας.

Από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας προέκυψε επίσης, ότι οι σκουρόχρωμες πέτρες εκατέρωθεν του παραθύρου έχουν θερμοκρασίες ανάμεσα σε αυτές των δύο ομάδων. Ακόμα χαμηλότερες και με σημαντικά μικρότερες μεταβολές έχουν οι ανοιχτόχρωμες πέτρες στην πάνω δεξιά γωνία του παραθύρου. Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία, λοιπόν, οι ομάδες αυτές και κυρίως οι ανοιχτόχρωμες πέτρες υποψήφιες περιοχές ύπαρξης υγρασίας, με τη δεύτερη ιδιαίτερα πιθανή.

Η περιοχή της ομάδας 1 διακρίθηκε από τις υπόλοιπες λόγω θερμοκρασίας. Ωστόσο, εκτός από αυτό, έχουν παρατηρηθεί σε αυτήν και άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία επίσης οδήγησαν στην ξεχωριστή μελέτη της περιοχής. Εξωτερικά και από την συμβατική εικόνα η περιοχή αυτή εμφανίζει προβλήματα. Αυτά είναι πέτρες καταπονημένες, με διαβρωμένη όψη και αλλοιωμένο χρώμα. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές αδυναμίες στη σύνδεσή τους. Στο συνδετικό υλικό των αρμών υπάρχουν κενά, ενώ σε ορισμένα σημεία λείπει εντελώς, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά ανάμεσα στις πέτρες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και σε άλλα σημεία, χωρίς να είναι όμως, τόσο εκτεταμένο.

Εστιάζοντας, έπειτα, στη δεύτερη ομάδα, διακρίνονται άλλες υποομάδες που την απαρτίζουν και έχουν διακριτή συμπεριφορά. Η πρώτη είναι η περιοχή εκείνη στην οποία έχει γίνει προσθήκη νέου υλικού ή επέμβαση και ανάδειξη του παλιού, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Εκεί, με τις μετρήσεις θερμοκρασίας αλλά και από την επεξεργασία των θερμικών εικόνων διαπιστώνεται ότι η περιοχή αυτή έχει διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες.

Συνεχίζοντας, στις θερμικές εικόνες και ιδιαίτερα στην ανάλυση κυρίων συνιστωσών εμφανίστηκε ένα τμήμα του τοίχου, το οποίο ενώ εξωτερικά δεν εμφανίζει κάποια παθολογία, στις θερμικές καταγραφές εμφανίζεται διαφοροποιημένο, με σαφή όρια. Το τμήμα αυτό εμφανίζει μεγάλες θερμοκρασίες και μεγάλες διακυμάνσεις όπως όλη η δεύτερη ομάδα και οριοθετείται στο μέσο, περίπου, του φαινομένου 2, ανάμεσα στην ακμή της πύλης και του τοίχου.

Τελευταίο στοιχείο αυτής της ομάδας είναι ένα τμήμα μιας λωρίδας παράλληλης στην κατασκευή της πύλης. Αυτή η λωρίδα έχει επιφάνεια διαφορετική από τις γειτονικές. Η υφή της είναι πιο λεία και το χρώμα της πιο ξεθωριασμένο.

Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και έξω από τα όρια της δεύτερης ομάδας, αφού αυτή είναι μια ζώνη η οποία ξεκινά από χαμηλά και φθάνει λίγο πιο κάτω από το τελείωμα της πύλης. Ωστόσο, δεν συμπεριφέρεται το ίδιο σε όλη της την έκταση. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι διακρίνεται σε δύο τμήματα, το άνω και το κάτω, από τα οποία το κάτω παρουσιάζει μικρότερες θερμοκρασίες.

Τέλος, παρατηρήθηκε ακόμη μία παθολογία, που δεν αφορά στην τοιχοποιία. Εμφανίζεται στην περιοχή του παραθύρου και συγκεκριμένα στα τζάμια. Ένα συγκεκριμένο από αυτά εμφανίζει σταθερά χαμηλότερες θερμοκρασίες από όλα τα υπόλοιπα. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές και σχεδόν σε όλες τις θερμικές λήψεις, ενώ εξωτερικά δεν μαρτυρά κάποιο πρόβλημα. Οι αιτίες του προβλήματος αυτού είναι άγνωστες.

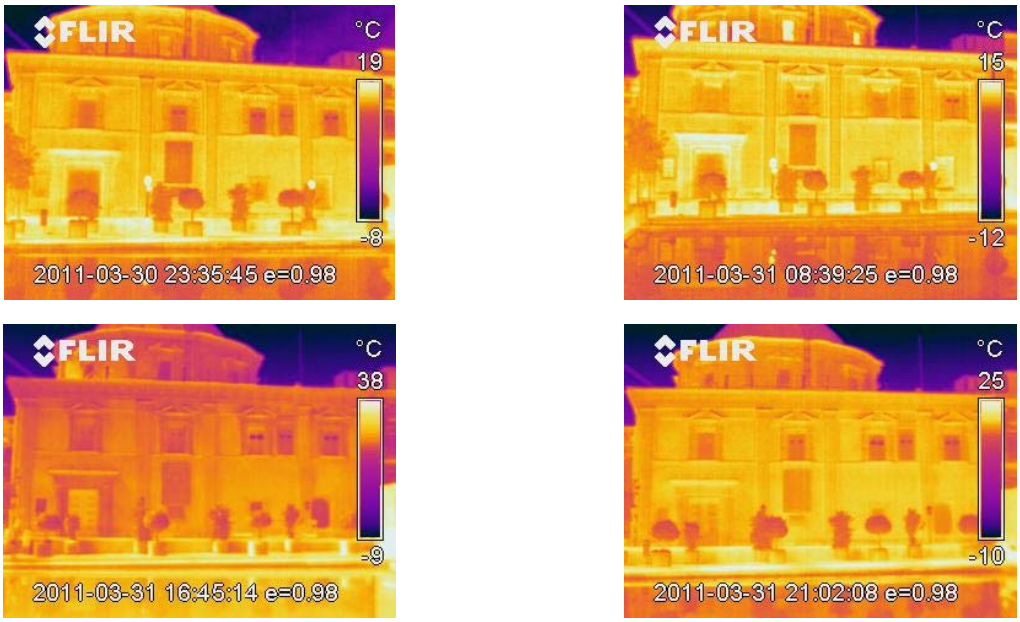
4.3 Όψη Virgen

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ανατολική όψη της Βασιλικής Virgen de los Despamparados. Η όψη αυτή φέρει κλασικίζοντα αρχιτεκτονικά στοιχεία ανάμεσα στα οποία πέντε παραστάδες με κιονόκρανα κορινθιακού ρυθμού, πέντε παράθυρα, τα τέσσερα από τα οποία περικλείονται σε μια δομή από τούβλα, εξωτερικά δύο μικρές παραστάδες και θριγκό, ενώ επάνω υπάρχει οριζόντιο γείσο και ανολοκλήρωτο αέτωμα. Κάτω από τη στέγη βρίσκεται οριζόντιο γείσο, δοκός με τρίγλυφα και μετόπες καθώς και επιστύλιο. Ακόμη, μία πύλη με στοιχεία δωρικού ρυθμού και ξύλινη πόρτα, η οποία εξετάζεται σε επόμενη ενότητα. Στο κεντρικό τμήμα υπάρχουν δύο κατασκευές από πλακάκια, στη μία από τις οποίες απεικονίζεται η Παναγία. Τέλος, στο κάτω τμήμα υπάρχουν τρία παράθυρα με σιδεριές εξωτερικά. Η τοιχοποιία αποτελείται από λιθοδομή της οποίας τα βασικά υλικά είναι ο ασβεστόλιθος και ένα είδος ηφαιστειακού τόφου. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί η όψη, εξαιρώντας την ακραία δεξιά παραστάδα. Αυτό διότι, με δεδομένο τον φακό που χρησιμοποιήθηκε για την κάμερα Sigma SD15, δεν μπορούσε να ληφθεί φωτογραφία που να περιλαμβάνει όλη την όψη, αφού στο σημείο λήψης υπάρχει κτίριο το οποίο εμποδίζει τη λήψη από μακρινότερο σημείο. Από την επεξεργασία δεν έχει εξαιρεθεί το τμήμα της βεράντας με τα φυτά, με σκοπό να συμπεριληφθούν κατά το δυνατό οι χαμηλότερες περιοχές της όψης. Επιπλέον, δεν θα γίνει εκτενής ανάλυση της πύλης της εισόδου, αφού θα αποτελέσει ξεχωριστή ενότητα.

Πίνακας 12 : Πίνακας λήψεων όψης Virgen

Θερμική εικόνα	Ώρα λήψης	Εξωτερική Θερμοκρασία (ºC)
512	23:35	17.2
522	08:39	13.4
540	16:45	24.0
552	21:02	21.5

4.3.1 Λήψεις

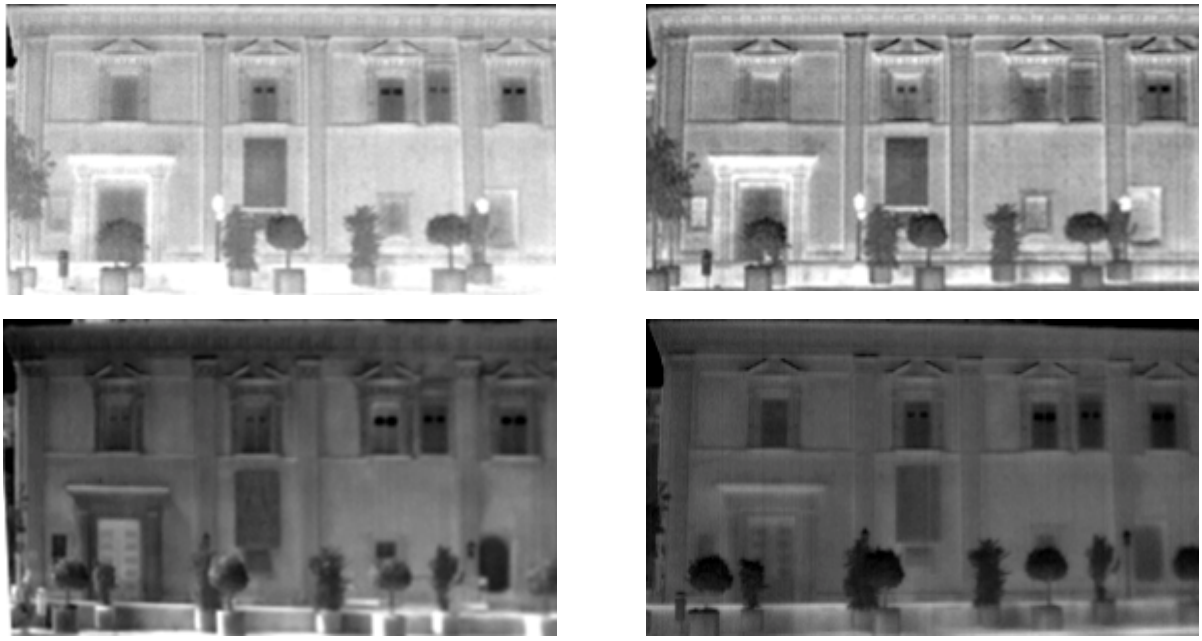


Εικόνα 72 : Εικόνες 512, 522, 540, 552

4.3.2 Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων

Εικόνες εισόδου

Παρακάτω φαίνονται οι εικόνες μετά την προεπεξεργασία, όπως εισήχθησαν στις επόμενες διαδικασίες. Οι εικόνες, προκειμένου να σχηματίσουν την πολυφασματική εικόνα απέκτησαν κοινό μέγεθος 280 x 146 pixel.



Εικόνα 73 : Εικόνες εισόδου 512, 522, 540, 552

δομή πολυφασματικής εικόνας

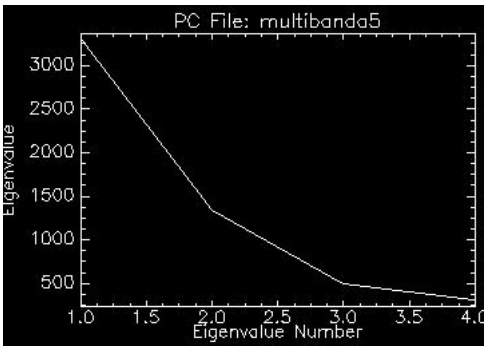
Κανάλι 1 : θερμική εικόνα 512

Κανάλι 2 : θερμική εικόνα 522

Κανάλι 3 : θερμική εικόνα 540

Κανάλι 4 : θερμική εικόνα 552

4.3.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών_ α



Εικόνα 74 : διάγραμμα ιδιοτιμών

Πίνακας 13 : Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	3296	0,6070
2	1337	0,2462
3	490	0,0902
4	307	0,0565

Στο παράδειγμα θεωρήθηκαν συνολικά τέσσερις κύριες συνιστώσες.

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι η πρώτη εικόνα εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής διακύμανσης. Η εικόνα αυτή είναι ασυσχέτιστη. Τα ποσοστά των υπόλοιπων τριών είναι πολύ μικρότερα, με τις δύο τελευταίες να εκφράζουν κυρίως το θόρυβο των δεδομένων.

PC 1

Εικόνα 75 : PC 1

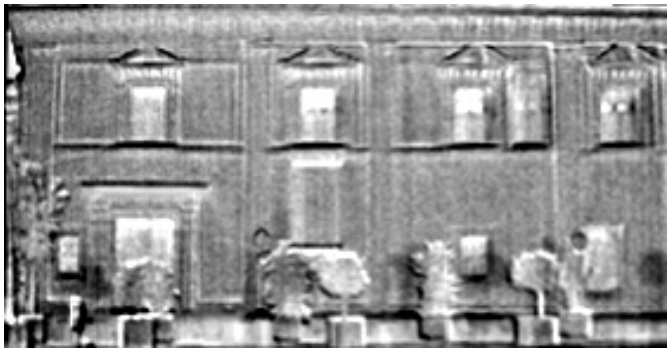
1. Στην κύρια συνιστώσα 1 εμφανίζεται το μεγαλύτερο ποσοστό πληροφορίας
2. Τονίζονται με άσπρο χρώμα οι περιοχές που γενικά εμφανίζουν τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες, περίγραμμα πόρτας και τοιχάκι βεράντας
3. Με μαύρο ή γενικά σκούρα απόχρωση οι ψυχρότερες (ξύλο, και γείσο παραθύρων και παραστάδων)
4. Είναι και η κύρια συνιστώσα που παρέχει την καθαρότερη εικόνα, σε όλο το φάσμα των αποχρώσεων, από άσπρο μέχρι μαύρο
5. Από όλα τα στοιχεία της όψης ξεχωρίζει η κατασκευή της εισόδου. Σε αυτή την κατασκευή, το ανώτερο τμήμα της, με έμφαση στο οριζόντιο γείσο, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από τη συνολική κατασκευή, η οποία αποτελείται από το ίδιο υλικό. Η διαφοροποίηση είναι πιο έντονη στο οριζόντιο γείσο. Σημαντική διαφοροποίηση παρουσιάζει, επίσης, στο επίπεδο πίσω από τους κίονες.
6. Μια ανωμαλία υπάρχει, επίσης, στο πάνω τμήμα της πόρτας, σε μια οριζόντια ζώνη. Είναι δηλαδή μια προβληματική περιοχή στην ξύλινη επιφάνεια.
7. Στην εικόνα του τοίχου, η οποία αποτελείται από πλακάκια, απεικονίζεται μια ζώνη οριζόντια, στο ανώτερο τμήμα της, διαφορετική από τη συνολική.
8. Μια ανωμαλία υπάρχει στην απεικόνιση των ξύλινων επιφανειών των δύο τελευταίων παραθύρων από δεξιά. Ιδιαίτερα στο ακραίο, το φαινόμενο είναι έντονο.
9. Εν γένει, σημειώνεται ότι το τμήμα της τοιχοποιίας που βρίσκεται κάτω από τα δύο δεξιότερα παράθυρα έχει διαφορετική απεικόνιση από την υπόλοιπη τοιχοποιία.

PC 2

Εικόνα 76 : PC 2

Σε αυτή την εικόνα, τονίζεται άλλη μία φορά η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στο οριζόντιο γείσο και την υπόλοιπη κατασκευή της πύλης.

Εικόνα 77 : PC 3



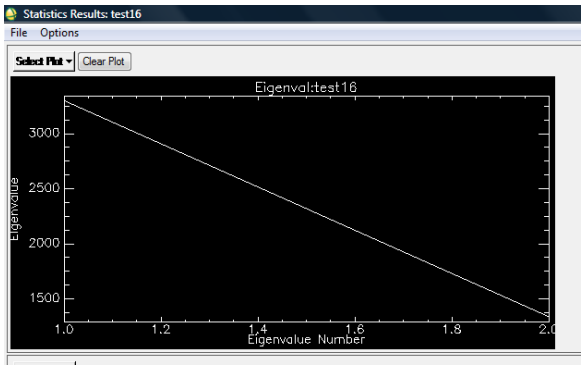
Εικόνα 78 : PC 4

4.3.2.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών _ β

Στο επόμενο παράδειγμα θεωρήθηκαν δύο κύριες συνιστώσες, εφ' όσον στο προηγούμενο φάνηκε ότι θεωρώντας τέσσερις, οι δύο τελευταίες δεν περιείχαν αξιοποιήσιμη πληροφορία. Θεωρώντας δύο συνιστώσες, επιχειρήθηκε να συγκεντρωθεί ο σημαντικός όγκος της πληροφορίας της εικόνας στην πρώτη συνιστώσα.

Πίνακας 14 : Πίνακας διακύμανσης

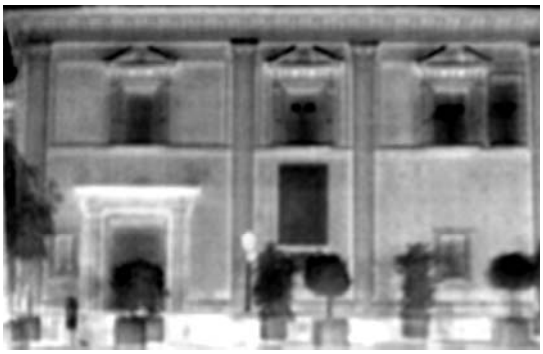
PC	eigenvalue	variance
1	3296	0,7114
2	1337	0,2886



Εικόνα 79 : διάγραμμα ιδιοτιμών

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η πρώτη κύρια συνιστώσα, όπως είναι αναμενόμενο, περιγράφει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολική διακύμανσης (71.14%). Ταυτόχρονα, όμως, και η δεύτερη εικόνα αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό που δεν είναι ασήμαντο, και το οποίο είναι ίσο με 28.86 %.

PC 1



Εικόνα 80 : PC 1

- Στην εικόνα της πρώτης συνιστώσας ξεχωρίζει ξανά το ανώτερο τμήμα της κατασκευής της πύλης, το οποίο διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα σημεία του ίδιου υλικού.
- Ανωμαλίες παρατηρούνται, επίσης, στα περισσότερα από τα παραθυρόφυλλα. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο από αριστερά εμφανίζεται μια προβληματική περιοχή στο μέσο του, σε μια κατακόρυφη γραμμή. Προς τα αριστερά το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο , ενώ στο ακραίο δεξιό παράθυρο το φαινόμενο καταλαμβάνει σχεδόν όλη την περιοχή της ξύλινης επιφάνειας του παραθύρου.
- Ως γενική παρατήρηση πρέπει να σημειωθεί ότι το κάτω και δεξιά τμήμα του τοίχου απεικονίζεται διαφορετικά (πιο ανοιχτόχρωμο) από τα υπόλοιπα.

PC 2

Από τις παράγωγες εικόνες φαίνεται ότι επετεύχθη ο στόχος και η πρώτη κύρια συνιστώσα είναι μια εικόνα απαλλαγμένη από θόρυβο και κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί σε μία ταξινόμηση.

Εικόνα 81 : PC 2

4.3.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών και Συμβατικής Εικόνας

Δημιουργήθηκε νέα πολυφασματική εικόνα με την προσθήκη των τριών καναλιών της συμβατικής εικόνας με την ακόλουθη δομή, η οποία έχει μέγεθος 2319 x 1263 pixel, ίσο με το μέγεθος της συμβατικής εικόνας.

Κανάλι 1 : red κανάλι ορατής

Κανάλι 2 : green κανάλι ορατής

Κανάλι 3 : blue κανάλι ορατής

Κανάλι 4 : θερμική εικόνα 512

Κανάλι 5 : θερμική εικόνα 522

Κανάλι 6 : θερμική εικόνα 540

Κανάλι 7 : θερμική εικόνα 552

Εικόνα 82 : Συμβατική εικόνα

4.3.3.1 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση

Παρακάτω επιχειρείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Θεωρήθηκαν συνολικά 18 κλάσεις, καθώς παραπάνω αποδείχθηκε ότι οι δέκα δεν είναι αρκετές για να ταξινομηθούν τα υλικά της όψης. Οι κλάσεις είναι οι παρακάτω :

1. πλακάκια : περιλαμβάνει τις δύο συνθέσεις με πλακάκια στο κέντρο της όψης, τη μεγάλη με την εικόνα της παναγίας και τη μικρότερη από κάτω
2. ξύλο 1 : το ξύλο της πόρτας
3. ξύλο 2 : το ξύλο των παραθυρόφυλλων
4. τούβλο : η δομή από τούβλα γύρω από τα παράθυρα
5. γλάστρα
6. φυτό 1
7. φυτό 2
8. κάγκελα : τα μεταλλικά κάγκελα στα δύο παράθυρα το κάτω δεξιά τμήμα της όψης και αριστερά της πόρτας
9. τοιχοποιία λεία : η λεία πέτρα από την οποία αποτελούνται οι στύλοι και τμήμα της τοιχοποιίας
10. τοιχοποιία τραχειά : οι πιο τραχείες πέτρες στις ίδιες περιοχές
11. γύψος : γύψος που έχει χρησιμοποιηθεί για κάλυψη σε ορισμένα σημεία της τοιχοποιίας
12. πέτρα λεία : υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί στα πιο λεία τμήματα του τοίχου και λιθοδομή με ισχνούς αρμούς ανάμεσα στις πέτρες

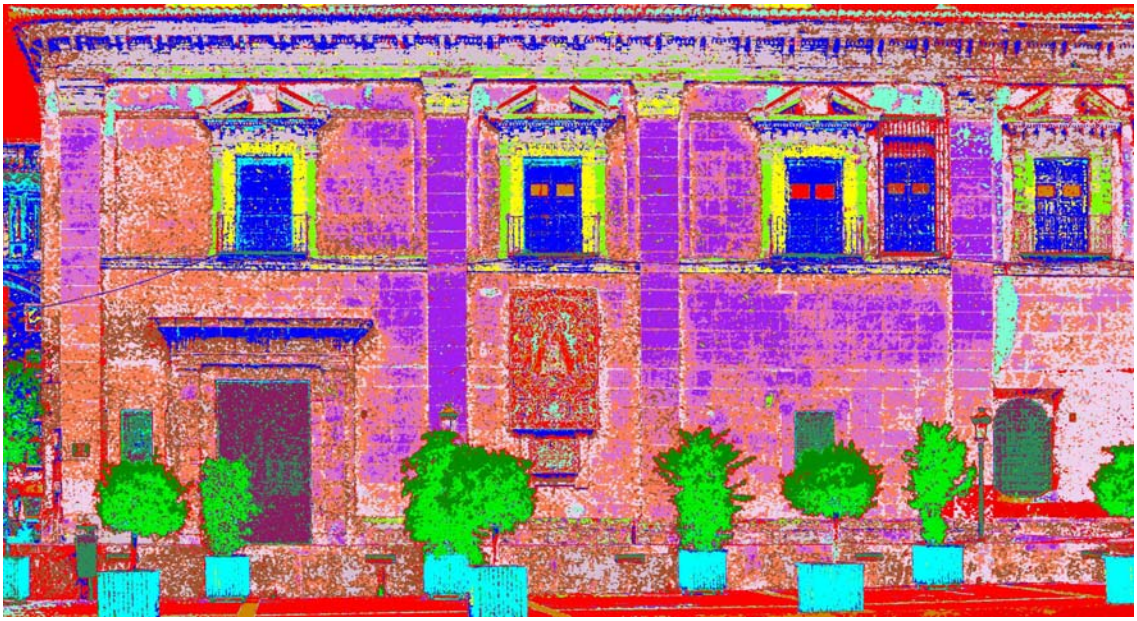
πλακάκια	
ξύλο 1	
ξύλο 2	
τούβλο	
γλάστρα	
φυτό 1	
φυτό 2	
κάγκελο	
τοιχοποιία λεία	
τοιχοποιία τραχειά	
γύψος	
πέτρα λεία	
πέτρα τραχειά	
ώχρα	
γείσο	
γκρι πέτρα	
ακτινωτό πλακάκι	
σκούρα πέτρα	

13. πέτρα τραχειά
14. ώχρα : δομή γύρω από τα παράθυρα
15. γείσο : το οριζόντιο γείσο
16. γκρι πέτρα : πλακάκι στο έδαφος της βεράντας
17. ακτινωτό πλακάκι : πλακάκι που σχηματίζει λωρίδες στη βεράντα
18. σκούρα πέτρα : ορισμένες σκούρες πέτρες στην τοιχοποιία

Εικόνα 83 : περιοχές εκπαίδευσης

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται ενδεικτικά περιοχές εκπαίδευσης που επιλέχθηκαν για τα δεδομένα. Πρέπει να αναφερθεί ότι για την ταξινόμηση κάθε υλικού, χρειάστηκε να δοθούν περισσότερες από μία περιοχές εκπαίδευσης, διότι είτε στοιχεία που ανήκουν στην ίδια κλάση μπορεί σε σημεία να μην παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια, είτε υλικά δύο διαφορετικών κλάσεων να μην είναι κατά τόπους δύσκολα διακριτά. Επίσης, ενδέχεται το ίδιο υλικό να έχει διαφορετική απόκριση σε διαφορετικό σημείο της εικόνας, λόγω συνθηκών φωτισμού, σκιάς κλπ, μολονότι επιχειρήθηκε οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην ταξινόμηση να επηρεάζονται στο ελάχιστο από σκιές.

Για την ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος της μέγιστης πιθανοφάνειας (*Maximum Likelihood*).



Εικόνα 84 : Ταξινομημένη εικόνα

Αποτελέσματα ταξινόμησης

Έχουν ταξινομηθεί σωστά τα σημεία στις θεματικές κατηγορίες του ξύλο 1 και ξύλο 2. Μικρά προβλήματα υπήρχαν στην κατηγορία ξύλο 1. Σωστά, επίσης, ταξινομήθηκαν τα στοιχεία της κατηγορίας κάγκελο. Όμοια τα στοιχεία της δομής των παραθύρων, δηλαδή οι θεματικές κατηγορίες ώχρα και τούβλο. Επίσης, εντοπίσθηκαν και ταξινομήθηκαν σωστά οι περιοχές όπου έχει προστεθεί γύψος στην όψη.

Τοιχοποιία

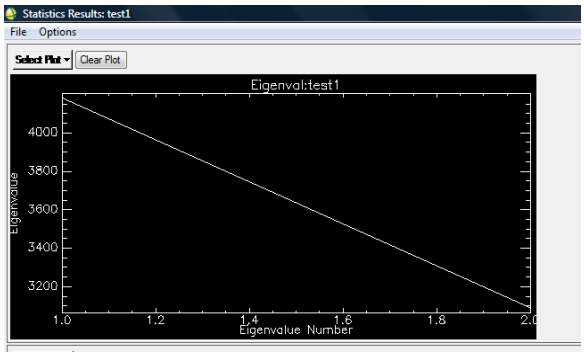
Στην ταξινομημένη εικόνα έχουν διαχωριστεί οι περιοχές με τα διάφορα χαρακτηριστικά. Αρχικά, φαίνονται οι περιοχές που ανήκουν στην λεία τοιχοποιία και είναι οι λιθοδομές των κιόνων και ορισμένες περιοχές, κυρίως στα κεντρικά της τοιχοποιίας. Μεμονωμένες πέτρες λείες

έχουν ταξινομηθεί σωστά σε διάφορα σημεία όλης της τοιχοποιίας της όψης. Αντίστοιχα, έχουν περιγραφεί τα στοιχεία που ανήκουν στις θεματικές κατηγορίες τοιχοποιία τραχειά και πέτρα τραχειά. Τα στοιχεία αυτών των δύο κατηγοριών εντοπίζονται κυρίως στο αριστερό τμήμα της όψης, τόσο στα χαμηλά όσο και στα ψηλά σημεία. Ακόμη, εμφανίζονται στο χαμηλό κομμάτι της αριστερής ακραίας παραστάδας. Οι τραχείες πέτρες εμφανίζουν μεγάλη συγκέντρωση γύρω από την κατασκευή της εισόδου. Περαιτέρω ανάλυση για τα στοιχεία αυτά της όψης θα γίνει παρακάτω , στην ανάλυση των λεπτομερειών.

Η εικόνα αυτή αποτελεί για την υπό εξέταση όψη, ένα χάρτη των υλικών από τα οποία αποτελείται. Διαχωρίζονται τα στοιχεία που εμφανίζονται στην τοιχοποιία της όψης.

4.3.3.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Στη νέα εικόνα, εφαρμόστηκε ξανά ανάλυση κυρίων συνιστωσών και η πολυφασματική εικόνα αναλύθηκε σε δύο συνιστώσες, με σκοπό να συγκεντρωθεί το μεγαλύτερο ποσοστό της αξιοποιήσιμης πληροφορίας σε μία εικόνα, την πρώτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 85 : διάγραμμα ιδιοτιμών

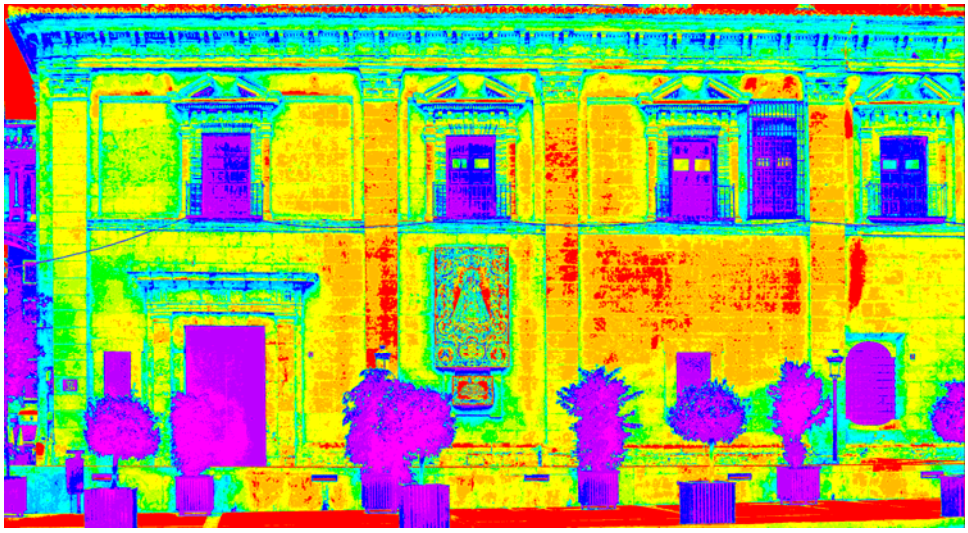
Πίνακας 15 : Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	4179	0,5749
2	3090	0,4251

Εικόνα 86: PC 1 Εικόνα 87 : PC 2

Αφού δημιουργήθηκε η επιθυμητή εικόνα της πρώτης κύριας συνιστώσας, ταξινομήθηκε με μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, θεωρώντας δέκα κλάσεις. Η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ERDAS IMAGINE.

4.3.3.3 Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση



Εικόνα 88 : Ταξινομημένη εικόνα επιβλεπόμενης ταξινόμησης

Στην ταξινόμηση αυτή θεωρήθηκαν δέκα κλάσεις (θεματικές κατηγορίες), με σκοπό να περιγραφούν όσο γίνεται καλύτερα οι περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά στην τοιχοποιία. Ο αριθμός είναι μικρότερος από τον αριθμό των κλάσεων της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, διότι δεν ενδιέφερε στην συγκεκριμένη περίπτωση να μελετηθούν στοιχεία έξω από την όψη. Συνεπώς, δεν λαμβάνονται εδώ υπ' όψη τα φυτά, οι γλάστρες, το τοιχάκι της βεράντας, τα οποία ταξινομήθηκαν σε δύο ξεχωριστές κλάσεις, χωρίς να επηρρεάσουν το αποτέλεσμα της ταξινόμησης για το τμήμα που ενδιαφέρει.

Σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται πόσο βελτιώνεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης με τη συμμετοχή της ορατής εικόνας. Όσον αφορά στην τοιχοποιία, διακρίνονται οι διαφοροποιήσεις στον ασβεστόλιθο της όψης. Κατηγοριοποιούνται, δηλαδή, λίθοι με διαφορετική υφή. Ταξινομείται, επίσης, η λιθοδομή γύρω από τα παράθυρα, το ξύλο, το τζάμι. Το χρήσιμο αποτέλεσμα της ταξινόμησης εδώ είναι ότι, αντικείμενα από το ίδιο υλικό (εδώ οι λίθοι), ταξινομούνται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με την υφή τους. Αυτό σημαίνει ότι λίθοι που βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση, λείες, πιο τραχείες, σχηματίζουν μία κλάση. Στην όψη, δηλαδή, υπάρχουν λίθοι που έχουν αλλοιωθεί από διάφορα φαινόμενα, διάβρωση, ρύπανση, όμβρια ύδατα, περιστασιακή απώλεια ενότητας και από ατυχείς επεμβάσεις μέσα στα χρόνια (Lerma, 1999).

Συγκεκριμένα, ως γενική εικόνα, παρατηρείται ότι το χαμηλότερο και δεξιό τμήμα του τοίχου έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από την υπόλοιπη τοιχοποιία. Αντίστοιχα, οι τρεις παραστάδες στα δεξιά παρουσιάζουν μεταξύ τους μεγαλύτερη ομοιογένεια, από ότι με τον ακραίο αριστερό, σχετικά με τους λίθους της δομής τους. Μεγάλη συγκέντρωση λίθων με όμοια χαρακτηριστικά εμφανίζεται στο αριστερό ακραίο τμήμα της όψης, σε όλο το ύψος του, δηλαδή πλάι στο παράθυρο και στην πύλη. Οι λίθοι αυτοί είναι, όπως περιγράφηκε παραπάνω λίθοι με διαβρωμένη επιφάνεια. Στην συγκεκριμένη ταξινόμηση, με κόκκινο χρώμα έχει αποτυπωθεί η κλάση που περιλαμβάνει τις πιο λείες πέτρινες επιφάνειες.

4.3.4 Ανάλυση Λεπτομερειών

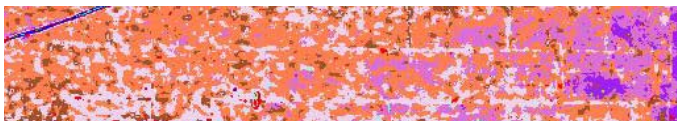
Γενικά :

Οι θερμικές εικόνες, σε συνδυασμό με τις συμβατικές βοηθούν στον εντοπισμό παθολογιών στις δομές της όψης. Οι καιρικές συνθήκες , όπως οι κύκλοι ψύξης – απόψυξης, ύγρανση – ξήρανση, είναι περισσότερο καταστροφικές για πορώδη δομικά υλικά με την παρουσία νερού, πάνω από το κρίσιμο ύψος της υγρασίας (Furmanski, Wisniewski, 2009).

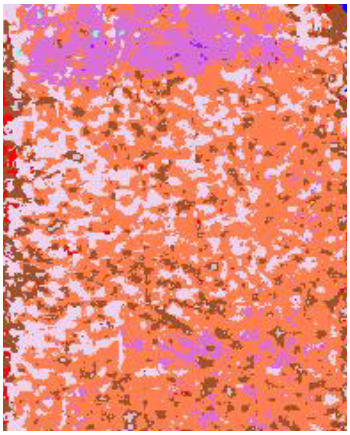
Ασβεστόλιθος

Το μεγαλύτερο κομμάτι της τοιχοποιίας της υπό εξέταση όψης είναι επενδεδυμένο με ασβεστόλιθο. Ωστόσο, σε σημεία της τοιχοποιίας αυτής οι λίθοι παρουσιάζουν αλλοιώσεις. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τμήματα τοιχοποιίας με πέτρες διαβρωμένες, με πιο τραχεία υφή.

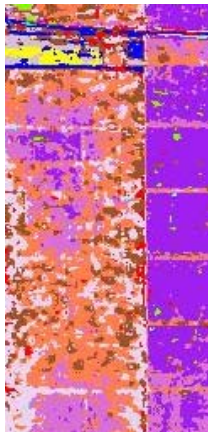
α)



β)

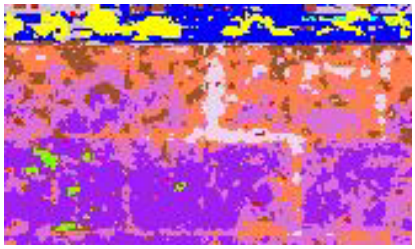


Πέτρες ιδιαίτερα διαβρωμένες



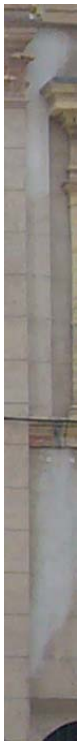
(σομόν)

Τμήματα με απώλεια ενότητας, όπου αυτή έχει ενισχυθεί με τσιμέντο



Επενδύσεις με γύψο ή τσιμέντο

α)

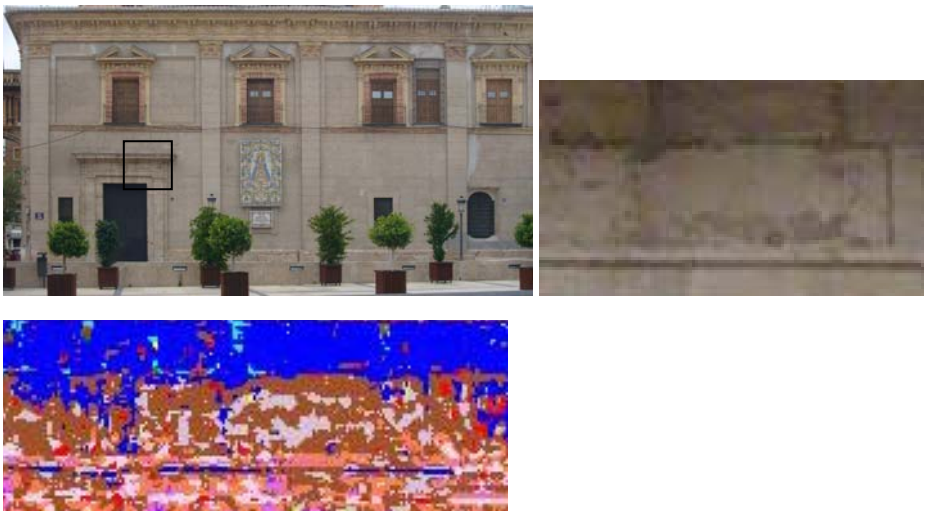


β)

γ)

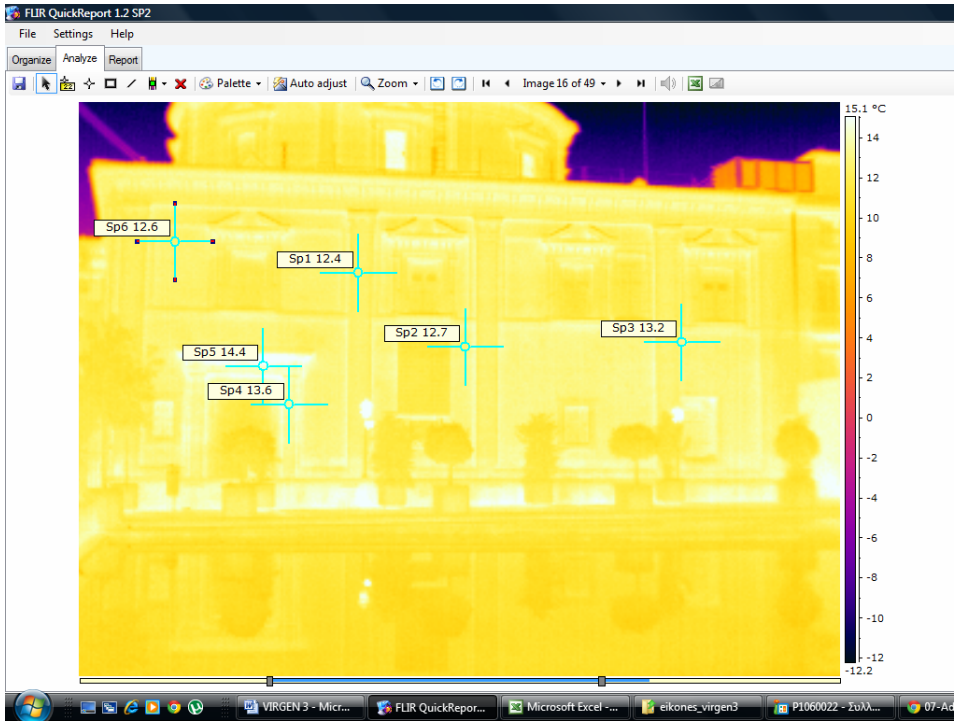
Ηφαιστειακός τόφφος

Τραχεία πέτρα



4.3.5 Μετρήσεις Θερμοκρασίας

Παρακάτω, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας στα τμήματα των κλάσεων που θεωρήθηκαν στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, στις τέσσερις θερμικές εικόνες. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαφορετικά σημεία της ίδιας κλάσης και λήφθηκαν οι μέσοι όροι. Με τις μετρήσεις αυτές επιχειρείται να ερμηνευθεί η συμπεριφορά του κάθε υλικού στις διαφορές της θερμοκρασίας. Έτσι, εντοπίζονται οι αποκρίσεις ενός υλικού στις διάφορες μορφές στις οποίες εντοπίζεται σε όλη την τοιχοποιία. Για παράδειγμα, όπως αναλύθηκε παραπάνω, στην τοιχοποιία υπάρχουν ασβεστόλιθοι σε καλή κατάσταση, ασβεστόλιθοι διαβρωμένοι καθώς και ολόκληρα τμήματα τοιχοποιίας με διαβρωμένη όψη, όπως αυτά ταξινομήθηκαν. Ενδιαφέρει, λοιπόν, εάν η θερμική συμπεριφορά αυτών των ομάδων είναι ίδια και αν όχι, πώς μπορεί να ερμηνευθεί η διαφορετική αυτή συμπεριφορά.

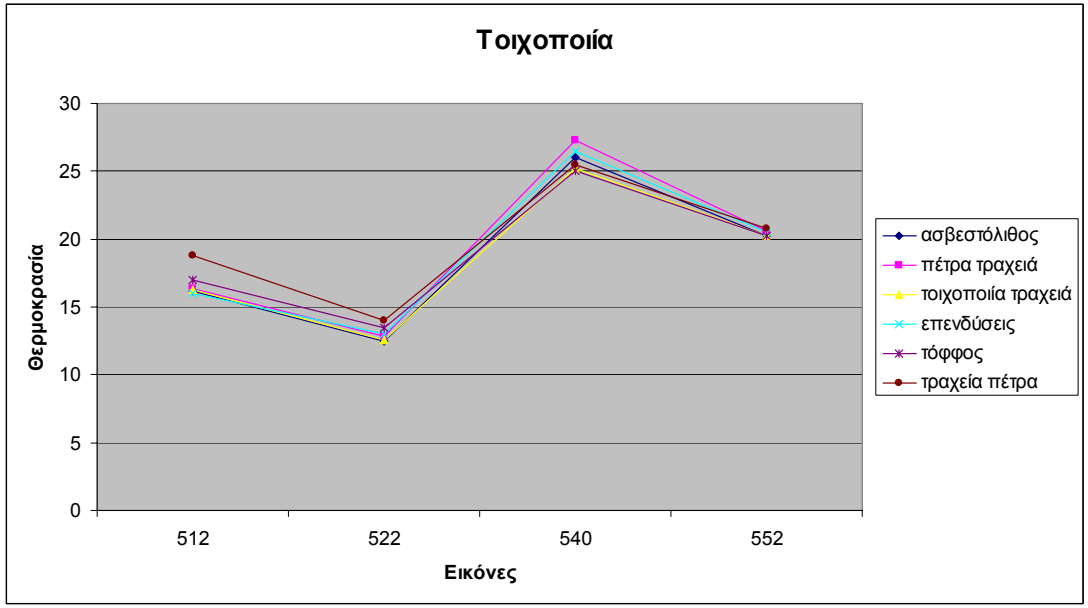


Εικόνα 89 : Ενδεικτικά σημεία μέτρησης θερμοκρασιών

εικόνα	ασβεστόλιθος	πέτρα τραχειά	τοιχοποιία τραχειά	επενδύσεις	τόφφος	τραχεία πέτρα
512	16,2	16,4	16,3	16	17	18,8
522	12,5	12,8	12,6	13	13,5	14
540	26	27,3	25,2	26,5	25	25,5
552	20,2	20,6	20,2	20,5	20,2	20,8
ΔT max	13,5	14,5	12,6	13,5	11,5	11,5

Πίνακας 16 : Μετρήσεις θερμοκρασιών

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τυπικές περιοχές στις οποίες έγιναν μετρήσεις για κάθε κατηγορία. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο διπλανό πίνακα.



Διάγραμμα 9 : Θερμοκρασίες τοιχοποιίας

Στην τελευταία γραμμή του πίνακα περιέχονται οι μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας του κάθε υλικού, που εμφανίζονται ανάμεσα σε δύο εικόνες. Οι τρείς πρώτες στήλες αναφέρονται σε κατηγορίες του ασβεστόλιθου, η τέταρτη στις εξωτερικές επενδύσεις από τσιμέντο και στόκο στον τοίχο και οι δύο τελευταίες στον ηφαιστειακό τόφφο.

Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά παρουσιάζεται στον τραχύ λίθο του ασβεστόλιθου. Είναι 14.5 βαθμοί C και παρουσιάζεται ανάμεσα στις λήψεις 540 και 522, που αντιστοιχούν σε πρωινή και μεσημεριανή λήψη , με θερμοκρασία περιβάλλοντος 13.4 και 24 βαθμούς C αντίστοιχα. Γενικά, οι τρεις κατηγορίες του ασβεστόλιθου που θεωρήθηκαν, παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορές απόλυτων θερμοκρασιών και διαφορών της τάξης του ενός βαθμού κελσίου. Ενδιάμεση διαφορά, στο σύνολο, έχουν οι επιφάνειες με τις εξωτερικές επενδύσεις. Όσον αφορά στον ηφαιστειακό τόφφο, οι δύο κατηγορίες που θεωρήθηκαν παρουσιάζουν την ίδια μέγιστη διαφορά, η οποία είναι η μικρότερη από όλες, στο σύνολο των παρατηρήσεων. Ο τόφφος, είναι το υλικό με τη μικρότερη διακύμανση στην απόλυτη θερμοκρασία του, ενώ ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (12.5 ελάχιστη στη λεία πέτρα και 27.3 μέγιστη στην τραχειά)

Για όλα τα υλικά, η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται ανάμεσα στις λήψεις 522 και 540, δηλαδή από τις 7:30 το πρωί έως τις 15 : 30 το μεσημέρι.

Αν εξετασθούν οι λήψεις διαδοχικά προκύπτει : Ανάμεσα στις λήψεις 512 και 522 (από βράδυ σε πρωί) η θερμοκρασία όλων των υλικών πέφτει, κατά την ίδια τάξη μεγέθους. Αυτή η τελευταία λήψη είναι αυτή στην οποία καταγράφονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στο "ζευγάρι" 522 και 540 παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας, με τα αποτελέσματα που σχολιάστηκαν παραπάνω. Η διαδοχή 540 με 552 (από απόγευμα σε βράδυ) έχει μια ακόμη πτώση της θερμοκρασίας, αντίστοιχου μεγέθους με την πρώτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις 20:00 τα υλικά έχουν σχεδόν την ίδια θερμοκρασία. Τέλος, ακολουθεί ξανά πτώση της θερμοκρασίας των υλικών, ανάμεσα στις λήψεις 552 με 512.

Έτσι, λοιπόν, από τις μετρήσεις και το διάγραμμα επιβεβαιώνεται ότι η συνολική επιφάνεια της τοιχοποιίας αποτελείται από υποπεριοχές λίθων οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση μεταξύ τους. Από αυτές τις περιοχές αυτές με τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση από το σύνολο είναι οι *τραχειά πέτρα* και *πέτρα τραχειά.*

Οι θεματικές κατηγορίες με τη μικρότερη μεταβολή θερμοκρασίας είναι και υποψήφιες για παρουσία υγρασίας. Αυτές οι κατηγορίες εδώ είναι ο *τόφφος* και η *τραχεία πέτρα.*

Οι περιοχές με τη μικρότερη διακύμανση στη θερμοκρασία είναι περιοχές υποψήφιες για παρουσία υγρασίας. Τα πορώδη υλικά παρουσιάζουν την τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό ο ρυθμός της πτώσης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια να μειώνεται. Επίσης, η μέγιστη θερμοκρασιακή πτώση στην επιφάνεια αυξάνεται με την παρουσία νερού (Furmanski, Wisniewski, 2009). Επομένως, η σχετικά μικρότερη μείωση της θερμοκρασίας στις

τραχειές πέτρες του ασβεστόλιθου, ενδέχεται να υποδηλώνει παρουσία υγρασίας, γεγονός που πιθανώς ερμηνεύει και την διαβρωμένη όψη της.

4.3.5 Συμπεράσματα

Η μελέτη της συγκεκριμένης όψης επέτρεψε να διερευνηθεί, κατά βάση, η τοιχοποιία της όψης. Για αυτήν, ήδη από την συμβατική εικόνα, είχαν παρατηρηθεί ανομοιομορφίες στην όψη των διάφορων σημείων της. Τα σημεία αυτά εξετάστηκαν και μέσα από τις θερμικές εικόνες και τα παράγωγά τους. Τέλος, προστέθηκαν στα δεδομένα και μετρήσεις θερμοκρασιών.

Από όλα τα παραπάνω περιγράφηκαν ορισμένες κατηγορίες λίθων που υπάρχουν διασκορπισμένες σε όλη την έκταση της τοιχοποιίας. Για κάθε μία από αυτές έγινε παρουσίαση σε ενδεικτικά σημεία λεπτομερειών. Οι κατηγορίες αυτές είναι πέτρες με διαβρωμένη επιφάνεια, τραχειές, λείες επιφάνειες, λιθοδομές με εξασθενημένους συνδέσμους και περιοχές με προσθήκη υλικού.

Από αυτές τις κατηγορίες, από τις θερμικές εικόνες και τις μετρήσεις των θερμοκρασιών προέκυψε ότι τα τμήματα του ηφαιστειακού τόφφου και αυτά που ανήκουν στην θεματική κατηγορία τραχεία πέτρα, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, είναι υποψήφια για παρουσία υγρασίας.

Ως γενική παρατήρηση σημειώνεται ότι υπάρχει ένας γενικός και σαφής διαχωρισμός δύο τμημάτων πάνω στην τοιχοποιία, τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Το ένα ορίζεται δεξιά του κεντρικού κίονα έως πέρα και αφορά μόνο στο χαμηλό κομμάτι. Το δεύτερο αφορά σε όλη την υπόλοιπη τοιχοποιία. Το πρώτο τμήμα, λοιπόν, παρουσιάζει εν γένει υψηλότερες θερμοκρασίες από το άλλο.

Τέλος, εντοπίστηκαν και κάποιες ανωμαλίες στο ξύλο των παραθύρων, ωστόσο η κλίμακα των συγκεκριμένων λήψεων δεν ευνοεί την περαιτέρω διερεύνησή τους.

4.4 Πύλη Virgen

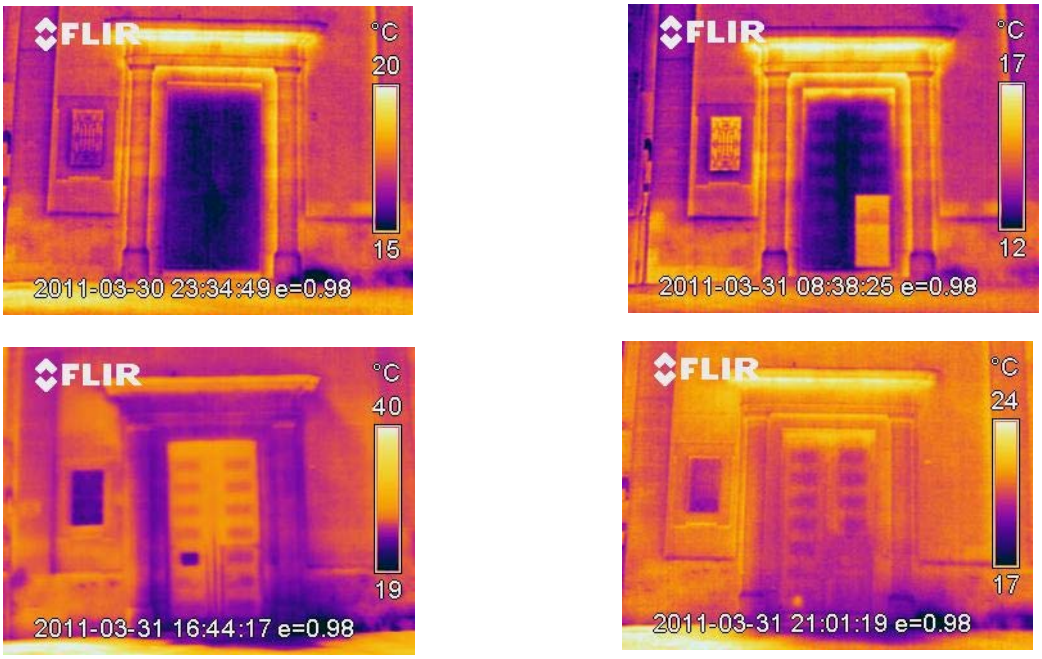
Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η είσοδος που βρίσκεται στην ανατολική όψη της Βασιλικής Virgen de los Despamparados. Αυτή είναι η μοναδική είσοδος της εκκλησίας από αυτή την πλευρά. Είναι μια κατασκευή κλασικίζουσα, την οποία αποτελούν στοιχεία κλασικά όπως οριζόντιο γείσο με τρίγλυφα και μετόπες, σταγόνες. Ακόμη, στη θέση των κιόνων υπάρχουν δύο παραστάδες με λιτά επίκρανα και βάσεις. Στη βάση της πόρτας υπάρχουν δύο σκαλιά από γκρι μάρμαρο. Εκτός από το μάρμαρο, το οποίο υπάρχει μόνο σε αυτά τα δύο

σκαλιά, το βασικό υλικό κατασκευής της πύλης είναι η πέτρα από την οποία αποτελείται όλη η όψη και είναι ένα είδος ηφαιστειακού τόφου. Τέλος, η δίφυλλη πόρτα είναι ξύλινη.

Πίνακας 17 : Πίνακας λήψεων πύλης Virgen

Θερμικές εικόνες	Ώρα λήψης	Εξωτερική θερμοκρασία (ºC)
511	23:35	17.2
521	08:38	13.4
539	16:44	24.0
551	21:01	21.5

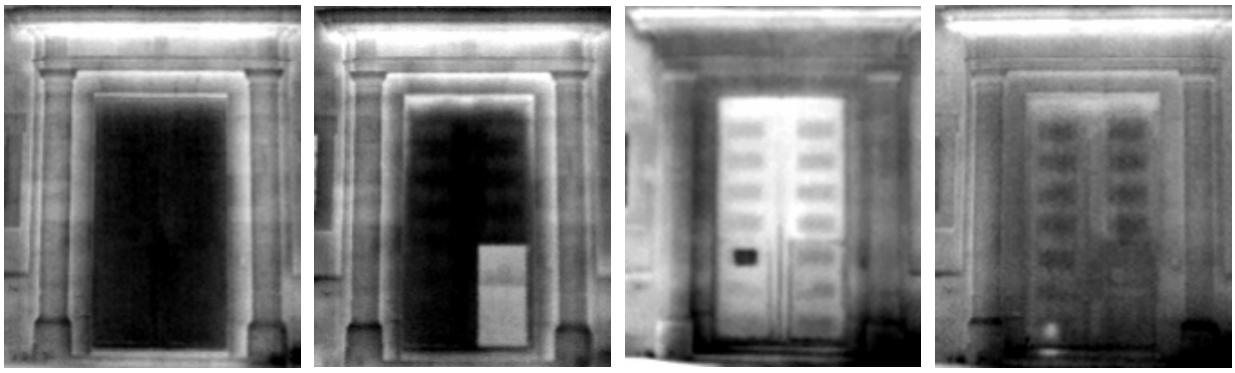
4.4.1 Λήψεις



Εικόνα 90: Εικόνες 511, 521, 539, 551

Εικόνες εισόδου

Παρακάτω οι εικόνες μετά την προεπεξεργασία, όπως εισήχθησαν στις επόμενες διαδικασίες. Οι εικόνες, προκειμένου να σχηματίσουν την πολυφασματική εικόνα απέκτησαν κοινό μέγεθος 175 x 200 pixel.



Εικόνα 91 : εικόνες εισόδου

4.4.2 Ανάλυση Θερμικών εικόνων

Γενικά

- Παρακάτω, για να αποφεύγονται οι επαναλήψεις θα ονομαστεί το επίπεδο ακριβώς πίσω από τις παραστάδες, *επίπεδο α*. Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει ένα τμήμα σχήματος Π περιμετρικά της πόρτας, δυο κατακόρυφες λωρίδες από την εξωτερική πλευρά των παραστάδων και συνεχίζει ως ένας προεξέχων τοίχος από το έδαφος μέχρι ένα μικρό ύψος, περίπου δύο μέτρα.
- Ως *επίπεδο β* θα αναφέρεται το επίπεδο του τοίχου.

Δημιουργία πολυφασματικής εικόνας

Οι τέσσερις θερμικές εικόνες, μετά την ενίσχυση και την αναγωγή, με επίθεση σχημάτισαν μια πολυφασματική εικόνα τεσσάρων καναλιών με την παρακάτω δομή :

Κανάλι 1 : θερμική εικόνα 511

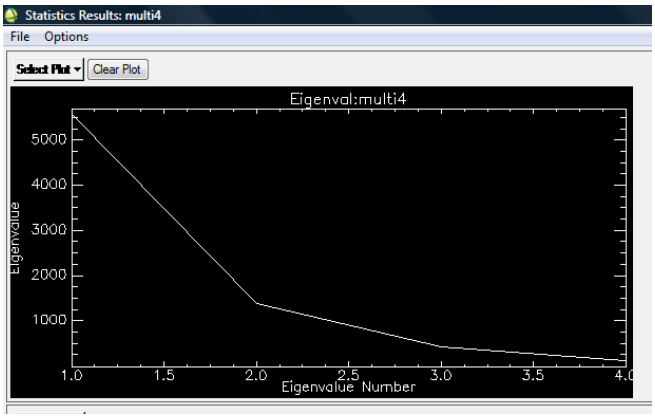
Κανάλι 2 : θερμική εικόνα 521

Κανάλι 3 : θερμική εικόνα 539

Κανάλι 4 : θερμική εικόνα 551

4.4.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Στην πολυφασματική εικόνα εφαρμόσθηκε ανάλυση κυρίων συνιστωσών και η αναλύθηκε σε τέσσερις νέες εικόνες.



Εικόνα 92 : διάγραμμα ιδιοτιμών

Πίνακας 18 : πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	5562	0,7437
2	1383	0,1849
3	427	0,0571
4	107	0,0143

Από τις τιμές του πίνακα προκύπτει ότι η πρώτη συνιστώσα εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό της διασποράς των πρωτογενών δεδομένων, σε ποσοστό 74.37 %. Η δεύτερη κύρια συνιστώσα εκφράζει πολύ μικρότερο ποσοστό που ανέρχεται στο 18.49%. Οι δύο τελευταίες έχουν ακόμη μικρότερες ιδιοτιμές και άρα και ποσοστά διακύμανσης που είναι ίσα με 5.71 % και 1.43 % αντίστοιχα. Ωστόσο, όπως αναλύεται παρακάτω, και η τρίτη και η τέταρτη είναι εικόνες που περιέχουν σημαντικές πληροφορίες, παρά το μικρό ποσοστό διακύμανσης που εκφράζουν. Οι λόγοι θα εξηγηθούν παρακάτω.

PC1

Εικόνα 93: PC 1

Η πρώτη κύρια συνιστώσα είναι μια εικόνα με ικανοποιητική ανάλυση, η οποία περιγράφει τα στοιχεία του αντικειμένου.

Αρχικά, θα εξεταστεί η ξύλινη επιφάνεια, δηλαδή η πόρτα. Σε αυτή παρουσιάζεται μια ομοιομορφία σχεδόν σε όλη την επιφάνειά της. Ωστόσο, υπάρχει ένα οριζόντιο τμήμα στο ψηλότερο τμήμα της το οποίο αποδίδεται διαφορετικά από τα υπόλοιπα. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται, επίσης, πιο διακριτικό σε δύο κατακόρυφες γραμμές, στην δεξιά και αριστερή ακμή της. Η κατακόρυφη γραμμή στα αριστερά φθάνει έως το μέσο της πόρτας, ενώ η δεξιά έχει μικρότερο μήκος και φθάνει λίγο ψηλότερα από το κέντρο της.

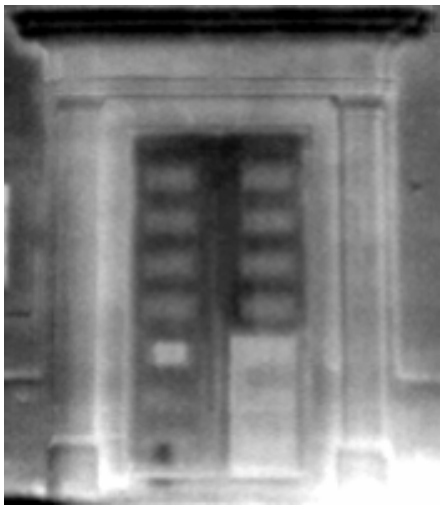
Όσον αφορά στις παραστάδες αλλά και στο επίπεδο α, παρατηρείται ότι στην εικόνα διακρίνονται οι διάφοροι λίθοι από τους οποίους αποτελούνται. Χαρακτηριστικές είναι οι διακριτές οριζόντιες γραμμές των ακμών τους.

Σχετικά με το αν εμφανίζονται ανωμαλίες στα όρια του αντικειμένου, πέρα από αυτήν που αναφέρθηκε για την ξύλινη επιφάνεια, μπορούν να επισημανθούν τρεις. Η πρώτη είναι αυτή που εντοπίσθηκε και στις πρωτογενείς εικόνες και είναι η σκιά, που εδώ εμφανίζεται με άσπρο χρώμα, στην κάτω δεξιά γωνία της εικόνας. Το φαινόμενο αυτό περιλαμβάνει τμήμα του τοίχου από το ύψος που συναντάει το έδαφος μέχρι και κάποιες δεκάδες εκατοστά ψηλότερα. Επίσης, βρίσκεται και στην κάτω δεξιά γωνία της βάσης της δεξιάς παραστάδας.

Η δεύτερη ανωμαλία, εντοπίζεται στο άνω τμήμα της ζωφόρου και στο λεπτό οριζόντιο τμήμα πάνω από αυτήν. Στην εικόνα χαρακτηριστικά εμφανίζεται μια σκούρα περιοχή, η οποία καλύπτει όλο το μήκος του γείσου, εκτός από τη γωνία στα δεξιά, η οποία ανήκει στο επίπεδο α.

Η τελευταία πιθανή ανωμαλία εντοπίζεται ακριβώς κάτω από την κάτω οριζόντια ακμή του επιστυλίου, στο επίπεδο α. Είναι μια οριζόντια γραμμή που εκτείνεται από το ένα επίκρανο έως το άλλο και απεικονίζεται με μαύρο χρώμα.

PC 2



Εικόνα 94 : PC 2

Η δεύτερη κύρια συνιστώσα απεικονίζει πληροφορίες για την ξύλινη επιφάνεια, οι οποίες δεν ήταν ορατές στην πρώτη. Έτσι, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι παρότι μια εικόνα έχει μικρό ποσοστό μεταβλητότητας, μπορεί να περιέχει πληροφορίες που δεν παρέχονται από μια άλλη εικόνα που έχει υψηλό ποσοστό. Στην ξύλινη επιφάνεια, λοιπόν, αποδίδονται τα ορθογώνια στις δύο πλευρές τις πόρτας, όπως φαίνονταν και σε ορισμένες από τις πρωτογενείς εικόνες. Τα ορθογώνια αυτά είναι σαφώς διακριτά στο άνω μέρος, δηλαδή από το άνοιγμα της πόρτας και πάνω. Αντίθετα, στο κάτω μέρος είναι ιδιαίτερα αχνά.

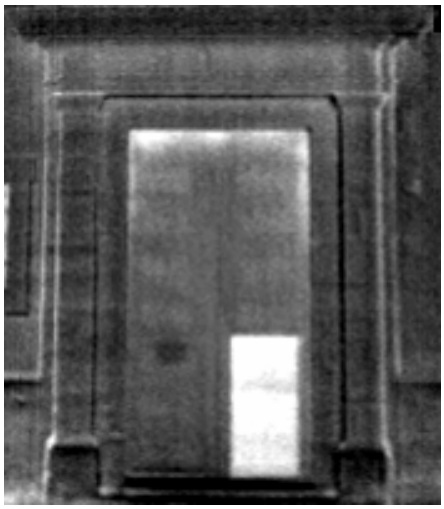
Στην πόρτα, φαίνεται, ακόμη, το μικρότερο ορθογώνιο που παρατηρήθηκε παραπάνω. Εδώ αποδίδεται με ανοιχτό τόνο.

Τελευταία σημείωση στην περιοχή της πόρτας είναι η μικρή μαύρη κηλίδα στο αριστερό τμήμα η οποία φαίνεται, μετά από μία διακοπή να συνεχίζεται και στο πρώτο μαρμάρινο σκαλοπάτι, για μια πολύ μικρή επιφάνεια.

Για την κατασκευή της πύλης εδώ μπορούν να επισημανθούν δύο ανωμαλίες. Η πρώτη εντοπίζεται στο οριζόντιο γείσο πάνω από τη ζωφόρο. Το γείσο και ιδιαίτερα οι δύο ακμές του (πάνω και κάτω), αποδίδονται με τόνο πολύ πιο σκούρο από την υπόλοιπη κατασκευή.

Η ανωμαλία που καταδεικνύει η άσπρη σκιά στα δεξιά, εδώ παρουσιάζεται πιο εκτεταμένη, καθώς περιλαμβάνει μεγαλύτερο τμήμα της βάσης της παραστάδας, τη γραμμή επαφής της βάσης με την παραστάδα και μια περιοχή στο επίπεδο α, από την άλλη πλευρά της βάσης της παραστάδας. Σε αυτή την εικόνα το φαινόμενο αποτυπώνεται με άσπρο χρώμα. Επίσης, εδώ με ίδιο χρώμα περιγράφεται ένα μικρό, γωνιακό τμήμα στην εσωτερική γωνία του επιπέδου α, όπου έρχεται σε επαφή με την άλλη παραστάδα. Υπάρχει, επομένως, μια πιθανότητα να υπάρχει η ίδια ανωμαλία και στην άλλη πλευρά.

PC 3



Εικόνα 95 : PC 3

Στην τρίτη συνιστώσα, μπορούν να εντοπιστούν πέντε πιθανά προβλήματα. Το πρώτο εμφανίζεται στην άνω περιοχή της πόρτας. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες εικόνες και περιλαμβάνει την πάνω ακμή της πόρτας και τις δύο κατακόρυφες, για μήκος μικρότερο από το μισό του ύψους της πόρτας. Η περιοχή αυτή είναι άσπρη και το φαινόμενο είναι εντονότερο στην αριστερή γωνία.

Η δεύτερη ανωμαλία παρουσιάζεται στο ανώτερο τμήμα της βάσης αμφότερων των παραστάδων. Οι περιοχές αυτές αποδόθηκαν πιο σκούρες, σχεδόν μαύρες, από τις υπόλοιπες. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην δεξιά παραστάδα. Επίσης, ενώ στην αριστερή το φαινόμενο είναι σχεδόν γραμμικό, στην δεξιά επεκτείνεται και στις πλαϊνές ακμές της βάσης, σαν ένα σχήμα Π. Λιγότερο σκούρα σημεία εμφανίζονται και στο εσωτερικό της όψης της δεξιάς βάσης.

Στην εσωτερική πλευρά της δεξιάς παραστάδας, αποτυπώνεται μία μαύρη γραμμή, στα όριά του με το επίπεδο α. Η γραμμή αυτή εκτείνεται σε όλο της το ύψος, δηλαδή από τη βάση μέχρι τον εχίνο.

Η επόμενη ανωμαλία αφορά στον τοίχο του επιπέδου α. Στο μεγαλύτερο ύψος του τοίχου, όπου αυτή η κατασκευή τελειώνει, οι ακμές έχουν μαύρο χρώμα. Η ανωμαλία αυτή εμφανίζεται με αντίστοιχο τρόπο και από τις δύο πλευρές.

Τέλος, φαίνεται και εδώ με σκουρότερο χρώμα από το χρώμα της πόρτας, ο μικρός ορθογώνιος σχηματισμός που έχει εντοπισθεί επανειλημμένα, στο αριστερό τμήμα της πόρτας. Τα μεγαλύτερα ορθογώνια δεν είναι έντονα αποδομένα, ωστόσο φαίνονται με μία πιο προσεκτική παρατήρηση.

Να σημειωθεί, επίσης, ότι με αχνές μαύρες γραμμές ξεχωρίζουν τα όρια των λίθων στις παραστάδες και στο επίπεδο α.

Τα μαρμάρινα σκαλιά, είναι σημαντικά πιο σκούρα από την υπόλοιπη όψη. Ωστόσο αυτό δεν είναι ενδεικτικό κάποιου προβλήματος, εφ' όσον αποτελούν διαφορετικό υλικό από αυτό της όψης και είναι αναμενόμενο να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετική συμπεριφορά.

PC 4

Η τέταρτη συνιστώσα είναι μια εικόνα η οποία εκφράζει πολύ μικρό ποσοστό της διασποράς. Ωστόσο, παρέχει ορισμένες σημαντικές πληροφορίες οι οποίες δεν δίνονται σε άλλες εικόνες. Γενικά, σημειώνονται τέσσερις ανωμαλίες επάνω στην όψη.

Η πρώτη περιοχή που ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες του ίδιου υλικού είναι η κάτω οριζόντια γραμμή του γείσου. Η γραμμή αυτή είναι μαύρη, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιοχές του γείσου και της ζωφόρου, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό.

Εικόνα 96 : PC 4

Το μικρό ορθογώνιο που καταγράφεται στην πόρτα εδώ είναι ιδιαίτερα έντονο και απεικονίζεται με μαύρο χρώμα.

Μια ανωμαλία, η οποία έχει παρατηρηθεί σε ελάχιστες εικόνες της όψης είναι μία μαύρη κηλίδα στην αριστερή πλευρά της πόρτας, χαμηλά. Η κηλίδα αυτή συμπεριλαμβάνει και ένα κομμάτι του ψηλότερου μαύρου σκαλοπατιού. Είναι ένα στοιχείο που εμφανίζεται μόνο στην εικόνα 551 και σε καμία προηγούμενη. Δεν εμφανίζεται ούτε και στην εικόνα 508 η οποία είναι επίσης βραδινή λήψη. Εάν εμφανίζονταν και σε αυτήν θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται με τις βραδινές θερμοκρασίες, ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει. Επομένως, δεν γνωρίζουμε αν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη πληροφορία.

Μία ακόμη παθολογία εντοπίζεται στην αριστερή κάτω γωνία της πόρτας. Από εκείνη τη γωνία και επεκτεινόμενη στις δύο πλευρές της ξεκινά μια μαύρη γραμμή, της οποίας το πάχος μειώνεται από τη γωνία προς τα άκρα.

4.4.3 Συνδυασμένη Επεξεργασία Θερμικών Εικόνων και Συμβατικής

Δημιουργία πολυφασματικής εικόνας

Δομή πολυφασματικής εικόνας

Κανάλι 1: θερμική εικόνα 511

Κανάλι 2: θερμική εικόνα 521

Κανάλι 3: θερμική εικόνα 539

Κανάλι 4: θερμική εικόνα 551

Κανάλι 5: red κανάλι συμβατικής

Κανάλι 6: green κανάλι συμβατικής

Κανάλι 7: blue κανάλι συμβατικής

Εικόνα 97 : συμβατική εικόνα

Το μέγεθος της νέας πολυφασματικής εικόνας είναι 1804 x 2108 pixel, ίσο με το μέγεθος της συμβατικής εικόνας.

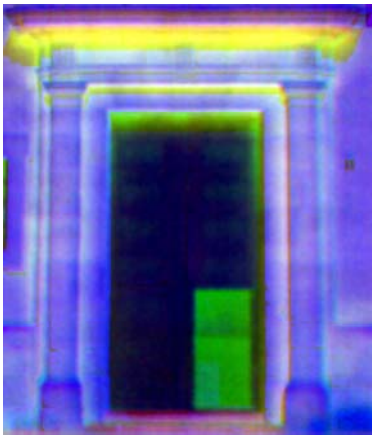
4.4.3.1 Έγχρωμα σύνθετα

Σύνθετο 1

Κανάλι 1 : κανάλι 1 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 2 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 5 πολυφασματικής



Εικόνα 98 : Σύνθετο 1

Στο διπλανό έγχρωμο σύνθετο παρουσιάζονται με διαφορετικά χρώματα ορισμένες περιοχές ενδεικτικές πιθανών παθολογιών. Οι περιοχές αυτές έχουν επισημανθεί και σε προηγούμενες εικόνες και εδώ διευκολύνεται ο εντοπισμός και η περιγραφή της θέσης τους, με τη συμμετοχή της οπτικής εικόνας.

Το πιο έντονο φαινόμενο, το οποίο καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση είναι στην περιοχή ανάμεσα στη ζωφόρο και στο οριζόντιο γείσο. Στην εικόνα αποδίδεται με χρώμα κίτρινο και διαφοροποιείται τελείως από τις γειτονικές περιοχές του ίδιου υλικού. Επίσης, αφορά τόσο στο προεξέχον επίπεδο όσο και στο επίπεδο α, στα ίδια ύψη.

Με επίσης κίτρινο χρώμα αποδίδεται το τμήμα κάτω από τη ζωφόρο, εκεί όπου συνορεύει με το επίπεδο α, στο μήκος ολόκληρης αυτής της γραμμής.

Στο τμήμα της πόρτας, η πάνω πλευρά της και το μισό περίπου της δεξιάς αποδίδονται με διαφορετικό χρώμα από την υπόλοιπη πόρτα. Συγκεκριμένα, το χρώμα αυτής της ζώνης είναι ανοιχτό πράσινο, σε αντίθεση με το σκούρο μπλε χρώμα της πόρτας.

Με μια επίσης πιο ανοιχτή απόχρωση εμφανίζονται τα ορθογωνικά σχήματα στις δύο πλευρές της πόρτας, με πιο έντονα αυτά της δεξιάς πλευράς.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί έως τώρα στην όψη και είναι η σκούρα κηλίδα κάτω και δεξιά, εμφανίζεται και εδώ με μπλε χρώμα, πιο σκούρο από το μπλε χρώμα του τοίχου.

Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται και στα παρακάτω σύνθετα, επομένως για αυτά δεν θα γίνει επιπλέον αναφορά. Οι παρακάτω εικόνες ενισχύουν την υπόθεση της ύπαρξης αυτών των παθολογιών και διευκολύνουν τον εντοπισμό τους.

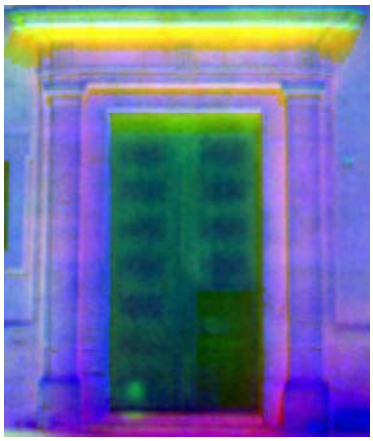
Σύνθετο 2

Κανάλι 1 : κανάλι 1 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 4 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 7 πολυφασματικής

Στο σύνθετο αυτό εμφανίζονται οι ίδιες προβληματικές περιοχές που σημειώθηκαν και στο προηγούμενο, με ανάλογα χρώματα. Υπάρχουν, όμως, δύο νέα στοιχεία που εισάγει αυτή η εικόνα.



Εικόνα 99 : Σύνθετο 2

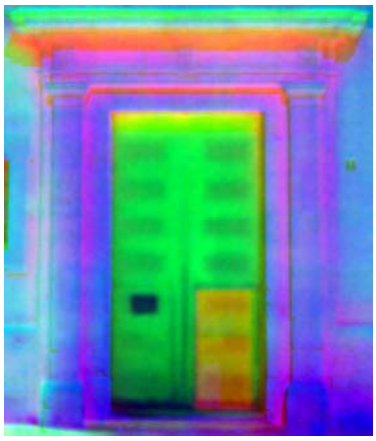
Το πρώτο αφορά στην μαύρη κηλίδα στα δεξιά. Η κηλίδα αποτυπώνεται και εδώ όπως και προηγουμένως, ωστόσο το φαινόμενο είναι πιο εκτεταμένο. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται ότι γύρω από την κηλίδα υπάρχει μια ευρύτερη περιοχή η οποία αποδίδεται με μοβ χρώμα, το οποίο επίσης διαφοροποιείται από το χρώμα του τοίχου. Συνεπώς, ενδέχεται το φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί ως τώρα να είναι πιο διευρυμένο, ή η περιοχή του μοβ χρώματος να είναι μια περιοχή η οποία είναι ζώνη επιρροής της παθολογίας που αποτυπώνεται με την κηλίδα. Το χαρακτηριστικό αυτό φαίνεται και στα παρακάτω έγχρωμα σύνθετα.

Σύνθετο 3

Κανάλι 1 : κανάλι 2 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 3 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 5 πολυφασματικής



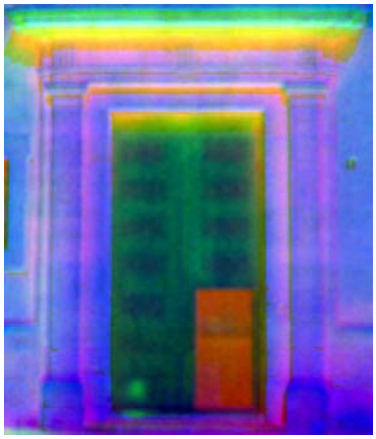
Εικόνα 100 : Σύνθετο 3

Σύνθετο 4

Κανάλι 1 : κανάλι 2 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 4 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 6 πολυφασματικής



Εικόνα 101 : Σύνθετο 4

Εικόνα 102 : Σύνθετο 5

Σύνθετο 5

Κανάλι 1 : κανάλι 2 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 5 πολυφασματικής

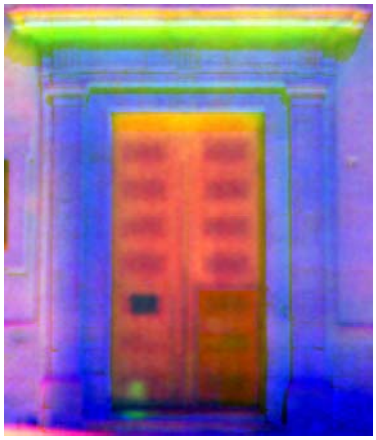
Κανάλι 3 : κανάλι 6 πολυφασματικής

Σύνθετο 6

Κανάλι 1 : κανάλι 3 πολυφασματικής

Κανάλι 2 : κανάλι 4 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 7 πολυφασματικής



Εικόνα 103 : Σύνθετο 6

Σύνθετο 7

Κανάλι 1 : κανάλι 7 πολυφασματικής

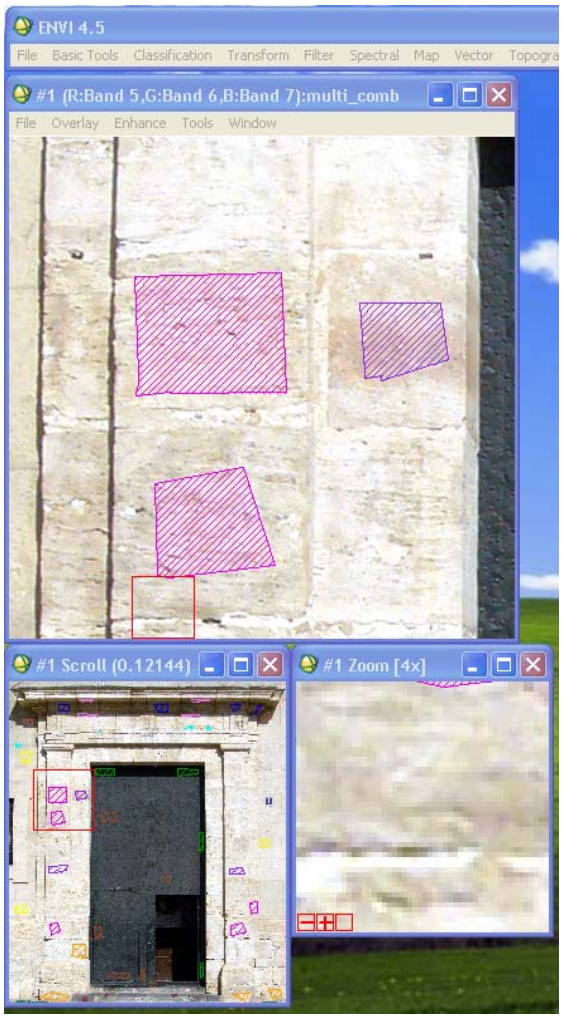
Κανάλι 2 : κανάλι 1 πολυφασματικής

Κανάλι 3 : κανάλι 6 πολυφασματικής

Εικόνα 104 : Σύνθετο 7

4.4.3.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Στη νέα πολυφασματική εικόνα πραγματοποιήθηκε επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρώντας δεκατρείς κλάσεις, με τον αλγόριθμο του παραλληλεπιπέδου, διότι μετά από δοκιμές αυτός έδωσε το πιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Οι θεματικές κατηγορίες που αντιστοιχούν στις δεκατρείς κλάσεις και οι περιοχές εκπαίδευσης παρουσιάζονται παρακάτω.



ξύλο	
μάρμαρο	
γκρι μάρμαρο	
τοίχος	
πέτρα τραχειά	
πέτρα τραχειά 2	
πέτρα λεία	
γύψος	
σκιά	
πάτωμα	
σκιά 2	
σκιά 3	
ξύλο σκιά	

Εικόνα 105 : περιοχές εκπαίδευσης

Κλάσεις :

1. *ξύλο* : το ξύλο από το οποίο είναι κατασκευασμένη η πόρτα
2. *μάρμαρο :* οι όψεις του μαρμάρου στα σκαλοπάτια, που είναι κάθετες στο έδαφος
3. *γκρι μάρμαρο :* οι οριζόντιες επιφάνειες του μαρμάρου στα σκαλοπάτια
4. *τοίχος :* το τμήμα της τοιχοποιίας που βρίσκεται πίσω από το επίπεδο α
5. *πέτρα τραχειά :* οι πέτρες με τραχεία επιφάνεια που εντοπίζονται κυρίως χαμηλά στο επίπεδο α και στις βάσεις των παραστάδων
6. *πέτρα τραχειά 2 :* οι πέτρες με λιγότερο έντονη τραχύτητα στην επιφάνειά τους από την
7. προηγούμενη κατηγορία
8. *πέτρα λεία :* οι υπόλοιπες πέτρες, οι οποίες έχουν λεία επιφάνεια, σε όλα τα επίπεδα της όψης
9. *γύψος :* οι επεμβάσεις με γύψο που έχουν γίνει σε λίγα σημεία της όψης
10. *σκιά :* τα σκιασμένα τμήματα της ζωφόρου
11. *πάτωμα :* η επιφάνεια του δρόμου που είναι ορατή στην εικόνα
12. *σκιά 2 :* το σκιασμένο τμήμα του οριζόντιου γείσου

13. *σκιά 3 :* το τμήμα της τοιχοποιίας που σκιάζουν τα προεξέχοντα τμήματα του οριζόντιου γείσου
14. *ξύλο σκιά :* οι σκιασμένες περιοχές του ξύλου της πόρτας

Σημειώσεις

- Ο δρόμος, στην κλάση πάτωμα, μετά την αναγωγή δεν θα έπρεπε να εμφανίζεται στην εικόνα. Παρόλα αυτά η γεωμετρία του αντικειμένου είναι αναπόφευκτο να μη εισάγει σφάλματα στη διαδικασία της αναγωγής. Η υπό εξέταση πύλη δεν είναι επίπεδο αντικείμενο αλλά έχει ανάγλυφο. Όμως, λόγω της μεγάλης απόστασης λήψης θεωρήθηκε ότι είναι δεκτό να εφαρμοσθεί αναγωγή για τη γεωμετρική διόρθωση της εικόνας. Το σφάλμα αυτό αφορά στα όρια της εικόνας και βρίσκεται εκτός των ορίων μελέτης του αντικειμένου. Επομένως, η ύπαρξή του δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα και η κλάση θεωρήθηκε μόνο έτσι ώστε τα εικονοστοιχεία αυτού του τμήματος να ταξινομηθούν σε ξεχωριστή κατηγορία και να μη δημιουργηθούν προβλήματα σύγχυσης στην ταξινόμηση των υπόλοιπων στοιχείων.
- Αντίστοιχο πρόβλημα εμφανίζεται και σε άλλο σημείο. Υπάρχει μία ζώνη μικρού ύψους στο τμήμα κάτω από το οριζόντιο γείσο, η οποία δεν βρίσκεται σε επίπεδο που προβάλλεται στην αναγωγή και κανονικά δεν θα έπρεπε να εμφανίζεται στην εικόνα. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό δε στάθηκε δυνατό να εξαλειφθεί. Ταυτόχρονα, το ίδιο τμήμα υπάρχει έντονη επίδραση σκιάς. Επομένως, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ερμηνεία των φαινομένων στη συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα και παρερμηνείες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απεικόνιση της περιοχής αυτής τόσο στα έγχρωμα σύνθετα, όσο και στις εικόνες κυρίων συνιστωσών. Στις τελευταίες, το φαινόμενο παρουσιάζεται κυρίως στην πρώτη και στην τρίτη εικόνα. Εκεί, επομένως, δεν λαμβάνεται υπόψη η περιοχή αυτή και οι εικόνες που προαναφέρθηκαν δεν μπορούν να στηρίξουν υπόθεση ανωμαλίας.

Εικόνα 106 : Ταξινομημένη εικόνα

Στην ταξινομημένη εικόνα, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της όψης έχει ταξινομηθεί στην κατηγορία τοίχος. Το γεγονός αυτό είναι λογικό αφού όλη η όψη αποτελείται από παρόμοιες πέτρες, με τη διαφορά ότι οι λίθοι στο επίπεδο πίσω από το επίπεδο α έχουν πιο λεία όψη. Οι λίθοι αυτοί είναι λιγότερο καταπονημένοι και σε καλύτερη κατάσταση από αυτούς που βρίσκονται στο επίπεδο α και στις παραστάδες.

Στην θεματική κατηγορία πέτρα τραχειά έχουν ταξινομηθεί οι τραχειές πέτρες του επιπέδου α και των παραστάδων. Συγκεκριμένα, δεν έχει ταξινομηθεί ολόκληρη η πέτρα αλλά τα τμήματα της επιφάνειάς της που είναι «φαγωμένα». Έτσι με πορτοκαλί χρώμα περιγράφονται οι ανωμαλίες πάνω στην επιφάνεια της πέτρας. Παρατηρείται ότι δεν έχουν ταξινομηθεί στοιχεία στην κατηγορία λεία πέτρα. Αντίθετα, τα στοιχεία αυτά, που αναμένονταν να ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν ταξινομηθεί στην θεματική κατηγορία τοίχος. Με αυτό τον τρόπο υποδεικνύεται ότι οι περιοχές αυτές, δηλαδή τα υλικά, δεν είναι διαχωρίσιμα και εντάσσονται στην ίδια θεματική κατηγορία.

Προβλήματα έχουν δημιουργηθεί στα σημεία όπου υπάρχει σκιά στο επίπεδο α. Τα σημεία αυτά έχουν ταξινομηθεί σε διάφορες κλάσεις οι οποίες δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα. Ωστόσο, οι περιοχές αυτές είναι μικρές και με υφή ελάχιστα διαφορετική από τις υφές των λίθων που υπάρχουν στην όψη. Επομένως, η προσπάθεια να θεωρηθεί ξεχωριστή κλάση για αυτές δεν απέδωσε.

Το ίδιο συνέβη και με τα σημεία όπου υπάρχει επικάλυψη γύψου. Παρότι είναι άλλο υλικό, η υφή του στη συμβατική εικόνα είναι παραπλήσια με τις γειτονικές. Παράλληλα, είναι τόσο μικρή η κάλυψή του που στις θερμικές εικόνες δεν μπορεί να διακριθεί πιθανή διαφορετική συμπεριφορά. Επομένως, ταξινομήθηκε και αυτό στην κλάση πέτρα τραχειά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και παρατηρώντας την ταξινομημένη εικόνα, γενικά συμπεραίνεται ότι τα όρια στους αρμούς των λίθων, τα κενά τους και οι ανωμαλίες στην επιφάνειά τους είναι εύκολα διακριτά στην εικόνα. Επίσης, ως γενική παρατήρηση, η τοιχοποιία του πίσω επιπέδου έχει φανερά πιο λείες και σε καλύτερη κατάσταση πέτρες στη δομή της από τα υπόλοιπα επίπεδα της όψης.

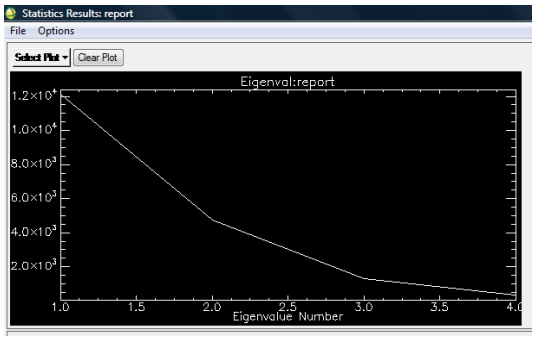
Όσον αφορά στη ζωφόρο και στο οριζόντιο γείσο οι σκιασμένες περιοχές έχουν ταξινομηθεί όπως αναμένονταν, με κάποιες συγχύσεις στις κατηγορίες σκιά 2 και σκιά 3. Για ακόμη μια φορά οι υφές που επιδιώκεται να διακριθούν είναι παραπλήσιες και το έργο της ταξινόμησης ιδιαίτερα δύσκολο.

Ως γενική παρατήρηση, τα υλικά και οι υφές τους στην περιοχή της όψης που ενδιαφέρει είναι παρόμοια και με μικρές διαφορές μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα η ταξινόμηση είναι δύσκολο να διακρίνει αυτές τις διαφορές και να διαχωρίσει κάθε αντικείμενο στην όψη. Με αυτά τα δεδομένα, η ταξινόμηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική , είναι ωστόσο δεκτή με τα δεδομένα που υπάρχουν.

Όσον αφορά στην πόρτα, εκεί τα πράγματα είναι πιο διακριτά. Έχουν ταξινομηθεί σωστά τόσο η πόρτα όσο και το τμήμα αυτής που είναι σκιασμένο. Στην κατηγορία ξύλο σκιά έχουν επίσης ταξινομηθεί σωστά οι διάφορες χαραμάδες των ανοιγμάτων.

4.4.3.3 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Η νέα πολυφασματική εικόνα αναλύθηκε σε τέσσερις νέες συνιστώσες, εφαρμόζοντας ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Οι ιδιοτιμές του πίνακα συνδιασποράς και τα ποσοστά διακύμανσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 107 : διάγραμμα ιδιοτιμών

Πίνακας 19 : Πίνακας διακύμανσης

PC	eigenvalue	variance
1	12109	0,6536
2	4766	0,2573
3	1328	0,0717
4	323	0,0174

Κατά φθίνουσα σειρά τα ποσοστά των διακυμάνσεων είναι 65%, 26%, 7% και 1.7% από την πρώτη έως την τέταρτη συνιστώσα. Έτσι, η πρώτη συνιστώσα εκφράζει τη συνολική διακύμανση σε ποσοστό 65% περίπου. Το ποσοστό αυτό είναι μεγάλο, δεν αντιπροσωπεύει, ωστόσο, το σύνολο της διακύμανσης. Έτσι, προκύπτει ότι και η δεύτερη κύρια συνιστώσα εκφράζει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής διασποράς, το οποίο είναι ίσο με 26% περίπου. Τα υπόλοιπα δύο ποσοστά είναι μικρότερα. Ιδιαίτερα μικρό το ποσοστό της τέταρτης, η οποία, όπως είναι αναμενόμενο, εκφράζει κάτι παραπάνω από το θόρυβο των δεδομένων, χωρίς αυτό να αποκλείει ότι σε αυτήν απεικονίζονται σημαντικά φαινόμενα.

Εικόνα 108 : PC 1

PC 1

Η εικόνα της πρώτης συνιστώσας εκφράζει το 65.36% της συνολικής διασποράς των δεδομένων. Αποδίδει, εν γένει, την πληροφορία των τριών καναλιών της συμβατικής εικόνας. Επομένως, η εικόνα αυτή δεν προσφέρεται για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν και στην θερμική απόκριση των αντικειμένων. Ωστόσο, στην εικόνα αυτή μπορούν να παρατηρηθούν προβληματικές περιοχές οι οποίες είναι ορατές με το ανθρώπινο μάτι.

Μία πρώτη παρατήρηση είναι ότι οι πέτρες που βρίσκονται στο επίπεδο α και τα μπροστινά του, δηλαδή παραστάδες, βάσεις των παραστάδων κλπ, έχουν

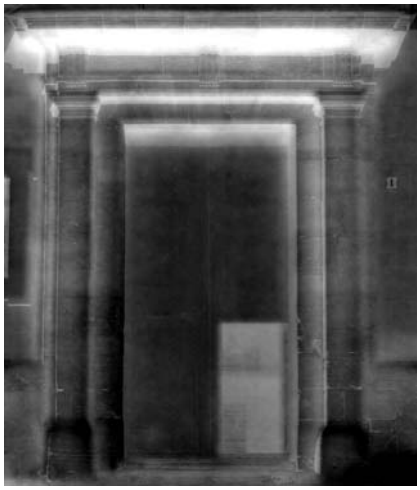
εντελώς διαφορετική υφή από αυτές που βρίσκονται στον τοίχο του πίσω επιπέδου, παρόλο που είναι το ίδιο υλικό. Αυτή είναι μια γενική παρατήρηση στη λιθοδομή του αντικειμένου. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται όσο κινούμαστε προς τα κάτω. Στα χαμηλά τμήματα των κιόνων, στις βάσεις τους και στα χαμηλά τμήματα του επιπέδου α, όπου συναντάει το έδαφος οι πέτρες είναι πολύ πιο φθαρμένες και καταπονημένες.

Πέρα από την επιφάνεια των λίθων, υπάρχουν ακόμη προβλήματα και στη σύνδεσή τους. Σε σημεία σε όλη την έκταση του αντικειμένου υπάρχουν φθορές και απώλειες στο υλικό που τις συνδέει. Χαρακτηριστικά, σε κάποια σημεία, παρατηρείται ότι έχει γίνει προσθήκη νέου υλικού για την ενίσχυση της σύνδεσής τους.

Αντίστοιχου τύπου μικρές επεμβάσεις, όχι στη σύνδεση αλλά στην επιφάνεια, φαίνονται στη ζωφόρο, κυρίως στο δεξί τμήμα.

Τέλος, στην επιφάνεια της πόρτας, επίσης, υπάρχουν ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του ξύλου, οι οποίες αποτυπώνονται με πιο σκούρο χρώμα από αυτό της συνολικής επιφάνειας.

PC 2



Εικόνα 109 : PC 2

Αρχικά, στην εικόνα αυτή παρατηρούνται ορισμένες περιοχές με άσπρους τόνους, με μεγαλύτερη αυτή κάτω από το οριζόντιο γείσο. Οι περιοχές αυτές εμφανίζονται έτσι λόγω σκιάς. Με την προσθήκη της συμβατικής εικόνας όπου σε αυτήν υπήρχαν σκιές, έχουν μεταφερθεί και στην πολυφασματική εικόνα. Με δεδομένο ότι η συμβατική εικόνα συμμετέχει με 3 (από τα 7) κανάλια στην εικόνα, η επίδρασή της είναι μεγάλη. Επομένως, η σκιά και στα τρία αυτά κανάλια έδωσε το αποτέλεσμα που φαίνεται παραπάνω. Έτσι, οι περιοχές αυτές εδώ δεν θα ληφθούν υπόψη για την ανάλυση.

Σχετικά, λοιπόν, με την υπόλοιπη όψη παρατηρείται πώς διαχωρίζονται οι πέτρες μεταξύ τους και καταγράφονται μικροδιαφορές στην απόδοση καθεμίας μεταξύ τους. Ανάμεσα στις πέτρες υπάρχουν ορισμένες οι οποίες υπάρχουν έντονες ανομοιομορφίες.

Μία πρώτη ανωμαλία που αναδεικνύεται στην δεύτερη εικόνα εντοπίζεται στο επίπεδο α, δίπλα στην αριστερή πλευρά της πόρτας. Εκεί, από την ακμή της αυτού του τοίχου και προς τα αριστερά του καταγράφεται μια ζώνη πιο σκούρα από την υπόλοιπη δομή. Παρουσιάζεται σαν ένα φαινόμενο το οποίο ξεκινά από την ακμή και επεκτείνεται προς την αριστερή διεύθυνση.

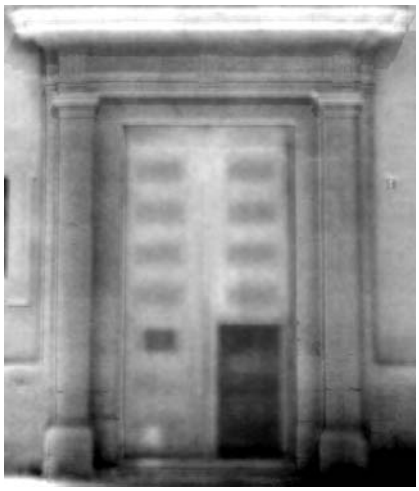
Αντίστοιχα σκούρες περιοχές εμφανίζονται και στις κορυφές των βάσεων των παραστάδων. Το φαινόμενο εμφανίζεται και στις δύο βάσεις, ωστόσο είναι πιο έντονο στη δεξιά.

Όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενη εικόνα, η προβληματική περιοχή στη βάση της δεξιάς παραστάδας περιλαμβάνει και τμήμα χαμηλότερα, κοντά στην εξωτερική του πλευρά.

Τέλος, ιδιαίτερα εκτεταμένη και έντονη είναι η παθολογία στη δεξιά γωνία της εικόνας, η οποία εδώ περιλαμβάνει και τη βάση της δεξιάς παραστάδας, στο κάτω μέρος της. Η περιοχή αυτή αποδίδεται με μαύρο χρώμα στην εικόνα.

PC 3

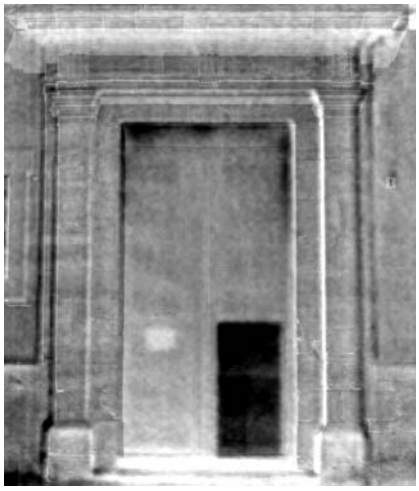
Η τρίτη εικόνα είναι μία εικόνα με μικρό ποσοστό διακύμανσης. Ωστόσο, θα εκμεταλλευτεί γιατί παρουσιάζει και ορίζει σαφώς τη μορφή και τα όρια κάποιων φαινομένων.



Εικόνα 110 : PC 3

Το πρώτο και κυριότερο από αυτά είναι ο μαύρος σχηματισμός – κηλίδα που έχει παρατηρηθεί και προηγουμένως. Είναι ιδιαίτερα έντονος και εδώ με πιο σαφή όρια. Τα όρια αυτά ξεκινούν από την κάτω δεξιά γωνία της εικόνας, στον τοίχο του επιπέδου α δηλαδή και φτάνουν μέχρι τον τοίχο του επιπέδου α πλάι στο δεξί φύλλο της πόρτας. Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει και το χαμηλότερο μέρος της βάσης του δεξιού κίονα. Χαρακτηριστικό είναι ότι καλύπτει όλη τη γραμμή επαφής της όψης με το έδαφος.

Αντίστοιχη σκιά εμφανίζεται εδώ και πλάι στη βάση της αριστερής παραστάδας. Είναι ένας μαύρος σχηματισμός με γωνιακό σχήμα, στα δεξιά της βάσης. Μια ακόμη μικρότερη κηλίδα έχουμε στην αριστερή πλευρά της ίδιας βάσης , κοντά στο έδαφος.



Εικόνα 111 : PC 4

Σε αυτή την εικόνα εμφανίζονται επίσης τα ορθογώνια σχήματα που έχουν παρατηρηθεί στην πόρτα καθώς και το μικρότερο που διακρίνεται από τα υπόλοιπα.

Τέλος, εμφανίζεται και εδώ η άσπρη σκιά χαμηλά στο αριστερό φύλλο της πόρτας.

PC 4

Η τέταρτη εικόνα, όπως αναλύθηκε και από τα στοιχεία του πίνακα, εκφράζει πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων. Σε αυτήν, ωστόσο, εμφανίζεται μια ανωμαλία που δεν είναι ορατή στις υπόλοιπες εικόνες των κυρίων συνιστωσών.

Η ανωμαλία αυτή βρίσκεται στην πάνω πλευρά της πόρτας καθώς και στις δύο της κατακόρυφες πλευρές. Είναι ο μαύρος, μη συνεχόμενος σχηματισμός , ο οποίος είναι πιο έντονος στην οριζόντια πλευρά απ' ότι στις κατακόρυφες. Ο σχηματισμός αυτός, όσον αφορά στις κατακόρυφες πλευρές έχει μία έκταση μικρότερη από το μισό ύψος της πόρτας. Επίσης, αφορά κυρίως στις ακμές και όχι στο κύριο σώμα της ξύλινης επιφάνειας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή όπου εμφανίζεται αυτή η παθολογία είναι περιοχή σκιασμένη στην συμβατική εικόνα. Σαν συνέπεια, στις προηγούμενες συνιστώσες η σκιά επηρεάζει το αποτέλεσμα και η περιοχή αυτή δεν είναι δυνατό να μελετηθεί, εφ' όσον καλύπτεται από μια θολή εμφάνιση. Επομένως, ενώ η εικόνα αυτή θεωρήθηκε μόνο ότι εκπροσωπεί το θόρυβο της εικόνας, αποδείχθηκε ότι δεν είναι έτσι. Σε αυτή την περιοχή, όπου η σκιά πλέον έχει αποδοθεί πλήρως στις προηγούμενες συνιστώσες, επιτρέπει στο σχηματισμό αυτό να εμφανιστεί και να καταγραφεί.

Ακόμη, δίνεται ένα επιπλέον στοιχείο για το φαινόμενο που καταγράφηκε στην προηγούμενη εικόνα στην αριστερή γωνία. Στην προηγούμενη εικόνα είχε εντοπιστεί μια μικρή μαύρη κουκκίδα αριστερά της βάσης της αριστερής παραστάδας. Εδώ το ίδιο φαινόμενο παρουσιάζεται πιο εκτεταμένο. Είναι μια μεγαλύτερη ζώνη παράλληλη στο έδαφος, η οποία ξεκινά από τη γωνία της βάσης της παραστάδας και, όπως φαίνεται, ξεπερνά τα όρια της εικόνας.

4.4.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας

Πίνακας 20 : Θερμοκρασίες ξύλου

ΞΥΛΟ

μέσοι όροι

εικόνα	**μέση θερμοκρασία**	**Π 1**	**Π 2**	**Π 3**	**ορθογώνια**	**μικρό ορθογώνιο**
511	15,3	17,2	16,4	16,5	15,3	15,2
521	12,3	16,1	14,9	15,5	12,8	12,6
539	28,2	28,7	27,2	26,6	27,1	24,0
551	20,4	21,6	21,0	21,0	19,8	19,7
ΔT max	16,0	12,6	12,3	11,1	14,2	11,4

Μέση θερμοκρασία : ο μέσος όρος των θερμοκρασιών όλης της επιφάνειας της πόρτας, όπου δεν έχει παρατηρηθεί παθολογία

Π 1 : το ανώτερο τμήμα της πόρτας, η οριζόντια γραμμή παθολογίας που έχει παρατηρηθεί στο ψηλότερο τμήμα (μετρήσεις σε τρία σημεία)

Π 2 : η αντίστοιχη παθολογία στην αριστερή πλευρά (μετρήσεις σε δύο σημεία)

Π 3 : η αντίστοιχη παθολογία στη δεξιά πλευρά (ένα σημείο)

Ορθογώνια : οι ορθογώνιοι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην πόρτα

Μικρό ορθογώνιο : το μικρό ορθογώνιο σχήμα που καταγράφηκε στην πόρτα

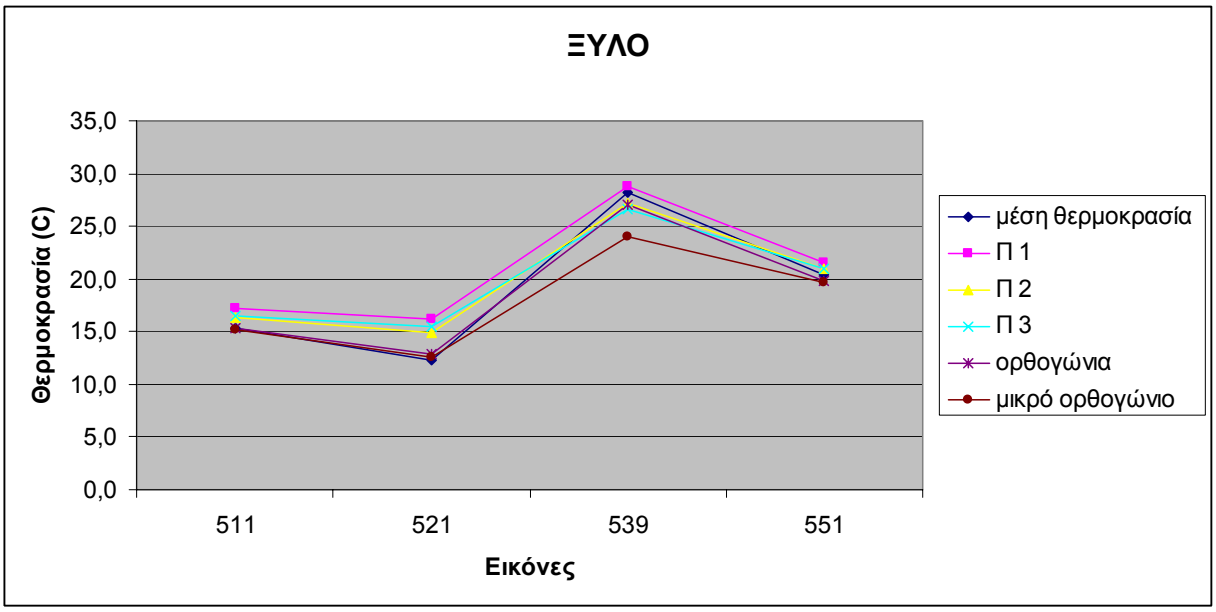
Σημείωση : για ορισμένες κατηγορίες οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν σε περισσότερα από ένα σημεία, ανάλογα με το μέγεθος της επιφάνειας του φαινομένου, και στη συνέχεια υπολογίσθηκαν οι μέσοι όροι. Για τα στοιχεία αυτά αριθμός των σημείων που μετρήθηκαν αναγράφεται σε παρένθεση.

Η τελευταία γραμμή του πίνακα περιέχει τις μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας για κάθε αντικείμενο.

Από τις μετρήσεις των θερμοκρασιών προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά παρουσιάζει η ξύλινη επιφάνεια, στις περιοχές όπου δεν παρατηρήθηκε παθολογία, η γενική επιφάνεια και είναι ίση με 16 °C. Τη μικρότερη διαφορά έχει η περιοχή Π 3 και είναι 11.1°C. Κοντινές μέγιστες θερμοκρασιακές διαφορές έχουν και οι περιοχές Π 1 και Π 2, 12.6 και 12.3°C, αντίστοιχα. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι περιοχές Π1, Π2 και Π3 περιγράφουν ένα κοινό φαινόμενο, όπως φαίνεται και στην εικόνα.

Μεγάλες, συγκριτικά, μεταβολές θερμοκρασίας παρουσιάζουν και τα ορθογώνια. Η μέγιστη είναι 14.2°C η οποία είναι η αμέσως μικρότερη μετά την μέγιστη μεταβολή της γενικής επιφάνειας. Αντίθετα, από τις μικρότερες διαφορές έχουμε στο μικρό ορθογώνιο με μέγιστη διαφορά τους 11.4°C.

Το γεγονός ότι όλες οι περιοχές που έχουν επισημανθεί ως πιθανές για παθολογία παρουσιάζουν μικρότερες μεταβολές θερμοκρασίας από την γενική επιφάνεια, μπορεί να ενισχύσει την υπόθεση για ύπαρξη υγρασίας στις περιοχές αυτές.



Διάγραμμα 10 : θερμοκρασίες ξύλου

Ακόλουθα με τον πίνακα, σαν πρώτη παρατήρηση, βλέπουμε ότι οι περιοχές Π 1, Π 2 και Π 3 ακολουθούν κοινή πορεία, όσον αφορά στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Εν γένει μεγαλύτερες θερμοκρασίες έχουμε στην περιοχή του Π 1, όχι όμως με μεγάλη διαφορά από τις άλλες δύο.

Τα ορθογώνια έχουν λίγο μικρότερη μεταβολή θερμοκρασίας από τη γενική επιφάνεια, η οποία κυρίως εντοπίζεται στην εικόνα 539, δηλαδή νωρίς το απόγευμα, αφού έχουν απορροφήσει τα αντικείμενα τη θερμότητα σχεδόν όλης της ημέρας. Το μικρό ορθογώνιο έχει σαφώς μικρότερες μεταβολές θερμοκρασίας σε σχέση με την γενική επιφάνεια.

ΜΑΥΡΗ ΚΗΛΙΔΑ / ΔΕΞΙΑ

Πίνακας 21 : Θερμοκρασίες κηλίδας δεξιά

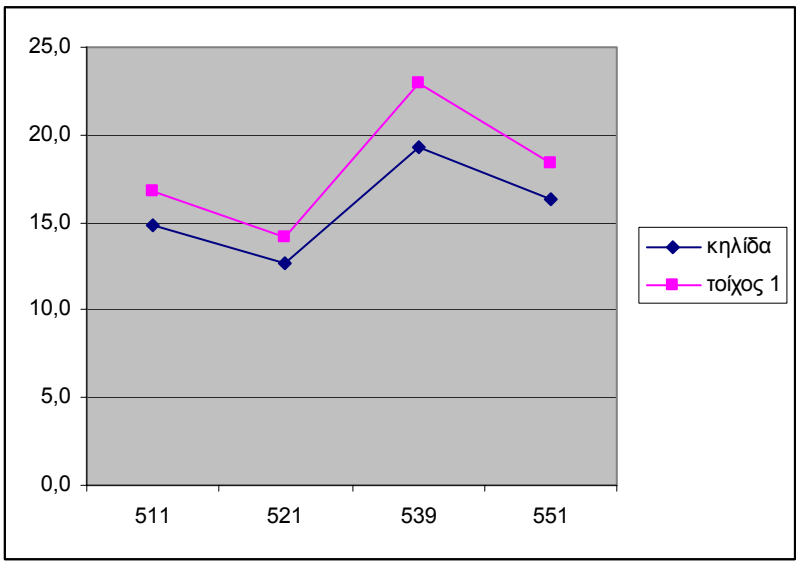
ΜΑΥΡΗ ΚΗΛΙΔΑ

δεξιά

	δεξιά της παραστάδας		**παραστάδα**		**αριστερά της παραστάδας**	
εικόνα	**κηλίδα**	**τοίχος 1**	**βάση κηλίδα**	**βάση**	**κηλίδα**	**τοίχος 2**
511	14,8	16,8	15,0	17,0	18,2	17,6
521	12,7	14,2	12,9	13,6	15,0	14,1
539	19,3	23,0	18,6	22,6	22,6	23,5
551	16,3	18,4	16,1	18,9	18,6	19,7

Ο πίνακας αυτός αναφέρεται στην μεγάλη μαύρη κηλίδα στην κάτω δεξιά γωνία της εικόνας αλλά και στην επέκταση αυτού του φαινομένου προς την βάση της παραστάδας. Έτσι, οι δύο πρώτες στήλες του πίνακα αναφέρονται στην βασική παθολογία. Οι δύο επόμενες στη βάση της παραστάδας και οι δύο τελευταίες αριστερά της. Σε όλες τις περιπτώσεις, η θερμοκρασία της πρώτης στήλης είναι της προβληματικής περιοχής και αυτή της δεύτερης στήλης της γειτονικής υγιούς περιοχής, πάντα του ίδιου υλικού. Και εδώ μετρήθηκαν σε πολλαπλά σημεία οι θερμοκρασίες και λήφθηκαν οι μέσοι όροι.

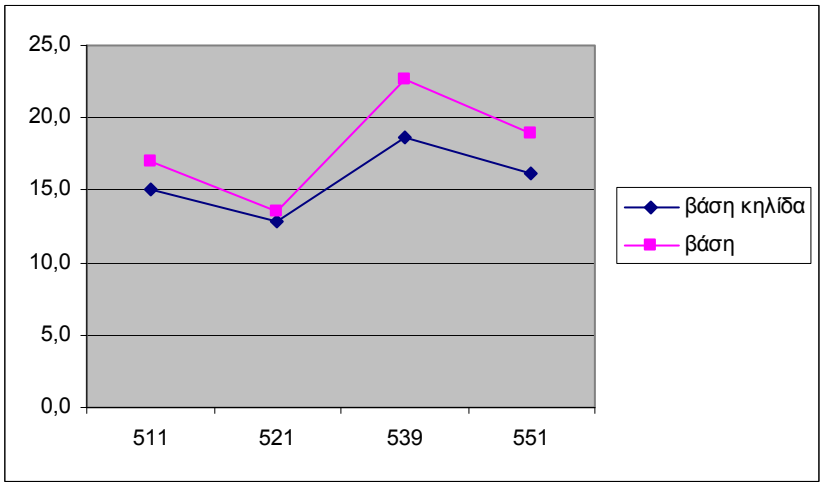
δεξιά της παραστάδας



Διάγραμμα 11 : θερμοκρασίες δεξιά της παραστάδας

Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία των δύο πρώτων στηλών, δηλαδή η βασική ανωμαλία , στα δεξιά της παραστάδας. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει την παθολογία και η μοβ τον υγιή τοίχο γύρω από αυτή. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η περιοχή της κηλίδας έχει σταθερά μικρότερες θερμοκρασίες από αυτές του τοίχου στον οποίο βρίσκεται. Οι διαφορές αυτές είναι της τάξης των 2°C . Επομένως, ενώ έχουν ίδια πορεία μεταβολών, η περιοχή της κηλίδας είναι σταθερά ψυχρότερη.

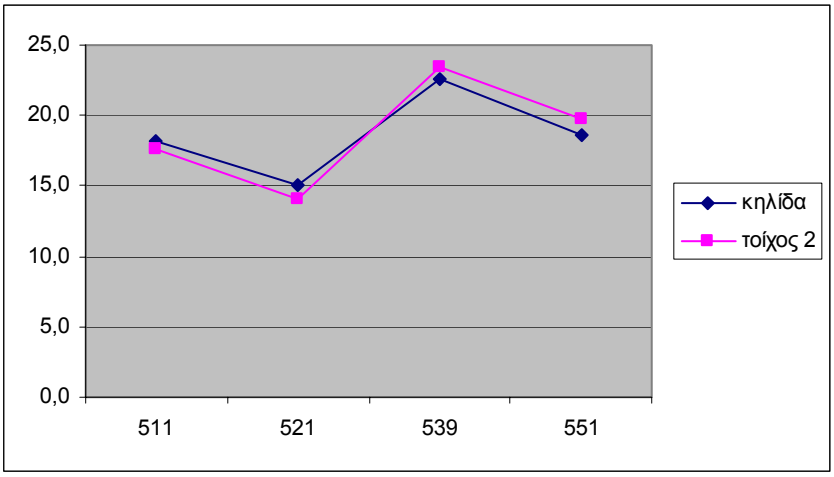
παραστάδα



Διάγραμμα 12 : θερμοκρασίες παραστάδας

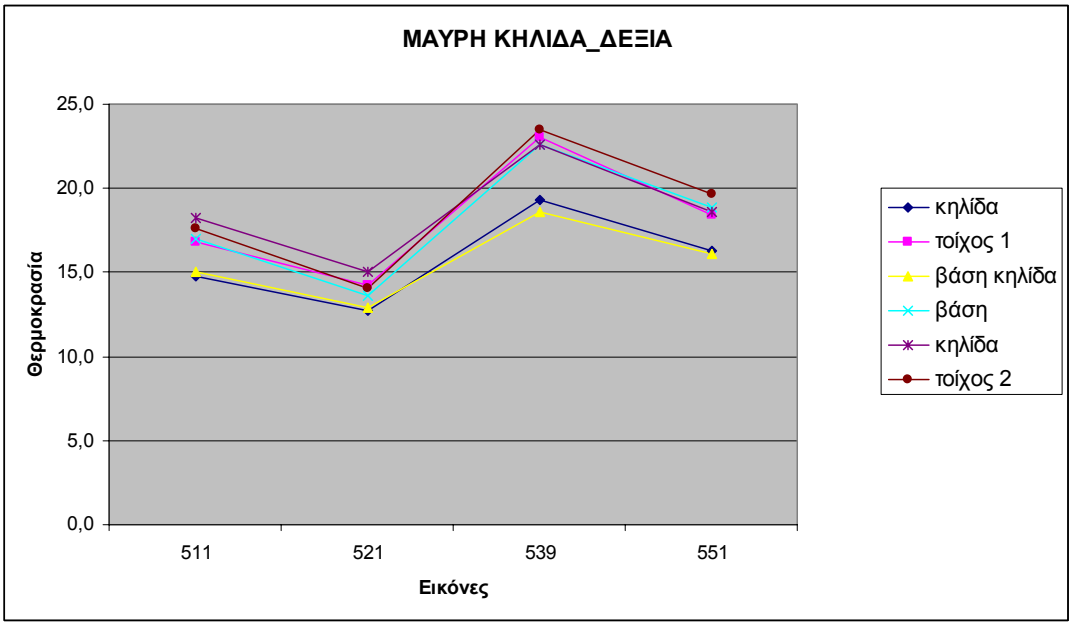
Το διπλανό διάγραμμα αναπαριστά τις τιμές των δύο επόμενων στηλών του παρακάτω πίνακα, δηλαδή της τρίτης και της τέταρτης. Η περιοχή στην οποία αντιστοιχεί είναι η βάση της δεξιάς παραστάδας. Το ίδιο φαινόμενο με πριν παρατηρείται και εδώ, δηλαδή στα όρια του φαινομένου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες από τις γειτονικές. Μια εξαίρεση υπάρχει στην εικόνα 521 όπου οι θερμοκρασίες πλησιάζουν, ωστόσο το γενικό φαινόμενο έχει διαφορές.

αριστερά της παραστάδας



Διάγραμμα 13 : θερμοκρασίες αριστερά της παραστάδας

Οι δύο τελευταίες στήλες του πίνακα παρουσιάζονται εδώ. Η αναπαριστώμενη περιοχή είναι στα αριστερά της βάσης της παραστάδας. Εδώ φαίνεται ότι οι δύο περιοχές δεν είναι σαφώς διαχωρίσιμες, «μπλέκονται» η μία στην άλλη. Έτσι, το φαινόμενο εδώ μπορεί να υπάρχει αλλά να είναι εξασθενημένο σε σχέση με τις προηγούμενες δύο περιοχές.



Διάγραμμα 14 : θερμοκρασίες κηλίδας δεξιά

Σε αυτό το διάγραμμα περιέχονται και οι έξι περιοχές του πίνακα. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι οι δύο προβληματικές περιοχές δεξιά της βάσης αλλά και πάνω σε αυτή (μπλε και κίτρινη γραμμή) αντιπροσωπεύουν ένα κοινό φαινόμενο. Αντίθετα, η θεωρημένη ως προβληματική περιοχή στα αριστερά της παραστάδας, έχει διαφορετική πορεία. Η πορεία της είναι παρόμοια με αυτές των τριών «υγιών» περιοχών, οι οποίες κινούνται επίσης αντίστοιχα.

Πίνακας 22 : Θερμοκρασίες μαύρης κηλίδας αριστερά

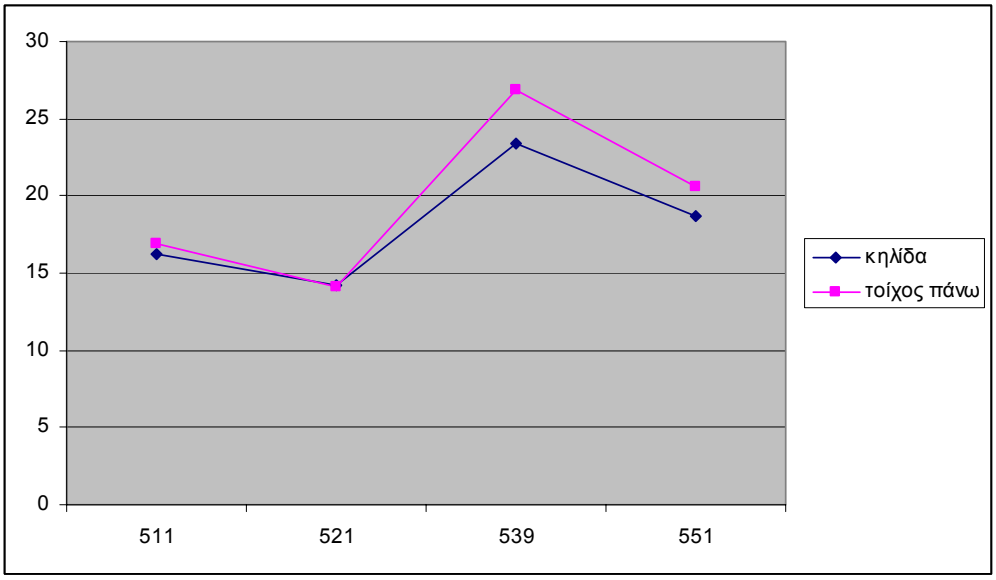
ΜΑΥΡΗ ΚΗΛΙΔΑ

αριστερά

	αριστερά της παραστάδας		**εσωτερική γωνία**	
εικόνα	**κηλίδα**	**τοίχος πάνω**	**κηλίδα γωνία**	**τοίχος εσωτερικός**
511	16,2	16,9	17,2	16,7
521	14,2	14,1	14,9	14,1
539	23,4	26,9	21,3	23,8
551	18,7	20,6	18,5	19,5

Ο πίνακας αυτός αναφέρεται στις προβληματικές περιοχές που εντοπίστηκαν γύρω από τη βάση της αριστερής παραστάδας. Θεωρήθηκαν για αυτή δύο τμήματα. Το ένα αριστερά της βάσης και το άλλο δεξιά της, το οποίο, μάλιστα, έχει σχήμα γωνίας. Έτσι, οι δύο πρώτες στήλες αφορούν στο πρώτο και οι δύο τελευταίες στο δεύτερο. Αντίστοιχα με πριν , σε κάθε ένα από τα δύο ζευγάρια στηλών, η πρώτη περιέχει θερμοκρασίες της προβληματικής περιοχής και η δεύτερη της «υγιούς».

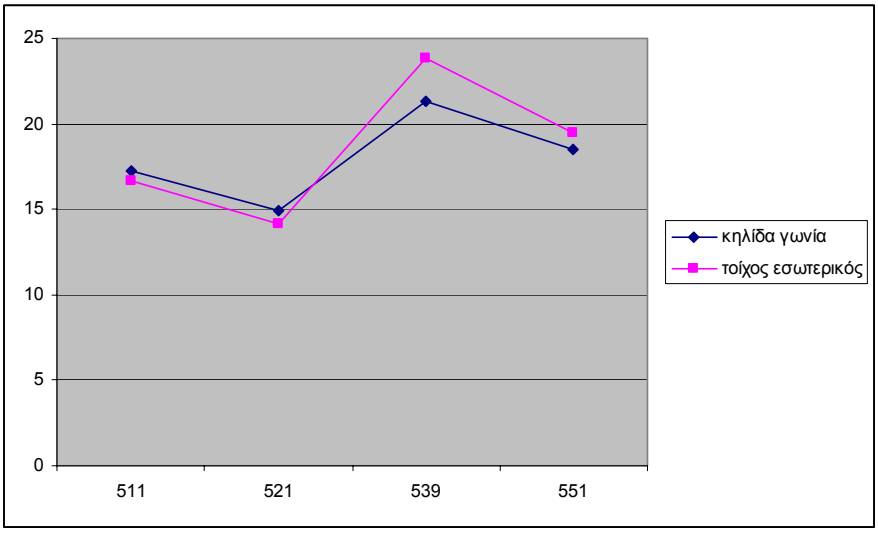
αριστερά της παραστάδας



Διάγραμμα 15 : θερμοκρασίες αριστερά της παραστάδας

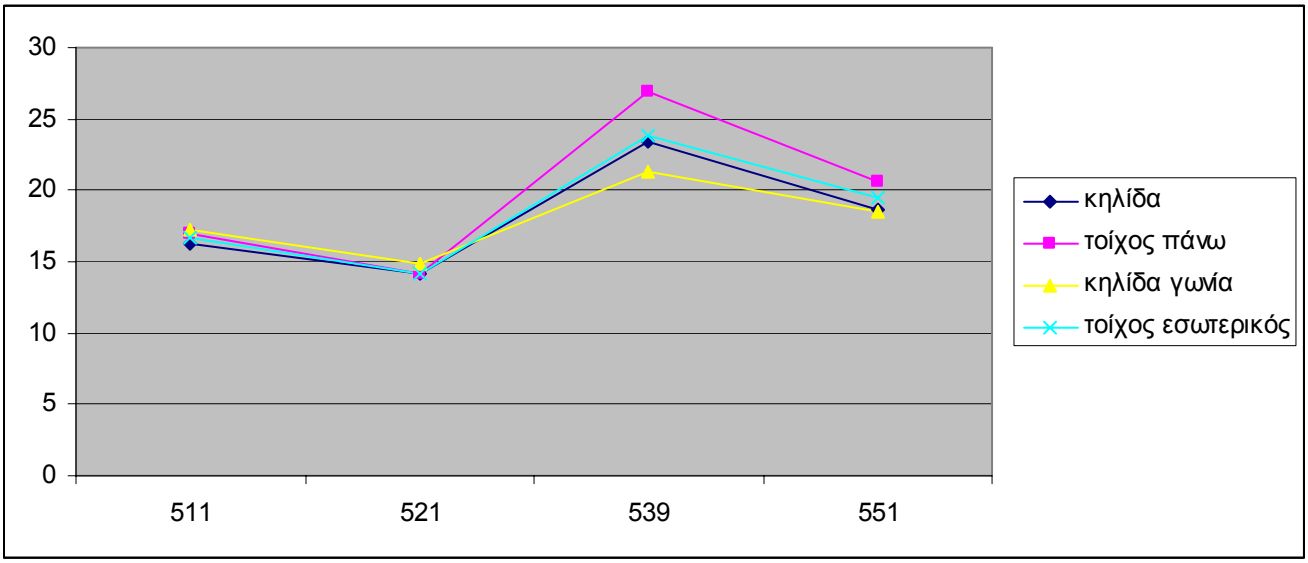
Διάγραμμα για το πρώτο τμήμα που θεωρήθηκε. Στις δύο πρώτες εικόνες 511 και 521, δηλαδή βράδυ και νωρίς το πρωί , οι δύο περιοχές έχουν κοντινές θερμοκρασίες. Αργότερα αρχίζουν να εμφανίζουν διαφορές, στις εικόνες 539 και 551. Οι διαφορές αυτές, λοιπόν, παρουσιάζονται τις μεσημεριανές και τις πρώτες βραδινές ώρες. Οι διαφορές αυτές είναι μεγάλες, αφού είναι της τάξης των 2-3°C.

εσωτερική γωνία



Διάγραμμα 16 : θερμοκρασίες στην εσωτερική γωνία

Το επόμενο διάγραμμα προέρχεται από τις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα. Η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με του προηγούμενου τμήματος. Οι δύο περιοχές έχουν κοντινές θερμοκρασίες στις δύο πρώτες λήψεις και διαφοροποιούνται στις δύο επόμενες. Εδώ, όπως και πριν, η προβληματική περιοχή παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες από την γειτονική της, όπου έχουν διαφορά.



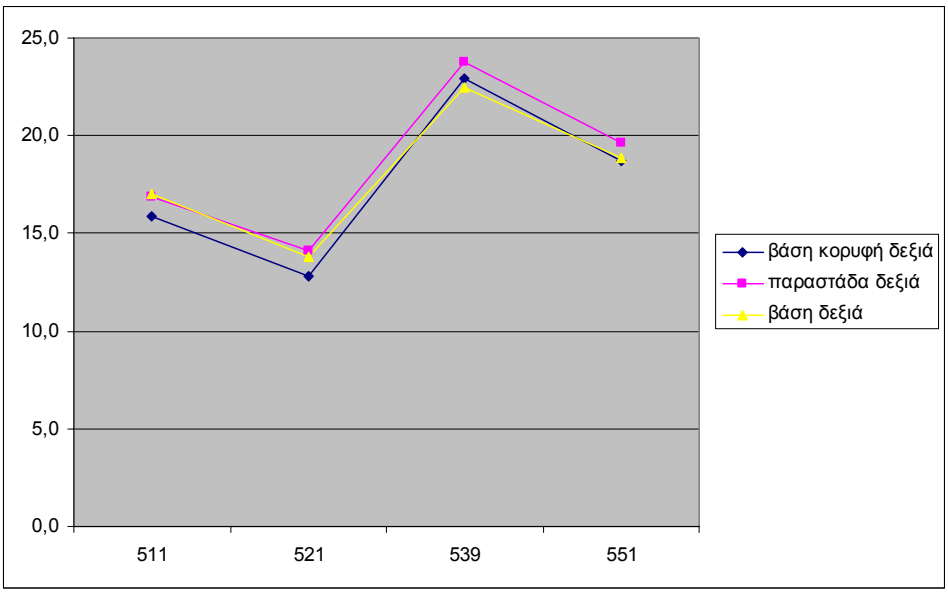
Διάγραμμα 17 : συγκεντρωτικό διάγραμμα

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα επιβεβαιώνεται ότι και οι τέσσερις υποπεριοχές στις δύο πρώτες ώρες λήψεις έχουν παραπλήσιες θερμοκρασίες. Έπειτα χαμηλότερες θερμοκρασίες έχουν οι δύο περιοχές που θεωρήθηκαν προβληματικές, χωρίς ωστόσο οι θερμοκρασίες τους να είναι ίδιες ή κοντινές.

ΠΑΡΑΣΤΑΔΕΣ

Πίνακας 23: θερμοκρασίες παραστάδων

εικόνα	**βάση κορυφή δεξιά**	**Παραστάδα δεξιά**	**βάση δεξιά**
511	15,9	16,9	17,0
521	12,8	14,1	13,8
539	22,9	23,8	22,5
551	18,7	19,6	18,9



Διάγραμμα 18 : Θερμοκρασίες δεξιάς παραστάδας

Δεξιά παραστάδα

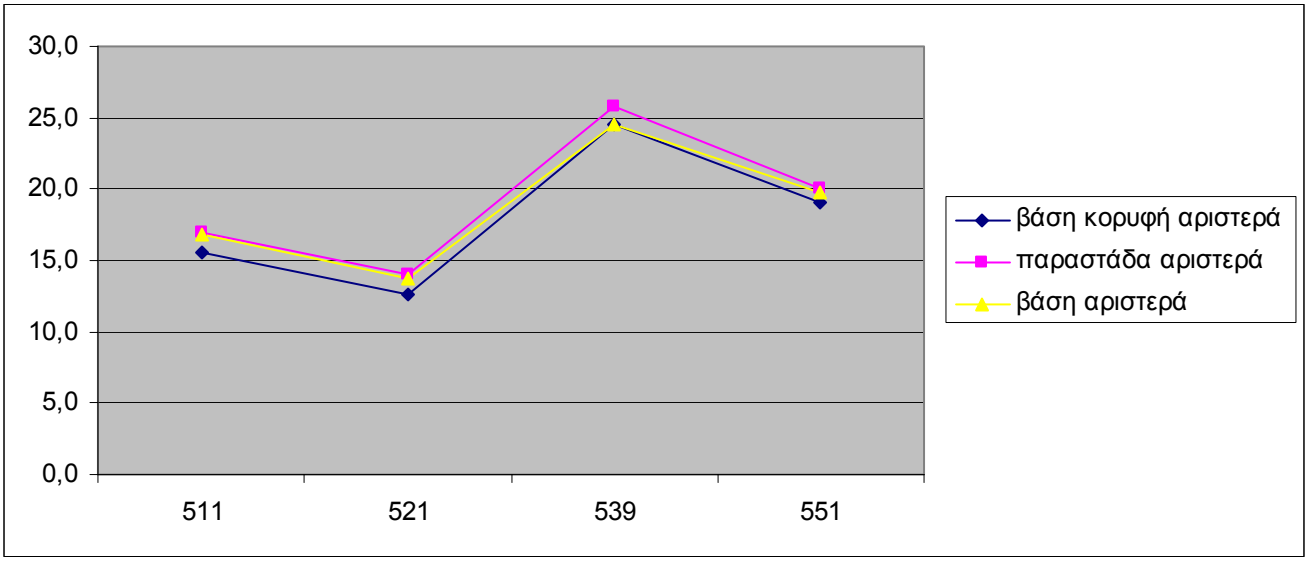
Για την μελέτη της πιθανής παθολογίας της βάσης των παραστάδων μετρήθηκε η θερμοκρασία στη γραμμή που εντοπίζεται η παθολογία, δηλαδή στο άνω τμήμα της βάσης. Επιπλέον, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της βάσης, εξαιρώντας τα σημεία της παθολογίας, και η θερμοκρασία στου κίονα, κοντά στη γραμμή που έρχεται σε επαφή με τη βάση. Έτσι η πρώτη στήλη του πίνακα αφορά στην προβληματική περιοχή και οι άλλες δύο είναι γειτονικές περιοχές του ίδιου υλικού οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για σύγκριση.

Έτσι, από τον πίνακα και το διάγραμμα προκύπτει ότι η εν λόγω ζώνη διαφοροποιείται από τις γειτονικές περιοχές και κύρια, από την υπόλοιπη βάση στην οποία ανήκει μόνο στις δύο πρώτες λήψεις, δηλαδή από ώρες αργά το βράδυ έως νωρίς το πρωί. Ωστόσο, ακόμη και οι διαφορές που παρουσιάζονται στις δύο πρώτες εικόνες δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Επιπλέον, στις δύο επόμενες εικόνες, η θερμοκρασία αυτής της ζώνης βρίσκεται ανάμεσα στη θερμοκρασία των άλλων δύο κατηγοριών που θεωρήθηκαν.

Αριστερή παραστάδα

Πίνακας 24 : θερμοκρασίες αριστερής παραστάδας

εικόνα	βάση κορυφή αριστερά	παραστάδα αριστερά	βάση αριστερά
511	15,6	16,9	16,8
521	12,6	14,0	13,7
539	24,6	25,8	24,6
551	19,0	20,1	19,8



Διάγραμμα 19 : θερμοκρασίες αριστερής παραστάδας

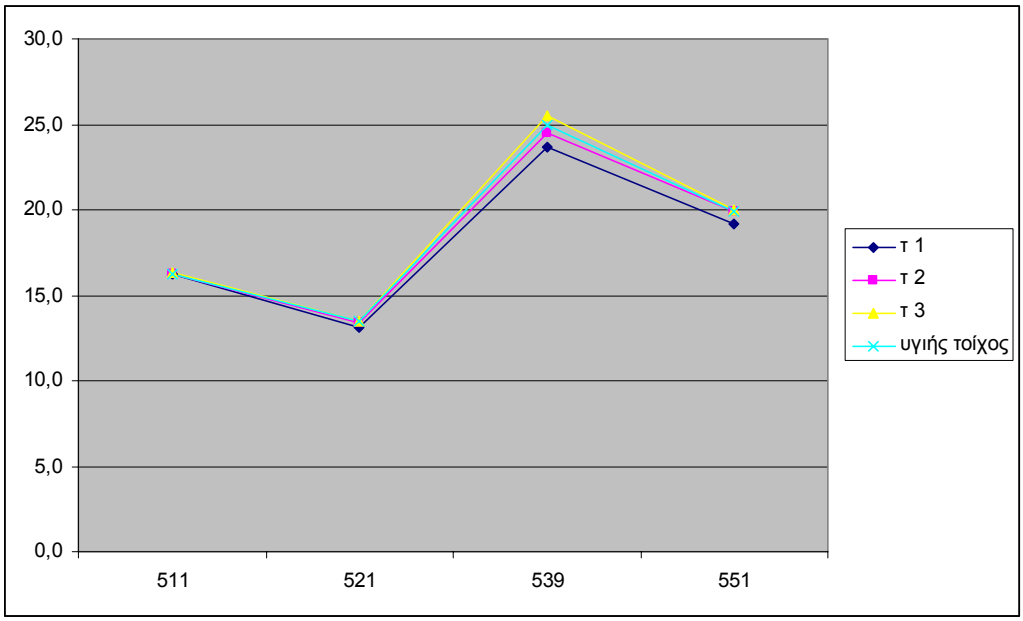
Αντίστοιχες μετρήσεις έγιναν και για την βάση της αριστερής παραστάδας, αφού κι εκεί είχε παρατηρηθεί το ίδιο φαινόμενο με τη δεξιά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο διπλανό διάγραμμα. Η συμπεριφορά της υπό μελέτη ζώνης είναι κι εδώ αντίστοιχη με πριν. Τα στοιχεία δεν είναι ικανά να ορίσουν τις δύο αυτές ζώνες ως σίγουρα προβληματικές.

ΕΠΙΠΕΔΟ

Α

Πίνακας 25: θερμοκρασίες επιπέδου Α

εικόνα	**τ 1**	**τ 2**	**τ 3**	**υγιής τοίχος**
511	16,2	16,2	16,3	16,3
521	13,1	13,4	13,5	13,5
539	23,7	24,5	25,5	25,0
551	19,2	19,9	20,0	20,0



Διάγραμμα 20 : θερμοκρασίες επιπέδου Α

Στην δεύτερη εικόνα των κυρίων συνιστωσών της πολυφασματικής εικόνας των επτά καναλιών, σκιαγραφήθηκε μια περιοχή στο επίπεδο α, η οποία διαφοροποιούνταν από τις υπόλοιπες. Αυτή η περιοχή βρίσκεται από την εσωτερική πλευρά του αριστερού κίονα. Έτσι, σε εκείνη την περιοχή μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες σε τρία σημεία κατά μήκος της αλλά και η θερμοκρασία του υπόλοιπου τοίχου του επιπέδου α στην γειτονική περιοχή. Για την τελευταία λήφθηκε ο μέσος όρος των θερμοκρασιών. Επομένως, οι στήλες τ1, τ2 και τ3 περιέχουν θερμοκρασίες αυτής της ζώνης και η τελευταία τη μέση θερμοκρασία του υπόλοιπου τοίχου που γειτνιάζει με αυτή τη ζώνη.

Στο διάγραμμα φαίνεται ότι οι περιοχές οι οποίες θεωρήθηκαν ούτε είναι διαχωρίσιμες, ούτε, όμως, σε συνδυασμό συνθέτουν μια ομάδα η οποία έχει διαφορετική συμπεριφορά από τη γενική συμπεριφορά του επιπέδου α.

4.4.5 Συμπεράσματα

Με μια πρώτη παρατήρηση των πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή των θερμικών εικόνων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η όψη δεν έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία. Τα χαμηλότερα τμήματά της είναι εν γένει πιο ψυχρά, σε σύγκριση με τα ανώτερα, τα οποία είναι θερμότερα. Ένα στοιχείο που διαφοροποιείται ακόμη πιο έντονα θερμοκρασιακά είναι το ανώτερο τμήμα της ζωφόρου, το οποίο πάντα εμφανίζεται σημαντικά πιο θερμό από τα υπόλοιπα αντικείμενα που βρίσκονται γύρω του.

Αρχικά, θα εξεταστεί το γενικό τμήμα της όψης και οι προβληματικές περιοχές που εντοπίστηκαν σε αυτό. Η σημαντικότερη παθολογία της όψης εντοπίστηκε στα δεξιά της δεξιάς παραστάδας, στον τοίχο του επιπέδου α. Η παθολογία αυτή είναι εκτεταμένη και τα όριά της ξεπερνούν τα όρια της περιοχής μελέτης. Αυτό προκύπτει από τις πρωτογενείς εικόνες, πριν επεξεργασθούν, όπου το φαινόμενο περιλαμβάνεται σε όλη την έκτασή του. Η περιοχή αυτής της παθολογίας έχει ακανόνιστο σχήμα, ωστόσο εφάπτεται παντού με το έδαφος. Επιπλέον, έχει μόνιμα χαμηλότερη θερμοκρασία από την υπόλοιπη τοιχοποιία, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις. Επομένως, πιθανολογείται η απώλεια θερμότητας σε εκείνη την περιοχή, περιεχόμενη υγρασία ή ακόμη διαρροή αέρα, φαινόμενα που παρατηρούνται στα κελύφη των κτιρίων και ιδιαίτερα όπου υπάρχει ένωση δομικών στοιχείων[3].

Στη συνέχεια, στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν μικρότερα τμήματα τα οποία έχουν την ίδια απεικόνιση με αυτήν της παθολογίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα τμήματα αυτά βρίσκονται τόσο γύρω από τη βάση της δεξιά παραστάδας, όσο και από του αριστερού.

Όσον αφορά στη βάση της δεξιάς παραστάδας, λοιπόν, το φαινόμενο παρατηρείται στη βάση της, εκεί δηλαδή που κι αυτή «ακουμπά» στο έδαφος και αριστερά της βάσης. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας αλλά και η φωτοερμηνεία δείχνουν ότι τα τμήματα αυτά έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή της μαύρης κηλίδας που περιγράφηκε. Ωστόσο, το φαινόμενο παρατηρείται πιο εξασθενημένο στα αριστερά της βάσης από ότι στην ίδια τη βάση και ακόμη περισσότερο από την κύρια επιφάνεια της παθολογίας.

Από τα παραπάνω, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα τρία τμήματα που περιγράφηκαν, ορίζουν ένα συνεχές και ομοιόμορφο φαινόμενο, του οποίου η κύρια επιφάνεια βρίσκεται στον τοίχο του επιπέδου α και εξασθενεί προς τα αριστερά. Επιπλέον, έχει ως χαρακτηριστικό την επαφή του με το έδαφος.

---

[3] http://www.thermograph.gr/index.php?/thermograph/

Σχετικά με το αριστερό τμήμα, αντίστοιχη παθολογία παρατηρήθηκε δεξιά της βάσης της παραστάδας αλλά και έξω από την αριστερή και κάτω γωνία της. Το πρώτο τμήμα, εμφανίζει μια ανωμαλία η οποία έχει σχήμα γωνίας και βρίσκεται στο επίπεδο α, στην εσωτερική πλευρά της παραστάδας. Το δεύτερο είναι μικρότερο σε έκταση και βρίσκεται επίσης στο επίπεδο α, από την εξωτερική πλευρά της. Στις εικόνες φαίνεται ότι το φαινόμενο εδώ έχει μικρότερη έκταση από ότι έχει στην δεξιά πλευρά της όψης. Από τις μετρήσεις, προκύπτει ότι το φαινόμενο έχει και μικρότερη ένταση. Δηλαδή, ενώ οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες από τα γενικά τμήματα, οι διαφορές αυτές είναι μικρές, ενώ υπάρχουν και ώρες της ημέρας, οπότε οι διαφορές είναι ασήμαντες. Πρέπει να σημειωθεί ότι και εδώ οι επιφάνειες αυτές έρχονται σε επαφή με το έδαφος.

Σε ορισμένες εικόνες, τα ανώτερα τμήματα των βάσεων αμφότερων των παραστάδων, απεικονίζονταν διαφορετικά από την υπόλοιπη βάση. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο σε εκείνα τα σημεία, όσο και στην υπόλοιπη βάση και στις ίδιες τις παραστάδες. Προέκυψαν κάποιες διαφορές στις θερμοκρασιακές μεταβολές, οι οποίες, ωστόσο, δεν είναι αρκετά ισχυρές για να υποστηρίξουν την υπόθεση μιας παθολογίας. Για την απεικόνιση αυτή, ενδέχεται να ευθύνεται η γεωμετρία της περιοχής και το έντονο ανάγλυφό της.

Επόμενο τμήμα μελέτης είναι η ξύλινη επιφάνεια, δηλαδή η πόρτα. Μία είναι η βασική ανωμαλία που παρατηρήθηκε εκεί, η οποία εκδηλώνεται σε πάνω από μια πλευρές. Η ανωμαλία περιγράφεται σε τρεις γραμμές με μικρό πάχος. Η πρώτη βρίσκεται στην άνω οριζόντια ακμή της πόρτας και οι άλλες δύο στις κατακόρυφες ακμές. Η πρώτη εκτείνεται σχεδόν σε όλο το μήκος της ακμής ενώ οι άλλες δύο, σε μήκος μικρότερο από το μισό ύψος της πόρτας. Οι ζώνες αυτές παρουσιάζουν μικρότερες μεταβολές στη θερμοκρασία από τη συνολική επιφάνεια της πόρτας, με τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Επομένως, αυτό μπορεί να είναι ενδεικτικό ύπαρξης υγρασίας. Από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και την μελέτη της μεταβολής τους προκύπτει ότι το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην οριζόντια γραμμή από ότι στις δύο κατακόρυφες.

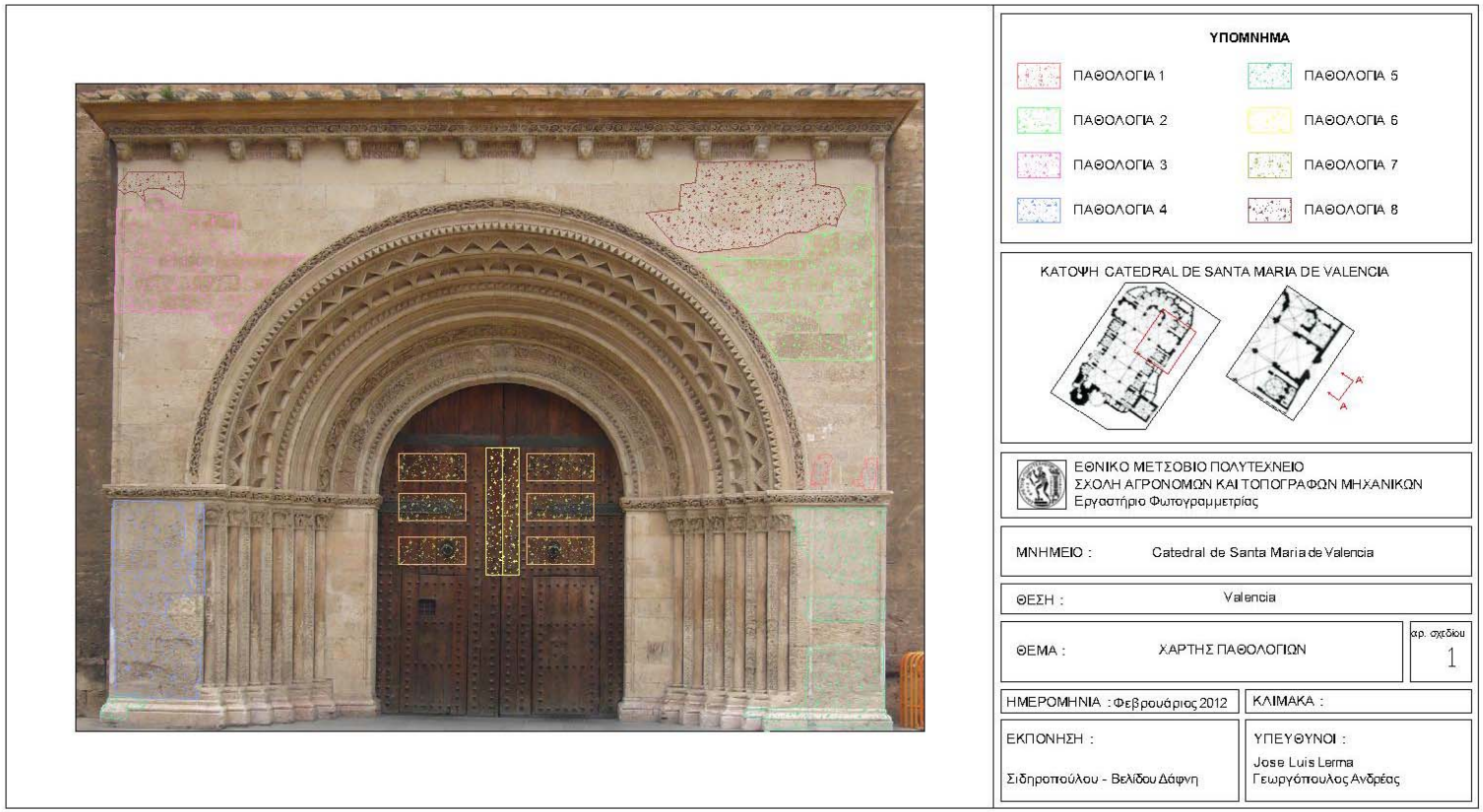
Σε πολλές εικόνες, ακόμα και στις πρωτογενείς, στην πόρτα διαγράφονται κάποιοι ορθογώνιοι σχηματισμοί, διατεταγμένοι, και στα δύο φύλλα της πόρτας αντίστοιχα. Οι περιοχές που ορίζουν δεν έχουν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας με την υπόλοιπη επιφάνεια της πόρτας. Κατά συνέπεια, δεν μαρτυρείται κάποια παθολογία, αλλά κατά πάσα πιθανότητα κάποιοι σχηματισμοί ή ανοίγματα που υπάρχουν από την εσωτερική πλευρά της πόρτας ή που υπήρχαν προηγούμενα και τώρα έχουν καταργηθεί.

Τέλος, πέρα από τα ορθογώνια αυτά, υπάρχει ένα ακόμη, μοναδικό, το οποίο όμως έχει θερμοκρασιακές διαφορές με την συνολική επιφάνεια. Βρίσκεται στο αριστερό φύλλο της πόρτας, λίγο πιο κάτω από το μέσο του ύψους της. Το σημείο αυτό έχει μικρότερες θερμοκρασίες

σε σχέση με την συνολική επιφάνεια αλλά και τις περιοχές των ορθογωνίων. Επομένως, πιθανώς η περιοχή που ορίζει το ορθογώνιο αυτό είναι προβληματική.

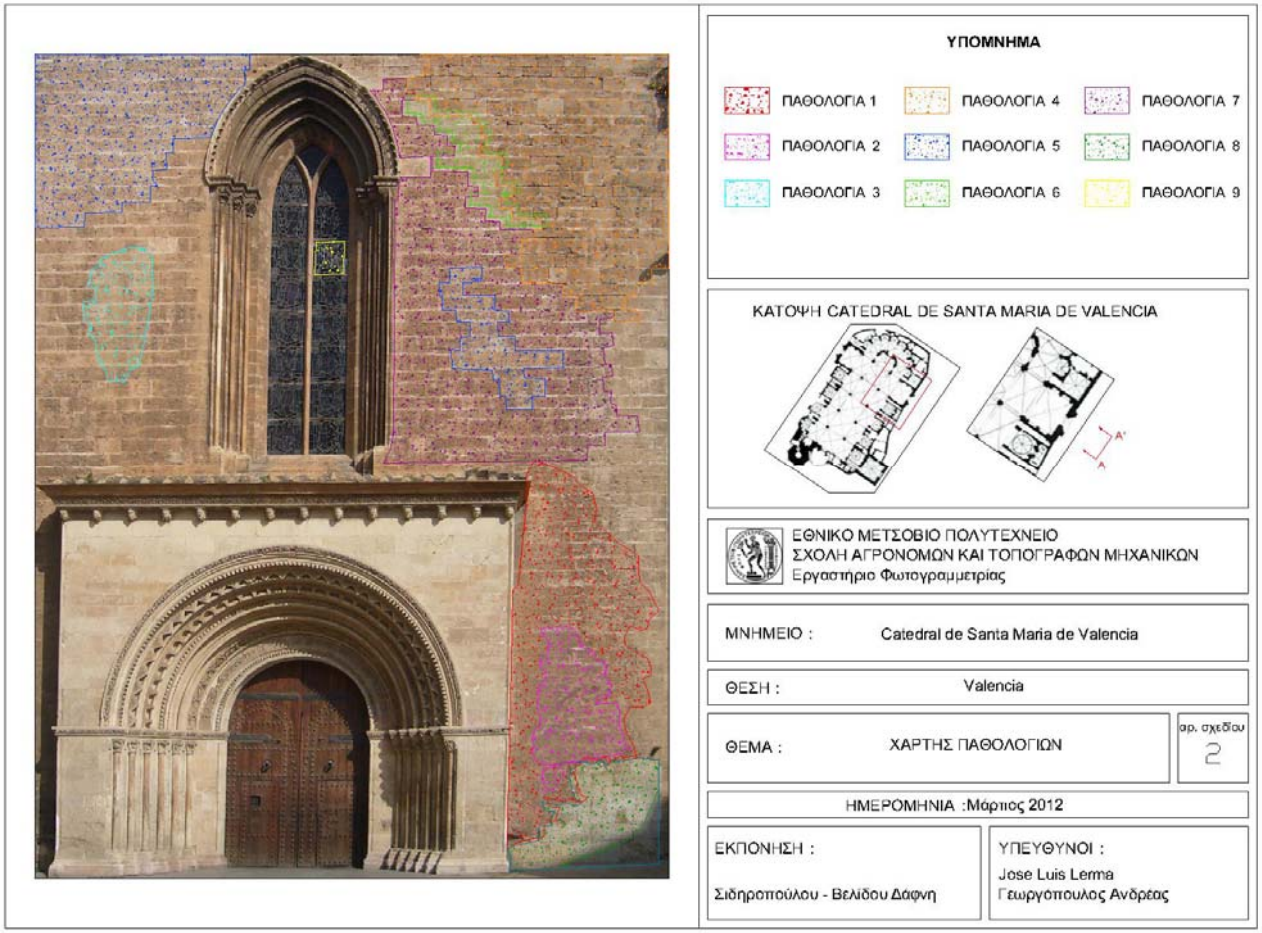
4.5 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

4.5.1 Ρωμανική Πύλη Καθεδρικού Ναού



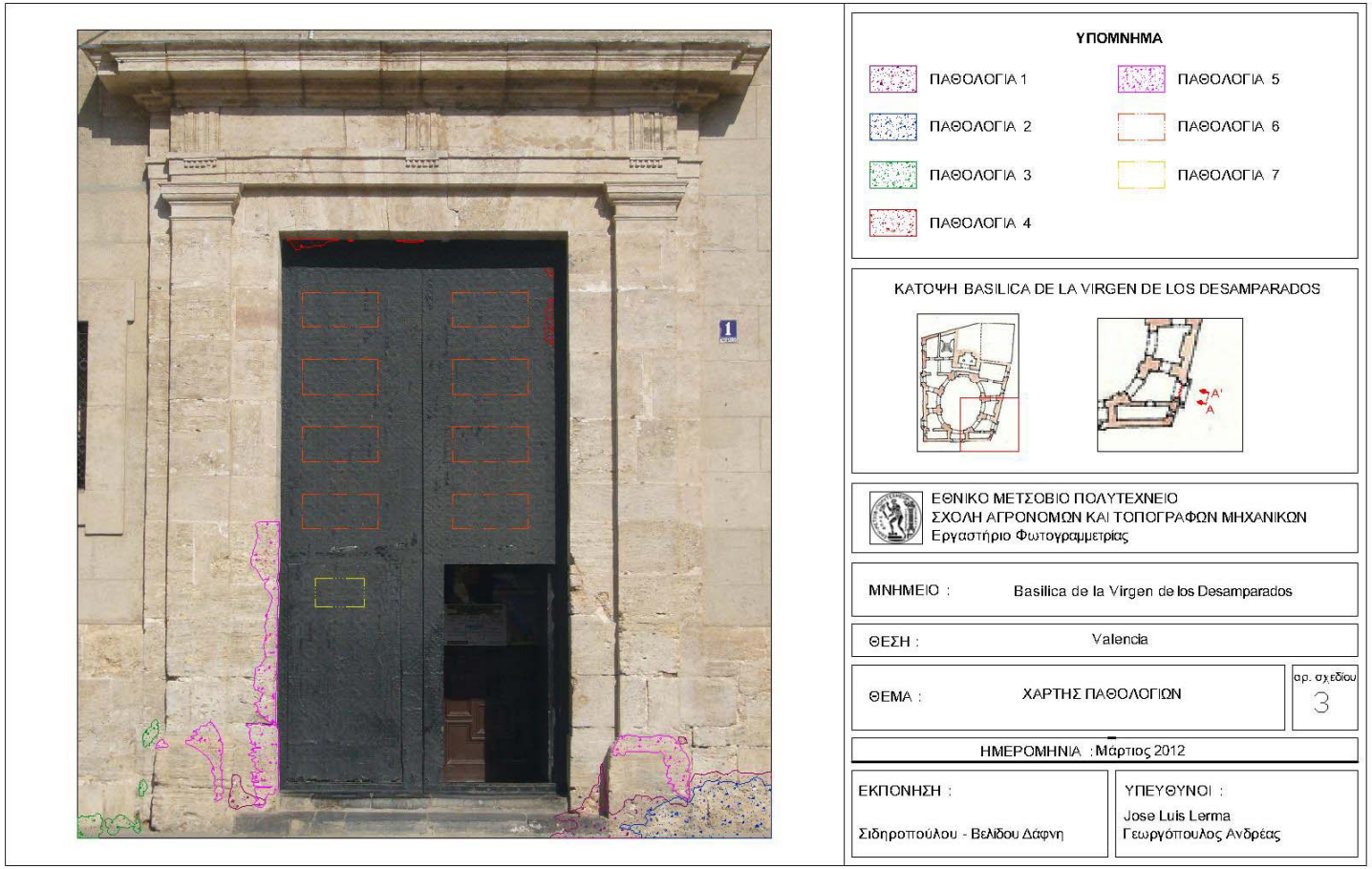
Εικόνα 112 : Χάρτης Παθολογιών Ρωμανικής Πύλης

4.5.2 Νοτιοανατολική Όψη Ρωμανικής Πύλης Καθεδρικού Ναού



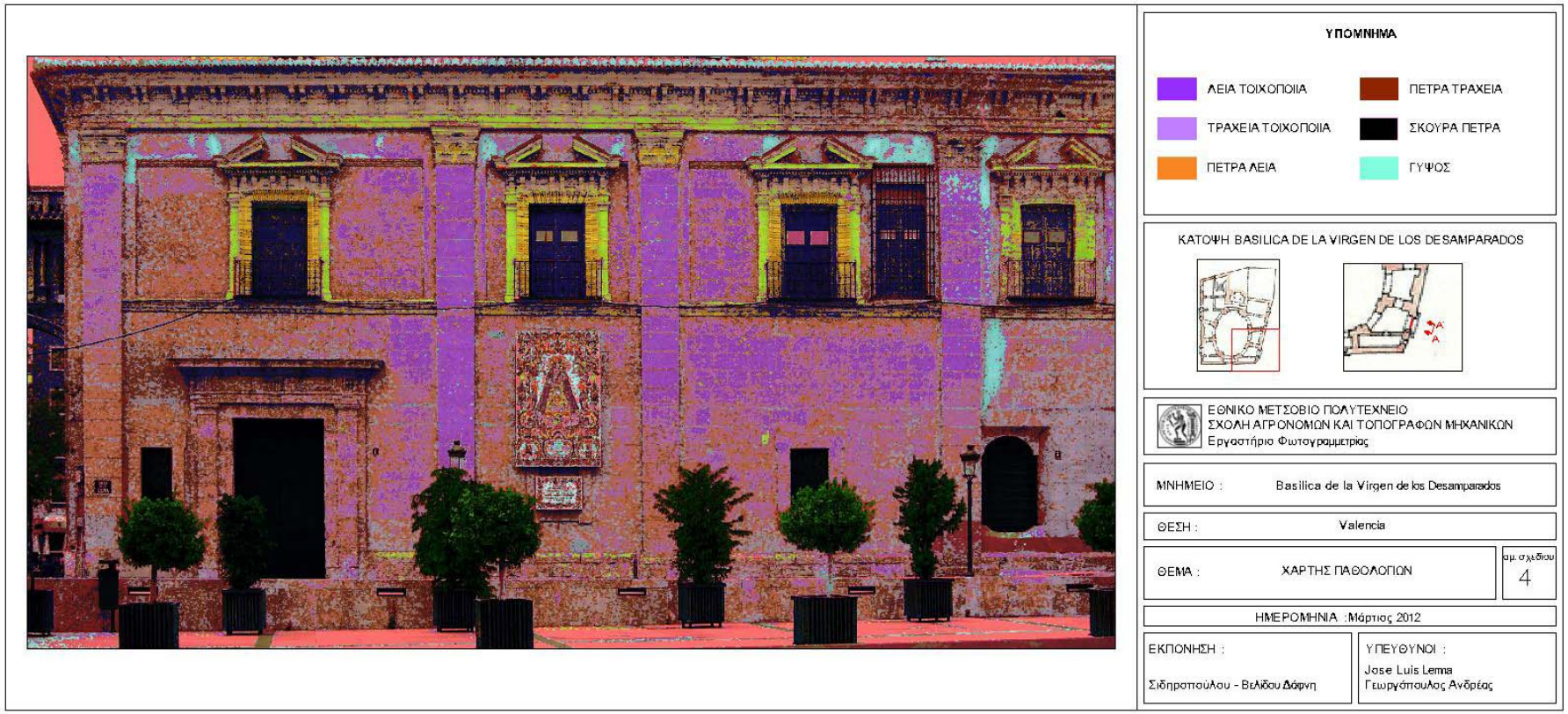
Εικόνα 113 : Χάρτης Παθολογιών Όψης Καθεδρικού

4.5.3 Πύλη Virgen



Εικόνα 114 : Χάρτης Παθολογιών Πύλης Virgen

4.5.4 Ανατολική Όψη Virgen



Εικόνα 115 : Χάρτης Παθολογιών Όψης Virgen

5

Σύνοψη και Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη ανίχνευσης παθολογιών σε όψεις ιστορικών κτιρίων, μέσω θερμικών καταγραφών. Μέσω των καταγραφών αυτών επιδιώχθηκε να εντοπισθούν ανωμαλίες, παθολογίες και προβλήματα των υλικών της όψης τα οποία είτε είναι ορατά με το ανθρώπινο μάτι είτε όχι. Οι παθολογίες μπορεί να αφορούν είτε στην επιφάνεια του υλικού είτε και στο εσωτερικό του, σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Οι προβληματικές περιοχές εντοπίστηκαν μέσω διάφορων μεθόδων και επιδιώχθηκε, όπου ήταν δυνατό, να περιγραφεί η φύση και η αιτία του φαινομένου. Τέλος, οριοθετήθηκαν οι περιοχές αυτές με την ορατή εικόνα ως υπόβαθρο, με στόχο να είναι σαφώς ορισμένες και η εικόνα αυτή να μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για πιθανές επεμβάσεις και εργασίες συντήρησης.

Όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση της δομής της μελέτης για την ανάλυση και τον εντοπισμό των παθολογιών οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι δημιουργία πολυφασματικών εικόνων με συνδυασμό των πρωτογενών εικόνων, ταξινομήσεις, επιβλεπόμενες και μη επιβλεπόμενες, ανάλυση κυρίων συνιστωσών, έγχρωμα σύνθετα και μετρήσεις θερμοκρασιών στις θερμικές εικόνες. Κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες παρέχει κάποια πληροφορία η οποία δεν είναι ορατή στις άλλες είτε ενισχύει κάποια που έχει ήδη παρουσιαστεί και από κάποια άλλη ή άλλες διαδικασίες.

Το πρώτο βήμα ήταν η παρατήρηση και καταγραφή των σημαντικότερων πληροφοριών των πρωτογενών εικόνων. Έτσι, τόσο για τις θερμικές όσο και για τις συμβατικές εικόνες εξήχθησαν τα σημαντικότερα στοιχεία. Από τις μεν θερμικές παρατηρήθηκε, σε γενικές γραμμές, η μεταβολή των θερμοκρασιών κάθε υλικού στη διάρκεια της ημέρας και σημειώθηκαν έντονες και εκτεταμένες διαφοροποιήσεις που ήταν ορατές για κάθε υλικό. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση δεν είναι άμεσα δυνατή στα πρωτογενή δεδομένα διότι κάθε μία από τις θερμικές εικόνες παρουσιάζει διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος και διαφορετική κλίμακα θερμοκρασιών.

Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο χρώμα σε δύο εικόνες δεν αντιπροσωπεύει την ίδια θερμοκρασία. Επομένως, εάν επιδιώκονταν η άμεση σύγκριση, θα έπρεπε πρώτα οι εικόνες να επεξεργαστούν και να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασιακή κλίμακα. Στις συμβατικές εικόνες, αρχικά έγινε αναγνώριση των υλικών που υπάρχουν στην όψη. Κατά δεύτερον, σημειώθηκαν προβλήματα των υλικών τα οποία είναι ορατά και με το ανθρώπινο μάτι. Η παρατήρηση της συμβατικής εικόνας είναι ένα στοιχείο βασικό για την ερμηνεία και των θερμικών εικόνων. Κάθε φαινόμενο που παρατηρείται στη θερμική εικόνα πρέπει να αντιστοιχηθεί με κάποιο υλικό και κάποια περιοχή της όψης, η οποία είναι πιο διακριτή στη συμβατική εικόνα. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις ήταν η βάση για την περαιτέρω μελέτη των εικόνων, αφού επισήμαναν τις κρίσιμες περιοχές οι οποίες πρέπει να μελετηθούν.

Η κυριότερη τεχνική πάνω στην οποία στηρίχθηκε όλη η ανάλυση είναι η δημιουργία πολυφασματικών εικόνων. Ο σχηματισμός των εικόνων αυτών περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εδώ σημειώνεται ότι η πολυφασματική εικόνα δεν χρησιμοποιήθηκε ανεξάρτητα αλλά αποτέλεσε το δεδομένο εισαγωγής στις διαδικασίες που ακολούθησαν, ταξινομήσεις και ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Το πλεονέκτημα που δίνει η συγκεκριμένη τεχνική είναι η συγκέντρωση όλης της διαθέσιμης πληροφορίας σε μία εικόνα. Έτσι, μια μέθοδος, όπως η ταξινόμηση, μπορεί να διαχειριστεί και να αντιμετωπίσει συνολικά όλη τη διατιθέμενη πληροφορία. Σε μία ταξινόμηση, για παράδειγμα, λαμβάνονται υπόψη η όψη του υλικού από τα τρία κανάλια της συμβατικής εικόνας και η θερμική συμπεριφορά του όλες τις ώρες λήψης. Έτσι, για κάθε περιοχή ενός υλικού παρέχονται και επεξεργάζονται ταυτόχρονα διαφορετικού τύπου και πολλαπλών χρονικών στιγμών πληροφορίες, οι οποίες βοηθούν στην εξαγωγή παθολογιών.

Το επόμενο εργαλείο ήταν η ταξινόμηση. Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, εν γένει, έδωσε αποτελέσματα λιγότερο ικανοποιητικά από την επιβλεπόμενη και, τελικά, χρησιμοποιήθηκε σε λιγότερες περιπτώσεις. Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση βοήθησε, κυρίως, στην περιγραφή των διαφορετικών τμημάτων μιας τοιχοποιίας, αποτελούμενων είτε από διαφορετικά υλικά είτε από υλικά τα οποία βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση. Το αποτέλεσμα ήταν μια γενική περιγραφή των ορίων. Ωστόσο, τα αντίστοιχα αποτελέσματα της επιβλεπόμενης ταξινόμησης ήταν πολύ πιο ικανοποιητικά. Με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, σε θερμικές λήψεις και σε συνδυασμό με συμβατικές, επιτεύχθηκε να ταξινομηθούν τόσο τα υλικά που υπάρχουν σε κάθε όψη, όσο και να διαχωριστούν όμοια υλικά τα οποία δεν εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά, λόγω διάβρωσης, υγρασίας κλπ. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρειάσθηκε να ορισθούν πάνω από μία περιοχές εκπαίδευσης για κάθε θεματική κατηγορία, κατανεμημένες σε όλη την έκτασή της, καθότι η ίδια θεματική κατηγορία δεν έχει ομοιόμορφη όψη σε κάθε σημείο της. Επιπλέον, χρειάστηκε να θεωρηθούν δύο θεματικές κατηγορίες για το ίδιο υλικό, όπου αυτό είχε τμήμα υπό σκιά στην εικόνα. Όπως είναι προφανές, η όψη του ίδιου υλικού σε φυσικό φως και η όψη του υπό σκιά είναι διαφορετική.

Κατά συνέπεια, η προσπάθεια ταξινόμησής τους στην ίδια κλάση θα δημιουργούσε προβλήματα. Για το λόγο αυτό για κάθε περιοχή υπό σκιά, κάθε υλικού ξεχωριστά, θεωρήθηκε μια δεύτερη ξεχωριστή θεματική κατηγορία. Η παράγωγη εικόνα της ταξινόμησης ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη ως προϊόν αυτόνομο αλλά και ως οδηγός για τις διαδικασίες που ακολούθησαν. Αποτελεί έναν χάρτη των υλικών της όψης αλλά και των διακρίσεων που υπάρχουν μέσα σε αυτά, καθώς αναφέρθηκε ότι ταξινομούνται σε διαφορετικές θεματικές κατηγορίες στοιχεία του ίδιου υλικού που βρίσκονται σε διαφορετική κατάσταση. Για αυτό και ο αριθμός των κλάσεων που επιλέγεται δεν είναι ίσος με τον αριθμό των υλικών αλλά με το άθροισμα των υποκατηγοριών τους που εμφανίζονται σε κάθε αντικείμενο.

Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών είναι μια τεχνική η οποία εξαλείφει πλεονασμούς στα πολυφασματικά δεδομένα. Επομένως, εξ ορισμού, αναμένεται τα αποτελέσματα που αποκτώνται από μια ανάλυση κυρίων συνιστωσών να αποδίδουν τα αρχικά δεδομένα με μικρότερη συσχέτιση και άρα μεγαλύτερη σαφήνεια. Στην προκειμένη περίπτωση, αυτό που επιτεύχθηκε είναι ανομοιομορφίες που εμφανίζονται στις πρωτογενείς εικόνες και οι οποίες είναι παρούσες σε όλες ή σε κάποιες ώρες της ημέρας (ώρες λήψης) να αποτυπωθούν σε μία ή περισσότερες εικόνες κυρίων συνιστωσών. Με την χρησιμοποίηση της πολυφασματικής εικόνας στην ανάλυση εκμεταλλευόμαστε την εμφάνιση όλων των προβληματικών περιοχών, τη μορφή και τα όριά τους σε όλες της εικόνες και επιδιώκεται να αποτυπωθούν συγκεντρωτικά σε ν αριθμό εικόνων που έχει επιλεχθεί για την ανάλυση. Τελικά, το αποτέλεσμα που παράχθηκε είναι ένας νέος αριθμός εικόνων στις οποίες έχουν περιγραφεί, από όλα τα διαθέσιμα στοιχεία, συγκεντρωτικά όλες οι παθολογίες και τα όριά τους, τα οποία παρουσιάζονταν κατά τόπους σε όλες τις εικόνες. Ωστόσο, οι παθολογίες αυτές δεν απεικονίστηκαν απαραίτητα όλες σε μία εικόνα, αλλά υπήρξαν περιπτώσεις όπου και η δεύτερη αλλά και η τρίτη συνιστώσα περιείχαν σημαντικά στοιχεία. Ακόμα, υπάρχει μία περίπτωση στην οποία και η τέταρτη συνιστώσα έδωσε μια εικόνα με την απεικόνιση φαινομένου το οποίο δεν εντοπίζεται στις υπόλοιπες. Αυτό συνέβη διότι η περιοχή αυτή στις περισσότερες εικόνες βρίσκονταν υπό σκιά, η οποία καθιστούσε αδύνατη την ορθή αποτύπωσή της. Έτσι, μόνο όταν εξαλείφθηκε το φαινόμενο της σκιάς στις πρώτες συνιστώσες «αποκαλύφθηκε» ανεπηρέαστη η επιφάνεια και το φαινόμενο που εμφανίζεται σε αυτή.

Τα έγχρωμα σύνθετα που σχηματίστηκαν ενίσχυσαν την απεικόνιση ορισμένων από τα φαινόμενα που είχαν ήδη εντοπισθεί. Δηλαδή, δεν ήταν ένα εργαλείο το οποίο ανέδειξε νέα φαινόμενα, αλλά με την κατάλληλη επιλογή καναλιών τονίστηκε και αποτυπώθηκε πιο καθαρά πάνω στο αντικείμενο κάποια ή κάποιες από τις ανωμαλίες που προέκυψαν σε προηγούμενο στάδιο.

Τέλος, συγκεντρώθηκαν όλες οι περιοχές οι οποίες χαρακτηρίστηκαν προβληματικές σε όλα τα προηγούμενα στάδια και για αυτές μετρήθηκαν θερμοκρασίες σε όλες τις θερμικές εικόνες. Η μέτρηση των θερμοκρασιών επέτρεψε τη σύγκριση των θερμοκρασιών

υποκατηγοριών του ίδιου υλικού, όπως αυτές ορίσθηκαν προηγουμένως. Με αυτό τον τρόπο, μελετήθηκε εάν πραγματικά αυτές οι υποκατηγορίες είναι διαχωρίσιμες ως προς τη θερμική συμπεριφορά και την κατάσταση στην οποία βρίσκονται. Υπήρξαν περιπτώσεις όπου οι διαφορές ήταν διακριτές και άλλες όπου η υπόθεση διαφοροποίησης των περιοχών δεν επιβεβαιώθηκε.

Στο τελευταίο στάδιο παράχθηκαν οι χάρτες παθολογιών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλές εικόνες από αυτές που προέκυψαν κατά την επεξεργασία, προκειμένου να αντληθεί από αυτές η πληροφορία που παρέχει κάθε μία ξεχωριστά. Αυτό διότι, όπως αποδείχθηκε σε όλη τη διαδικασία, διαφορετικές εικόνες μπορεί να καταδεικνύουν τα ίδια φαινόμενα ή, αντίθετα, κάποιο φαινόμενο να περιγράφεται αποκλειστικά σε μία εικόνα. Επομένως, η συμμετοχή όλων των εικόνων που περιέχουν αξιοποιήσιμη πληροφορία ήταν απαραίτητη. Τέτοιες εικόνες ήταν οι εικόνες κυρίων συνιστωσών, ταξινομημένες εικόνες αλλά ακόμα και οι συμβατικές. Με υπόβαθρο κάθε μία από αυτές, κάθε φορά ψηφιοποιήθηκαν τα όρια των προβληματικών περιοχών και εντάχθηκαν στην ίδια θεματική κατηγορία πολύγωνα ανωμαλιών που θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύουν την ίδια παθολογία. Δεδομένου ότι όλες οι παραπάνω εικόνες είχαν κοινό μέγεθος, τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης συγκεντρώθηκαν και παρουσιάσθηκαν με υπόβαθρο τη συμβατική εικόνα. Κατ' αυτό τον τρόπο, έχουμε μια συνολική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε ένα υπόβαθρο που είναι κατανοητό και επιτρέπει τον εντοπισμό κάθε φαινομένου.

Σχετικά με τη δομή της ανάλυσης πρέπει να σημειωθεί ότι η κάθε μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν παράγει αποτελέσματα τα οποία δεν αντικαθιστά κάποια από τις υπόλοιπες. Αυτό σημαίνει ότι οι τεχνικές αυτές προσφέρουν κάθε μία τα στοιχεία που αναλύθηκαν παραπάνω και τα οποία σε συνδυασμό έδωσαν το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μιας μεθόδου πιθανώς ενισχύουν, διασαφηνίζουν ή απορρίπτουν τα αποτελέσματα κάποιας άλλης. Η παρατήρηση της συμβατικής εικόνας οδηγεί στην επιλογή των θεματικών κατηγοριών και τον αριθμό τους που θα θεωρηθούν σε μια ταξινόμηση. Από την ταξινόμηση διασαφηνίζονται τα όρια των υποκατηγοριών κάθε υλικού. Η απεικόνιση των ανομοιομορφιών και ανωμαλιών στις εικόνες κυρίων συνιστωσών μπορεί να αντιστοιχηθεί με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Τέλος, οι υποκατηγορίες που ορίσθηκαν στην ταξινόμηση αλλά και η απεικόνιση των «επικίνδυνων» για παθολογίες περιοχών στις εικόνες κυρίων συνιστωσών υποδεικνύουν τις περιοχές στις οποίες μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες για να συγκριθούν με αυτές των υγιών τμημάτων.

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι η συμμετοχή της συμβατικής εικόνας στις διαδικασίες πρώτον, προσθέτει πληροφορία για τις παθολογίες των υλικών οι οποίες είναι ορατές και σε αυτή αλλά και βοηθά στην «τοποθέτηση» των παθολογιών που εξάγονται από τις θερμικές

εικόνες και τα παράγωγά τους επάνω στον αντικείμενο, έτσι ώστε ο εντοπισμός και η οριοθέτησή τους να είναι πιο σαφής και διακριτός.

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω διαδικασιών το κύριο αποτέλεσμα που παράχθηκε είναι η οριοθέτηση των προβληματικών ζωνών. Από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων όλων των σταδίων και μετά τις μετρήσεις των θερμοκρασιών, απορρίφθηκαν ή επιβεβαιώθηκαν οι προηγούμενες παρατηρήσεις και πια έχουν περιγραφεί οι περιοχές για τις οποίες υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις παθολογιών. Επομένως, η θέση και η έκτασή τους είναι ορισμένες. Έτσι, σε κάποιο υπόβαθρο, βέλτιστα τη συμβατική εικόνα μπορούν να τοποθετηθούν τα όρια των περιοχή αυτών.

Πέρα από τα όρια των προβληματικών περιοχών, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατό να προσδιοριστεί και η αιτία του φαινομένου που επισημάνθηκε. Η παθολογία, λοιπόν, που μπορεί να ορισθεί, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία είναι η ύπαρξη υγρασίας. Τα τμήματα με υγρασία παρουσιάζουν μικρότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μέσα στην ημέρα, ενώ οι ξηρές μάζες παρουσιάζουν πιο έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Αυτό το στοιχείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον προσδιορισμό του χαρακτήρα μιας παθολογίας και παρατηρήθηκε και στις εφαρμογές αυτής της εργασίας. Για τμήματα του ίδιου υλικού τα οποία παρουσίαζαν έντονες ανομοιομορφίες στις εικόνες μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες και παρατηρήθηκε ότι οι προβληματικές περιοχές παρουσίαζαν εν γένει χαμηλότερες θερμοκρασίες και χαμηλότερες διακυμάνσεις σε σχέση με την υπόλοιπη μάζα. Παρόλα αυτά, υπήρχαν άλλες προβληματικές περιοχές, με βάση τις εικόνες, οι οποίες δεν είχαν ανάλογη συμπεριφορά. Οι θερμοκρασίες τους διαφοροποιούνται έντονα από αυτές της γενικής μάζας και υποδεικνύουν μια διαφορετική κατάσταση υλικού, ωστόσο η αιτία του προβλήματος δεν μπορεί να διατυπωθεί στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

Σε άλλες περιπτώσεις, παθολογίες ορατές στη συμβατική εικόνα, όπως διαβρωμένες πέτρες κλπ δεν υποδείκνυαν υποχρεωτικά κάποιο πρόβλημα στο εσωτερικό του υλικού. Δηλαδή από τη θερμική επεξεργασία δεν προέκυψαν στοιχεία ανωμαλιών, παρόλο που εξωτερικά το υλικό εμφανίζει προβλήματα.

Εν γένει, παρατηρήθηκε συνολικά ότι η διαφοροποίηση θερμοκρασιακά των υλικών και των υποκατηγοριών τους είναι διακριτή σε λήψεις κατά τη διάρκεια της ημέρας και όχι τις βραδινές ώρες. Από όλες τις ενότητες προέκυψε ότι οι μέγιστες διαφορές παρουσιάζονται κατά τις μεσημεριανές ώρες και εκεί είναι που μπορούν ευκολότερα να εντοπισθούν διαφορετικές συμπεριφορές υπό-ομάδων του ίδιου υλικού.

Κατά την εφαρμογή όλων των παραπάνω εντοπίστηκαν αντιμετωπίσθηκαν ορισμένα προβλήματα. Το κυριότερο από αυτά ήταν ότι οι εικόνες, τόσο οι συμβατικές αλλά περισσότερο οι θερμικές , επηρεάζονται από σκιά. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν τμήματα επάνω στο αντικείμενο τα οποία την ώρα της λήψης βρίσκονται υπό σκιά και, κατά συνέπεια, δεν μπορούν

να συγκριθούν με τα υπόλοιπα. Αντίστοιχα, υπάρχουν άλλα τμήματα τα οποία εκτίθενται σε ηλιοφάνεια για μεγαλύτερο διάστημα από τα υπόλοιπα, επομένως η διαμόρφωση της θερμοκρασίας τους δεν γίνεται υπό τις ίδιες συνθήκες με τα υπόλοιπα. Για τους λόγους αυτούς στην εργασία αυτή απορρίφθηκαν και δεν εισήχθησαν στη διαδικασία εικόνες με έντονη ύπαρξη σκιάς.

5.2 Προτάσεις για βελτίωση

Με βάση τα παραπάνω, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προτείνεται οι λήψεις να γίνονται, αν είναι δυνατόν, σε μέρες με συννεφιά και όχι σε μέρες με έντονη ηλιοφάνεια, ούτως ώστε να αποφεύγονται τα παραπάνω φαινόμενα. Επιδιώκονται ομοιογενείς συνθήκες φωτισμού. Ωστόσο, σε περίπτωση που οι λήψεις δεν έχουν πραγματοποιηθεί μια τέτοια μέρα, πρέπει να δίνεται προσοχή στην επιλογή των εικόνων αλλά και στη φωτοερμηνεία. Φαινόμενα σκιάς ή ηλιοφάνειας μπορεί να οδηγήσουν σε υπόθεση παθολογίας η οποία, όμως, είναι επισφαλής, ή πιθανότερα, λανθασμένη. Σημαντικό είναι επίσης, οι θερμικές εικόνες να λαμβάνονται σε κατανεμημένες ώρες σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών.

Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα εάν είναι βαθύτερη η γνώση των υλικών από τα οποία αποτελείται το αντικείμενο. Μια γνώση των υλικών θα μπορούσε να περιλαμβάνει και θερμικές ιδιότητες αυτών, όπως λχ τον συντελεστή εκπομπής του υλικού, με βάση τις οποίες μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα η μεταβολή της θερμοκρασίας που παρουσιάζουν. Ακόμη όμως και χωρίς την γνώση τέτοιου είδους στοιχείων, κανείς πρέπει με παρατήρηση στο πεδίο αλλά και στη συμβατική εικόνα έπειτα να σχηματίσει μία, όσο πιο ξεκάθαρη εικόνα γίνεται για τα υλικά που συναποτελούν το αντικείμενο, ώστε να μπορέσει να ερμηνεύσει όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Τέλος, μετρήσεις υγρασίας του αντικειμένου στο πεδίο μπορούν να βοηθήσουν τη διαδικασία και να ενισχύσουν το αποτέλεσμα.

Τελικά, το προϊόν το οποίο παράχθηκε στο τέλος της εργασίας είναι ένας χάρτης των παθολογιών που εντοπίσθηκαν σε κάθε όψη. Το προϊόν αυτό μπορεί να αποτελέσει μια βάση για κάποιον ο οποίος θα πραγματοποιήσει στο μνημείο κάποια επέμβαση συντήρησης, παρέχοντάς του στοιχεία σχετικά με τη φύση και τη θέση των προβλημάτων που υπάρχουν. Αντίστοιχες εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν όχι μόνο για την ανίχνευση παθολογιών αλλά και για την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας μιας επέμβασης συντήρησης επάνω στο μνημείο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διπλωματικές εργασίες

Αϊβαλιώτης Παναγιώτης – Θεοφράστου Δημήτριος "Εφαρμογές Θερμογραφίας σε Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2008

Βούλγαρη Ευγενία, "Μη καταστροφικές – διαγνωστικές μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011

Δερμιτζάκης Νικόλαος, "Υπέρυθρη θερμογραφία ως εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου σε θέματα ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού", Πανεπιστήμιο Πατρών, Μεταπτυχιακή εργασία, 2006

Μαργιώτης Ιωάννης "Μελέτη μετεωρολογικών φαινομένων με την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας", Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2007

Μπουλούσης Γεώργιος "Προσδιορισμός συντελεστών εκπομπής δομικών υλικών με χρήση της θερμογραφίας υπέρυθρου (8-12μm) και συσχέτισή τους με την μικροδομή τους", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003

Οτουζμπίρ Οζλέμ, Γκαϊτατζή Όλγα "Θερμική ανάλυση σφάλματος σε μετασχηματιστή έγχυσης συστήματος ΤΑΣ ", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2011

Ρογκότης Σάββας "Επεξεργασία εικόνας από θερμοκάμερα", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010

Σταθοπούλου Έλλη "Τρισδιάστατα Μοντέλα Αρχιτεκτονικά Σύνθετων Αντικειμένων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Στεργίου Νικόλαος, Νικολάου Ηλίας "Μετρήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας εναέριων υποσταθμών διανομής με χρήση θερμικής απεικόνισης", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2009

Ελληνικά συγγράμματα

Αργιαλάς Δημήτρης "Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1999

Γεωργόπουλος Ανδρέας "Ψηφιακή Φωτογραμμετρία", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1998

Ξένα συγγράμματα

Jose Luis Lerma Garcia, "Metodología de clasificación multiespectral de imágenes digitales para el reconocimiento y caracterización de materiales y patologías en fachadas arquitectónicas", Διδακτορική Εργασία, Universidad Politecnica de Valencia, Βαλένθια 1999

Άρθρα

P. Furmanski, T. S. Wisniewski /ISESCO Science and Technology Vision - Volume 5, Number 7, May 2009, (71-75)

José Luis Lerma "Automatic Plotting of Architectural Facades with Multispectral Images", JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING © ASCE / AUGUST 2005, **DOI:** 10.1061/~ASCE!0733-9453~2005!131:3~73!

José L. Lerma, Miriam Cabrelles, Cristina Portalés, "Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade", Construction and Building Materials 25 (2011) 2190–2197, Valencia, October 2010

José Luis Lerma, Luis Ángel Ruiz, Fernando Buchon "Application of spectral and textural classifications to recognize materials and damages on historic building facades", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5. Amsterdam 2000.

διαδίκτυο

www.flir.com

www.dpreview.com

www.wikipedia.org

http://www.thermograph.gr/index.php?/thermograph/

http://users.sch.gr/ipap/Ellinikos%20Politismos/arx.arxit.htm

http://asep2012.blogspot.com/2010/10/blog-post_2608.html