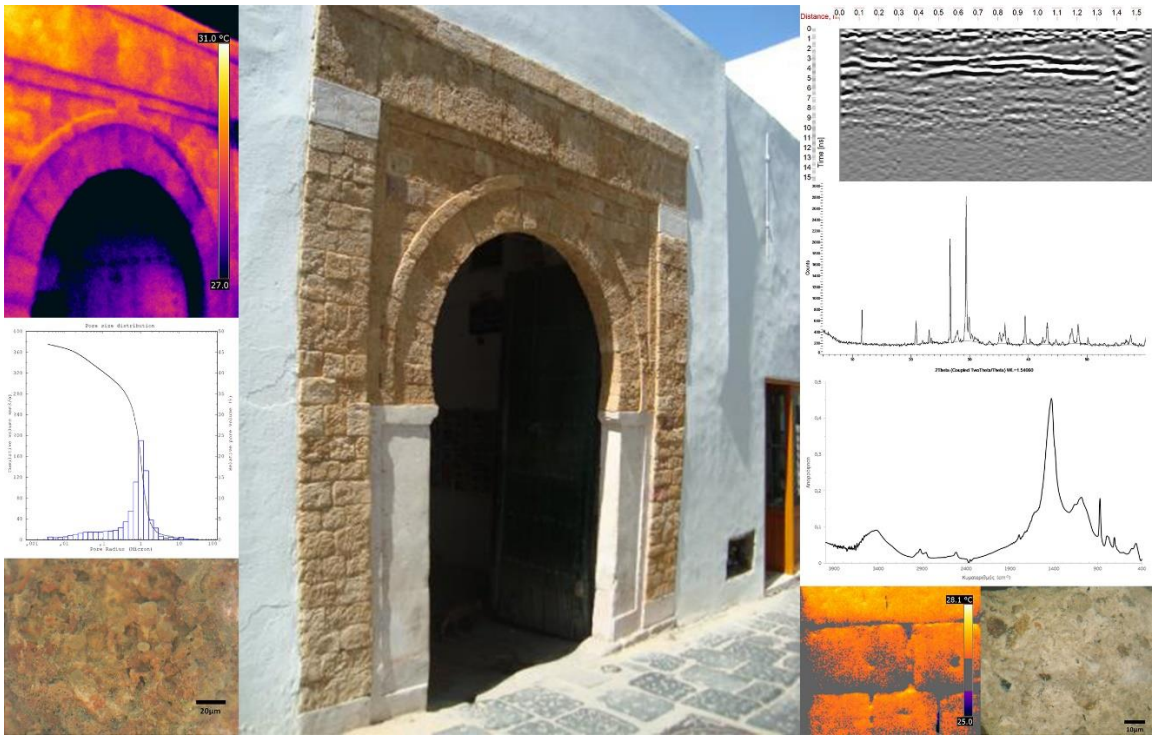
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ:
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Μ Ε Τ Α Π Τ Υ Χ Ι Α Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΟΥΚ ΤΩΝ ΣΕΣΙΑ ΣΤΗ ΜΕΔΙΝΑ ΤΗΣ ΤΥΝΗΣΙΑΣ (ENTRANCE OF SOUK DES CHÉCHIAS OF MEDINA OF TUNIS) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ



ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Κ. ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ:
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Μ Ε Τ Α Π Τ Υ Χ Ι Α Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΟΥΚ ΤΩΝ ΣΕΣΙΑ ΣΤΗ ΜΕΔΙΝΑ ΤΗΣ ΤΥΝΗΣΙΑΣ (ENTRANCE OF SOUK DES CHÉCHIAS OF MEDINA OF TUNIS) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Κ. ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αυγερινού Σοφία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)

Μπατής Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τσίμας Σταμάτιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπακόλας Αστέριος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΠΙΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Αυγερινού Σοφία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)

Μπακόλας Αστέριος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δελέγκου Αικατερίνη, Δόκτωρ, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.

Λαμπρόπουλος Κυριάκος, Δόκτωρ, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.

Μούνδουλας Πέτρος, Δόκτωρ, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.

Ξυνοπούλου Ευαγγελία, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Στην οικογένειά μου

Στους ανθρώπους που έχω δίπλα μου

Σε όσους πιστεύουν ότι κάθε πρωινό που ξημερώνει
είναι πιο φωτεινό από εκείνο που δύει

Καθώς η Ελλάδα πλέει σήμερα προς αχαρτογράφητα νερά,
η επιστημονική εξειδίκευση των νέων ανθρώπων σε καινοτόμους τομείς,
θα μας υποδείξει που βρίσκεται η πυξίδα
που δείχνει το δρόμο προς τη στεριά.
Κάθε καράβι έχει προορισμό ένα λιμάνι.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη αποκατάστασης μίας ιστορικής κατασκευής, της εισόδου του Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias), στην οδό Rue de la Kasbah, στη Μεδίνα της Τύνιδας (Τυνησία), αξιολογώντας την υφιστάμενη κατάσταση των υλικών, χρησιμοποιώντας τόσο μη καταστρεπτικές, όσο και αναλυτικές τεχνικές ελέγχου των υλικών.

Η ευκαιρία για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δόθηκε στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από την Ευρωπαϊκή Ένωση ερευνητικού προγράμματος MEDNETA*, υπό την αιγίδα του ENPI CBC (European Neighbourhood and Partnership Instrument – Cross-Border Cooperation) Mediterranean Seaп Basin Programme 2007/2013. Επιστημονικά υπεύθυνη του προγράμματος ήταν η Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Σοφία Αυγερινού. Υπεύθυνος εκ μέρους της Τυνησίας, ήταν ο κ. Zoubeir Mouhli, Διευθυντής του ASM (Association Sauvegarde de la Médina de Tunis). Η εκπόνηση έγινε στο Εργαστήριο Α1, Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κα. Αντωνία Μοροπούλου για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε κατά την ανάθεση του θέματος. Άλλωστε, πάνω από καθηγήτρια υπήρξε για εμένα δασκάλα και με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τον τομέα της Προστασίας των Μνημείων. Σε είσμα ορισμένων, το μεγαλύτερο τεχνολογικό ίδρυμα της Χώρας, το Πολυτεχνείο,

* Το πρόγραμμα MEDNETA είναι ένα από τα 95 προγράμματα του ENPI CBC Mediterranean Sea Basin Programme 2007/2013. Αφορά στην ενίσχυση του διεθνούς πολιτιστικού διαλόγου και της συνεργασίας μεταξύ διαφόρων φορέων, με σκοπό την υποστήριξη της δημιουργικότητας στις τέχνες και τα δημιουργήματα (Arts, Crafts and Design – ACD), ως μέσο για την αναζωογόνηση των κοινοτήτων που κατοικούν στις ιστορικές πόλεις της λεκάνης της Μεσογείου (medneta.eu/project-overview).

οφείλει και θα συνεχίσει να οφείλει πολλά στα οράματα και τις προσπάθειες της κας Μοροπούλου.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τη Δρ. Κατερίνα Δελέγκου, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π., για τις ατελείωτες ώρες βοήθειας που μου παρείχε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, κατά το σχολιασμό των αποτελεσμάτων, αλλά και κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κυριάκο Λαμπρόπουλο, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π., για την εκτενή υποστήριξη που μου παρείχε στην επεξεργασία και το σχολιασμό των δεδομένων που προέκυψαν από το GPR, αλλά και σε γενικότερα θέματα που αφορούσαν πληθώρα σημείων της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες, επιπρόσθετα, θα ήθελα να απευθύνω στην Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Σοφία Αυγερινού και στον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Αστέριο Μπακόλα.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Δρ. Πέτρο Μούνδουλα, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης DTA/TG και την κα. Ευαγγελία Ξυνοπούλου, Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης MIP.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς θα ήθελα να απευθύνω στην κα. Αντωνία Λαμπροπούλου, γραμματέα της Β' κατεύθυνσης, για την υποστήριξή της καθόλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων. Άλλωστε, στο πείσμα και τις φιλότιμες προσπάθειές της οφείλεται η διεξαγωγή του Δ.Π.Μ.Σ. με τη μέγιστη δυνατή – δεδομένων των αντικειμενικών δυσκολιών – αρτιότητα.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω ακόμη στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής και σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Α1, Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την άρτια συνεργασία που είχαμε, αλλά και τις χρήσιμες υποδείξεις και τη βοήθεια που μου παρείχαν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια, τους φίλους και κυρίως τους ανθρώπους που έχω δίπλα μου, για τη συμπαράστασή τους όλον αυτόν

τον καιρό και να εκφράσω τη βεβαιότητα μου ότι θα συνεχίσω να έχω τη στήριξη τους.

Κλείνοντας, θα ήθελα να επισημάνω ότι, παρόλο που καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για την αρτιότητα του κειμένου που ακολουθεί, σχόλια και παρατηρήσεις είναι πάντοτε κάτι παραπάνω από ευπρόσδεκτα. Άλλωστε, μία ερευνητική εργασία οφείλει, εφόσον ευελπιστεί να θεωρηθεί επιτυχημένη, να προκαλεί ερεθίσματα για επιστημονικό διάλογο και ανταλλαγή απόψεων.

Αθανασίου Δημήτρης

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σύγχρονη εποχή, ολοένα και μεγαλύτερη σημασία αποδίδεται στην προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Η διεύρυνση του όρου «μνημείο», η επιταγή για εκπόνηση επιστημονικής τεκμηρίωσης, αξιοποιώντας διεπιστημονικές γνώσεις και η διατύπωση των αρχών της αντιστρεψιμότητας και της συμβατότητας, είναι ορισμένες από τις σύγχρονες εξελίξεις στην επιστήμη της αποκατάστασης των μνημείων. Στα πλαίσια αυτά, ολοκληρωμένη μεθοδολογία έχει αναπτυχθεί, προκειμένου να υποστηρίξει τη διάγνωση της φθοράς των δομικών υλικών μιας ιστορικής κατασκευής και παράλληλα τη διατύπωση προτάσεων αναφορικά με φυσικοχημικά συμβατές επεμβάσεις αποκατάστασης.

Σε ένα πρώτο επίπεδο, πραγματοποιείται μια σύντομη ανασκόπηση της σημασίας που λαμβάνει η προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς και ορισμένων κείμενων κανόνων και άγραφων αρχών που τη διέπουν. Επιπροσθέτως, λαμβάνει χώρα μια σύντομη εισαγωγή στην επιστήμη των δομικών υλικών και στις βασικές αρχές της μεθοδολογίας για την αποκατάσταση των υλικών ενός μνημείου. Τέλος, επιχειρείται μια εισαγωγή στις αρχές, πάνω στις οποίες βασίζονται οι σημαντικότερες τεχνικές ελέγχου των υλικών.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η είσοδος του Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias), στην οδό Rue de la Kasbah, στη Μεδίνα της Τύνιδας (Τυνησία), μελετάται λεπτομερώς, με σκοπό την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης των δομικών υλικών, όπως επίσης και το χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς που αυτά παρουσιάζουν.

Μετά την καταγραφή μακροσκοπικών παρατηρήσεων, πραγματοποιείται εφαρμογή μη καταστρεπτικών τεχνικών ελέγχου (NDT) των υλικών. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM), η θερμογραφία υπέρυθρου (IRT) και το γεωραντάρ (GPR). Ακολούθως, δείγματα από υλικά της ιστορικής κατασκευής λαμβάνονται, με σκοπό την εφαρμογή αναλυτικών τεχνικών ελέγχου των υλικών. Οι τεχνικές που αξιοποιούνται είναι η περίθλαση

ακτίνων Χ (XRD), η ποροσιμετρία υδραργύρου (MIP), η διαφορική θερμική ανάλυση / θερμοβαρυμετρική ανάλυση (DTA/TG), η φασματοσκοπία μετασχηματισμού Fourier (FTIR), ο προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και οι δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (spot tests).

Τα αποτελέσματα κάθε τεχνικής επεξεργάζονται, σχολιάζονται εκτενώς και συνδυάζονται μεταξύ τους, με σκοπό την τεκμηρίωση της κατάστασης, το χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς των δομικών υλικών της ιστορικής κατασκευής. Τέλος, ορισμένες προτάσεις κατατίθενται, ώστε να συνεισφέρουν στον προσδιορισμό συμβατών επεμβάσεων, στα πλαίσια της ολοκληρωμένης αποκατάσταση της ιστορικής κατασκευής.

ABSTRACT

In modern days, protection of the Cultural Heritage is of increasing significance. The expansion of the term «monument», the need for scientific documentation, utilizing interdisciplinarity and the development of the principles of reversibility and compatibility, are some of the recent developments in the field of monuments restoration. In this context, comprehensive methodology has been developed, in order to support the diagnosis of damage of building materials of a historic building and alongside, the formulation of proposals concerning physicochemical compatible recovery operations.

At first, a short overview of the significance of the protection of the Cultural Heritage takes place, as well as certain current rules and unwritten principles concerning it. Additionally, a brief introduction to the science of building materials is being presented, as well as the basic principles of the methodology for the restoration of materials of a monument. Finally, an introduction to the principles is made, on which the most important methods of control of materials are based.

In the present work, the entrance of the Souk des Chéchias, on the Rue de la Kasbah Street, in the Medina of Tunis (Tunisia), is studied in detail, in order to determine the current state of material, as well as to characterize and diagnose the damage that occurs.

After recording macroscopic observations, non–destructive techniques (NDT) for material testing are applied, including fiber optic microscopy (FOM), infrared thermography (IRT) and ground penetrating radar (GPR). Thereafter, samples of materials from the historic building are taken, in order to apply analytical techniques for material testing. The techniques utilized are X-ray diffraction (XRD), mercury porosimetry (MIP), differential thermal analysis / thermogravimetry (DTA/TG), Fourier transform IR spectroscopy (FTIR), determination of total soluble salts and chemicals detection (spot) tests.

The results of each technique are being processed, extensively discussed and combined all together, in order to determine the state, to characterize and diagnose the damage of the building materials of the historic structure. Finally, a few proposals are made, aiming at helping to identify compatible operations, in order to completely restore the historic structure.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος i
Περίληψη iv
Abstract vi
Πίνακας Περιεχομένων 1
Ευρετήριο Πινάκων 3
Ευρετήριο Σχημάτων 4
Ευρετήριο Εικόνων 7
Συντμήσεις 12
1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος 14
1.1. Προστασία Της Πολιτιστικής Κληρονομιάς 14
1.1.1. Αναγκαιότητα Προστασίας Της Πολιτιστικής Κληρονομιάς 14
1.1.2. Μνημεία Παγκόσμιας Κληρονομιάς Της UNESCO 20
1.1.3. Κανόνες Που Διέπουν Την Προστασία Της Πολιτιστικής Κληρονομιάς 23
1.1.4. Συστήματα Αξιών 27
1.2. Δομικά Υλικά 30
1.2.1. Κατηγορίες Υλικών 30
1.2.2. Κύκλος Ζωής Των Υλικών 32
1.2.3. Φθορά Των Υλικών 35
1.2.4. Παράγοντες Φθοράς Λίθων, Κεραμικών και Κονιαμάτων 41
2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος 45
2.1. Βασικές Αρχές Και Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης 45
2.1.1. Μεθοδολογία Προστασίας Της Πολιτιστικής Κληρονομιάς 45
2.1.2. Διαγνωστική Μελέτη 47
2.1.3. Συμβατότητα Υλικών Αποκατάστασης Της Πολιτιστικής Κληρονομιάς 52
2.2. Μελέτη Περίπτωσης 56
2.2.1. Ιστορικά Στοιχεία Για Την Τυνησία 56
2.2.2. Ιστορικά Στοιχεία Για Την Τύνιδα 59
2.2.3. Η Μεδίνα Της Τύνιδας 61
2.2.4. Τα Σουκ 66
2.2.5. Τα Σέσια 70
2.2.6. Ιστορικά Στοιχεία Των Σουκ Στην Τυνησία 72

2.2.7. Το Σουκ Των Σέσια (Souk Des Chéchias) 75
3. Πειραματικό Μέρος.....78
3.1. Αρχές Μεθόδων Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών Ελέγχου Των Υλικών .78
3.1.1. Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM).....78
3.1.2. Θερμογραφία Υπέρυθρου (IRT).....85
3.1.3. Γεωραντάρ (GPR).....100
3.2. Αρχές Μεθόδων Αναλυτικών Τεχνικών Ελέγχου Των Υλικών 110
3.2.1. Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD) 110
3.2.2. Ποροσιμετρία Υδραργύρου (MIP).....118
3.2.3. Διαφορική Θερμική / Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (DTA/TG).....131
3.2.4. Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier (FTIR).....140
3.2.5. Προσδιορισμός Ολικών Διαλυτών Αλάτων (SST) Και Δοκιμές Ποιοτικής Χημικής Ανίχνευσης (Spot Tests).....153
3.3. Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις Μνημείου.....155
3.4. Δειγματοληψία Αναλυτικών Τεχνικών Ελέγχου Των Υλικών 170
4. Παρουσίαση Και Συζήτηση Των Αποτελεσμάτων 177
4.1. Αποτελέσματα Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών Ελέγχου Των Υλικών...177
4.1.1. Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών.....177
4.1.2. Αποτελέσματα Θερμογραφίας Υπέρυθρου.....195
Α. Εσωτερικό Τμήμα Της Ιστορικής Κατασκευής 196
Β. Εξωτερικό Τμήμα Της Ιστορικής Κατασκευής.....198
4.1.3. Αποτελέσματα Γεωραντάρ.....226
4.2. Αποτελέσματα Αναλυτικών Τεχνικών Ελέγχου Των Υλικών 244
4.2.1. Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών Δειγμάτων 244
4.2.2. Αποτελέσματα Περίθλασης Ακτίνων Χ.....252
4.2.3. Αποτελέσματα Ποροσιμετρίας Υδραργύρου 257
4.2.4. Αποτελέσματα Διαφορικής Θερμικής / Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης 263
4.2.5. Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Μετασχηματισμού Fourier.....269
4.2.6. Αποτελέσματα Προσδιορισμού Ολικών Διαλυτών Αλάτων Και Δοκιμών Ποιοτικής Χημικής Ανίχνευσης.....271
5. Συμπεράσματα – Προοπτικές.....273
6. Βιβλιογραφία 281

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Η εξέλιξη της αντιμετώπισης των προστατευόμενων περιοχών...18
Πίνακας 2: Το Σύστημα Αξιών του Alois Riegl.....27
Πίνακας 3: Το πιο πρόσφατο από τα Συστήματα Αξιών του Bernard M. Feilden.....28
Πίνακας 4: Το Σύστημα Αξιών του M. Κορρέ.....28
Πίνακας 5: Γενικές κατηγορίες των υλικών.....30
Πίνακας 6: Κύριες ιδιότητες των δομικών υλικών.....31
Πίνακας 7: Συντελεστής εκπομπής ε_λ, για διάφορα υλικά.....94
Πίνακας 8: Ορισμένες πρόσφατες δημοσιεύσεις, σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά, που εφαρμόζουν το GIS σε διάφορα επιστημονικά πεδία.....101
Πίνακας 9: Τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας και της εξασθένισης για διάφορα υλικά που συναντώνται συχνά κατά την εφαρμογή GPR.....109
Πίνακας 10: Τα κυριότερα είδη φασματομετρίας ακτίνων Χ.....110
Πίνακας 11: Ορισμένες από τις κυριότερες τεχνικές θερμικής ανάλυσης....131
Πίνακας 12: Περιοχές της ιστορικής κατασκευής στις οποίες παρατηρήθηκε φθορά, καθώς και το είδος αυτής.....158
Πίνακας 13: Δείγματα από την ιστορική κατασκευή που ελήφθησαν για εφαρμογή αναλυτικών τεχνικών ελέγχου.....170
Πίνακας 14: Θέσεις της ιστορικής κατασκευής, όπου πραγματοποιήθηκε σάρωση με χρήση GPR.....229
Πίνακας 15: Ορυκτολογική σύνθεση των δειγμάτων, ως αποτέλεσμα της ανάλυσης XRD.....253
Πίνακας 16: Ιδιότητες της μικροδομής των δειγμάτων, ως αποτέλεσμα MIP 258
Πίνακας 17: Ποσοστιαία απώλεια μάζας των δειγμάτων, σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, ως αποτέλεσμα DTA/TG.....265
Πίνακας 18: Τιμή των ολικών διαλυτών αλάτων SST% των δειγμάτων.....271
Πίνακας 19: Προσδιορισμός χλωριούχων ιόντων και θειικών ιόντων στα δείγματα, με χρήση spot tests 272

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Παραδείγματα παλιών και νεότερων παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς 15
Σχήμα 2: Κύριοι παράγοντες για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό του κύκλου ζωής ενός υλικού.....32
Σχήμα 3: Η μεταβολή των ιδιοτήτων ή του κόστους ενός υλικού, σαν συνάρτηση του χρόνου ή αριθμού κύκλων λειτουργίας 34
Σχήμα 4: Μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας από όξινη ανθρακική κρούστα 38
Σχήμα 5: Μηχανισμός κυψέλωσης αλάτων σε τοιχοποιία.....39
Σχήμα 6: Μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης.....48
Σχήμα 7: Τοπογραφικό σχέδιο του Σουκ των Σέσια 77
Σχήμα 8: Δομή ενός τυπικού καλωδίου οπτικών ινών 81
Σχήμα 9: Οι τρεις κατηγορίες οπτικών ινών 83
Σχήμα 10: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 87
Σχήμα 11: Το μέλαν σώμα 89
Σχήμα 13: Καμπύλες του Planck, χαραγμένες σε ημιλογαριθμική κλίμακα, από 100K μέχρι 1000K.....91
Σχήμα 14: Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ένα ημιδιαπερατό σώμα 92
Σχήμα 15: Απεικόνιση της διάταξη του GPR.....102
Σχήμα 16: Η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υλικό, κάτω από την επιφάνεια, με χρήση GPR.....103
Σχήμα 17: Απεικόνιση δυσδιάστατης τομής υπεδάφους, με χρήση GPR.....105
Σχήμα 18: Επεξεργασία των δεδομένων που έχουν προκύψει από δύο διαφορετικές εφαρμογές GPR, ώστε να εξαλειφθεί ο θόρυβος.....106
Σχήμα 19: Τρισδιάστατα διαγράμματα δύο διαφορετικών τύπων με χρήση GPR 107
Σχήμα 20: Α. Περίθλαση Fraunhofer. **Β.** Περίθλαση Fresnel. **Γ.** Κατανομή της έντασης της εικόνας περίθλασης που δημιουργείται από στενή ορθογώνια σχισμή, κατά την περίθλαση Fraunhofer 111
Σχήμα 21: Ένα τυπικό περιθλασίμετρο (Siemens D5000), στο οποίο φαίνονται τα κυριότερα σημεία του 113
Σχήμα 22: Ανάκλαση ακτίνων Χ από παράλληλα επίπεδα 115
Σχήμα 23: Σχηματική απεικόνιση του νόμου του Bragg.....115
Σχήμα 24: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ 117
Σχήμα 25: Σταγόνα ενός υγρού πάνω σε μια επιφάνεια 119
Σχήμα 26: Μια σταγόνα ενός μη διαβρέχοντος υγρού πάνω σε ένα πορόδες υλικό 119
Σχήμα 27: Διάκριση πόρων, ανάλογα με τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης 120

Σχήμα 28: Επιρροή του ρυθμού εισχώρησης του υδραργύρου στο μέγεθος και τον όγκο των πόρων.....125
Σχήμα 29: Πόσο γρήγορα επιτυγχάνεται η ισορροπία.....127
Σχήμα 30: Διάγραμμα όγκου εισχώρησης συναρτήσει της πίεσης, στο οποίο φαίνονται οι τυπικές καμπύλες εισχώρησης και απομάκρυνσης του υδραργύρου.....129
Σχήμα 31: Ογκομετρική κατανομή πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, που προκύπτει από την καμπύλη είσδυσης με χρήση του απλοποιημένου μοντέλου του Washburn.....130
Σχήμα 32: Η μορφή της καμπύλης DTA.....134
Σχήμα 33: Διάταξη μιας τυπικής συσκευής ανάλυσης TG, στην οποία φαίνονται τα κυριότερα σημεία της.....136
Σχήμα 34: Προγράμματα αύξησης της θερμοκρασίας του φούρνου, κατά τη θερμική ανάλυση.....136
Σχήμα 35: Η μορφή της καμπύλης TG.....138
Σχήμα 36: Καμπύλη DTA/TG ενός κεραμικού.....139
Σχήμα 37: Καμπύλη DTA/TG ενός ασβεστιτικού κονιάματος.....139
Σχήμα 38: Οι δονήσεις τάσης και κάμψης των μοριακών δομών και οι περιοχές απορρόφησης στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος IR.....141
Σχήμα 39: Δυναμική ενέργεια του μορίου κατά τη διαστολή ή συστολή σε σχέση με την κατάσταση ισορροπίας.....142
Σχήμα 40: Επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες και μεταβάσεις σε διατομικό μόριο που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση.....145
Σχήμα 41: Ενεργειακές στάθμες για έναν μη αρμονικό ταλαντωτή.....146
Σχήμα 42: Απεικόνηση ενός τυπικού φασματοφωτομέτρου FTIR και διάταξη των πηγών, των καθρεπτών και του ανιχνευτή.....149
Σχήμα 43: Αποτελέσματα FTIR φασματοσκοπίας.....151
Σχήμα 44: Γεωμετρική τεκμηρίωση της ιστορικής κατασκευής.....156
Σχήμα 45: Χαρτογράφηση της φθοράς της ιστορικής κατασκευής.....157
Σχήμα 46: Θέσεις της ιστορικής κατασκευής στις οποίες παρατηρήθηκε κάθε τύπος φθοράς που περιγράφεται στον Πίνακα 12.....158
Σχήμα 47: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V01.....235
Σχήμα 48: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V02.....235
Σχήμα 49: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V03.....235
Σχήμα 50: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V04.....236
Σχήμα 51: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V05.....236
Σχήμα 52: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V06.....236
Σχήμα 53: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V07.....237
Σχήμα 54: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V08.....237
Σχήμα 55: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V09.....237
Σχήμα 56: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V10.....238
Σχήμα 57: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V11.....238
Σχήμα 58: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V14.....238
Σχήμα 59: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση R15.....238

Σχήμα 60: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση R16 239
Σχήμα 61: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H17 239
Σχήμα 62: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H18 239
Σχήμα 63: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H19 239
Σχήμα 64: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H21 240
Σχήμα 65: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H22 240
Σχήμα 66: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H23 241
Σχήμα 67: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H24 241
Σχήμα 68: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H25 242
Σχήμα 69: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση G28 242
Σχήμα 70: Λεπτομέρεια της γεωμετρικής τεκμηρίωσης της ιστορικής κατασκευής, όπου φαίνονται ορισμένες διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του GPR 243
Σχήμα 71: Διάγραμμα XRD για το κεραμικό M_c_y 253
Σχήμα 72: Διάγραμμα XRD για το κεραμικό M_c_r 254
Σχήμα 73: Διάγραμμα XRD για τον ψαμμίτη M_s_p 254
Σχήμα 74: Διάγραμμα XRD για τον ασβεστόλιθο M_s 255
Σχήμα 75: Διάγραμμα XRD για το κονίαμα M_m_w 255
Σχήμα 76: Διάγραμμα XRD για το κονίαμα M_m_g 256
Σχήμα 77: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για το κεραμικό M_c_r 259
Σχήμα 78: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για το κεραμικό M_c_r 259
Σχήμα 79: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για τον ψαμμίτη M_s_p 260
Σχήμα 80: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για τον ψαμμίτη M_s_p 260
Σχήμα 81: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για τον ασβεστόλιθο M_s 261
Σχήμα 82: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για τον ασβεστόλιθο M_s 261
Σχήμα 83: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για το κονίαμα M_m_w 262
Σχήμα 84: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για το κονίαμα M_m_w 262
Σχήμα 85: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_c_y 266
Σχήμα 86: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_c_r 266
Σχήμα 87: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_s_p 267
Σχήμα 88: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_s 267
Σχήμα 89: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_m_w 268
Σχήμα 90: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_m_g 268
Σχήμα 91: Φάσμα απορρόφησης του φιλμ λευκού χρώματος M_film, ως αποτέλεσμα FTIR 269

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τμήμα του τοίχους της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου, στο οποίο είχαν χρησιμοποιηθεί ασύμβατα τσιμεντιτικά κονιάματα ως υλικό αποκατάστασης 54
Εικόνα 2: Τμήμα του Χάρτη της Μεσογείου Θάλασσας 62
Εικόνα 3: Η τυνήσια παραλλαγή του σέσια, το παραδοσιακό καπέλο της Τυνησίας 71
Εικόνα 4: Η είσοδος του Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias) σήμερα, η οποία εξετάστηκε στην παρούσα εργασία. 75
Εικόνα 5: Α. Τμήμα της οχυρωτικής τοιχοποιίας του Εθνικού Σταδίου στο Ηράκλειο Κρήτης. **Β.** Το θερμογράφημα της ίδιας περιοχής.....97
Εικόνα 6: Θερμοκάμερα της εταιρίας FLIR Systems 98
Εικόνα 7: Συσκευή ποροσιμετρίας υδραργύρου Pascal 240/140, της εταιρίας Thermo Electron Corporation 121
Εικόνα 8: Η περιοχή D01, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά ...160
Εικόνα 9: Η περιοχή D02, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά ...161
Εικόνα 10: Η περιοχή D03, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 162
Εικόνα 11: Η περιοχή D04, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 163
Εικόνα 12: Η περιοχή D05, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 164
Εικόνα 13: Η περιοχή D06, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 165
Εικόνα 14: Η περιοχή D07, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 166
Εικόνα 15: Η περιοχή D08, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 167
Εικόνα 16: Η περιοχή D09, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 168
Εικόνα 17: Η περιοχή D10, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά 169
Εικόνα 18: Δείγματα M_c (κεραμικό) 172
Εικόνα 19: Δείγμα M_s_p (ψαμμίτης πρόσοψης).....172
Εικόνα 20: Δείγμα M_s (ασβεστόλιθος πρόσοψης) 173
Εικόνα 21: Δείγματα M_m_w και M_m_g (ιστορικό κονίαμα).....174
Εικόνα 22: Κόκος δείγματος M_film (φιλμ λευκού χρώματος πρόσοψης)...175
Εικόνα 23: Δείγματα M_steel (μέταλλο).....176
Εικόνα 24: Η πρόσοψη της ιστορικής κατασκευής 178
Εικόνα 25: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη.....181
Εικόνα 26: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη.....181
Εικόνα 27: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος.....182
Εικόνα 28: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος.....182
Εικόνα 29: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 183

Εικόνα 30: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 184
Εικόνα 31: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 185
Εικόνα 32: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 186
Εικόνα 33: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.....187
Εικόνα 34: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.....188
Εικόνα 35: Αποτελέσματα FOM των κονιαμάτων αρμολόγησης.....188
Εικόνα 36: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου.....189
Εικόνα 37: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου.....189
Εικόνα 38: Αποτελέσματα FOM των μαύρων επικαθίσεων στον ασβεστόλιθο, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 190
Εικόνα 39: Αποτελέσματα FOM των μαύρων επικαθίσεων στον ασβεστόλιθο, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής. 191
Εικόνα 40: Αποτελέσματα FOM των πληρώσεων μικρών κοιλοτήτων και μικρών τρυπών του ασβεστόλιθου, που έχουν πληρωθεί με ένα ροζ χρώματος υλικό 192
Εικόνα 41: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 193
Εικόνα 42: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 194
Εικόνα 43: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής 194
Εικόνα 44: Α. Το εξωτερικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής **Β.** Το εσωτερικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής 195
Εικόνα 45: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευή 202
Εικόνα 46: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....202
Εικόνα 47: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....203
Εικόνα 48: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....203
Εικόνα 49: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....204

Εικόνα 50: Θερμογράφημα περιοχής της δυτικής τοιχοποιίας της ιστορικής κατασκευής.....204
Εικόνα 51: Θερμογράφημα περιοχής της δυτικής τοιχοποιίας της ιστορικής κατασκευής.....204
Εικόνα 52: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....205
Εικόνα 53: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....205
Εικόνα 54: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....206
Εικόνα 55: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....206
Εικόνα 56: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....206
Εικόνα 57: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....207
Εικόνα 58: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....207
Εικόνα 59: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....208
Εικόνα 60: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....208
Εικόνα 61: Θερμογράφημα της βορειοανατολικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....209
Εικόνα 62: Θερμογράφημα περιοχής της ανατολικής τοιχοποιίας, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....209
Εικόνα 63: Θερμογράφημα περιοχής της ανατολικής τοιχοποιίας, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....209
Εικόνα 64: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....210
Εικόνα 65: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....210
Εικόνα 66: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....211
Εικόνα 67: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....211
Εικόνα 68: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....211
Εικόνα 69: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....212
Εικόνα 70: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....212
Εικόνα 71: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.....213

Εικόνα 72: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 214
Εικόνα 73: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 214
Εικόνα 74: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 215
Εικόνα 75: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 215
Εικόνα 76: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 216
Εικόνα 77: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 216
Εικόνα 78: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 217
Εικόνα 79: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 217
Εικόνα 80: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 218
Εικόνα 81: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 218
Εικόνα 82: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 219
Εικόνα 83: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 219
Εικόνα 84: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 220
Εικόνα 85: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 220
Εικόνα 86: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 221
Εικόνα 87: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 221
Εικόνα 88: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 222
Εικόνα 89: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 222
Εικόνα 90: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής 223
Εικόνα 91: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.....224
Εικόνα 92: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.....224
Εικόνα 93: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.....225

Εικόνα 94: Οι σαρώσεις V01, V02, V03 και V04, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εξωτερικό δυτικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής 230
Εικόνα 95: Οι σαρώσεις V05, V06, V07, V08 και V09, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εξωτερικό ανατολικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής 231
Εικόνα 96: Οι σαρώσεις V10, V11 και V14, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....232
Εικόνα 97: Οι σαρώσεις R15, R16, H17 και H18, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....233
Εικόνα 98: Η σάρωση H19, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στη μέση του θόλου (εσωτερικό) της ιστορικής κατασκευής.....233
Εικόνα 99: Οι σαρώσεις H21, H22, H23, H24 και H25, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.....234
Εικόνα 100: Η σάρωση G28, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στις πλάκες του εδάφους, εξωτερικά της ιστορικής κατασκευής 234
Εικόνα 101: Λεπτομέρεια της ανατολικής πλευράς της εισόδου της ιστορικής κατασκευής, όπου φαίνεται ότι ο ασβεστόλιθος αποτελεί τη μοναδική στρώση σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας στη συγκεκριμένη περιοχή 243
Εικόνα 102: Αποτελέσματα FOM του κεραμικού M_c_y 245
Εικόνα 103: Αποτελέσματα FOM του κεραμικού M_c_r 246
Εικόνα 104: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη M_s_p 247
Εικόνα 105: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου M_s 248
Εικόνα 106: Αποτελέσματα FOM του κονιάματος M_m_w 249
Εικόνα 107: Αποτελέσματα FOM του κονιάματος M_m_g.....250
Εικόνα 108: Αποτελέσματα FOM του φιλμ M_film 250
Εικόνα 109: Αποτελέσματα FOM του μετάλλου M_steel 251

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ΓΟΚ	Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός
ΕΜ	Ηλεκτρομαγνητική (Electromagnetic)
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (National Technical University of Athens)
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (United Nations)
ACD	Τέχνες και Δημιουργήματα (Arts, Crafts and Design)
ASM	Association Sauvegarde de la Médina de Tunis
CBC	Cross–Border Cooperation
CIAM	Διεθνές Συνέδριο Μοντέρνας Αρχιτεκτονικής (Congrès International d'Architecture Moderne – International Congresses of Modern Architecture)
CMP	Common Mid–Point
DIL	Μέτρηση Θερμικής Διαστολής (Dilatometry)
DSC	Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry)
DTA	Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis)
DTA/TG	Διαφορική Θερμική / Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis / Thermogravimetry)
ENPI	European Neighbourhood and Partnership Instrument
FIFO	Μοντέλο εξυπηρέτησης First–Come First–Served
FOM	Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optic Microscopy)
FTIR	Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier (Fourier Transform IR Spectroscopy)

GPR	Γεωραντάρ (Ground–Penetrating Radar)
ICDD	Διεθνές Κέντρο Δεδομένων Περίθλασης (International Center for Diffraction Data)
ICOMOS	Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών (International Council on Monuments and Sites)
IR	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (Infrared)
IRT	Θερμογραφία Υπέρυθρου (Infrared Thermography)
MIP	Ποροσιμετρία Υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry)
NDT	Μη Καταστρεπτική Τεχνική (Non–Destructive Technique)
PTGA	Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση υπό Πίεση (Pressurized Thermogravimetric Analysis)
PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο (Polyvinyl Chloride)
SEM	Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy)
SST	Ολικά Διαλυτά Άλατα (Total Soluble Salts)
TGA	Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (Thermogravimetric Analysis)
TMA	Θερμομηχανική Ανάλυση (Thermomechanical analysis)
TWT	Χρόνος Δύο Διαδρομών (Two Way Time)
UNESCO	Εκπαιδευτική Επιστημονική και Πολιτιστική Οργάνωση των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
USB	Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος (Universal Serial Bus)
XRD	Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (X–Ray Diffraction)
XRF	Ανάλυση με Φθορισμό Ακτίνων Χ (X–Ray Fluorescence)

1. Γενικο Θεωρητικο Μερος

1.1. Προστασια Της Πολιτιστικης Κληρονομιας

1.1.1. Αναγκαιοτητα Προστασιας Της Πολιτιστικης Κληρονομιας

Στη σύγχρονη εποχή, ολοένα και μεγαλύτερη σημασία αποδίδεται στην προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς από κάθε κοινωνία. Ο λόγος που αυτό συμβαίνει δεν είναι απόλυτα σαφής, αλλά μάλλον έχει να κάνει με την αυξανόμενη ταχύτητα του εκσυγχρονισμού και των πολλών αλλαγών στην κοινωνία. Υπό τέτοιες συνθήκες, τα στοιχεία του παρελθόντος μίας κοινωνίας μπορούν να προσφέρουν το αίσθημα του ανήκειν και της ασφάλειας στις σύγχρονες κοινωνίες και να δράσουν ως μια άγκυρα σε έναν ταχέως μεταβαλλόμενο κόσμο. Επιπλέον, σε πολλές κοινωνίες η κληρονομιά μπορεί να αποτελέσει το στοιχείο καθορισμού της εθνικής ταυτότητας. Η κατανόηση του παρελθόντος μπορεί επίσης να αποτελέσει μεγάλη βοήθεια για τη διαχείριση των προβλημάτων του παρόντος και του μέλλοντος.

Το εύρος αυτού που θεωρείται ως κληρονομιά έχει διευρυνθεί σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια. Παλαιότερα, η κληρονομιά έτεινε να αποτελείται από μεμονωμένα μνημεία και κτίρια, όπως χώρους λατρείας ή οχυρωματικά έργα και συχνά θεωρούταν ως κάτι αυτόνομο, χωρίς ιδιαίτερη σχέση με το περιβάλλον τοπίο. Σήμερα, αναγνωρίζεται ότι τα στοιχεία που περιβάλλουν το μνημείο έχουν επηρεαστεί από την αλληλεπίδρασή τους με την ανθρωπότητα και ως εκ τούτου μπορούν να αναγνωριστούν ως κληρονομιά. Παράλληλα, κρίνεται σκόπιμη η πιο προσεκτική κρίση του κατά πόσον κάτι είναι μνημείο ή όχι, με την εισαγωγή διαφόρων κριτηρίων και συστημάτων αξιών (βλ. §1.1.2 και §1.1.4). Άλλωστε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, ένα σύνολο από παράγοντες επηρεάζουν πλέον την πολιτιστική κληρονομιά.



Σχήμα 1: Παραδείγματα παλιών και νεότερων παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (UNESCO et al., 2013).

Αναπόφευκτα, αυτή η επέκταση της έννοιας της κληρονομιάς οδήγησε με τη σειρά της σε μια τεράστια επέκταση των τύπων των κατασκευών και των τοποθεσιών οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως κληρονομιά. Η Σύμβαση για την Παγκόσμια Κληρονομιά (World Heritage Convention) αναγνωρίζει ότι η κληρονομιά μπορεί να οριστεί ως «μνημεία, ομάδες κτιρίων και τόποι». Στην πράξη, το ευρύ αυτό σύνολο περιλαμβάνει: αστικά κέντρα, αρχαιολογικούς χώρους, βιομηχανική κληρονομιά, πολιτιστικά τοπία και διαδρομές πολιτιστικής κληρονομιάς. Η έννοια ενός ιστορικού μνημείου δεν καλύπτει μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο αλλά και την αστική ή την αγροτική τοποθεσία που μαρτυρά έναν ιδιαίτερο πολιτισμό μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός. Αυτό ισχύει όχι μόνο για τις μεγάλες δημιουργίες αλλά και για τα ταπεινά έργα που με τον καιρό απέκτησαν πολιτιστική σημασία (ICOMOS, 1964).

Αυτό αυξάνει σημαντικά το φάσμα των περιοχών που πρέπει να απασχολούν τους υπευθύνους για τη διαχείριση της κληρονομιάς και έτσι διευρύνει το φάσμα των δεξιοτήτων που απαιτούνται για το σκοπό αυτό. Η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων, αποτελεί έναν επιστημονικό κλάδο ο οποίος πρέπει να βασίζεται στη συνεργασία όλων των επιστημών και όλων των τεχνών που μπορούν να συνεισφέρουν στη μελέτη και τη διάσωση της μνημειακής κληρονομιάς (ICOMOS, 1964). Επίσης, αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό τα είδη και ο αριθμός των απειλών που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις σε τόπους πολιτιστικής κληρονομιάς. Εκτός από τις άμεσες απειλές για τα στοιχεία του ίδιου του τόπου κληρονομιάς, είναι πολύ πιο συχνές οι αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούνται από δυσμενείς εξελίξεις στον περιβάλλον χώρο του. Υπό τις συνθήκες αυτές, οι αποφάσεις που λαμβάνονται για την ευρύτερη οικονομική ή κοινωνική πολιτική που εφαρμόζεται στην κάθε περιοχή, πρέπει να είναι συμβατές με την ευημερία του τόπου που αποτελεί κληρονομιά.

Η αναγνώριση ότι οι τοποθεσίες πολιτιστικής κληρονομιάς δεν είναι απομονωμένες έχει οδηγήσει στην αντιμετώπιση του περιβάλλοντος τους ως ένα φυσικό περιβάλλον και παράλληλα, σε μία σειρά από κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές απειλές και ευκαιρίες. Οτιδήποτε συμβαίνει σε αυτό το περιβάλλον μπορεί να έχει επίδραση στην πολιτιστική κληρονομιά και τη σημασία της. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι απαραίτητο και ότι όλοι όσοι συμμετέχουν σε αυτό πρέπει να έχουν την ικανότητα να επηρεάζουν τις αποφάσεις σχετικά με το τι γίνεται στο περιβάλλον του μνημείου. Γενικότερα, η αλλαγή στη γύρω περιοχή είναι μάλλον αναπόφευκτη, αλλά πρέπει να ελέγχεται ώστε να μη βλάψει τις αξίες που δηλώνει η πολιτιστική κληρονομιά. Πράγματι, μπορεί να αποτελέσει εφαλτήριο για νέες χρήσεις των μνημείων, γεγονός που μπορεί, εφόσον γίνεται υπό όρους και προϋποθέσεις, να οδηγήσει στην ομαλή ένταξη των μνημείων στη σύγχρονη ζωή (UNESCO et al., 2013).

Σήμερα, οι κοινότητες εμπλέκονται όλο και περισσότερο στην κληρονομιά τους (Πίνακας 1). Υπάρχει ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση σχετικά με τη συμβολή της πολιτιστικής κληρονομιάς στην αειφόρο ανάπτυξη και την

κοινωνική συνοχή. Αυτό συνδέεται με το ολοένα και πιο ευρύ φάσμα του τι μπορεί να θεωρηθεί ως κληρονομιά, συμπεριλαμβανομένων, για παράδειγμα, ολόκληρο τοπίων, αστικών κέντρων, πρώην βιομηχανικών και στρατιωτικών εγκαταστάσεων, καθώς και ό,τι έχει παραδοσιακά θεωρηθεί ως κληρονομιά, όπως αρχαιολογικοί χώροι, ερείπια και σημαντικά κτίρια.

Η πολυπλοκότητα της πολιτιστικής κληρονομιάς θα πρέπει, επομένως, να υποχρεώσει την κοινωνία στην ολοκληρωμένη διαχείριση της, αντί για τη διατήρηση μόνο συγκεκριμένων δομών, όπως συνέβη στο παρελθόν. Λόγω του πολύ διευρυμένου πεδίου εφαρμογής του τι θεωρείται ως κληρονομιά, αυξάνεται η πολυπλοκότητα των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν τα μνημεία, καθώς και η ανάγκη να τη χρησιμοποίησή τους με βιώσιμο τρόπο, είτε για τουρισμό, είτε για άλλους σκοπούς. Κατά συνέπεια, η φροντίδα της κληρονομιάς συνεπάγεται αναπόφευκτα τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το ποια αλλαγή είναι, ή δεν είναι αποδεκτή. Σημαντικό στοιχείο είναι κάθε αλλαγή να αποτελεί προϊόν διαλόγου, εξακριβωμένης επιστημονικής τεκμηρίωσης και να καταγράφεται πλήρως για μελλοντική αναφορά (ICOMOS, 1964).

Πίνακας 1: Η εξέλιξη της αντιμετώπισης των προστατευόμενων περιοχών (συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα – Phillips, 2003).

Αντικείμενο	***Στο παρελθόν, οι προστατευόμενες περιοχές:***	***Πλέον, οι προστατευμένες περιοχές:***
Στόχοι	• Αναφέρονταν στη διατήρηση. • Αφορούσαν την προστασία. • Κηρύσσονταν κυρίως για την προστασία θεαματικών τοπίων. • Η διαχείριση γινόταν κυρίως για τους επισκέπτες και τους τουρίστες.	• Αξιοποιούνται επίσης για την επίτευξη κοινωνικών και οικονομικών στόχων. • Συχνά εξυπηρετούν επιστημονικούς και πολιτιστικούς σκοπούς. • Η διαχείριση λαμβάνει περισσότερο υπόψη τους κατοίκους της περιοχής.
Διακυβέρνηση	• Διευθύνονταν από την κεντρική κυβέρνηση.	• Διευθύνονται από οργανισμούς, με τη συμμετοχή πλήθους ενδιαφερόμενων.
Κάτοικοι	• Η διαχείριση γίνονταν εναντίων των ανθρώπων. • Η διαχείριση γινόταν χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές γνωμοδοτήσεις.	• Αξιοποιούνται με, για, και σε ορισμένες περιπτώσεις από τους κατοίκους. • Η διαχείριση γίνεται και για την κάλυψη των αναγκών των κατοίκων της περιοχής.
Ευρύτερο πλαίσιο	• Η ανάπτυξη κάθε μιας γινόταν χωριστά. • Η διαχείριση εφάρμοζε το μοντέλο των «νησιών», δηλαδή καθένα ήταν ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα.	• Γίνεται προγραμματισμός ως μέρος εθνικών, περιφερειακών και διεθνών προγραμμάτων. • Διαχειρίζονται ως «δίκτυα», δηλαδή αυστηρά προστατευόμενες περιοχές, ρυθμισμένες, αλλά και συνδεδεμένες μεταξύ τους.
Αντιλήψεις	• Θεωρούνταν πρωτίστως ένα εθνικό προτέρημα. • Προκαλούσαν ανησυχία μόνο σε εθνικό επίπεδο.	• Θεωρούνται επίσης προτέρημα της τοπικής κοινωνίας. • Προκαλούν επίσης διεθνή ανησυχία.

Αντικείμενο	***Στο παρελθόν, οι προστατευόμενες περιοχές:***	***Πλέον, οι προστατευμένες περιοχές:***
Τεχνικές διαχείρισης	• Η διαχείριση γινόταν μέσα ένα σύντομο χρονοδιάγραμμα. • Η διαχείριση γινόταν με τεχνοκρατικούς τρόπους.	• Η διαχείριση γίνεται καθόλη τη διάρκεια ζωής (lifetime). • Η διαχείριση γίνεται με πολιτικά κριτήρια.
Οικονομία	• Το κόστος κάλυπταν οι φορολογούμενοι.	• Οι πηγές χρηματοδότησης είναι πολλές.
Δεξιότητες διαχείρισης	• Η διαχείριση γινόταν από τους επιστήμονες. • Υπήρχε καθοδήγηση από εμπειρογνώμονες.	• Υπεύθυνοι για τη διαχείριση είναι άτομα πολλών ειδικοτήτων. • Το σχέδιο διαχείρισης βασίζεται στην τοπική γνώση.

1.1.2. ΜΝΗΜΕΙΑ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ ΤΗΣ UNESCO

Η UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Εκπαιδευτική Επιστημονική και Πολιτιστική Οργάνωση των Ηνωμένων Εθνών) δημιουργήθηκε το 1945 και αποτελεί έναν σημαντικό εξειδικευμένο διεθνή οργανισμό του ΟΗΕ (Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών – United Nations). Στόχος της UNESCO είναι η παγίωση της παγκόσμιας ειρήνης μέσα από την επικοινωνία των λαών δια της εκπαίδευσης, των φυσικών και κοινωνικών επιστημών και του πολιτισμού. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, η UNESCO αποτελεί ένα διεθνές κέντρο επικοινωνίας αλλά και ένα εργαστήριο ιδεών για τη δημιουργία προτύπων, τη σύναψη διεθνών συνθηκών σε διάφορα αναδυόμενα προβλήματα, όπως ηθικής τάξης, καθώς και τον σεβασμό στις κοινές αξίες κάθε πολιτισμού των λαών. Ο σύγχρονος ρόλος του οργανισμού αυτού κρίνεται πολύ σημαντικός ιδιαίτερα στην αναζήτηση παγκόσμιων οραμάτων για τον αμοιβαίο σεβασμό και την βιώσιμη ανάπτυξη των λαών, που υπαγορεύουν οι σχετικές συνθήκες των ανθρωπίνων δικαιωμάτων, με απώτερο στόχο την εξάλειψη της φτώχειας ή τουλάχιστον τον περιορισμό της.

Με τον όρο Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO, νοείται μία διακριτή θέση ή τόπος (όπως για παράδειγμα δάσος, όρος, λίμνη, έρημος, μνημείο, κτήριο, σύμπλεγμα ή πόλη), που προτάθηκε και έγινε αποδεκτό στον κατάλογο των μνημείων που διαχειρίζεται το διεθνές Πρόγραμμα Παγκόσμιας Κληρονομιάς της Επιτροπής Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO, η οποία απαρτίζεται από 21 κράτη – εταίρους εκλεγμένα από τη Γενική Συνέλευση των Εταίρων Κρατών για μία καθορισμένη περίοδο.

Το πρόγραμμα στοχεύει στην καταγραφή, την ονοματοδοσία και τη συντήρηση τόπων ιδιάζουσας πολιτιστικής ή φυσικής σημασίας για την κοινή κληρονομιά της ανθρωπότητας. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, οι καταχωρημένοι αυτοί χώροι, χρηματοδοτούνται από το Ταμείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς. Η έναρξη του προγράμματος έγινε με την αποδοχή και υιοθέτηση της Συνθήκης για την Προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής

Κληρονομιάς από το Γενικό Συνέδριο της UNESCO το 1972. Από τότε έως σήμερα έχουν αναγνωρίσει τη Συνθήκη 191 κράτη – εταίροι, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας.

Το Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO οφείλει να είναι «ιδιάζουσας παγκόσμιας αξίας» και να πληροί ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω δέκα κριτήρια ένταξης (whc.unesco.org/en/criteria):

i. Να αποτελεί αριστούργημα της ανθρώπινης δημιουργικής διάνοιας.
ii. Να επιδεικνύει σημαντικές ανθρώπινες αξίες για μακρά περίοδο χρόνου ή σε μία πολιτιστική περιοχή του κόσμου, εξελίξεις στην αρχιτεκτονική ή την τεχνολογία, τις μνημειακές τέχνες, την πολεοδομία ή τον σχεδιασμό τοπίου.
iii. Να φέρει μία μοναδική ή τουλάχιστον εξαιρετική μαρτυρία για κάποια πολιτισμική παράδοση, ζώντα ή εξαφανισμένο πολιτισμό.
iv. Να αποτελεί σημαντικό παράδειγμα τύπου κτηρίου, αρχιτεκτονικού ή τεχνολογικού συνόλου ή τοπίου που απεικονίζει σημαντική ή σημαντικές φάσεις της ανθρώπινης ιστορίας.
v. Να αποτελεί σημαντικό παράδειγμα παραδοσιακής ανθρώπινης εγκατάστασης, χερσαίας ή θαλάσσιας χρήσης (αντιπροσωπευτικής πολιτισμού ή πολιτισμών) ή ανθρώπινης αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, ιδιαίτερα όταν το τελευταίο έχει γίνει ευάλωτο υπό την πίεση ανεπανόρθωτων αλλαγών.
vi. Να συνδέεται άμεσα ή διακριτά με γεγονότα ή ζώσες παραδόσεις, με ιδέες ή πίστεις, με καλλιτεχνικά ή λογοτεχνικά έργα εξέχουσας παγκόσμιας σημασίας (το συγκεκριμένο κριτήριο θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα κριτήρια).
vii. Να εμπεριέχει εξαιρετικά φυσικά φαινόμενα ή περιοχές εξαιρετικής φυσικής ομορφιάς και αισθητικής.
viii. Να είναι ιδιάζον παράδειγμα μειζόνων φάσεων της ιστορίας της Γης, της εξέλιξης της ζωής, σημαντικών εν εξελίξει γεωλογικών διαδικασιών για την ανάπτυξη γεωσχηματισμών ή σημαντικών γεωμορφικών ή φυσιογραφικών χαρακτηριστικών.

ix. Να είναι ιδιάζον παράδειγμα σημαντικών εν εξελίξει οικολογικών και βιολογικών διαδικασιών, στην εξέλιξη και ανάπτυξη οικοσυστημάτων χερσαίων, γλυκού ύδατος, παράκτιων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων και πληθυσμών φυτών και ζώων.

x. Να περιέχει τα σημαντικότερα φυσικά ενδιαιτήματα συντήρησης της βιοποικιλότητας, να περιλαμβάνει απειλούμενα είδη παγκόσμιας αξίας, από την άποψη της επιστήμης ή της διατήρησης του είδους.

Για να κριθεί η εξαιρετική παγκόσμια αξία του, ένα μνημείο πρέπει να κριθεί και ως προς δύο επιπλέον παράγοντες: την αυθεντικότητα ή/και την ακεραιότητά του και παράλληλα, πρέπει να απολαμβάνει ιδιαίτερης προστασίας και συστημάτων διαχείρισης, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του. Το κριτήριο της αυθεντικότητας αναφέρεται στα μνημεία τα οποία εντάσσονται με βάση τα παραπάνω κριτήρια i – vi, ενώ το κριτήριο της ακεραιότητας αναφέρεται σε όλα τα μνημεία, ανεξαρτήτως κριτηρίου ένταξης.

1.1.3. Κανονες Που Διεπουν Την Προστασια Της Πολιτιστικης Κληρονομιας

Κατά τη διαδικασία μιας μελέτης αποκατάστασης και συντήρησης ενός μνημείου πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη οι βασικές αρχές που έχουν γίνει αποδεκτές τόσο διεθνώς, όσο και στο εκάστοτε τοπικό νομικό δίκαιο. Οι πρώτες αναφορές στην προστασία πολιτιστικών αγαθών σε διεθνές επίπεδο εμφανίζονται το 17ο αιώνα σε συνθήκες ειρήνης και αφορούν την επιστροφή έργων τέχνης που αφαιρέθηκαν κατά τη διάρκεια εχθροπραξιών. Κατά τον 19ο αιώνα ξεκινά ο ορισμός της έννοιας του μνημείου και ο προβληματισμός της προστασίας και αποκατάστασης. Οι εθνικοί κατάλογοι μνημείων ξεκίνησαν από το πρώτο μισό του 19ου αιώνα, ενώ το 1890 ιδρύονται οι πρώτες οργανώσεις για την προστασία των τόπων φυσικού κάλλους και εμφανίζονται οι πρώτες ιδιωτικές πρωτοβουλίες για την προστασία των παλαιών πόλεων. Η Νομοθεσία διαμορφώνεται σταδιακά από τα τέλη του 19ου αιώνα.

Το 1931 το διοργανώνεται το 1ο συνέδριο για τη διατήρηση των μνημείων στην Αθήνα, με συμμετοχή 118 ευρωπαίων επιστημόνων (αρχαιολόγων, ιστορικών τέχνης, αρχιτεκτόνων, συντηρητών μνημείων). Συζητούνται οι βασικές αρχές αποκατάστασης, τα υλικά και οι τεχνικές, η χρήση των μνημείων και για πρώτη φορά εμφανίζεται ο όρος «κληρονομιά της ανθρωπότητας». Ακολουθεί το 1933 το συνέδριο του CIAM (Congrès International d'Architecture Moderne – International Congresses of Modern Architecture – Διεθνές Συνέδριο Μοντέρνας Αρχιτεκτονικής) στην Αθήνα, από τα αποτελέσματα του οποίου συντάσσεται η Χάρτα της Αθήνας (1943).

Το 1964 δημοσιεύεται η Χάρτα της Βενετίας (ICOMOS, 1964). Καταρτίστηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων, που πραγματοποιήθηκε στη Βενετία στις 25 – 31 Μαΐου 1964 και που διοργανώθηκε από το ICOMOS (Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών – International Council on Monuments and Sites). Η Χάρτα αυτή αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα διαχρονικό πλαίσιο κατευθυντήριων αρχών που διέπουν τη θεωρία και κυρίως την πράξη της αποκατάστασης και της

συντήρησης κάθε είδους μνημείων. Περιλαμβάνει 16 άρθρα και εισάγει έννοιες όπως αυτή της διεπιστημονικότητας, ενώ επεκτείνει την έννοια του ιστορικού μνημείο, ώστε αυτό να περιλαμβάνει την μεμονωμένη αρχιτεκτονική δημιουργία καθώς και την αστική η αγροτική τοποθεσία που αποτελεί μαρτυρία ενός ειδικού πολιτισμού, μιας σημαντικής εξέλιξης, η ενός ιστορικού γεγονότος. Καλύπτει όχι μόνο τις μεγάλες, αλλά και τις ταπεινές δημιουργίες, επιτρέπονται οι απαραίτητες διαρρυθμίσεις για την εξυπηρέτηση της τυχόν απαιτούμενης νέας χρήσης και αποκλείεται κάθε προσθήκη η κατεδάφιση που θα μπορούσε να αλλάξει το άμεσο παραδοσιακό περιβάλλον. Επιπλέον, επιβάλλεται η διατήρηση των αξιόλογων προσθηκών όλων των περιόδων του μνημείου και ορίζει ότι η αποκατάσταση σταματά εκεί που τελειώνουν οι ενδείξεις και ξεκινούν οι υποθέσεις για το μνημείο. Οι προσθήκες των στοιχείων που λείπουν πρέπει να είναι ορατές και να ξεχωρίζουν, ενώ προσθήκες σύγχρονων στοιχείων, επιτρέπονται με πολλούς περιορισμούς.

Το 1972 υπογράφεται η σύμβαση για την προστασία της πολιτιστικής και φυσικής παγκόσμιας κληρονομιάς, ενώ ακολουθεί το 1975 η Διακήρυξη του Άμστερνταμ (Ευρωπαϊκή Χάρτα για την Αρχιτεκτονική Κληρονομιά). Στην τελευταία εισάγεται ο όρος της «αρχιτεκτονικής κληρονομιάς», που περιλαμβάνει όχι μόνο το μεμονωμένο μνημείο με το άμεσο περιβάλλον του, αλλά επίσης ολόκληρες πόλεις και χωριά ή τμήματα πόλεων ιστορικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος και ακόμη ιστορικούς κήπους και πάρκα. Ακόμη, εισάγεται ο όρος της «ολοκληρωμένης διατήρησης» στην οποία προτεραιότητα έχει η διατήρηση της λειτουργικής και κοινωνικής ιδιαιτερότητας των ιστορικών περιοχών, ενώ εκτός από την πολιτιστική αξία των κτιρίων εισάγεται και η αξία χρήσης τους, δηλαδή οι χρήσεις εκείνες οι οποίες θα αντιστοιχούν σε ανάγκες της σύγχρονης ζωής και παράλληλα θα σέβονται τον ιδιαίτερο χαρακτήρα τους και θα εξασφαλίζουν τη διατήρησή τους.

Το 1985 υπογράφεται η Σύμβαση της Γρανάδας και το 1987 η Χάρτα Ιστορικών Πόλεων (Χάρτα της Ουάσιγκτον). Το 1998 συντάσσεται η νέα Χάρτα της Αθήνας, η οποία ορίζει πως ο πολεοδομικός σχεδιασμός πρέπει να ασκήσει ειδικό ρόλο για να εξασφαλίσει την καλύτερη ποιότητα σχεδίου με σεβασμό στο

χαρακτήρα της πόλης και στην οργάνωση του δημόσιου χώρου της και πως ο σχεδιασμός θα πρέπει να βασίζεται σε μια εις βάθος ανάλυση της ιστορικής, λειτουργικής, μορφολογικής και πολιτιστικής φυσιογνωμίας της περιοχής και στην αναγνώριση των ιδιαίτερων ποιοτήτων της. Ακόμη, εισάγονται έννοιες όπως αυτή της βιώσιμης ανάπτυξης των οικοσυστημάτων της πόλης, της ενδυνάμωση της οικονομικής βάσης της πόλης και της αποφυγής μονολειτουργικών ζωνών στην πόλη. Η πρώτη συμπλήρωση της νέας Χάρτας της Αθήνας πραγματοποιήθηκε το 2003, με την εισαγωγή εννοιών όπως της διευκόλυνσης των ανθρώπινων επαφών, της αύξηση των τόπων χαλάρωσης και αναψυχής, της βελτίωσης του ατομικού και συλλογικού αισθήματος ασφάλειας και της διατήρησης του υψηλού αισθητικά περιβάλλοντος σε όλη την πόλη.

Το 2011 υπογράφονται οι Αρχές της Βαλέτα για τις ιστορικές πόλεις. Σύμφωνα με αυτές τις αρχές, οι ιστορικές πόλεις και τα ιστορικά σύνολα συγκροτούνται από υλικά και άυλα στοιχεία και, ως ζωντανοί οργανισμοί, υπόκεινται σε συνεχείς αλλαγές. Οι αλλαγές, όταν κατευθύνονται σωστά, μπορούν να αποτελέσουν ευκαιρία, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των ιστορικών πόλεων, οικισμών και αστικών περιοχών, με βάση τα ιστορικά χαρακτηριστικά τους. Κάθε παρέμβαση πρέπει να έχει ως στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων και της ποιότητας του περιβάλλοντος και να πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Πρέπει να γίνονται σεβαστές οι πολιτιστικές διαφορές και παραδόσεις των διαφορετικών κοινωνιών που κατοίκησαν διαχρονικά τις ιστορικές πόλεις και κάθε ενέργεια πρέπει να βασίζεται σε προκαταρκτικές διεπιστημονικές μελέτες (Μαΐστρου, 2014).

Στην Ελλάδα, η πρώτη σχετική νομοθεσία περιλάμβανε τους νόμους ΒΧΜΣΤ του 1889 και 5351/1932, περί αρχαιοτήτων. Σήμερα, η προστασία των μνημείων κατοχυρώνεται από το ισχύων Σύνταγμα της Ελλάδας, στο άρθρο 24 §1 και §6 (Η' Αναθεωρητική Βουλή των Ελλήνων, 2008). Επιπλέον κατοχυρώνεται από μία σειρά διεθνών ρυθμίσεων και οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς κατοχυρώνεται στη χώρα

μας, από μία σειρά από νόμους, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι οι ακόλουθοι (Χατζοπούλου, 2014):

- ν. 1337/1983 (νέος οικιστικός νόμος)
- ν. 1577/1985 (Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός – ΓΟΚ)
- ν. 1650/1986 περί προστασίας του περιβάλλοντος
- ν. 2039/1992 (υιοθέτηση της Σύμβασης της Γρανάδας)
- ν. 2508/1997 περί προστασίας του περιβάλλοντος, οικονομικής ανάπτυξης και κοινωνικής συνοχής
- ν. 2742/1999 περί χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρας ανάπτυξης και άλλες διατάξεις
- ν. 3028/2002 περί προστασίας των αρχαιοτήτων και εν γένει της πολιτιστικής κληρονομιάς
- ν. 4067/2012 (νέος ΓΟΚ)

1.1.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΩΝ

Το σύνολο των Χαρτών και των διατάξεων περί της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς αποκαλύπτουν ένα σύνολο αξιών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να ιεραρχούνται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της αποκατάστασης ενός μνημείου. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα Συστήματα Αξιών. Από αυτά, πρωτοπόρο για την εποχή του θεωρείται του Alois Riegl (1903), το οποίο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, χωρίζει τις αξίες σε Μνήμης και Παρόντος. Εξαιρετικά σημαντικά είναι τα Συστήματα Αξιών του Bernard M. Feilden (1979, 1982 και 1988), το πιο πρόσφατο από τα οποία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, χωρίζει τις αξίες σε Συγκινησιακές, Πολιτιστικές και Χρήσης. Τέλος, ιδιαίτερης σπουδαιότητας είναι το Σύστημα Αξιών του Μ. Κορρέ (1983), το οποίο αναλύεται εκτενέστερα στον Πίνακα 4 (Κορρές, 2014). Το πιο από όλα τα Συστήματα Αξιών θα ακολουθηθεί σε μια μελέτη αποκατάστασης ενός μνημείου, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι η επιλογή των ίδιων των μελετητών, οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προτεραιότητες της εποχής, οι εκάστοτε επιστημονικές αντιλήψεις κ.λπ..

Πίνακας 2: Το Σύστημα Αξιών του Alois Riegl (1903). Η σημαντικότητα αυξάνεται προς τα πάνω και συνεπώς η κατηγορία 1 λογίζεται ως σπουδαιότερη της 2 και αντίστοιχα η υποκατηγορία α λογίζεται ως σπουδαιότερη της β (Κορρές, 2014).

1. Αξίες Μνήμης
α) Αξία της ηλικίας
β) Ιστορική αξία
γ) Αξία εξειδικευμένης αναμνηστικής λειτουργίας
2. Αξίες Παρόντος
α) Χρηστική αξία
β) Καλλιτεχνική αξία
β1) Αξία δημιουργικής πρωτοτυπίας (πρωταρχική καλλιτεχνική αξία)
β2) σχετική καλλιτεχνική αξία

Πίνακας 3: Το πιο πρόσφατο από τα Συστήματα Αξιών του Bernard M. Feilden (1988). Η σημαντικότητα αυξάνεται προς τα πάνω και συνεπώς η κατηγορία 1 λογίζεται ως σπουδαιότερη της 2 και αντίστοιχα η υποκατηγορία α λογίζεται ως σπουδαιότερη της β (Κορρές, 2014).

1. Συγκινησιακές Αξίες
α) Θαυμασμός
β) Ταυτότης
γ) Ιστορική συνέχεια
δ) Πνευματική και συμβολική
ε) Ιερότης
2. Πολιτιστικές Αξίες
α) Αξία τεκμηρίου
β) Ιστορική αξία
γ) Αρχαιολογική αξία, αξία πλικίας και σπανιότης
δ) Αισθητική αξία και αξία συμβόλου
ε) Αρχιτεκτονική αξία
ζ) Αξία αστικού τοπίου, φυσικού τοπίου και οικολογική αξία
η) Επιστημονική και τεχνολογική αξία
3. Χρηστικές Αξίες
α) λειτουργική
β) οικονομική
γ) κοινωνική
δ) πολιτική

Πίνακας 4: Το Σύστημα Αξιών του Μ. Κορρέ (1983), στο οποίο περιγράφονται αναλυτικά οι έννοιες που εντάσσονται σε κάθε κατηγορία αξιών. Η σημαντικότητα αυξάνεται προς τα πάνω και συνεπώς η αισθητική αξία λογίζεται ως η σπουδαιότερη και η συγκινησιακή αξία ως η λιγότερο σπουδαία (Κορρές, 2014).

Αισθητική Αξία
Εξαρτάται από την καλλιτεχνική αξία ως εκτιμάται σήμερα, από την κατάσταση του υλικού και από το περιβάλλον του μνημείου συμπεριλαμβανομένων φωτός και καιρού.
Καλλιτεχνική Αξία
Εξαρτάται μόνον από τη μορφή και το στυλ ως εκτιμώνται σήμερα και ομοίως από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού.

Ιστορική Αξία
Εξαρτάται μόνον από τις υφιστάμενες ιστορικές μαρτυρίες αναφορικώς προς το αντικείμενο ή από παρόμοιας αξίας αρχαιολογικές μαρτυρίες.
Αρχαιολογική Αξία
Εξαρτάται μόνον από τις αναγνωριζόμενες υλικές μαρτυρίες.
Αξία Τεκμηρίου
Ως προς την Ιστορία της Τέχνης την Ιστορία της Τεχνικής, την Ιστορία της Επιστήμης κ.λπ., ή ως προς οιονδήποτε συνδυασμό αυτών.
Αξία Μνήμης
Ατομικής ή συλλογικής.
Αξία Συμβολισμού
Ατομική ή συλλογική με πνευματικό, εθνικό, κοινωνικό, πολιτικό, ιστορικό ή θρησκευτικό νόημα.
Αξία Τοποσήμου
Εξαρτάται από την ορατότητα, την ατομικότητα και την απόσταση από άλλα τοπόσημα.
Αξία Σπανιότητος
1. Γνήσια ή απόλυτη αξία σπανιότητος: γνώρισμα εξαιρετικών επιτευγμάτων. Τα αντικείμενα αυτά είναι σπάνια όχι εξ αιτίας τυχαίας εξαφάνισης ή μη ανακάλυψης άλλων του αυτού είδους, ούτε εξ αιτίας μη αναγνώρισης (για παράδειγμα για λόγους ιδεολογικών προτιμήσεων) άλλων παρόμοιων ως ισαξίων, αλλά μόνον επειδή προϋποθέτουν υψίστη ανθρώπινη δεξιότητα ή τεχνογνωσία ή εξόχως δυσεύρετη ύλη ή αμύθητη δαπάνη, ή, κατά μείζονα λόγο, εάν προϋποθέτουν συνδυασμό των προηγουμένων. **2. Συμπτωματική ή τυχαία αξία σπανιότητος:** ανήκει σε αντικείμενα τα οποία δεν είναι μεν σπουδαία (δύνανται μάλιστα να είναι και ευτελή), υφίστανται όμως σε ελάχιστο αριθμό, είτε εξ αρχής, είτε κατόπιν συμπτωματικής εξαφάνισης όλων των άλλων του είδους των, όσον πολυπληθές και αν υπήρξε αυτό κάποτε. **3. Σχετική αξία σπανιότητος:** αποτέλεσμα σύγκρισης της σπανιότητος ενός αντικειμένου προς τη σπανιότητα ενός άλλου ή άλλων αντικειμένων.
Υλική Αυθεντικότης
Εξαρτάται από το ποσοστόν αυθεντικού υλικού από συγκινησιακής απόψεως ή επί τη βάσει αναγνωρίσιμων εκδηλώσεων ηλικίας.
Χρηστική Αξία
Εξαρτάται από την λειτουργική καταλληλότητα και την κατάσταση διατηρήσεως.
Συγκινησιακή Αξία
Εξαρτάται από το νόημα, τη σπουδαιότητα, την υλική αυθεντικότητα, την ηλικία, τη φήμη και από τις άλλες αξίες χωριστά ή σε συνδυασμό.

1.2. ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

1.2.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά με τα οποία ασχολείται η επιστήμη και τεχνική των υλικών μπορούν να ταξινομηθούν στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 5, χωρίς φυσικά η κατηγοριοποίηση αυτή να είναι απόλυτη. Ανάλογα με την εφαρμογή τους, τα δομικά υλικά παρουσιάζουν μια σειρά από ιδιότητες, όπως αυτές αποτυπώνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 5: Γενικές κατηγορίες των υλικών. Υπάρχουν υλικά που ανήκουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες (Ashby and Jones, 1996).

Κατηγορία	***Υλικά***
Μέταλλα	Σίδηρος και χάλυβες Αλουμίνιο και τα κράματά του Χαλκός και τα κράματά του Νικέλιο και τα κράματά του Τιτάνιο και τα κράματά του
Κεραμικά και ύαλοι	Αλουμίνα (Al_2O_3, σάπφειρος) Μαγνήσια (MgO) Πυριτικοί ύαλοι και οξείδια του πυριτίου Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC) Νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) Τσιμέντο και μίγματα του Κονιάματα
Σύνθετα υλικά	Fiberglass (GFRP) Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες Στερεά διαλύματα κεραμικών και μετάλλων (Cermets)
Πολυμερή	Πολυεθυλένιο (PE) Πολυστυρένιο (PS) Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) Ελαστομερή και φυσικό καουτσούκ
Φυσικά υλικά	Ξύλο Δομικοί λίθοι

Πίνακας 6: Κύριες ιδιότητες των δομικών υλικών (Ashby and Jones, 1996).

Κατηγορία	***Ιδιότητες***
Φυσικές	Πυκνότητα Πορώδες Διαπερατότητα
Μηχανικές	Μέτρο ελαστικότητας Αντοχή εφελκυσμού και παραμόρφωσης Αντοχή θραύσης Σκληρότητα Αντοχή κόπωσης Αντοχή σε ερπυσμό Απόσβεση
Θερμικές	Θερμική αγωγιμότητα Θερμοχωρητικότητα Συντελεστής θερμικής διαστολής
Οικονομικές	Κόστος και διαθεσιμότητα Ευκολία ανακύκλωσης
Παραγωγή	Ευκολία παραγωγής Συμβατότητα με άλλα υλικά Επεξεργασία φινίρισμα
Αισθητικές	Χρώμα Υφή

1.2.2. Κυκλος Ζωης Των Υλικων

Τα κύρια στοιχεία του ολοκληρωμένου σχεδιασμού κύκλου ζωής των υλικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Για κάθε εφαρμογή, τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κάποιου στοιχείου, έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής ενός υλικού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Το περιβάλλον παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στη διατήρηση, την αύξηση, ή τη μείωση της διάρκειας ζωής ενός υλικού.



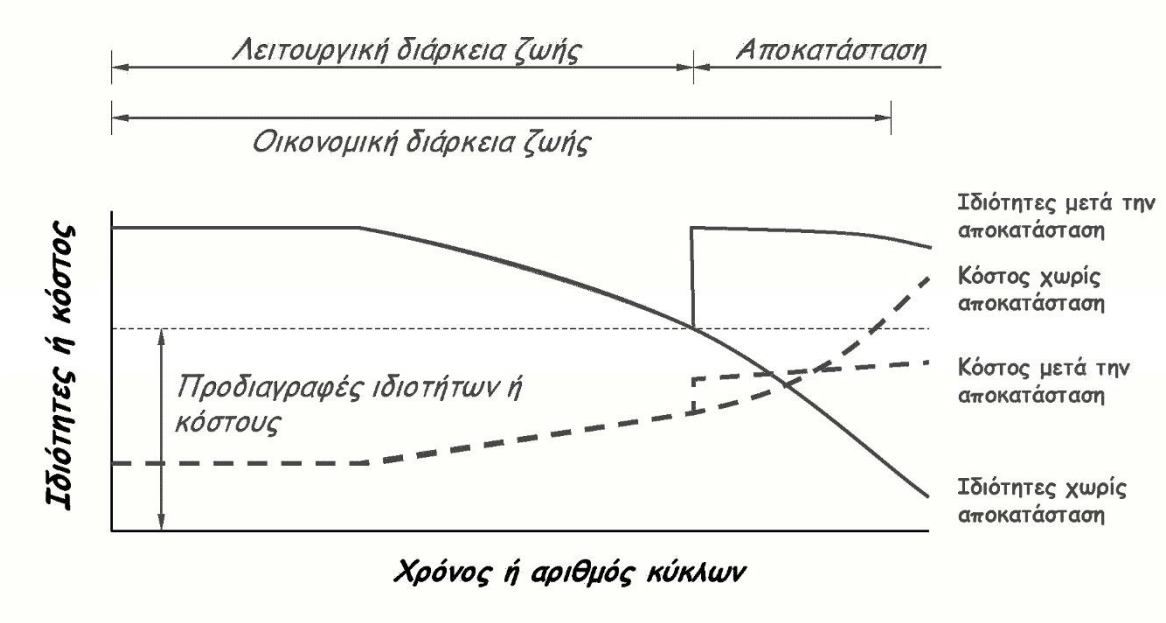
Σχήμα 2: Κύριοι παράγοντες για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό του κύκλου ζωής ενός υλικού (Μοροπούλου, 2010).

Είναι χρήσιμο να αποσαφηνιστούν μερικοί ορισμοί, ώστε να γίνει κατανοητή η έννοια της διάρκειας ζωής ενός υλικού και πως αυτή μπορεί να εκτιμηθεί. Τα υλικά υπόκεινται σε συνεχή φθορά κατά τη διάρκεια της χρήσης τους. Η φθορά αυτή μπορεί να είναι αμελητέα ή ελάχιστα διακριτή σε ανθρώπινα χρονικά όρια, ή σχετικά ευδιάκριτη με έντονη δράση.

Ως λειτουργική διάρκεια ζωής ενός υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή, ορίζεται το χρονικό διάστημα (ή αριθμός κύκλων λειτουργίας) που παρέρχεται μέχρι την απώλεια μάζας, ή μείωση κάποιας ιδιότητας (μηχανική, φυσική, χημική κ.λπ.) του υλικού, σε τέτοιο βαθμό που καθιστά την χρήση του μη ικανοποιητική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Σχήμα 3). Η λειτουργική διάρκεια ζωής ενός υλικού μπορεί να εκτιμηθεί με δοκιμές κόπωσης ή προηγούμενη εμπειρία με παρόμοια υλικά. Παράλληλα, υπάρχουν σύγχρονα θεωρητικά μοντέλα που αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για τον προσδιορισμό της λειτουργικής διάρκειας ζωής ενός υλικού, σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Ως οικονομική διάρκεια ζωής ενός υλικού, ορίζεται το χρονικό διάστημα (ή αριθμός κύκλων λειτουργίας) πέραν του οποίου είναι οικονομικά ασύμφορη η διατήρηση του υπάρχοντος υλικού (Σχήμα 3). Αυτό συμβαίνει όταν το συνολικό κόστος συντήρησης, αποκατάστασης, αποτίμησης και αντικατάστασης του υπάρχοντος υλικού είναι μεγαλύτερο από το ολικό κόστος ζωής ενός νέου υλικού ίδιας ή διαφορετικής σύστασης. Για παράδειγμα, μια παραδοσιακή τοιχοποιία είναι ίσως πιο οικονομικό να αντικατασταθεί με μια σύγχρονη τοιχοποιία, αν το κόστος συντήρησης των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη είναι συγκριτικά δυσανάλογο σε σχέση με το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης σύγχρονων υλικών.

Το κόστος ζωής (lifetime cost) ενός υλικού συμπεριλαμβάνει το κόστος κατασκευής, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος προστασίας, το κόστος συντήρησης, το κόστος αποκατάστασης, το κόστος αντικατάστασης και την εναπομένουσα αξία (αξία ενός προϊόντος στο τέλος της ζωής του, για παράδειγμα πώληση ενός αυτοκινήτου για σίδερα). Κατά την φάση του σχεδιασμού λειτουργικών και δομικών στοιχείων, λαμβάνονται υπόψη τόσο το κόστος ζωής του υλικού όσο και οι ιδιότητές του προκειμένου να γίνει η επιλογή του πλέον κατάλληλου υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή (Μοροπούλου, 2010).



Σχήμα 3: Η μεταβολή των ιδιοτήτων (συνεχής γραμμή) ή του κόστους (διακεκομμένη γραμμή) ενός υλικού, σαν συνάρτηση του χρόνου ή αριθμού κύκλων λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι, μετά το πέρας ενός αρχικού διαστήματος και όσο ο χρόνος περνάει, τόσο οι ιδιότητες αρχίζουν να φθίνουν. Η αποκατάσταση πραγματοποιείται (ιδανικά) τη στιγμή που οι ιδιότητες του υλικού φτάνουν το κατώτατο όριο των προδιαγραφών που έχουν τεθεί (λειτουργική διάρκεια ζωής). Κατόπιν, αποκαθιστά τις ιδιότητες σε ένα επίπεδο (σχεδόν) ίδιο με το αρχικό και εν συνεχεία οι ιδιότητες αρχίζουν να φθίνουν ξανά, οπότε και μία νέα αποκατάσταση είναι αναγκαία. Αντίθετα, μετά το πέρας ενός αρχικού διαστήματος και όσο ο χρόνος περνάει τόσο το κόστος αυξάνεται. Η αποκατάσταση αυξάνει το κόστος απότομα, αλλά εν συνεχεία το κόστος λαμβάνει τιμές μικρότερες από αυτές που θα λάμβανε αν δεν είχε πραγματοποιηθεί η αποκατάσταση. (Μοροπούλου, 2010).

1.2.3. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Φθορά ονομάζεται η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών κ.ά.) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής κ.ά.), της συνοχής, των διαστάσεων και της αισθητικής των υλικών. Τα διάφορα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στη διεπιφάνεια μεταξύ του περιβάλλοντος και των υλικών και κατατάσσονται γενικά ως ακολούθως (Μοροπούλου, 2010):

- Μηχανική ή φυσική φθορά. Αφορά σε μηχανική χαλάρωση των δομών και διαχωρισμό των συστατικών του υλικού λόγω θλιπτικών, εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων, αναπτυσσόμενων δυνάμεων εντός του υλικού λόγω ανισοτροπίας ή διαδικασιών που σχετίζονται με την παρουσία διαλυτών αλάτων και των κύκλων ύγρανσης – ψύξης. Παράδειγμα φυσικής φθοράς είναι η φθορά του τσιμέντου λόγω τριβής.
- Χημική φθορά. Περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο υλικό υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων ή λόγω θερμοδυναμικής αστάθειας ορισμένων συστατικών του υλικού. Παράδειγμα χημικής φθοράς είναι η επίδραση της όξινη βροχής σε δομικά υλικά.
- Βιολογική φθορά. Αφορά στην επίδραση διαφόρων οργανισμών στα υλικά και σχετίζεται με τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες φθοράς.

Οι παράγοντες φθοράς χωρίζονται σε ενδογενείς παράγοντες, δηλαδή εκείνους που αφορούν στο υλικό και σε εξωγενείς παράγοντες, δηλαδή εκείνους που αφορούν στο περιβάλλον. Ειδικότερα, εν συνεχεία αναλύονται οι ενδογενείς παράγονες (Μοροπούλου, 2010).

Το είδος του δομικού υλικού. Χωρίς να είναι απόλυτο, τα μέταλλα είναι πιο επιρρεπή σε συγκεκριμένους τύπους μηχανικής φθοράς όπως η τριβή και η κόπωση και χημικής φθοράς (ανάπτυξη σκωρίας) παρά στους υπόλοιπους, όπως η δράση διαλυτών αλάτων, η βιολογική φθορά κ.λπ.. Επιπλέον, τα προϊόντα της οξείδωσης αυξάνουν τον όγκο των μεταλλικών στοιχείων, τα οποία, όταν είναι εγκιβωτισμένα σε κάποιο άλλο υλικό, ασκούν ισχυρές μηχανικές τάσεις και ενδέχεται να οδηγήσουν στη ρήξη του υλικού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η φθορά που έχουν υποστεί τα μάρμαρα της Ακρόπολης από τα μεταλλικά στοιχεία (σίδηρος) που τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό τους κατά την επέμβαση που πραγματοποιήθηκε από τον Μπαλάνο και τα οποία σήμερα έχουν σε μεγάλο βαθμό σκουριάσει. Αντίθετα με τα μέταλλα, δομικά υλικά όπως η πέτρα, τα κονιάματα και τα κεραμικά (συμπεριλαμβανομένου του τσιμέντου) είναι πιο επιρρεπή σε διαφορετικών τύπων φθορές, όπως η χημική φθορά από την όξινη βροχή και από τα καυσαέρια, η δράση διαλυτών αλάτων και οι κύκλοι ύγρανσης – ξήρανσης.

Οι ιδιότητες (μηχανικές, φυσικοχημικές, ορυκτολογικές) του υλικού. Οι ιδιότητες ενός υλικού επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από συγκεκριμένους εξωγενείς παράγοντες. Είναι σημαντικό να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του εφαρμοζόμενου εξωγενή παράγοντα και της ιδιότητας η οποία δύναται να μεταβληθεί, ώστε η συγκεκριμένη ιδιότητα να καταστεί τελικά μέτρο αξιολόγησης της φθοράς του υλικού.

Η μακροδομή και η μικροδομή του υλικού και η χωρική κατανομή των ιδιοτήτων. Ιδιαίτερα η μικροδομή, η οποία διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στις ιδιότητες (μηχανικές, φυσικές, φυσικοχημικές) των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξάπλωση της φθοράς στο υλικό. Τα όρια της κλίμακας για το διαχωρισμό μεταξύ της μακροδομής και της μικροδομής εξαρτώνται από την μετρούμενη ιδιότητα.

Η προέλευση του υλικού και η απόληψή του. Είναι κατανοητό ότι η σύσταση και η μικροδομή του υλικού επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευσή του. Αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε σύνθετα υλικά όπως το τσιμέντο και τα κονιάματα, όπου η προέλευση των πρώτων υλών καθορίζει άμεσα την σύσταση του σύνθετου υλικού. Τα παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως η πέτρα και το μάρμαρο, εξαρτώνται ακόμα περισσότερο από την προέλευσή τους.

Η τεχνολογία παραγωγής του υλικού. Η τεχνολογία παραγωγής είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να μεταβάλλει σημαντικά τόσο την μικροδομή, όσο και τις ιδιότητες των δομικών υλικών. Η εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας παραγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα κονιάματα

αποκατάστασης, ώστε η συμβατότητά τους με τα υπάρχοντα υλικά να είναι η βέλτιστη δυνατή.

Η συμβατότητα του υλικού με άλλα υλικά. Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μία κατασκευή πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους (βλ. §2.1.3).

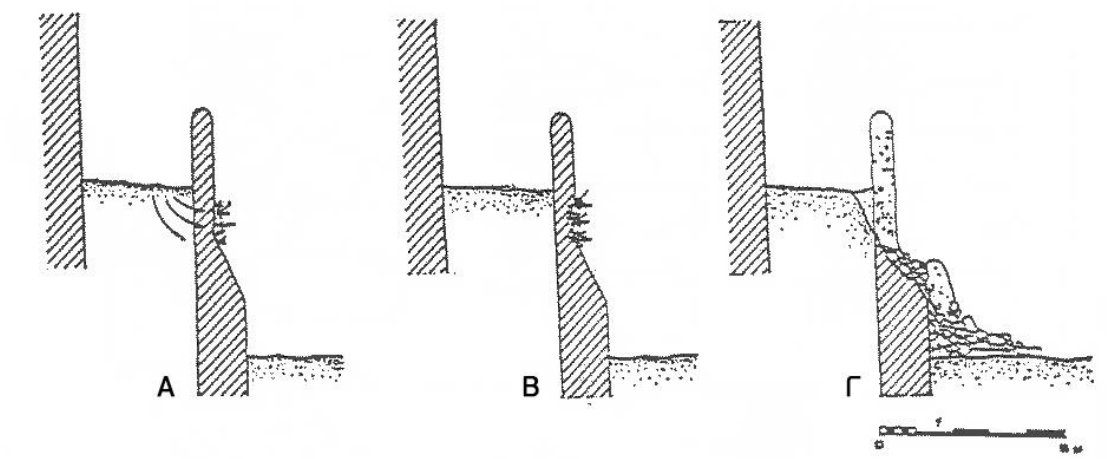
Αντίστοιχα, οι παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον (εξωγενείς παράγοντες) αναλύονται στη συνέχεια (Μοροπούλου, 2010).

Το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων (βιομηχανική, αστική ή θαλασσινή ατμόσφαιρα) που επιδρούν στο υλικό. Από το είδος αυτό καθορίζονται οι μηχανισμοί της φθοράς στα δομικά υλικά. Συγκεκριμένα, σε μία επιφάνεια μπορεί να επιδρούν ατμοσφαιρικά σωματίδια, αερολύματα, διαφόρων ειδών αποθέσεις σε ξηρή και υγρή φάση, σημαντικές θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετός, διαλυτά άλατα κ.ά.. Ειδικότερα, σε ένα υλικό μπορεί να εμφανιστούν επιφανειακές κρούστες ή να πραγματοποιηθεί κρυστάλλωση αλάτων. Στις επιφανειακές κρούστες εντάσσεται η γυψοποίηση των μαρμάρων και οι όξινη ανθρακική κρούστα.

Η γυψοποίηση αναφέρεται στον σχηματισμό γύψου, δηλαδή $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, με προσβολή του $Ca(OH)_2$ ή του $CaCO_3$ των λίθων από θειικό οξύ. Ο γύψος στην επιφάνεια της πέτρας είναι διαλυτός και με έκπλυση (για παράδειγμα από τη βροχή) αποκαλύπτει το υγιές, μη γυψοποιημένο στρώμα της πέτρας, δηλαδή επιτρέπει την εξέλιξη του φαινομένου σε βάθος. Αυτό έχει σαν γενικότερο αποτέλεσμα την σταδιακή απαλοιφή των λεπτομερειών της επιφάνειας της πέτρας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η γυψοποίηση του πεντελικού μαρμάρου της Ακρόπολης, η οποία χρόνο με τον χρόνο απαλείφει τις λεπτομέρειες από τις Καρυάτιδες.

Η όξινη ανθρακική κρούστα αναφέρεται στη μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου, δηλαδή $CaCO_3$, σε όξινο ανθρακικό ασβέστιο, δηλαδή $Ca(HCO_3)_2$, το οποίο στην συνέχεια με την εξάτμιση του νερού μετατρέπεται σε ανακρυσταλλωμένο ανθρακικό ασβέστιο. Το στρώμα αυτό, θεωρείται ότι δεν έχει καλή συνοχή με το υποκείμενο ανθρακικό ασβέστιο (της κύριας μάζας της

πέτρας) και οδηγεί σε χαλάρωση της κρούστας, που σε συνέργια με βιολογική δραστηριότητα, και την χαλάρωση των αρμών μπορεί να προκαλέσει τοπικές καταρρεύσεις σε τοιχοποιίες. Η εξέλιξη αυτού του φαινομένου φαίνεται στο Σχήμα 4.

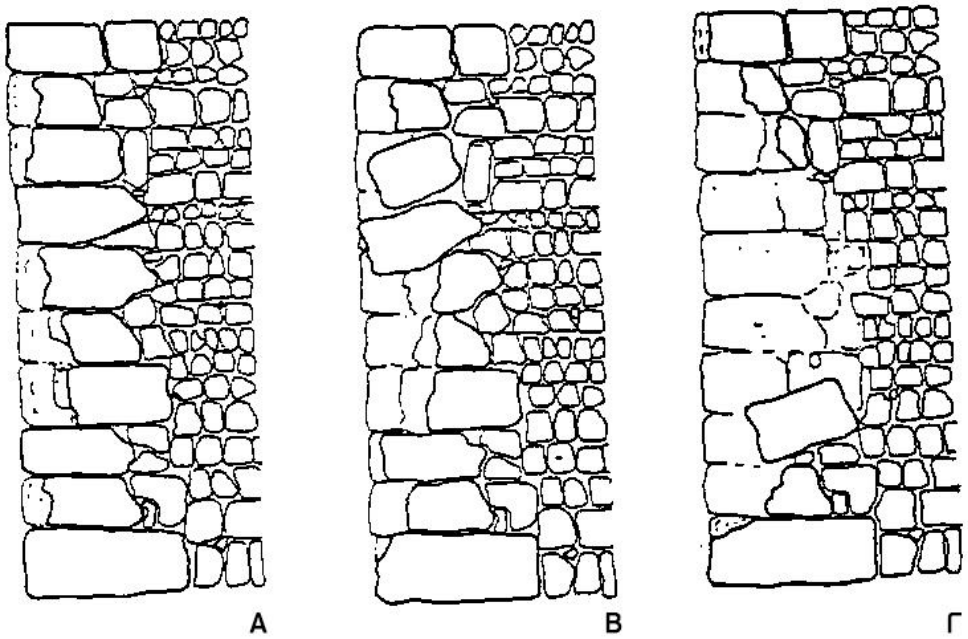


Σχήμα 4: Μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας από όξινη ανθρακική κρούστα (Μοροπούλου, 2014β).

Η κρυστάλλωση των αλάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η θαλασσινή ατμόσφαιρα είναι πολύ πλούσια σε χλωριούχο νάτριο. Το υδατικό διάλυμα των αλάτων μεταφέρεται στην επιφάνεια του λίθου, όπου πραγματοποιείται εξάτμιση του διαλύτη (δηλαδή του νερού). Αποτέλεσμα της εξάτμισης είναι η κρυστάλλωση των αλάτων εντός των πόρων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα ένα (ή παραπάνω) από τα ακόλουθα τρία φαινόμενα:

- Εξάνθηση, κατά την οποία η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από της εξάτμισης και τα άλατα κρυσταλλώνονται έξω από τους πόρους, σχηματίζοντας αποθέσεις.
- Κρυτττοεξάνθηση, κατά την οποία η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή της εξάτμισης και έτσι το υδάτινο μέτωπο υποχωρεί στο εσωτερικό της πέτρας και η κρυστάλλωση γίνεται μέσα στους πόρους.
- Κυψέλωση, κατά την οποία η επιφάνεια της πέτρας εκφυλίζεται με τη δημιουργία σπηλαιώσεων και εμφανίζεται σε περιοχές που εκτίθενται σε

ισχυρούς ανέμους. Το Σχήμα 5 δείχνει τον μηχανισμό κατάρρευσης της τοιχοποιίας, λόγω κυψέλωσης.



Σχήμα 5: Μηχανισμός κυψέλωσης αλάτων σε τοιχοποιία (Μοροπούλου, 2014β).

Η ένταση, η διάρκεια και η συχνότητα της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων. Σε γενικές γραμμές, η ένταση της φθοράς των δομικών υλικών αυξάνεται με αύξηση της έντασης, της διάρκειας και της συχνότητας της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων. Και οι τρεις αυτοί εξωγενείς παράγοντες, δρουν συνήθως αθροιστικά, αλλά τα αποτελέσματά τους εξαρτώνται σημαντικά από αρκετούς ενδογενείς παράγοντες, όπως το είδος και η μικροδομή του υλικού.

Το είδος των μηχανικών φορτίσεων. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι εφελκυστικές, οι διατμητικές ή θλιπτικές τάσεις, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η τριβή, η διόγκωση του υλικού λόγω χημικής αντίδρασης, η κρυστάλλωση αλάτων και ο σχηματισμός πάγου, οι σεισμικές δονήσεις κ.ά.. Για παράδειγμα, η αστοχία του τσιμέντου, λόγω ανάπτυξης σημαντικών εφελκυστικών τάσεων (λόγω σεισμού, υπερφόρτωσης κ.ά.) οδηγεί κυρίως σε μεγάλες ρηγματώσεις.

Η κατανομή, ο προσανατολισμός και η ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων ανάλογα με τη θέση του υλικού στην κατασκευή. Συνήθως δρουν έμμεσα στην αστοχία και φθορά των υλικών. Είναι επίσης δυνατόν, στο ίδιο υλικό να παρατηρούνται διαφορετικού τύπου φθορές, ανάλογα με την θέση του στην κατασκευή, όπως για παράδειγμα φθορά λόγω υγρασίας στα κατώτερα στρώματα της τοιχοποιίας και φθορά λόγω κρυστάλλωσης των αλάτων στα ανώτερα στρώματα.

Οι συνθήκες χρήσης του δομικού υλικού. Τα δομικά υλικά έχουν συχνά διαφορετικές χρήσεις. Οι συνθήκες χρήσης του υλικού θα καθορίσουν επομένως και τους μηχανισμούς και την ένταση της φθοράς.

Η μικροκλίμα και το νερό. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι φθορές που προκαλούνται από τη βροχή, τα αερόλυμα, την ανερχόμενη τριχοειδή υγρασία και τη συμπύκνωση. Το νερό ελέγχει τη μεταφορά, την κρυστάλλωση, την ανακρυστάλλωση και την ενυδάτωση στον λίθο και ευθύνεται για την υπό προϋποθέσεις ανάπτυξη ισχυρών ωσμωτικών πιέσεων.

Διάφοροι βιολογικοί παράγοντες. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τα βακτήρια, τα άλγη, οι μύκητες, οι λειχήνες, τα δένδρα, τα φυτά και τα πουλιά. Τα αποτελέσματα της δράσης αυτών των παραγόντων μπορεί να έχουν τόσο αισθητικό χαρακτήρα, όσο και να προκαλέσουν φυσικές ή χημικές διεργασίες στην επιφάνεια των υλικών. Ειδικότερα, η δράση των βακτηρίων μπορεί να ευνοήσει τη διάβρωση της πέτρας, μέσα από την ανάλωση χημικών συστατικών των ορυκτών της και μπορεί να παρέχει προϊόντα μεταβολισμού τα οποία δρουν ως καταλύτες στην εξέλιξη της φθοράς.

1.2.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΦΘΟΡΑΣ ΛΙΘΩΝ, ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Οι λίθοι που χρησιμοποιούνται στην οικοδομική ποικίλουν ως προς την γεωλογική προέλευση, την σύσταση, τις φυσικές ιδιότητες, και την μηχανική αντοχή. Τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, ο τρόπος επεξεργασίας και χρήσης του και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του (είδος πετρώματος, ορυκτολογική σύσταση, ιστός, υφή) καθορίζουν την ανθεκτικότητα των δομικών λίθων. Πιο αναλυτικά, λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες φθοράς των υλικών που αναφέρθηκαν στην §1.2.3, οι παράγοντες που συντελούν στη φθορά των δομικών λίθων των κτιρίων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (Μανίτα και Πανταζόπουλος, 2000):

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία προκαλεί την χαλάρωση της σύνδεσης των υλικών και τη δημιουργία ρηγματώσεων.
- Το νερό ελέγχει την ενυδάτωση, μεταφορά, κρυστάλλωση και ανακρυστάλλωση των αλάτων τα οποία μπορεί να προκαλέσουν τη δημιουργία στεγανών στρωμάτων στην επιφάνεια με δυσμενή αποτελέσματα.
- Η συνεχής έκθεση των δομικών λίθων στον άνεμο και στην αμμοβολή φθείρει τις επιφάνειές τους.
- Η δράσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του διοξειδίου του πυριτίου (SO_2) της ατμόσφαιρας προκαλούν χημικές φθορές των δομικών λίθων και ιδιαίτερα αυτών με ασβεστολιθική σύσταση (γυψοποίηση του ασβεστόλιθου).
- Οι μικροοργανισμοί, τα φυτά και τα ζώα είναι δυνατόν να προκαλέσουν εκτεταμένες φθορές, είτε με την έκκριση ποσοτήτων οργανικών οξέων, είτε με την κατακράτηση νερού είτε με τις μηχανικές τάσεις που δύναται να ασκήσουν.
- Οι φθορές που προέρχονται είτε από σεισμούς, είτε από καθιζήσεις ή δονήσεις του εδάφους μπορεί να είναι καταστρεπτικές για την ευστάθειας του ιστορικού κτιρίου (Δρίτσος, 2001).

Αντίστοιχα, οι παράγοντες φθοράς των κεραμικών μπορούν να διακριθούν σε ενδογενείς και εξωγενείς. Οι ενδογενείς παράγοντες φθοράς περιλαμβάνουν (Μοροπούλου):

- Ατέλειες ψησίματος.
- Προσμίξεις ανθρακικού ασβεστίου.
- Διαφορά στο συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ υαλώματος και σώματος.

Στους εξωγενείς παράγοντες φθοράς των κεραμικών περιλαμβάνονται (Μοροπούλου):

- Μηχανικές καταπονήσεις από υπερκείμενες πιέσεις.
- Τριχοειδής αναρρίχηση νερού με διαλυτά άλατα.
- Παγετός.
- Βιολογικοί παράγοντες.
- Προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης ή στερέωσης.
- Χρήση μεταλλικών συνδέσμων.

Αναλυτικότερα, τα διαλυτά άλατα μπορεί να προέρχονται από τη θάλασσα (μεταφορά NaCl σε αποστάσεις μέχρι 15km), από υπόγεια νερά (ανάλογα με το υπέδαφος, τροφοδοτούν τα δομικά υλικά με ιόντα νατρίου, καλίου, μαγνησίου, ασβεστίου, θειικά, ανθρακικά, χλωριούχα και πυριτικά), από ατμοσφαιρικούς ρύπους (το SO_2, το SO_3 και τα NO_x της ατμόσφαιρας προσβάλλουν τις ανθρακικές προσμίξεις των κεραμικών, σχηματίζοντας άλατα) και από επαφές με δομικά υλικά ή κονιάματα (το τσιμέντο και ο γύψος αποτελούν πηγές θειικών, ανθρακικών και διαλυτών πυριτικών αλάτων). Οι βιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν μύκητες (αναπτύσσονται σε όξινο περιβάλλον, σε τιμές pH από 5 έως 5,5), τρέφονται με πολύ μικρές ποσότητες οργανικού υλικού, χρειάζονται υγρασία, είναι ανθεκτικοί στη έλλειψη ηλιακού φωτός και παράγουν οξέα όπως θειικό, οξαλικό και κιτρικό, που διαλύουν το κεραμικό), φύκη (χρειάζονται υγρασία, σχετικά υψηλή θερμοκρασία και φως, ενώ τα σημαντικότερα είναι τα χλωροφύκη που αντέχουν σε τιμές pH από 3,5 έως 9 και διαλύουν τις ανθρακικές προσμίξεις), βακτήρια (αναπτύσσονται σε αλκαλικό περιβάλλον, σε

τιμές pH από 8 έως 8,5 και κάποια παράγουν θειικό οξύ, άλλα παράγουν αμμωνία, νιτρικό οξύ ή οργανικά οξέα που διαλύουν το κεραμικό) και λειχήνες (η δράση τους οφείλεται κυρίως στη μηχανική καταπόνηση, λόγω ανάπτυξης των ριζιδίων τους μέσα στο υλικό). Η διάβρωση από προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης περιλαμβάνει αλλοιώσεις από μηχανικό καθαρισμό, αλλοιώσεις από διαλυτά άλατα λόγω καθαρισμού του υαλώματος με οξύ, ρηγματώσεις από τη διόγκωση των μεταλλικών συνδέσμων και τέλος, κιτρίνισμα, ρηγμάτωση, αποφλοίωση και θραύση του υαλώματος λόγω χρήσης κόλλας, στερεωτικού ή υλικού συμπλήρωσης (Μοροπούλου).

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες φθοράς των υλικών που αναφέρθηκαν στην §1.2.3, οι σημαντικότερες αιτίες οι οποίες επιφέρουν την αλλοίωση ή καταστροφή των κονιαμάτων είναι οι ακόλουθες (Μανίτα και Πανταζόπουλος, 2000):

- Η πτώση της μηχανικής αντοχής του κονιάματος λόγω γήρανσης του υλικού.
- Η ενανθράκωση προκαλεί αύξηση στο πορώδες του κονιάματος με αποτέλεσμα την αύξηση του ερπυσμού και της ταχύτητας ανάπτυξής του (Σίδερης, 1984).
- Το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας αποτελεί σημαντική παράμετρος της ανθεκτικότητας του κονιάματος, επειδή οι περισσότεροι μηχανισμοί φθοράς για να πραγματοποιηθούν χρειάζονται νερό.
- Ο συνδυασμός μικρού πορώδους, υγρασίας και παρουσίας διαλυτών αλάτων έχει ως αποτέλεσμα τη δυσχέρεια της ελεύθερης εξάτμισης του νερού, την απόθεση και κρυστάλλωση των αλάτων στα τοιχώματα των πόρων των λίθων δομής και τη δημιουργία κρυσταλλικών πιέσεων (Τάσιος και Αλιζάκη, 1993).
- Η συνεχής ροή του νερού προκαλεί επίσης σημαντική φθορά των υλικών (Τάσιος και Αλιζάκη, 1993).
- Οι ακραίες μεταβολές των τιμών της θερμοκρασίας προκαλούν διαδοχικούς κύκλους ψύξης – απόψυξης του υλικού με αποτέλεσμα την απώλεια βάρους λόγω απότριψης και μείωσης της μηχανικής αντοχής.

- Επιπλέον, η πτώση της θερμοκρασίας οδηγεί σε πήξη του νερού που βρίσκεται στους τριχοειδείς πόρους, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του. Αυτή η αύξηση του όγκου του νερού προκαλεί την άσκηση ισχυρών υδραυλικών πιέσεων στα τοιχώματα των πόρων και την πιθανή τοπική θραύση του ιστού του κονιάματος (Τριανταφύλλου, 1997).
- Οι βιολογικές επιδράσεις από προέρχονται από τη δράση των φυτών προκαλούν φθορά στα παλιά κονιάματα. Οι ρίζες των φυτών διεισδύουν στις μικρορωγμές του κονιάματος και ασκούν πιέσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της υπάρχουσας ρηγμάτωσης. Επιπλέον, η σήψη τους δίνει χουμικό οξύ το οποίο προκαλεί διάβρωση.

2. Ειδικο Θεωρητικο Μερος

2.1. Βασικες Αρχες Και Μεθοδολογια Διαγνωστικης Μελετης

2.1.1. Μεθοδολογια Προστασιας Της Πολιτιστικης Κληρονομιας

Στη σύγχρονη εποχή επιβάλλεται, πριν επιχειρηθεί οποιαδήποτε επέμβαση σε ένα μνημείο, να ακολουθείται ρητά η πορεία εργασίας που υποδεικνύεται από όλους τους κανόνες που έχουν θεσμοθετηθεί και που έχει στόχο να αποτρέψει ή να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες μίας άστοχης και ίσως βλαπτικής εφαρμογής. Στα πλαίσια αυτά καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια για την προστασία των μνημείων και των κτιρίων σημαντικής αρχιτεκτονικής αξίας μέσω ολοκληρωμένου σχεδίου και με την συνεργασία διαφόρων φορέων. Η προστασία των μνημείων συνίσταται στην επέμβαση στο ίδιο το μνημείο και στην επέμβαση στο περιβάλλον.

Η επέμβαση στο μνημείο αφορά τέσσερεις κύριες κατευθύνσεις (Μοροπούλου, 2010):

1. Διαγνωστική μελέτη. Αφορά τη μελέτη των ιδιοτήτων των αυθεντικών υλικών και των μηχανισμών φθοράς τους.
2. Συντήρηση – Επέμβαση στα υλικά. Περιλαμβάνει μία σειρά από ενέργειες, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες:
    - Προστερέωση (σε περιπτώσεις προχωρημένης διάβρωσης).
    - Καθαρισμός (μηχανική, φυσική ή χημική απομάκρυνση επιφανειακών επικαθήσεων).
    - Στερέωση (αποκατάσταση της συνοχής του διαβρωμένου λίθου).
    - Επιφανειακή προστασία (απομόνωση και προστασία του λίθου από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών παραγόντων).

- Σύνθεση και εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης, συμβατών με τα ιστορικά δομικά υλικά του κτιρίου.
- Αντιμετώπιση ανερχόμενης υγρασίας.
- Συνεχής παρακολούθηση και έλεγχος των υλικών της επέμβασης στο χρόνο, για την έγκαιρη αντιμετώπιση νέων προβλημάτων ή αστοχιών και τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων συντήρησης.

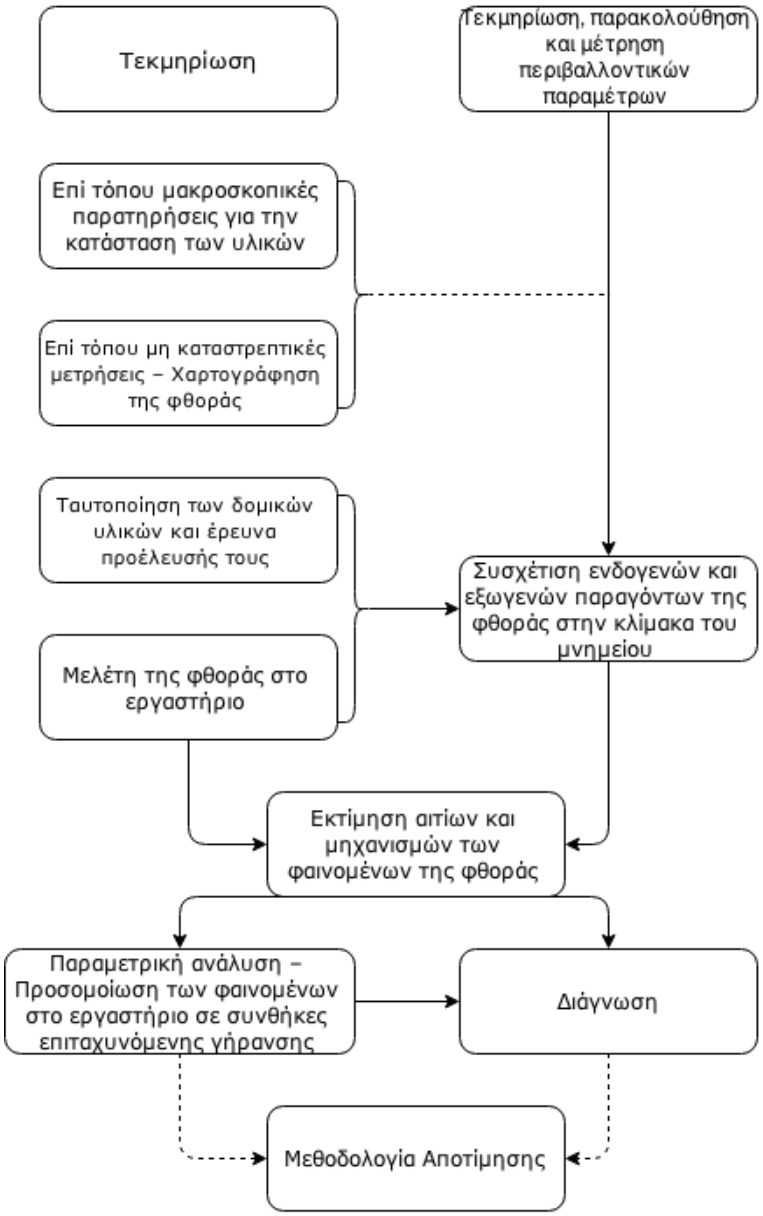
3. Αποκατάσταση του φορέα, που αφορά μία σειρά από δομοστατικές επεμβάσεις.
4. Αναστήλωση του μνημείου, που αφορά μία σειρά από αρχιτεκτονικές επεμβάσεις.

Η επέμβαση στο περιβάλλον είναι εξαιρετικά σημαντική ώστε να αντιμετωπιστεί απευθείας η προέλευση της φθοράς. Περιλαμβάνει μέτρα περιβαλλοντικής προστασίας των μνημείων (έλεγχος των μικροκλιματικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων) και διαχείριση περιβάλλοντος για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών κινδύνων (χωροταξικές, πολεοδομικές ρυθμίσεις). Είναι επομένως προφανές ότι η συντήρηση είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

Τα κριτήρια επιλογής υλικών και μεθόδων επέμβασης πρέπει να βασίζονται σε μια γενικότερη δεοντολογία των επεμβάσεων συντήρησης, σε συμβατότητα των δομικών υλικών μεταξύ τους και με τα υλικά επέμβασης και στην αντιστρεψιμότητα της επέμβασης, στο μέτρο που αυτή είναι εφικτή (Μοροπούλου, 2010).

2.1.2. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Η διάγνωση της φθοράς των υλικών πρέπει να ακολουθεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης, η οποία περιλαμβάνει τα βήματα που φαίνονται στο Σχήμα 6. Αρχικά, η ιστορική τεκμηρίωση περιλαμβάνει τη μελέτη των ιστορικών αρχείων και τη σύγκριση παλαιότερων φωτογραφιών με νεότερες, ώστε να καταγραφούν σημαντικές πληροφορίες τόσο για την προέλευση των υλικών, όσο και για τυχόν προγενέστερες επεμβάσεις. Η γνώση των μνημείων και του είδους των επεμβάσεων που έγιναν παλαιότερα αποτελούν στοιχεία απαραίτητα, που συμπληρώνουν και πολλές φορές εξηγούν τη σημερινή εικόνα του μνημείου. Συνεπώς και η τήρηση λεπτομερών αρχείων κάθε επέμβασης μπορεί να βοηθήσει καθοριστικά τον επόμενο μελετητή ή συντηρητή. Επιπρόσθετα, σε αυτό το στάδιο πρέπει να γίνει λεπτομερώς η τοπογραφική αποτύπωση και η αρχιτεκτονική αποτύπωση.



Σχήμα 6: Μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης (Μοροπούλου, 2014β). Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με χρήση του διαδικτυακού λογισμικού draw.io, έκδοση 4.8.0.5, της εταιρίας JGraph Ltd (draw.io).

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις για την κατάσταση των υλικών. Πρώτο στάδιο είναι η τεκμηρίωση της κατάστασης, όπου συλλέγονται και ταξινομούνται στοιχεία, όσο το δυνατόν πιο λεπτομερή, σχετικά με τη σοβαρότητα της φθοράς (φωτογραφική, φωτογραμμετρική και σχεδιαστική αποτύπωση). Δεύτερο στάδιο είναι οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις (τυπολογία των φαινομένων διάβρωσης), όπου επιχειρείται η περιγραφή και καταγραφή των διαφόρων μορφών φθοράς και η συσχέτισή τους με

παράγοντες, όπως η θέση, το μικροκλίμα και το είδος του λίθου. Τρίτο και τελευταίο στάδιο είναι οι επί τόπου μετρήσεις στο μνημείο και στο άμεσο περιβάλλον, όπου λαμβάνουν χώρα έλεγχοι, όπως για υγρασία στους τοίχους, για παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα, για τυχόν ύπαρξη υπογείων νερών κ.ά., συλλογή στοιχείων σχετικά με τα υγροθερμικά και γενικά τα κλιματικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής και εφόσον κριθεί αναγκαίο, ορισμένοι από τους προηγούμενους παράγοντες είναι δυνατόν να παρακολουθούνται μόνιμα, στο άμεσο περιβάλλον του μνημείου.

Ακολουθεί η τεκμηρίωση, παρακολούθηση και μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων. Εδώ ελέγχεται η μικροκλίμα (θερμοκρασία, υγρασία, βροχοπτώσεις, ταχύτητα και συχνότητα ανέμων κ.ά.), οι ρύποι (στερεολύματα, υδρολύματα, αερολύματα), η χημική ανάλυση εδάφους, η ανερχόμενη υγρασία και γίνεται έρευνα για εύρεση αλάτων σε υγρή ή στερεή φάση.

Επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση επί τόπου μη καταστρεπτικών τεχνικών (NDT – Non–Destructive Technique) και η χαρτογράφηση της φθοράς, όπως επίσης και η συσχέτιση των δεδομένων του περιβάλλοντος και της φθοράς των υλικών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι ο χαρακτηρισμός των υλικών μπορεί να είναι καταστρεπτικός (destructive) ή μη καταστρεπτικός (non–destructive). Οι καταστρεπτικές δοκιμές εφαρμόζονται κυρίως στην φάση του σχεδιασμού, ενώ οι μη καταστρεπτικές δοκιμές είναι προτιμότερες στην μετέπειτα διάρκεια ζωής του υλικού. Οι τεχνικές χαρακτηρισμού των υλικών μπορούν επίσης να διαχωριστούν σε εργαστηριακές ή επί τόπου (in–situ). Οι επί τόπου μετρήσεις είναι γενικά προτιμότερες αλλά όχι πάντα εφικτές για ορισμένες τεχνικές και μεθόδους χαρακτηρισμού των υλικών (Μοροπούλου, 2010). Μερικές από τις μη καταστρεπτικές τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό το βήμα είναι η μικροσκοπία οπτικών ινών, η θερμοκάμερα, το γεωραντάρ, η υπερηχοσκόπηση, τα μικροκύματα κ.ά..

Ακολουθεί η ταυτοποίηση των δομικών υλικών και η έρευνα της προέλευσής τους. Για να βρεθεί η προέλευση των υλικών της ιστορικής κατασκευής όταν υπάρχει έλλειψη σχετικών πληροφοριών είναι αναγκαία η διεξαγωγή μελετών σε δείγματα από το μνημείο και δείγματα λατομείων της

περιοχής βάσει γεωλογικού χάρτη. Ορισμένες από αυτές τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται είναι η πετρογραφική μελέτη, η ορυκτολογική μελέτη η μελέτη της χημικής σύστασης, η νετρονική ενεργοποίηση (ανάλυση διάκρισης) κ.ά..

Επόμενο βήμα είναι η μελέτη της φθοράς στο εργαστήριο. Προϋποθέτει συστηματική δειγματοληψία από τα διαβρωμένα εξωτερικά τμήματα του υλικού, και με τρόπο ώστε να καλύπτονται όλες τις μορφές διάβρωσης που παρατηρούνται. Ασφαλώς σημαντικό στοιχείο κατά τη δειγματοληψία η λήψη όσο το δυνατόν μικρότερου όγκου δείγματος και μάλιστα από τα λιγότερο εμφανή σημεία του μνημείου, ώστε να αποφεύγεται η εκτεταμένη καταστροφή αυθεντικού υλικού και η αισθητική αλλοίωση του μνημείου. Τα αποτελέσματα αυτής της εξέτασης, συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα από τη μελέτη υγιών δειγμάτων από το ίδιο υλικό, οδηγούν σε συμπεράσματα σχετικά με το είδος και το βαθμό διάβρωσης, την κατάσταση των προϊόντων διάβρωσης και του υλικού, όπως και την αιτία δημιουργίας της φθοράς.

Ακολουθεί η συσχέτιση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων της φθοράς στο επίπεδο του μνημείου, η οποία περιλαμβάνει στοχαστική συσχέτιση των περιβαλλοντικών παραγόντων και των δεδομένων της φθοράς των υλικών με πολυκριτηριακή ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανάλυση σε κύριες συνιστώσες, με δύο ομάδες μεταβλητών (ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες φθοράς), γραφική παράσταση του συνόλου των δεδομένων σε δυσδιάστατο διάγραμμα και εκτίμηση του ρόλου και του ειδικού βάρους κάθε μεταβλητής στις διαφορετικές ομάδες. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται ανάλυση διάκρισης, η οποία αποδίδει μία πλήρη εικόνα του διαχωρισμού των δεδομένων σε ομάδες, οδηγεί στην καταγραφή των συναρτήσεων διάκρισης και βοηθάει στην πρόβλεψη σε ποια ομάδα κατατάσσεται μια νέα περίπτωση

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η εκτίμηση αιτίων και μηχανισμών των φαινομένων της φθοράς. Γίνεται αξιολόγηση των εργαστηριακών δεδομένων, των δεδομένων από τα αποτελέσματα των επί τόπου μη καταστρεπτικών τεχνικών ελέγχου και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα.

Τελευταίο βήμα είναι η παραμετρική ανάλυση και η προσομοίωση των φαινομένων στο εργαστήριο σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης (ASTM). Αφού καθοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα φαινόμενα φθοράς, ακολουθεί η προσομοίωση των συνθηκών στο εργαστήριο και οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης σε θάλαμο αλατονέφωσης, θάλαμο προσομοίωσης περιβαλλοντικών συνθηκών, εφαρμογή κύκλων εμβάπτισης – ξήρανσης κ.ά.. Με αυτόν τον τρόπο, επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση για τα αίτια και τους μηχανισμούς της φθοράς (Μοροπούλου, 2014δ).

2.1.3. Συμβατοτητα Υλικων Αποκαταστασης Της Πολιτιστικης Κληρονομιας

Η επιλογή ενός ορθολογικού σχήματος επέμβασης σε υφιστάμενο κτίριο προϋποθέτει μια σειρά από ερευνητικές εργασίες και συνεκτίμηση πολλών παραμέτρων. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις για τον καθορισμό της βέλτιστης τεχνικής επέμβασης είναι (Δημοσθένους και Στυλιανίδης, 2000):

- Σαφή γνώση των υλικών και της μορφολογίας του φέροντα οργανισμού του κτιρίου.
- Αποτύπωση της παθολογίας και περιγραφή του τύπου και της έκτασης των βλαβών.
- Προσδιορισμός και τεκμηρίωση των αιτιών πρόκλησης της υφιστάμενης παθολογίας και των βλαβών του κτιρίου.
- Εκτίμηση της υφιστάμενης αντοχής του φέροντα οργανισμού με επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές.
- Σαφή γνώση των διαφόρων τεχνικών επισκευής και ενίσχυσης.

Τα κριτήρια και οι αρχές επεμβάσεων που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των κατάλληλων τεχνικών συμβάλουν καθοριστικά στην αποτελεσματικότητα του τελικού σχήματος επέμβασης. Τα κριτήρια αυτά είναι (Θεοδωρίδης, 2006):

- Σεβασμός στο πρωτότυπο.
- Αντιστρεψιμότητα προτεινόμενων επεμβάσεων (στο μέτρο του δυνατού).
- Συμβατότητα προτεινόμενων και υφιστάμενων υλικών (καθώς στην πράξη η πλήρης αντιστρεψιμότητα δύσκολα επιτυγχάνεται).
- Διαχρονικότητα νέων επεμβάσεων.
- Οικονομικό κόστος επέμβασης και συντήρησης.
- Χρόνος αποπεράτωσης.
- Κοινωνικό και ψυχολογικό κόστος των ενοίκων και του κοινωνικού συνόλου.

- Επαρκής και ευσταθής υποστύλωση κατά τη διάρκεια των εργασιών επέμβασης.

Από τα παραπάνω, η συμβατότητα των υλικών είναι ένας εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας. Ειδικότερα, η πλήρης αντιστρεψιμότητα, δηλαδή ο σχεδιασμός μιας επέμβασης αποκατάστασης, ώστε αυτή να μπορεί να αφαιρεθεί πλήρως, στην πράξη δύσκολα επιτυγχάνεται. Έτσι, η συμβατότητα των υλικών λαμβάνεται υπόψη, ώστε ακόμα και να μην μπορεί να αφαιρεθεί πλήρως η επέμβαση, να μην προξενήσει τουλάχιστον περεταίρω φθορά στο αυθεντικό υλικό. Αναλυτικότερα, η συμβατότητα μπορεί να αφορά διάφορους παράγοντες όπως η χημική σύσταση, ο συντελεστής θερμικής διαστολής (επιδιώκονται όσο το δυνατόν παρόμοιες τιμές, ώστε κατά τη διάρκεια θερμικών κύκλων να μη παρατηρείται ανομοιογένεια στη διαστολή και συνεπώς συνεπαγόμενη ανάπτυξη τάσεων), η πυκνότητα (επιδιώκονται παρόμοιες τιμές ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση) κ.ά. και καθορίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή συμπεριφορά των υλικών. Η ασυμβατότητα των υλικών είναι δυνατόν να οδηγήσει στην αστοχία τους, στην μείωση της διάρκειας ζωής τους, ή στην εκλεκτική ένταση της φθοράς σε ένα από τα υλικά του δομικού συστήματος (Μοροπούλου, 2010).

Συμβατότητα δεν σημαίνει απαραίτητα υλικά με τα ίδια χημικά συστατικά, αλλά με παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (Rodrigues, 1996). Μέχρι τώρα ο προσδιορισμός της συμβατότητας των υλικών στηριζόταν σε πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες εργαστηρίου οι οποίες συχνά διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές. Τα υλικά εξετάζονται με την χρήση τεχνικών που χρησιμοποιούνται για δοκιμές σκυροδέματος και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αυθεντικά υλικά (Moropoulou et al., 2005).

Η χρήση τσιμέντου στις ιστορικές κατασκευές είναι από τις πλέον ασύμβατες. Αναλυτικότερα, τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας καθιστώντας τα πολύ δυνατά και άκαμπτα σε σχέση με τα παραδοσιακά κονιάματα στις ιστορικές τοιχοποιίες. Επιπλέον, η χρήση του τσιμέντου ως υλικού αποκατάστασης διαταράσσει τη μηχανική συμπεριφορά, τη στατική και τη δυναμική της τοιχοποιίας, με κίνδυνο

εμφάνισης διαφορικών φορτίσεων σε τμήματα της δομής και συνεπώς την επακόλουθη αστοχία τους. Τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν ακόμη γενικότερα μεγάλο συντελεστή θερμική διαστολής, σχεδόν διπλάσιο της πέτρας, με αποτέλεσμα, σε κύκλους θέρμανσης – ψύξης, να ασκούνται μηχανικές τάσεις στα αυθεντικά υλικά που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία (ρηγμάτωση). Επιπρόσθετα, σε εφαρμογές αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, η μικρή τιμή πορώδους και η σχετικά πυκνή δομή των τσιμεντιτικών κονιαμάτων δυσκολεύει την «αναπνοή» της τοιχοποιίας, δηλαδή την μεταφορά της υγρασίας στους κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης. Τέλος, τα τσιμεντιτικά κονιάματα είναι φορέας διαλυτών αλάτων. Ο εκλεκτικός προσανατολισμός των διαλυτών αλάτων στα γειτονικά ιστορικά δομικά υλικά και η κρυστάλλωση τους κατά τη φάση της εξάτμισης οδηγούν σε άσκηση πιέσεων κρυστάλλωσης (Μοροπούλου, 2014γ). Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα χρήσης τσιμέντου σε εργασίες αποκατάστασης της μεσαιωνικής πόλης της ρόδου μπορούν να παρατηρηθούν στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Τμήμα του τοίχους της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου, στο οποίο είχαν χρησιμοποιηθεί ασύμβατα τσιμεντιτικά κονιάματα ως υλικό αποκατάστασης. Παρατηρούμε ότι τμήματα έχουν αποσπαστεί, δημιουργώντας κοιλότητες (Μοροπούλου, 2014γ).

Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης είναι τα ακόλουθα (Μοροπούλου, 2010):

- Προσομοίωση των ιδιοτήτων των ιστορικών κονιαμάτων.
- Βελτίωση των χαρακτηριστικών των ιστορικών κονιαμάτων.
- Αναπαραγωγισιμότητα και έλεγχος της παρασκευής τους βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών.

Η αντίστροφη μηχανική προσέγγιση (reverse engineering), που συχνά εφαρμόζεται για το σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης, αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις (Μοροπούλου και Μούνδουλας, 2014):

1. Χαρακτηρισμός ιστορικών κονιαμάτων.
2. Παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης.
3. Αποτίμηση των χαρακτηριστικών τους.
4. Αριστοποίηση παρασκευής.
5. Αποτίμηση με πιλοτική, επί τόπου εφαρμογή.

2.2. Μελετη Περιπτωσης

2.2.1. Ιστορικα Στοιχεια Για Την Τυνησια

Η Τυνησία, ή Τούνεζι, είναι μία χώρα στις μεσογειακές ακτές της Βόρειας Αφρικής. Είναι το μικρότερο και το πιο ανατολικό από τα κράτη που εκτείνονται κατά μήκος της οροσειράς του Άτλαντα και συνορεύει με την Αλγερία στα δυτικά και τη Λιβύη στα νοτιοανατολικά (Εικόνα 2). Το 40% της χώρας καταλαμβάνει η έρημος Σαχάρα και το υπόλοιπο περιλαμβάνει γόνιμα εδάφη και προσβάσιμες ακτές. Η γεωγραφία της χώρας έπαιξε σημαντικό ρόλο στους αρχαίους χρόνους, αρχικά με την Καρχηδόνα, την πόλη των Φοινίκων και αργότερα σαν αφρικανική επαρχία, καθώς αποτελούσε το σιτοβολώνα της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας.

Πλουσιότατη η ιστορία της Τυνησίας, από τα αρχαία χρόνια φιλοξένησε στις σελίδες της τη δράση και τον πολιτισμό πολλών αξιόλογων λαών. Οι Φοίνικες χρησιμοποίησαν τα λιμάνια της Τυνησίας ήδη από τον 12ο π.Χ. αιώνα και αργότερα, τον 8ο π.Χ. αιώνα, οι Καρχηδόνιοι ίδρυσαν το κράτος τους και το διατήρησαν μέχρι το 146 π.Χ., οπότε οι Ρωμαίοι κατάκτησαν την Καρχηδόνα που εκτεινόταν στα εδάφη της σύγχρονης Τυνησίας και την ενσωμάτωσαν στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία. Στο α΄ μισό του 5ου μ.Χ. αιώνα, οι Βάνδαλοι εκτόπισαν τους Ρωμαίους από την περιοχή και τον 6ο μ.Χ. αιώνα ανακτήθηκε από την Ανατολική Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία (το Βυζάντιο) του αυτοκράτορα Ιουστινιανού. Ο επόμενος αιώνας σήμανε την κυριαρχία των μουσουλμάνων στον τυνησιακό χώρο. Στη συνέχεια η Τυνησία πέρασε στον έλεγχο διάφορων ισλαμικών δυναστειών όπως οι Αμπασίδες, οι Αγκλαβίδες, οι Φιτιμίδες, οι Αλμοάδες και οι Χαφσίδες. Για κάποιο χρονικό διάστημα κυριάρχησαν οι Ισπανοί, όμως το 1574, η Τυνησία περιλήφθηκε στην αχανή Οθωμανική Αυτοκρατορία με ανώτατο πολιτικό άρχοντα τον «αντιβασιλέα» ή μπέη. Την περίοδο της παρακμής της οθωμανικής κυριαρχίας, η Τυνησία αποτέλεσε το μήλο της έριδας ανάμεσα στη Γαλλία, την Ιταλία και το Ηνωμένο Βασίλειο και μέχρι το 188, οι Τυνήσιοι ηγεμόνες πάσχιζαν να κρατούν μια ουδέτερη πολιτική απέναντι στις μεγάλες ευρωπαϊκές δυνάμεις όσο βέβαια αυτό ήταν δυνατό.

Ο Άχμαντ Μπέη (περίοδος ηγεμονίας 1837 – 1855) εξευρωπάισε σε σημαντικό βαθμό το στρατό, το ναυτικό, κατάργησε τη δουλεία και επέφερε αλλαγές στους μηχανισμούς διοίκησης. Ο Μουχάμαντ Μπέη (1855 – 1859) επιδίωξε χωρίς αποτέλεσμα την απομάκρυνση από την ευρωπαϊκή επιρροή. Κατά την ηγεμονία του διαδόχου του Μουχάμαντ ας – Σαντίκ (1859 – 1882) ανακηρύχτηκε στην Τυνησία το πρώτο αραβικό σύνταγμα (1861), χρεοκόπησε η Τυνησία (1869) και εγκαταστάθηκε μια ευρωπαϊκή (Γαλλία – Αγγλία – Ιταλία) επιτροπή. Η Γαλλία κατόρθωσε να αποκτήσει τον έλεγχο της Τυνησίας με την αγγλική συγκατάθεση στο Συνέδριο του Βερολίνου (1878). Με τη συνθήκη Μπαρντό την οποία υπέγραψε ο Μουχάμαντ ας – Σαντίκ, η Γαλλία εγκατέστησε καθεστώς προτεκτοράτου στην Τυνησία (1881).

Το 1911 – 1912, οι Γάλλοι κατέστειλαν μια πρώτη απόπειρα τυνησιακής αυτοδιάθεσης, όμως το 1920, δημιουργήθηκε το κόμμα Ντεστούρ, που ήταν η πρώτη προσπάθεια της πολιτικής οργάνωσης του τυνησιακού λαού και προωθούσε το αίτημα της συνταγματικής διακυβέρνησης, που θα επιφύλασσε ίση αντιμετώπιση για Τυνήσιους και Ευρωπαίους. Η βίαιη εκτόπιση του ηγέτη του Ντεστούρ Αμπντ αλ – Αζίζ ατ – Τααλιμπί και η λήψη μέτρων καταστολής αποδυνάμωσε το εθνικό κίνημα. Το 1934, ο εθνικιστής και λαϊκός δικηγόρος Χαμπίμπ Μουργκίμπα ίδρυσε το κόμμα Νέο – Ντεστούρ, το οποίο το 1934 χωρίστηκε και το 1938 κηρύχτηκε επίσημα εκτός νόμου. Ο Μπουργκίμπα και οι υπόλοιποι ηγέτες φυλακίστηκαν.

Η χώρα παρέμεινε υπό ναζιστική κατοχή από το Νοέμβριο του 1942 μέχρι τον Μάιο του 1943. Μετά την απελευθέρωση της Τυνησίας από τους Γερμανούς και την ανάληψη της εξουσίας από τους Γάλλους, απογοήτευση προκλήθηκε στους Τυνήσιους που εκδήλωναν την αντίδρασή τους με τρομοκρατικές ενέργειες και εθνιστικές στρατιωτικές επιχειρήσεις στα ορεινά.

Τον Ιούλιο του 1954, ο Γάλλος πρωθυπουργός Πιερ Μαντές – Φρανς υποσχέθηκε την παραχώρηση της πλήρους αυτονομίας και στις 20 Μαρτίου 1956 αποδέχτηκαν Γάλλοι και Τυνήσιοι τη συμφωνία ανεξαρτησίας της Τυνησίας με πρωθυπουργό τον Χαμπίμπ Μπουργκίμπα. Στις 25 Ιουλίου 1957, ανακηρύχθηκε η δημοκρατία της Τυνησίας με πρόεδρό της τον Μπουργκίμπα.

Το 1963, η Γαλλία εκκένωσε την Μπιζέρτα από τις στρατιωτικές της δυνάμεις. Το 1964, το κόμμα Νέο – Ντεστούρ έλαβε την ονομασία Σοσιαλιστικό Κόμμα Ντεστούρ και η Τυνησία εθνικοποίησε αιφνιδιαστικά τις γαίες, που κατείχαν οι αλλοδαποί με αποτέλεσμα την επιδείνωση των γαλλοτυνησιακών σχέσεων.

Η περίοδος 1970 ως 1978 χαρακτηρίζεται από μία αυξανόμενη λαϊκή αντίδραση απέναντι στο μονοκομματικό καθεστώς του Μπουργκίμπα, ο οποίος διατηρούσε ισοβίως το προεδρικό αξίωμα από το 1975. Συχνό φαινόμενο ήταν οι απεργίες και οι πορείες διαμαρτυρίας. Στο μεταξύ, η Τυνησία βελτίωνε τη θέση της στον αραβικό κόσμο και από το 1979 μέχρι το 1990, έγινε η έδρα του Αραβικού Συνδέσμου, όταν η έδρα μεταφέρθηκε από το Κάιρο στην Τύνιδα.

Τον Αύγουστο του 1982 και μέχρι το 1994, η τυνησιακή πρωτεύουσα φιλοξένησε την Οργάνωση για την Απελευθέρωση της Παλαιστίνης, επειδή ο ηγέτης της Γιασέρ Αραφάτ έφυγε για λόγους ασφαλείας από τη Βηρυτό. Το 1983 θεσμοθετήθηκε η αρχή του πολυκομματισμού και το 1987, η κυβέρνηση αναγκάστηκε να αντιμετωπίσει την άνοδο του μουσουλμανισμού και ο πρωθυπουργός Ζιν ελ – Αμπιντίν Μπεν Άλι διαδέχτηκε τον Μπουργκίμπα στο ανώτατο πολιτικό αξίωμα. Το 1988, αναθεωρήθηκε το σύνταγμα, εκδημοκρατίστηκαν οι θεσμοί καταργήθηκε η ισόβια προεδρία και το Σοσιαλιστικό Κόμμα Ντεστούρ έλαβε το νέο όνομα Συνταγματικός Δημοκρατικός Συναγερμός.

Στις εκλογές του Απριλίου 1989, ο στρατηγός Μπεν Άλι με το 95% των ψήφων εξελέγη πρόεδρος της Δημοκρατίας και η κοσμική εξουσία επέτεινε τις πιέσεις της προς τους ισλαμισμούς. Το 1994, με τις προεδρικές εκλογές που έγιναν επιβεβαιώθηκε ότι ισχύει σχεδόν ο μονοκομματισμός του Συνταγματικού Δημοκρατικού Συναγερμού.

2.2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΥΝΙΔΑ

Η Τύνιδα είναι η πρωτεύουσα της Τυνησίας με πληθυσμό περίπου 730.000 κατοίκους. Στην ευρύτερη περιοχή γύρω από την πόλη υπολογίζεται ότι ζουν περίπου δυο εκατομμύρια κάτοικοι.

Τη δεύτερη χιλιετία π.Χ. ιδρύθηκε αρχικά μία πόλη από τους Λιβύους και αργότερα πέρασε στην κατοχή Βέρβερων και Νουμιδίων. Τον 9ο αιώνα π.Χ., η πόλη πέρασε στα χέρια Φοινίκων της Καρχηδόνας. Οι Βέρβεροι πήραν την εξουσία της Τύνιδας το 395 π.Χ. για σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς ο Αγαθοκλής εισέβαλε στην Αφρική και μετέφερε εκεί το αρχηγείο του. Όταν έφυγε από τα εδάφη της Αφρικής, η Τύνιδα πέρασε και πάλι στα χέρια των Καρχηδονίων.

Το 146 π.Χ., η Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία κατέστρεψε την Τύνιδα και την Καρχηδόνα. Ωστόσο, η πόλη ανοικοδομήθηκε υπό την εξουσία του Αύγουστου και εξελίχθηκε σε μία σημαντική πόλη και κέντρο ανάπτυξης γεωργικών δραστηριοτήτων.

Τον 7ο αιώνα μ.Χ., μετά την τελική καταστροφή της Καρχηδόνας, η Τύνιδα απέκτησε η ίδια μεγάλη σημασία υπό την εξουσία των Αράβων Μουσουλμάνων. Εκείνη την περίοδο πρωτοχτίστηκε κι η Μεδίνα της Τύνιδας, το ιστορικό της κέντρο. Από το 12ο μέχρι το 16ο αιώνα, η παλαιά πόλη βρισκόταν υπό την εξουσία βερβερικών δυναστειών. Κατά την περίοδο αυτή, η πόλη έγινε μια από τις μεγαλύτερες και πλουσιότερες πόλεις του ισλαμικού κόσμου κι ο πληθυσμός της έφτασε τους 100.000 κατοίκους.

Το 1534, η πόλη πέρασε στα χέρια των Οθωμανών. Ωστόσο, ο σουλτάνος Μουλάι – Χασάν κατέφυγε στην αυλή του Αυτοκράτορα Καρόλου του 5ου. Ο Κάρολος, που επεδίωκε να βρει λύση στη μάστιγα των κουρσάρων, συμφώνησε να αποκαταστήσει στο θρόνο τον Μουλάι – Χασάν με αντάλλαγμα την υποτέλειά του στον ίδιο. Το 1535, οργανώθηκε ναυτική εκστρατεία από τον ίδιο τον Αυτοκράτορα Κάρολο κι η πόλη γρήγορα επανακτήθηκε. Το 1574, όμως, οι Οθωμανοί καταλαμβάνουν εκ νέου την Τύνιδα. Από το 1591 και μετά, οι

μπέηδες, κυβερνήτες τοποθετημένοι από την Οθωμανική Αυτοκρατορία, ήταν σχετικά ανεξάρτητοι και το εμπόριο κι η πειρατεία συνέχιζαν να ανθίζουν.

Από το 1881 ως το 1956, η Τύνιδα βρισκόταν υπό την εξουσία της Γαλλίας. Οι Γάλλοι είχαν καθιερώσει ένα καθεστώς προτεκτοράτου όσον αφορά στο σύστημα διοίκησης, το οποίο αναγνώριζε την πλασματική εξουσία της τοπικής κυβέρνησης. Κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η Τύνιδα κατελήφθη από τις δυνάμεις του Άξονα από το Νοέμβριο του 1942 μέχρι το Μάιο του 1943 και αποτέλεσε την τελευταία τους βάση στην Αφρική.

2.2.3. Η Μεδινα Της Τυνιδας

Υπό την επήρεια των Almohads και των Hafsids, από τον 12ο έως τον 16ο αιώνα, η Τύνιδα θεωρήθηκε μία από τις μεγαλύτερες και πλουσιότερες πόλεις στον ισλαμικό κόσμο. Περίπου 700 μνημεία, συμπεριλαμβανομένων παλατιών, τζαμιών, μαυσωλείων, ισλαμικών ιεροδιδασκαλείων και σιντριβανιών, μαρτυρούν αυτό το αξιόλογο παρελθόν.

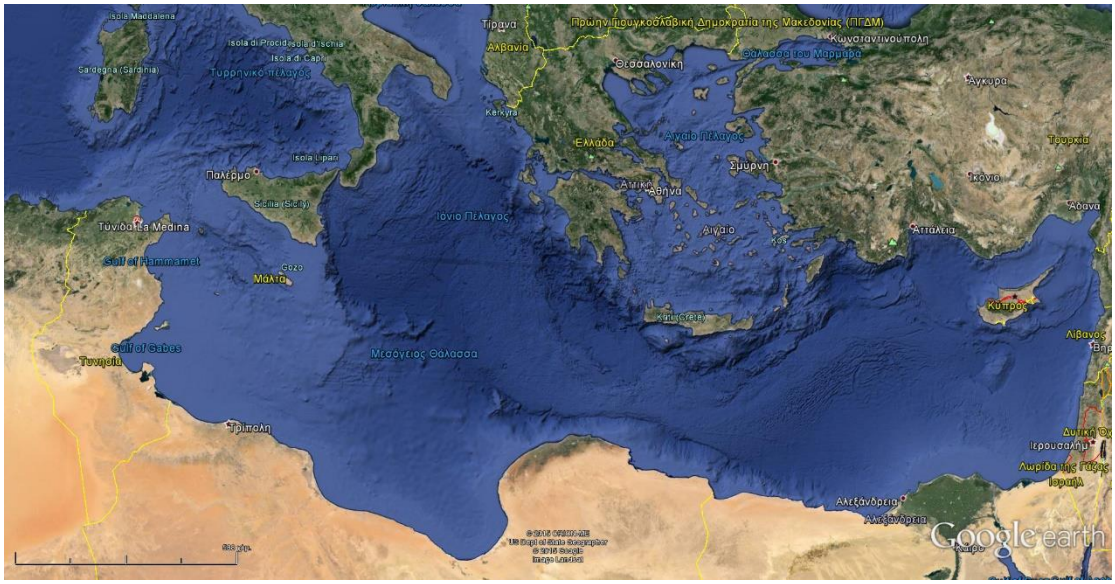
Πρόκειται για ένα εμπορικό και οικονομικό κέντρο για το βόρειο τμήμα της Τυνησίας και το διοικητικό κέντρο για το σύνολο της Τυνησίας. Βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα και μόνο η λίμνη της Τύνιδας παρεμβάλλεται μεταξύ αυτής και της Μεσογείου Θάλασσας. Η Τύνιδα χωρίζεται σε τρία μέρη: την παλιά πόλη, που ονομάζεται Μεδίνα, την γαλλική συνοικία, η οποία τώρα είναι το κέντρο και τις νεότερες και μεγαλύτερες περιοχές χτισμένες νότια και βόρεια της πόλης.

Η Τύνιδα έχει μία σειρά από τοπόσημα επικρατέστερα εκ των οποίων είναι το τζαμί Zitouna και τα λιγοστά ερείπια της αρχαίας Καρχηδόνας. Σήμερα, η Μεδίνα εξακολουθεί να κατοικείται, αλλά μόνο από ένα μικρό ποσοστό του συνολικού πληθυσμού της χώρας.

Εδώ είναι το σημείο όπου βρίσκεται το κύριο τζαμί της Τύνιδας, καθώς ολόκληρη η Τύνιδα υπήρξε μία μουσουλμανική πόλη. Το όνομά του σημαίνει «ελιά» και προέρχεται από τον ιδρυτή του τζαμιού που δίδαξε το Κοράνι κάτω από μία ελιά. Χτίστηκε αρχικά τον 9ο αιώνα από τους Aghlabid, αλλά το πιο διάσημο τμήμα του, ο μιναρές, είναι μία προσθήκη του 19ου αιώνα.

Βρισκόμενη σε μία εύφορη πεδιάδα περιοχή της βορειοανατολικής Τυνησίας, και λίγα χιλιόμετρα από τη θάλασσα, η Μεδίνα της Τύνιδας (Εικόνα 2) είναι μία από τις πρώτες αραβο–μουσουλμανικικές πόλεις του Μαγκρέμπ (698 μ.Χ.). Πρωτεύουσα πολλών δυναστειών που ασκούσαν παγκόσμια επιρροή, αντιπροσωπεύει ένα ανθρώπινο οικισμό που μαρτυρά την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην αρχιτεκτονική, την πολεοδομία και τις επιπτώσεις των κοινωνικο–πολιτιστικών και οικονομικών αλλαγών των προηγούμενων πολιτισμών. Από τον 12ο έως τον 16ο αιώνα, η Τύνιδα θεωρήθηκε μία από τις μεγαλύτερες και

πλουσιότερες πόλεις στον αραβικό κόσμο. Πολυάριθμες μαρτυρίες από αυτήν και προηγούμενες περιόδους υπάρχουν μέχρι και σήμερα. Μεταξύ του 16ου και 19ου αιώνα, η πόλη γέμισε με πολλά παλάτια και κατοικίες, μεγάλη τζαμιά και ισλαμικά ιεροδιδασκαλεία.



Εικόνα 2: Τμήμα του Χάρτη της Μεσογείου Θάλασσας. Φαίνεται η Τυνησία (νοτιοδυτικά), η πρωτεύουσά της Τύνιδα (δυτικά), αλλά και η Μεδίνα της Τύνιδας (La Medina). Δημιουργήθηκε με χρήση του λογισμικού Google Earth, έκδοση 7.1.2.2041, της εταιρίας Google Inc..

Η Μεδίνα της Τύνιδας έχει κηρυχτεί Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO από το 1979. Καλύπτει μία έκταση πάνω από 2.700.000m^2 και περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά μίας αραβο–μουσουλμανικής πόλης. Αποτελείται από την κεντρική Μεδίνα (8ος αιώνας) και τα προάστια προς το Βορρά και το Νότο (13ος αιώνας). Αυτό το αξιοπρόσεκτο σύνολο των κτιρίων, αναπτύχθηκε από έναν μικρό οικισμό, που ονομάζεται Oppidum tunicense, όπως αναφέρεται από τον Pliny τον Πρεσβύτερο. Έφθασε στο απόγειό του τον 13ο αιώνα υπό τη δυναστεία των Hafsid, αλλά συνέχισε να εμπλουτίζεται με τζαμιά, κτίρια, και ισλαμικά ιεροδιδασκαλεία κατά τη διάρκεια του 16ου και 17ου αιώνα. Υπάρχουν περίπου 700 ιστορικά μνημεία, τα οποία κατανέμονται σε 7 τομείς, μεταξύ των οποίων το πιο αξιοσημείωτο είναι το τζαμί Zitouna, το

τζαμί Kasbah, το τζαμί Youssef Dey, η πύλη Bab Jedid, η πύλη Bab Bhar, το Σουκ ech-Chaouachia, το Dar el-Bey, το Σουκ ech-Chaouachia, το Tourbet (οικογενειακό νεκροταφείο) el Bey, αρχοντικά όπως το Dar Hussein, το Dar Ben Abdallah, το Dar Lasram, το Medrasa Es-Slimanya και το El-Mouradia, οι στρατώνες El Attarine και το Zaouia του Sidi Mehrez.

Με τα σουκ του, τον αστικό ιστό, τις κατοικημένες συνοικίες, τα μνημεία και τις πύλες, αυτό το σύνολο αποτελεί ένα πρωτότυπο ανάμεσα στα καλύτερα διατηρημένα στον ισλαμικό κόσμο. Η Μεδίνα της Τύνιδας έχει ασκήσει μία εξαιρετική επιρροή στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής, της γλυπτικής, των τεχνών, καθώς και του πολεοδομικού σχεδιασμού. Αυτό το σύνολο κτιρίων είναι σπάνιο, καθώς τα περισσότερα ιστορικά ισλαμικά κέντρα έχουν υποστεί σοβαρή καταστροφή και ανοικοδόμηση στο πέρασμα των αιώνων, σε αντίθεση με την Τύνιδα που διατηρεί ακόμη την ομοιογένειά της.

Οι διακοσμημένες, μυστηριώδεις και ποικίλες πόρτες που υπάρχουν στους δρόμους, πάνω από όλα τα στοιχεία της Μεδίνας, καταδεικνύουν τους τρόπους της σκέψης και της ζωής των οικογενειών της Τυνησίας. Ειδικότερα, υπάρχουν απλές πόρτες με ένα μόνο φύλλο, διπλές ορθογώνιες πόρτες σε στυλ Hafsid, και πόρτες που εσωκλείουν μία μικρή κάτω πόρτα είναι γνωστές ως Khoukha. Επινοήθηκε από την ισπανική πριγκίπισσα, σύζυγο του Abdulaziz Ibn Moussa Ibn Noussair, προκειμένου να υποχρεωθούν οι μουσουλμάνοι υπήκοοι να υποκύψουν στη μοναρχία. Το χρώμα τους έχει επίσης ιδιαίτερη σημασία: η κίτρινη ώχρα στο Κοράνι είναι το χρώμα που αγαπήθηκε από τον Θεό, το πράσινο είναι το χρώμα του Παραδείσου και το μπλε, το οποίο εισήχθη κατά τα τελευταία χρόνια, υπενθυμίζει το «γαλάζιο του Sidi Bou Said», το χωριό βόρεια της Τύνιδας, το οποίο στο παρελθόν ταυτίστηκε με την καταστροφή, αλλά σήμερα χρησιμοποιείται ως ένα από τα κυρίαρχα χρώματα στα παράθυρα και τους τοίχους των σπιτιών της Μεδίνας της Τύνιδας. Η τριχρωμία (λευκό, πράσινο και κόκκινο) είναι το οικόσημο της δυναστείας των Hafsid, οι οποίοι βασίλεψαν την περίοδο 1228 – 1574 στην Τύνιδα. Πιο συγκεκριμένα, τα τρία αυτά χρώματα συνενώθηκαν προκειμένου να υπενθυμίσουν τις προηγούμενες

δυναστείες: άσπρο για την Aghlabids, πράσινο για τους Fatimids, και κόκκινο για τους Sanhajids (whc.unesco.org/en/list/36).

Οι διακοσμήσεις πάνω από τις πόρτες γίνονται με μεγάλα και μικρά καρφιά για να παρασταθούν σύμβολα και γεωμετρικά σχέδια και συνεπώς έχουν σημαντική ιστορική και κοινωνιολογική σημασία. Επίσης, υπάρχει το σύμβολο της Tanit, της Καρχηδόνιας θεάς της γονιμότητας, το εξάγωνο αστέρι του Δαβίδ (που σύμφωνα με το μύθο διώχνει μακριά τα djinng, δηλαδή τα κακοήθη πνεύματα), ο χριστιανικός σταυρός (απομεινάρι του χριστιανικού παρελθόντος της Τυνησίας), η μουσουλμανική mihrab (θέση στο τζαμί, όπου ο ιμάμης οδηγεί τους πιστούς σε προσευχή), το τουρκικό φεγγάρι (που συμβολίζει την Οθωμανική Τουρκία), καθώς και τα άλλα χριστιανικά σύμβολα, όπως το μάτι και το ψάρι.

Τα κριτήρια με βάση τα οποία εντάχθηκε στα Μνημεία Παγκόσμια Κληρονομιάς της UNESCO είναι πολλά (βλ. §1.1.2). Ο ρόλος που διαδραματίζει η Μεδίνα της Τύνιδας μεταξύ του Μαγκρέμπ, της Νότιας Ευρώπης και της Ανατολής, ενθάρρυναν τις ανταλλαγές και τις επιρροές στον τομέα των τεχνών και της αρχιτεκτονικής κατά τη διάρκεια πολλών αιώνων. Ως μία σημαντική πόλη και η πρωτεύουσα των διαφόρων δυναστειών (από τους Banu Khurassan έως τους Husseinits), αποτελεί εξαιρετική μαρτυρία για τους πολιτισμούς της Ifriqiya (κυρίως από τον 10ο αιώνα). Είναι ένα παράδειγμα ενός ανθρώπινου οικισμού που έχει διατηρήσει την ακεραιότητα του αστικού ιστού του με όλα τα μορφολογικά συστατικά του. Ο αντίκτυπος της κοινωνικο–οικονομικής αλλαγής έχει καταστήσει αυτόν τον παραδοσιακό οικισμό ευάλωτο, με αποτέλεσμα να πρέπει να προστατεύεται πλήρως (whc.unesco.org/en/list/36).

Υπολογίζεται ότι το 50% της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς της Τύνιδας είναι σε κακή κατάσταση ή σχεδόν ερείπια. Τόσο μεμονωμένα μνημεία, όσο και η συνοχή του συνόλου του αστικού ιστού έχουν παραμείνει μερικώς ευάλωτα στις συνέπειες των κοινωνικο–οικονομικών αλλαγών. Σήμερα, μία νεκρή ενδιάμεση ζώνη προτείνεται προκειμένου να προστατευθούν καλύτερα τα περίχωρα του ακινήτου (whc.unesco.org/en/list/36).

Η Μεδίνα της Τύνιδας (με το κεντρικό της τμήμα και τα δύο προάστια, Βόρεια και Νότια) έχει διατηρήσει, χωρίς σημαντική μεταβολή, τον αστικό ιστό της και τη μορφολογία, καθώς και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της. Η επίδραση της προσαρμογής σε νέες μορφές ζωής και οι απαιτήσεις της είναι σχετικά μικρές και οι διάφορες αποκαταστάσεις ή / και παρεμβάσεις αποκατάστασης δεν έχουν επηρεάσει την αξία της λειτουργικής και δομικής αυθεντικότητάς της, ακόμη και αν στα κτίρια παραμένει ο κίνδυνος της αλλαγή των υλικών και των οικοδομικών τεχνικών.

Η Μεδίνα εντάσσεται στην εθνική λίστα της Τυνησίας με 88 ιστορικά μνημεία. Απολαμβάνει επίσης την εθνική προστασία για 5 μνημεία, 14 δρόμους (συμπεριλαμβανομένων 3 Σουκ) και μία πλατεία. Η προστασία της είναι επίσης εξασφαλισμένη από το Νόμο 35–1994 σχετικά με την προστασία της αρχαιολογικής και ιστορικής κληρονομιάς και των παραδοσιακών τεχνών, καθώς και από το σχέδιο ανάπτυξης της Μεδίνας της Τύνιδας. Έχει διαφύλαξη και διαχείριση της δομής της από το Εθνικό Ινστιτούτο Πολιτιστικής Κληρονομιάς (National Heritage Institute) και από τον Σύλλογο Προστασίας για την Μεδίνα του Δήμου της Τύνιδας. Σύμφωνα με την UNESCO, η προτεινόμενη ενδιάμεση νεκρή ζώνη πρέπει να θεσμοθετηθεί ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματική προστασία της Μεδίνας, λαμβάνοντας υπόψη τις αξίες της και την ενσωμάτωσή της στην περιβαλλοντικό πλαίσιο. Πρέπει να διευκρινιστούν τα ρυθμιστικά μέτρα για τη διασφάλιση της διαχείρισης του χώρου και της νεκρής ζώνης του καθώς και τους μηχανισμούς εφαρμογής.

2.2.4. Τα Σουκ

Το σουκ (Souk ή Souq) είναι μία υπαίθρια αγορά ή εμπορική συνοικία σε πόλεις της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Ο συνώνυμος περσικός όρος είναι το παζάρι. Ο όρος σουκ χρησιμοποιείται συχνά για να ορίσει την αγορά σε κάθε πόλη της Μέσης Ανατολής, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε πόλεις της δυτικής Ευρώπης, ιδιαίτερα εκείνες με μουσουλμανική κοινότητα. Όπως συμβαίνει σε διάφορες αγορές, οι τιμές συνήθως καθορίζονται με διαπραγμάτευση μεταξύ των αγοραστών και των πωλητών.

Η λέξη σουκ εισήχθη στις ευρωπαϊκές γλώσσες μέσω των γαλλικών, πιθανώς κατά τη διάρκεια της γαλλικής κατοχής των χωρών του Μαρόκου, της Αλγερίας και της Τυνησίας, κατά το 19ο ή τον 20ο αιώνα. Έτσι, η λέξη σουκ αναφέρεται συνήθως στις παραδοσιακές αγορές της Βόρειας Αφρικής. Η ορθογραφία της λέξης που περιλαμβάνει το γράμμα q (Souq) πιθανότατα αναπτύχθηκε στα αγγλικά και αφορά τις παραδοσιακές αγορές της Μέσης Ανατολής και τις αραβικές, καθώς η βρετανική αποικιοκρατία ήταν παρούσα εκεί κατά τη διάρκεια του 19ου και 20ου αιώνα. Στα σύγχρονα αραβικά πρότυπα, ο όρος αλ–σουκ (al–souq) αναφέρεται σε αγορές τόσο με την φυσική τους έννοια, όσο και με την ευρύτερη οικονομική έννοια.

Το σουκ ήταν αρχικά μία υπαίθρια αγορά. Ιστορικά, σουκ υπήρχαν εκτός των πόλεων σε περιοχές όπου τα καραβάνια σταμάτησαν και οι έμποροι εμφάνιζαν τα προϊόντα τους προς πώληση. Με άλλα λόγια, το σουκ δημιουργούταν όταν κατέφθανε ένα καραβάνι. Δεδομένου ότι αυτό θα μπορούσε συμβαίνει σπάνια, τα σουκ συχνά επεκτείνονται πέρα από την αγορά και πώληση αγαθών, ώστε να διοργανώνουν μεγάλα φεστιβάλ με τη συμμετοχή διαφόρων πολιτιστικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων. Κάθε σουκ θα μπορούσε να εξυπηρετήσει μία κοινωνική δραστηριότητα με το να είναι ένα μέρος συνάντηση, εκτός από την εμπορική του λειτουργία.

Αργότερα, λόγω της σπουδαιότητας των αγορών και την ανάπτυξη των πόλεων, οι κύριες τοποθεσίες σουκ μετατοπίστηκαν προς τα αστικά κέντρα. Στις

περιοχές όπου έδρευαν φυλές, οι φυλετικές συγκρούσεις συνήθως διακόπτονταν ώστε να επιτραπεί η ομαλή λειτουργία του σουκ και η απρόσκοπτη ανταλλαγή αγαθών.

Εποχιακά σουκ υπήρχαν για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, που μπορεί να είναι σε ετήσια, μηνιαία ή εβδομαδιαία βάση. Τα παλαιότερα σουκ στήνονταν σε ετήσια βάση, και ήταν συνήθως ο τόπος όπου διάφορα φεστιβάλ έξω από τις πόλεις λάμβαναν χώρα. Για παράδειγμα, στο σουκ Ukadh πραγματοποιούταν ετησίως στην προ-ισλαμική εποχή σε μία περιοχή μεταξύ Μέκκας και Ταΐφ κατά τη διάρκεια του ιερού μήνα του Dhu al-Qi'dah. Ως μία πολυσύχναστη αγορά, ήταν περισσότερο γνωστή για τους ποιητικούς αγώνες της, με κριτές επιφανείς ποιητές όπως ο Al-Khansa και ο Al-Nabigha. Ένα παράδειγμα ενός ισλαμικού ετήσιου σουκ είναι το Al Mirbid λίγο έξω από τη Βασόρα, το οποίο φημίζεται για τους ποιητικούς διαγωνισμούς του και τις αφηγητικές δραστηριότητές του. Οι αλλαγές στην πολιτική, στην οικονομία και στο κοινωνικό γίγνεσθαι έχουν οδηγήσει μόνο λίγα μικρά εποχιακά σουκ στην επιβίωση, έξω από χωριά και μικρές πόλεις, όπου κυρίως πωλούν αγροτικά και κτηνοτροφικά προϊόντα.

Εβδομαδιαία σουκ εξακολουθούν να λειτουργούν σε όλο τον αραβικό κόσμο. Τα περισσότερα από αυτά πήραν το όνομα τους από την ημέρα της εβδομάδας κατά την οποία διοργανώνονται. Συνήθως έχουν συγκεκριμένους ανοιχτούς χώρους, που ορίζονται ειδικά για τη χρήση τους μέσα στις πόλεις. Παραδείγματα τέτοιων αγορών που έχουν επιβιώσει είναι η αγορά της Τετάρτης στο Αμμάν, που ειδικεύεται στην πώληση μεταχειρισμένων προϊόντων, η αγορά Ghazl της Παρασκευής στη Βαγδάτη, που ειδικεύεται στην πώληση κατοικίδιων ζώων και η αγορά Fina στο Μαρακές, που προσφέρει παραστάσεις, όπως το τραγούδι, μουσική, τα ακροβατικά και οι δραστηριότητες τσίρκου.

Τα μόνιμα σουκ είναι πιο συχνά, αλλά λιγότερο διάσημα, καθώς επικεντρώνονται στην εμπορική δραστηριότητα, αντί για τη διασκέδαση. Μέχρι την εποχή Umayyad, τα μόνιμα σουκ ήταν απλώς ένας ανοιχτός χώρος όπου οι έμποροι έφερναν κινητούς πάγκους κατά τη διάρκεια της ημέρας και απομάκρυναν τη νύχτα. Κανείς δεν είχε δικαίωμα να κατέχει συγκεκριμένο χώρο και συνήθως εξυπηρετούσαν πρώτο αυτόν που κατέφθανε πρώτος (μοντέλο

εξυπηρέτησης First–Come First–Served – FIFO). Κατά τη διάρκεια της εποχής Umayyad, οι κυβερνήσεις ξεκίνησαν την ενοικίαση και στη συνέχεια την πώληση χώρων στους εμπόρους. Οι έμποροι στη συνέχεια κατασκεύαζαν καταστήματα στις περιοχές τους για να αποθηκεύουν τα εμπορεύματά τους τη νύχτα. Με τα μεγάλης έκτασης και στενά σοκάκια του, το σουκ Al–Madina είναι η μεγαλύτερης έκτασης στεγασμένη ιστορική αγορά στον κόσμο, με μήκος περίπου 13 χιλιομέτρων. Είναι τμήμα της αρχαίας πόλης του Χαλεπίου, που αποτελεί Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO από το 1986.

Το σουκ μίας πόλης χωρίζεται σε μικρότερα εμπορικά τμήματα, που αποτελούν ένα λαβύρινθο από στενά σοκάκια, καθένα από τα οποία παίρνει το όνομά του από το προϊόν που διακινείται σ' αυτό, όπως σουκ των χρυσαφικών, σουκ των ενδυμάτων και υφασμάτων, σουκ των δερμάτων, σουκ των μπαχαρικών, τα οποία προσφέρουν πανδαισία χρωμάτων και αρωμάτων, ενώ άλλα ονομάζονται από το επάγγελμα που ασκείται σ' αυτά, όπως σουκ των ραφτάδων, σουκ των βυρσοδεψών, σουκ των γανωματάδων, σουκ των ξυλογλυπτών κ.λπ.. Ταυτόχρονα, ολόκληρο το συγκρότημα ονομάζεται σουκ.

Αν και κάθε γειτονιά μέσα σε μία πόλη είχε ένα τοπικό σουκ πώλησης τροφίμων και άλλων ειδών πρώτης ανάγκης, το κύριο σουκ ήταν μία από τις κεντρικές δομές μίας μεγάλης πόλης, που πωλούνταν διαρκή αγαθά, είδη πολυτελείας και παρέχονταν υπηρεσίες, όπως η ανταλλαγή χρημάτων. Τα εργαστήρια, όπου τα εμπορεύματα προς πώληση παράγονταν (στην περίπτωση των εμπόρων που πωλούν τοπικά προϊόντα που κατασκευάζονται), συνήθως βρίσκονταν μακριά από το ίδιο το σουκ.

Το σουκ ήταν επίσης ένα επίπεδο της τοπικής αυτοδιοίκησης. Οι Muhtasib ήταν οι υπεύθυνοι για την εποπτεία των εμπορικών διαδικασιών και την είσπραξη των φόρων για ένα δεδομένο σουκ, ενώ οι Arif ήταν οι επόπτες για μία συγκεκριμένη ανταλλαγή.

Ανάμεσα στα πιο αξιόλογα σουκ στον αραβικό κόσμο είναι το περίφημο σουκ Χαμιντίγια (Hamidiyya) της Δαμασκού και τα σουκ του Αλέπο στη Συρία, τα σουκ της Σιδώνας και της Τρίπολης στο Λίβανο, το υπαίθριο παζάρι στην πλατεία

Ζεμάα ελ–Φνα (Djemaa el–Fna) στο Μαρακές του Μαρόκου, το σουκ Χαν ελ–Χαλίλι (Khan el–Khalili) στο Κάιρο της Αιγύπτου, τα σουκ της Σαανά στην Υεμένη, τα σουκ στο Ντουμπάι κ.ά. Τα παραδοσιακά σουκ της Βηρυτού ισοπεδώθηκαν κυριολεκτικά κατά τη διάρκεια του δεκαπενταετούς εμφυλίου πολέμου στο Λίβανο (1975 – 1990), αλλά κατασκευάστηκαν και πάλι πρόσφατα σε μοντέρνα αρχιτεκτονική γραμμή, που διατηρεί όμως στοιχεία της πρότερης αραβικής μορφολογίας τους.

2.2.5. Τα Σεσια

Το σέσια (Chéchia) είναι το εθνικό καπέλο της Τυνησίας και πρόκειται για παραλλαγή του μπερέ (Εικόνα 3). Στην Τυνησία, την ανατολική Λιβύη και την περιοχή της Βεγγάζης (όπου ονομάζεται "chenna") το σέσια είναι κόκκινο, ενώ στην υπόλοιπη Λιβύη είναι μαύρο. Σε ορισμένα μέρη της Τυνησίας και του Μαρόκου, το σέσια είναι λευκό ή γκρι. Η παραλλαγή που υπάρχει η Βεγγάζη, παρόμοια με τον μπερέ των Βάσκων, έχει μία φούντα στο κέντρο του καπέλου, ενώ η παραλλαγή της Τυνησίας δεν έχει. Το σέσια, το οποίο είναι μαλακό και εύκαμπτο, δεν πρέπει να συγχέεται με το φέσι, το οποίο είναι άκαμπτο, κωνικό και περισσότερο ένα καπέλο που φοριέται ως έχει.

Μέχρι το 19ο αιώνα το σέσια συνήθως φοριόντουσαν ως βάση για το τουρμπάνι, καθώς το ύφασμα τυλίγονταν γύρω από το καπέλο στο κεφάλι. Τον τελευταία αιώνα, άρχισε να γίνεται ένα καπέλο από μόνο του και εξελίχθηκε στο τυπικό σήμα κατατεθέν των ανδρών της Τυνησίας. Χαρακτηριστική είναι η φράση του Πέρση ποιητής Rumi, ο οποίος έγραψε: «Ένας άντρας χωρίς σέσια είναι διαλυμένος». Το σέσια έχει υιοθετηθεί επίσης από διάφορα γαλλικά και αφρικανικά στρατεύματα, συμπεριλαμβανομένων των Zouaves, τα τάγματα των οποίων το χρησιμοποίησαν κατά τη διάρκεια του Αμερικανικού Εμφυλίου Πολέμου.

Η διαδικασία κατασκευής του chechia δεν έχει αλλάξει πολύ κατά τη διάρκεια των αιώνων και παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την κατασκευή του μπερέ. Η όλη διαδικασία αποτελείται από έξι στάδια. Αρχικά γίνεται το πλέξιμο, που ακολουθείται από το πάτημα (για να αυξηθεί η πυκνότητα και να ενισχυθούν οι ίνες). Αυτό ακολουθείται από το λανάρισμα, το οποίο αρχικά γινόταν με τριβόλια, αλλά σήμερα έχουν αντικατασταθεί με βούρτσες από χάλυβα. Στη συνέχεια γίνεται το βάψιμο κυρίως σε κόκκινο χρώμα, αλλά επίσης και σε μαύρο (για τη Λιβύη), γκρι και πράσινο (για εξαγωγή στο Μαρόκο και τη Νιγηρία). Μετά την βαφή, η δημιουργία του chechia ολοκληρώνεται και το καπέλο βουρτσίζεται (southpacificberets.com).

Καθώς λίγα παιδιά έχουν αναλάβει την οικογενειακή επιχείρηση παραγωγής σέσια, η παλιά και πολύπλοκη τέχνη της κατασκευής σέσια σιγά σιγά εξαφανίζεται. Από την ανεξαρτησία της Τυνησίας το 1956, χάρη στις φθηνές εισαγωγές και στο ότι οι νέοι αποστασιοποιούνται από τις παραδώσεις, τα σέσια είναι σε παρακμή. Φοριούνται μόνο από ηλικιωμένους άνδρες και σε ειδικές θρησκευτικές περιστάσεις. Είναι ενδιαφέρον ότι το σέσια δεν φοριέται μόνο από τους Μουσουλμάνους, αλλά συνήθως και από τους Εβραίους της Τυνησίας.



Εικόνα 3: Η τυνήσια παραλλαγή του σέσια, το παραδοσιακό καπέλο της Τυνησίας. Είναι κόκκινου χρώματος και δεν φέρει φούντα (lartisanet.com).

2.2.6. Ιστορικα Στοιχεια Των Σουκ Στην Τυνησια

Η δυναστεία των Hafsid (1128 – 1535) κυβέρνησε με αυτόνομο και κυρίαρχο τρόπο πάνω για από τρεις αιώνες. Η αντιβασιλεία τους σημαδεύτηκε από τη σημαντική ανάπτυξη του αστικού ιστού στην Τύνιδα, καθώς και την ανάπτυξη στους οικονομικούς και κοινωνικούς τομείς της. Οι εξελίξεις αυτές επέφεραν μια ισχυρή καλλιτεχνική και εμπορική παρουσία στην ακμάζουσα πόλη. Δημιουργήθηκαν αγορές επικεντρωμένες σε προϊόντα πολυτελείας, όπως εκείνα από δέρμα και ύφασμα. Οι δραστηριότητες αυτές γίνονταν σε τόπους παραγωγής και εμπορίου, που επρόκειτο να γίνουν τα νέα σουκ.

Μετά από τη χαοτική ισπανική κατοχή, κάτω από τη δυναστία των Hafsid, η Τύνιδα έγινε το 1574 μία οθωμανική επαρχία και υποβαθμίστηκε σε δεύτερης τάξης πολιτεία (pachalik). Αυτή η υποβάθμιση έφερε μαζί της την έλευση ενός νέου τρόπου ζωής, που εισήχθη από την τον πληθυσμό της Λεβαντίνης. Αυτό αφορούσε αρχικά τα ρούχα και την τουρκική μόδα, τα οποία με τη σειρά τους οδήγησαν στη δημιουργία νέων σουκ για να καλύψουν τις καινούργιες ανάγκες του πληθυσμού. Έτσι, επήλθε η γέννηση του σουκ el Trouk, του σουκ el bachmaqiyya, του σουκ el leffa, του σουκ el Sarrajine κ.ά..

Το τουρκικό στοιχείο δεν ήταν το μόνο που έφτασε στη Μεδίνα. Στην αρχή του 17ου αιώνα, σημαντική κύματα μεταναστών από την Ανδαλουσία έφτασαν στην Τύνιδα και εγκαταστάθηκαν σε κοινότητες στη Μεδίνα (rue des Andalous, rue de la vieilleTronja, Bab Souika, τζαμί Harmel κ.ά.) και εισήγαγαν τις δικές τους συγκεκριμένες παραδόσεις και είδη ένδυσης. Η Τυνησία τους χρωστάει κυρίως την εισαγωγή και ανάπτυξη των σέσια (βλ. §2.2.5). Αυτή η προσοδοφόρα βιομηχανία, η οποία έγινε σήμα κατατεθέν στη Τυνησίας, ήταν αποτέλεσμα αρχικά της δημιουργίας των τριών σουκ βρίσκονται κοντά στο τζαμί Hammouda Pasha el Mouradi. Πρόκειται για το μεγάλο σουκ el chaouachiyya, το μικρό σουκ el chaouachiyya και το σουκ el Hafsi (προς τιμήν του Mohammed el Bey Hafsi).

Σήμερα, το Μεγάλο Τζαμί (Great Mosque), το νευραλγικό κέντρο της πόλης, είναι η άγκυρα για τα παλαιότερα σουκ της Μεδίνας. Το Μεγάλο Τζαμί

περιβάλλεται από το σουκ el Attarine, το σουκ el Qmech, el Souf και το σουκ el Fekka. Αυτά τα σουκ ειδικεύονται στην παραγωγή πολύτιμων αγαθών, δημιουργώντας μικρή ηχορύπανση. Διαθέτουν σταυρωτές καμάρες, θόλους και πλακόστρωτα δρομάκια που οδηγούν σε κατοικημένες περιοχές της παλιάς πόλης.

Ορισμένοι κανόνες υπήρχαν αναφορικά με τη θέση των σουκ. Βασικοί παράγοντες ήταν το επίπεδο του θορύβου και η οπτική ρύπανση, η πραγματική ρύπανση που προκαλείται από τη δραστηριότητα, το μέγεθος των προϊόντων και η οικονομική τους αξία. Αυτή η ιεράρχηση των παζαριών εκ των πραγμάτων διέπει τη διανομή τους στην κεντρική Μεδίνα και τα δύο προάστια. Αυτό διατηρήθηκε για αιώνες χάρη στις αρχές της Ουμάνας και από τον 19ο αιώνα, από τον Σεΐχη της Μεδίνας (Sheikh el Medina), που ήλεγχε την άσκηση του επαγγέλματος έξω από την περίμετρο του σουκ.

Κάποιες αλλαγές όμως έγιναν αισθητές. Μεταξύ άλλων, η εξαφάνιση ορισμένων σημείων στην αγορά: των τοποθεσιών Sidi Mardoum, al Marid (βιβλιοπωλείο της γειτονιάς) και Rahbet el Oud (Bab Bhar). Ορισμένα σουκ επίσης τροποποιήθηκαν, μετά τη μεγάλη μείωση της κατασκευής κεριών (chammaine), η οποία έδωσε τη θέση της σε υποδηματοποιούς (blaghjiyya).

Το σουκ el Kébir και το Σουκ των Σέσια (Souk Esseghir de la Chéchia ή Souk des Chéchias – Εικόνα 4) χτίστηκαν από τον Mourad τον 2ο, την περίοδο 1675 – 1684.

Ως μία βιομηχανία, εξ ορισμού, τα σέσια σημάδευσαν βαθιά την τέχνη της Τυνησίας στα ρούχα και εν γένει την πόλη της Τύνιδας. Η μεγάλη επιτυχία τους μετά τη σταδιακή υιοθέτησή τους από τους μετανάστες από την Ανδαλουσίας, καθώς εγκαταστάθηκαν στην Τύνιδα, συνέβαλε σημαντικά στην οικονομική υγεία της της Τύνιδας, τον 19ο αιώνα, καθώς εξάγονταν εκατοντάδες χιλιάδες καπέλα.

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας αυτής οδήγησε σε μια ισχυρότερη παρουσία στην πόλη, τόσο με την κατασκευή πρόσθετων σουκ, όσο και με την ενίσχυση των υφιστάμενων σουκ. Συνεπώς στην κεντρική Μεντίνα υπάρχουν: το σουκ el

Kebir, το σουκ el Srhir, το σουκ Souk el Drouj και το σουκ el Hafsi, το οποίο έγινε μέλος το σουκ el Berka τον 19ο αιώνα. Τα σουκ el Hafsi και Ελ Drouj είναι δίπλα στον δρόμο Kasbah.

Κατά τον 19ο αιώνα και πιο συγκεκριμένα το 1850, οι Fleury υπολογίζονταν σε σχεδόν 300 εξειδικευμένες βιομηχανίες πλεξίματος, απασχολώντας σχεδόν 7000 τεχνίτες, οι οποίοι χωρίζονταν σε εργαζόμενους και μαθητευόμενους. Το 1880, ο αυξημένος ανταγωνισμός από το εξωτερικό (κυρίως από τη Γαλλία και την Αυστρία) και η έλλειψη των πρώτων υλών, προκάλεσαν την αποδυνάμωση της βιομηχανίας. Αυτό, σε συνδυασμό με υιοθέτηση του οθωμανικού σέσια, θα οδηγούσε σε μια αργή αλλά σταθερή παρακμή. Την παραμονή της ανεξαρτησίας, η πόλη διέθετε μόνο 110 εξειδικευμένους τεχνίτες στο πλέξιμο, εκ των οποίων μόνο 50 δήλωναν φανερά το επάγγελμά τους.

Κατά το 1987, η μείωση της εγχώριας ζήτησης αποτελούσε αδιαμφισβήτητο γεγονός. Ωστόσο, παραπάνω από το 70% της παραγωγής εξαγόταν (κυρίως στην Αφρική). Ο ανταγωνισμός με ξένα καπέλα, χαμηλότερων τιμών, προκάλεσε την υποβάθμιση της ποιότητας των τυνησιακών καπέλων λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής (υψηλές τιμές του μαλλιού και μειωμένη προσφορά στην αγορά, φόροι εξαγωγής κ.λπ. – ASM, 2014).

2.2.7.Το Σουκ Των Σεσια (Souk Des Chechias)

Το Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias) βρίσκεται στην οδό Rue de la Kasbah, στη Μεδίνα της Τύνιδας (Τυνησία). Αρχικά, ήταν ένας χώρος εργασίας και πώλησης σέσια. Σήμερα (Εικόνα 4) διατηρεί αυτές τις λειτουργίες, αλλά με την μείωση της ζήτησης των σέσια, πολλές μπουτίκ στο σουκ μετατράπηκαν σε εργαστήρια για κοσμήματα και καταστήματα για διάφορα χειροποίητα είδη.



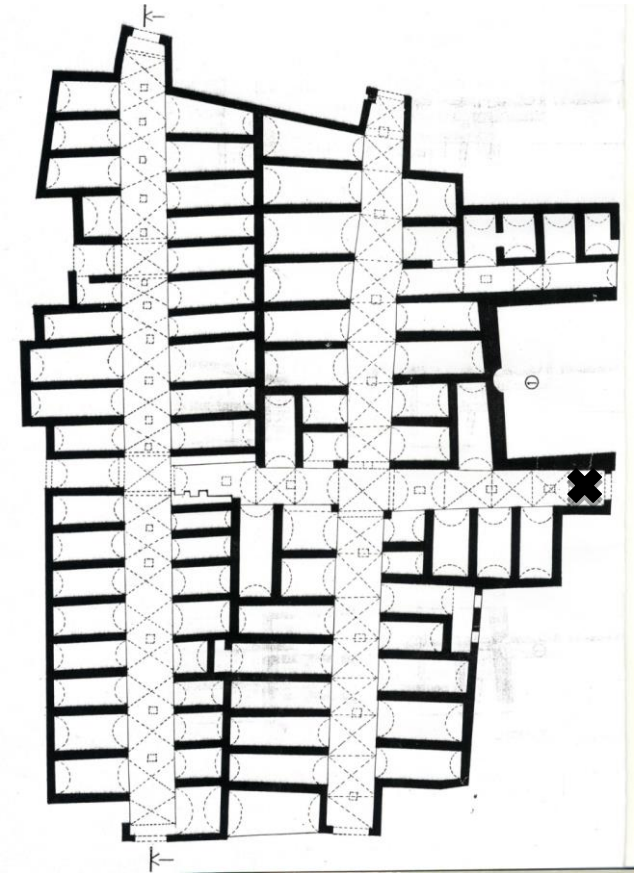
Εικόνα 4: Η είσοδος του Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias) σήμερα, η οποία εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.

Το σουκ των σάσια είναι πάντα ένα ζωντανός χώρος δραστηριότητων χειροτεχνίας, ένας χώρος που φέρνει τους καλλιτέχνες και τους μαθητές μαζί και χρησιμεύει ως ένα πέρασμα, το οποίο σχεδόν επιβάλλεται να επισκεφθούν οι τουρίστες, στην καρδιά του κέντρου της Μεδίνας της Τύνιδας. Κατά τη διάρκεια του μήνα του Ραμαζανιού (Ramadan) και της εποχής του Φεστιβάλ της Μεδίνας της Μεδίνας (Festival de la Médina), κάθε βράδυ λαμβάνουν χώρα εκεί εκδηλώσεις με μουσική Σούφι, παραδοσιακά τραγούδια και μουσική με ανδαλουσιανή προέλευση (malouf).

Τα σουκ el Kebir και el Srhir έχουν αρκετά σημεία πρόσβασης: δύο πόρτες στο δρόμο Sidi Ben Arous, δύο πόρτες στο σουκ el Bey και δύο πόρτες στην οδό Rue de la Kasbah (Σχήμα 7). Τα σουκ επικοινωνούν μεταξύ τους, σχεδιάστηκαν την ίδια στιγμή (17ος αιώνας) και έχουν συνολικά 122 καταστήματα. Αυτό το έργο μεγάλης κλίμακας υποστηρίχθηκε από τον ηγεμόνα Muradite και έχει τη συνηθισμένη μορφή των σουκ, συμπεριλαμβανομένης της ευρείας κλίτης που καλύπτεται από σταυρωτούς θόλους. Οι ξύλινες πόρτες των καταστημάτων είναι όμορφα διακοσμημένες με ξυλογλυπτική. Τα έπιπλα είναι ιδιαίτερα προσεκτικά δημιουργημένα και η εσωτερική διαρρύθμιση ενδιαφέρουσα.

Το κάθε κατάστημα διαιρείται, ως συνήθως, σε δύο περιοχές. Η πρώτη είναι η πρόσοψη του καταστήματος, με πάγκους που εκθέτουν διάφορα σέσια. Η δεύτερη περιοχή είναι το πίσω δωμάτιο, το οποίο είναι χαμηλοτάβανο και έχει σχεδιαστεί ως ένας χώρος εργασίας, όπου ο εργάτης δουλεύει και ο επιβλέπων τον παρατηρεί (ASM, 2014).

Το κτίριο αποτελεί μια παχιά λιθοδομή, η οποία περιλαμβάνει σημεία με παραδοσιακά τούβλα, κονιάματα και λευκό επίχρισμα από ασβέστη. Η γεωμετρική τεκμηρίωση του κτιρίου φαίνεται στο Σχήμα 44 (βλ. §3.3).



Σχήμα 7: Τοπογραφικό σχέδιο του Σουκ των Σέσια. Σημειωμένο με Χ είναι το σημείο που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία (ASM, 2014).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1.1. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (FOM)

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί, με διάμετρο μικρότερη των 8μm, όπου από μέσα τους, μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, υπό μορφή φωτός. Συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Ένα καλώδιο οπτικών ινών, περιέχει μέσα του δεκάδες ή και εκατοντάδες πολύ λεπτές τέτοιες οπτικές ίνες. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χιλιόμετρα.

Υπάρχει ένας ιδιαίτερος κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με έρευνα για της δυνατότητες και εφαρμογές τους. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών και επιτρέπουν τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερο εύρος ζώνης (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) σε σχέση με άλλες μορφές μετάδοσης σημάτων, όπως ο χαλκός, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης πλησιάζει αυτή με την οποία διαδίδεται το φως. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν με αυτές με μικρότερη απώλεια και επιπλέον δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για φωτισμό. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων λέιζερ. Τέλος, στην επιστήμη των υλικών βρίσκουν εφαρμογή στην επί τόπου αναγνώριση των τύπων φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφαρμογών μεθόδων συντήρησης,

καθαρισμού και προστασίας επιφανειών και στην αρχική εκτίμηση της μικροδομής ενός υλικού.

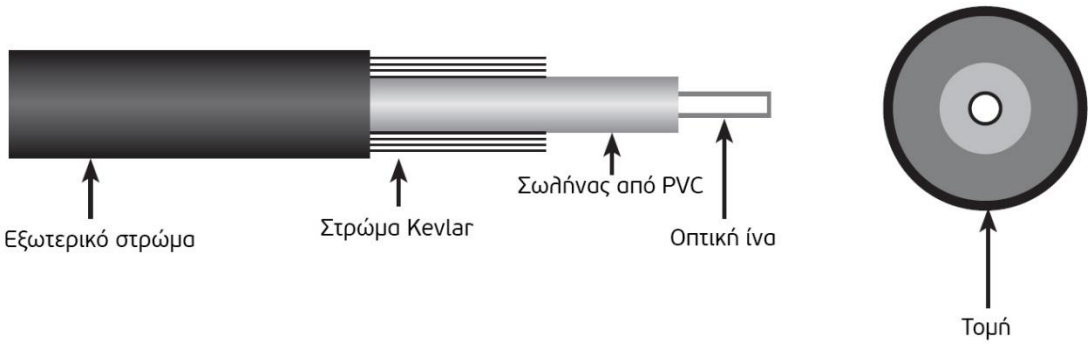
Η χρησιμοποίηση των οπτικών ινών σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών οφείλεται στην πληθώρα πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Πιο συγκεκριμένα, έχουν χαμηλό κόστος πρώτης ύλης (γυαλί) και μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων (φωτεινής δέσμης), που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα. Ακόμη, μπορούν να μεταφέρουν παράλληλα τεράστιο όγκο δεδομένων σε σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια, ενώ παράλληλα είναι πολύ πιο λεπτές και ελαφριές από αυτά. Ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών. Επιπλέον, η μεταφορά των δεδομένων είναι πολύ γρήγορη και τα δεδομένα που ταξιδεύουν μέσα σε αυτές είναι λιγότερο ευάλωτα σε παρεμβολές. Συγκεκριμένα, οι απώλειες δεδομένων θεωρούνται σχεδόν μηδενικές. Τέλος, τα δεδομένα μεταδίδονται ψηφιακά, συνεπώς επιτυγχάνεται γρηγορότερη κωδικοποίηση – αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Το αμιγώς ψηφιακό σήμα εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Αναλυτικότερα, είναι πιο ακριβές από τα χάλκινα καλώδια. Επίσης το κόστος των ηλεκτρονικών και οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων μπορεί να είναι μεγάλο. Είναι, επιπρόσθετα, πιο δύσκολη η εγκατάστασή τους και είναι πολύ εύθραυστες. Τέλος, δεν είναι αρκετά ευλύγιστες και θα πρέπει η εγκατάσταση τους να γίνεται με ελαφριά κλίση γιατί διαφορετικά θα υπάρχει απώλεια δεδομένων.

Συνήθως αυτό που χρησιμοποιείται είναι μία δέσμη οπτικών ινών. Αν οι ίνες αποτελούνταν μόνο από ένα υλικό, τότε το φως που «ταξιδεύει» στο εσωτερικό τους θα περνούσε, όταν θα έρχονταν σε επαφή, από την μια ίνα στην άλλη. Έτσι, κάθε ίνα επικαλύπτεται με ένα ή περισσότερα λεπτά στρώματα υλικού

μικρότερου δείκτη διάθλασης, έτσι ώστε κάθε επόμενο στρώμα να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το προηγούμενο. Επίσης, τοποθετείται στη γυάλινη ίνα ένα περίβλημα που την προστατεύει και την κάνει πιο ανθεκτική σε μηχανικές καταπονήσεις. Κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τα εξής τρία μέρη: Πρώτον, από την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται πυρήνας και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως. Δεύτερον, από την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα λόγω της διαφορετικότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο, ώστε να κρατάει τα κύματα φωτός, με ολικές ανακλάσεις, μέσα στον πυρήνα και να συνεχίζουν το ταξίδι τους μέσω αυτού. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται μανδύας. Τρίτον, από ένα αδιαφανές εξωτερικό πλαστικό. Στις οπτικές ίνες που απαρτίζουν ένα οπτικό καλώδιο, ουσιαστικά υπάρχει και ένα τέταρτο, εξωτερικό, στρώμα που είναι το έγχρωμο μελάνι που εφαρμόζεται για την αναγνώριση των ινών.

Καλώδια οπτικών ινών υπάρχουν σε όλα τα μεγέθη και σχήματα. Ακριβώς όπως και στα ομοαξονικά καλώδια, το τμήμα που κατέχουν οι οπτικές ίνες είναι ένα κομμάτι του καλωδίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, το καλώδιο οπτικών ινών περιλαμβάνει ένα προστατευτικό στρώμα που προστατεύει το καλώδιο κατά τη διαδικασία παραγωγής και χρήσης του. Στο εσωτερικό αυτού, η οπτική ίνα περικλείεται από έναν σωλήνα από πολυβινυλοχλωρίδιο (Polyvinyl chloride – PVC), η ευκαμψία του οποίου επιτρέπει στην οπτική ίνα να λυγίζει. Γύρω από τον σωλήνα από PVC, υπάρχει ένα στρώμα Kevlar που απορροφά τα φορτία που ασκούνται στην ίνα κατά τη τοποθέτησή της. Τέλος, ένα εξωτερικό περίβλημα από PVC προστατεύει το καλώδιο από την υγρασία.



Σχήμα 8: Δομή ενός τυπικού καλωδίου οπτικών ινών (CSI, 2009).

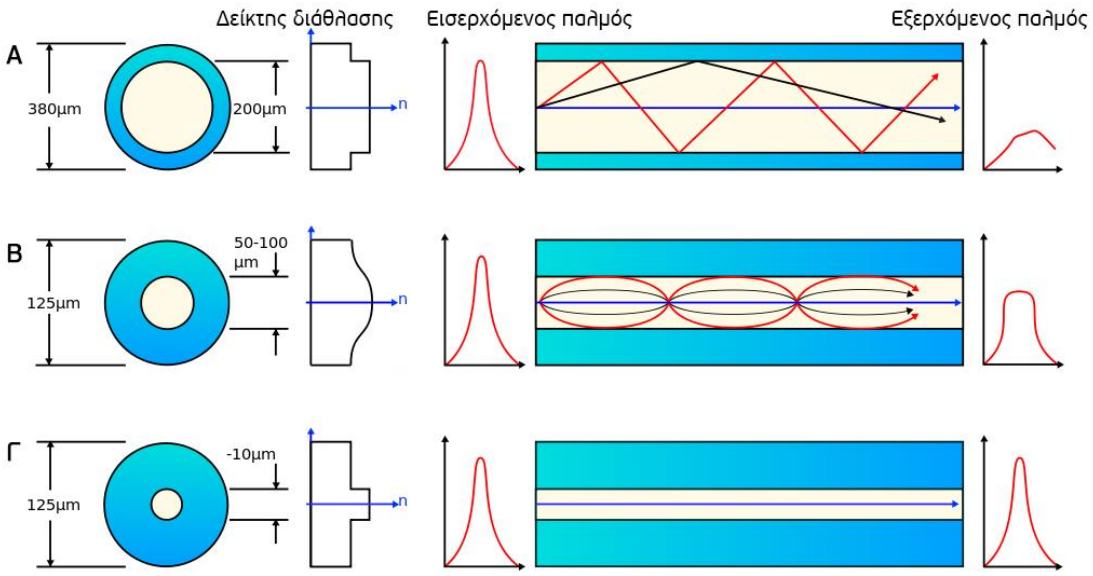
Η δομή ενός δικτύου οπτικών ινών είναι αρκετά απλή. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τον πομπό, ένα μέσο μεταφοράς, τον ενισχυτή σήματος και τον δέκτη. Ο πομπός μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε φωτεινή πληροφορία και πραγματοποιεί την εκπομπή της. Βρίσκεται σε επαφή με το οπτικό καλώδιο και διαθέτει κατάλληλο φακό, ώστε να διοχετεύει το φως στο εσωτερικό του. Ως μέσο μεταφοράς, χρησιμοποιείται το καλώδιο οπτικών ινών. Ο ενισχυτής σήματος είναι απαραίτητος μόνο σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, επειδή παρατηρείται συχνά εξασθένιση του σήματος και αναλαμβάνει την ενίσχυσή του σε τακτικά διαστήματα. Διαθέτει ειδικά κυκλώματα, τα οποία όταν λάβουν την εξασθενημένη φωτεινή πληροφορία, εκπέμπουν το σήμα εκ νέου, με πλήρη ισχύ. Τέλος ο δέκτης λαμβάνει το φωτεινό σήμα και το μετατρέπει ξανά στην αρχική του μορφή, δηλαδή σε ψηφιακά δεδομένα. Όπως και ο πομπός, βρίσκεται σε άμεση επαφή με το καλώδιο οπτικών ινών και χρησιμοποιεί φωτοδιόδους για ανιχνεύσει το λαμβανόμενο σήμα.

Με την πάροδο των ετών έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι οπτικών ινών, ο καθένας εκ των οποίων υποστηρίζει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις διάφορων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Για όλους τους τύπους των οπτικών ινών, υπάρχουν διεθνή πρότυπα στα οποία προδιαγράφονται τα χαρακτηριστικά μετάδοσης καθώς και τα γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά αυτών. Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

Στην ίνα τύπου πολλαπλού τύπου με βηματική μεταβολή (δηλαδή απότομη μεταβολή από την ίνα στο περίβλημα) του δείκτη διάθλασης (multimode step–index fiber), όπως φαίνεται στο Σχήμα 9Α, υπάρχουν πολλαπλά κύματα μετάδοσης και το φως διαδίδεται με ολικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος. Ο πυρήνας στον τύπο αυτό έχει διάμετρο από 100μm έως 200μm και το περίβλημα από 140μm έως 280μm. Τα πολλαπλά κύματα διανύουν διαφορετικές διαδρομές με την ίδια ταχύτητα και φθάνουν σε διαφορετικούς χρόνους στο τέρμα του αγωγού.

Στην ίνα πολλαπλού τύπου με βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης (multimode graded–index fiber), όπως φαίνεται στο Σχήμα 9Β, υπάρχουν πολλαπλά κύματα μετάδοσης και ο δείκτης διάθλασης μειώνεται εκθετικά από το κέντρο προς την περιφέρεια της ίνας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα των κυμάτων όσο πλησιάζουν την περιφέρεια. Έτσι, παρόλο που διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις φθάνουν στον ίδιο περίπου χρόνο στο τέρμα, με τα κύματα που κινούνται παράλληλα στον άξονα (Μοροπούλου, 2009δ).

Η πιο εξελιγμένη οπτική ίνα είναι η ίνα απλού τύπου με ένα μόνο κύμα (monomode ή single mode–index fiber), όπως φαίνεται στο Σχήμα 9Γ. Παρουσιάζουν βηματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης και διαστάσεις πυρήνα μέχρι 10μm. Τα κύματα φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και μπορούν να σταλούν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Η μικρή αυτή διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει τη διέλευση σε ένα περιορισμένο πλήθος ακτινών, ουσιαστικά μόνο σε ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της διατομής των.



Σχήμα 9: Οι τρεις κατηγορίες οπτικών ινών. **Α.** Ίνα τύπου πολλαπλού τύπου με βηματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης (multimode step–index fiber). **Β.** Ίνα πολλαπλού τύπου με βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης (multimode graded–index fiber). **Γ.** Ίνα απλού τύπου με ένα μόνο κύμα (monomode ή single mode–index fiber).

Η εξέταση μιας επιφάνειας με χρήση μικροσκοπίας οπτικών ινών (Fiber Optic Microscopy – FOM) είναι μια μη καταστρεπτική τεχνική ελέγχου. Η διάταξη είναι φορητή, ελαφριά και σχετικά μικρών διαστάσεων, γεγονός που επιτρέπει την εξέταση τόσο μεγάλων όσο και επί μέρους τμημάτων επιφανειών.

Το μικροσκόπιο FOM χρησιμοποιεί φακούς οπτικών ινών. Ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται μια λάμπα αλογόνου. Τα μήκη κύματος που χαρακτηρίζουν το λευκό φως είναι της τάξεως των 400 – 760 nm. Τα μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων του υλικού που παρατηρείται είναι συνήθως της τάξεως των 0,15 – 2 nm, γεγονός που εξηγεί την παρατήρηση των κρυστάλλων σαν συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από λευκό φως. Η αλληλεπίδραση των κρυστάλλων με το φως προσδίδει τις οπτικές ιδιότητες στον παρατηρούμενο κρύσταλλο, αξιοποιώντας τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της απορρόφησης. Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι τα εξής (Μοροπούλου, 2009δ):

- Λάμπα αλογόνου, που λειτουργεί στα 100W.

- Έλεγχος έντασης φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.
- Σύστημα εστίασης.
- Αντικειμενικοί φακοί. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μπορεί να αλλάξει κανείς φακούς για να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων. Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας, μέσω οπτικών ινών.

Γενικά, οι αντικειμενικοί φακοί των μικροσκοπίων χαρακτηρίζονται από τα ακόλουθα μεγέθη (Μοροπούλου, 2009δ):

- Άνοιγμα διαφράγματος A_n (numerical aperture).
- Η μικρότερη μετρήσιμη διάσταση μεταξύ δυο σημείων d, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση του Abbe για τη διακριτική ικανότητα: $d = \frac{k \cdot \lambda}{A_n}$, όπου το k είναι σταθερά.
- Το βάθος εστίασης δίνεται από τη σχέση του Rayleigh: $\Delta z = \frac{\lambda}{n \cdot \sin^2\theta}$ και χαρακτηρίζει την απόσταση μεταξύ σημείων εστίασης, στα οποία η εικόνα εμφανίζει αποδεκτή καθαρότητα.

Εξαιρετικά σημαντική είναι η κάθετη προς την υπό εξέταση επιφάνεια τοποθέτηση του μικροσκοπίου FOM. Με αυτόν τον τρόπο, το φως ανακλάται διάμεσο των αντικειμενικών φακών. Το μικροσκόπιο FOM τελικά συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας USB (Universal Serial Bus – Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος), για την καταγραφή και αποθήκευση κινούμενων (βίντεο) ή σταθερών εικόνων. Οι εικόνες αυτές μπορούν να επεξεργαστούν με εξιδεικευμένο ή μη λογισμικό επεξεργασίας εικόνων ώστε να προκύψουν τα τελικά αποτελέσματα και να γίνει εκτίμηση της μικροδομής του υλικού ή να παρουσιαστεί η χαρτογράφηση της φθοράς μιας αρχιτεκτονικής επιφάνειας.

3.1.2. ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ (IRT)

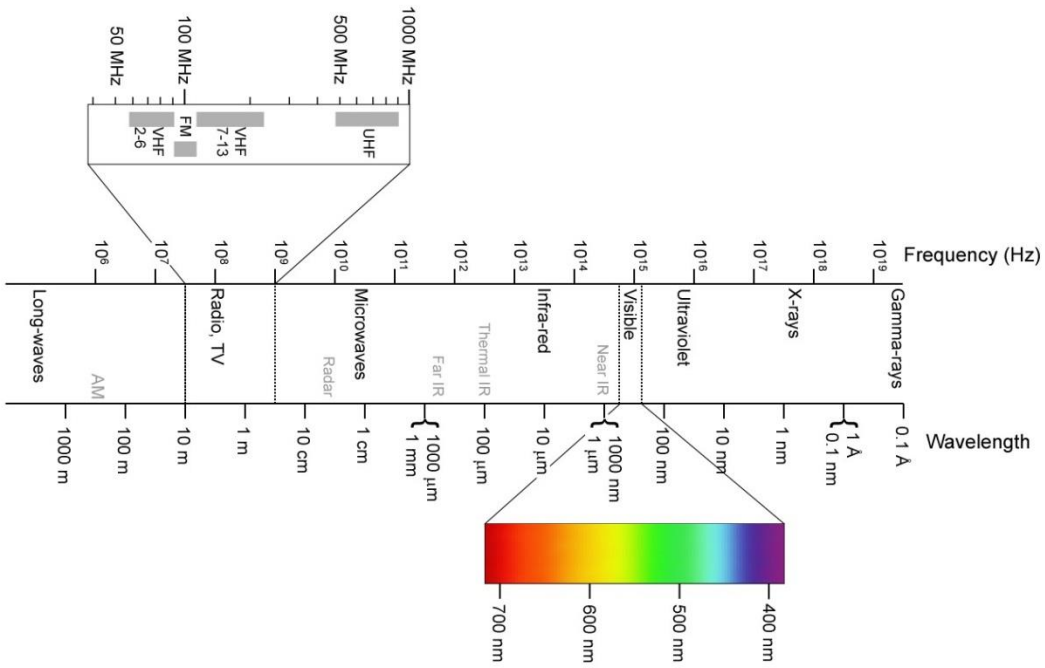
Η θερμογραφία υπέρυθρου (Infrared Thermography – IRT) είναι μη καταστρεπτική τεχνική ελέγχου, κατά την οποία μετράται και καταγράφεται η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός υλικού ή ενός σώματος, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το αποτέλεσμα τέτοιων μετρήσεων είναι το θερμογράφημα, μια «θερμική» εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας. Η τεχνική της IRT χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών, όπως οι ακόλουθες (Κουή και συνεργάτες, 2014):

- Αξιολόγηση επεμβάσεων συντήρησης σε μνημεία και ιστορικά σύνολα, όπως επεμβάσεις καθαρισμού, επεμβάσεις στερέωσης και έλεγχος της φυσικοχημικής συμβατότητας υλικών σε επεμβάσεις αποκατάστασης.
- Εντοπισμός ανερχόμενης ή παραμένουσας υγρασίας σε τοιχοποιίες και αρχιτεκτονικές επιφάνειες.
- Επιφανειακή φθορά τοιχοποιιών, αρχιτεκτονικών επιφανειών κλπ.
- Ανίχνευση διαστρωμάτωσης δομικών υλικών σε τοιχοποιίες και κατασκευές.
- Αποφλοίωση χρωμάτων και επικαλύψεων σε γέφυρες, τοίχους, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δίκτυα κ.λπ..
- Ρωγμές σε υλικά και κατασκευές.
- Ενεργειακή επιθεώρηση κτηρίων, εντοπίζοντας θερμικές γέφυρες και ύπαρξη κακής, ελλιπούς ή κατεστραμμένης μόνωσης.
- Επιθεώρηση λεβήτων, συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού.
- Εντοπισμός διαρροών σε σωληνώσεις, δίκτυα και θερμαινόμενα δάπεδα.
- Έλεγχος μηχανολογικού εξοπλισμού για τυχόν υπερθερμάνσεις κινητήρων και καταπονήσεις.
- Ποιοτικός έλεγχος βιομηχανικών εγκαταστάσεων.
- Έλεγχος αεροσκαφών, κατά τα στάδια παραγωγής ή συντήρησής τους (έλεγχος πτερυγίων, κινητήρων, κελύφους του αεροσκάφους κ.λπ.).
- Επιθεώρηση ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων.

- Εντοπισμός φθορών ή ελαττωματικών περιοχών σε φωτοβολταϊκά πάνελ.
- Στην ιατρική και την υγεία, για τον εντοπισμό ατόμων με πυρετό, μέσα από ένα πλήθος (για παράδειγμα σε αεροδρόμια), που ενδεχομένως φέρουν κάποια επικίνδυνη ασθένεια.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ανάλογα με τη συχνότητα των κυμάτων της και αντίστοιχα ανάλογα με την ενέργεια που μεταφέρει, χωρίζεται σε περιοχές. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γάμα. Όλες αυτές οι παραπάνω μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κινούνται (ταξιδεύουν) με την ταχύτητα φωτός και μπορούν ακόμη να διαπεράσουν και ορισμένα υλικά.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ή υπέρυθρες ακτίνες είναι τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Σχήμα 10). Στο φάσμα τοποθετούνται ως μικρότερη συχνότητα, στην προέκταση της κόκκινης ορατής ακτινοβολίας, γεγονός από το οποίο προκύπτει και το όνομα «υπέρυθρες» (υπό του ερυθρού). Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από το 1 mm έως τα 700 nm, όπου ξεκινά το ορατό φάσμα. Συνήθως εκπέμπονται από όλα τα σώματα, που έχουν κάποια θερμοκρασία. Τα σώματα με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερες υπέρυθρες και αντίστροφα, αυξάνεται η θερμοκρασία των σωμάτων που απορροφούν περισσότερες υπέρυθρες ακτίνες. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την ταλάντωση των σωματιδίων από τα οποία αποτελείται, η οποία αφορά τη θερμική ενέργεια του σώματος. Οι υπέρυθρες ακτίνες μπορούν να γίνουν αντιληπτές από ορισμένους οργανισμούς, όπως οι σκύλοι και τεχνητά με τις θερμικές κάμερες. Ευρεία εμπορική χρήση έβρισκαν οι υπέρυθρες ακτίνες στη μεταφορά δεδομένων από τα κινητά τηλέφωνα πριν την κυκλοφορία του Bluetooth.

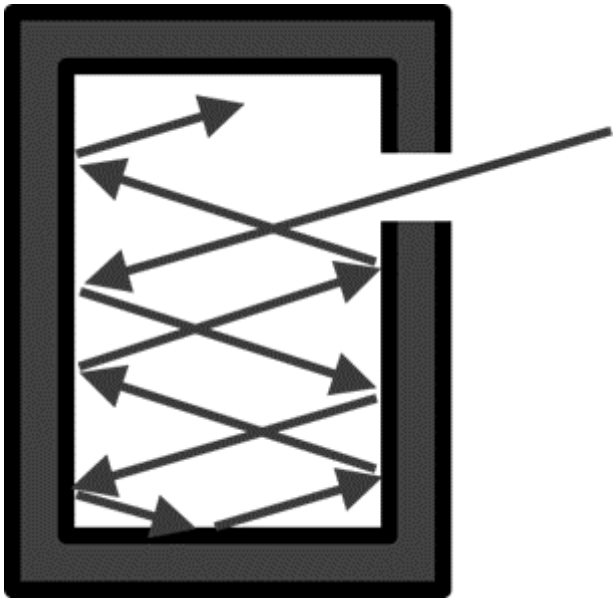


Σχήμα 10: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. (Αθανασίου, 2013).

Η κατανόηση της μετάδοσης της θερμότητας διευκολύνει τη σωστή ανάλυση του θερμογραφήματος. Η θερμική πληροφορία που λαμβάνεται από το θερμογράφημα οδηγεί στη σωστή διάγνωση του εκάστοτε προβλήματος. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με τρεις τρόπους: με αγωγή (conduction), με μεταφορά ή συναγωγή (convection) και με ακτινοβολία (radiation).

Το μέλαν σώμα (Σχήμα 11) είναι το σώμα εκείνο, που απορροφά όλη την ακτινοβολία που πέφτει πάνω του, με οποιοδήποτε μήκος κύματος. Η ονομασία «μέλαν» αποδίδεται από το νόμο του Kirchoff (1824 – 1887), σύμφωνα με τον οποίο ένα σώμα ικανό να απορροφά όλη την ακτινοβολία κάθε μήκους κύματος που προσπίπτει σε αυτό, είναι επίσης ικανό και να την εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε ένα τέτοιο σώμα, ο λόγος της εκπεμπόμενης προς την απορροφώμενη ακτινοβολία (e/a) πρέπει να είναι μια συνάρτηση του μήκους κύματος (λ) της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας (T) του σώματος. Το μέλαν σώμα είναι ένα εξιδανικευμένο σώμα ως προς την εκπομπή ακτινοβολίας γιατί, σύμφωνα και με τις προηγούμενες παρατηρήσεις, αφού είναι τέλειος απορροφητής του φωτός, πρέπει να είναι και τέλειος εκπομπός. Καθώς η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας δεν μπορεί

να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας, η εκπεμπόμενη ισχύς είναι η μέγιστη για ένα ιδανικό απορροφητικό μέσο. Το μέλαν σώμα είναι μια πολύ σημαντική έννοια, καθώς μπορεί να αποδείξει ότι η ολική ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και ο φασματικός διαχωρισμός της, εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία.



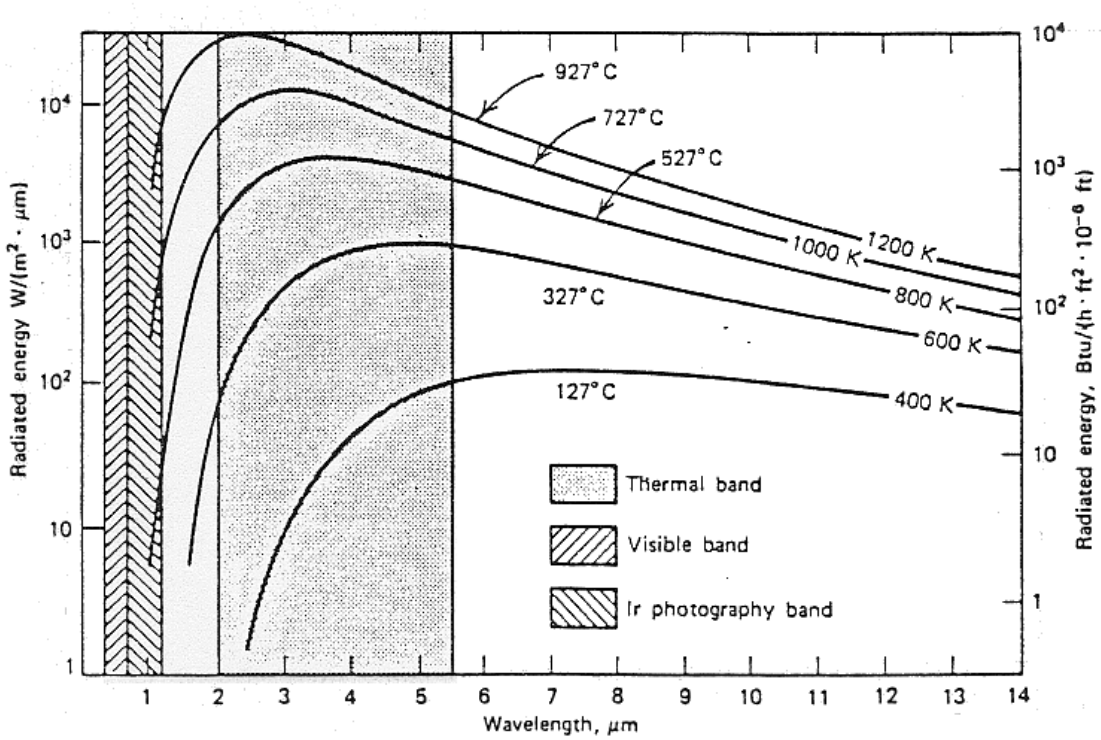
Σχήμα 11: Το μέλαν σώμα. Η ακτίνα παγιδεύεται στο εσωτερικό του.

Ο M. Planck (1858 – 1947) κατάφερε να περιγράψει τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος με την παρακάτω σχέση:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} 10^{-6}$$

όπου $W_{\lambda b}$ ($W/m^2 \cdot \mu m$) είναι το φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος σε μήκος κύματος λ, c είναι η ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8 m/s$), h είναι η σταθερά του Planck ($6{,}6 \cdot 10^{-34} Joule/sec$), k είναι η σταθερά του Boltzmann ($1{,}4 \cdot 10^{-23} Joule/K$), T (K) είναι η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος, και λ (μm) είναι το μήκος κύματος.

Η εξίσωση του Planck, όταν παρουσιάζεται γραφικά για διάφορες θερμοκρασίες, παράγει μια σειρά από καμπύλες. Ακολουθώντας μια οποιαδήποτε καμπύλη του Planck , η εκπομπή φάσματος είναι μηδέν για λ = 0, στη συνέχεια αυξάνεται αλματωδώς προς το μέγιστο σε μήκος κύματος λ_{max} και στη συνέχεια μειώνεται και πλησιάζει στο μηδέν σε πολύ μεγάλα μήκη κύματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο (Μοροπούλου, 2009στ).



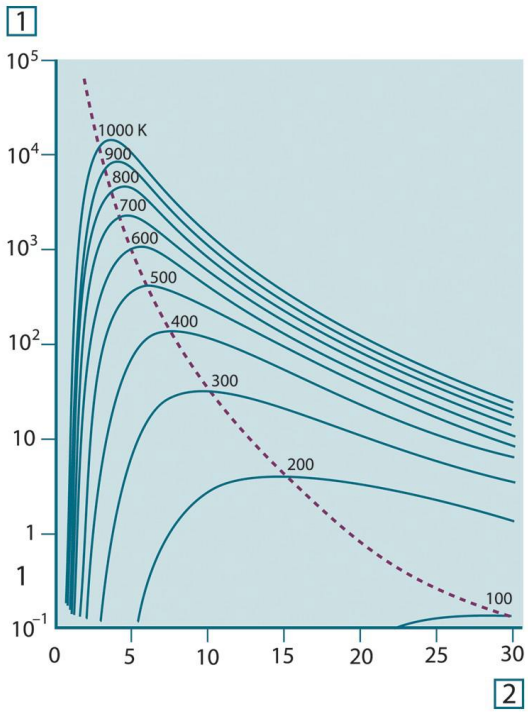
Σχήμα 12: Κατανομή της ενέργειας του μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες (Μοροπούλου, 2009στ).

Διαφορίζοντας την εξίσωση του Plank, εξάγεται η εξίσωση του Wein (1864 – 1928), η οποία είναι η ακόλουθη:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$$

Η σχέση εκφράζει με μαθηματικό τρόπο την κοινή παρατήρηση ότι τα χρώματα μεταβάλλονται από το κόκκινο προς το πορτοκαλί ή το κίτρινο, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ενός ακτινοβολητή θερμότητας (Σχήμα 13). Το μήκος κύματος του χρώματος ταυτίζεται με εκείνο που υπολογίζεται για το λ_{max}.

Ένα πολύ θερμό άστρο, όπως για παράδειγμα ο Σείριος (11000K), που εκπέμπει γαλαζωπό λευκό φως, ακτινοβολεί, με τη μέγιστη τιμή του φασματικού συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας να βρίσκεται εντός του αόρατου φάσματος υπεριώδους, σε μήκος κύματος 0,27μm. Ο Ήλιος (6000K περίπου) εκπέμπει κίτρινο φως, με μέγιστη τιμή στα 0,5μm περίπου, στο μέσον του ορατού φάσματος. Σε θερμοκρασία δωματίου (300K), η μέγιστη τιμή του συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας βρίσκεται στα 9,7μm, στη ζώνη των άπω υπέρυθρων, ενώ σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (77K) η μέγιστη τιμή της σχεδόν αμελητέας ακτινοβολίας ενέργειας βρίσκεται στα 38μm, στα μήκη κύματος των απωτάτων υπέρυθρων (Μοροπούλου, 2009στ).



Σχήμα 13: Καμπύλες του Planck, χαραγμένες σε ημιλογαριθμική κλίμακα, από 100K μέχρι 1000K. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το γεωμετρικό τόπο των μέγιστων τιμών του συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας, σε κάθε θερμοκρασία, όπως περιγράφεται από το νόμο μετατόπισης του Wien. Ο άξονας 1 αντιστοιχεί στον φασματικό συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας και ο άξονας 2 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος (Φλώρος, 2010).

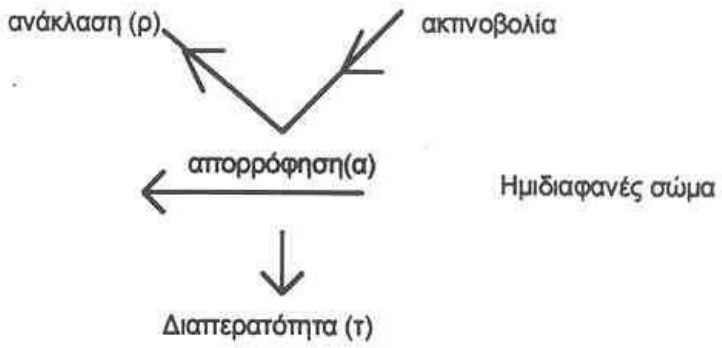
Με την ολοκλήρωση του μαθηματικού τύπου του Planck, μεταξύ λ = 0 και λ = ∞, λαμβάνεται ο συνολικός συντελεστής εκπομπής μέσω ακτινοβολίας ($W_{\lambda b}$) ενός μέλανος σώματος. Έτσι προκύπτει η εξίσωση των Stefan – Boltzmann (J. Stefan 1835 – 1893 και L. Boltzmann 1844 – 1906), η οποία είναι η ακόλουθη:

$$W_{\lambda b} = \sigma T^4$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan Boltzmann ($5{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$). Εφαρμόζοντας την εξίσωση αυτή, μπορεί να υπολογιστεί ότι το ανθρώπινο σώμα, σε θερμοκρασία 300K και με εμβαδόν εξωτερικής επιφανείας περίπου $2m^2$, εκπέμπει ενέργεια περίπου 1kW.

Στην πραγματικότητα, τα αντικείμενα δεν συμμορφώνονται σχεδόν ποτέ με τους νόμους του μέλανος σώματος, σε μια εκτεταμένη περιοχή μηκών κύματος.

Είναι, βέβαια, δυνατό να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος σε ορισμένες περιοχές του φάσματος. Για παράδειγμα, ένας συγκεκριμένος τύπος λευκής βαφής μπορεί να φαίνεται απόλυτα λευκός στην ορατή περιοχή του φάσματος, αλλά εμφανίζεται σαφώς γκρι στα 2μm περίπου, ενώ πέρα από τα 3μm εμφανίζεται σχεδόν μαύρος. Υπάρχουν τρεις διεργασίες που είναι δυνατό να λάβουν χώρα και να μην επιτρέψουν σε ένα πραγματικό αντικείμενο να συμπεριφερθεί ως μέλαν σώμα: ένα κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να απορροφάται (α), ένα κλάσμα μπορεί να ανακλάται (ρ) και ένα κλάσμα μπορεί να μεταδίδεται μέσω του αντικειμένου (τ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 (Φλώρος, 2010).



Σχήμα 14: Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ένα ημιδιαπερατό σώμα (Αβδελίδης, 2002).

Αν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας διαπεράσει το υλικό, τότε το υλικό αυτό θα λέγεται διαφανές. Ακόμη, διακρίνονται τα αδιαφανή υλικά (ακτινοβολούν μόνο από την επιφάνειά τους) και τα ημιδιαπερατά υλικά (ακτινοβολούν από τη μάζα τους). Τέλος, υπάρχουν εξαιρετικά λιασμένα υλικά που αντανακλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω τους και ονομάζονται κάτοπτρα. Η απορροφητική ικανότητα των υλικών αυξάνει, όταν η επιφάνειά τους είναι ανώμαλη. Ένα σώμα που στο μάτι φαίνεται ανώμαλο και τραχύ, στις υπέρυθρες μπορεί να είναι καθρέπτης, γιατί το ορατό φως είναι μικρότερου μήκους κύματος από αυτό των υπέρυθρων.

Επειδή οι παράγοντες τ, ρ και α εξαρτώνται από το μήκος κύματος, χρησιμοποιείται ο δείκτης λ, προκειμένου να υποδηλώνεται η φασματική εξάρτηση των ορισμών τους. Έτσι, φασματικός συντελεστής απορρόφησης α_λ είναι λόγος της φασματικής ακτινοβολούμενης ισχύος που απορροφάται από ένα αντικείμενο προς εκείνη που προσπίπτει σε αυτό. Φασματικός συντελεστής ανάκλασης ρ_λ είναι ο λόγος της φασματικής ακτινοβολούμενης ισχύος που ανακλάται από ένα αντικείμενο προς εκείνη που προσπίπτει σε αυτό. Φασματικός συντελεστής μετάδοσης τ_λ είναι ο λόγος της φασματικής ακτινοβολούμενης ισχύος που μεταδίδεται μέσα από ένα αντικείμενο προς εκείνη που προσπίπτει σε αυτό. Το άθροισμα αυτών των τριών παραγόντων πρέπει πάντοτε να δίνει τη μονάδα, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την IRT, που καλείται συντελεστής εκπομπής, απαιτείται για να περιγράψει το κλάσμα ε του συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος που παράγεται από ένα αντικείμενο σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Συνεπώς ως φασματικός συντελεστής εκπομπής ε_λ ορίζεται ως ο λόγος της φασματικής ακτινοβολούμενης ισχύος, που προέρχεται από ένα αντικείμενο προς εκείνη που προέρχεται από ένα μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος. Ο συντελεστής εκπομπής έχει μία χαρακτηριστική τιμή για κάθε υλικό (Πίνακας 7). Η σχέση που περιγράφει αυτόν τον ορισμό είναι η εξής:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

Πίνακας 7: Συντελεστής εκπομπής ε_λ, για διάφορα υλικά (courses.arch.ntua.gr).

Υλικό	*Συντελεστής Εκπομπής* ε_λ
Γαιώδη υλικά	
Αμμώδες χώμα, στεγνό	0,9
Αργιλώδες χώμα, στεγνό	0,98
Προϊόντα από φυσικά πετρώματα	
Δομικά στοιχεία / Πλάκες / Κυβόλιθοι:	
Ασβεστόλιθος	0,95
Μάρμαρο	0,95
Γρανίτης / Βασάλτης	0,45
Σχιστόλιθος	0,9
Προϊόντα τσιμέντου	
Γαρμπιλόδεμα Οπλισμένο σκυρόδεμα	0,9
Οπλισμένο σκυρόδεμα	0,9
Ελαφροσκυρόδεμα (περλιτόδεμα)	0,9
Πλάκες από σκυρόδεμα	0,9
Κεραμικά προϊόντα	
Οπτόπλινθοι (9 x 6 x 19 cm)	0,94
Διακοσμητικοί οπτόπλινθοι	0,9
Κεραμίδια	0,9
Πλακίδια και πάνελ	0,9
Κυβόλιθοι	0,9
Προϊόντα ξύλου	
Σανίδες ξύλου	0,95
Προϊόντα μετάλλων	
Χάλυβας, από μετάλλευμα	0,2
Χάλυβας, ανοξείδωτος	0,2
Χαλκός, από μετάλλευμα	0,02 – 0,05
Αλουμίνιο, από μετάλλευμα	0,02 – 0,04
Προϊόντα ασφάλτου	
Άσφαλτος	0,95
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	0,95
Ασφαλτικές μεμβράνες	0,92
Ασφαλτική μεμβράνη με επίστρωση AL	0,08
Γυαλί	0,87 – 0,94
Νερό	0,96

Υπάρχουν τρία είδη πηγών ακτινοβολίας, τα οποία διακρίνονται μεταξύ τους, από τον τρόπο με τον οποίο ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μεταβάλλεται με το μήκος κύματος (Φλώρος, 2010):

- Μέλαν σώμα, για το οποίο $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$.
- Τεφρό σώμα, για το οποίο $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ σταθερά μικρότερη του 1.
- Επιλεκτικός ακτινοβολητής, στον οποίο το ε μεταβάλλεται με το μήκος κύματος.

Σύμφωνα με το νόμο του Kirchhoff, για κάθε υλικό, ο φασματικός συντελεστής εκπομπής ισούται με τον φασματικό συντελεστή απορρόφησης ενός σώματος, σε κάθε καθορισμένη θερμοκρασία και μήκος κύματος. Δηλαδή:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Από τον τύπο αυτό προκύπτει ότι, για ένα αδιαφανές υλικό ($\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$), ισχύει ότι:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \text{ ή } \varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

Η τελευταία σχέση είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι συχνά είναι ευκολότερο να μετρηθεί άμεσα ο συντελεστής ανάκλασης παρά ο συντελεστής εκπομπής. Για πολύ στιλβωμένα υλικά, το ε_λ προσεγγίζει το μηδέν, συνεπώς για ένα πλήρως ανακλαστικό υλικό (δηλαδή έναν τέλειο καθρέπτη) προκύπτει ότι:

$$\rho_\lambda = 1$$

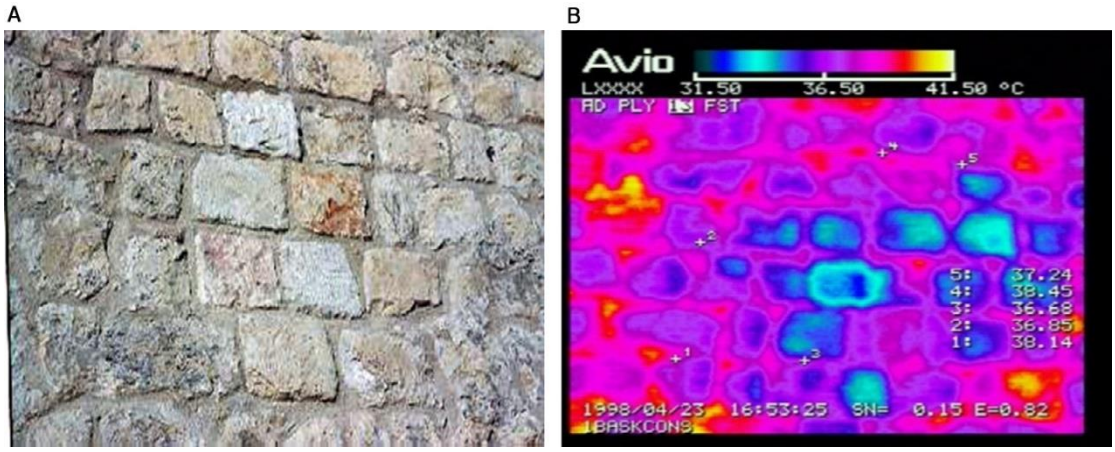
Για αυτόν το λόγο, με χρήση της IRT δεν μπορούν να αναπαραστούν ανακλαστικά υλικά, όπως τζάμια ή καθρέπτες. Για έναν ακτινοβολητή που είναι τεφρό (δηλαδή γκρίζο) σώμα, ο μαθηματικός τύπος των Stefan – Boltzmann γίνεται ως εξής:

$$W_{\lambda o} = \varepsilon \sigma T^4$$

Αυτό σημαίνει ότι η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς ενός τεφρού σώματος είναι ίδια με εκείνη ενός μέλανος σώματος, στην ίδια θερμοκρασία, μειωμένη κατά την τιμή ε του τεφρού σώματος (ε ή ε_λ).

Κατά την πρόσκρουση της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε ένα σώμα, όπως προαναφέρθηκε, ένα μέρος της ανακλάται, ένα άλλο απορροφάται και ένα άλλο διαπερνά το σώμα. Το ποσό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται αυξάνει το ενεργειακό περιεχόμενο των στοιχειωδών σωματιδίων του, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Η μεταβολή αυτή μπορεί να μετρηθεί μέσω δευτερευόντων φαινομένων που αφορούν στη μέτρηση κάποιων φυσικών ιδιοτήτων (όπως η πίεση, ο όγκος, κ.λπ.), κάποιων χημικών χαρακτηριστικών (όπως συμβαίνει στην υπέρυθρη φωτογραφία), ή κάποιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (όπως η αγωγιμότητα). Ένας ανιχνευτής υπέρυθρου μετατρέπει την υπέρυθρη ακτινοβολία που απορροφά ένα υλικό, σε ηλεκτρικό σήμα. Σήμερα επικρατούν δύο τύποι ανιχνευτών: οι θερμικοί (thermal detectors), και οι ανιχνευτές φωτονίων. Οι θερμικοί ανιχνευτές είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε να είναι ευαίσθητοι στις θερμοκρασιακές μεταβολές, οι οποίες παρατηρούνται πάνω στο δέκτη απορρόφησης της ακτινοβολίας. Έτσι, απορροφώντας ακτινοβολία, αυξάνεται η θερμοκρασία του ανιχνευτή και παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι παράγωγο του επιπέδου της απορροφημένης ενέργειας. Τέτοιοι είναι τα θερμοστοιχεία, τα βολτόμετρα (μετρητές της ενέργειας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) και οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές (πυκνωτές). Ο πιο σπουδαίος θερμικός ανιχνευτής είναι ο βολομετρικός θερμίστορας, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μεταβολή της αντίστασης ενός ημιαγώγιμου φιλμ, όταν αυτό θερμαίνεται από μια θερμική ακτινοβολία. Οι φωτονικοί ανιχνευτές είναι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούν την ενέργεια που περιέχεται στα φωτόνια της προσπίπτουσας υπέρυθρης ακτινοβολίας κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να απελευθερώνονται ηλεκτρόνια και να αυξάνεται έτσι η αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Δύο τύποι ανιχνευτών φωτονίων έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον: οι φωτοαγώγιμοι και οι φωτοβολταϊκοί. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι κατασκευασμένοι από ίνδιο–αντιμόνιο ή από υδράργυρο–κάδμιο–τελλούριο και είναι εφοδιασμένοι με σύστημα ψύξης. Μετά τη δημιουργία του ηλεκτρικού σήματος, αυτό φιλτράρεται, ενισχύεται και φθάνει στην οθόνη, όπου σχηματίζεται η υπέρυθρη εικόνα (θερμογράφημα). Η εικόνα αυτή μπορεί να είναι έγχρωμη ή ασπρόμαυρη. Στις ασπρόμαυρες οι διάφορες θερμοκρασίες παριστάνονται με διαφορετικές αποχρώσεις γκρίζου. Οι

έγχρωμες εικόνες, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 5, προκύπτουν με τη χρήση μιας αυθαίρετης χρωματικής κλίμακας που αντιστοιχεί κάποιο χρώμα σε κάθε θερμικό επίπεδο (Μοροπούλου, 2009στ).



Εικόνα 5: Α. Τμήμα της οχυρωτικής τοιχοποιίας του Εθνικού Σταδίου στο Ηράκλειο Κρήτης. **Β.** Το θερμογράφημα της ίδιας περιοχής, όπου με μπλε χρώμα έχουν απεικονιστεί οι πιο ψυχρές περιοχές και με κίτρινο οι πιο θερμές. Η θερμοκρασιακή κλίμακα (31,5°C – 41,5°C) βρίσκεται στο επάνω μέρος της εικόνας. Είναι εμφανή τα σημεία που παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην θερμοκρασία της τοιχοποιίας (Kordatos et al., 2013).

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας: η καταγραφή της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας, η καταγραφή της ανακλώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας, μετά από εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας πάνω στο εξεταζόμενο σώμα και η καταγραφή ενός μίγματος ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Με ένα τυπικό θερμογραφικό σύστημα (Εικόνα 6) και την επεξεργασία των διαφόρων θερμογραφημάτων, προκύπτει πληθώρα δυνατοτήτων (Μοροπούλου, 2009στ):

- Προσδιορισμός της μέσης θερμοκρασίας του εξεταζόμενου θερμογραφήματος.
- Επιλογή συγκεκριμένων σημείων του θερμογραφήματος και ακριβής προσδιορισμός της θερμοκρασίας τους.

- Απεικόνιση περιοχών χαμηλών, μέσων και υψηλών θερμοκρασιών στο θερμογράφημα.
- Μεγέθυνση συγκεκριμένου σημείου της εικόνας.
- Δημιουργία ιστογράμματος της κατανομής των θερμοκρασιών.



Εικόνα 6: Θερμοκάμερα της εταιρίας FLIR Systems (flir.com).

Στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Σχήμα 10) διακρίνονται δύο περιοχές μήκους κύματος, οι οποίες είναι διαπερατές από την ατμόσφαιρα και χρησιμοποιούνται από τα θερμογραφικά συστήματα. Αυτές είναι οι εξής: 2 – 5,6 μm (χαμηλού – μεσαίου μήκους κύματος) και 8 – 14 μm (υψηλού μήκους κύματος). Η επιλογή του κατάλληλου μήκους κύματος εξαρτάται συνήθως από την εφαρμογή (Μοροπούλου, 2014α).

Τα θερμογραφικά συστήματα χαμηλού – μεσαίου μήκους κύματος έχουν μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες (μεγαλύτερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Συνήθως, χρησιμοποιούνται η ευαισθησία κρίνεται πιο

απαραίτητη από την αντίθεση στην εικόνα. Περιορίζονται, όμως, όσον αφορά στην απόσταση καταγραφής – ελέγχου, σε περίπτωση που απαιτείται ακρίβεια στην μέτρηση της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, τα θερμογραφικά συστήματα υψηλού μήκους κύματος έχουν μεγάλη ευαισθησία στις χαμηλές θερμοκρασίες (μικρότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή μεγαλύτερων αποστάσεων, καθώς η ατμόσφαιρα εξασθενεί λιγότερο στα υψηλά μήκη κύματος (Balaras and Argiriou, 2002). Τα πλεονεκτήματα των θερμογραφικών συστημάτων υψηλού μήκους κύματος είναι ότι συμπεριφέρονται καλά στις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, είναι ικανά να ανιχνεύσουν μικρές θερμοκρασιακές διαφορές και επηρεάζονται λιγότερο από της ηλιακές ανακλάσεις (Μοροπούλου, 2009στ).

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

Κατά τη λήψη του θερμογραφήματος, πρέπει να επικρατούν σταθερές συνθήκες. Ωστόσο, μπορεί να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα και κάτω από μη σταθερές συνθήκες, αρκεί να υπάρχει σχετική εμπειρία και αρκετά δεδομένα για το εξεταζόμενο υλικό. Πρέπει να σημειωθεί ότι, διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ο τοίχος ενός κτιρίου, που εκτίθεται άμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία, θα εμφανίσει μια θερμή εξωτερική επιφάνεια και μια ψυχρή εσωτερική επιφάνεια κατά τη θερμογράφησή του από το εσωτερικό του κτιρίου.

3.1.3. ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR)

Το γεωραντάρ (Ground–Penetrating Radar – GPR) θεωρείται ένα δημοφιλές εργαλείο ιζηματολογικών μελετών. Αποτελεί μια μη καταστρεπτική τεχνική ελέγχου, που έχει σχεδιαστεί κυρίως για τη διερεύνηση του υπεδάφους (Neal, 2004, Comas et al., 2004). Ο Πίνακας 8 απεικονίζει πρόσφατη έρευνα που έχει διεξαχθεί με χρήση GPR (Jol and Bristow, 2003). Η τεχνική βρίσκει εφαρμογές σε αρκετά ερευνητικά και τεχνικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων (Μοροπούλου, 2009ε):

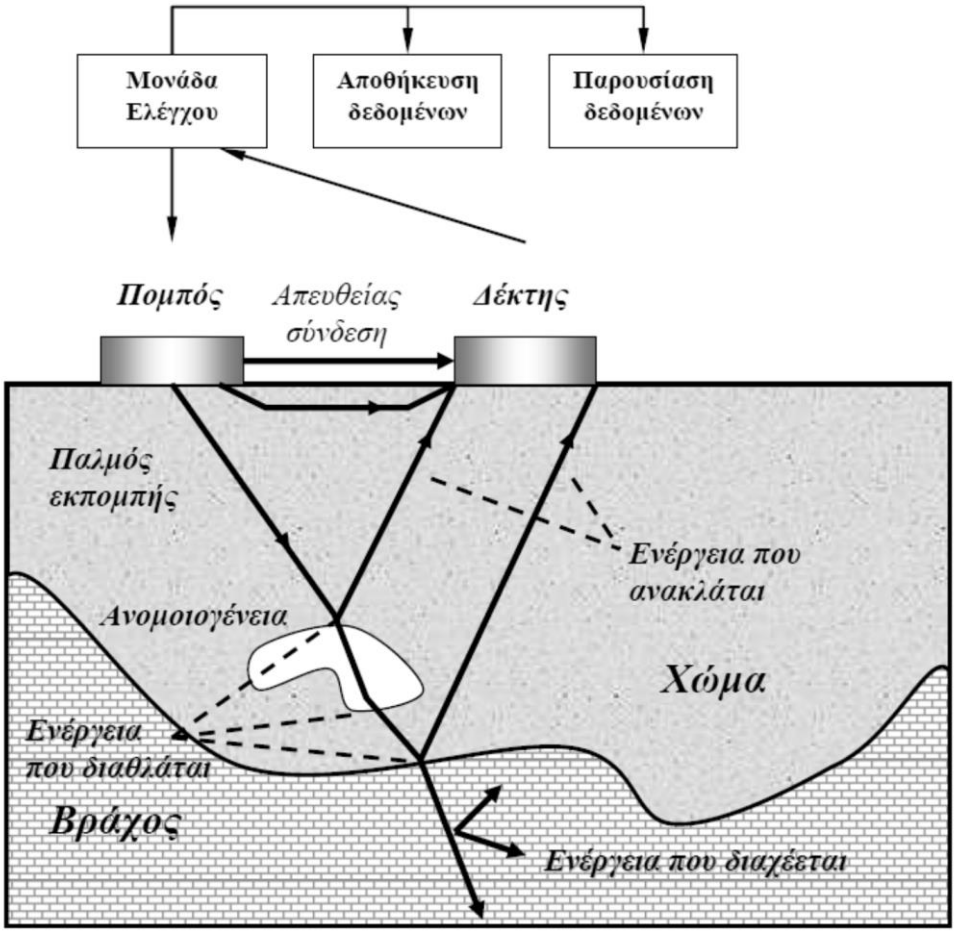
- Αρχαιολογία, για την ανίχνευση θεμελιώσεων αρχαίων κτισμάτων και υπολείμματα διαφόρων κατασκευών (Conyers and Goodman, 1997).
- Χαρτογράφηση υπόγειων σωληνώσεων (ύδρευσης, φυσικού αερίου κ.λπ.).
- Μη καταστρεπτική εξέταση τσιμέντου και οπλισμένου σκυροδέματος, ποιητικός έλεγχο του τσιμέντου, ανίχνευση φθοράς και ανομοιογενειών, εξέταση του πάχους του τσιμέντου κ.λπ. (Mellett, 1995).
- Εξέταση οδοστρωμάτων, χαρτογράφηση ατελειών και πάχους της ασφάλτου (Moropoulou et al., 2002).
- Γεωλογική χαρτογράφηση, αποκάλυψη της τοπογραφίας των πετρωμάτων, χαρτογράφηση του βυθού ποταμών και λιμνών, και αποκάλυψη υπόγειων νερών και υπόγειων κοιλοτήτων (Stevens et al., 1995).
- Ορυχεία, για την ανίχνευση πετρωμάτων, κοιλοτήτων και άλλων ανομοιογενειών.

Πίνακας 8: Ορισμένες πρόσφατες δημοσιεύσεις, σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά, που εφαρμόζουν το GIS σε διάφορα επιστημονικά πεδία (Jol and Bristow, 2003).

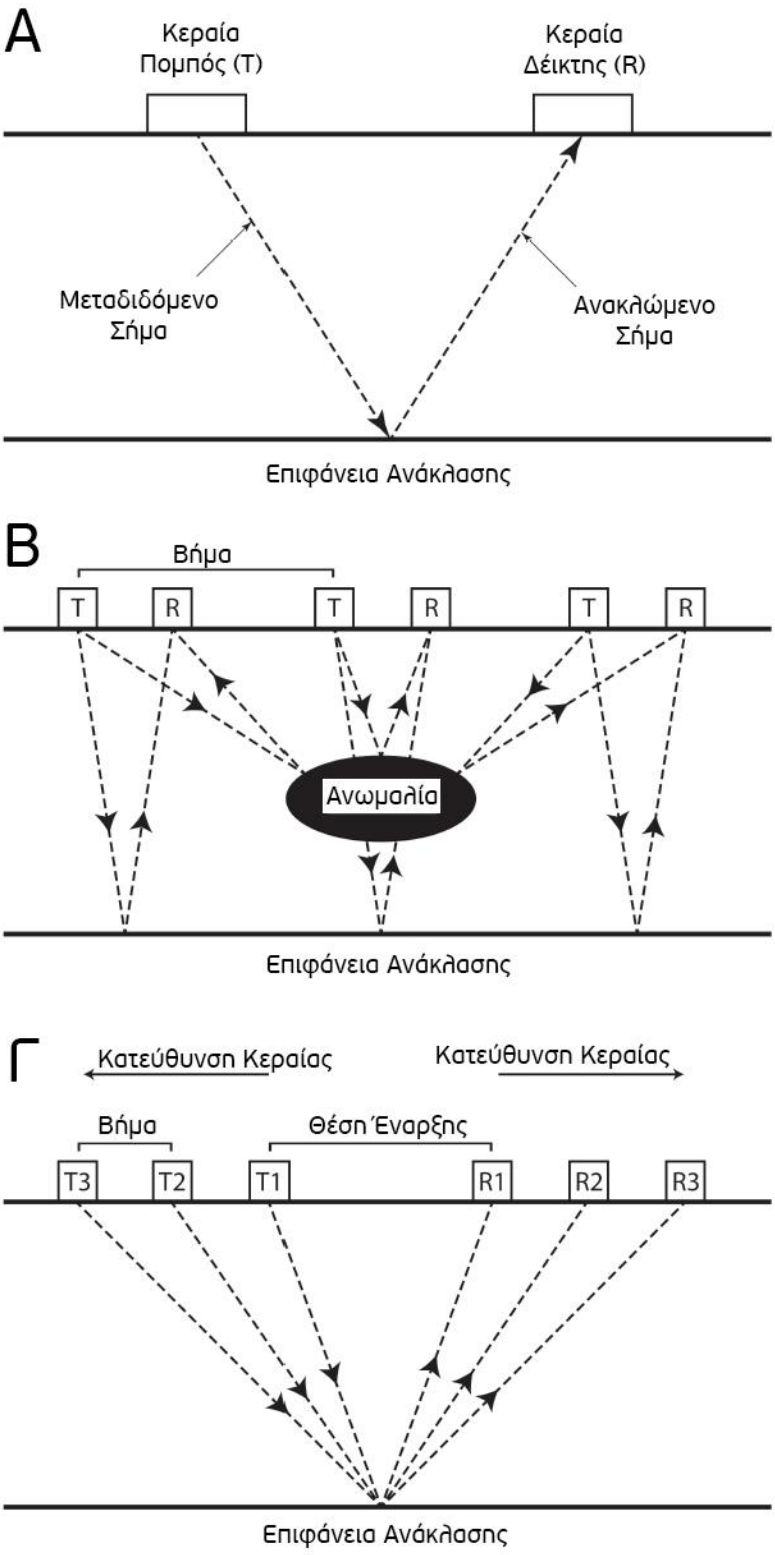
Πεδίο Έρευνας	***Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά***
Πάγος	Appleby et al., 2010, Benediktsson et al., 2009, Degenhardt, 2009, Gibbard et al., 2012, Hart et al., 2011, Irvine–Fynn et al., 2006, Kim et al., 2010, Langston et al., 2011, Leopold et al., 2011, Monnier et al., 2011, Murray and Booth, 2010.
Ποταμοί	Ashworth et al., 2011, Johnson and Carpenter, 2013, Kostic and Aigner, 2007, Lunt and Bridge, 2004, Nobes et al., 2001, Rice et al., 2009, Słowik, 2011.
Δέλτα Ποταμών	Barnhardt and Sherrod, 2006, Gibbard et al., 2012, Gutsell et al., 2004.
Παράκτια περιοχή	Bennett et al., 2009, Bristow and Pucillo, 2006, Buynevich et al., 2010, Clemmensen et al., 2012, Nielsen and Clemmensen, 2009, Olson et al., 2012, Pascucci et al., 2009, Tamura et al., 2011.
Αιολικός τομέας	Bristow et al., 2007, Bristow et al., 2010, Buynevich et al., 2010, Clemmensen et al., 2012, Tamura et al., 2011, Vriend et al., 2012.
Τυρφώνες	Comas et al., 2005, Comas et al., 2011, De Oliveira et al., 2012, Kettridge et al., 2008, Lowry et al., 2009, Plado et al., 2011, Rosa et al., 2009.
Σφάλματα τεχνικής	Bhosle et al., 2007, Christie et al., 2009, Malik et al., 2010.

Ένα σύστημα GPR ανιχνεύει αλλαγές στις ηλεκτρικές ιδιότητες, στο βάθος ενός υλικού, χρησιμοποιώντας παλμούς υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικής (electromagnetic – EM) ενέργειας, συνήθως στην περιοχή 10 – 1000 MHz (Jol and Smith, 1991 – Holden et al., 2002 – Neal, 2004), όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Η ποιότητα του GPR εξαρτάται από το περιβάλλον (Daniels, 2004), δηλαδή το είδος των μελετώμενων υλικών και όσων τα περιβάλλουν. Όσο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια διαδίδεται, η ταχύτητα της μεταβάλλεται λόγω του ότι διέρχεται από υλικά διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων (Neal, 2004). Απότομες αλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά, οδηγούν ένα τμήμα της ενέργειας στην ανάκλαση και η κεραία λήψης του συστήματος GPR ανιχνεύει την ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (Σχήμα 16Α). Αξίζει

να σημειωθεί ότι, οι περισσότερες κεραίες GPR δεν είναι σχεδιασμένες να μεταδίδουν ενέργεια μόνο στο υλικό, αλλά ταυτόχρονα μεταδίδουν την ενέργεια και στον αέρα. Ως εκ τούτου, ανακλάσεις είναι πιθανόν να συμβούν από άλλα σώματα, πλην του εξεταζόμενου, όπως τοίχοι, αυτοκίνητα, φράχτες ή εναέρια καλώδια. Για την αποφυγή αυτού του γεγονότος, υπάρχουν ορισμένες θωρακισμένες κεραίες, για τη μείωση του εξωτερικού «θορύβου», οι οποίες περιορίζουν τα σήματα που μεταδίδονται μέσω του αέρα. Οι θωρακισμένες κεραίες, όμως, έχουν συνήθως αυξημένο όγκο, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη τη χρήση τους.



Σχήμα 15: Απεικόνιση της διάταξης του GPR. Ο παλμός εκπομπής διαχέεται στο υπέδαφος (χώμα) και όταν προσπίπτει σε κάποια ανομοιογένεια (διαφορετικές ηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες σε σχέση με το μητρικό υλικό), μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται προς την επιφάνεια ενώ το υπόλοιπο διαχέεται προς βαθύτερα επίπεδα. Οι πολλαπλές ανακλάσεις αντιστοιχούν στις διάφορες διεπιφάνειες που συναντά ο παλμός, μέχρι πλήρους εξασθένησής του (Μοροπούλου, 2009ε).



Σχήμα 16: Α. Η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υλικό, κάτω από την επιφάνεια, με χρήση GPR. **Β.** Παράλληλη μετακίνηση πομπού και δέκτη, προς την ίδια κατεύθυνση, για τη σάρωση μιας επιφάνειας. **Γ.** Μετακίνηση πομπού και δέκτη προς την αντίθετη κατεύθυνση (απομάκρυνσή τους ολοένα και περισσότερο), για τη σάρωση μιας επιφάνειας (Common Mid–Point – CMP) (Robinson et al., 2013).

Οι κεραίες εκπομπής μετατρέπουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και οι κεραίες λήψης, αντίστροφα, μεταρέπουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ο έλεγχος της ακτινοβολίας γίνεται με κατάλληλη σχεδίαση της συσκευής. Η κεντρική συχνότητα κυμαίνεται, όπως προαναφέρθηκε, μεταξύ 10MHz και 1000MHz. Οι συσκευές παράγουν παλμούς, με εύρος ζώνης 2 – 3 οκτάβων. Η επιλογή της κεντρικής συχνότητας εξαρτάται από την επιθυμητή διεισδυτικότητα, για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι χαμηλές συχνότητες παρέχουν μικρότερες απώλειες ανά μονάδα μήκους, δηλαδή μεγαλύτερη διεισδυτικότητα σε σχέση με τις υψηλότερες συχνότητες, αλλά υστερούν στην ανάλυση που παρέχουν (Μοροπούλου, 2009ε).

Ο χρόνος μεταξύ μετάδοσης και λήψης, αναφέρεται ως χρόνος δύο διαδρομών (Two Way Time – TWT), μετριέται συνήθως σε νανοδευτερόλεπτα και είναι συνάρτηση του βάθους που πραγματοποιείται η ανάκλαση και της ταχύτητας διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (Neal, 2004, Jol and Smith, 1991). Η σάρωση μιας επιφάνειες μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: με την παράλληλη μετακίνηση πομπού και δέκτη, προς την ίδια κατεύθυνση (Σχήμα 6Β) και με την μετακίνησή τους προς την αντίθετη κατεύθυνση (Σχήμα 6Γ).

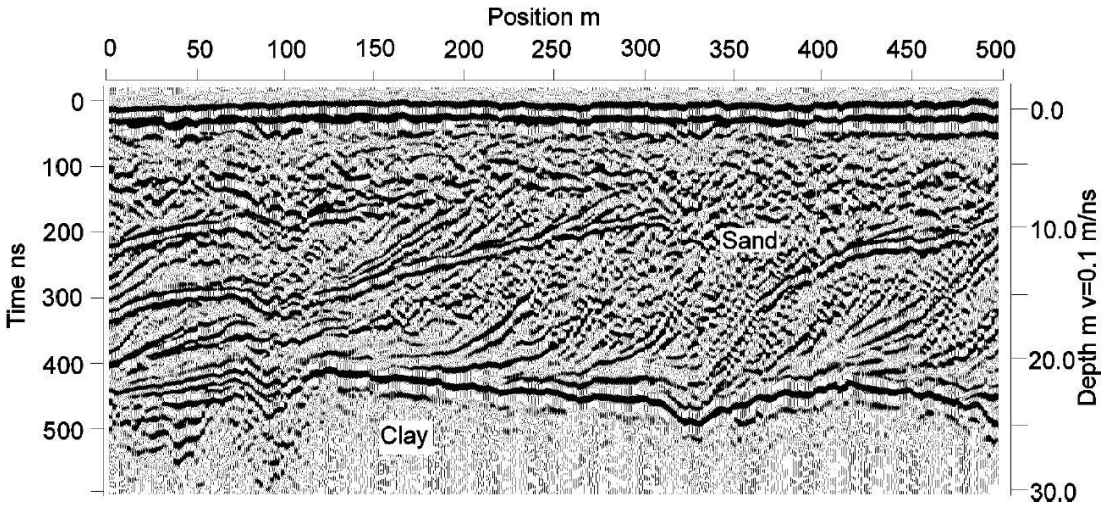
Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης στο υλικό, μετατρέπεται ο χρόνος δύο διαδρομών σε βάθος, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

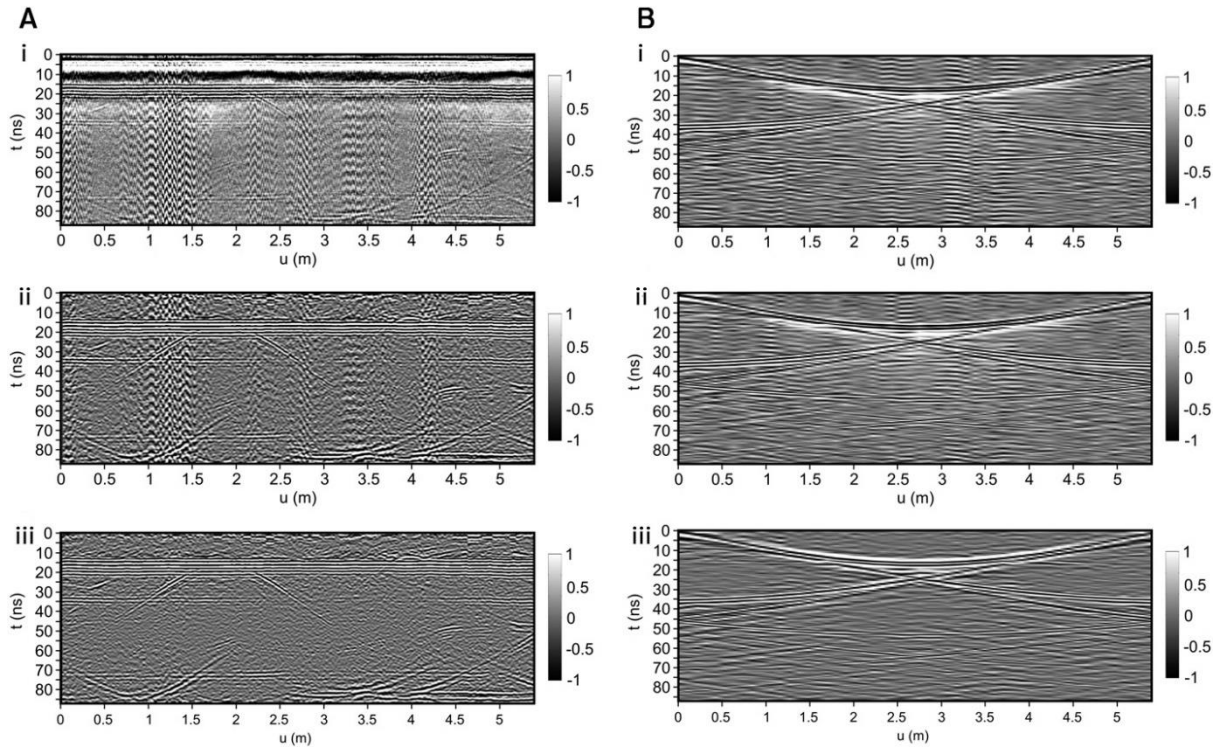
Όπου d είναι το βάθος, v είναι η ταχύτητα διάδοσης και t είναι ο χρόνος δύο διαδρομών.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του GPR και ο προσδιορισμός της εικόνας του υπεδάφους μπορεί να γίνει με τρεις μορφές: με μονοδιάστατα ίχνη, με δυσδιάστατες τομές και με τρισδιάστατες αναπαραστάσεις (Μοροπούλου, 2009ε). Τα μονοδιάστατα ίχνη χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αντικειμένων και τον προσδιορισμό του βάθους στο οποίο βρίσκονται. Οι δυσδιάστατες τομές δημιουργούνται με την μετακίνηση πομπού και δέκτη στην επιφάνεια του υλικού και τη δημιουργία γραφικής παράστασης, στον οριζόντιο

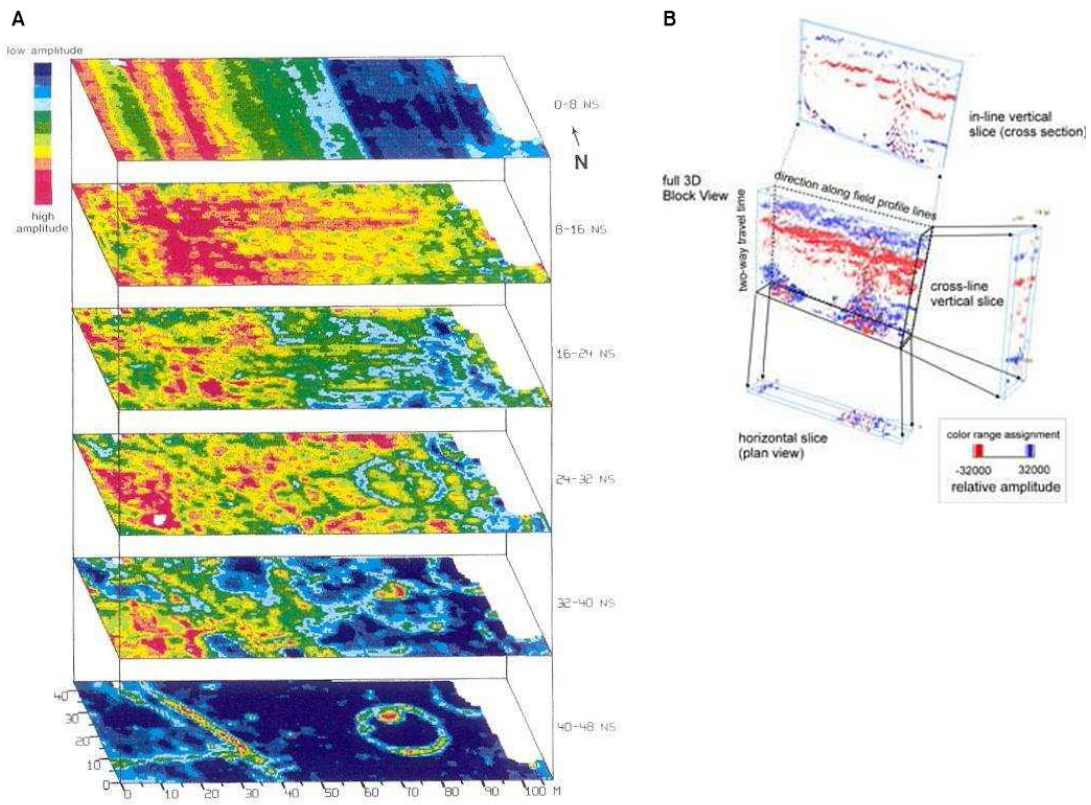
άξονα της οποίας εμφανίζεται το μήκος της σάρωσης που πραγματοποιήθηκε και στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζεται ο χρόνος δύο διαδρομών (Σχήμα 17). Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αντιστοιχείται κάποιο χρώμα σε κάθε εύρος πολικότητας. Περεταίρω βελτίωση της απεικόνισης των αποτελεσμάτων και απομάκρυνση του παρατηρούμενου θορύβου είναι δυνατή με ψηφιακή επεξεργασία του διαγράμματος με διάφορους τρόπους (Σχήμα 18). Επέκταση των δυσδιάστατων τομών αποτελούν τα τρισδιάστατα διαγράμματα, εφόσον η σάρωση γίνει σε δύο άξονες, δηλαδή σε ένα επίπεδο. Πρόκειται, με άλλα λόγια, για πολλαπλές οριζόντιες σαρώσεις, καταγραφή των επί μέρους αποτελεσμάτων και σύνθεση αυτών σε ένα τρισδιάστατο διάγραμμα με διάφορους τρόπους (Σχήμα 19).



Σχήμα 17: Απεικόνιση δυσδιάστατης τομής υπεδάφους, με χρήση GPR. Στον κάθετο άξονα, ο χρόνος δύο διαδρομών (αριστερός κάθετος άξονας) έχει μετατραπεί σε βάθος υπεδάφους (δεξιός κάθετος άξονας). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο μήκος σάρωσης (kiska.giseis.alaska.edu).



Σχήμα 18: Επεξεργασία των δεδομένων που έχουν προκύψει από δύο διαφορετικές εφαρμογές GPR, ώστε να εξαλειφθεί ο θόρυβος. **Ai.** Μη επεξεργασμένα δεδομένα. **Aii.** Δεδομένα στα οποία έχε εφαρμοστεί κατάλληλο φίλτρο, για την εξάλειψη θορύβου και διαφόρων άχρηστων συχνοτήτων. Ο θόρυβος παρατηρούμε ότι έχει σχεδόν απομακρυνθεί. **Aiii.** Δεδομένα στα οποία έχει εφαρμοστεί ημιτονοειδής προσαρμογή των κυμάτων, με τις κατάλληλες συχνότητες από το βήμα Aii. Ο θόρυβος που είχε απομείνει μετά το προηγούμενο βήμα έχει πλέον εξαλειφτεί πλήρως. **Bi.** Μη επεξεργασμένα δεδομένα. **Bii.** Δεδομένα στα οποία έχει εφαρμοστεί ημιτονοειδής προσαρμογή των κυμάτων. Παρατηρούμε ότι έχει απομείνει ένα ποσοστό ημιτονοειδούς θορύβου σε κάποια σημεία του διαγράμματος. **Biii.** Δεδομένα στα οποία έχει εφαρμοστεί ημιτονοειδής προσαρμογή των κυμάτων, σε διαφορετικά σημεία του διαγράμματος t – u, για τις κατάλληλες συχνότητες. Ο θόρυβος έχει σχεδόν απομακρυνθεί. Ο θόρυβος που παρέμεινε στις χαμηλές συχνότητες, απομακρύνθηκε με εφαρμογή επεξεργασίας τύπου dewow (Bonomo et al., 2015).



Σχήμα 19: Τρισδιάστατα διαγράμματα δύο διαφορετικών τύπων με χρήση GPR. **Α.** Τομές σε τακτά χρονικά (χωρικά – βάθος) διαστήματα, όπου το μπλε και το κόκκινο χρώμα καταγράφουν χαμηλή και υψηλή τιμή πόλωσης αντίστοιχα. **Β.** Συμπαγής όγκος, στον οποίο περιλαμβάνονται διάφορες κατόψεις και τομές (Μοροπούλου, 2009ε).

Η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσα στο υλικό, εξαρτάται από διάφορες ιδιότητες του υλικού. Η διηλεκτρική σταθερά (ή αλλιώς διηλεκτρική διαπερατότητα), μια ιδιότητα η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα του υλικού σε νερό, είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που ελέγχει την ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Διάφορες αντανακλάσεις, επομένως, μπορεί να σχετίζονται με διεπαφές, όπου εμφανίζεται μια σημαντική μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό (Comas et al., 2005). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί ένα μέτρο της μεταφοράς φορτίου μέσα σε ένα υλικό, με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου (Powers, 1997). Οι πιο σημαντικές ηλεκτρικές απώλειες αγωγιμότητας, που σχετίζονται με το GPR, μπορεί να συμβούν λόγω της μεταφοράς φορτίου ιόντων στο νερό και στις

ηλεκτροχημικές διαδικασίες που συνδέονται με την ανταλλαγή κατιόντων. Ο Olhoeft (Olhoeft, 1998) περιγράφει τη σημασία της ανταλλαγής αργιλικών κατιόντων, στις μελέτες του εδάφους και των ιζημάτων. Η σχέση για την ταχύτητα διάδοσης εκφράζεται ως:

$$v = \frac{c}{\sqrt{e_r}}$$

όπου v είναι η ταχύτητα, c είναι η ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$m/s) και e_r είναι η διηλεκτρική σταθερά. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς για διάφορα υλικά που συναντώνται συχνά κατά την εφαρμογή GPR.

Πίνακας 9: Τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας και της εξασθένισης για διάφορα υλικά που συναντώνται συχνά κατά την εφαρμογή GPR (Leckebusch, 2003 και όσες σειρές είναι σημειωμένες με *: Annan, 2005).

Υλικό	***Διηλεκτρική Σταθερά***	***Ηλεκτρική Αγωγιμότητα*** ($mS \cdot m^{-1}$)	***Ταχύτητα*** ($m \cdot ns^{-1}$)	***Εξασθένηση*** ($dB \cdot m^{-1}$)
Αέρας	1	0	0,3	0
Θαλασσινό Νερό	80	3000	0,033	600
Καθαρό Νερό	80	0,5	0,033	0,1
Πάγος*	3 – 4	0,01	0,16	0,01
Γρανίτης, ξηρός	5	0,01	0,13	0,01
Ασβεστόλιθος*	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
Σχιστόλιθος*	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Άμμος, ξηρή	5	0,01	0,13	0,01
Άμμος, υγρή*	20 – 30	0,1 – 1,0	0,06	0,03 – 0,3
Άργιλος, υγρή	10	500	0,095	300
Έδαφος:				
Αμμώδες, ξηρό	2,6	1,4	0,19	1
Αμμώδες, υγρό	25	69	0,06	23
Αργιλικό, ξηρό	2,5	2,7	0,19	3
Αργιλικό, υγρό	19	500	0,07	200
Πάγος	6	0,1	0,12	0,1

3.2. ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.2.1. ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRD)

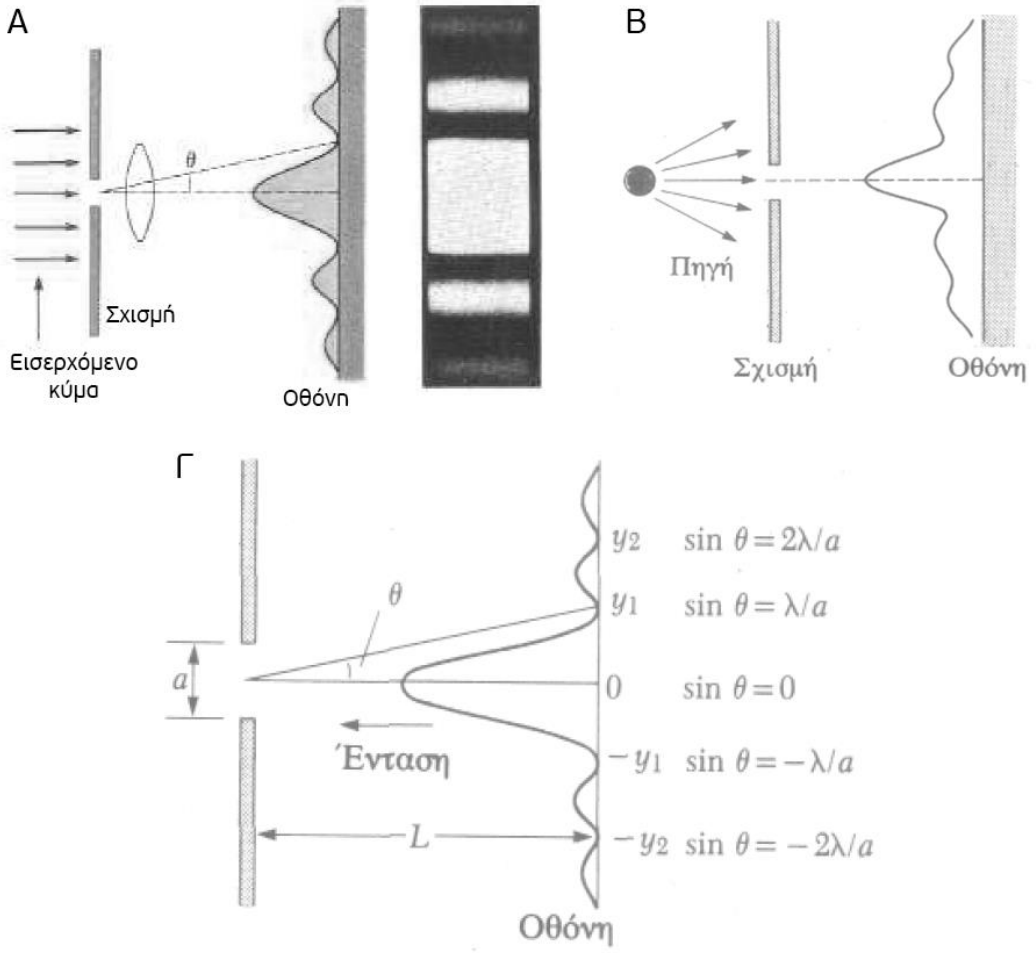
Οι ακτίνες Χ (Σχήμα 10) ανακαλύφθηκαν από τον W. C. Roentgen (1845 – 1923) το 1895 και χωρίζονται σε μαλακές (1 – 100 Å) και σκληρές (0,1 – 1 Å – Τσόπελας, 2014β). Σήμερα χρησιμοποιούνται στους εξής τομείς (Connolly, 2005):

- Για τη δημιουργία ακτινογραφιών, δηλαδή εικόνων από αδιαφανή υλικά. Στηρίζεται στην σχέση μεταξύ της πυκνότητας των υλικών και την απορρόφηση των ακτίνων Χ. Οι ακτινογραφίες χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία από ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές.
- Στην κρυσταλλογραφία ακτίνων Χ, ώστε να προσδιοριστούν πληροφορίες σχετικά με τη δομή των κρυσταλλικών υλικών.
- Στα διάφορα είδη φασματομετρίας ακτίνων Χ, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό στοιχείων σε υλικά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Τα κυριότερα είδη φασματομετρίας ακτίνων Χ (Τσόπελας, 2014β).

Τεχνική	***Διέγερση με***	***Μετρούνται***
Ανάλυση με Φθορισμό Ακτίνων Χ (X–Ray Fluorescence – XRF)	Φωτόνια, Ηλεκτρόνια	Φωτόνια
Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (X–Ray Diffraction – XRD)	Φωτόνια	Φωτόνια
Ανάλυση με απορρόφηση ακτίνων Χ	Φωτόνια	Φωτόνια
Φωτοηλεκτρονιακή φασματοσκοπία ακτίνων Χ	Φωτόνια	Ηλεκτρόνια
Ηλεκτρονιακή φασματοσκοπία Auger	Φωτόνια, Ηλεκτρόνια	Ηλεκτρόνια

Το φαινόμενο της περίθλασης παρατηρείται όταν το εμπόδιο ή η οπή έχουν διαστάσεις ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος των διαδιδόμενων κυμάτων. Έτσι, για να παρατηρηθεί περίθλαση του φωτός απαιτείται η ύπαρξη πολύ μικρών οπών ή πολύ μικρών εμποδίων, με πολύ αιχμηρά άκρα. Υπάρχουν δύο είδη περίθλασης: η περίθλαση Fraunhofer και η περίθλαση Fresnel (Σχήμα 20). Αναλυτικότερα, κατά την περίθλαση Fraunhofer, οι ακτίνες που προσπίπτουν, καθώς και οι ακτίνες που φτάνουν στο σημείο παρατήρησης, είναι σχεδόν παράλληλες. Κατά την περίθλαση Fresnel, η οθόνη παρατήρησης βρίσκεται σε πεπερασμένη απόσταση από την σχισμή και δεν χρησιμοποιείται φακός για την εστίαση των παράλληλων ακτινών (Βερνάρδου, 2011α).



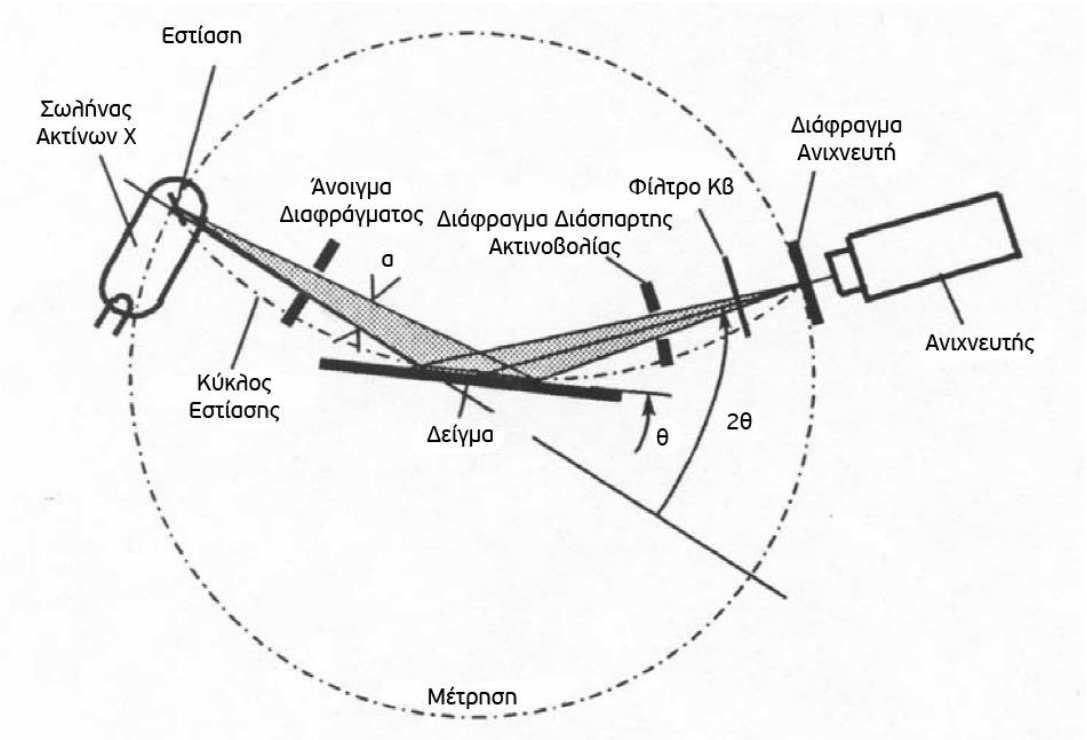
Σχήμα 20: Α. Περίθλαση Fraunhofer. **Β.** Περίθλαση Fresnel. **Γ.** Κατανομή της έντασης της εικόνας περίθλασης που δημιουργείται από στενή ορθογώνια σχισμή, κατά την περίθλαση Fraunhofer. Ισχύει η σχέση: $I_\theta = I_0 \left[\frac{\sin\left(\pi\cdot\alpha\cdot\sin\frac{\theta}{\lambda}\right)}{\pi\cdot\alpha\cdot\sin\frac{\theta}{\lambda}}\right]^2$, όπου Io είναι η ένταση η οποία αντιστοιχεί στο κεντρικό μέγιστο, για θ = 0 (Βερνάρδου, 2011α).

Η περίθλαση ακτίνων Χ χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες (Connolly, 2005 – Τσόπελας, 2014β):

- Προσδιορισμός των μονοφασικών υλικών, όπως ορυκτά, χημικές ενώσεις, κεραμικά και άλλα υλικά.
- Μελέτη ορυκτολογικής σύστασης.
- Προσδιορισμός της κρυσταλλικής δομής των υλικών.
- Συλλογή πληροφοριών για προσμίξεις κρυστάλλων σε υπερκαθαρές κρυσταλλικές ενώσεις.
- Προσδιορισμός βαθμού κρυσταλλικότητας (ποσοστό κρυσταλλικού υλικού επί του συνολικού υλικού), σε υλικά, όπως φάρμακα, τρόφιμα και πολυμερή (βαθμονόμηση με αμιγώς άμορφα και κρυσταλλικά υλικά).
- Ταυτοποίηση πολυμορφισμού.
- Προσδιορισμός και δομική ανάλυση των αργιλικών ορυκτών.
- Αναγνώριση των άμορφων υλικών σε μερικώς κρυσταλλικά μίγματα.
- Μελέτη της θερμικής διαστολής σε κρυσταλλικές δομές.

Στο Σχήμα 21 φαίνεται ένα περιθλασίμετρο. Τα κυριότερα σημεία του είναι τα εξής (Connolly, 2005):

- Πηγή ακτινοβολίας.
- Μονοχρωμάτορας.
- Ευθυγραμμιστής μονοχρωματικής ακτινοβολίας.
- Δειγματοφορέας.
- Ευθυγραμμιστής ακτινοβολίας.
- Ανιχνευτής ακτίνων Χ.



Σχήμα 21: Ένα τυπικό περιθλασίμετρο (Siemens D5000), στο οποίο φαίνονται τα κυριότερα σημεία του. Με θ είναι σημειωμένη η γωνία ανάκλασης, με 2θ η γωνία περίθλασης, με α η γωνία του διαφράγματος και με μέτρηση η περιοχή εντός της οποίας πραγματοποιείται η μέτρηση (Connolly, 2005).

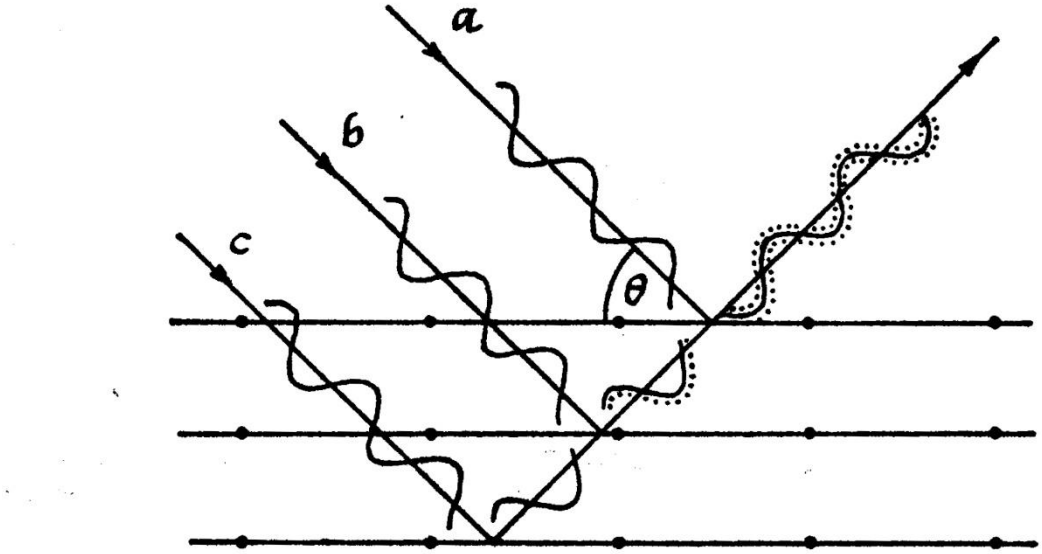
Το ιδανικό δείγμα αποτελείται από μία άπειρη ποσότητα, τυχαία προσανατολισμένης σκόνης με μέγεθος κρυστάλλων μικρότερο από 10μm, τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κρύσταλλοι να μην έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό. Καθώς η επίτευξη του παραπάνω είναι πρακτικά ανέφικτη, πρέπει να γίνεται προσπάθεια το δείγμα να έχει όσο το δυνατόν παρόμοια χαρακτηριστικά. Έτσι, η προετοιμασία του δείγματος είναι συνήθως ο πιο σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει την ποιότητα των στοιχείων που συλλέγονται.

Μια συνεκτική δέσμη μονοχρωματικών ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος, απαιτείται για την ανάλυση XRD. Μία καθαρή άνοδος, ενός συγκεκριμένου μετάλλου, με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, σε ένα σφραγισμένο σωλήνα κενού, παράγει ακτίνες Χ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίθλαση ακτίνων Χ. Απαιτείται η σωστή επιλογή του μετάλλου της ανόδου και της ενέργειας των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων,

γνωστό μήκος κύματος ή ομάδας μηκών κύματος. Σωλήνες ακτίνων Χ από χαλκό, για τις οποίες το μήκος κύματος της ισχυρότερης ακτινοβολίας (Κα) είναι περίπου 1,54Å, χρησιμοποιούνται συχνά για περίθλαση ακτίνων Χ σε δείγματα ανόργανων υλικών. Άλλες άνοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως σε σωλήνες ακτίνων Χ περιλαμβάνουν είναι το χρώμιο (Κα = 2,29Å), το σίδηρο (Κα = 1,94Å), το κοβάλτιο (Κα = 1,79Å) και το μολυβδαίνιο (Κα = 0,71Å). Για τις περισσότερες εφαρμογές περίθλασης ακτίνων Χ, όσο πιο κοντά στη μονοχρωματική ακτινοβολία είναι η δέσμη ακτίνων Χ, τόσο καλύτερα είναι τα πειραματικά αποτελέσματα (Connolly, 2005).

Στα περισσότερα περιθλασίμετρα σκόνης, μια σειρά παράλληλων πλακών διατεταγμένες παράλληλα προς το επίπεδο του κυκλικού περιθλασίμετρου και διάφορες σχισμές σκέδασης και λήψης ακτίνων (τοποθετημένες κάθετα προς τον κυκλικό περιθλασίμετρο) χρησιμοποιούνται, για να δημιουργήσουν μια προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων Χ που είναι (περίπου) παράλληλη. Οι σχισμές διασποράς (από την πλευρά της προσπίπτουσας δέσμης) μπορεί να ποικίλουν, για να ελέγχουν το πλάτος της προσπίπτουσας δέσμης, που πέφτει στο δείγμα. Οι σχισμές λήψης ακτίνων μπορεί να ποικίλουν για τον έλεγχο του πλάτους της δέσμης που εισέρχεται στον ανιχνευτή.

Ο W. L. Bragg (1890 – 1971) έδειξε ότι οι ακτίνες Χ δημιουργούν την απεικόνιση της κρυσταλλικής δομής, όταν αυτές περιθλώνται σε έναν κρύσταλλο. Η διασπορά από ένα μέσο συνεχές σε δύο διαστάσεις, όπως ένα επίπεδο ατόμων σε μια δομή κρυστάλλου, καλείται ανάκλαση. Εντούτοις, οι όροι περίθλαση και ανάκλαση μπορούν να χρησιμοποιηθούν αδιακρίτως και οι δύο. Έτσι, αν ακτίνες Χ πέσουν σε ένα επίπεδο ατόμων με γωνία πρόσπτωσης θ, οι ακτίνες θα διαπεράσουν τα στρώματα των ατόμων και θα δώσουν την απεικόνιση τους (Στεργιούδης), όπως φαίνεται στο Σχήμα 22.

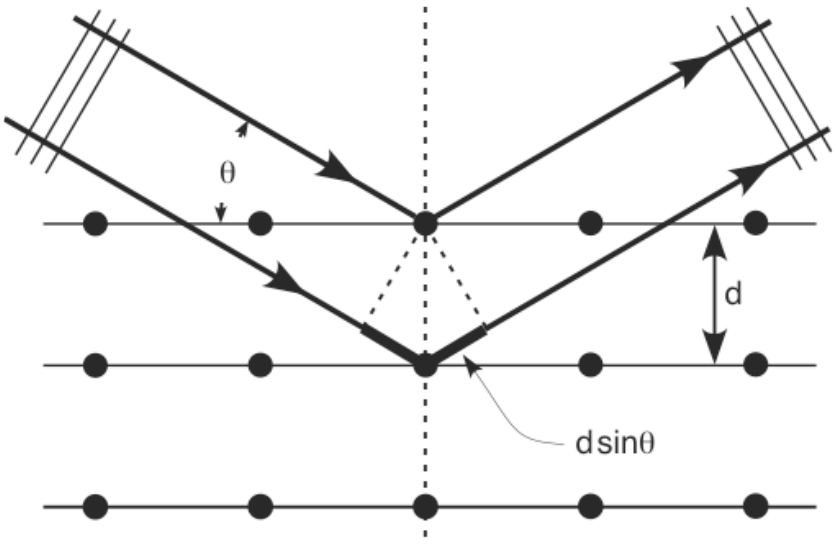


Σχήμα 22: Ανάκλαση ακτίνων Χ από παράλληλα επίπεδα (Στεργιούδης).

Σύμφωνα, λοιπόν, με τη συνθήκη του Bragg (Σχήμα 23), ισχύει ότι:

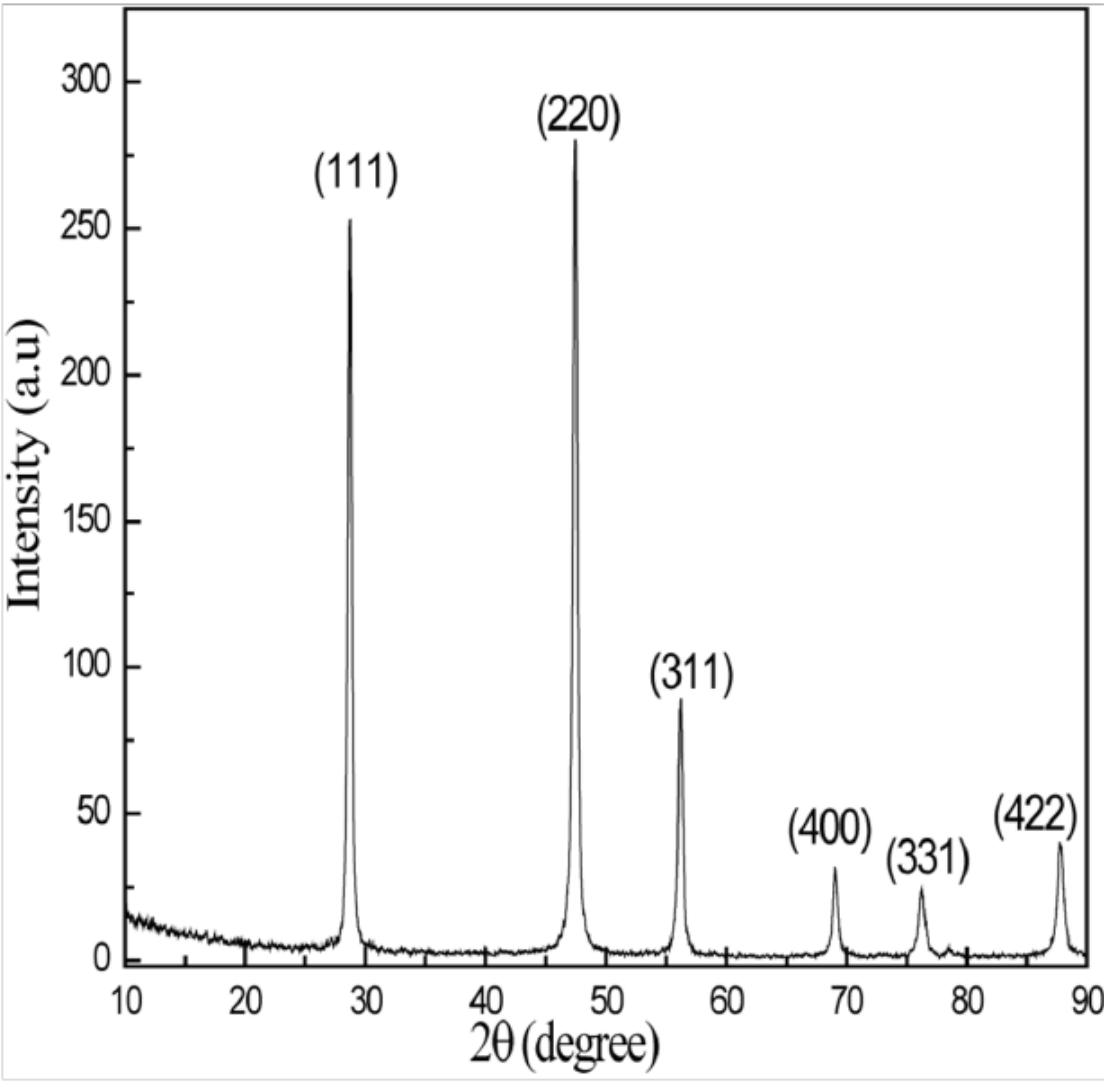
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$$

όπου n είναι ένας ακέραιος, λ είναι το μήκος κύματος των ακτίνων Χ (σε Å), d είναι η απόσταση μεταξύ των ατομικών επιπέδων τον κρύσταλλο (σε Å) και θ είναι η γωνία περίθλασης.



Σχήμα 23: Σχηματική απεικόνιση του νόμου του Bragg (Αθανασίου, 2013).

Υπάρχουν δύο ειδών περιθλασίμετρα: □τα θ–θ, στα οποία ο σωλήνας ακτίνων Χ και ο ανιχνευτής κινούνται ταυτόχρονα και τα θ–2θ, στα οποία ο σωλήνας ακτίνων Χ είναι ακίνητος και ο δειγματοφορέας κινείται στο μισό της ταχύτητας του ανιχνευτή ώστε να διατηρηθεί η γεωμετρία θ–2θ. Η γωνία της περίθλασης (καταγράφεται ως 2θ κατά σύμβαση) σχετίζεται με την απόσταση των πλεγμάτων, d, από τον νόμο του Bragg και η ένταση της μέγιστης περίθλασης σχετίζεται με την ένταση των περιθλάσεων στο δείγμα. Οι γωνίες και η ένταση της περίθλασης καταγράφονται ηλεκτρονικά, με τη χρήση ενός ανιχνευτή και με τη χρήση εξειδικευμένου αναπαριστώνται σε διάγραμμα της γωνίας 2θ (οριζόντιος άξονας) έναντι της έντασης των κορυφών (κάθετος άξονας) για το δείγμα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας αποτελεί ένα διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 24.



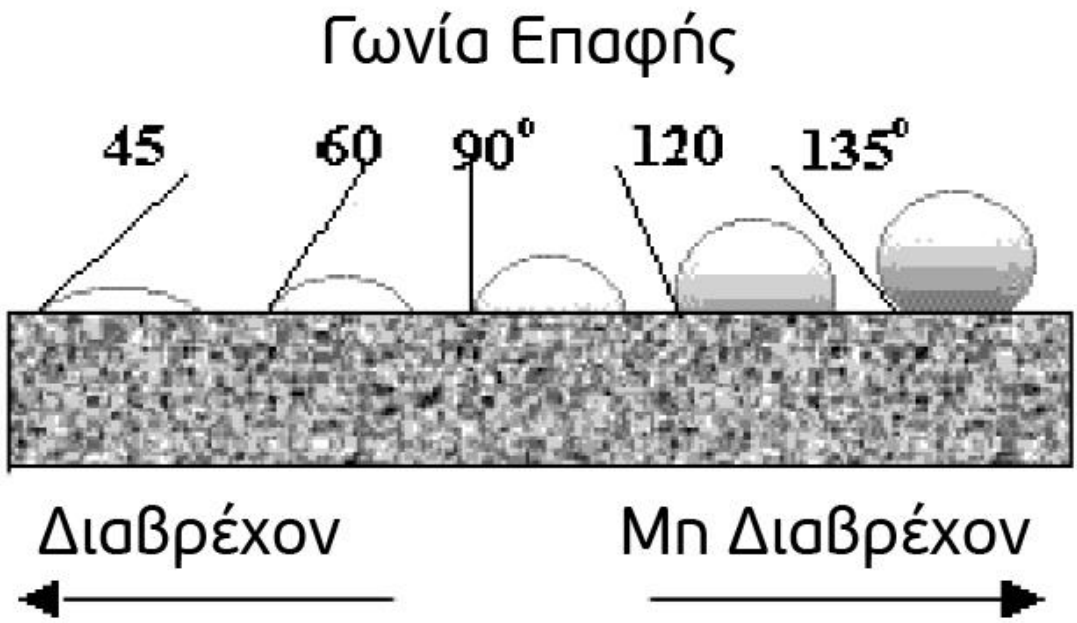
Σχήμα 24: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ (Τσόπελας, 2014β). Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η γωνία 2θ και στον κατακόρυφο η ένταση των κορυφών σε παλμούς ανά δευτερόλεπτο.

Τις περισσότερες φορές, στόχος της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των κρυσταλλικών φάσεων στο δείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των δεδομένων (κορυφών) του δείγματος αντίστοιχα δεδομένα μιας βάσης πρότυπων δεδομένων, που παρέχονται από το Διεθνές Κέντρο Δεδομένων Περίθλασης (International Center for Diffraction Data – ICDD). Το 2004 αυτή η βάση δεδομένων περιείχε πάνω από 150.000 διαγράμματα XRD, τόσο πειραματικά (περίπου 94.000), όσο και υπολογιστικά (περίπου 59.000), από σχεδόν όλες τις γνωστές ανόργανες και πολλές οργανικές κρυσταλλικές ουσίες (icdd.com).

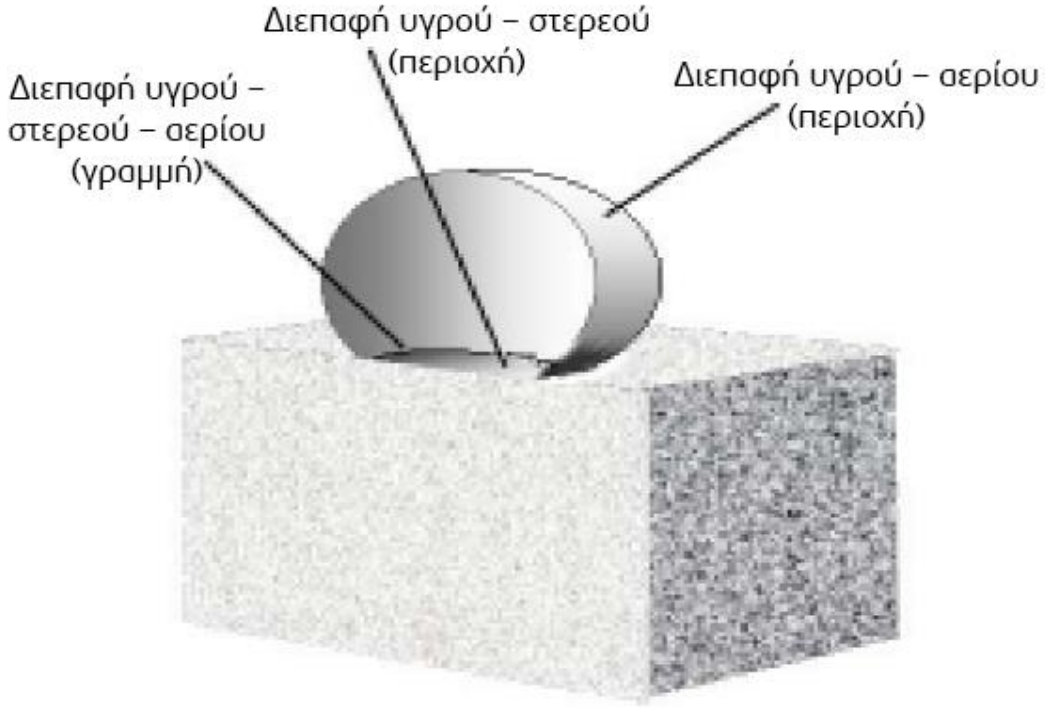
3.2.2. Ποροσιμετρια Υδραργυρου (MIP)

Η Ποροσιμετρία Υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry – MIP) είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο χαρακτηρισμού για τα πορώδη υλικά. Αποτελεί μια αναλυτική τεχνική ελέγχου, δηλαδή απαιτεί δειγματοληψία (καταστρεπτική τεχνική). Μπορεί να ανιχνεύσει πόρους μεταξύ περίπου 500μm και 3,5nm. Η MIP παρέχει ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών, όπως είναι η κατανομή του μεγέθους των πόρων, ο συνολικός όγκος των πόρων ή αλλιώς το πορώδες, η φαινόμενη πυκνότητα και η ειδική επιφάνεια του δείγματος. Μετά από επεξεργασία με ειδικό λογισμικό, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της δομής του δικτύου των πόρων του υλικού.

Τα υγρά χωρίζονται σε διαβρέχοντα και μη διαβρέχοντα (όπως και οι επιφάνειες διαχωρίζονται σε υδρόφιλες και υδρόφοβες αντίστοιχα), ανάλογα με τη γωνία επαφής που σχηματίζει μια σταγόνα αυτών πάνω σε ένα πορώδες υλικό. Έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25, όταν η γωνία αυτή είναι μικρότερη των 90^{o}, το υλικό ονομάζεται διαβρέχον, ενώ όταν η γωνία είναι μεγαλύτερη των 90^{o}, το υλικό ονομάζεται μη διαβρέχον. Ο υδράργυρος είναι ένα μη διαβρέχον υγρό (Σχήμα 26) για το σύνολο σχεδόν των υλικών. Αυτό το γεγονός είναι που τον καθιστά το ιδανικό υγρό για την ποροσιμετρία, αφού αν γινόταν χρήση κάποιου διαβρέχοντος υγρού, για παράδειγμα νερό, αυτό δε θα εισχωρούσε απλά στους πόρους του υλικού, αλλά θα διαλυτοποιούσε μέρος του υλικού, αλλοιώνοντας τη δομή του δικτύου των πόρων.

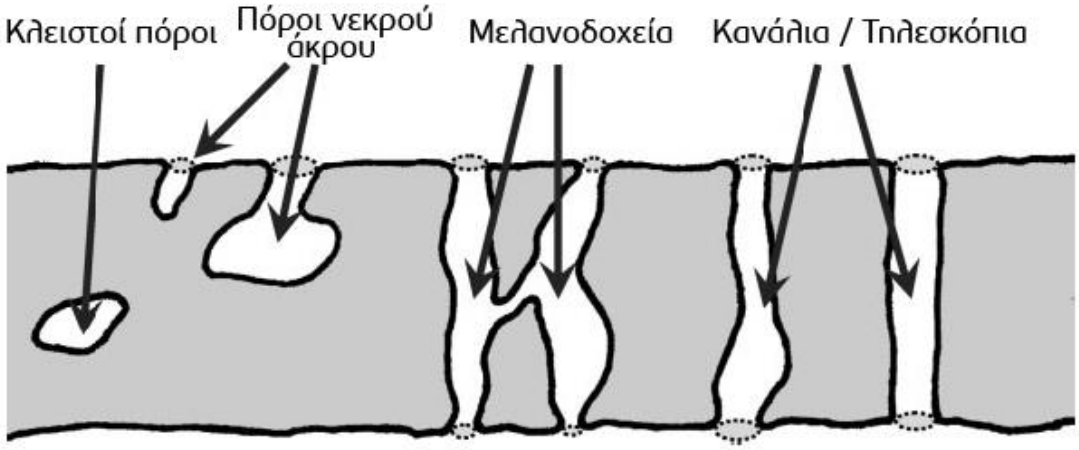


Σχήμα 25: Σταγόνα ενός υγρού πάνω σε μια επιφάνεια. Η διαβροχή ελατώνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά. Όταν η γωνία είναι μικρότερη των 90ο, το υλικό ονομάζεται διαβρέχον, ενώ όταν η γωνία είναι μεγαλύτερη των 90ο, το υλικό ονομάζεται μη διαβρέχον (Webb, 2001).



Σχήμα 26: Μια σταγόνα ενός μη διαβρέχοντος υγρού πάνω σε ένα πορόδες υλικό. Είναι σημειωμένες όλες οι διεπαφές που αναπτύσσονται (Webb, 2001).

Οι πόροι ενός πορώδους μέσου εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία ως προς το σχήμα, το μέγεθος και τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης. Ειδικότερα, αναφορικά με το μέγεθος, οι πόροι χωρίζονται σε μικρόπορους, με μέγεθος πόρων μικρότερο από 0,002μm, σε μεσόπορους, με μέγεθος πόρων μεταξύ 0,002μm και 0,05μm και σε μακρόπορους, με μέγεθος πόρων μεγαλύτερο από 0,05μm. Αναφορικά με τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 27, διακρίνονται σε κλειστούς πόρους, πόρους νεκρού άκρου, μελανοδοχεία, κανάλια και τηλεσκόπια. Ειδικότερα, κλειστοί χαρακτηρίζονται οι πόροι που δεν έχουν καμιά σύνδεση μεταξύ τους και δεν είναι διαπερατοί από κάποιο ρευστό. Ως νεκρού άκρου χαρακτηρίζονται οι ανοιχτοί πόροι, που έχουν μια είσοδο, αλλά δεν είναι διαπερατοί. Έτσι κάποιο ρευστό μπορεί να εισέλθει σε αυτούς, αλλά είναι δύσκολο να εξέλθει. Μελανοδοχεία ονομάζονται οι πόροι με περισσότερα του ενός ανοίγματα, που όμως είναι πολύ στενά (λαιμοί), με αποτέλεσμα να είναι δύσκολα διαπερατοί από ρευστά. Τέλος, τα κανάλια είναι πόροι διαπερατοί από ρευστά και τα τηλεσκόπια είναι πόροι, των οποίων η διαπερατότητα είναι μεταξύ αυτής των καναλιών και των μελανοδοχείων (Μοροπούλου, 2009α). Η MIP δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση κλειστών πόρων, δεδομένου ότι ο υδράργυρος δεν έχει δίοδο να εισέλθει στο εσωτερικό αυτών.



Σχήμα 27: Διάκριση πόρων, ανάλογα με τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης (Giesche, 2006).

Μια βασική παραδοχή στην ποροσιμετρία είναι το σχήμα των πόρων. Ουσιαστικά οι συσκευές ποροσιμετρίας (Εικόνα 7) υποθέτουν ότι οι πόροι έχουν μια κυλινδρική μορφή, χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης των Young – Laplace:

$$\Delta P = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{r_{pore}}$$

Η εξίσωση αυτή συσχετίζει τη διαφορά πίεσης κατά μήκος της επαφής του υδραργύρου (τα r_1 και r_2 περιγράφουν την καμπυλότητα της εν λόγω επαφής), προς το αντίστοιχο μέγεθος πόρου (r_{pore}) χρησιμοποιώντας την επιφανειακή τάση του υδραργύρου (γ) και τη γωνία επαφής (θ) μεταξύ του υλικού και του υδραργύρου. Το πραγματικό σχήμα των πόρων είναι ωστόσο εντελώς διαφορετικό και συνεπώς η υπόθεση της κυλινδρικής μορφής των πόρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφορές μεταξύ της ανάλυσης και της πραγματικότητας.



Εικόνα 7: Συσκευή ποροσιμετρίας υδραργύρου Pascal 240/140, της εταιρίας Thermo Electron Corporation (Kaufmann).

Η πίεση είναι μία από τις βασικές μεταβλητές μέτρησης και πρέπει να επισημανθεί ότι μια λανθασμένη ανάγνωση της πίεσης θα οδηγήσει αυτόματα σε λάθος εκτίμηση του μεγέθους των πόρων. Η μέτρηση μπορεί να διαφοροποιηθεί μέχρι και κατά 5 τάξεις μεγέθους και η πίεση μεταβάλλεται αντίστοιχα κατά ένα εξίσου μεγάλο εύρος. Θα ήταν πολύ δύσκολο να γινόταν χρήση ενός μόνο αισθητήρα για ολόκληρη την μέτρηση. Έτσι, για πρακτικούς λόγους, τα περισσότερα όργανα χρησιμοποιούν περισσότερους του ενός αισθητήρες. Αυτό το σύστημα, στη συνέχεια, μας παρέχει μια καλύτερη ανάλυση μέσα σε ένα εύρος τιμών, ωστόσο, μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα στα σημεία μετάβασης μεταξύ των διαφόρων αισθητήρων. Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη αυτά τα σημεία μετάβασης (Giesche, 2006).

Η δεύτερη βασική παράμετρος μέτρησης είναι το μέγεθος των πόρων. Ουσιαστικά όλα τα όργανα μετρούν την χωρητικότητα ανάμεσα σε ένα μεταλλικό στοιχείο στο εξωτερικό μιας γυάλινης στήλης και του μήκους που έχει καταλάβει ο υδράργυρος στη στήλη. Ο χειριστής πρέπει να ελέγχει, κυρίως, ότι η στήλη δεν έχει επιμολύνσεις και δεν εμφανίζονται προβλήματα στο γυαλί. Η βαθμονόμηση του όγκου με ένα γνωστό πρότυπο υλικό είναι σχετικά απλή διαδικασία, η οποία απαιτείται να πραγματοποιηθεί πριν την μέτρηση.

Η επιφανειακή τάση του υδραργύρου και η γωνία επαφής μεταξύ του υδραργύρου και της επιφάνειας του δείγματος είναι πρόσθετοι παράγοντες που πρέπει να καθοριστούν. Σε γενικές γραμμές, η επιφανειακή τάση του υδραργύρου δεν σχετίζεται με τα σφάλματα κατά τον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των πόρων. Μία τιμή της τάξεως των 0,485N·m^{-1} στους 25°C, είναι κοινώς αποδεκτή από τους περισσότερους ερευνητές. Συνήθως ενδείκνυται η χρησιμοποίηση φρέσκου (τριπλής απόσταξης) υδραργύρου για κάθε μέτρηση. Μολονότι η χρησιμοποίηση υδραργύρου αρκεί στις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχει η πιθανότητα παρατήρησης σφαλμάτων. Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί από τον Allen (Allen, 1997) και τον Klobek (Klobek, 1981), περιγράφουν την επίδραση της θερμοκρασίας

και της πίεσης στην τιμή της επιφανειακής τάσης, αλλά οι παρατηρήσεις αυτές δεν χρησιμοποιούνται σε γενικές γραμμές.

Η γωνία επαφής είναι μια παράμετρος, η οποία επηρεάζει σαφώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για παράδειγμα, οι γωνίες επαφής από 128° έως 148° έχουν προσδιοριστεί ως χαρακτηριστικές του υδραργύρου στο γυαλί (Adamson, 1982). Ωστόσο, στις περισσότερες εφαρμογές επιλέγεται μια σταθερή τιμή ανεξάρτητα από το υλικό του δείγματος, για παράδειγμα 130° ή 140°.

Αρκετές τεχνικές είναι διαθέσιμες για τον προσδιορισμό της γωνίας επαφής, όπως η τοποθέτηση μιας σταγόνας υδραργύρου στην επίπεδη επιφάνεια του δείγματος και είτε η προσαρμογή του πραγματικού σχήματος της σταγόνας, είτε η μέτρηση του μέγιστου ύψους, h_{max}, δεδομένου ότι ο όγκος του υδραργύρου αυξάνεται. Η γωνία επαφής μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\cos\theta = 1 - \frac{\rho \cdot g \cdot {h_{max}}^2}{2 \cdot \gamma_{Hg,air}}$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ρ η πυκνότητα του υγρού.

Κατά την προετοιμασία του δείγματος, το πρώτο βήμα απαιτεί τον καλό καθαρισμό της επιφάνειας. Μία από τις βασικές παραμέτρους, σε αυτό το σημείο, είναι το βάρος του δείγματος. Τα πορώδη υλικά έχουν την τάση να προσροφούν νερό ή άλλα χημικά, τα οποία θα πρέπει να αφαιρεθούν κατά την αρχική εκκένωση του δείγματος.

Η MIP δεν έχει άμεσο τρόπο να διαπιστώσει αν έχουν απομακρυνθεί οι επιμολύνσεις ή ποιο είναι το πραγματικό βάρος. Μπορούμε να κρίνουμε μόνο έμμεσα από μια αναπάντεχα χαμηλή πίεση κενού. Επίσης, μπορεί να χρειαστούν και επιπλέον βήματα για τον προσδιορισμό του καθαρού βάρους του δείγματος. Παρά το γεγονός ότι έχει προταθεί, συνήθως δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί καμία θερμική επεξεργασία στο δείγμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκκένωσης.

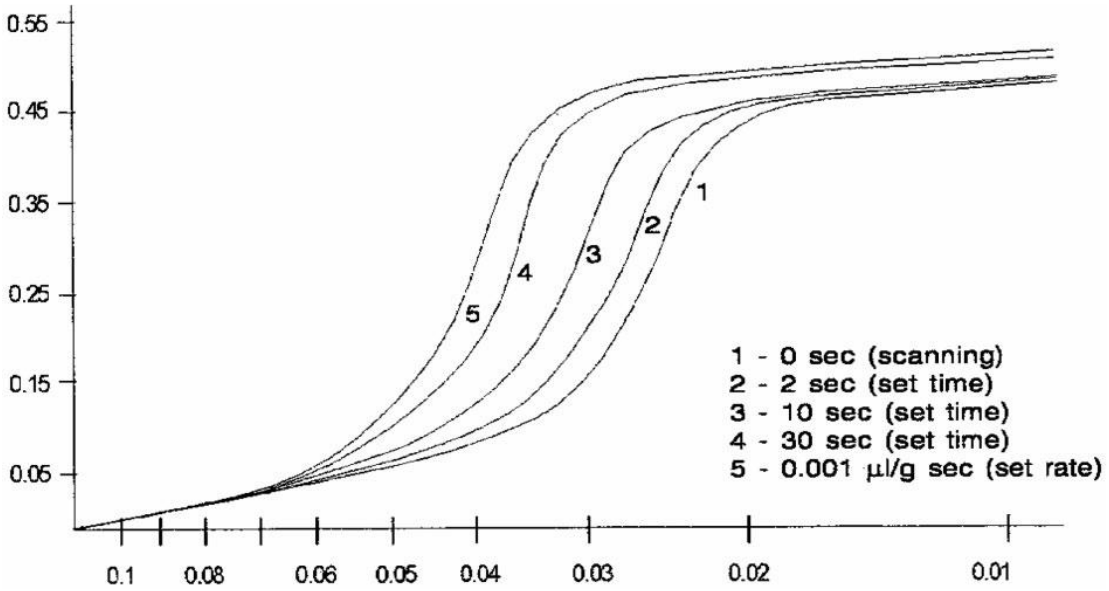
Αρχικά, το δείγμα εκκενώνεται για την απομάκρυνση του αέρα και της εναπομένουσας υγρασίας ή άλλων υγρών από τους πόρους. Το δείγμα στη συνέχεια γεμίζεται με τον υδράργυρο όσο το όλο σύστημα εξακολουθεί να είναι κάτω από ελαττωμένη πίεση. Όταν πραγματοποιείται με αργό ρυθμό, η αύξηση της πίεσης επιτρέπει στον υδράργυρο να εισχωρεί στους μεγαλύτερους πόρους του δείγματος ή σε τυχόν κενά διαστήματα μεταξύ κομματιών του δείγματος.

Στη συνέχεια, η πίεση αυξάνεται έως και αρκετές ατμόσφαιρες, γεγονός που επιτρέπει μια ομαλή μετάβαση από την χαμηλή στην υψηλή πίεση της ανάλυσης. Στο τέλος της πρώτης φάσης (φάση χαμηλής πίεσης) της ανάλυσης το βάρους του γεμάτου με υδράργυρο δείγματος προσδιορίζεται, γεγονός που επιτρέπει τον υπολογισμό της πυκνότητας του δείγματος (χρησιμοποιώντας αντίστοιχες καμπύλες αναφοράς τυφλού δείγματος).

Στο επόμενο στάδιο, το δείγμα μεταφέρεται στο σύστημα υψηλής πίεσης (φάση υψηλής πίεσης) στο οποίο ασκούνται πιέσεις μέχρι και 414MPa (60000psi) που εφαρμόζονται με ισοστατικό τρόπο. Τα περισσότερα μηχανήματα μπορούν να λειτουργούν σε συνεχή ή βηματική λειτουργία. Η συνεχής λειτουργία προσφέρει τη δυνατότητα να διεξαχθεί μια ανάλυση σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, από 5 έως 10 λεπτά για μια ολόκληρη ανάλυση. Ωστόσο, αυτό απαιτεί προσεκτική εξέταση πολλών συντελεστών διόρθωσης, όπως η θλιπτική επίδραση θέρμανσης και η παρεμπόδιση της ροής του υδραργύρου μέσω των μικρών πόρων. Από την άλλη πλευρά, δίνει τη δυνατότητα καταγραφής μεγάλου αριθμού δεδομένων. Αντίθετα, η βηματική λειτουργία επιτυγχάνει με μεγαλύτερη βεβαιότητα την πραγματική ισορροπία για κάθε δεδομένο που λαμβάνεται, εφόσον το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης οριστεί αρκετά μεγάλο και η επίδραση της θερμοκρασίας θεωρηθεί αμελητέα, γεγονός που συνήθως συμβαίνει σε χρόνους εξισορρόπησης πάνω από 5 λεπτά.

Το μέγεθος και ο όγκος των πόρων, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ρυθμίσεις του ρυθμού εισχώρησης. Αναλυτικότερα, σε μία μελέτη, πέντε δείγματα από αλούμινα αναλύθηκαν με μια συσκευή Micromeritics Autopore 9420, χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη λειτουργία σάρωσης (εξισορρόπηση με το

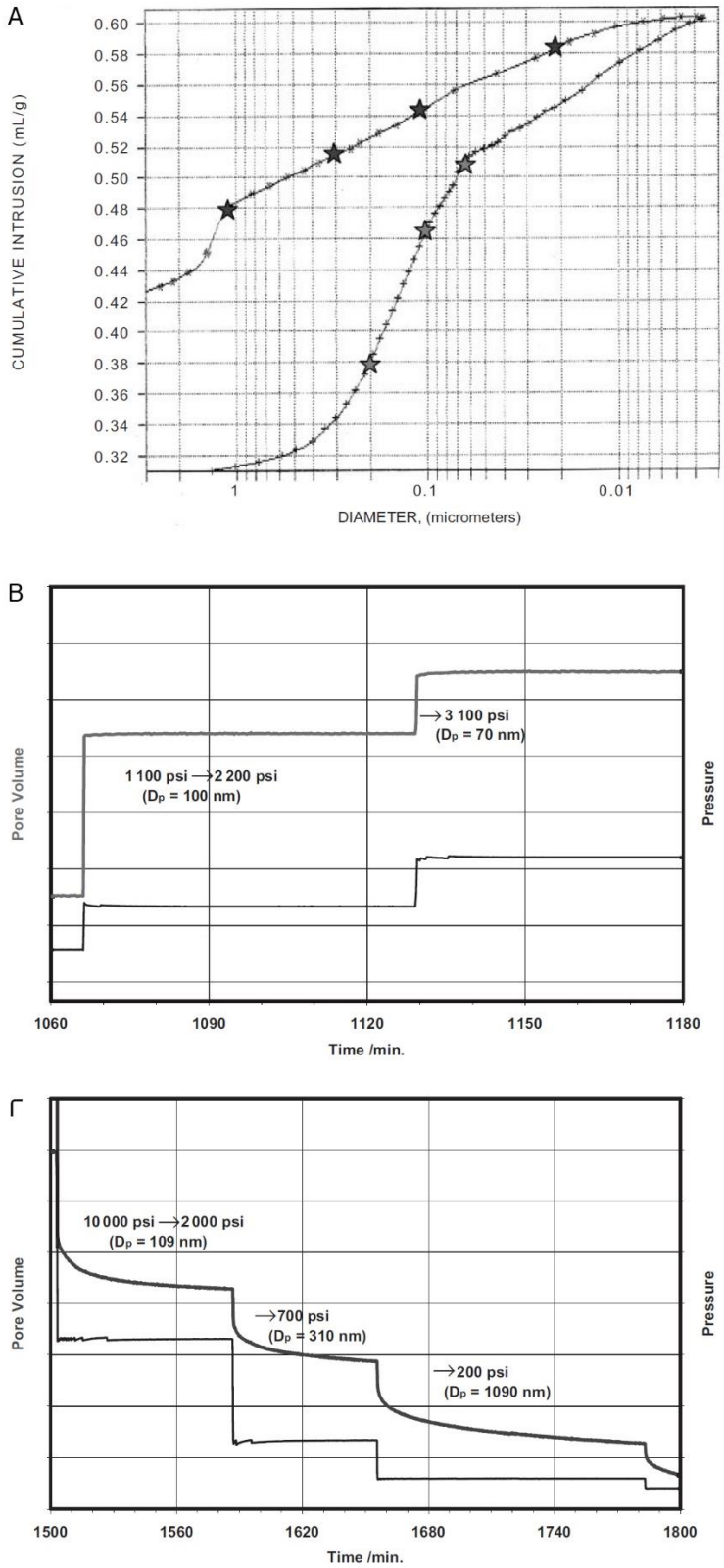
χρόνο για 0 δευτερόλεπτα), εξισορρόπηση σε 2sec, 10sec και 30sec και έναν ρυθμό εξισορρόπηση ίσο με 0,001 $\mu L \cdot g^{-1} \cdot sec^{-1}$. Οι αθροιστικές καμπύλες εισχώρησης στον όγκο των πόρων των πέντε δειγμάτων φαίνονται στο Σχήμα 28. Παρατηρείται μια διαφορά που φτάνει το 10% στον όγκο των πόρων και το 40% έως 50% στο μέγεθος των πόρων, όσο πιο αργή γίνεται η ανάλυση (Mayer and Stowe, 1965).



Σχήμα 28: Επιρροή του ρυθμού εισχώρησης του υδραργύρου στο μέγεθος και τον όγκο των πόρων (Mayer and Stowe, 1965).

Μια άλλη πτυχή του χρόνου εξισορρόπησης φαίνεται στο Σχήμα 29. Σε αυτήν την περίπτωση, ο όγκος εισχώρησης θεωρείται ως μία συνάρτηση του χρόνου για την εισχώρηση (Σχήμα 29Β) και την απομάκρυνση (Σχήμα 29C) σε συγκεκριμένες τιμές πίεσης. Το δείγμα μετράται πρώτα κάτω από κανονικές συνθήκες, με χρόνο εξισορρόπησης 300sec (Σχήμα 29Α). Παρατηρείται ότι η ισορροπία επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της εισχώρησης (Σχήμα 29Β) πολύ πιο γρήγορα από ότι κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης (Σχήμα 29C), παρά το γεγονός ότι πρόκειται για το ίδιο δείγμα και ότι οι δοκιμές απομάκρυνσης καλύπτουν σημεία για υψηλότερες καθώς και για χαμηλότερες τιμές πίεσης (μέγεθος πόρων) σε σύγκριση τις δοκιμές εισχώρησης. Η εξισορρόπηση στην

περίπτωση της απομάκρυνσης πραγματοποιήθηκε επί 2h. Συνεπώς και άλλοι παράγοντες, εκτός από την ροή του υδραργύρου διαμέσου του δικτύου των πόρων και την θερμοκρασία είναι υπεύθυνοι για την καθυστέρηση στην επίτευξη ισορροπίας (Giesche, 2006).

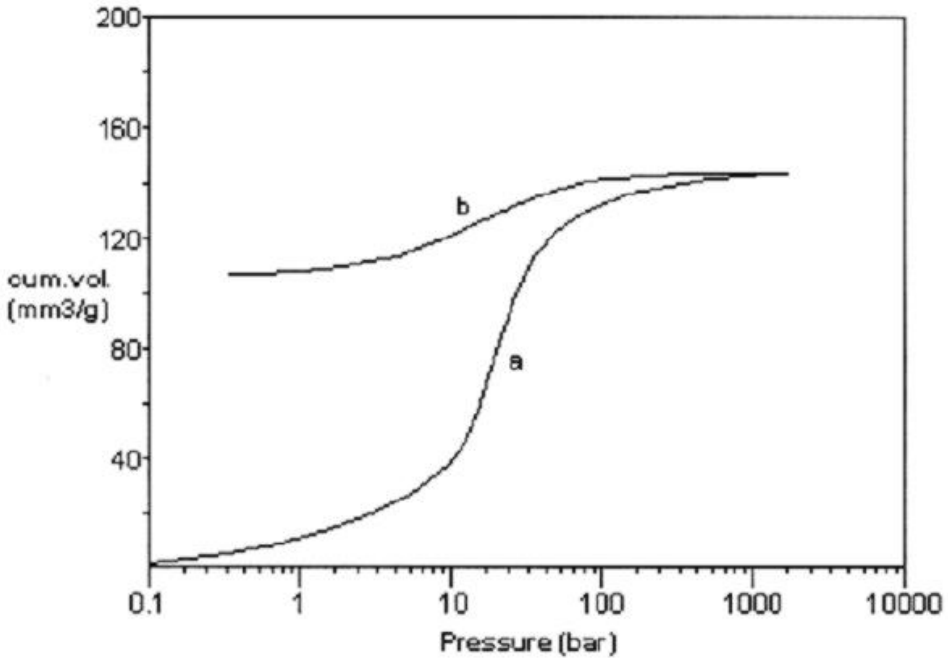


Σχήμα 29: Πόσο γρήγορα επιτυγχάνεται η ισορροπία. **Α.** Τα αρχικά δεδομένα που συλλέγονται. **Β.** Οι καμπύλες όγκου των πόρων συναρτήσει του χρόνου – έντασης για την εισχώρηση του υδραργύρου. **Γ.** Οι καμπύλες όγκου των πόρων συναρτήσει του χρόνου – έντασης για την απομάκρυνση του υδραργύρου (Giesche, 2006).

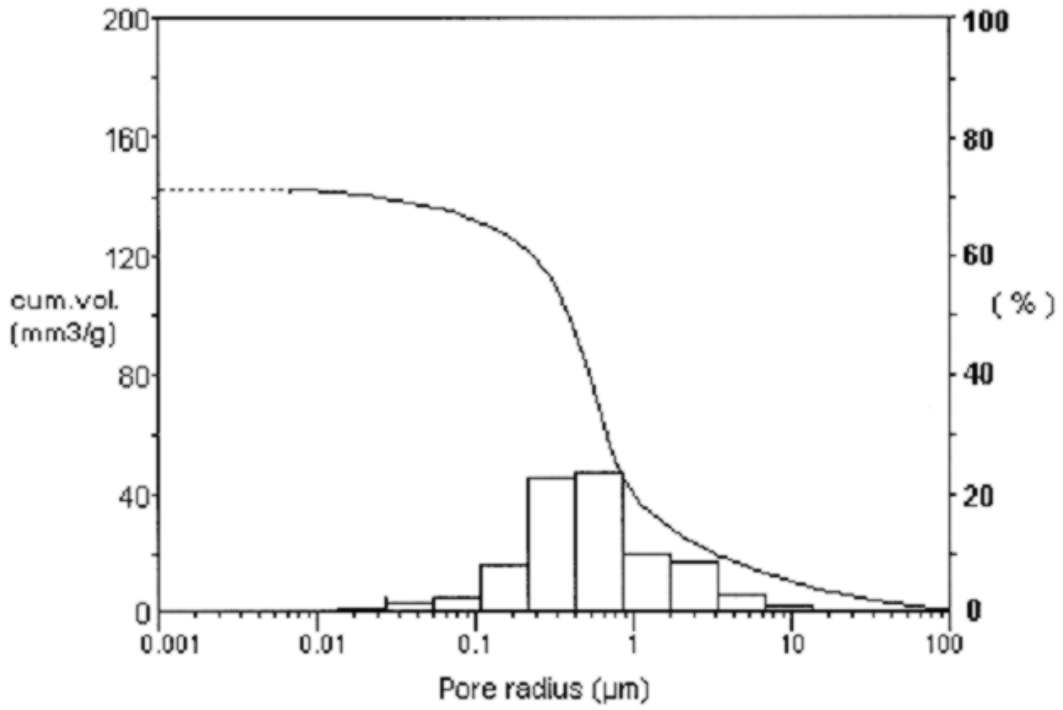
Η συμπιεστότητα είναι μια επιπλέον παράμετρος, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ιδανικά, αυτή θα μπορούσε να διορθωθεί με την εκτέλεση του πειράματος με ένα τυφλό πρότυπο δείγμα, δηλαδή ένα μη–πορώδες δείγμα από το ίδιο υλικό. Δυστυχώς, αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό. Ως συμπιεστότητα ορίζεται ως η μεταβολή του όγκου ανά μονάδα πίεσης και το γραμμικά ισοδύναμο είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young. Τα περισσότερα στερεά έχουν τιμή συμπιεστότητας από περίπου $10^{-3}Pa^{-1}$ έως περίπου $10^{-4}Pa^{-1}$. Έτσι, ένα δείγμα όγκου $1cm^3$ θα συμπιεστεί κατά περίπου $0,006cm^3$ έως $0,06cm^3$ σε τελική πίεση 400MPa. Ανάλογα με τον όγκο των πόρων του δείγματος, αυτό μπορεί να αποτελεί μικρή επίδραση. Από την άλλη πλευρά, τα πολυμερή υλικά έχουν συνήθως σημαντικά μεγαλύτερη συμπιεστότητα και συνεπώς μια πολύ μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η επίδραση της συμπιεστότητας μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί κατά τη σχεδίαση του συνολικού όγκου των πόρων, συναρτήσει της πίεσης. Σε περίπτωση εξαιρετικά μη–συμπιεστού δείγματατος, μπορεί να παρατηρηθεί ακόμη και μια συνολικά αρνητική μεταβολή του όγκου. Η συμπιεστότητα έχει πρωτίστως σημασία σε μικρότερα μεγέθη πόρων ή σε υψηλότερες πιέσεις. Ωστόσο, αυτές είναι οι περιοχές, οι οποίες έχουν την σχετικά σημαντικότερη επίδραση στους υπολογισμούς της επιφάνειας. Έτσι, οι τελευταίες αυτές τιμές μπορούν να επηρεαστούν (να αυξηθούν ή να μειωθούν) σημαντικά από τη συμπιεστότητα (Giesche, 2006).

Από την ποροσιμετρία υδραργύρου, προκύπτουν οι καμπύλες εισχώρησης και απομάκρυνσης του υδραργύρου (Σχήμα 30). Οι τιμές της πίεσης εισχώρησης μετατρέπονται απευθείας στο αντίστοιχο μέγεθος πόρων χρησιμοποιώντας την εξίσωση Washburn. Με απλή διαφόριση της καμπύλης εισχώρησης λαμβάνεται μια ογκομετρική κατανομή των πόρων ως προς τις ακτίνες τους (Σχήμα 31). Εδώ θα πρέπει να τονισθεί ότι εάν η καμπύλη αυτή παρουσιάζει ένα ανοδικό αντί για ένα παράλληλο προς τον άξονα της διαμέτρου των πόρων (άξονας x) τμήμα στην έναρξή της, τότε στο δείγμα υπάρχει πορώδες μικρότερο από τα όρια ανίχνευσης της τεχνικής, για τις ρυθμίσεις που δόθηκαν στη συσκευή. Ακόμη, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ποροσιμετρία δεν μετρά το πραγματικά μέγεθος των πόρων, αλλά την μεγαλύτερη διασύνδεση ανάμεσα στον πόρο και την

επιφάνεια του δείγματος (είτε πρόκειται για λαιμό, είτε για κανάλι πόρων). Ακόμα, δεν λαμβάνει υπόψη το κλειστό πορώδες (Σχήμα 27). Έτσι, τα αποτελέσματα του πορώδους με χρήση της ποροσιμετρίας υδραργύρου δείχνουν πάντα μικρότερα μεγέθη πόρων σε σχέση με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) ή οπτικού μικροσκοπίου. Παρόλα αυτά, καθώς η εφαρμογή της είναι πιο απλή από αυτές τις τεχνικές και μπορεί να δώσει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα για διάφορες εφαρμογές, γεγονός που δικαιολογεί την ευρεία χρήση της.



Σχήμα 30: Διάγραμμα όγκου εισχώρησης συναρτήσει της πίεσης, στο οποίο φαίνονται οι τυπικές καμπύλες εισχώρησης (καμπύλη a) και απομάκρυνσης (καμπύλη b) του υδραργύρου (Κουλουμπή και συνεργάτες, 2000).



Σχήμα 31: Ογκομετρική κατανομή πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, που προκύπτει από την καμπύλη είσδυσης με χρήση του απλοποιημένου μοντέλου του Washburn (Μοροπούλου, 2009γ).

3.2.3. ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ / ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (DTA/TG)

Η θερμική ανάλυση χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως ο χαρακτηρισμός και ο ποιοτικός έλεγχος υλικών και η μελέτη διεργασιών και περιλαμβάνει μια σειρά από διαφορετικές τεχνικές (Πίνακας 11). Τα υλικά που κυρίως μετρούνται είναι κεραμικά, κονιάματα, λίθοι, πολυμερή, κράματα, φαρμακευτικά υλικά και τρόφιμα.

Σύμφωνα με τη θερμική θεωρία, θερμοτονισμός μιας αντίδρασης είναι η ενέργεια, που εκλύεται ή απορροφάται εξαιτίας της αντίδρασης και η οποία μπορεί να εμφανιστεί σαν θερμότητα ή/και σαν εσωτερική ενέργεια ή άλλη μορφής ενέργειας. Η ενέργεια που εκλύεται ή απορροφάται, κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης, προέρχεται από τη λύση ή το σχηματισμό των ατόμων μεταξύ των αντιδρώντων μορίων. Σε μία εξώθερμη αντίδραση, η ενέργεια δεσμών των προϊόντων της αντίδρασης είναι μικρότερη από εκείνη των αντιδρώντων, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας, το οποίο και απελευθερώνεται (Μοροπούλου και συνεργάτες, 2014).

Πίνακας 11: Ορισμένες από τις κυριότερες τεχνικές θερμικής ανάλυσης (Fröberg, 2010).

Τεχνική	***Μετρούμενη Ιδιότητα***
Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis – DTA)	Διαφορά θερμοκρασίας
Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (Thermogravimetric Analysis – TGA)	Απώλεια μάζας
Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry – DSC)	Ροή θερμότητας
Θερμομηχανική Ανάλυση (Thermomechanical analysis – TMA)	Παραμορφώσεις και διαστάσεις
Μέτρηση Θερμικής Διαστολής (Dilatometry – DIL)	Όγκος
Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση υπό Πίεση (Pressurized TGA – PTGA)	Απώλεια Μάζας ως συνάρτηση της πίεσης

Η Διαφορική Θερμική / Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis / Thermogravimetry – DTA/TG) αποτελεί μια τεχνική μέτρησης, όπου εκτελείται τόσο η τεχνική της Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης, όσο και της Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης. Αναλυτικότερα, μετρούνται οι αλλαγές στη μάζα του υλικού, καθώς και οι μεταβολές της ενέργειας, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, με συνέπεια να καθίσταται δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τις φυσικοχημικές αλλαγές που υφίσταται το υλικό. Ωστόσο, προκειμένου να κατανοηθούν πλήρως οι αντιδράσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, χρήσιμο εργαλείο αποτελούν πληροφορίες που προέρχονται από άλλες τεχνικές μέτρησης. Όταν τα αποτελέσματα της DTA/TG δείχνουν ότι έχει συμβεί απώλεια μάζας, που σχετίζεται με μια ενδόθερμη αντίδραση, τότε μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι έχουν συμβεί αντιδράσεις όπως αφυδάτωση, εξάτμιση, εξάχνωση, ή υποβάθμιση. Αν και μπορούμε να συμπεράνουμε το είδος των αντιδράσεων που έχουν συμβεί, εάν υπάρχουν ορισμένες ενδείξεις για τη σύσταση του υλικού, είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα, εάν το υλικό είναι άγνωστο. Στην περίπτωση αυτή, η DTA/TG συνδυάζεται με άλλες τεχνικές μέτρησης (Motomura and Celiz, 2011).

Η DTA βασίζεται στην μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ($\Delta T = T_{δειγ} - T_{αναφ}$), μεταξύ του προς μέτρηση δείγματος ($T_{δειγ}$) και ενός δείγματος αναφοράς ($T_{αναφ}$), όταν και τα δύο δείγματα υπόκεινται σε ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Όταν λαμβάνει χώρα μια χημική ή φυσική μεταβολή, που συνοδεύεται από έκλυση ή απορρόφηση θερμότητας, τότε αρχίζει να παρουσιάζεται διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο προς μέτρηση δείγμα και το δείγμα αναφοράς. Το διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας – χρόνου (ή $T_{δειγ}$) θα παρουσιάζει μια ενδόθερμη ή εξόθερμη κορυφή (απορρόφηση ή απελευθέρωση ενέργειας αντίστοιχα). Η φορά της κορυφής δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο, μιας και καθορίζεται τις ρυθμίσεις που έχουν επιλεγεί. Ιδιαίτερη σημασία όμως έχουν το σημείο (θερμοκρασία) που συμβαίνει η μεταβολή αυτή (ή γενικότερα το εύρος θερμοκρασίας), καθώς και η επιφάνεια που περικλείεται από την κορυφή. Η επιφάνεια Α είναι ανάλογη της θερμότητας της αντίδρασης:

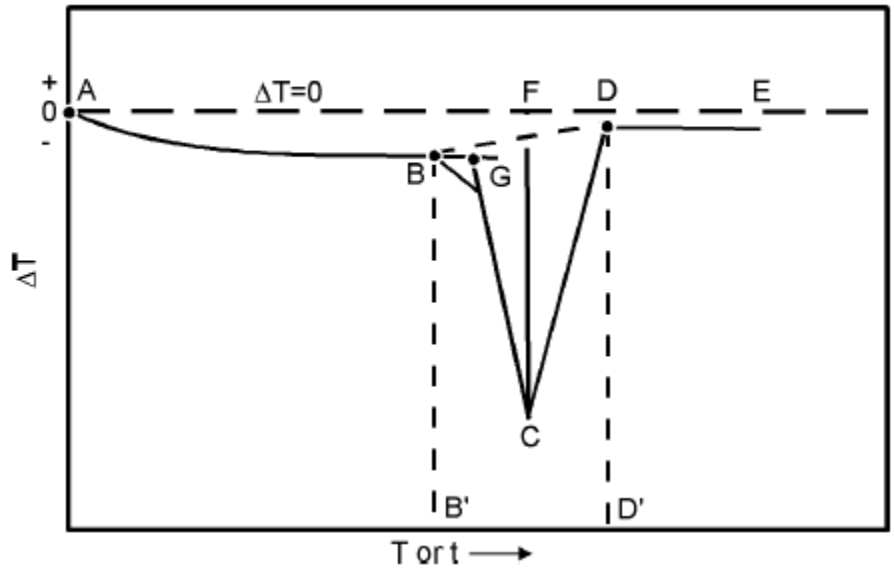
$$\Delta H = K \cdot A = K \cdot \int \Delta T \cdot dt$$

όπου K είναι σταθερά, η οποία εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του δείγματος (Μοροπούλου, 2009β).

Η διαφορά θερμοκρασίας παρακολουθείται ως συνάρτηση του χρόνου ή της θερμοκρασίας και μπορεί να αποκαλύψει τα ακόλουθα (Μοροπούλου, 2009β):

- Έλεγχος ποιότητας και σύστασης πολυμερών, τσιμέντων, ορυκτών, φαρμακευτικών προϊόντων και τροφίμων.
- Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες.
- Υαλώδης μεταβολές.
- Συμπεριφορά τήξης και κρυστάλλωσης.
- Καθαρότητα του δείγματος.
- Κινητική αντιδράσεων.
- Θερμική σταθερότητα.

Η μορφή που έχει η καμπύλη DTA φαίνεται στο Σχήμα 32. Ο κάθετος άξονας (άξονας y) αναπαριστά τη διαφορά θερμοκρασίας του δείγματος και του δείγματος αναφοράς, ΔΤ και ο οριζόντιος άξονας (άξονας x) αναπαριστά τη θερμοκρασία, Τ ή το χρόνο, t. Τα ευθύγραμμα τμήματα AB και DE αντιστοιχούν στην περιοχή όπου η διαφορά θερμότητας είναι σχεδόν μηδενική. Η αρχική θερμοκρασία είναι το σημείο B και προσδιορίζεται προσεγγιστικά, ενώ η τελική θερμοκρασία είναι το σημείο D. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι εκείνη που αντιστοιχεί στο σημείο C (προέκταση του ευθυγράμμου τμήματος CF, ώστε να τέμνει τον οριζόντιο άξονα). Το εύρος της κορυφής αντιστοιχεί στην προβολή του ευθύγραμμου τμήματος BD στον οριζόντιο άξονα (δηλαδή είναι το ευθύγραμμο τμήμα B'D'). Τέλος, το ύψος της κορυφής είναι το ευθύγραμμο τμήμα CF (Földvári, 2011).



Σχήμα 32: Η μορφή της καμπύλης DTA (Földvári, 2011).

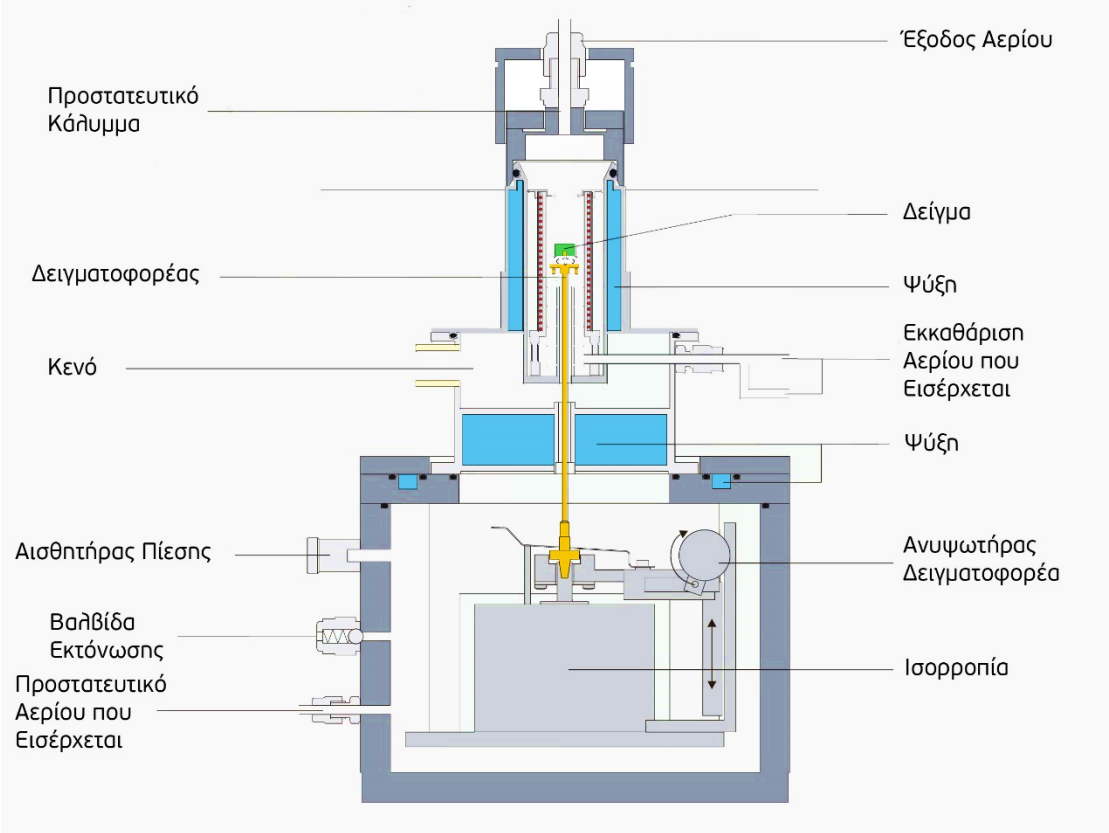
Στην ανάλυση TG καταγράφεται η μεταβολή της μάζας του δείγματος, κατά την εξέλιξη ενός προκαθορισμένου προγράμματος μεταβολής της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της μάζας επέρχεται όταν παράγονται πτητικά αέρια, κατά τη θερμική αντίδραση του δείγματος με το περιβάλλον αέριο (συνήθως αέρας). Τέτοια πτητικά αέρια μπορεί να είναι υδρατμοί (λόγω ξήρανσης / αφυδάτωσης του δείγματος), CO_2 (λόγω καύσης οργανικών) και άλλες παρεμφερείς ενώσεις. Ανάλογα με το είδος της ατμόσφαιρας, μπορούν να επέλθουν οξειδώσεις, παράλληλα με τις διασπάσεις (Μοροπούλου, 2009β).

Οι κύριες διεργασίες που μπορούν να μελετηθούν με την βοήθεια της ανάλυσης TG είναι οι εξής (Μοροπούλου, 2009β):

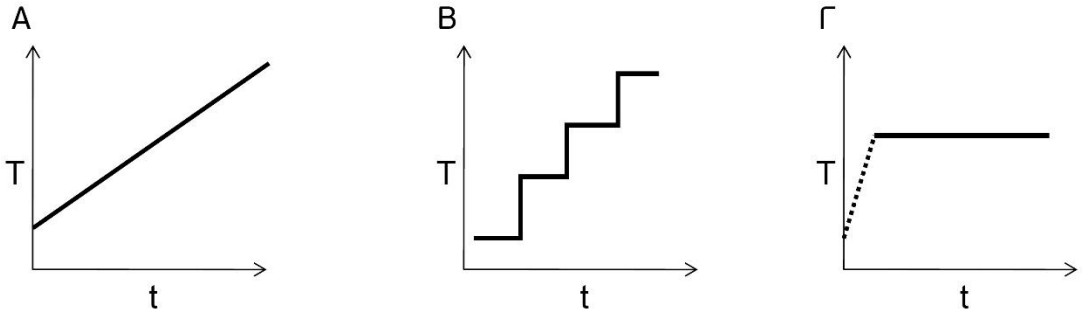
- Απορρόφηση ή προσρόφηση (αύξηση ή μείωση βάρους).
- Εκρόφηση (μείωση βάρους).
- Ξήρανση – Απομάκρυνση διαλύτη (μείωση βάρους).
- Εξάτμιση (μείωση βάρους).
- Αποσύνθεση (μείωση βάρους).
- Αντιδράσεις στερεάς – στερεάς φάσης (μείωση βάρους).
- Αντιδράσεις στερεάς – υγρής φάσης (αύξηση ή μείωση βάρους).

Τα βασικά στοιχεία της συσκευής, που ονομάζεται και θερμοζυγός φαίνονται στο Σχήμα 33 και είναι τα ακόλουθα (Τσόπελας, 2014α):

- Ευαίσθητος αναλυτικός ζυγός. Η ακρίβειά του είναι συνήθως της τάξης του μg.
- Δοχεία δείγματος (χωνευτήρια). Είναι συνήθως κατασκευασμένα από αλουμίνιο, πλατίνα, οξείδιο του πυριτίου και αλουμίνα, ώστε να υπάρχει δυνατότητα επιλογής υλικού συμβατό με το προς εξέταση δείγμα.
- Φούρνος. Στην περιοχή του φούρνου μπορεί να διοχετεύεται αδρανές (αργό, άζωτο) ή οξειδωτικό (αέρας, οξυγόνο) αέριο ή να βρίσκεται υπό συνθήκες κενού. Η ανώτατη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει είναι συνήθως πάνω από 1000^{o}C, ενώ υπάρχουν τρία είδη προγραμμάτων που μπορεί να ακολουθηθούν ώστε να φτάσει τη μέγιστη θερμοκρασία: συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, βηματική αύξηση της θερμοκρασίας, ισοθερμική λειτουργία (Σχήμα 34).
- Σύστημα διαβίβασης αερίου, που εξασφαλίζει αδρανή (ή σε ορισμένες περιπτώσεις δραστική ατμόσφαιρα).
- Σύστημα ελέγχου λειτουργικών παραμέτρων και επεξεργασίας δεδομένων (ηλεκτρονικός υπολογιστής).



Σχήμα 33: Διάταξη μιας τυπικής συσκευής ανάλυσης TG, στην οποία φαίνονται τα κυριότερα σημεία της (Franke, 2005).



Σχήμα 34: Προγράμματα αύξησης της θερμοκρασίας του φούρνου, κατά τη θερμική ανάλυση. **Α.** Συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, με σταθερό ρυθμό**. Β.** Βηματική αύξηση της θερμοκρασίας. **Γ.** Ισοθερμική λειτουργία (Fröberg, 2010).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της τεχνικής είναι οι ακόλουθοι (Fröberg, 2010):

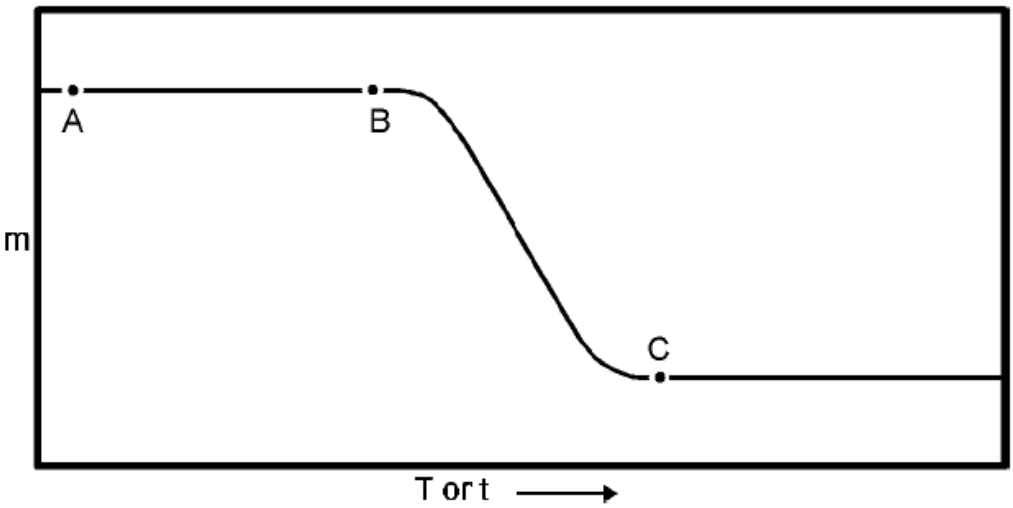
- Ρυθμός θέρμανσης.
- Μέγεθος δείγματος.
- Κοκκομετρία δείγματος.
- Σχήμα χωνευτηρίου.
- Ρυθμός ροής αερίου.
- Βαθμονόμηση θερμοκρασίας και βάρους.

Οι κύριες εφαρμογές της ανάλυσης TG είναι οι εξής (Μοροπούλου, 2009β):

- Θερμική σταθερότητα. Η θερμοβαρυμετρική καμπύλη μπορεί να αποκαλύψει τους μηχανισμούς αποσύνθεσης κάποιου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες και υπό διάφορες ατμόσφαιρες.
- Κινητική αντιδράσεων – διεργασιών. Χρησιμοποιείται συχνά και για τη μελέτη των κινητικών χαρακτηριστικών κάθε είδους διεργασίας, αύξησης ή μείωσης της μάζας του προς εξέταση υλικού.
- Χαρακτηρισμός υλικών. Οι θερμοβαρυμετρικές καμπύλες (με τις χαρακτηριστικές κορυφές για κάθε υλικό) χρησιμοποιούνται για την ταυτοποίηση υλικών και τον ποιοτικό έλεγχο.
- Μελέτη διάβρωσης. Επιτρέπει την μελέτη αντιδράσεων οξείδωσης ή άλλου τύπου, καθώς είναι δυνατή η εφαρμογή διαφόρων τύπων ατμόσφαιρας (ενεργά αέρια ή/και ατμοί)
- Προσομοίωση βιομηχανικών διαδικασιών: Ο θερμοζυγός μπορεί να θεωρηθεί σαν μια μικρογραφία αντιδραστήρα, έχοντας τη δυνατότητα να προσομοιώνει τις συνθήκες αντίδρασης μερικών βιομηχανικών αντιδραστήρων.

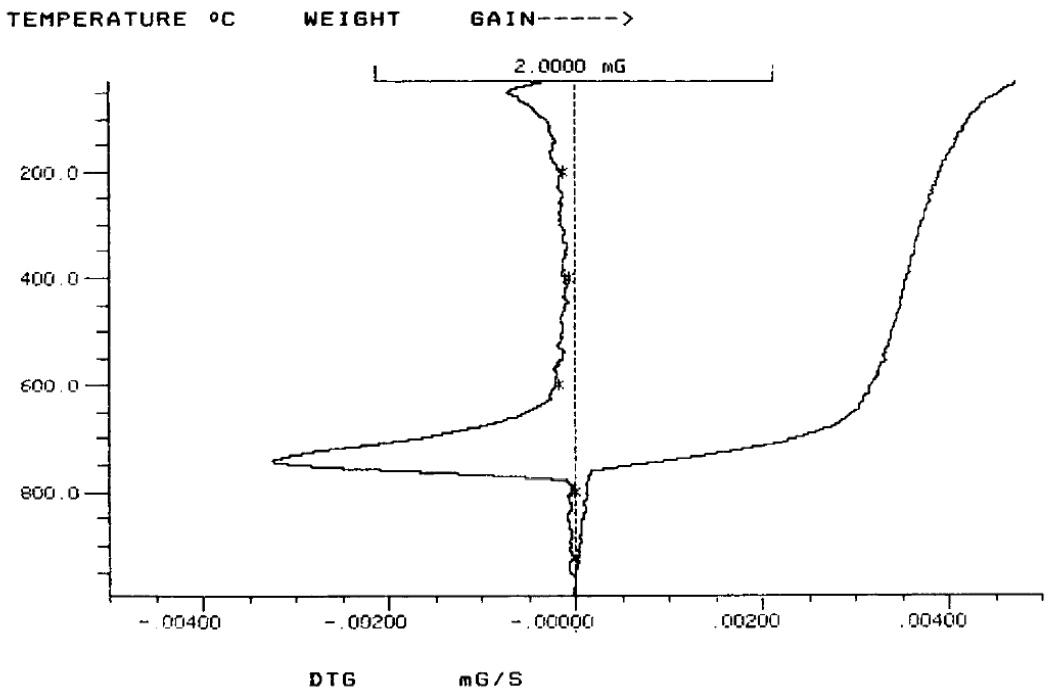
Η μορφή που έχει η καμπύλη DTA φαίνεται στο Σχήμα 35. Ο κάθετος άξονας (άξονας y) αναπαριστά τη μάζα του δείγματος, m και ο οριζόντιος άξονας (άξονας x) αναπαριστά τη θερμοκρασία, T ή το χρόνο, t. Το ευθύγραμμο τμήμα AB αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το βάρος είναι σχεδόν σταθερό. Η αρχική θερμοκρασία είναι εκείνη που αντιστοιχεί το σημείο B και η τελική θερμοκρασία

είναι εκείνη που αντιστοιχεί το σημείο C. Το θερμοκρασιακό διάστημα των δύο προαναφερθέντων θερμοκρασιών είναι η περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η απώλεια μάζας (Földvári, 2011).

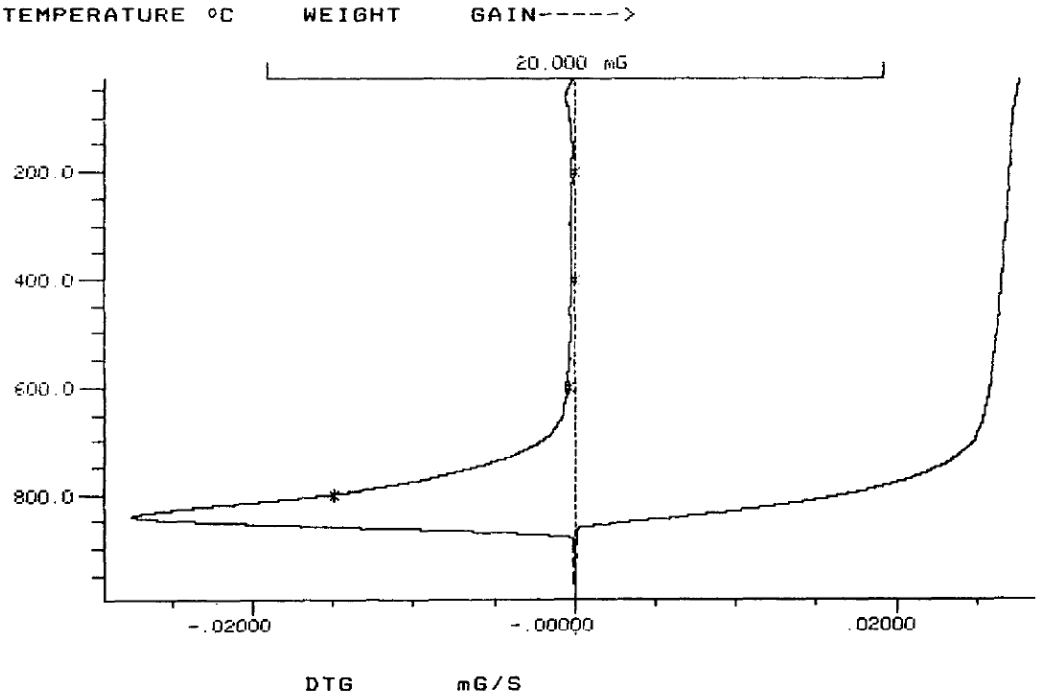


Σχήμα 35: Η μορφή της καμπύλης TG (Földvári, 2011).

Η ταυτόχρονη διεξαγωγή των δύο προαναφερθέντων τεχνικών, δηλαδή η DTA/TG, δίνει ως αποτέλεσμα ένα διάγραμμα, όπως αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 36 και στο Σχήμα 37.



Σχήμα 36: Καμπύλη DTA/TG ενός κεραμικού (Moropoulou et al., 1995b).

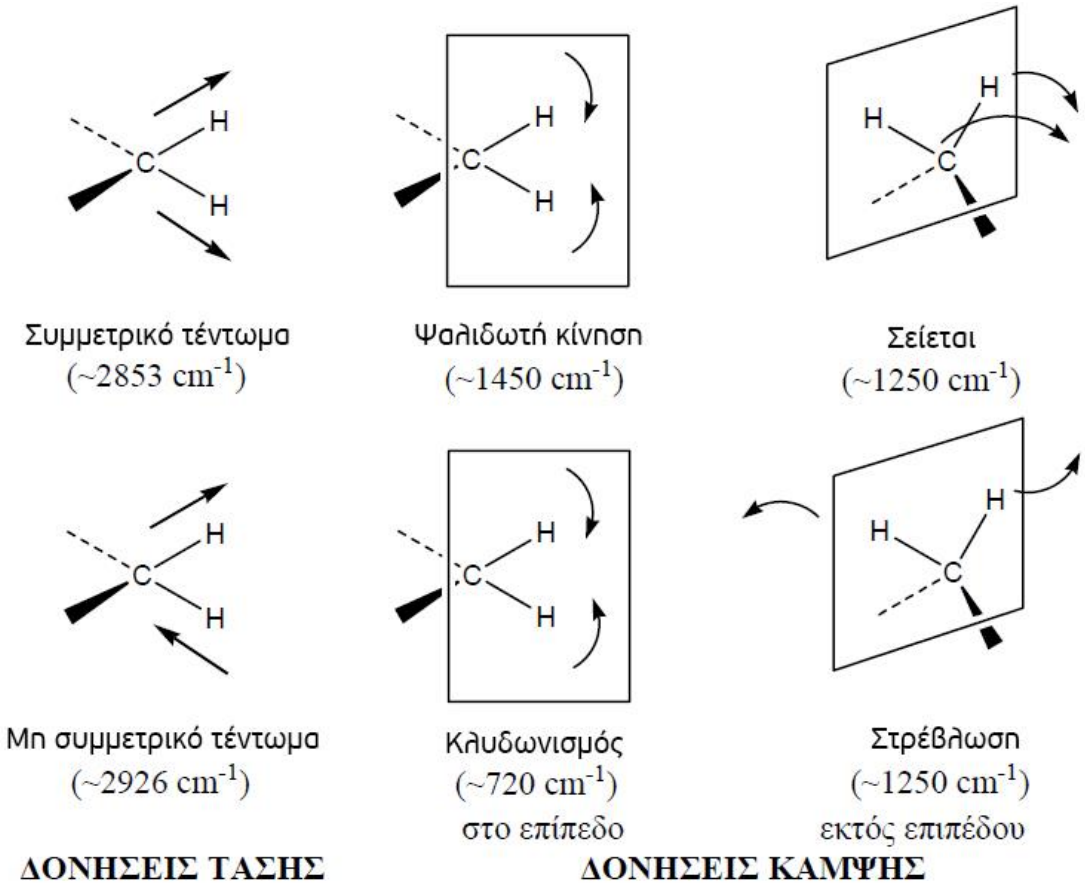


Σχήμα 37: Καμπύλη DTA/TG ενός ασβεστιτικού κονιάματος (Moropoulou et al., 1995a).

3.2.4. ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ FOURIER (FTIR)

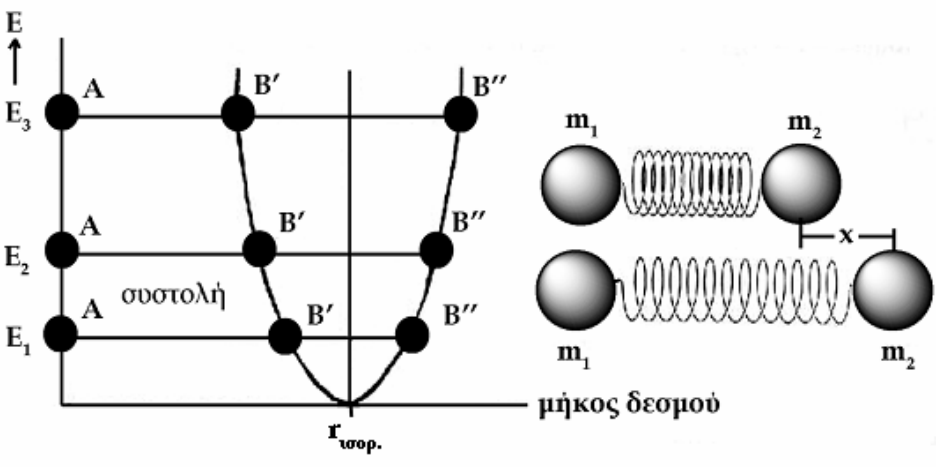
Η υπέρυθρη φασματοσκοπία (Infrared Spectroscopy – IR Spectroscopy) θεωρείται σημαντική φασματοσκοπική τεχνική, λόγω της ευκολίας λήψης φασμάτων και της σύγκρισής τους με φάσματα γνωστών οργανικών ενώσεων. Χρησιμοποιείται ευρύτατα κατά τη σύνθεση χημικών ενώσεων και για την πιστοποίηση της καθαρότητάς τους.

Στην περιοχή υπέρυθρου του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Infrared – IR – Σχήμα 10) συμβαίνουν απορροφήσεις που οφείλονται σε δονήσεις ή κάμψεις των δεσμών των μορίων, για ενώσεις με μόνιμη διπολική ροπή, που μεταβάλλεται κατά την παραμόρφωση του μορίου και απορροφούν ισχυρά στην περιοχή υπέρυθρου (Σχήμα 38). Ειδικότερα, στις δονήσεις μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ δύο συνδεδεμένων ατόμων, αλλά όχι η γωνία του δεσμού, ενώ αντίθετα, στις κάμψεις, αλλάζει η γωνία μεταξύ των ατόμων. Γενικότερα, οι δονήσεις απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια από τις κάμψεις. Εκτός από τις δονήσεις και τις κάμψεις υπάρχουν και άλλα είδη παραμόρφωσης της δομής των μορίων, όπως όταν αυτό σείεται (wagging), κλυδωνίζεται (rocking), στρεβλώνεται (twisting), ή έχει ψαλιδωτή κίνηση (scissoring) κ.ά..



Σχήμα 38: Οι δονήσεις τάσης και κάμψης των μοριακών δομών και οι περιοχές απορρόφησης στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος IR (Βαλαβανίδης, 2006).

Εάν μελετηθεί ένα σταθερό διατομικό μόριο, θα παρατηρηθούν ελκτικές και απωστικές δυνάμεις μεταξύ των ηλεκτρονικών τροχιών και των πρωτονίων του πυρήνα που δημιουργούν μια κατάσταση ισορροπίας. Η ισορροπία αυτή, με την ενέργεια του μορίου στην κατώτερη ή θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη, έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση του μήκους του δεσμού μεταξύ των ατόμων. Κάθε λοιπόν προσπάθεια μεταβολής του μήκους του δεσμού θα απαιτήσει απορρόφηση ενέργειας από το περιβάλλον. Η κατάσταση του μορίου κατά την έκταση, συστολή ή ισορροπία σε σχέση με το μήκος του δεσμού και της δυναμικής του ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 39.



Σχήμα 39: Δυναμική ενέργεια του μορίου κατά τη διαστολή ή συστολή σε σχέση με την κατάσταση ισορροπίας, $r_{ισορ}$ (Βαλαβανίδης, 2006).

Στην κατώτερη ή θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη, όπου το μόριο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, το μήκος του δεσμού είναι $r_{ισορ}$. Εάν το μόριο δονείται το μήκος του δεσμού θα μεταβάλλεται, όπως σε ένα ελατήριο με αρμονική κίνηση. Η δύναμη που αναπτύσσεται και τείνει να επαναφέρει το ελατήριο στη θέση του δίνεται από το νόμο του Hooke:

$$F = -f(r-r_{ισορ})$$

όπου f είναι σταθερά της δύναμης επαναφοράς και r η απόσταση των ατόμων.

Η ενέργεια του μορίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 39, είναι μια παραβολική καμπύλη που δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \frac{1}{2} f(r - r_{ισορ})^2$$

Εάν το μόριο δονείται αρμονικά (με ίσες περιοδικές εκτάσεις και συστολές του μήκους του δεσμού), κάτι που δε συμβαίνει με τα πραγματικά μόρια, τότε πρόκειται για ένα πρότυπο απλού αρμονικού ταλαντωτή, που χρησιμεύει στη μελέτη των φασμάτων δόνησης (ή ταλάντωσης) στην περιοχή του υπέρυθρου.

Η εφαρμογή του προτύπου του αρμονικού ταλαντωτή στο διατομικό μόριο μπορεί να δώσει τη συχνότητα ταλάντωσης $\nu_{ταλ}$ μέσω της εξίσωσης:

$$\nu_{ταλ} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{f}{\mu}}$$

όπου f είναι η σταθερά της δύναμης επαναφοράς στη θέση ισορροπίας και μ είναι η μάζα αναγωγής. Για ένα διατομικό μόριο με άτομα μάζας m_1 και m_2 ισχύει ότι:

$$\mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

Μετατρέποντας τη συχνότητα σε κυματαριθμούς μέσω της σχέσης $\omega_{ταλ} = \frac{\nu_{ταλ}}{c}$ (όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός), προκύπτει η εξίσωση:

$$\omega_{ταλ} = \frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{f}{\mu}}$$

Η σχέση αυτή είναι έχει πρακτική σημασία στη φασματοσκοπία IR. Στο Σχήμα 39 φαίνεται ότι το άτομο Α παραμένει ακίνητο, ενώ το Β μετακινείται, είτε αριστερά (Β΄ – συστολή), είτε δεξιά (Β΄΄ – έκταση). Για τις ενεργειακές στάθμες E_1 και E_2 υπάρχουν διαφορές στο βαθμό συστολής ή διαστολής, αλλά η συχνότητα ταλάντωσης δεν μεταβάλλεται. Η συχνότητα ταλάντωσης ενός τέλειο ελαστικού δεσμού εξαρτάται από τη μάζα του συστήματος και τη σταθερά της δύναμης επαναφοράς, αλλά είναι ανεξάρτητη της ποσοτικής παραμόρφωσης του μορίου.

Ο υπολογισμός της ολικής ενέργειας ενός απλού αρμονικού ταλαντωτή (χωρίς τριβές και ενδοατομικές επιδράσεις που επιφέρουν απώλεια ενέργειας) γίνεται αρκετά εύκολα. Εάν το σύστημα κινείται συγχρόνως τότε η ολική ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας. Στην περίπτωση του αρμονικού ταλαντωτή, η κινητική ενέργεια είναι μηδενισμένη κατά τη χρονική στιγμή της απομάκρυνσης, $r - r_{ισορ} = \Delta r$ και η ολική ενέργεια είναι μόνο η δυναμική. Η ενέργεια αυτή, όπως και όλες οι μορφές μοριακής

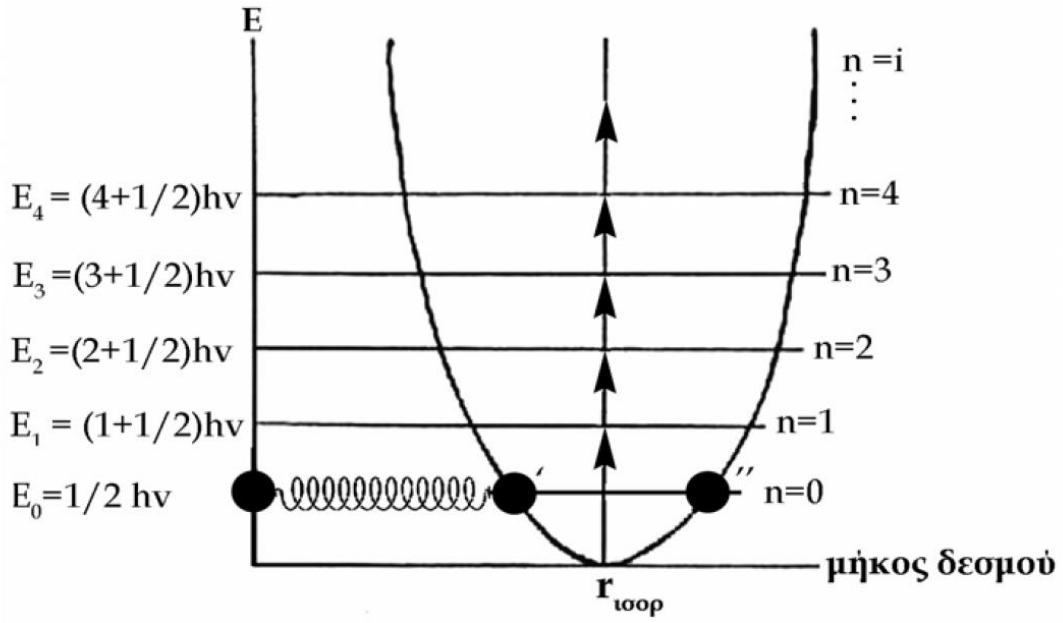
ενέργειας, είναι κβαντωμένη και για κάθε σύστημα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση Schrödinger. Για την ενέργεια του απλού αρμονικού ταλαντωτή η κβαντομηχανική δίνει την εξίσωση:

$$E = \left(n + \frac{1}{2}\right) h \cdot \nu_{\tau\alpha\lambda}$$

όπου n = 0, 1, 2,... (ακέραιος θετικός αριθμός) και καλείται δονητικός κβαντικός αριθμός, h είναι η σταθερά του Planck και $\nu_{ταλ}$ είναι η συχνότητα σε cps. Για την κατώτερη ή θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη ταλάντωσης, n = 0, η ενέργεια του απλού αρμονικού ταλαντωτή καλείται ενέργεια μηδενικού σημείου.

Ακόμη και στην περίπτωση της ενέργειας μηδενικού σημείου, παραμένει ένα ποσό ενέργειας $\frac{1}{2} h \cdot \nu_{\tau\alpha\lambda}$, δηλαδή το μόριο δεν είναι τελείως ακίνητο, αλλά δονείται ελαφρά. Η περίπτωση αυτή δεν καλύπτεται από την κλασική μηχανική.

Εάν, τώρα, το μόριο από το κατώτερο επίπεδο απορροφήσει μια ποσότητα ενέργειας (ακτινοβολία) hν΄, όπου ν΄ = 2ν, θα πρέπει να διεγερθεί και να πάει στο ενεργειακό επίπεδο E_2. Ωστόσο, σύμφωνα με την κβαντομηχανική υπάρχουν μόνο ορισμένες επιτρεπόμενες μεταβάσεις μεταξύ των διαφόρων ενεργειακών επιπέδων (στάθμες) για έναν αρμονικό ταλαντωτή, δηλαδή μόνο για $\Delta E = E_{n+1} - E_n = h\nu$. Άρα, η μετάβαση από το E_o στο E_2 είναι απαγορευμένη, ενώ οι μεταβάσεις από το E_o στο E_1 και από το E_1 στο E_2 είναι επιτρεπτές. Η αρχή αυτή της κβαντομηχανικής καλείται κανόνας επιλογής.



Σχήμα 40: Επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες και μεταβάσεις σε διατομικό μόριο που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση (Βαλαβανίδης, 2006).

Εάν οι δονήσεις του διατομικού μορίου περιλαμβάνουν αλλαγές στη διπολική ροπή του, τότε το μόριο αλληλεπιδρά με την υπέρυθρη περιοχή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ανάλογα με τη μετάβαση προκαλεί απορρόφηση ή εκπομπή ενέργειας, που μπορεί να καταγραφεί με ένα φασματοφωτόμετρο.

Σε έναν απλό αρμονικό ταλαντωτή η διαφορά ενέργειας μεταξύ των ενεργειακών σταθμών είναι ίδια, αφού βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (Σχήμα 40). Κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε μεγάλη σύγχυση στα φάσματα IR, ωστόσο τα μόρια στην πραγματικότητα δεν συμπεριφέρονται κατά αυτόν τον τρόπο, δηλαδή δεν είναι ενωμένα με ένα ιδανικό ελατήριο, χωρίς τριβές και εκτελώντας αρμονική κίνηση.

Στα πραγματικά μόρια η δόνηση δεν είναι αρμονική, λόγω της ανελαστικότητας των δομών τους. Έτσι, μόνο ένα μέρος των διαστολών και συστολών των δεσμών είναι ιδανικό (περίπου 10%), ενώ για μεσαίες ή μεγάλες διαστολές ή συστολές η δόνηση του μορίου είναι δυσαρμονική. Η ενέργεια στον μη αρμονικό ταλαντωτή δεν είναι μια απλή συμμετρική παραβολική καμπύλη (όπως στο Σχήμα 39), αλλά όπως στο Σχήμα 41, συμπίπτοντας μόνο σε μια

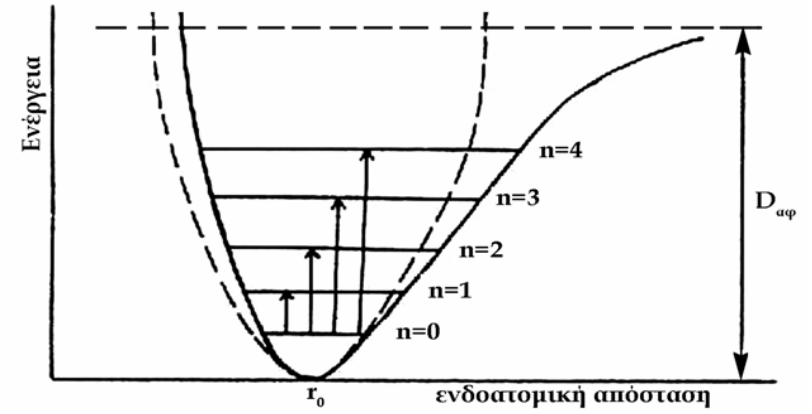
μικρή περιοχή γύρω από τη θέση ισορροπίας (Βαλαβανίδης, 2006). Η εμπειρική μαθηματική εξίσωση για μια τέτοια καμπύλη γραμμή είναι:

$$E = D_{\alpha\varphi}[1 - e^{a(r_{\iota\sigma o\rho} - r)}]^2$$

όπου α είναι μια σταθερά για τα διάφορα είδη διατομικών μορίων και $D_{\alpha\varphi}$ είναι η ενέργεια αφεταιρισμού ή διάστασης, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση του δεσμού. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, οι ενεργειακές στάθμες ταλάντωσης (ή δόνησης) παίρνουν τη μορφή:

$$E_n = h\cdot\nu_{\tau\alpha\lambda}\left[\left(n+\frac{1}{2}\right) - X_e\left(n+\frac{1}{2}\right)^2\right] \text{ ή } E_n = h\cdot\omega_{\tau\alpha\lambda}c\left[\left(n+\frac{1}{2}\right) - X_e\left(n+\frac{1}{2}\right)^2\right]$$

όπου n = 0, 1, 2, ..., X_e είναι η σταθερά της μη αρμονικής κίνησης και $\omega_{\tau\alpha\lambda}$ είναι η συχνότητα ταλάντωσης σε κυματαριθμούς. Η εξίσωση αυτή διαφέρει από αυτή του απλού αρμονικού ταλαντωτή με την προσθήκη του παράγοντα $h\cdot\omega_{\tau\alpha\lambda}cX_e\left(n+\frac{1}{2}\right)^2$, που δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ των ενεργειακών σταθμών μειώνεται σταθερά καθώς αυξάνεται ο n.



Σχήμα 41: Ενεργειακές στάθμες για έναν μη αρμονικό ταλαντωτή (Βαλαβανίδης, 2006).

Οι κανόνες επιλογής για τον μη αρμονικό ταλαντωτή είναι Δn = ±1, ±2, ±3, ..., που σημαίνει ότι τα n = ±1 είναι τα ίδια με τον αρμονικό ταλαντωτή, ενώ τα n = ±2, n = ±3 κ.λπ., επιτρέπουν μεγαλύτερα άλματα προς τα επάνω ή προς τα κάτω στις άλλες ενεργειακές στάθμες που διαφέρουν κατά 2 ή 3 κβαντικά επίπεδα ενέργειας. Οι πιθανότητες τέτοιων αλμάτων προβλέπονται από τη

θεωρία και παρατηρούνται στα φάσματα IR, αλλά η πιθανότητα τους μειώνεται για ανώτερες ενεργειακές στάθμες και μόνο τα n = ±1, ±2 και ±3 έχουν αρκετά ισχυρή ένταση φασματικών γραμμών.

Με την κατανομή Boltzmann, ο πληθυσμός των μορίων με n = 1 στο ενεργειακό επίπεδο E_1 είναι μόνο 1% του πληθυσμού της θεμελιώδους ή κατώτερης κατάστασης (n = 0) και μειώνεται σημαντικά καθώς ανέρχεται σε άλλα ενεργειακά επίπεδα. Αγνοούνται λοιπόν όλες οι άλλες ενεργειακές μεταπτώσεις και γίνεται εστίαση σε εκείνες από την κατώτερη στάθμη προς τις ανώτερες. Η φασματική γραμμή για το ενεργειακό άλμα από n = 0 σε n = 1 έχει σημαντική ένταση και καλείται θεμελιώδης απορρόφηση, ενώ από n = 0 σε n = 2 και από n = 0 σε n = 3 έχουν πολύ μικρότερη ένταση και καλούνται πρώτη και δεύτερη υπερτονική, αντίστοιχα. Το φάσμα IR του HCl, για παράδειγμα, παρουσιάζει μια ισχυρή απορρόφηση στα 2886cm^{-1}, μία ασθενέστερη στα 5668cm^{-1} και μία πολύ ασθενή στα 8347cm^{-1} (Βαλαβανίδης, 2006).

Η φασματοσκοπία IR χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή 4000 – 650 cm^{-1}, ωστόσο αρκετά χρήσιμες πληροφορίες για τη δομή πολλών οργανικών ενώσεων μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην περιοχή 400 – 10 cm^{-1}, που καλείται άπω υπέρυθρη. Η άπω υπέρυθρη περιοχή είναι η περιοχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπου απορροφούν το δευτέριο, το τρίτιο, οι παραμορφώσεις του σκελετού οργανικών ενώσεων, οι δονήσεις στρέβλωσης του κορμού διαφόρων οργανικών ενώσεων, οι δονήσεις διαφόρων μοριακών δομών, οι δεσμοί υδρογόνου (200 – 50 cm^{-1}) κ.λπ.

Στην περιοχή, όμως, αυτή η ευαισθησία του φασματοφωτομέτρου IR είναι περιορισμένη και οι εντάσεις των απορροφήσεων πολύ μικρές, με αποτέλεσμα ο «θόρυβος» να σκεπάζει τις ταινίες απορρόφησης. Η αδυναμία των κοινών φασματοφωτομέτρων IR περνικήθηκε με τη Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier (Fourier Transform IR Spectroscopy – FTIR).

Η Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier είναι μια αναλυτική τεχνική ελέγχου, δηλαδή απαιτεί δειγματοληψία (καταστρεπτική τεχνική). Παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, το κυριότερο εκ των οποίων είναι ότι αποτελεί μια

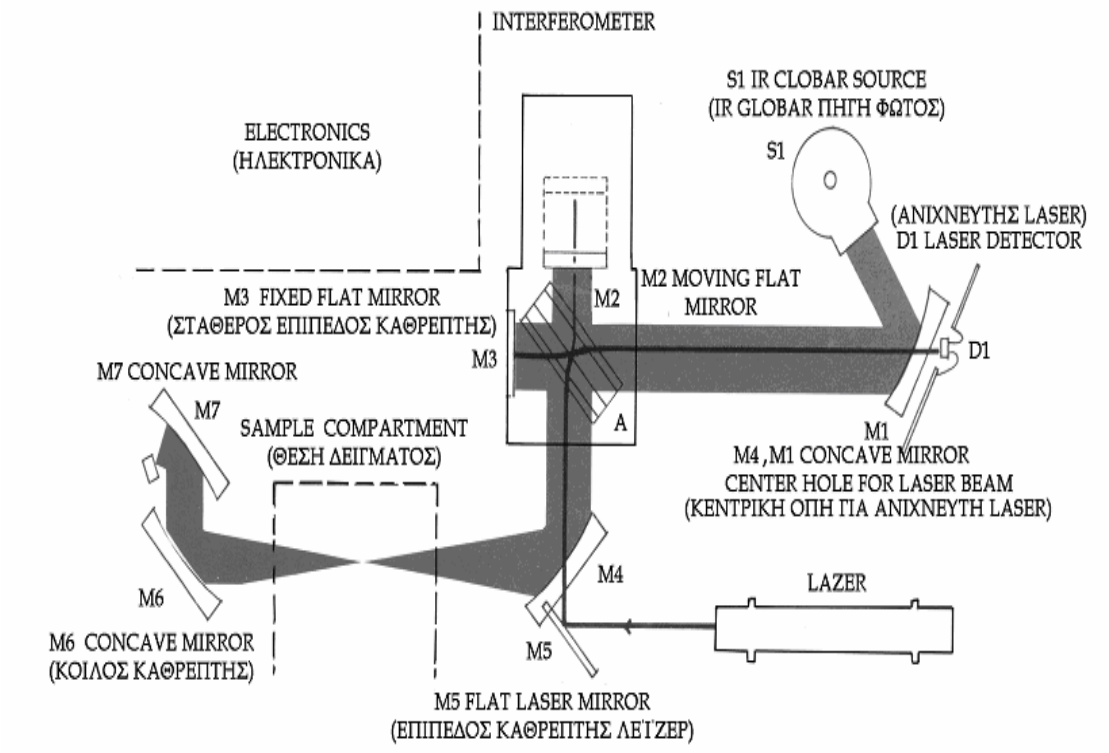
πολύ γρήγορη τεχνική. Αναλυτικότερα, η χρήση των υπολογιστών στην φασματοσκοπία FTIR προσφέρει τη δυνατότητα ταχείας λήψης πολλαπλών φασμάτων, υπολογισμού του μέσου όρου τους, επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων, γεγονός που οδηγεί στην μέτρηση φασμάτων υψηλής ποιότητας. Είναι δυνατή επίσης η αφαίρεση φασμάτων (difference spectroscopy) και επομένως η ακριβής ανίχνευση πολύ μικρών μεταβολών, που οφείλονται τόσο στην μεταβαλλόμενη σύσταση, όσο και στην φυσική κατάσταση του δείγματος. Επιπλέον, είναι δυνατή η μελέτη μοριακών αλλαγών και αλληλεπιδράσεων. Για παράδειγμα, δεσμοί υδρογόνου και ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις προκαλούν συνήθως είτε μετατοπίσεις στην συχνότητα απορρόφησης, είτε αλλαγή στο συντελεστή μοριακής απορρόφησης. Και οι δύο αυτές φασματικές διαφορές μπορούν να μελετηθούν λεπτομερώς με την τεχνική των φασμάτων διαφοράς. Τέλος, η ύπαρξη βάσης δεδομένων με γνωστά φάσματα υπέρυθρου παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης του φάσματος ενός μείγματος συστατικών σε αυτά των επί μέρους συστατικών και επομένως τη δυνατότητα ποσοτικής ανάλυσης του μείγματος.

Εκτός όμως από τα πολλά πλεονεκτήματα, η τεχνική παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η μεγάλη ευαισθησία που χαρακτηρίζει την φασματοσκοπία FTIR μετατρέπεται σε μειονέκτημα στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα του φωτόμετρου δεν έχει πλήρως εκκενωθεί ή αντικατασταθεί με άζωτο. Τότε, το φάσμα IR παρουσιάζει έντονες απορροφήσεις που οφείλονται στο H_2O και το CO_2 του χώρου του φωτόμετρου. Το σοβαρότερο, όμως, μειονέκτημα της φασματοσκοπίας FTIR, είναι η απαιτούμενη ακριβής ρύθμιση των οπτικών του οργάνου, κυρίως του συμβολομέτρου Michelson. Σε αντίθεση με τα συμβατικά φασματοφωτόμετρα, που δίνουν μεν κακής ποιότητας, αλλά χρησιμοποιήσιμα φάσματα όταν δεν είναι καλώς ρυθμισμένα, τα φωτόμετρα FTIR δεν παρέχουν καμία πληροφορία όταν δεν έχουν καλή ρύθμιση (Βερνάρδου, 2011β).

Η ανάλυση κατά Fourier ή μετασχηματισμός Fourier είναι η ανάλυση μιας μαθηματικής συνάρτησης ή μιας πειραματικά λαμβανομένης καμπύλης με τη μορφή μιας τριγωνομετρικής σειράς. Χρησιμοποιείται ως τεχνική

προσδιορισμού των αρμονικών συστατικών ενός πολύπλοκου περιοδικού κύματος.

Η τεχνική βασίζεται στην καταγραφή του φάσματος με συμβολομετρικές μετρήσεις, που υπερτερούν των κοινών μηχανισμών σάρωσης του φάσματος. Η διάταξη του μηχανισμού στο φασματοφωτόμετρο για τη διεργασία Fourier φαίνεται στο Σχήμα 42.



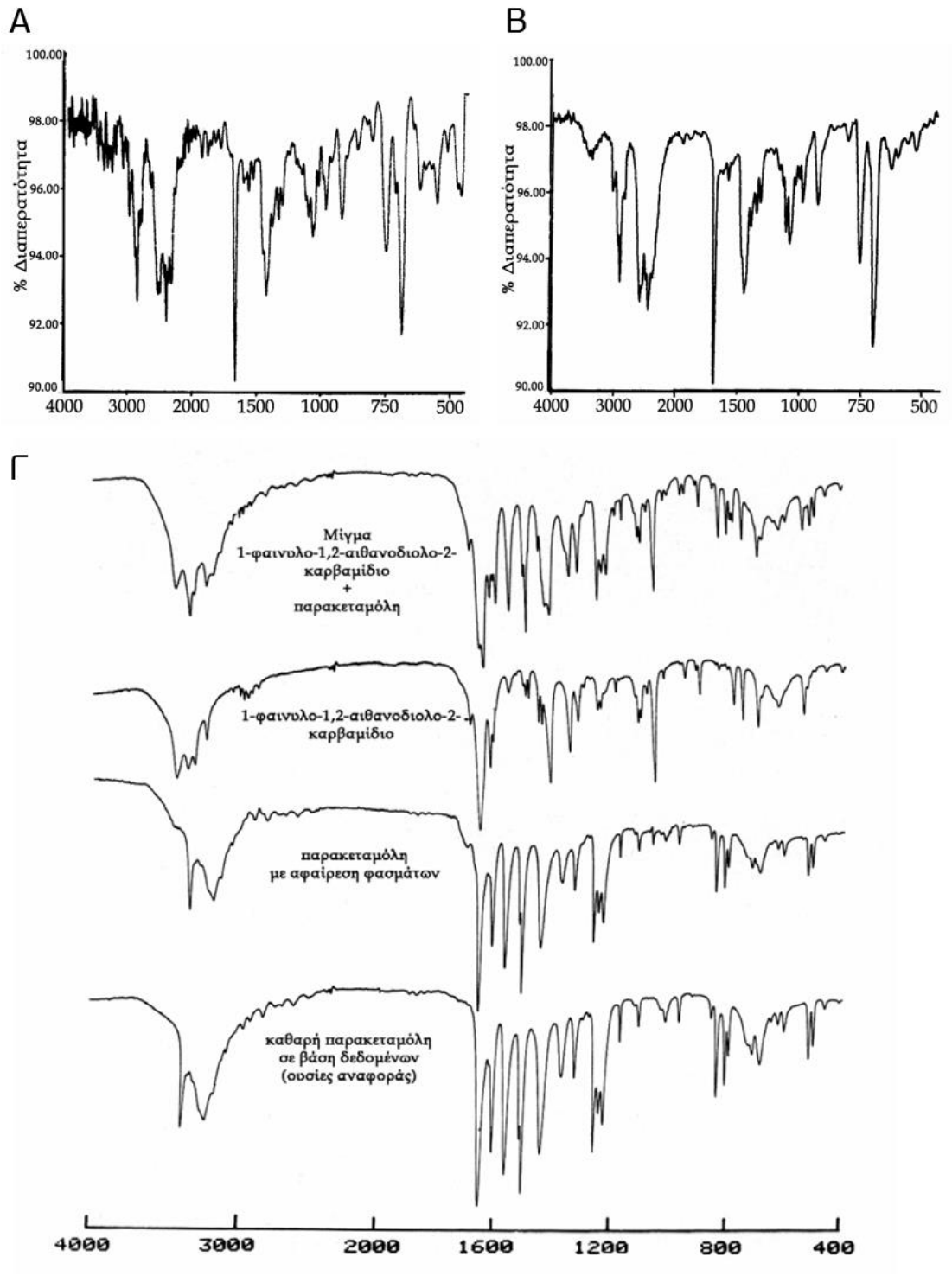
Σχήμα 42: Απεικόνηση ενός τυπικού φασματοφωτομέτρου FTIR και διάταξη των πηγών, των καθρεπτών και του ανιχνευτή (Βαλαβανίδης, 2006).

Το συμβολόμετρο είναι μια πλάκα Α, κατασκευασμένη από ημιδιαφανές υλικό, συνήθως KBr, που δεν απορροφά την IR και κατεργασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλά το 50% της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω της. Η πλάκα Α διαιρεί την ακτινοβολία σε δύο ίσα μέρη και στέλνει το ½ στον καθρέπτη M_1 και το άλλο ½ στον καθρέπτη M_2. Οι δύο δέσμες ανακλώνται στους καθρέπτες και γυρνούν στην πλάκα – διαχωριστή της δέσμης του φωτός, όπου συνενώνονται πάλι σε μια δέσμη φωτός με κατεύθυνση το δείγμα της ουσίας και μετά στον ανιχνευτή.

Η μονοχρωματική δέσμη φωτός που εκπέμπεται από την πηγή και συνενώνεται στην πλάκα Α υπόκειται σε θετική ή αρνητική συμβολή, ανάλογα με τις αποστάσεις του από τους καθρέπτες M_1 και M_2. Εάν οι αποστάσεις αυτές είναι ίσες ή διαφέρουν κατά πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (ολόκληροι ή ακέραιοι αριθμοί) της μονοχρωματικής δέσμης, τότε δημιουργείται θετική συμβολή που δίνει μια δέσμη φωτός μεγάλης έντασης. Εάν όμως οι αποστάσεις της Α από τους M_1 και M_2 είναι μισοί ολόκληροι αριθμοί (½ κ.λπ.) του μήκους κύματος, τότε οι δέσμες φωτός ανακλώνται στους καθρέπτες, επανέρχονται στην Α και εξουδετερώνονται.

Στη μονάδα συμβολομέτρου, ο καθρέπτης M_2 κινείται αργά προς την πλάκα Α ή απομακρύνεται από αυτή. Με τον τρόπο αυτό ο ανιχνευτής δέχεται ακτινοβολία εναλλασσόμενης έντασης, λόγω του φαινομένου της συμβολής. Η πηγή μπορεί να εκπέμπει μια σειρά από μονοχρωματικές ακτινοβολίες (v_1, v_2 κ.λπ.), που θα δημιουργήσουν στον ανιχνευτή ένα περίπλοκο μίγμα ακτινοβολιών με εναλλασσόμενες εντάσεις. Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier, τα κενά αυτά μετατρέπονται στο κανονικό φάσμα IR. Συνήθως η καταγραφή των σημάτων στον ανιχνευτή γίνεται κάθε 0,001sec και κάθε πληροφορία συσσωρεύεται σε ένα από τα 1000 σημεία του προγραμματισμένου φάσματος. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες (εντάσεις απορροφήσεων σε διάφορες συχνότητες), εκτελεί τους μετασχηματισμούς Fourier σε ελάχιστα δευτερόλεπτα και παρουσιάζει κανονικό φάσμα, που έχει αναλυθεί σε 1000 σημεία, έτοιμο για καταγραφή στο βαθμολογημένο φασματογραφικό χαρτί (Σχήμα 43).

Η όλη διαδικασία γίνεται σε 1 – 2 sec, και μετά από 20 – 100 σαρώσεις του φάσματος, ο «θόρυβος» μειώνεται σημαντικά ενώ οι εντάσεις των απορροφήσεων βελτιώνονται σε σημαντικό βαθμό. Η ικανότητα διαχωρισμού των φασματικών γραμμών για το FTIR στην περιοχή 4000 – 400 cm^{-1} είναι περίπου 4cm^{-1}. Η ικανότητα αυτή μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση των σημείων συγκέντρωσης πληροφοριών για το φάσμα και την απόσταση κίνησης του M_2 (Βαλαβανίδης, 2006).



Σχήμα 43: Αποτελέσματα FTIR φασματοσκοπίας. **Α.** Φάσμα υδροχλωρικής μεθαδόνης με μία σάρωση. **Β.** Σάρωση της ίδιας ουσίας 32 φορές (FTIR) με αντίστοιχη μείωση του θορύβου. **Γ.** Παράδειγμα φασμάτων FTIR μίγματος δύο ουσιών (παρακεταμόλης και 1–φαινυλο–1,2–αιθανοδιολο–2–καρμαμίδιο), αφαίρεση φασμάτων και σύγκριση φάσματος (παρακεταμόλης) με φάσμα αναφοράς (Βαλαβανίδης, 2006).

Η ερμηνεία φασμάτων IR δεν είναι εύκολη εργασία, αλλά απαιτεί πρακτική εξάσκηση. Απαιτείται μεγάλη εμπειρία και πειραματισμός, για την επεξήγηση των διαφόρων ταινιών απορρόφησης, ακόμη και απλών οργανικών ενώσεων. Επίσης, υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφίας και πινάκων για τις βασικές απορροφήσεις των σπουδαιότερων οργανικών ενώσεων. Για την ερμηνεία των φασμάτων IR πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω σημεία (Βαλαβανίδης, 2006):

- Οι απορροφήσεις χαρακτηριστικών ή δραστικών ομάδων, εμφανίζονται συνήθως στην περιοχή 4000 – 1500 cm^{-1}.
- Οι απορροφήσεις σκελετού εμφανίζονται στην περιοχή κάτω των 1500cm^{-1} (περιοχή δακτυλικών αποτυπωμάτων), αλλά η ακριβής εκτίμησή τους είναι πιο δύσκολη.
- Οι χαρακτηριστικές ομάδες δίνουν μία ή περισσότερες απορροφήσεις, που εξαρτώνται από τη φύση και τη θέση τους στο μόριο.
- Πολλές χαρακτηριστικές ομάδες δίνουν ασθενείς απορροφήσεις που είναι δύσκολο να διακριθούν.
- Σύγκριση των φασμάτων αγνώστων ενώσεων (με ορισμένες ενδείξεις ως προς τη δομή τους) με φάσματα γνωστών ενώσεων, μπορούν να δώσουν θετικά αποτελέσματα για την πιστοποίησή τους. Θεωρητικά, τα δύο φάσματα πρέπει να είναι παρόμοια.
- Οι πίνακες IR με τις χαρακτηριστικές απορροφήσεις (δραστικών ομάδων και σκελετού) οργανικών ενώσεων είναι συντεταγμένοι με τις γενικές εκτιμήσεις των περιοχών που απορροφούν από την επιστημονική βιβλιογραφία.
- Οι απορροφήσεις ταινιών ή γραμμών ή κορυφών διακρίνονται ανάλογα με την έντασή τους σε ισχυρές, μέτριες, ασθενείς και πλατιές. Η σύγκριση αυτή είναι ποιοτική και πρέπει να γίνεται κάτω από τις ίδιες συνθήκες συγκέντρωσης, χρόνου σάρωσης κ.λπ..

3.2.5. Προσδιορισμος Ολικων Διαλυτων Αλατων (SST) Και Δοκιμες Ποιοτικης Χημικης Ανιχνευσης (Spot Tests)

Ο προσδιορισμός των ολικών διαλυτών αλάτων πραγματοποιείται εφαρμόζοντας το ιταλικό πρότυπο «Dosaggio dei sali solubili, Normal 13/83» (Normal 13/83, 1983). Αναλυτικότερα, λαμβάνει χώρα ζύγιση 100 ± 5 mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, στο οποίο προστίθενται 100mL απιονισμένου νερού. Για την παρασκευή των διαλυμάτων απαιτείται η χρήση απιονισμένου νερού υψηλής καθαρότητας. Τα διαλύματα τοποθετούνται αφήνονται για 24h, σε θερμοκρασία 20 – 21 °C και εν συνεχεία μετρείται η αγωγιμότητά τους, η οποία εκφράζεται σε μS (μSiemens). Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathrm{SST\%} = \frac{(\mathrm{C_{δείγματος}} - \mathrm{C_{H_2O}})\cdot 6{,}88}{\mathrm{m}}$$

όπου SST% (Ολικά Διαλυτά Άλατα – Total Soluble Salts) είναι η επί της εκατό περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικά διαλυτά άλατα, $C_{δείγματος}$ είναι η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος (σε μS), C_{H2O} είναι η αγωγιμότητα του απιονισμένου νερού που χρησιμοποιήθηκε (σε μS) και m είναι το βάρος του προς εξέταση δείγματος (σε mg).

Εν συνεχεία, πραγματοποιούνται δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων ιόντων (Cl^-) και θειικών ιόντων (SO_4^{-2}), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται τα υδατικά διαλύματα, βάσει των οποίων έγινε ο προσδιορισμός της αγωγιμότητας.

Για τον προσδιορισμό των χλωριούχων ιόντων κάθε δείγματος, μέρος του υδατικού διαλύματος τοποθετείται εντός δοκιμαστικού σωλήνα και προστίθεται μικρή ποσότητα (λίγες σταγόνες) νιτρικού αργύρου ($AgNO_3$) 0,1N. Παρουσία χλωριούχων ιόντων, σχηματίζεται χλωριούχος άργυρος (AgCl), ο οποίος

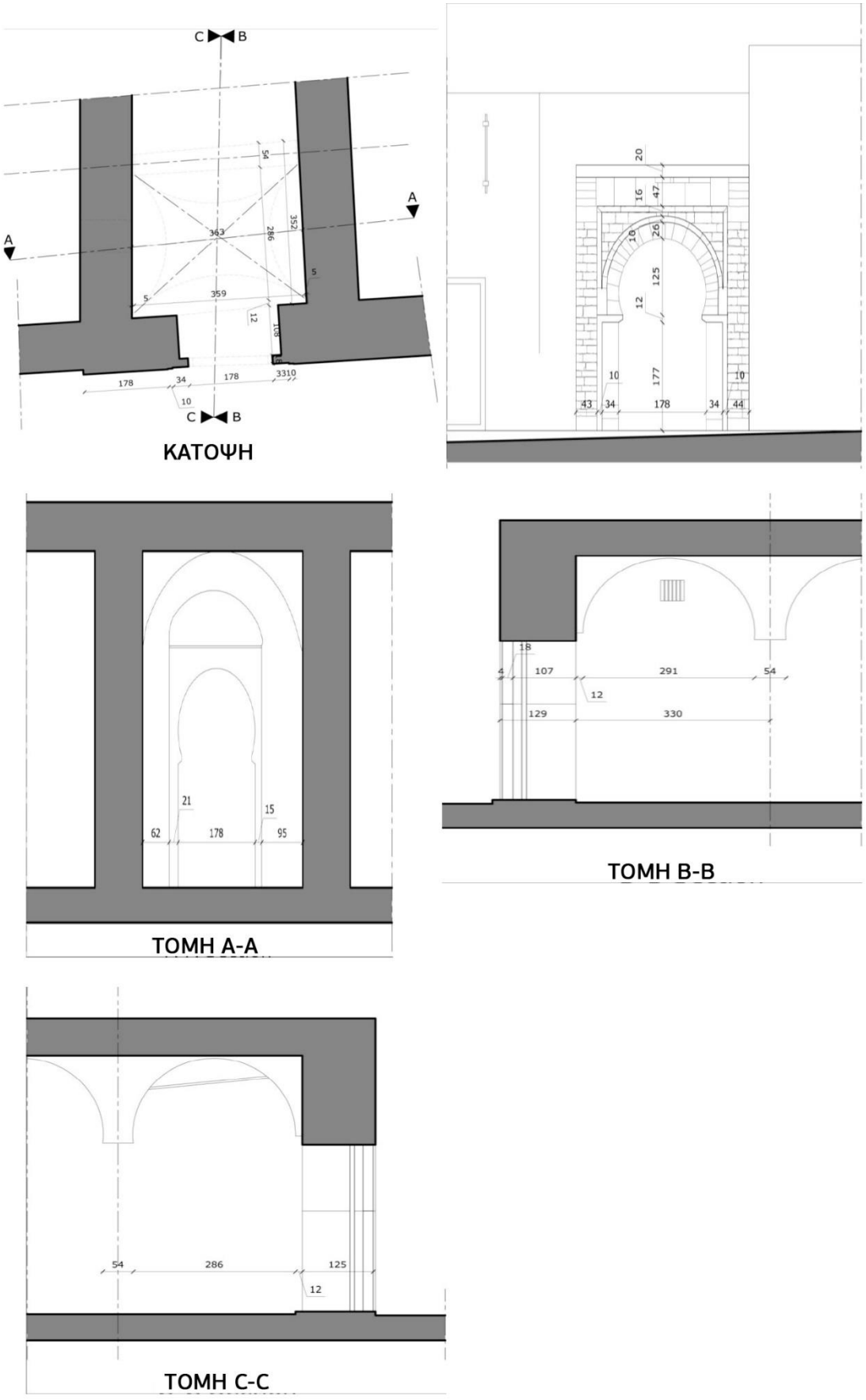
προκαλεί χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα στο διάλυμα. Η ποσότητα των περιεχομένων χλωριούχων ιόντων καθορίζει την ένταση του παρατηρούμενου θολώματος.

Για τον προσδιορισμό των θειικών ιόντων κάθε δείγματος, μέρος του υδατικού διαλύματος τοποθετείται εντός δοκιμαστικού σωλήνα και προστίθεται μικρή ποσότητα (λίγες σταγόνες) χλωριούχου βαρίου ($BaCl_2$) 0,4M. Παρουσία θειικών ιόντων, σχηματίζεται θειικό βάριο ($BaSO_4$), το οποίο προκαλεί χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα στο διάλυμα. Η ποσοτική παρουσία των θειικών ιόντων καθορίζει την ένταση του θολώματος.

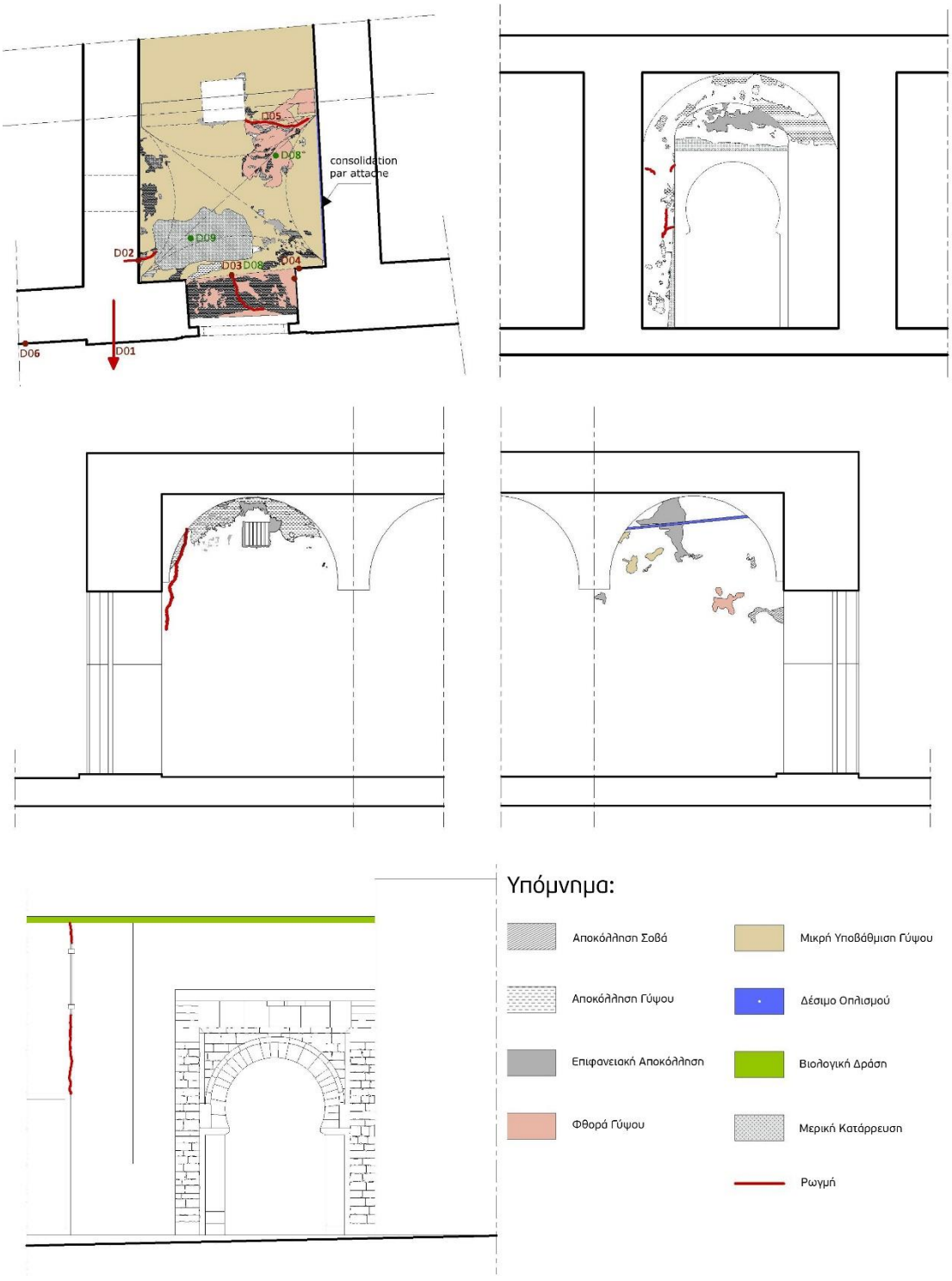
Ποιοτικά, η παρουσία των χλωριούχων ιόντων και των θειικών ιόντων μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, μικρή, πολύ μικρή ή ίχνη. Επισημαίνεται ότι μέτρο σύγκρισης για την πολύ μεγάλη παρουσία χλωριούχων ιόντων είναι το πόσιμο νερό.

3.3. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΜΝΗΜΕΙΟΥ

Η οπτική παρατήρηση της ιστορικής κατασκευής φανερώνει προχωρημένη φθορά στην πλευρά που βρίσκεται επί της οδού Kasbah Street. Το κτίριο αποτελεί μια παχιά λιθοδομή, η οποία περιλαμβάνει σημεία με παραδοσιακά τούβλα, κονιάματα και λευκό επίχρισμα από ασβέστη. Ο κατεστραμμένος θόλος έχει μερικώς καταρρεύσει και έχει σήμερα σταθεροποιηθεί με μια προσωρινή αντιστήριξη. Η γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου φαίνεται στο Σχήμα 44 και η χαρτογράφηση της φθοράς φαίνεται στο Σχήμα 45. Οι φθορές που εντοπίστηκαν ταξινομούνται σύμφωνα με τις κατατάξεις διαφόρων μορφών φθοράς της ICOMOS στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 12. Η θέση στην οποία βρίσκεται κάθε μία φαίνεται στο Σχήμα 46, και αναλύεται στη συνέχεια.



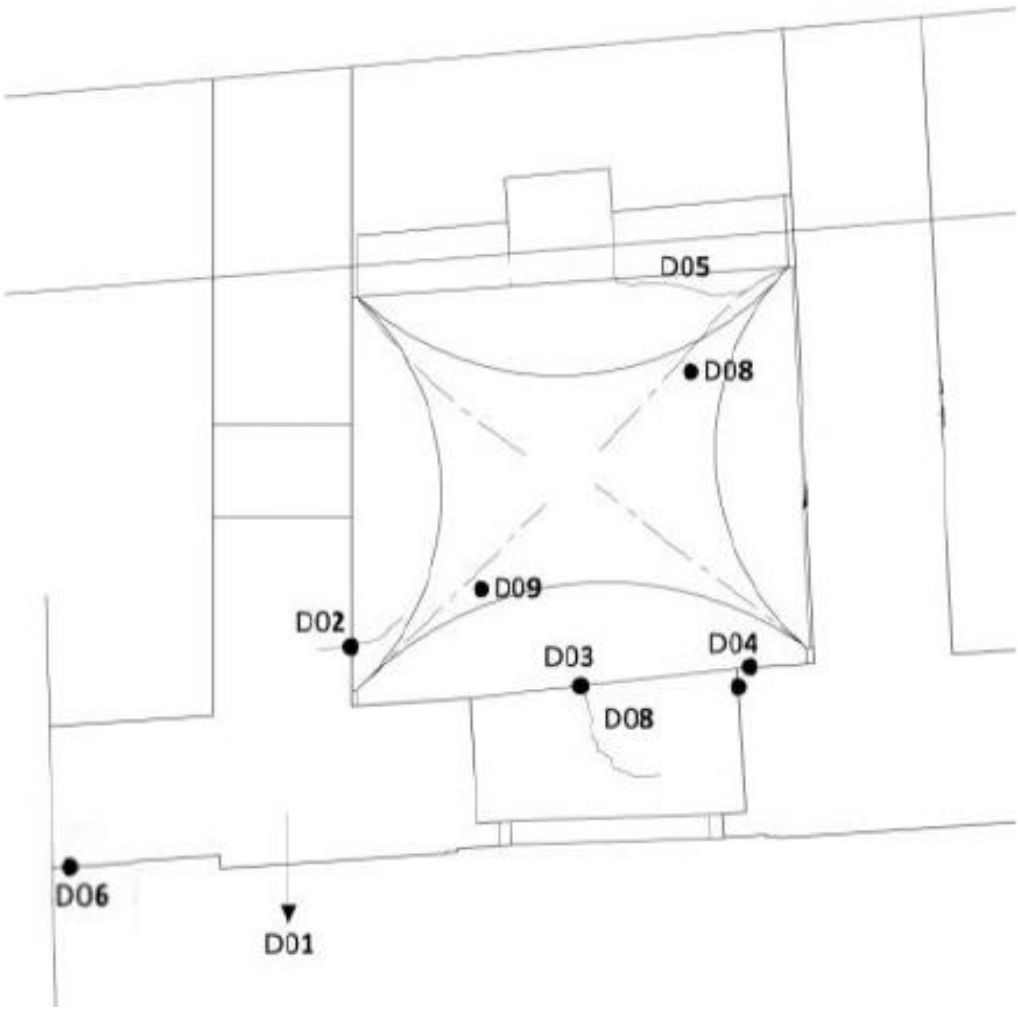
Σχήμα 44: Γεωμετρική τεκμηρίωση της ιστορικής κατασκευής (ASM, 2014).



Σχήμα 45: Χαρτογράφηση της φθοράς της ιστορικής κατασκευής. Όπως φαίνεται στο υπόμνημα, με διαφορετικό χρωματισμό αναπαρίσταται κάθε τύπος φθοράς (ASM, 2014).

Πίνακας 12: Περιοχές της ιστορικής κατασκευής στις οποίες παρατηρήθηκε φθορά, καθώς και το είδος αυτής. Η θέση κάθε μίας φαίνεται στο Σχήμα 46.

Κωδικός Περιοχής	*Είδος Παρατηρούμενης Φθοράς*
D01	Εκτός Επιπέδου Παραμόρφωση
D02	Ρωγμή
D03	Ρωγμή
D04	Ρωγμή
D05	Ρωγμή
D06	Ρωγμή
D07	Ρωγμή
D08	Φούσκωμα Επιχρίσματος
D09	Μερική Κατάρρευση
D010	Βιολογική Δράση



Σχήμα 46: Θέσεις της ιστορικής κατασκευής στις οποίες παρατηρήθηκε κάθε τύπος φθοράς που περιγράφεται στον Πίνακα 12 (ASM, 2014).

Περιοχή D01 (Εκτός Επιπέδου Παραμόρφωση)

Σε ένα από τα εξωτερικά τοιχώματα της καμάρας, μπορεί να παρατηρηθεί μια σημαντική παραμόρφωση (Εικόνα 8). Το πάχος της τοιχοποιίας υφίσταται προφανώς έναν διαχωρισμό των φύλλων του που οδηγεί στην κάμψη της εξωτερικής στρώσης, φαινόμενα που ενδέχεται να συμβούν σε τρίστρωτη τοιχοποιία με κακή σύνδεση ανάμεσα στις στρώσεις.

Πιθανή αιτία. Η καμάρα βρίσκεται στο άκρο μιας σειράς από καμάρες, που παράγουν μια ώθηση στην τελευταία καμάρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η πλευρική δύναμη που προκύπτει, δημιούργησε μια εκτός επιπέδου και εκτός της καμπυλότητας δύναμη, συμβάλλοντας έτσι στο να λυγίσει η τοιχοποιία. Στρώσεις της τοιχοποιίας με κακή σύνδεση, μπορεί να υποστούν μια εσωτερική ρηγμάτωση και έναν διαχωρισμό που ακολουθείται από κάμψη. Είναι επίσης εμφανής μια επιφανειακή πλήρωση με τσιμέντο του εσωτερικού. Η παρέμβαση αυτή έγινε περίπου δύο χρόνια πριν την παρούσα μελέτη. Επιπλέον, η σύνθεση του εδάφους (λασπώδες) και οι κραδασμοί που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της ανακατασκευής του γειτονικού κτιρίου συνέβαλαν σημαντικά στην παρατηρούμενη φθορά και παραμόρφωση. Αυτό συνέβη μόνο στη μία πλευρά της καμάρας, καθώς η άλλη ενοποιείται και εμποδίζεται η πλευρική ώθηση.



Εικόνα 8: Η περιοχή D01, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά (ASM, 2014).

Περιοχή D02 (Ρωγμή)

Μια δομική κάθετη ρωγμή είναι εμφανής κατά μήκος του εξωτερικού πυλώνα της καμάρας (Εικόνα 9). Η ρωγμή είναι βαθιά και πλατιά (έως 1,5cm). Η ηλικία της ρωγμής είναι λίγοι μήνες και είναι ενεργή, σύμφωνα με την επιτόπου έρευνα και τη σύγκριση με τις προηγούμενες καταγραφές.

Πιθανή αιτία: Η κάμψη της εξωτερικής στρώσης της τοιχοποιίας έχει προκαλέσει μια ρωγμή στο πλευρικό τοίχωμα. Η εκτός επιπέδου παραμόρφωση έχει οδηγήσει σε διαχωρισμό των δύο αυτών τμημάτων, γεγονός που σχηματίζει μια κάθετη ρωγμή στο ενδιάμεσο. Αυτό επιβεβαιώνεται επίσης από το γεγονός ότι η ρωγμή έχει συμβεί σε μία μόνο πλευρά της καμάρας, την παραμορφωμένη.

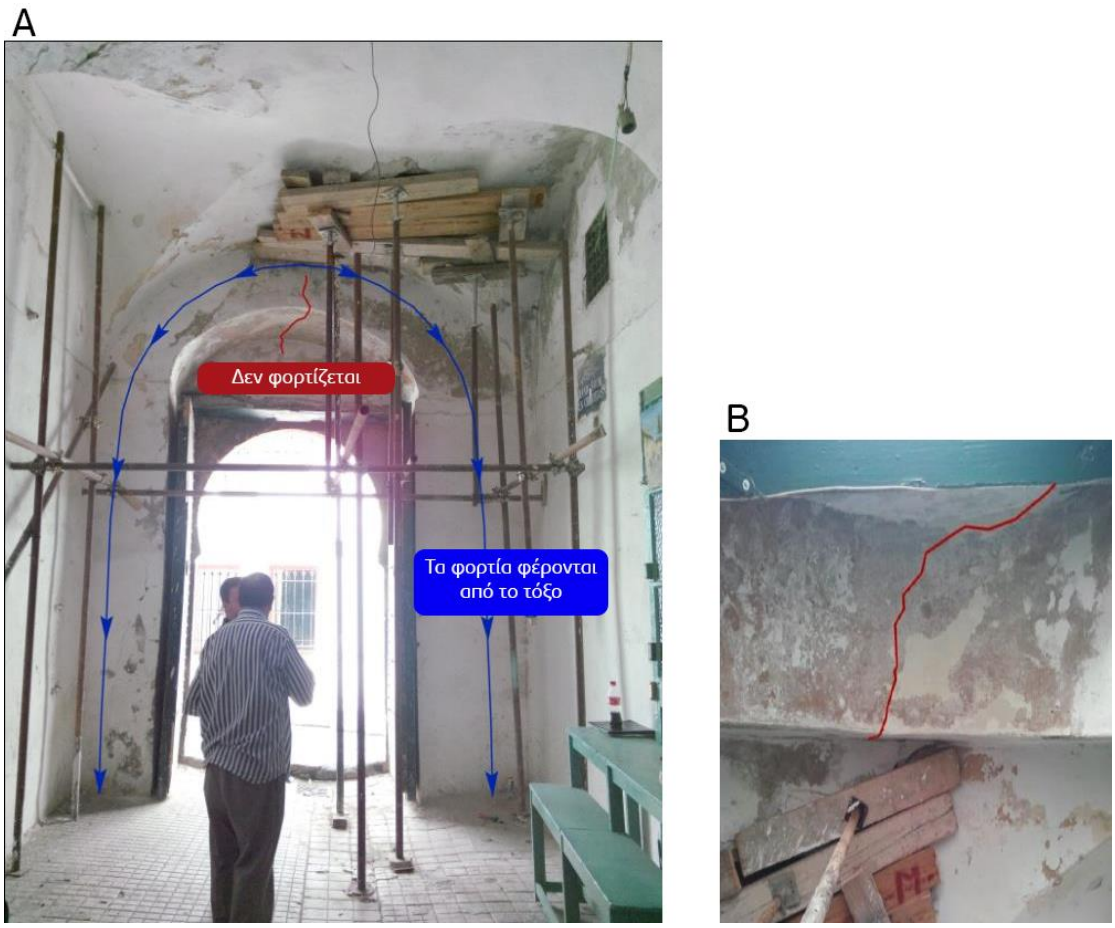


Εικόνα 9: Η περιοχή D02, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά (ASM, 2014).

Περιοχή D03 (Ρωγμή)

Πάνω από το τοξωτό άνοιγμα της όψης που βρίσκεται επί της οδού El Kasbah, μια κάθετη ρωγμή είναι εμφανής στο κέντρο του ανοίγματος και με κατεύθυνση προς τα πάνω (Εικόνα 10). Η ρωγμή δεν είναι πολύ μεγάλη, ούτε βαθιά.

Πιθανή αιτία: Η ρωγμή μπορεί να συνδεθεί με την ανάπτυξη ενός ενσωματωμένου τόξου στο εξωτερικό τοίχωμα. Πράγματι, φαίνεται ότι το τόξο που φέρει τις δυνάμεις δεν είναι αυτό που υπάρχει στην πόρτα, αλλά το παραπάνω που δημιουργήθηκε από τις ρωγμές (εγκάρσιο τόξο). Τα σημεία κάτω από το τόξο, τα οποία δεν φορτίζονται πλέον από δυνάμεις μπορεί να ραγίσουν (η τοιχοποιία βρίσκεται υπό χαμηλή τάση συμπίεσης), αλλά η δομή παραμένει σταθερή.



Εικόνα 10: Α. Η περιοχή D03, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. **Β.** Η ίδια περιοχή σε κοντινή λήψη (ASM, 2014).

Περιοχή D04 (Ρωγμή)

Μπορεί να παρατηρηθεί ρωγμή δίπλα στο κούφωμα της μεταλλικής πόρτας (Εικόνα 11).

Πιθανή αιτία: Η παρουσία του διαβρωμένου μεταλλικού στοιχείου είναι ίσως η κύρια αιτία της ρωγμής. Πράγματι, το οξυγόνο και τα χλωριούχα ιόντα δημιουργούν τη διάβρωση (σκουριά) του χάλυβα και την οξείδωση, που έχουν ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του σιδήρου. Αυτή η διόγκωση ασκεί δυνάμεις και ωθήσεις στην περιβάλλουσα τοιχοποιία και οδηγεί στη ρωγμή της.

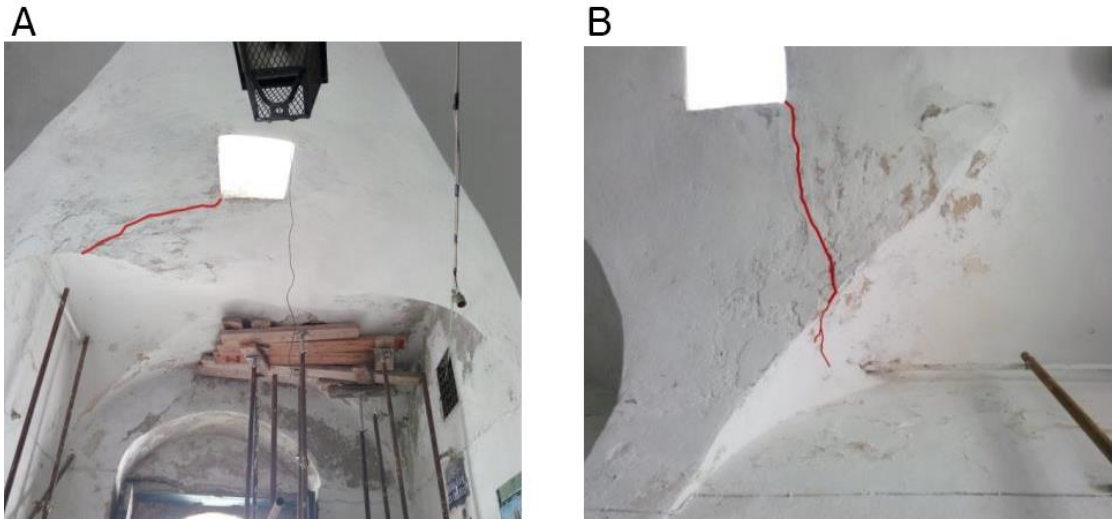


Εικόνα 11: Η περιοχή D04, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά (ASM, 2014).

Περιοχή D05 (Ρωγμή)

Στο εσωράχιο της καμάρας είναι εμφανής μια διαγώνια ρωγμή (Εικόνα 12). Η ρωγμή ξεκινάει από την εξωτερική γωνία του φεγγίτη και εκτείνεται προς τη διαγώνιο. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί η απόσπαση του επιχρίσματος από τη γύρω περιοχή. Αυτή η περιοχή φαίνεται να είχε προηγουμένως επισκευαστεί επιφανειακά (με επίχρισμα).

Πιθανή αιτία: Η φθορά αυτή είναι αποτέλεσμα του νερού της βροχής που διεισδύει μέσα από το φεγγίτη. Πράγματι, η συσσώρευση υγρασίας δημιουργεί απώλεια της συνοχής και έχει ως αποτέλεσμα τις ρωγμές και την απόσπαση του επιχρίσματος.

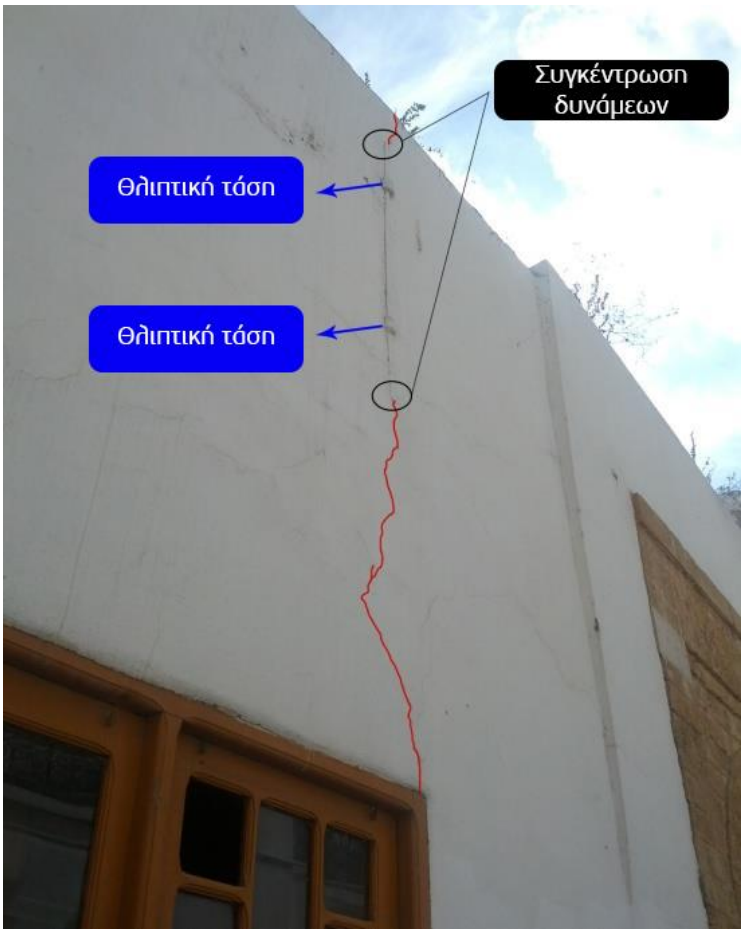


Εικόνα 12: Α. Η περιοχή D05, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. **Β.** Η ίδια περιοχή σε κοντινή λήψη (ASM, 2014).

Περιοχή D06 (Ρωγμή)

Στην αριστερή πλευρά της πρόσοψης, μία σχετικά λεπτή ρωγμή είναι ορατή και στις δύο πλευρές μιας μεταλλικής ράβδου που έχει τοποθετηθεί ώστε να κρατάει το εξωτερικό τοίχωμα με δύο δεσμούς (Εικόνα 13). Η ρωγμή αναπτύσσεται προς τα πάνω μέχρι την κορυφή της τοιχοποιίας και προς τα κάτω μέχρι τη γωνία της πόρτας.

Πιθανή αιτία: Προφανώς, αυτή η ρωγμή είναι το αποτέλεσμα μιας συγκέντρωσης δυνάμεων στις δύο πλευρές της μεταλλικής ράβδου που συνδέεται στους δεσμούς. Αυτό θα επιβεβαίωνε και της κάμψη της εξωτερικής στρώσης της τοιχοποιίας. Στην πραγματικότητα, η παραμόρφωση του τοιχώματος δημιουργεί έλξη των δεσμών και μετατρέπεται σε μία κατανεμημένη θλιπτική τάση κατά μήκος της μεταλλικής ράβδου, προκαλώντας έτσι μία συγκέντρωση τάσεων στα άκρα της.

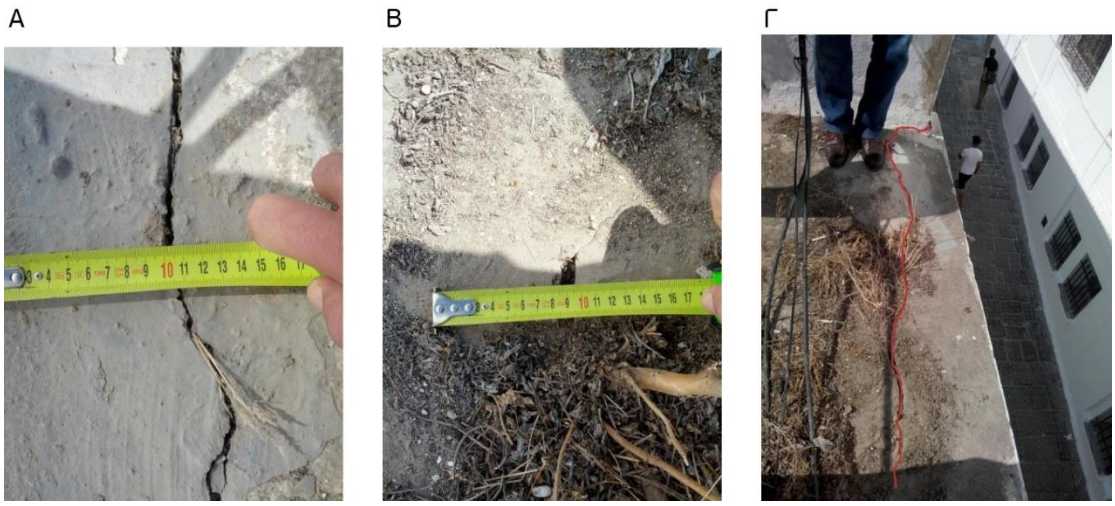


Εικόνα 13: Η περιοχή D06, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά (ASM, 2014).

Περιοχή D07 (Ρωγμή)

Στην ταράτσα της καμάρας, γύρω στα 10cm από τη μπροστινή πλευρά της τοιχοποιίας, είναι εμφανής μια μεγάλη ρωγμή, με πλάτος από 0,5cm έως 1cm (Εικόνα 14).

Πιθανή αιτία: Αυτή η ρωγμή μπορεί να συνδεθεί άμεσα με την απόσπαση που έχει ήδη παρατηρηθεί στο εξωτερικό τοίχωμα, που προκαλείται από την πλευρική ώθηση που ασκείται σε αυτό. Η φθορά αυτή, που βρίσκεται στην ταράτσα, μπορεί να προκαλέσει διείσδυση νερού και βιολογική ανάπτυξη.

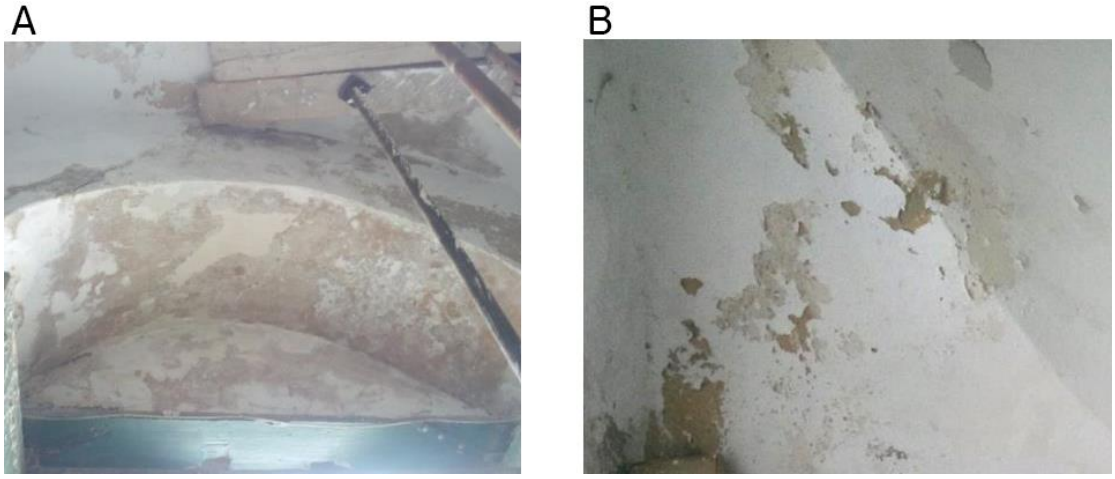


Εικόνα 14: Α. Η περιοχή D07, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. Είναι εμφανές ότι η ρωγμή φτάνει σε πλάτος το 1cm. **Β.** Η ίδια περιοχή σε διαφορετική λήψη. **Γ.** Η ίδια περιοχή σε μακρινή λήψη, όπου φαίνεται ότι η θέση της συγκεκριμένης φθοράς είναι η ταράτσα της ιστορικής κατασκευής (ASM, 2014).

Περιοχή D08 (Φούσκωμα Επιχρίσματος)

Σχεδόν κάθε σημείο της καμάρας, συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών τοίχων, παρουσιάζει σημάδια φουσκώματος του επιχρίσματος, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την απόσπαση των στρωμάτων του γύψου (Εικόνα 15).

Πιθανή αιτία: Τα φουσκώματα και η επακόλουθη απόσπασή τους, είναι πιθανόν να είναι αποτέλεσμα της δράσης της υγρασίας και της επίδρασης των καιρικών συνθηκών, ιδίως στα κάθετα στοιχεία του κτίσματος. Η κατάσταση των οριζόντιων στοιχείων, δηλαδή του ανώτατου ορίου της καμάρας, ως επί το πλείστων, επιδεινώθηκε λόγω της διείσδυσης νερού της βροχής από την οροφή, στην οποία παρατηρείται μια απώλεια της απόδοσης της στεγανοποίησής της.



Εικόνα 15: Α. Η περιοχή D08, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. **Β.** Η ίδια περιοχή σε κοντινή λήψη (ASM, 2014).

Περιοχή D09 (Μερική Κατάρρευση)

Ένα σημαντικό τμήμα της οροφής της καμάρας έχει καταρρεύσει (Εικόνα 16).

Πιθανή αιτία: Φαίνεται ότι η φθορά είναι το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού παραγόντων που οδήγησαν στην κατάρρευση ενός τμήματος της καμάρας. Πρώτον, η διείσδυση του νερού της βροχής από τη στέγη έχει σίγουρα προκαλέσει μια απώλεια της συνάφειας μεταξύ των τούβλων και του κονιάματός τους, αποδυναμώνοντας έτσι τη σταθερότητα της οροφής. Δεύτερον, η πλευρική ώθηση που ασκείται στην καμάρα πρέπει να έπαιξε κάποιο ρόλο στην μερική κατάρρευση, καθώς μπορεί να έχουν προκληθεί εσωτερικές τάσεις εφελκυσμού στην καμάρα, γεγονός που κατά συνέπεια μειώνει τη σταθερότητά της.



Εικόνα 16: Α. Η περιοχή D09, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. **Β.** Η ίδια περιοχή σε μακρινή λήψη (ASM, 2014).

Περιοχή D10 (Βιολογική Δράση)

Στην οροφή της καμάρας έχει αναπτυχθεί πλήθος φυτών (Εικόνα 17).

Πιθανή αιτία: Η έλλειψη συντήρησης και η συσσώρευση νερού στην επιφάνεια της οροφής είναι οι πιο πιθανές κύριες αιτίες της παρατηρούμενης βιολογικής ανάπτυξης στην οροφή.

A



B



Εικόνα 17: Α. Η περιοχή D10, στην οποία φαίνεται η παρατηρούμενη φθορά. **Β.** Η ίδια περιοχή σε διαφορετική λήψη (ASM, 2014).

3.4. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για τις ανάγκες των αναλυτικών τεχνικών ελέγχου, δείγματα ελήφθησαν από διάφορα σημεία της ιστορικής κατασκευής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 13. Τα δείγματα ήταν όσο το δυνατόν μικρότερου μεγέθους και από τα λιγότερο εμφανή σημεία της ιστορικής κατασκευής. Από τα δείγματα, το κεραμικό είχε εσωτερικό διαφορετικού χρώματος και συνεπώς διαχωρίστηκε σε δύο δείγματα (εξωτερικό κίτρινου χρώματος και εσωτερικό γκρι χρώματος). Τα δείγματα μετρήθηκαν και φωτογραφήθηκαν στο εργαστήριο, με χρήση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής Nikon D70, της εταιρίας Nikon Corporation. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας φαίνονται στις Εικόνες 18 έως 23.

Πίνακας 13: Δείγματα από την ιστορική κατασκευή που ελήφθησαν για εφαρμογή αναλυτικών τεχνικών ελέγχου.

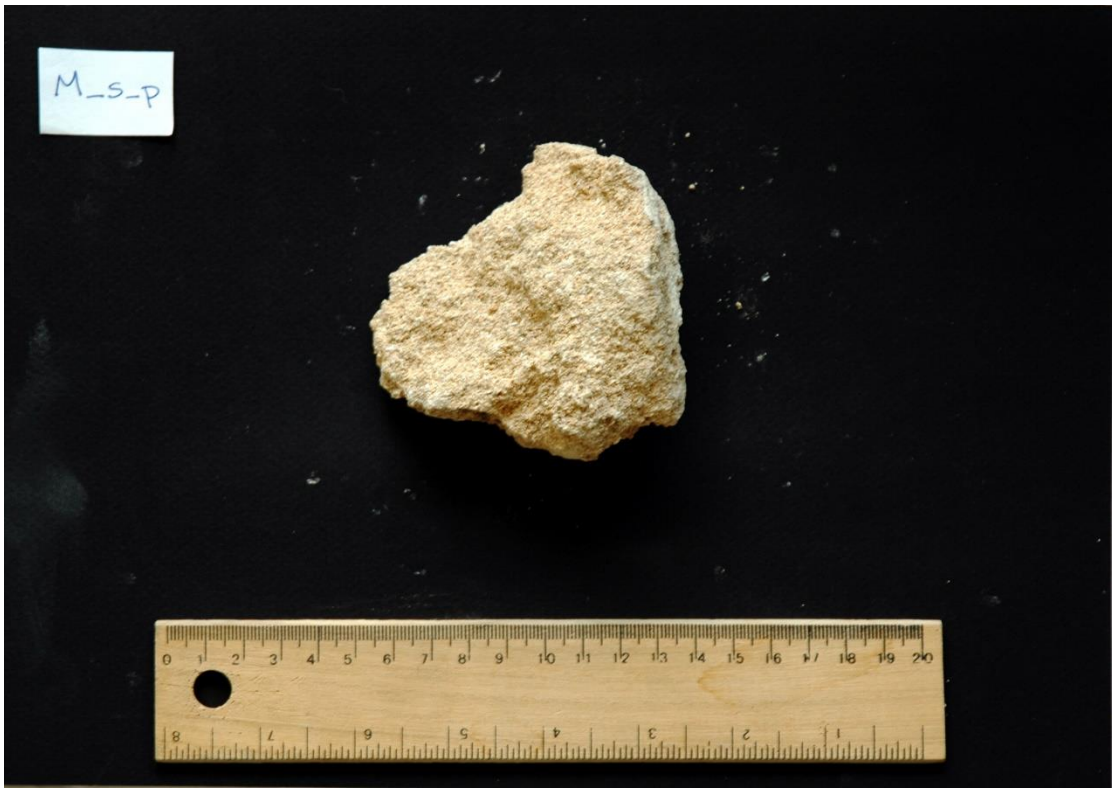
Κωδικός Δείγματος	***Υλικό***
M_c_y	Κεραμικό Κίτρινου Χρώματος (Εξωτερικό Δείγματος)
M_c_r	Κεραμικό Κόκκινου Χρώματος (Εσωτερικό Δείγματος)
M_s_p	Ψαμμίτης Πρόσοψης
M_s	Ασβεστόλιθος Πρόσοψης
M_m_w	Ιστορικό Κονίαμα Λευκού Χρώματος
M_m_g	Ιστορικό Κονίαμα Γκρι Χρώματος
M_film	Φιλμ Λευκού Χρώματος Πρόσοψης
M_steel	Μέταλλο


M_c
A

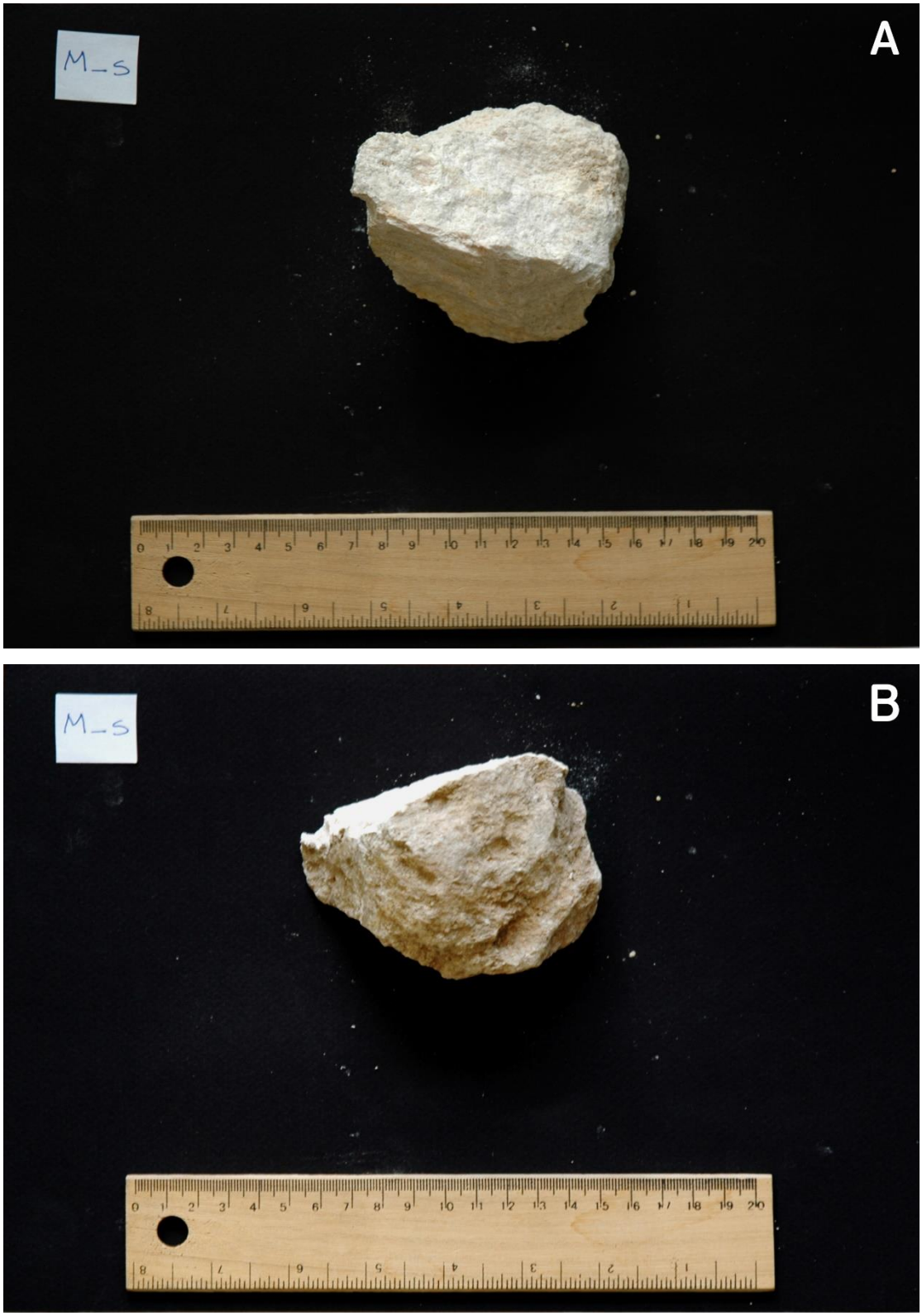

M_c
B



Εικόνα 18: Δείγματα M_c (κεραμικό). **Α.** και **Β.** Εξωτερικό (κίτρινο χρώμα), από όπου προήλθε το δείγμα M_c_y. **Γ.** Θραύσμα, στο οποίο φαίνεται το εσωτερικό (κόκκινο χρώμα), από όπου προήλθε το δείγμα M_c_r.



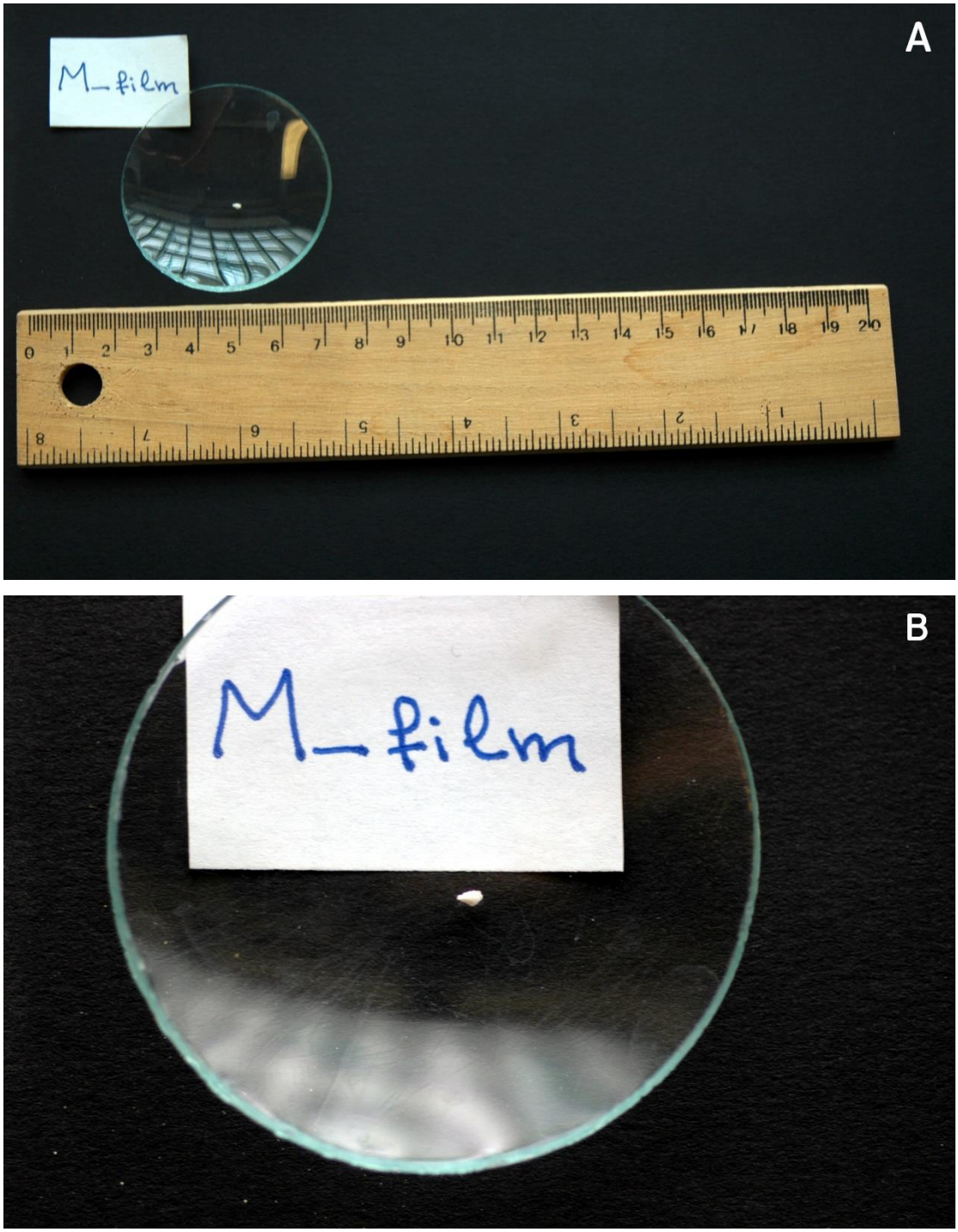
Εικόνα 19: Δείγμα M_s_p (ψαμμίτης πρόσοψης).



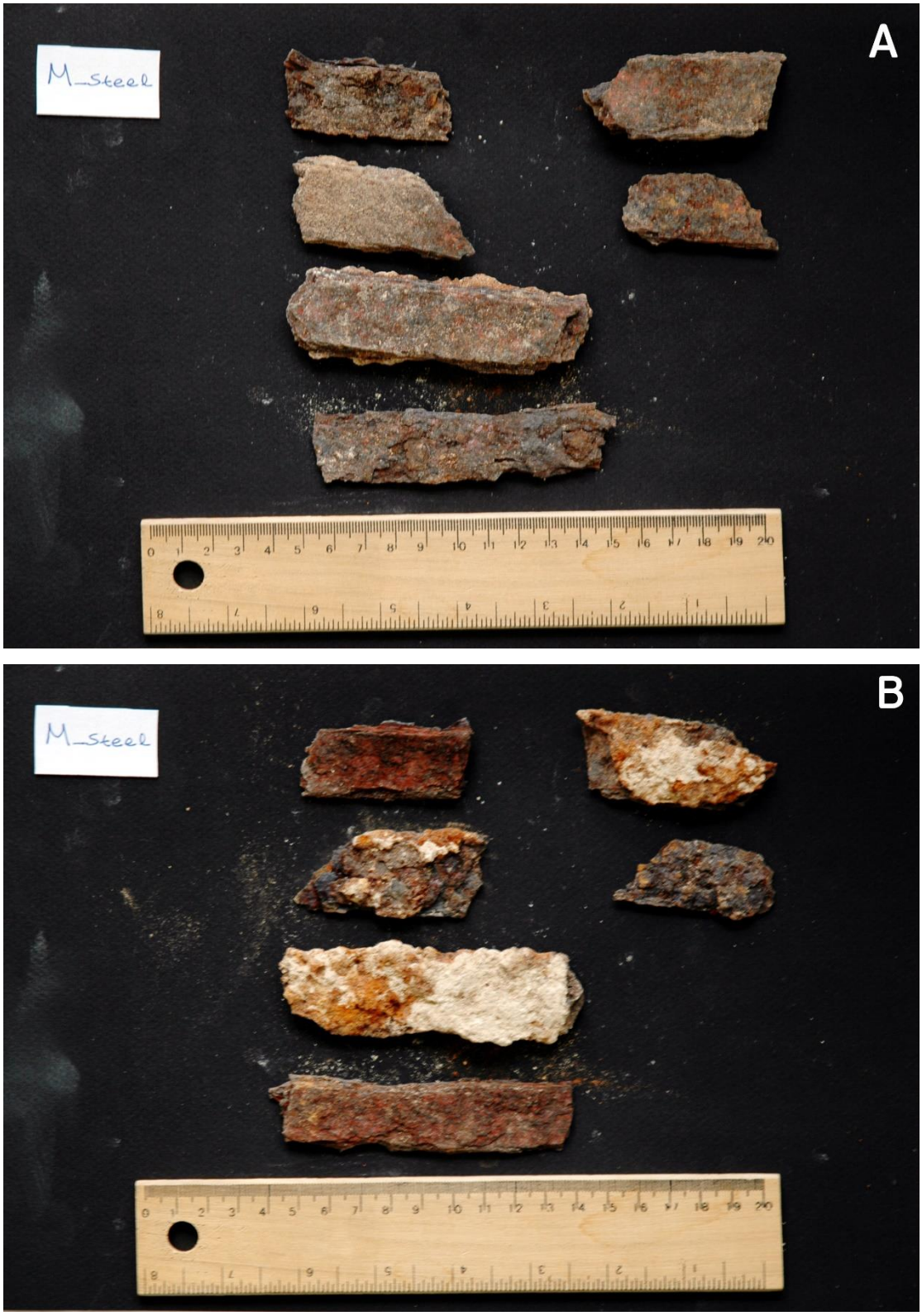
Εικόνα 20: Δείγμα M_s (ασβεστόλιθος πρόσοψης). **Α.** Πρώτη όψη. **Β.** Δεύτερη όψη.



Εικόνα 21: Δείγματα M_m_w και M_m_g (ιστορικό κονίαμα).



Εικόνα 22: Κόκος δείγματος M_film (φιλμ λευκού χρώματος πρόσοψης). **Α.** Πανοραμική λήψη. **Β.** Κοντινή λήψη (macro).



Εικόνα 23: Δείγματα M_steel (μέταλλο) **A.** Πρώτη όψη. **B.** Δεύτερη όψη.

4. Παρουσιαση Και Συζητηση Των Αποτελεσματων

4.1. Αποτελεσματα Μη Καταστρεπτικων Τεχνικων Ελεγχου Των Υλικων

4.1.1. Αποτελεσματα Μικροσκοπιας Οπτικων Ινων

Χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο οπτικών ινών i-Scope USB, της εταιρίας MORITEX Corporation, τους φακούς View 30XPL lens, View 50XPL lens και View 120X lens, της εταιρίας MORITEX Corporation και το λογισμικό Moritex Viewer, έκδοση 2.2, της εταιρίας MORITEX Corporation, πραγματοποιήθηκε λήψη εικόνων από διάφορα σημεία της ιστορικής κατασκευής. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, εικόνες FOM ελήφθησαν από τον ψαμμίτη, τον ασβεστόλιθο και το κονίαμα αρμολόγησης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στις Εικόνες 25 έως 32, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, για τα υλικά της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 24: Η πρόσοψη της ιστορικής κατασκευής. **Α.** Ψαμμίτης. **Β.** Κονίαμα αρμολόγησης. **Γ.** Ασβεστόλιθος (MEDNETA – Technical Report, 2015).

Δύο ήδη ψαμμίτη φαίνονται στην Εικόνα 25, ενώ και τα δύο είναι πωρόλιθοι. Το πρώτο είδος ψαμμίτη έχει σκούρο μπεζ – πορτοκαλί χρώμα και είναι εκείνο που έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στην πρόσοψη της ιστορικής κατασκευής. Έχει μεσαίους προς μεγάλους κόκκους και μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού. Το δεύτερο είδος ψαμμίτη έχει ανοιχτό μπεζ χρώμα και έχει χρησιμοποιηθεί σε μικρότερο βαθμό. Έχει μικρούς προς μεσαίους κόκκους και επαρκή ποσότητα συνδετικού υλικού. Και τα δύο είδη ψαμμίτη έχουν μακροπορώδη χαρακτήρα και μικρή συνοχή ανάμεσα στο συνδετικό υλικό και τα αδρανή. Το γεγονός αυτό, τους προσδίδει χαμηλή μηχανική αντοχή και τα καθιστά επιρρεπή στην φθορά λόγω της κρυστάλλωσης των αλάτων. Παρατηρείται ότι οι ψαμμίτες έχουν υποστεί εκτεταμένη φθορά, μέσω της αποσάθρωσης των κόκκων τους.

Στην Εικόνα 27 παρατηρείται ότι υπάρχουν υπολείμματα ενός λεπτού φιλμ λευκού χρώματος, σε διάφορα σημεία των ψαμμιτών, που προφανώς τοποθετήθηκε στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης της ιστορικής κατασκευής. Η συγκεκριμένη επέμβαση είναι φυσικοχημικά ασύμβατη, αφού καθώς το φιλμ τοποθετήθηκε πάνω στο πορώδες υλικό, εμπόδισε τη διαπνοή του.

Στην Εικόνα 29 είναι εμφανές ότι ορισμένοι ψαμμίτες έχουν επικαλυφθεί με επιχρίσματα κόκκινου – πορτοκαλί και καφέ χρώματος, ως τμήμα προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης της ιστορικής κατασκευής. Τα επιχρίσματα έχουν κάνει την επιφάνεια των ψαμμιτών λεία. Η αισθητική ασυμβατότητα των υλικών είναι εξαιρετικά εμφανής, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση στο χρώμα.

Παρατηρώντας την Εικόνα 32, είναι εμφανής η φυσικοχημική ασυμβατότητα των επιχρισμάτων και των ψαμμιτών, καθώς τα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική μικροδομή. Ειδικότερα, το επίχρισμα έχει καλύψει τα κενά του ψαμμίτη, αλλά, καθώς είναι πιο συμπαγές υλικό, εμποδίζει τη διαπνοή του ψαμμίτη. Επιπλέον, έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής, γεγονός που προκαλεί φθορά κατά τη διάρκεια των κύκλων θέρμανσης – ψύξης του ψαμμίτη, λόγω των μεταβολών της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Συνέπεια όλων των παραπάνω είναι η απόσπαση τμημάτων των ψαμμιτών που εμφανίζεται εκτεταμένα στην ιστορική κατασκευή.

Στην Εικόνα 35 παρατηρούνται δύο είδη κονιαμάτων αρμολόγησης. Το ένα έχει ανοιχτό μπεζ χρώμα και είναι το ιστορικό κονίαμα αρμολόγησης. Η συνδετική ύλη είναι υπόλευκου χρώματος, ενώ τα αδρανή έχουν μεσαίο, κυρίως, μέγεθος. Το δεύτερο είδος κονιάματος είναι το ίδιο υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση των ψαμμιτών. Η συνδετική ύλη είναι πορτοκαλί χρώματος και τα αδρανή έχουν μικρό προς μέτριο μέγεθος.

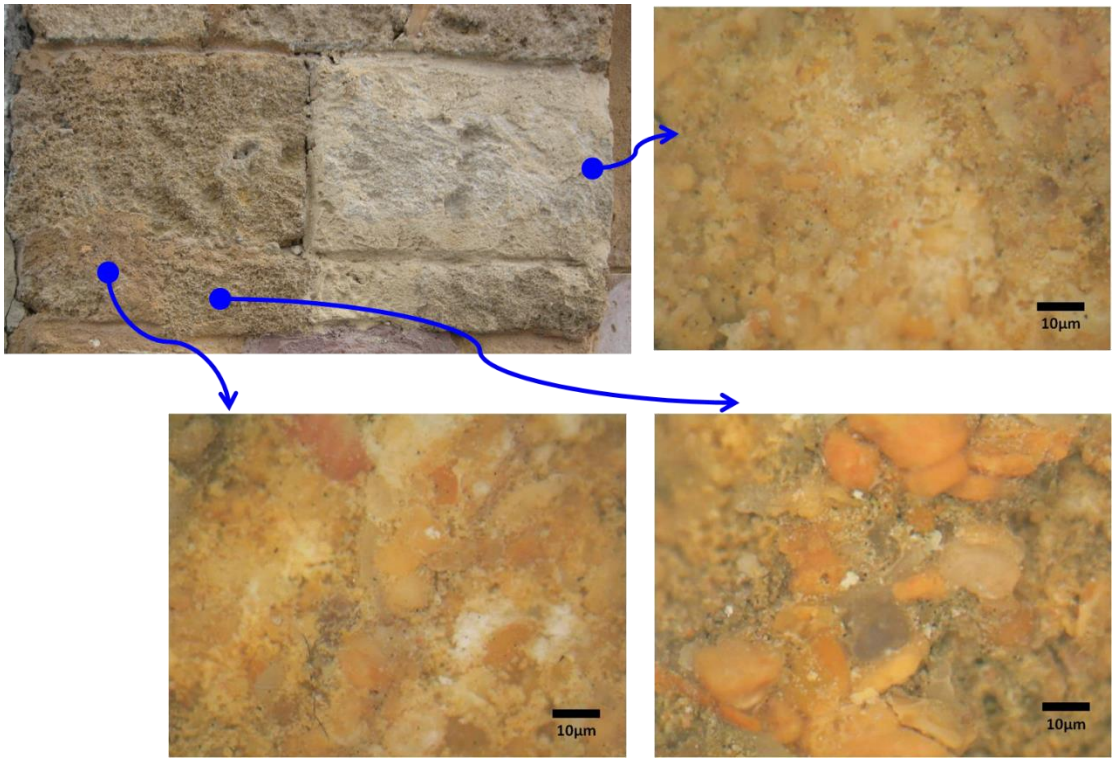
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 36, οι ασβεστόλιθοι που υπάρχουν στις δύο πλευρές της πόρτας, στην είσοδο της ιστορικής κατασκευής, έχουν υπόλευκο χρώμα. Είναι ορατές φλέβες κόκκινου χρώματος, γεγονός που αποτελεί ένδειξη

παρουσίας οξειδίων του σιδήρου. Σε ορισμένα σημεία υπάρχει μικρορηγμάτωση και απόσπαση μικρών τμημάτων του ασβεστόλιθου, δημιουργώντας μικρές κοιλότητες.

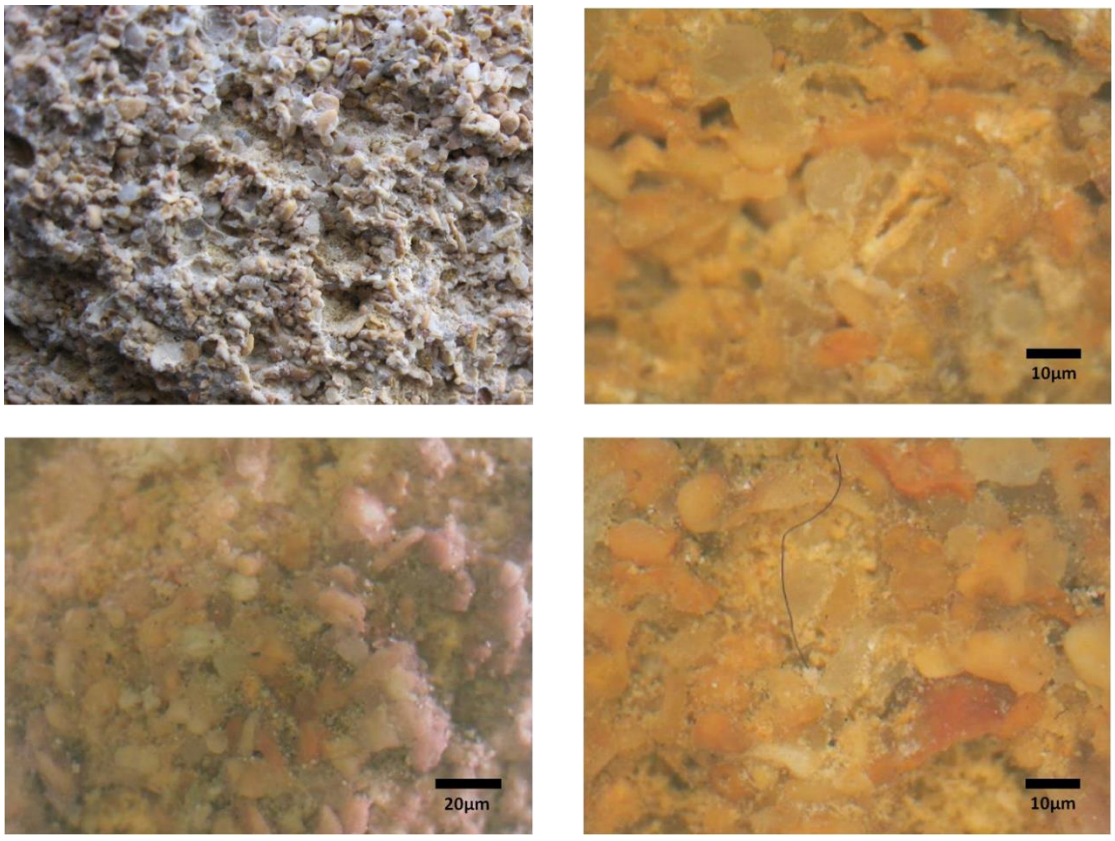
Στην Εικόνα 38 παρατηρείται η συσσώρευση μαύρων επικαθίσεων σε διάφορα σημεία του ασβεστόλιθου και στις δύο πλευρές της πρόσοψης της ιστορικής κατασκευής. Η παρουσία μαύρων επικαθίσεων είναι επιπλέον ορατή στις περιοχές όπου ο ασβεστόλιθος εμφανίζει μικρορηγματώσεις.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 40, μικρές κοιλότητες και μικρές τρύπες του ασβεστόλιθου έχουν πληρωθεί με ένα ροζ χρώματος υλικό. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη επέμβαση αισθητικά είναι μη συμβατή (λόγω της διαφοροποίησης στο χρώμα), το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται φυσικοχημικά συμβατό, καθώς δεν έχουν δημιουργηθεί ρωγμές, αποσπάσεις τμημάτων ή άλλου τύπου φθορά.

Τέλος, στην Εικόνα 41 παρατηρούνται υπολείμματα ενός λεπτού φιλμ στο επάνω τμήμα του ασβεστόλιθου, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής. Δείχνει να είναι το ίδιο υλικό, από το οποίο παρατηρήθηκαν ίχνη στους ψαμμίτες (Εικόνα 27) και πρόκειται πιθανών για υπολείμματα κάποιας επέμβασης αδιαβροχοποίησης της επιφάνειας. Το συγκεκριμένο υλικό είναι φυσικοχημικά ασύμβατο και με τον ασβεστόλιθο, παρά το γεγονός ότι ο ασβεστόλιθος είναι πιο συμπαγής από τον ψαμμίτη. Η διαπνοή της επιφάνειας εμποδίζεται, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εμφάνιση αποσπάσεων.



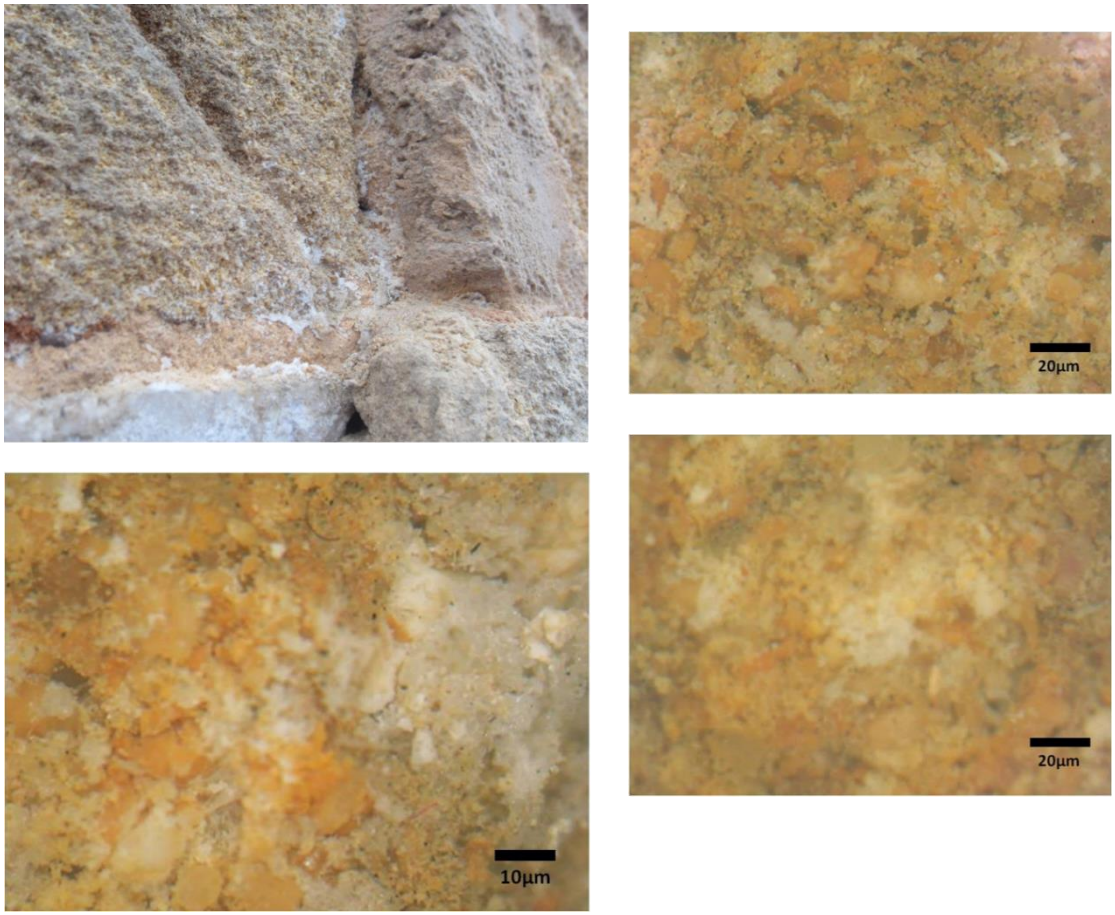
Εικόνα 25: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη.



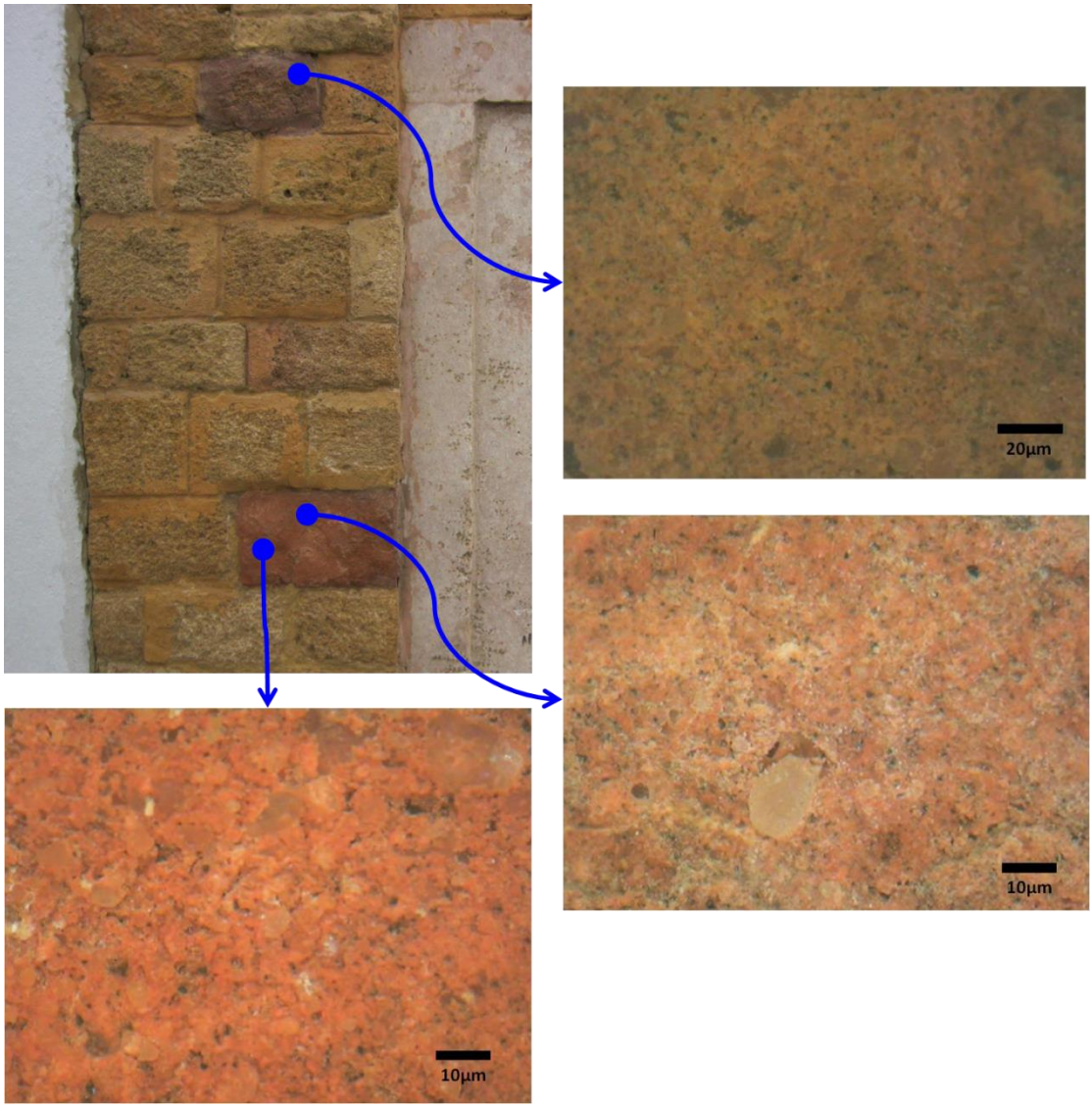
Εικόνα 26: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη.



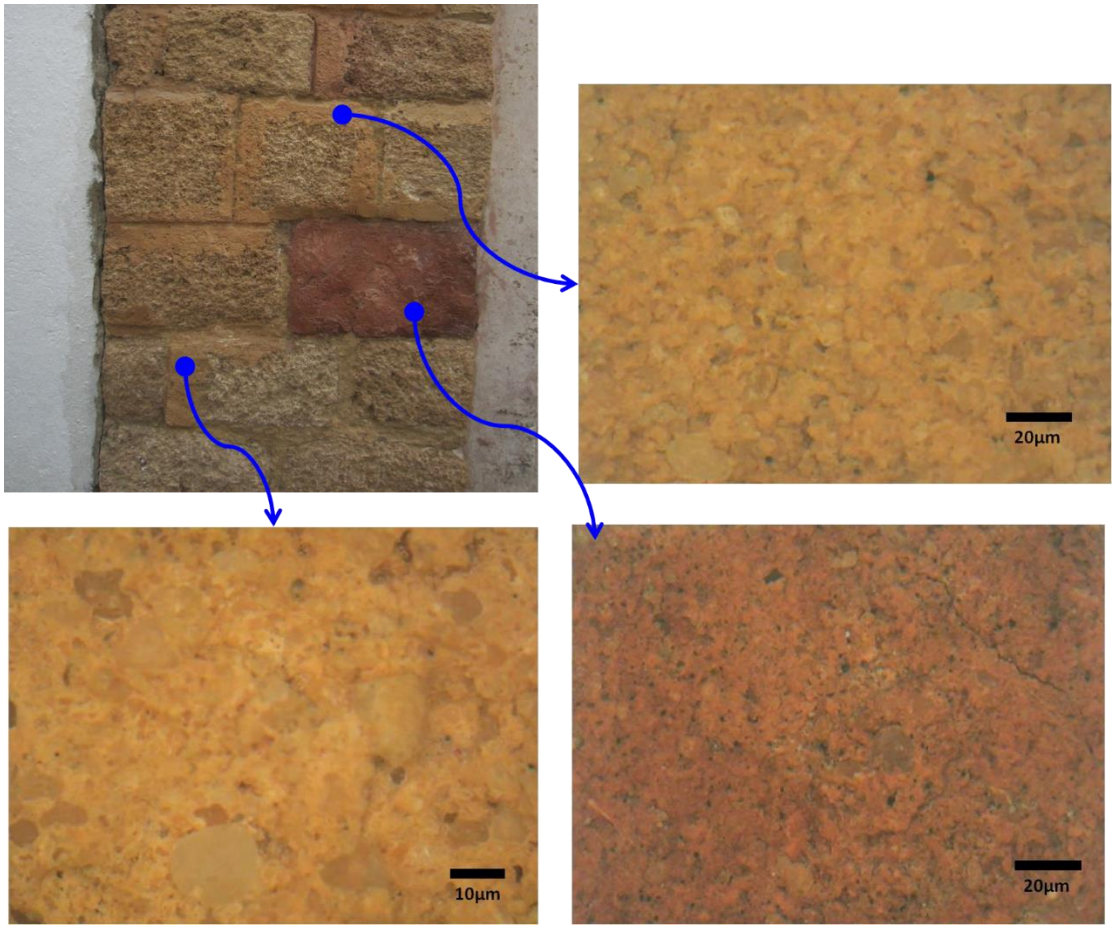
Εικόνα 27: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος.



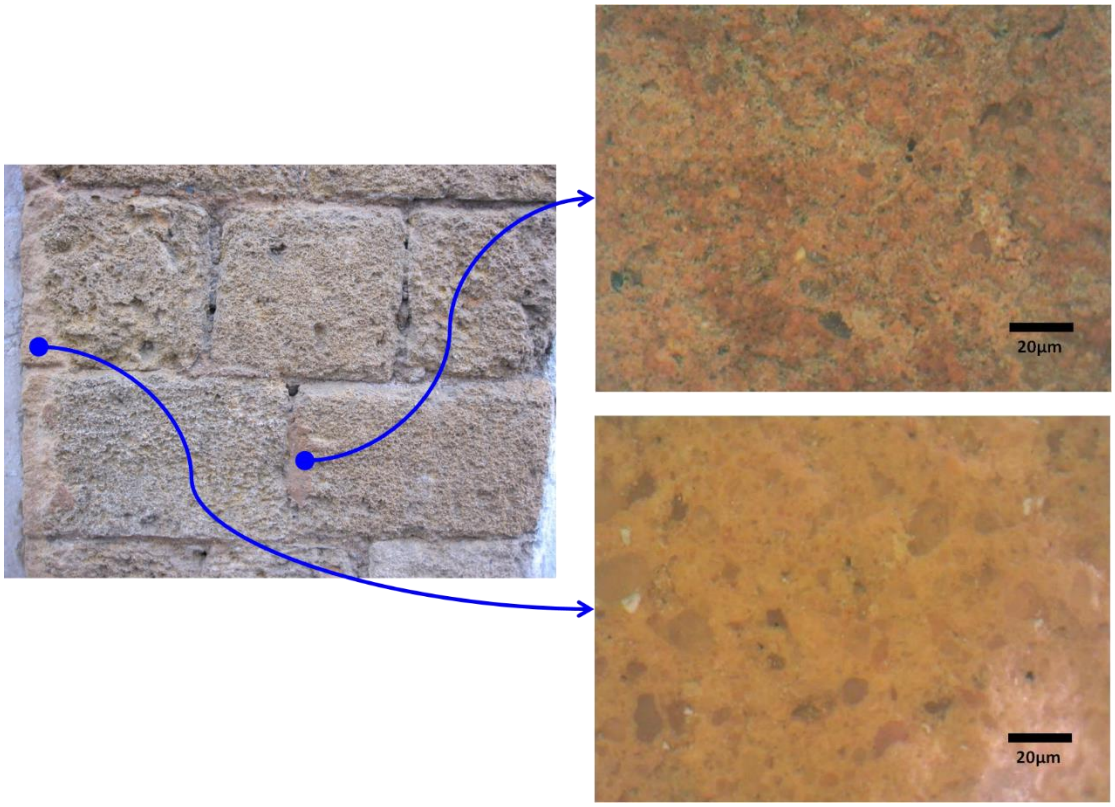
Εικόνα 28: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος.



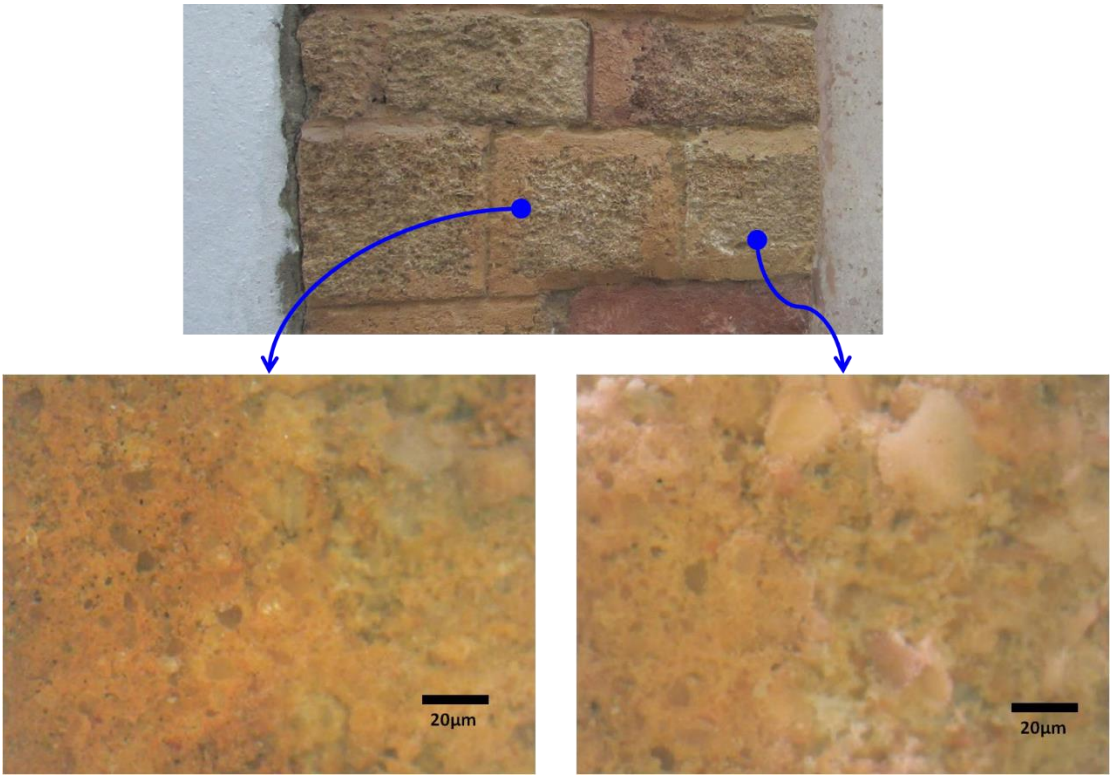
Εικόνα 29: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



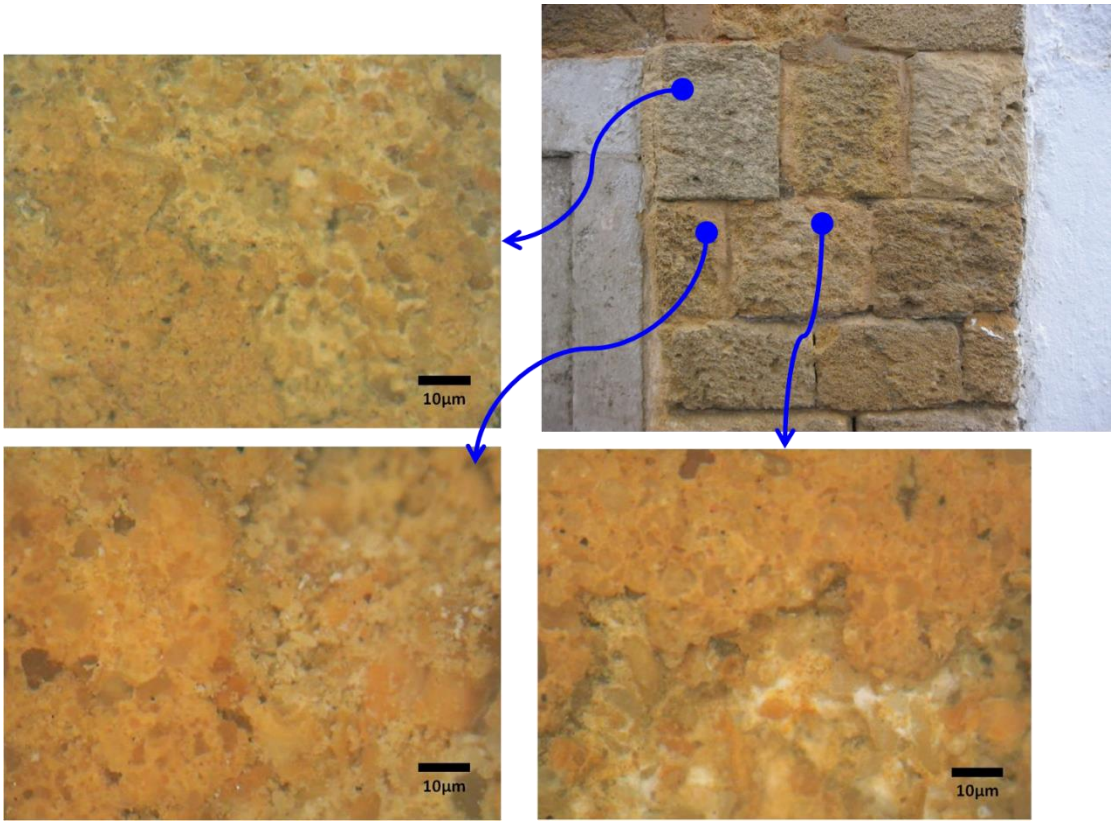
Εικόνα 30: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



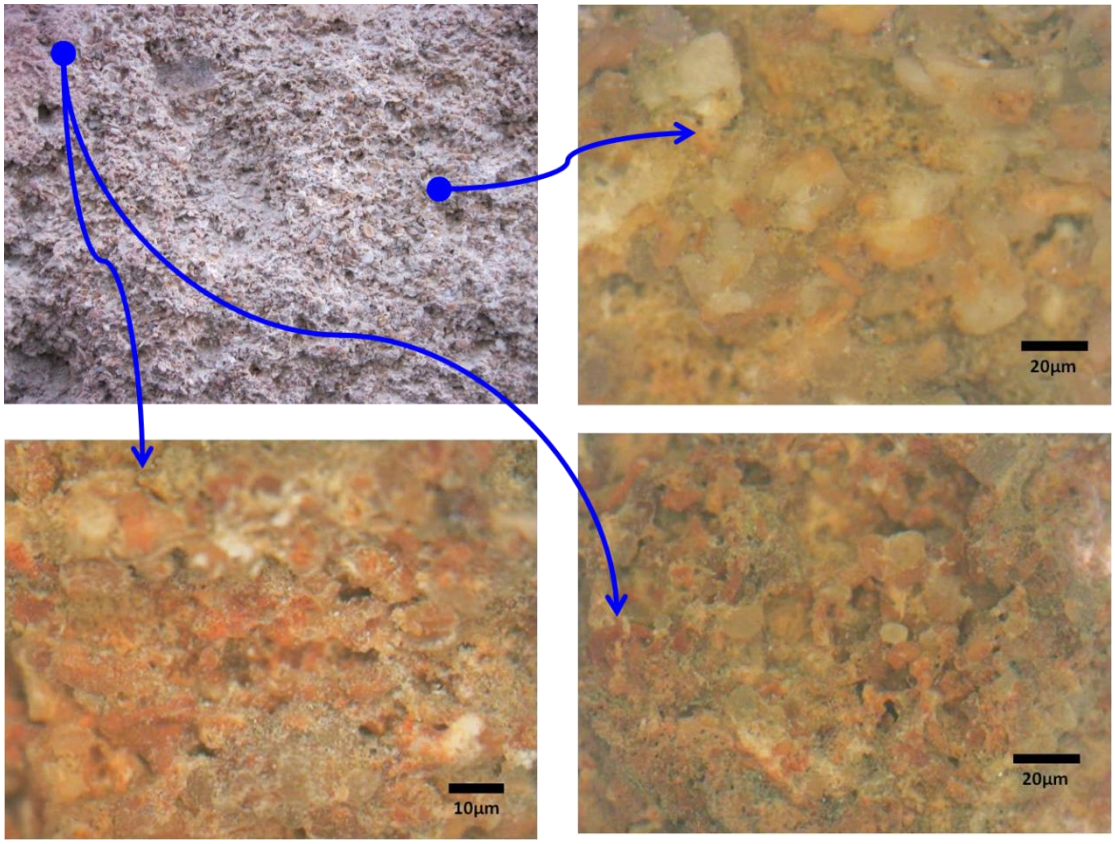
Εικόνα 31: Αποτελέσματα FOM των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί στους ψαμμίτες, στα πλαίσια προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



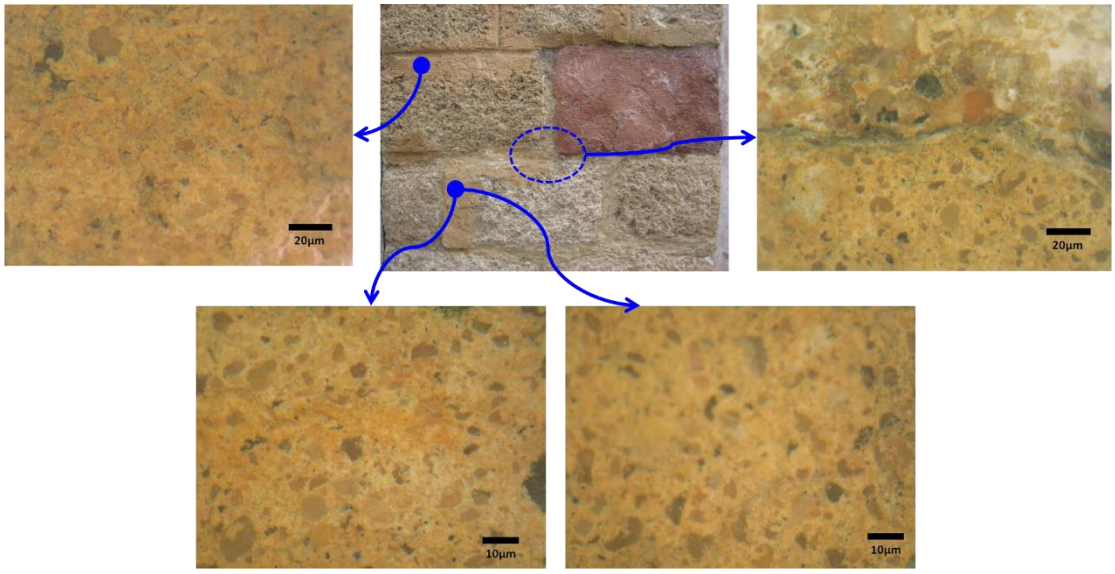
Εικόνα 32: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



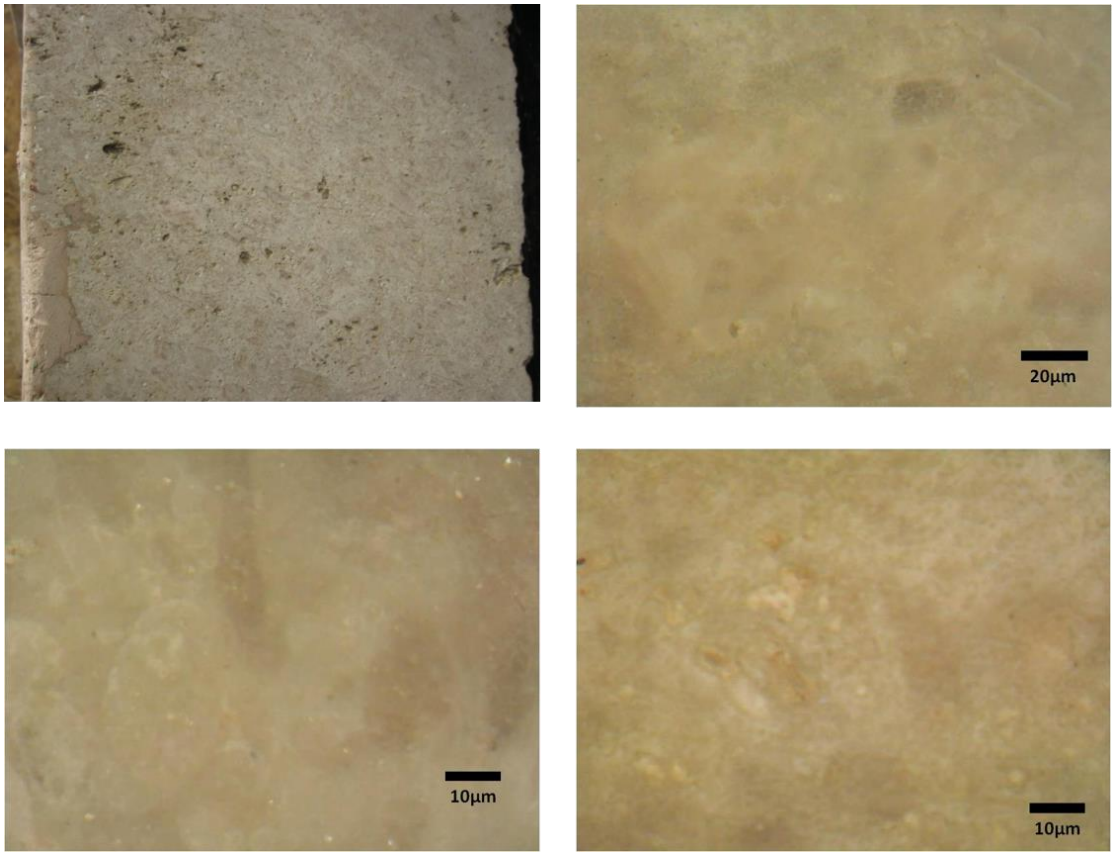
Εικόνα 33: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



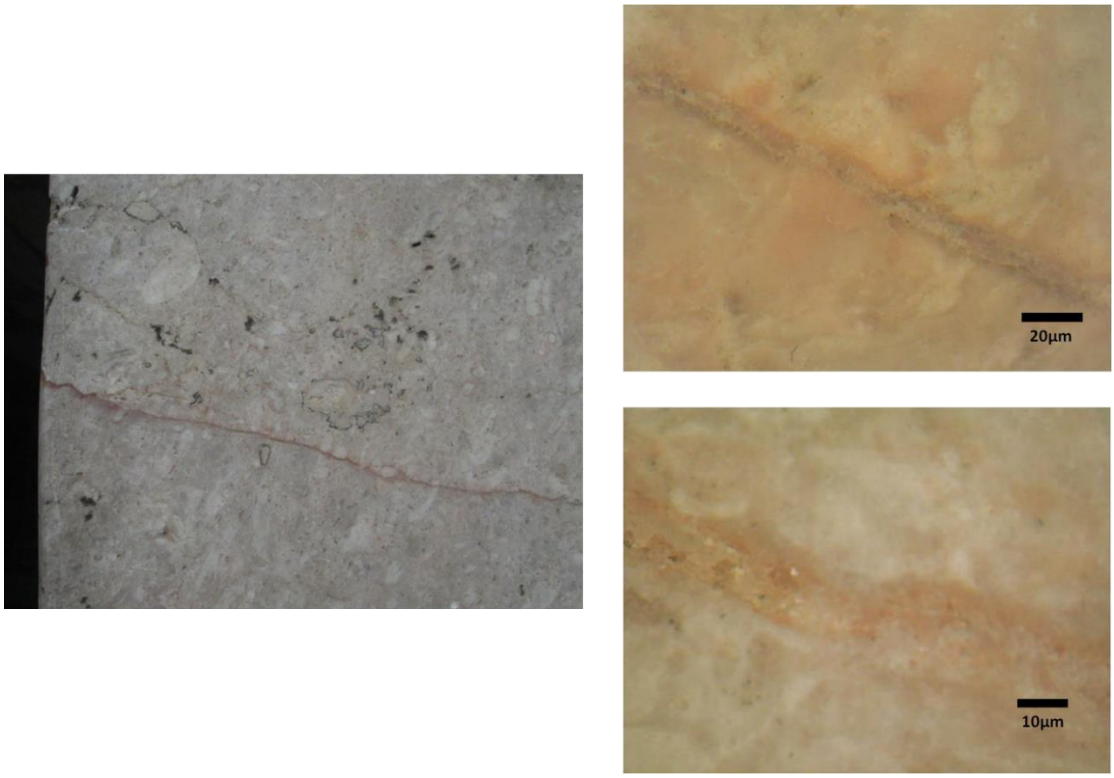
Εικόνα 34: Αποτελέσματα FOM της αλληλεπίδρασης των ψαμμιτών με τα επιχρίσματα που τους έχουν τοποθετηθεί, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 35: Αποτελέσματα FOM των κονιαμάτων αρμολόγησης.



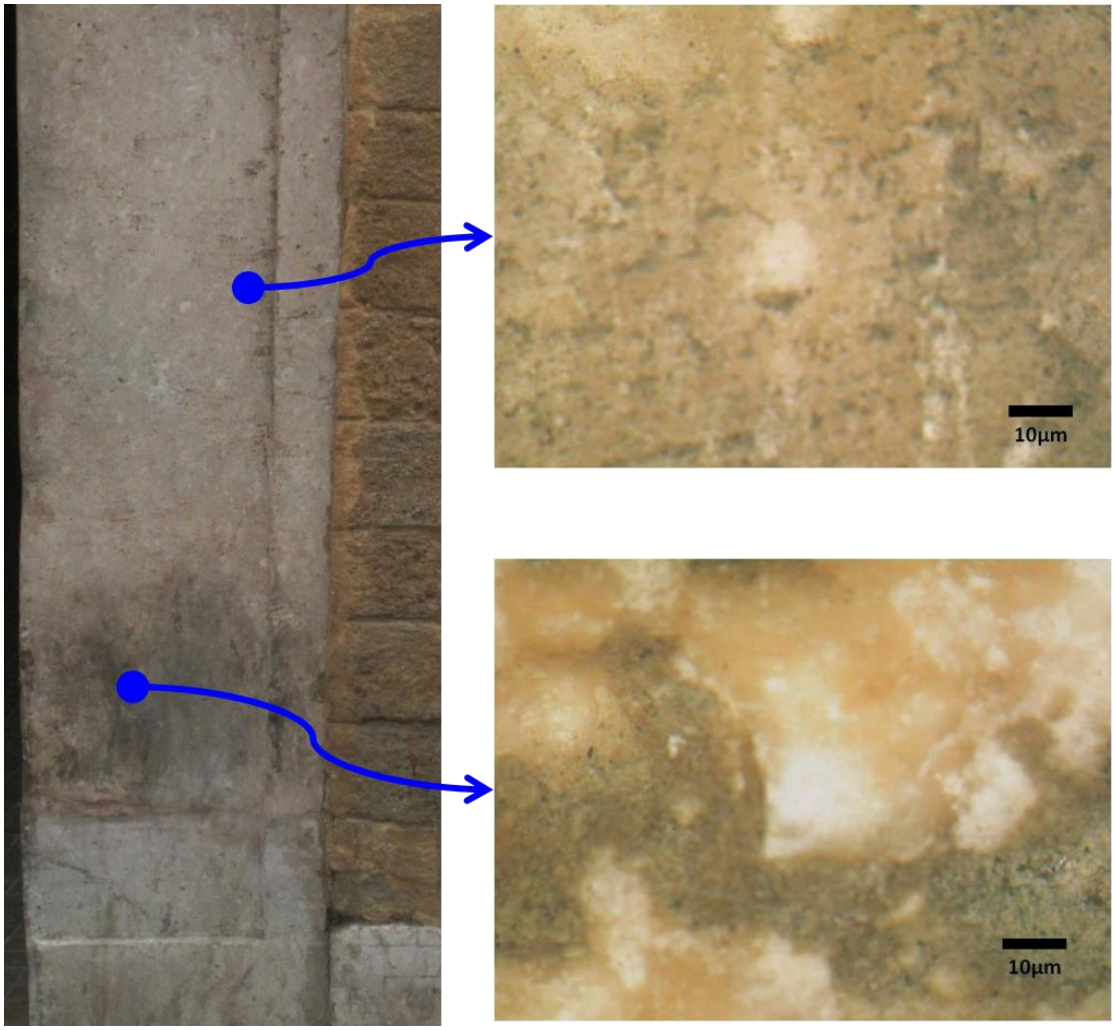
Εικόνα 36: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου.



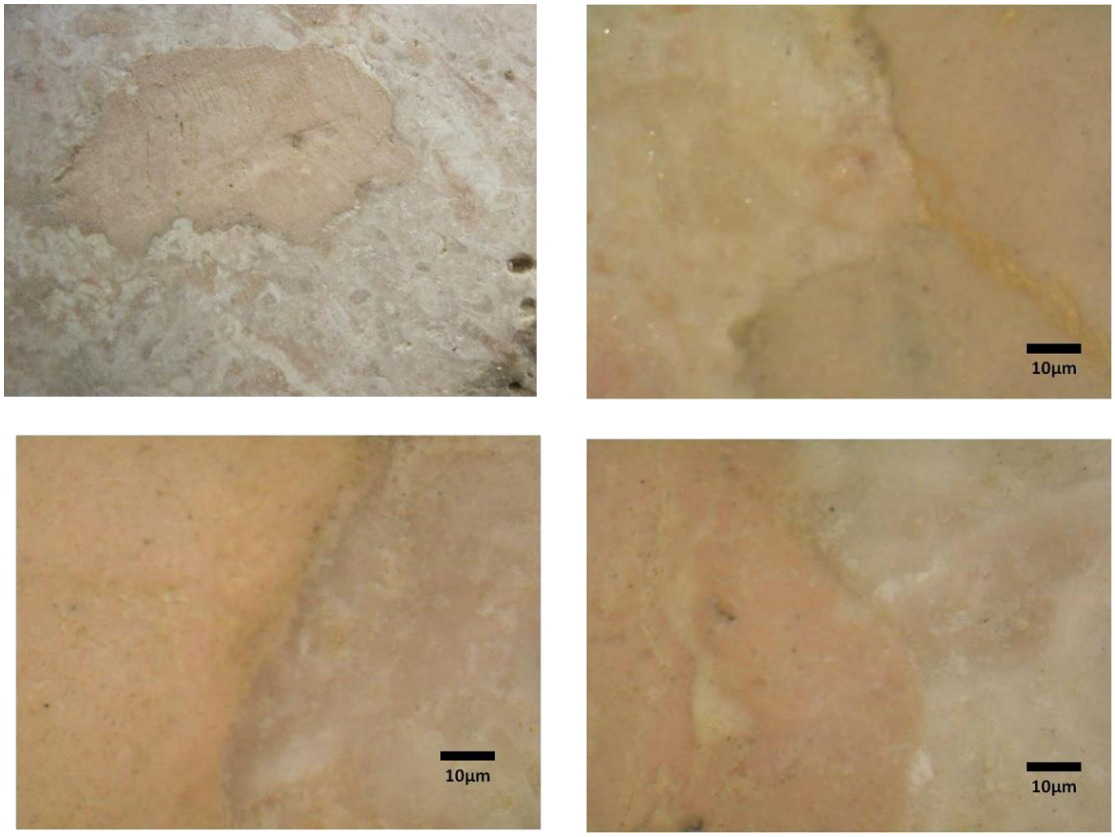
Εικόνα 37: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου.



Εικόνα 38: Αποτελέσματα FOM των μαύρων επικαθίσεων στον ασβεστόλιθο, στην ανατολική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 39: Αποτελέσματα FOM των μαύρων επικαθίσεων στον ασβεστόλιθο, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



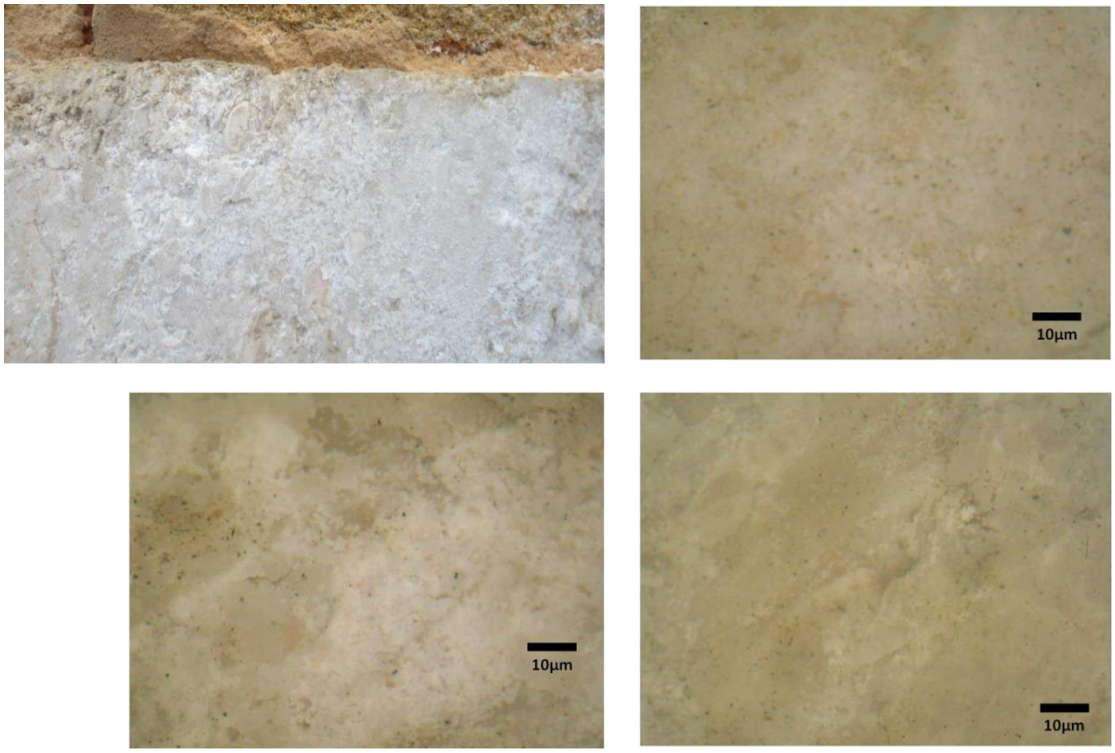
Εικόνα 40: Αποτελέσματα FOM των πληρώσεων μικρών κοιλοτήτων και μικρών τρυπών του ασβεστόλιθου, που έχουν πληρωθεί με ένα ροζ χρώματος υλικό.



Εικόνα 41: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 42: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 43: Αποτελέσματα FOM των υπολειμμάτων του φιλμ λευκού χρώματος, στη δυτική πλευρά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.

4.1.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ

Χρησιμοποιώντας τη θερμοκάμερα FLIR B200 Western, της εταιρίας FLIR Systems, πραγματοποιήθηκε λήψη θερμικών φωτογραφιών. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44, θερμικές φωτογραφίες ελήφθησαν τόσο από το εσωτερικό, όσο και από το εξωτερικό της ιστορικής κατασκευής. Οι θερμικές φωτογραφίες επεξεργάστηκαν με το λογισμικό FLIR QuickReport, έκδοση 1.2 SP2, της εταιρίας FLIR Systems (FLIR Systems, 2008). Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στις Εικόνες 45 έως 80, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, για την τρέχουσα κατάσταση της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 44: Α. Το εξωτερικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής. Η περιοχή δεξιά της πόρτας της εισόδου βρίσκεται δυτικά και η περιοχή αριστερά της πόρτας βρίσκεται ανατολικά. **Β.** Το εσωτερικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής. Η περιοχή δεξιά βρίσκεται ανατολικά και η περιοχή αριστερά βρίσκεται δυτικά.

Α. ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το εσωτερικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής παρουσιάζει αξιόλογες θερμοκρασιακές διαφορές. Μακροσκοπικά, παρατηρούνται δύο τύποι φθοράς: απόσπαση επιχρίσματος και ρωγμές.

Σε πρώτο στάδιο, παρατηρείται μία συσχέτιση των θέσεων όπου έχει αποσπαστεί το επίχρισμα και των θερμοκρασιακών μεταβολών. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 45 παρατηρείται ότι τα σημεία, στα οποία η τοιχοποιία έχει αποφλοιωθεί, ταυτίζονται με τα σημεία τα οποία παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία. Χαρακτηριστικά, υπάρχει σημείο, στο οποίο το επίχρισμα έχει αποσπαστεί, με θερμοκρασία 21,6^{o}C, ενώ γειτονικό του σημείο έχει θερμοκρασία 22,2^{o}C. Αντίστοιχη κατάσταση παρατηρείται στο θερμογράφημα της Εικόνας 46, όπου γειτονικά σημεία παρουσιάζουν θερμοκρασιακή διαφορά μέχρι και 0,9^{o}C. Εξίσου υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ γειτονικών σημείων παρουσιάζει το θερμογράφημα της Εικόνας 54 (θερμοκρασιακή διαφορά μέχρι και 1^{o}C) και το θερμογράφημα της Εικόνας 48 (θερμοκρασιακή διαφορά μέχρι και 0,9^{o}C). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από άλλα θερμογραφήματα του εσωτερικού (Εικόνα 53, Εικόνα 52, Εικόνα 47, Εικόνα 51 και Εικόνα 48).

Χαρακτηριστικά, η διαφοροποίηση ψυχρών – θερμών περιοχών φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 59, όπου παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση του σχήματος της περιοχής, όπου το επίχρισμα έχει αποφλοιωθεί, με το σχήμα των ψυχρών περιοχών. Αντίστοιχα, εξίσου χαρακτηριστική διαφοροποίηση ψυχρών – θερμών περιοχών φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 52, στο θερμογράφημα της Εικόνας 63 και στο θερμογράφημα της Εικόνας 65.

Οι ψυχρές περιοχές που προσδιορίζονται αντιστοιχούν σε περιοχές όπου η τοιχοποιία έχει συγκρατήσει νερό, δηλαδή σε περιοχές όπου υπάρχει υγρασία. Κάτι τέτοιο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το νερό έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα. Έτσι, η παρουσία του νερού στην τοιχοποιία αλλάζει ορισμένες ιδιότητές της, όπως η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα, με συνέπεια, η θερμοκρασία της τοιχοποιίας που φέρει

υγρασία να αλλάζει με πιο αργούς ρυθμούς. Παράλληλα, οι μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, μήνα Νοέμβριο. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 24°C, δηλαδή υψηλότερα από το συνηθισμένο για την εποχή. Κατά συνέπεια, το νερό που περιέχει η τοιχοποιία με τη μορφή υγρασίας δεν είχε προλάβει να θερμανθεί, σε αντίθεση με την υπόλοιπη τοιχοποιία, με αποτέλεσμα την εμφάνιση θερμοκρασιακών διαφορών. Συνοψίζοντας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόσπαση του επιχρίσματος που λαμβάνει χώρα εκτεταμένα στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής, οφείλεται στην υγρασία που υπάρχει σε τμήματα της τοιχοποιίας.

Σε δεύτερο στάδιο, παρατηρείται μία συσχέτιση της θέσης των ρωγμών και των θερμοκρασιακών μεταβολών. Ειδικότερα, στο θερμογράφημα της Εικόνας 50, η ρωγμή που φαίνεται μακροσκοπικά είναι το σύνορο που χωρίζει το θερμογράφημα σε θερμές (πάνω από τη ρωγμή) και ψυχρές (κάτω από τη ρωγμή) περιοχές. Είναι χαρακτηριστικό ότι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο περιοχές είναι 0,8°C. Επιπλέον, στο θερμογράφημα της Εικόνας 46 φαίνεται μια ρωγμή, η οποία δεν μπορεί να παρατηρηθεί μακροσκοπικά. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 57 παρατηρείται ότι το «μέτωπο» της υγρασίας διακόπτεται από την ασυνέχεια που δημιουργεί η ρωγμή και το θερμογράφημα χωρίζεται σε δύο περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορά θερμοκρασίας μέχρι και κατά 0,6°C (διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος των επισημασμένων ευθύγραμμων τμημάτων). Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στο θερμογράφημα της Εικόνας 56 (διαφορά θερμοκρασίας μέχρι και κατά 1°C), όπου φαίνεται ότι το «μέτωπο» της υγρασίας τείνει να μετακινηθεί από τα αριστερά προς τα δεξιά. Τέλος, στο θερμογράφημα της Εικόνας 61 φαίνεται χαρακτηριστικά η ασυνέχεια της υγρασίας, λόγω της παρουσίας της ρωγμής. Εκείνο, όμως, που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία σταδιακά ελαττώνεται προς το κάτω τμήμα του θερμογραφήματος, γεγονός που αποτελεί ένδειξη για την παρουσία μίας επιπρόσθετης πηγής υγρασίας σε αυτήν την περιοχή. Συμπερασματικά, λοιπόν, οι ρωγμές αποτελούν ασυνέχεια, η οποία εμποδίζει τη διάδοση της υγρασίας, δημιουργώντας χαρακτηριστικές ψυχρές και θερμές περιοχές στην τοιχοποιία. Το γεγονός αυτό καθιστά ακόμα και μικρές, μη ορατές μακροσκοπικά ρωγμές, παρατηρήσιμες με τη χρήση της IRT.

Β. ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το εξωτερικό τμήμα της ιστορική κατασκευής παρουσιάζει επίσης θερμοκρασιακές διαφορές. Κάτι τέτοιο παρατηρείται στο θερμογράφημα της Εικόνας 85, στο θερμογράφημα της Εικόνας 88 και στο θερμογράφημα της Εικόνας 90. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 87 παρατηρείται μια διαφορά της υψηλότερης (29,7°C) από τη χαμηλότερη (28,5°C) θερμοκρασία κατά 1,2°C, σε γειτονικούς ψαμμίτες που βρίσκονται στο επάνω μέρος της πρόσοψης.

Εξετάζοντας επιμελέστερα την πρόσοψη της κατασκευής, στο θερμογράφημα της Εικόνας 89 παρατηρείται ότι η τοιχοποιία παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή διακύμανση των θερμοκρασιών της. Για παράδειγμα, στο θερμογράφημα της Εικόνας 77, υπάρχει σημείο με θερμοκρασία 25,6°C και κοντινό του σημείο με θερμοκρασία 26,8°C. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 78, η επισημασμένη περιοχή παρουσιάζει θερμοκρασίες από 25,8°C έως 28,1°C, δηλαδή διαφορά της ανώτερης από την κατώτερη θερμοκρασία πάνω από 2°C. Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις δεξιά της πόρτας. Ειδικότερα, σημείο του θερμογραφήματος της Εικόνας 82 παρουσιάζει θερμοκρασία 26,9°C, ενώ γειτονικό του παρουσιάζει θερμοκρασία 28,1°C. Ίδια συμπεράσματα εξάγονται και από το θερμογράφημα της Εικόνας 71 και το θερμογράφημα της Εικόνας 72. Παρατηρείται επιπλέον μακροσκοπικά ότι υπάρχουν μικρές αποσπάσεις στον ψαμμίτη, οι οποίες δημιουργούν κοιλότητες. Στα σημεία αυτά, η θερμοκρασία της τοιχοποιίας είναι χαμηλότερη. Χαρακτηριστικά, στο θερμογράφημα της Εικόνας 73, τέτοιο σημείο παρουσιάζει θερμοκρασία 26°C, ενώ γειτονικό του παρουσιάζει θερμοκρασία 27°C.

Επιχειρώντας μια εις βάθος ανάλυση των θερμοκρασιακών μεταβολών που ο ψαμμίτης παρουσιάζει, παρατηρείται ότι στο θερμογράφημα της Εικόνας 73 κάθε ψαμμίτης παρουσιάζει σημαντική διακύμανση των θερμοκρασιών του. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ψαμμίτης του οποίου η ανώτερη θερμοκρασία είναι 27,3°C και η κατώτερη 26,1°C. Αντίστοιχα είναι και τα συμπεράσματα για το τμήμα που βρίσκεται πιο κοντά στο έδαφος, όπως αυτό που φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 74, όπου η ανώτερη θερμοκρασία ορισμένων

ψαμμιτών διαφέρει από την κατώτερη κατά 1,1°C. Ίδια είναι τα συμπεράσματα και για το ανώτερο τμήμα, όπως αυτό που φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 86, όπου υπάρχει ψαμμίτης του οποίου η ανώτερη θερμοκρασία είναι 28,4°C και η κατώτερη 27,3°C. Στα σημεία εκείνα των ψαμμιτών που παρουσιάζουν αυξημένη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι έχει χρησιμοποιηθεί το μπεζ – καφέ επίχρισμα, ως τμήμα προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης της ιστορικής κατασκευής, με σκοπό τη συμπλήρωση των ψαμμιτών. Το επίχρισμα αυτό παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον ψαμμίτη, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι συγκρατεί υγρασία.

Επίσης ενδιαφέροντα είναι τα αποτελέσματα που φαίνονται στο θερμογράφημα της Εικόνας 69, όπου υπάρχουν ψαμμίτες με υψηλότερη (Α) και ψαμμίτες με χαμηλότερη (Β) μέση θερμοκρασία. Το κυριότερο συμπέρασμα, όμως, σε αυτό το σημείο είναι ότι η επικάλυψη του ψαμμίτη (Γ) με το κόκκινου – πορτοκαλί χρώματος επίχρισμα, ως τμήμα προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης της ιστορικής κατασκευής, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία του, που σε σημεία φτάνει τους 27°C. Επίσης, σημαντικό είναι ότι παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές στο κονίαμα που βρίσκεται ανάμεσα στους ψαμμίτες. Ειδικότερα, η μέση θερμοκρασία του κονιάματος Li1 είναι 25,9°C, ενώ του κονιάματος Li2 είναι 26,2°C. Αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι μέρος του κονιάματος αρμολόγησης έχει συμπληρωθεί με το ίδιο μπεζ – καφέ χρώματος επίχρισμα που έχουν πληρωθεί οι ψαμμίτες και το οποίο προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας τους. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται στο θερμογράφημα της Εικόνας 70.

Συμπερασματικά, οι διαφορές στη θερμοκρασία και κατά συνέπεια στη διαπνοή των αυθεντικών ψαμμιτών, των ψαμμιτών που έχουν αποκατασταθεί με χρήση του κόκκινου – πορτοκαλί χρώματος επιχρίσματος, των ψαμμιτών που έχουν αποκατασταθεί με χρήση του μπεζ – καφέ επιχρίσματος και στο κονίαμα που βρίσκεται ανάμεσα στους ψαμμίτες, αποδίδονται τόσο στις διαφορές στη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση, όσο και κυρίως στη διαφορά στη μικροδομή τους. Η διαφορά στη διαπερατότητα των υλικών από το νερό, εξηγεί την φυσικοχημική ασυμβατότητα μεταξύ τους. Αποτέλεσμα αυτής της

ασυμβατότητας είναι η εμφάνιση διαφόρων μορφών φθοράς, που παρατηρούνται μακροσκοπικά, όπως η απώλεια αυθεντικού υλικού, μέσω της απόσπασης τμημάτων του ψαμμίτη.

Στο θερμογράφημα της Εικόνας 77 παρατηρείται ότι ο λίθος που βρίσκεται πάνω αριστερά έχει θερμοκρασία από 24,3°C έως 25,6°C, που είναι διαφορετική από αυτή του ψαμμίτη και συνεπώς πρόκειται για διαφορετικό υλικό. Πράγματι, αυτό επιβεβαιώνεται και μακροσκοπικά. Τα ίδια αποτελέσματα φαίνονται στο θερμογράφημα της Εικόνας 82, για τον αντίστοιχο λίθο που βρίσκεται στο ανώτερο δυτικό τμήμα της εισόδου. Σε γενικές γραμμές, η διαφορά τη θερμοκρασία των δύο υλικών είναι της τάξεως των 2°C.

Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει επίσης θερμοκρασιακές μεταβολές στο εσωτερικό του, όπως φαίνεται στο επισημασμένο ευθύγραμμο τμήμα του θερμογραφήματος της Εικόνας 68 (από 24,2°C έως 25,1°C). Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στο θερμογράφημα της Εικόνας 71 (τμήμα Αr3) και στο επισημασμένο τμήμα του θερμογραφήματος της Εικόνας 72.

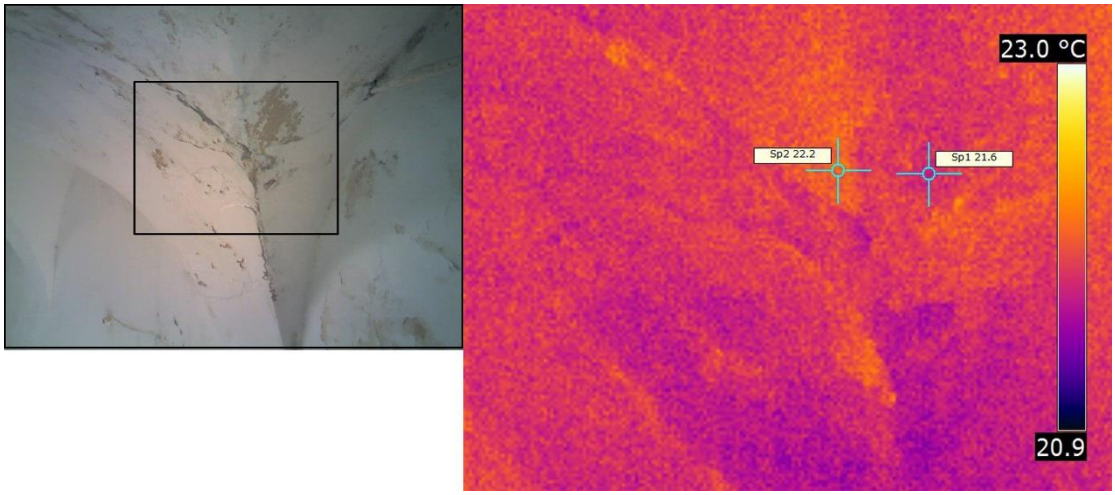
Τα δύο δομικά υλικά (ασβεστόλιθος και ψαμμίτης) της πρόσοψης της ιστορικής κατασκευής παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικές θερμοκρασίες. Κάτι τέτοιο φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 68, όπου παρατηρείται μία διαφορά της τάξεως των 2°C ανάμεσα στα δύο υλικά (διαφορά κατά μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων που έχουν επισημανθεί στο θερμογράφημα). Κάτι τέτοιο συμβαίνει καθώς ο ασβεστόλιθος είναι πολύ πιο συμπαγής από τον ψαμμίτη (βλ. §4.2.3). Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα αριστερά της πόρτας, όπως στο θερμογράφημα της Εικόνας 75. Επιπλέον, καθώς η διαφορά αυτή είναι περίπου ίδια με τη θερμοκρασιακή διαφορά που παρουσιάζει ο ψαμμίτης με τους δύο λίθους που βρίσκονται στο ανώτερο ανατολικό και στο ανώτερο δυτικό τμήμα της εισόδου (θερμογράφημα της Εικόνας 77 και θερμογράφημα της Εικόνας 82), εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι λίθοι αυτοί είναι ασβεστόλιθοι και μάλιστα είναι όμοιοι με τον ασβεστόλιθο που χρησιμοποιείται στην πρόσοψη.

Το θερμογράφημα της Εικόνας 93 και το θερμογράφημα της Εικόνας 92 αντιστοιχούν στην περιοχή ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής, η οποία παρουσιάζει εκτός επιπέδου κάμψη. Οι ρωγμές που φαίνονται μακροσκοπικά παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία. Επιπλέον, φαίνεται ότι η κύρια ρωγμή έχει δημιουργήσει ένα δίκτυο μικρότερων ρωγμών στην περιοχή, τμήματα του οποίου δεν είναι ορατά μακροσκοπικά. Ακόμη, η δεξιά περιοχή των θερμογραφημάτων παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες, σε σύκριση με την αριστερή περιοχή των θερμογραφημάτων. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες αποτελούν ένδειξη υγρασίας και πιθανών παρουσίας αλάτων σε αυτό το τμήμα της τοιχοποιίας.

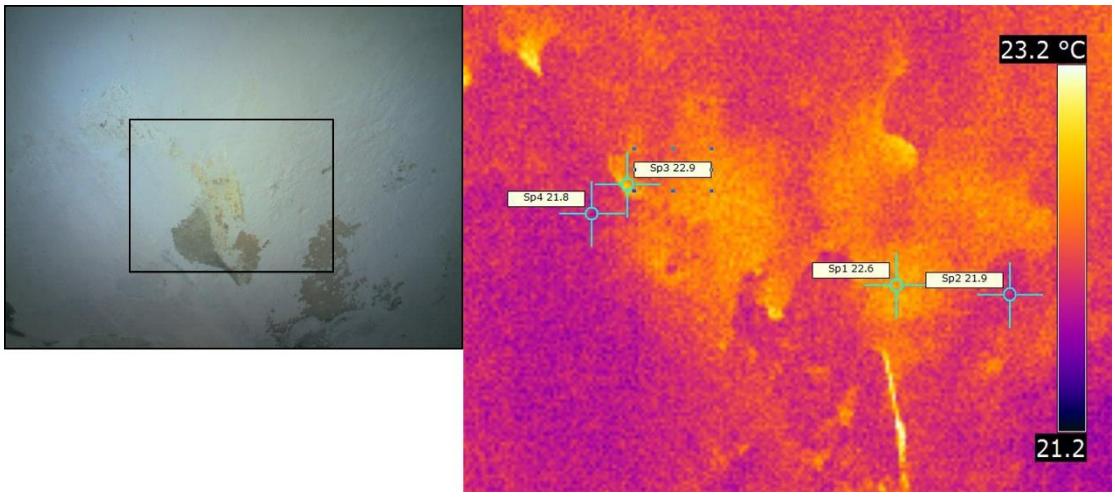
Μακροσκοπικά, φαίνονται ορισμένες λευκές διαγραμμίσεις στο πάνω αριστερά τμήμα της εισόδου. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 76, οι διαγραμμίσεις αυτές δεν προκαλούν διαφορά στη θερμοκρασία της τοιχοποιίας και συνεπώς δεν ευθύνονται για την παρατήρηση κάποιας φθοράς.

Το μεταλλικό στοιχείο που έχει τοποθετηθεί, όπως φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 91 έχει προφανώς μεγαλύτερη θερμοκρασία από την υπόλοιπη τοιχοποιία, λόγω του ότι έχει πολύ χαμηλή θερμοχωρητικότητα. Με άλλα λόγια, καθώς οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί κατά τις μεσημεριανές ώρες, το μέταλλο έχει θερμανθεί περισσότερο από την τοιχοποιία.

Ακόμη, η σύγχρονη τοιχοποιία που περιβάλει την ιστορική κατασκευή έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 80. Η θερμοκρασία της είναι λίγο πάνω από τους 25^{o}C. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται για το αριστερό τμήμα του θερμογραφήματος της Εικόνας 79 και για το δεξί τμήμα του θερμογραφήματος θερμογράφημα της Εικόνας 81. Στα σημεία, μάλιστα, που η ιστορική και η σύγχρονη τοιχοποιία βρίσκονται σε επαφή, όπως στο θερμογράφημα της Εικόνας 73, ο ψαμμίτης εμφανίζει σημειακά χαμηλότερη θερμοκρασία, καθώς θερμότητα μεταφέρεται από το θερμότερο στο ψυχρότερο υλικό.

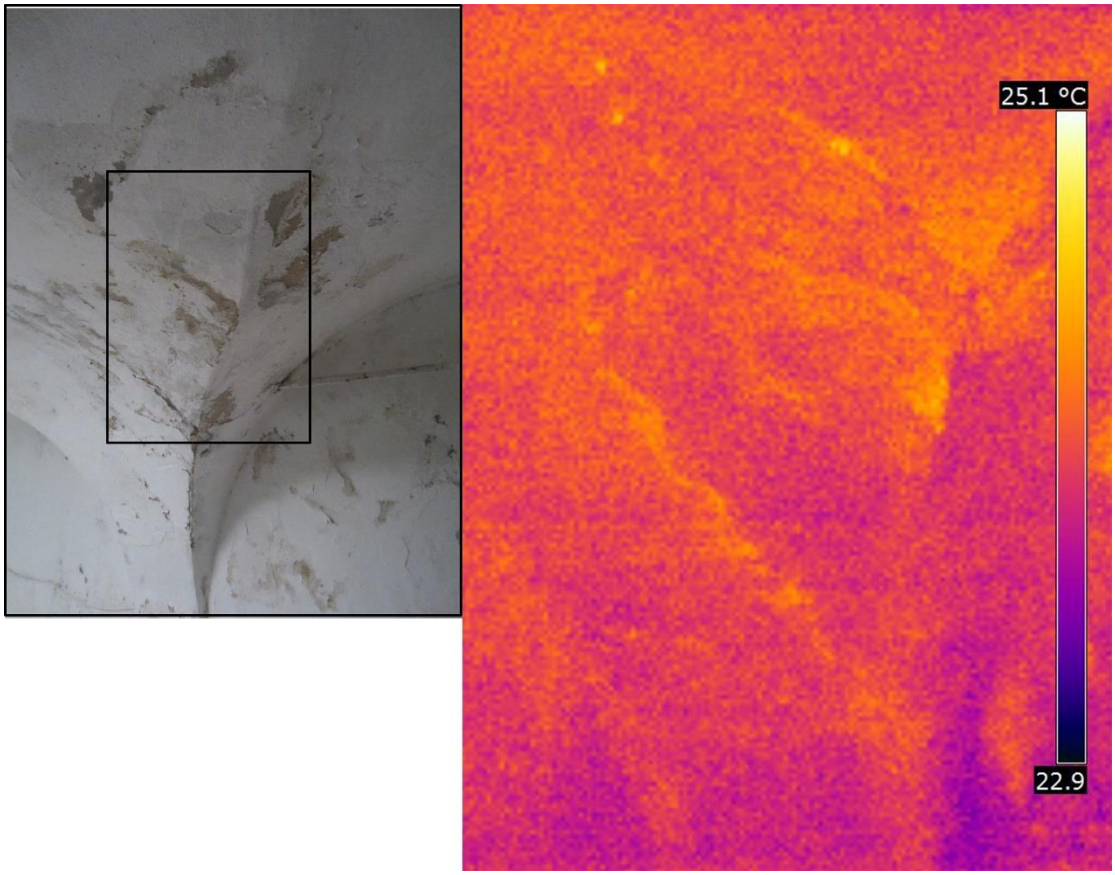


Εικόνα 45: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής

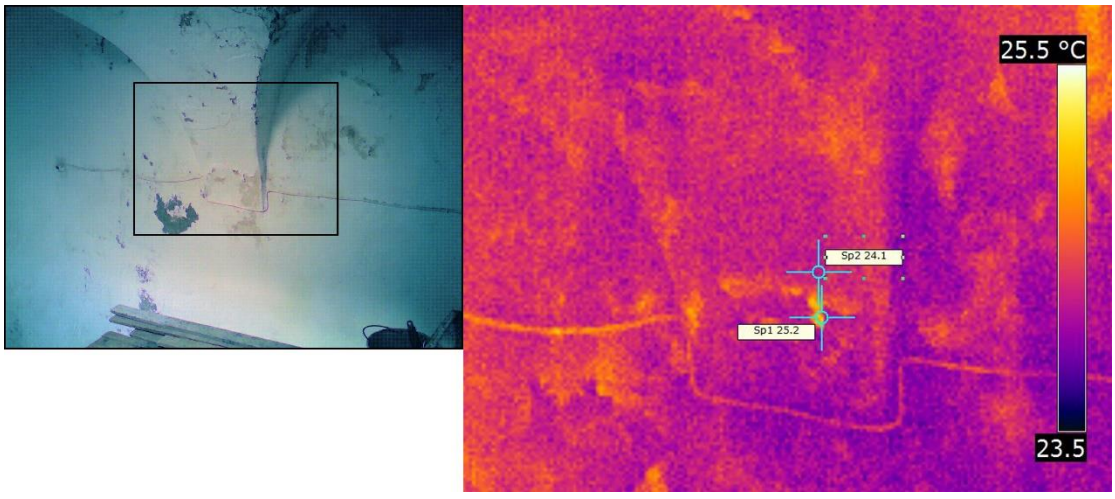


Εικόνα 46: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.

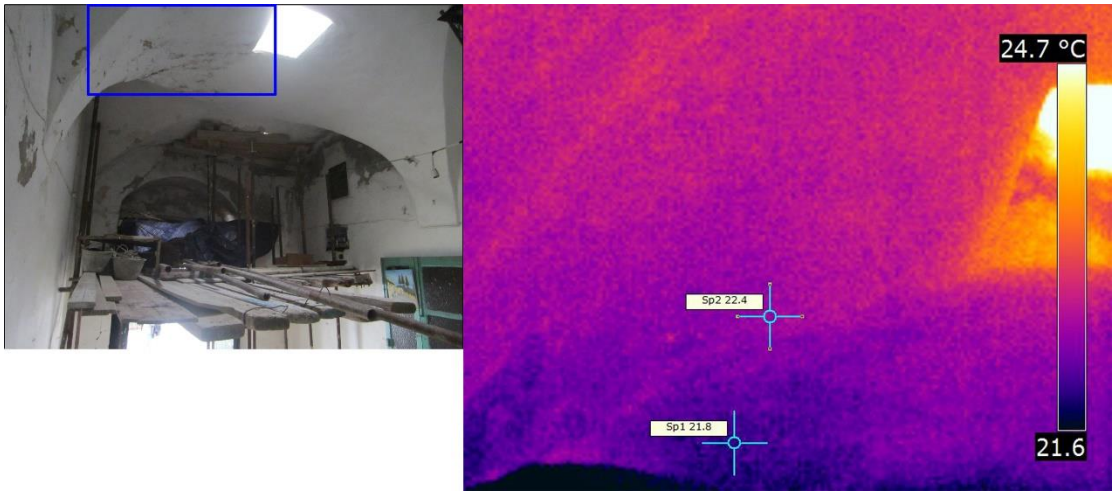
.



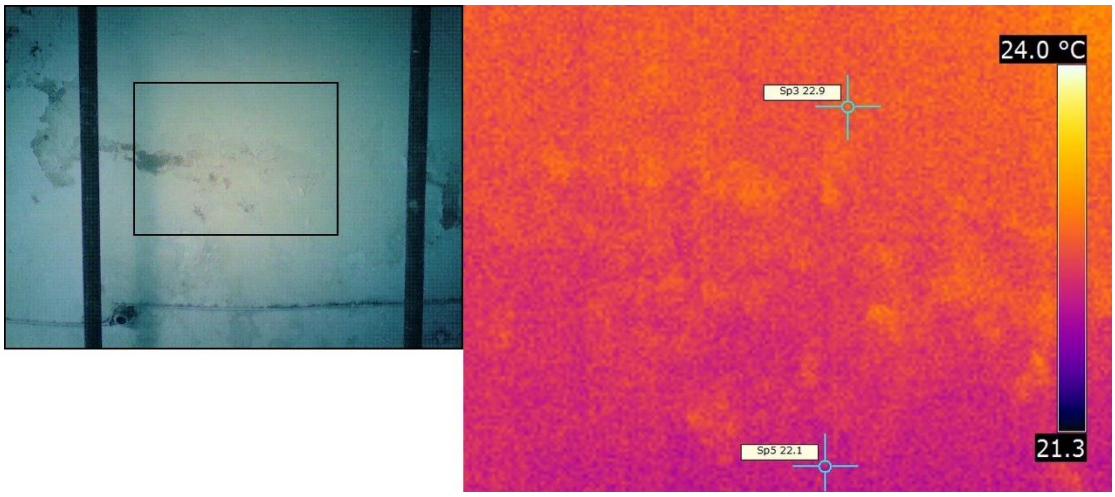
Εικόνα 47: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



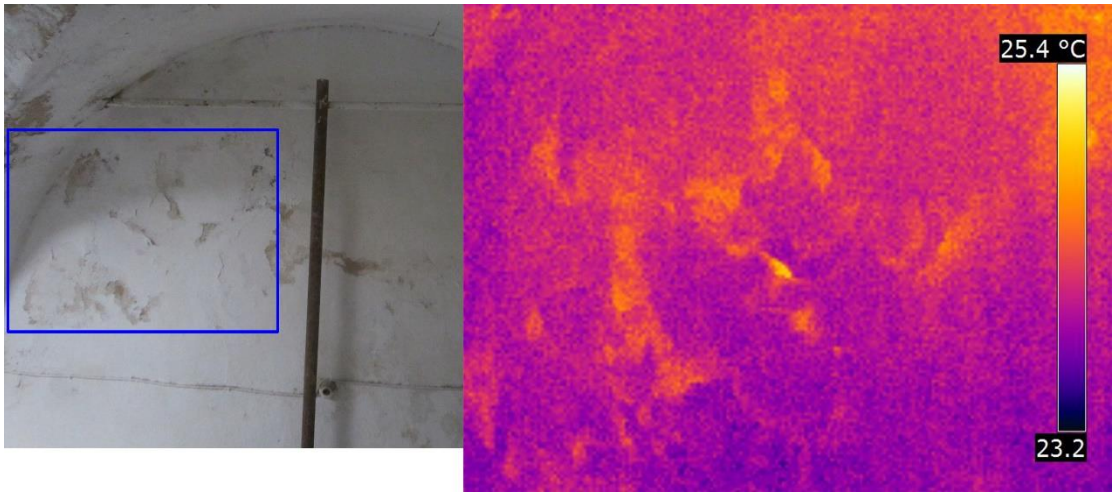
Εικόνα 48: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



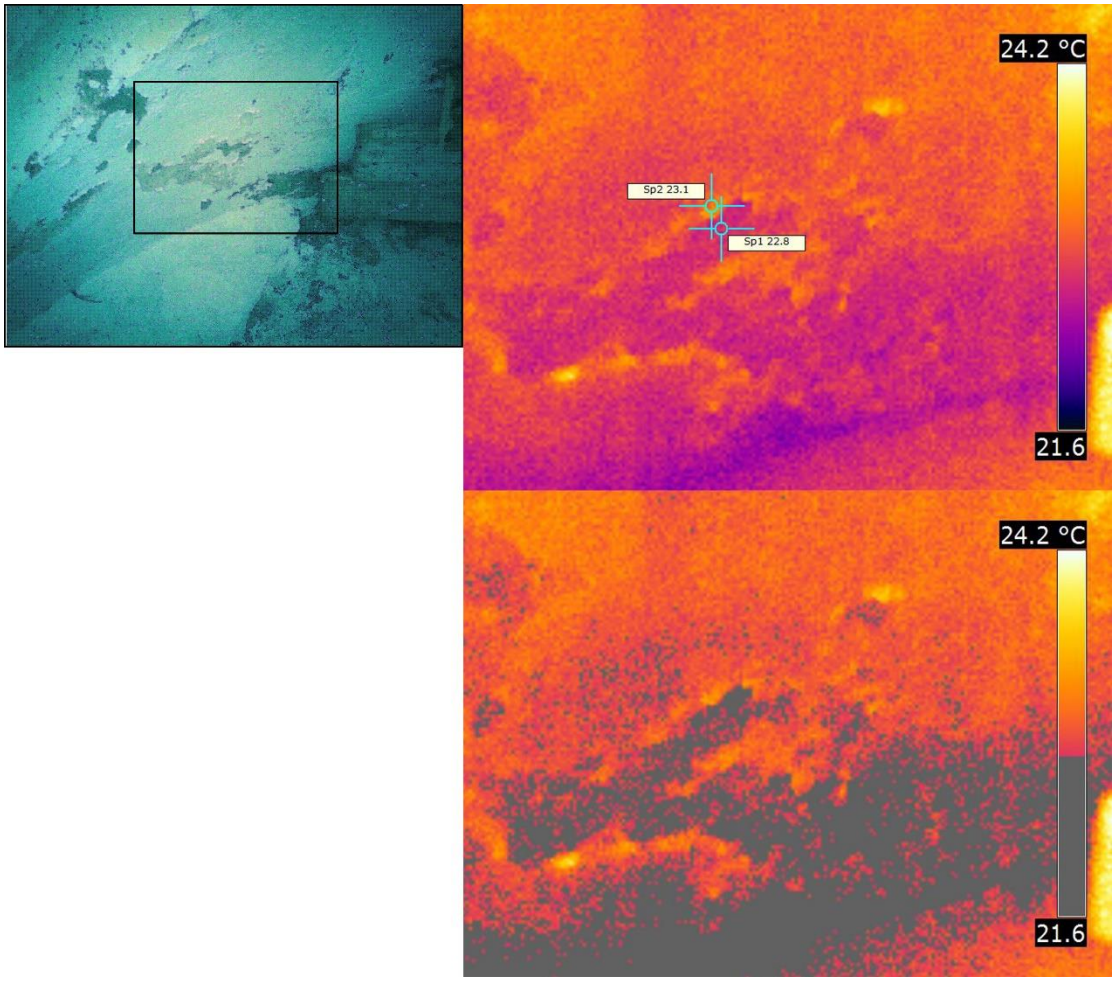
Εικόνα 49: Θερμογράφημα της δυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



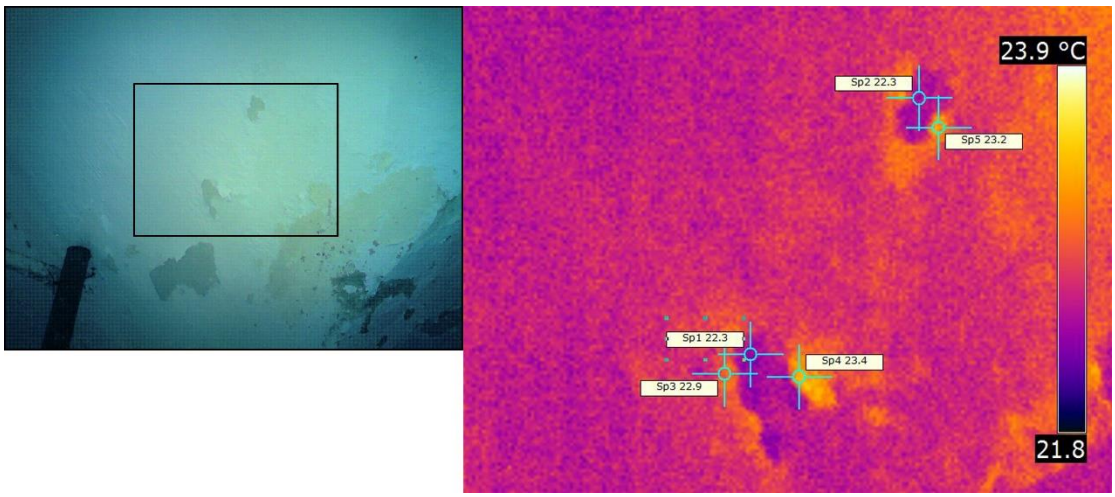
Εικόνα 50: Θερμογράφημα περιοχής της δυτικής τοιχοποιίας της ιστορικής κατασκευής.



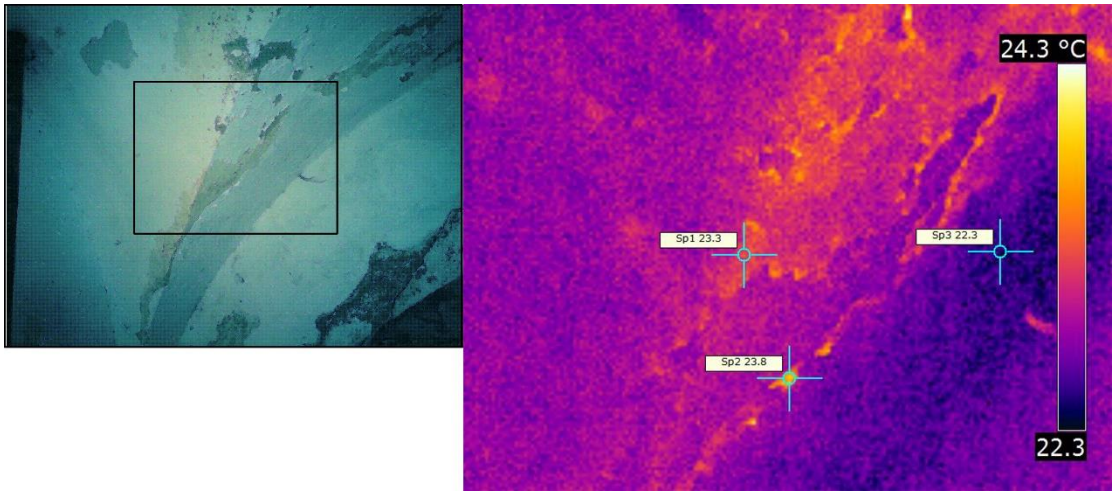
Εικόνα 51: Θερμογράφημα περιοχής της δυτικής τοιχοποιίας της ιστορικής κατασκευής.



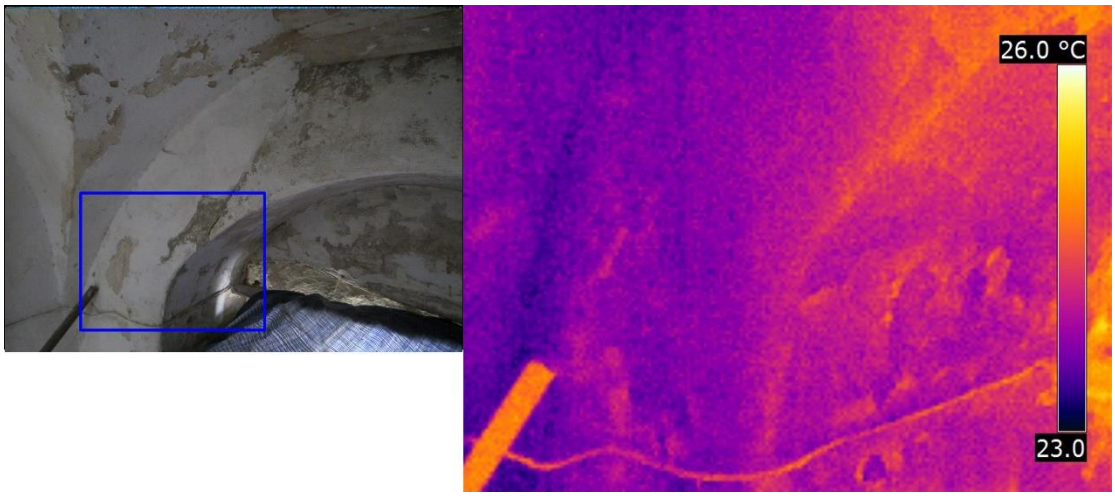
Εικόνα 52: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



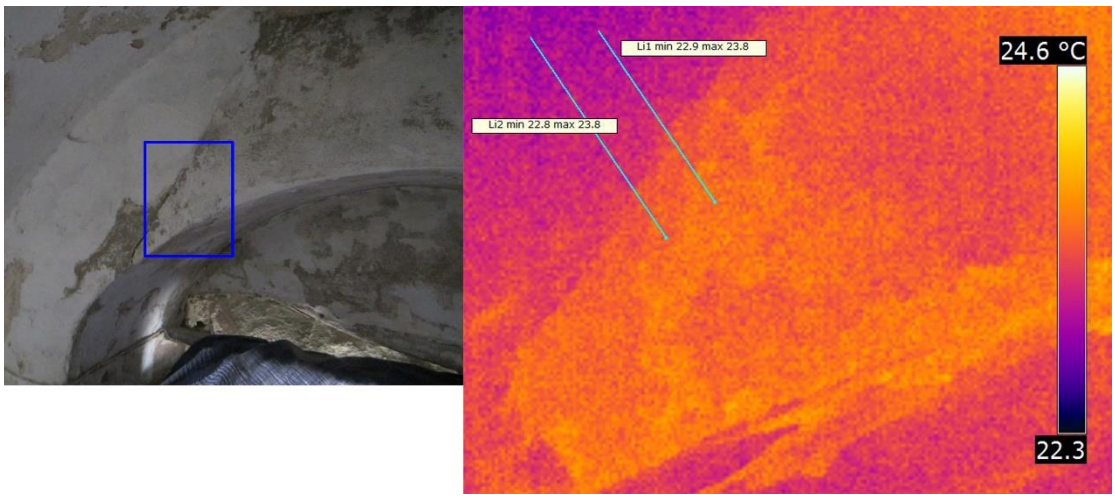
Εικόνα 53: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



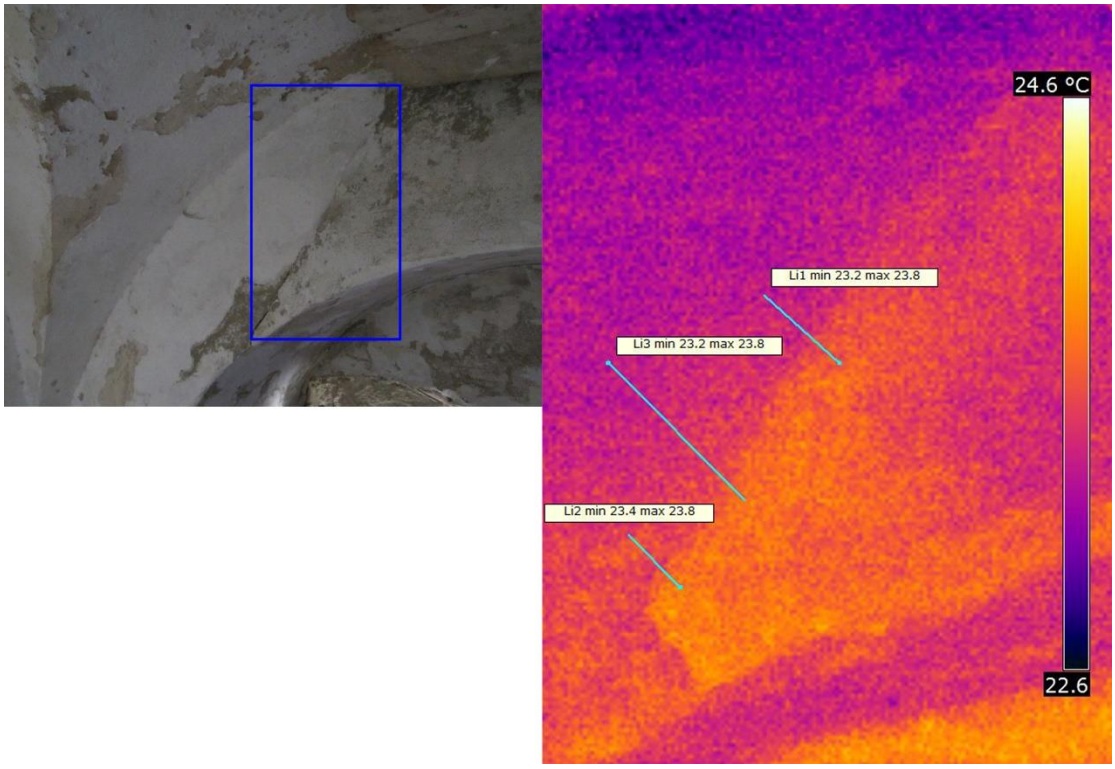
Εικόνα 54: Θερμογράφημα της βορειοδυτικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



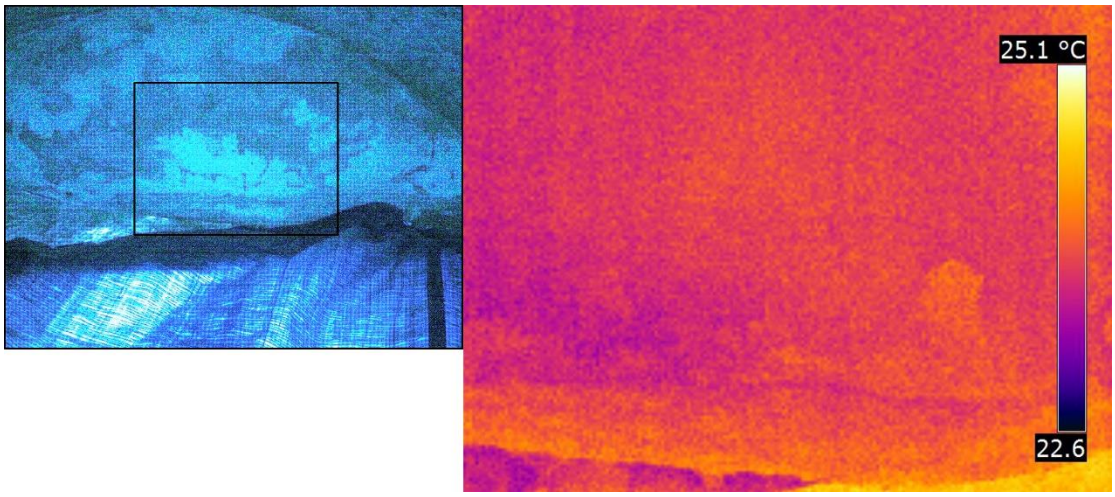
Εικόνα 55: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



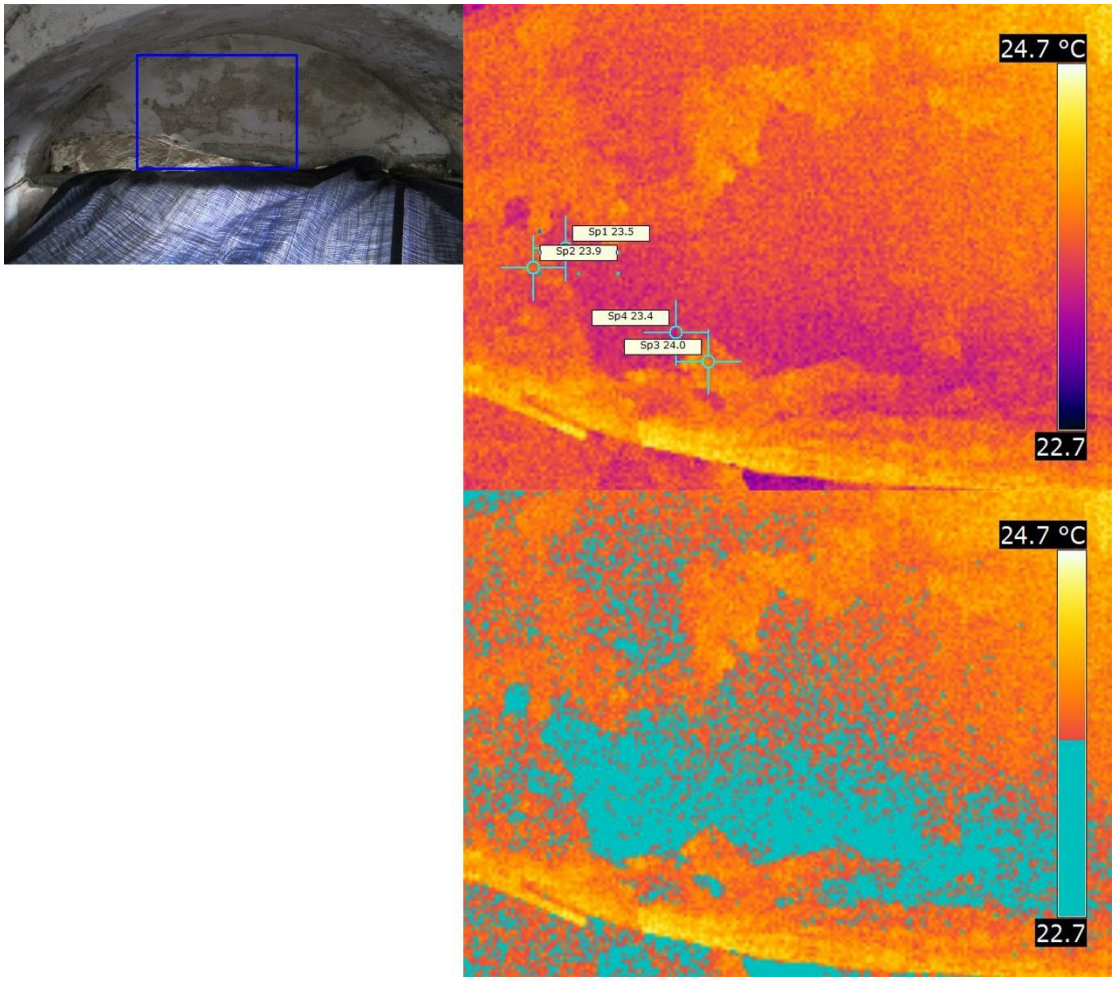
Εικόνα 56: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



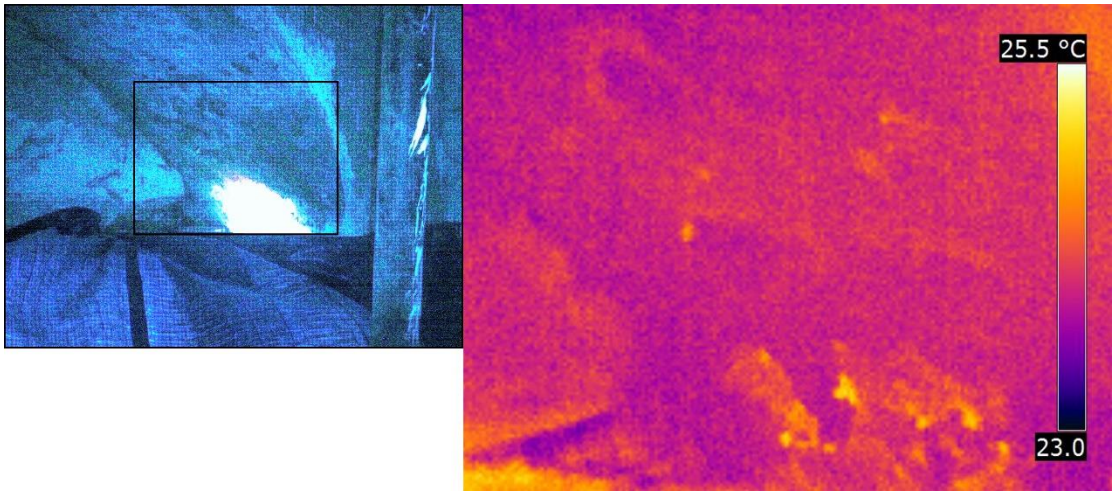
Εικόνα 57: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



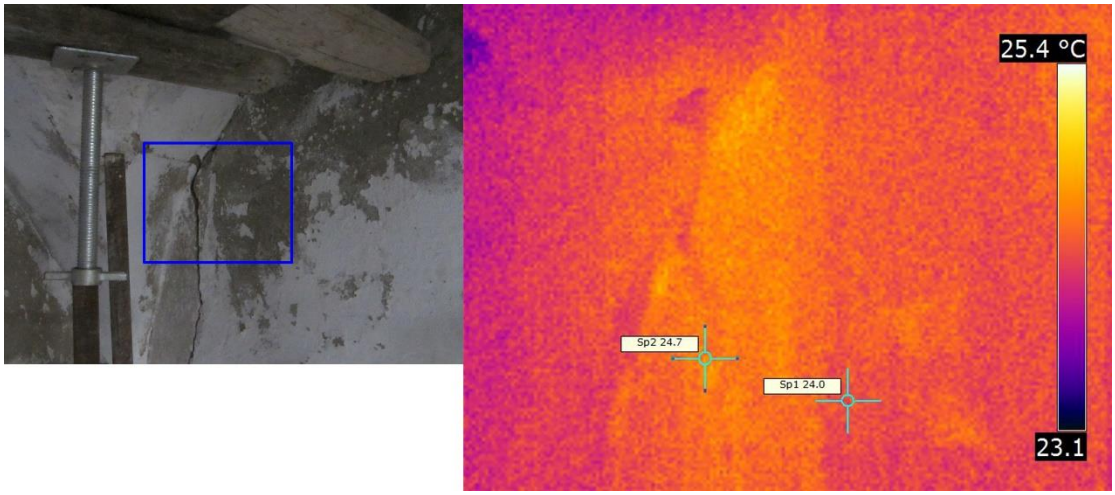
Εικόνα 58: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



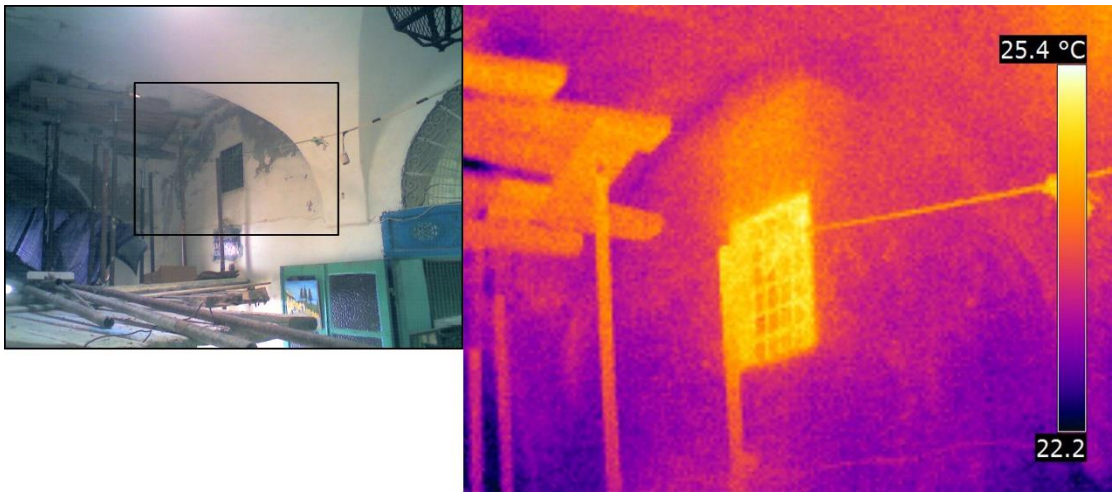
Εικόνα 59: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



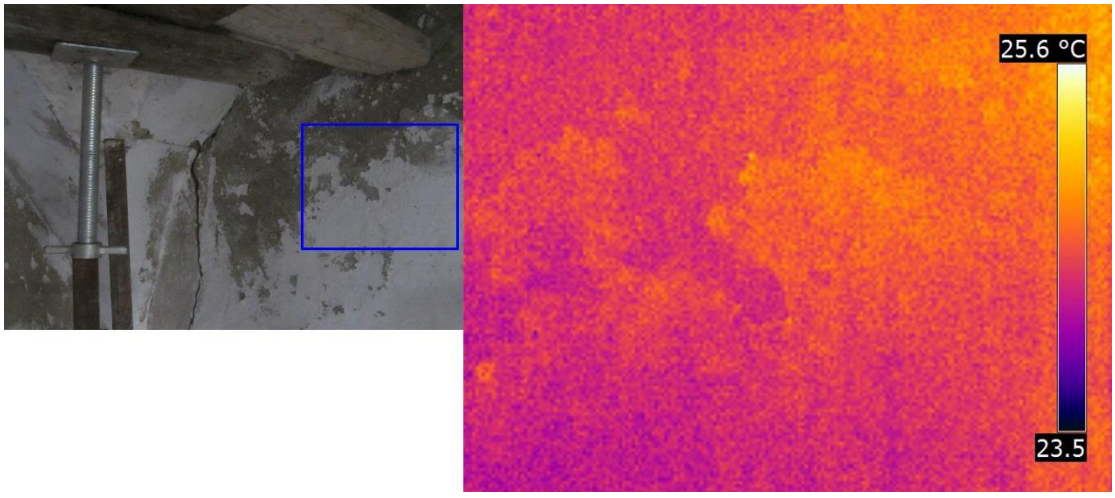
Εικόνα 60: Θερμογράφημα της περιοχής του τόξου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



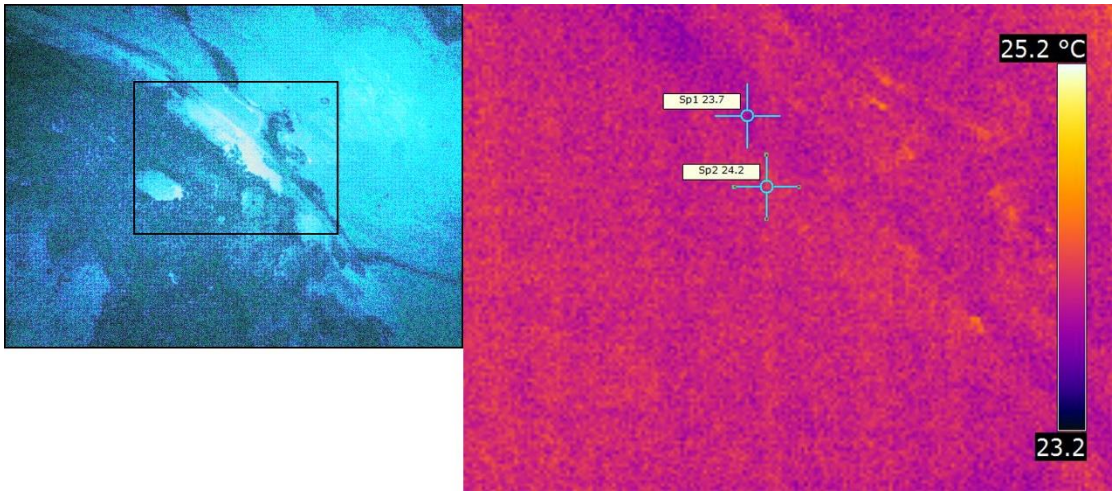
Εικόνα 61: Θερμογράφημα της βορειοανατολικής περιοχής της βάσης του θόλου, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



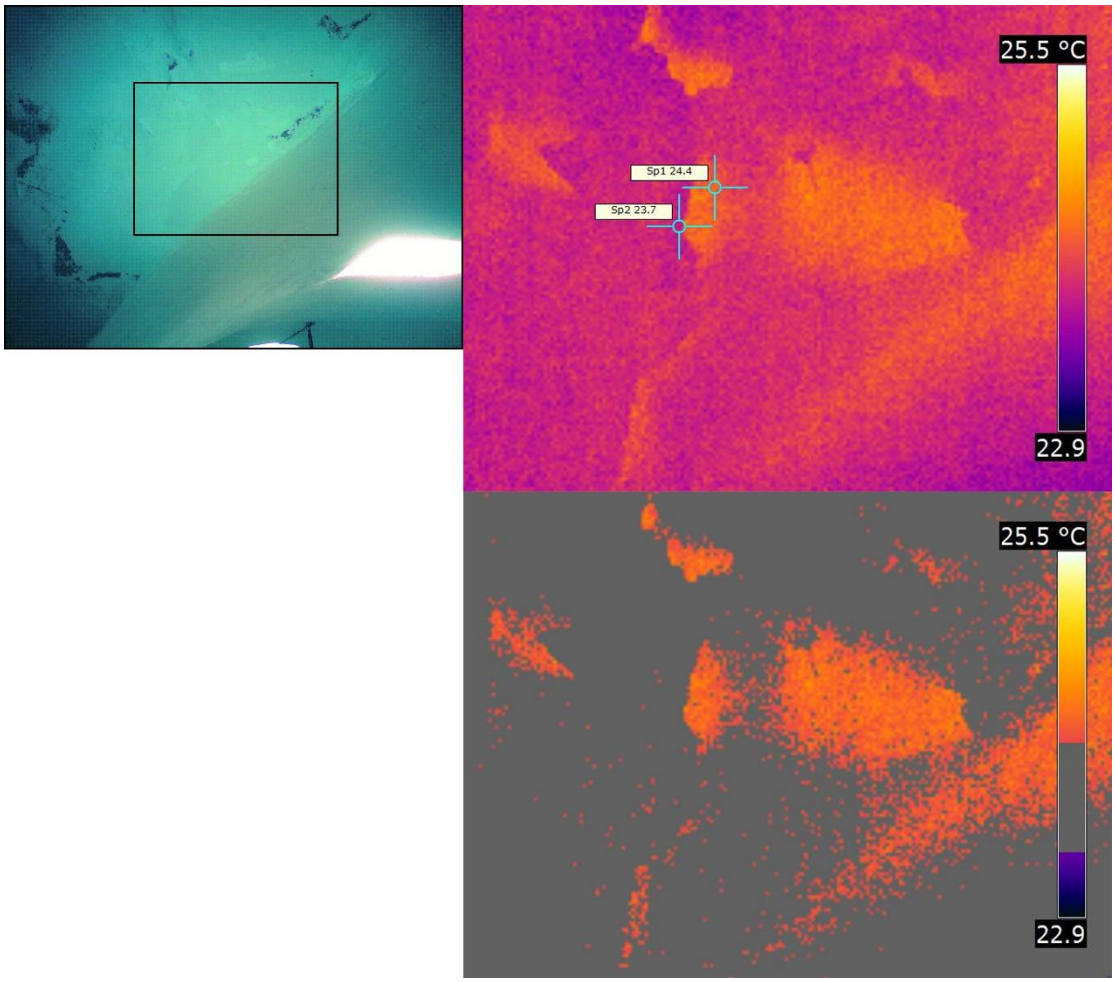
Εικόνα 62: Θερμογράφημα περιοχής της ανατολικής τοιχοποιίας, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



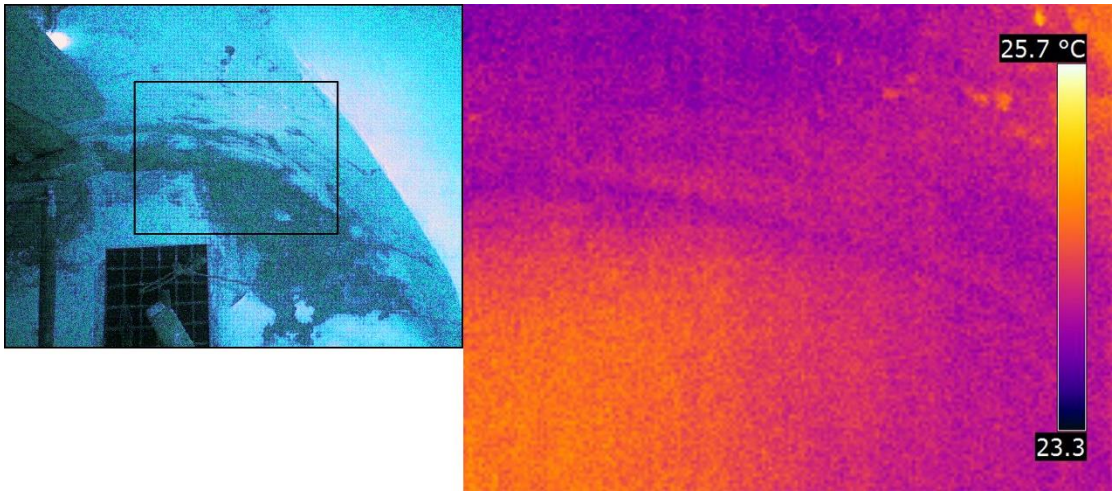
Εικόνα 63: Θερμογράφημα περιοχής της ανατολικής τοιχοποιίας, στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



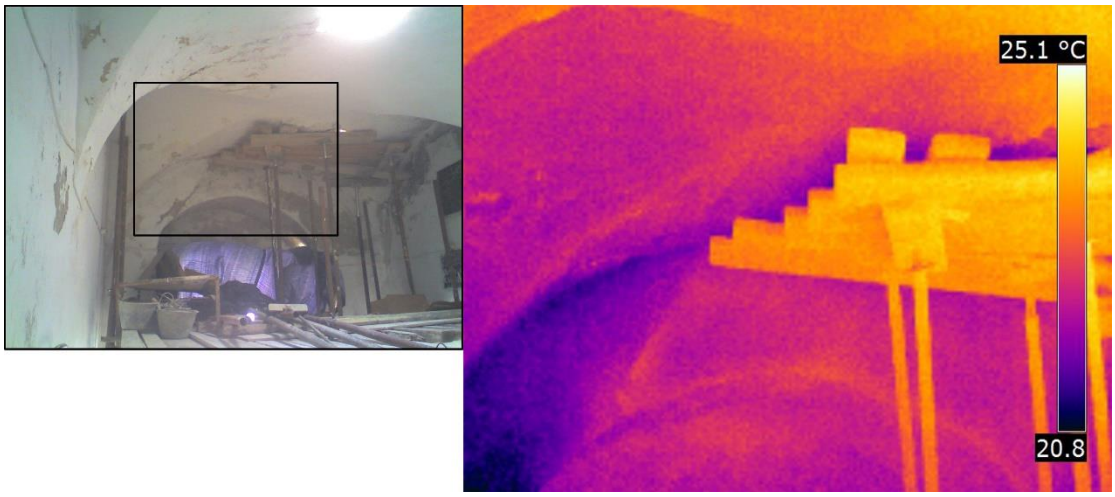
Εικόνα 64: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



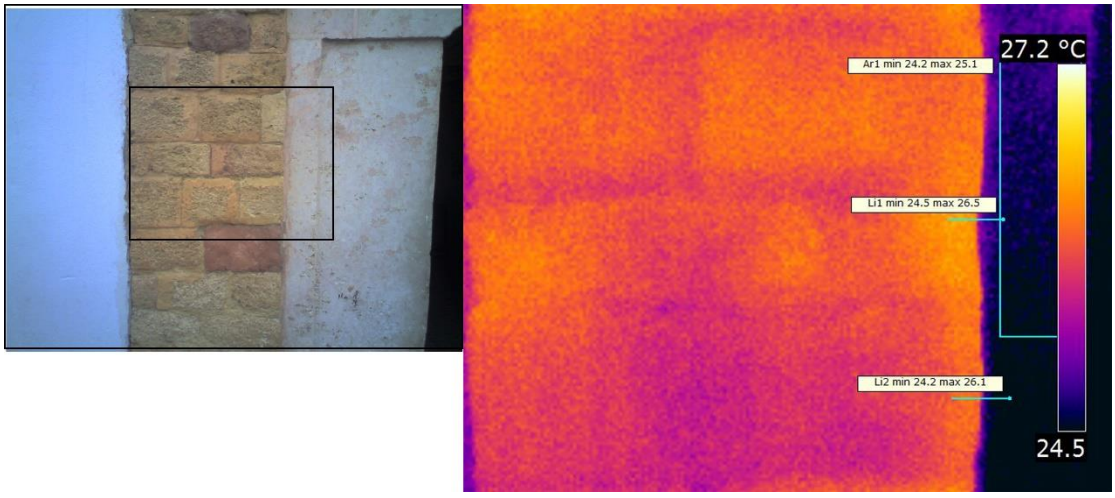
Εικόνα 65: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



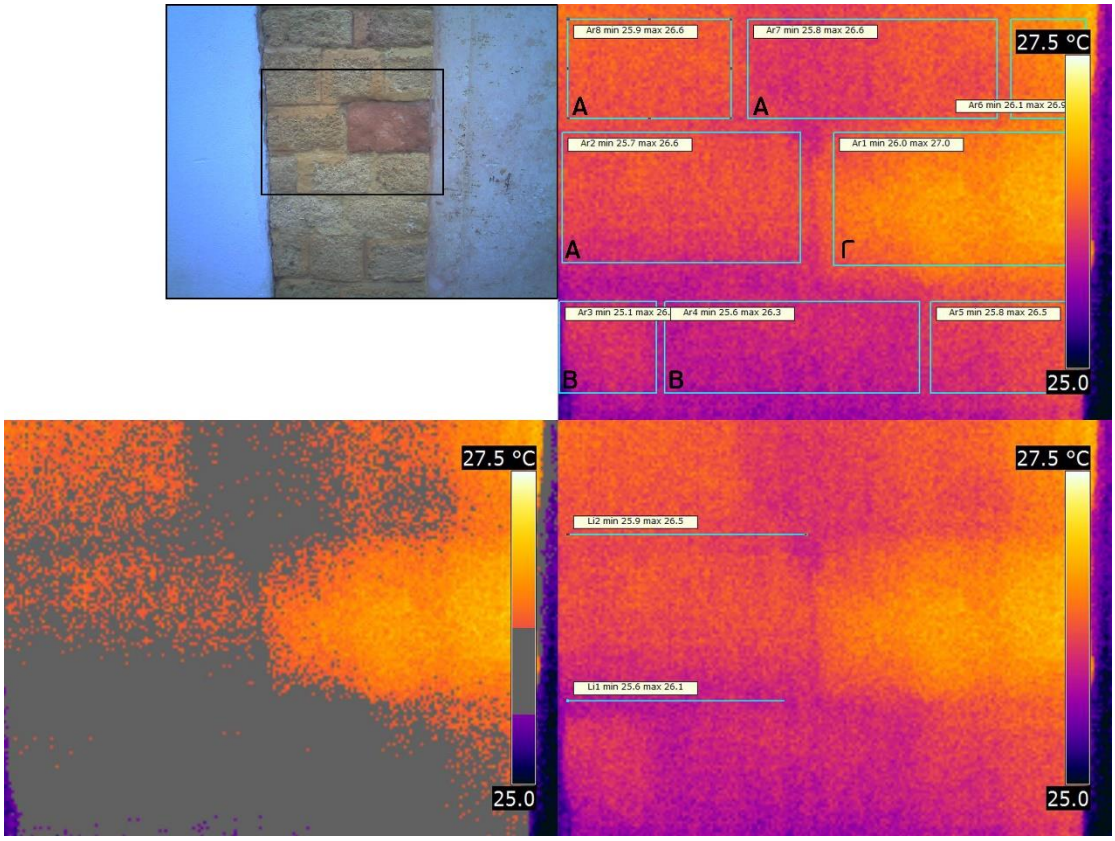
Εικόνα 66: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



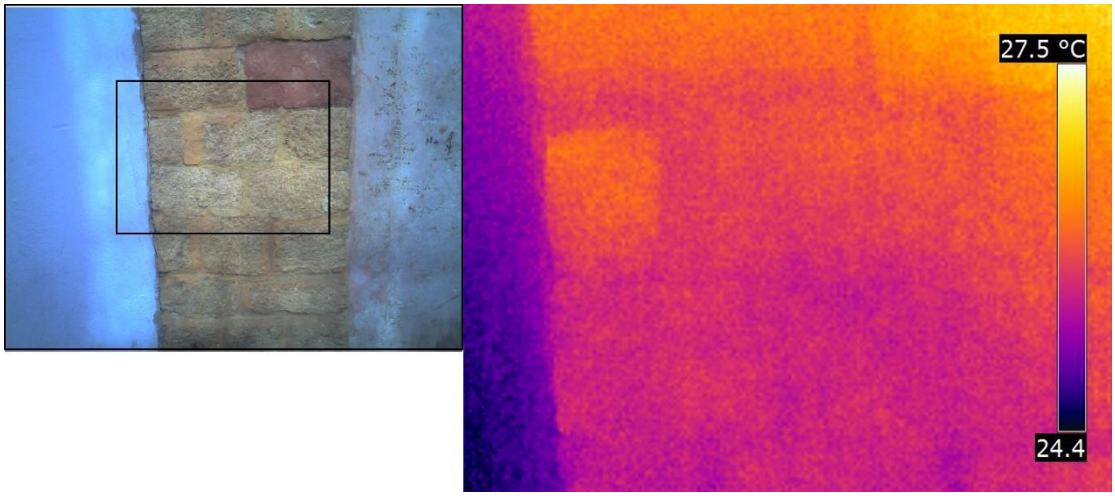
Εικόνα 67: Θερμογράφημα περιοχής του εσωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



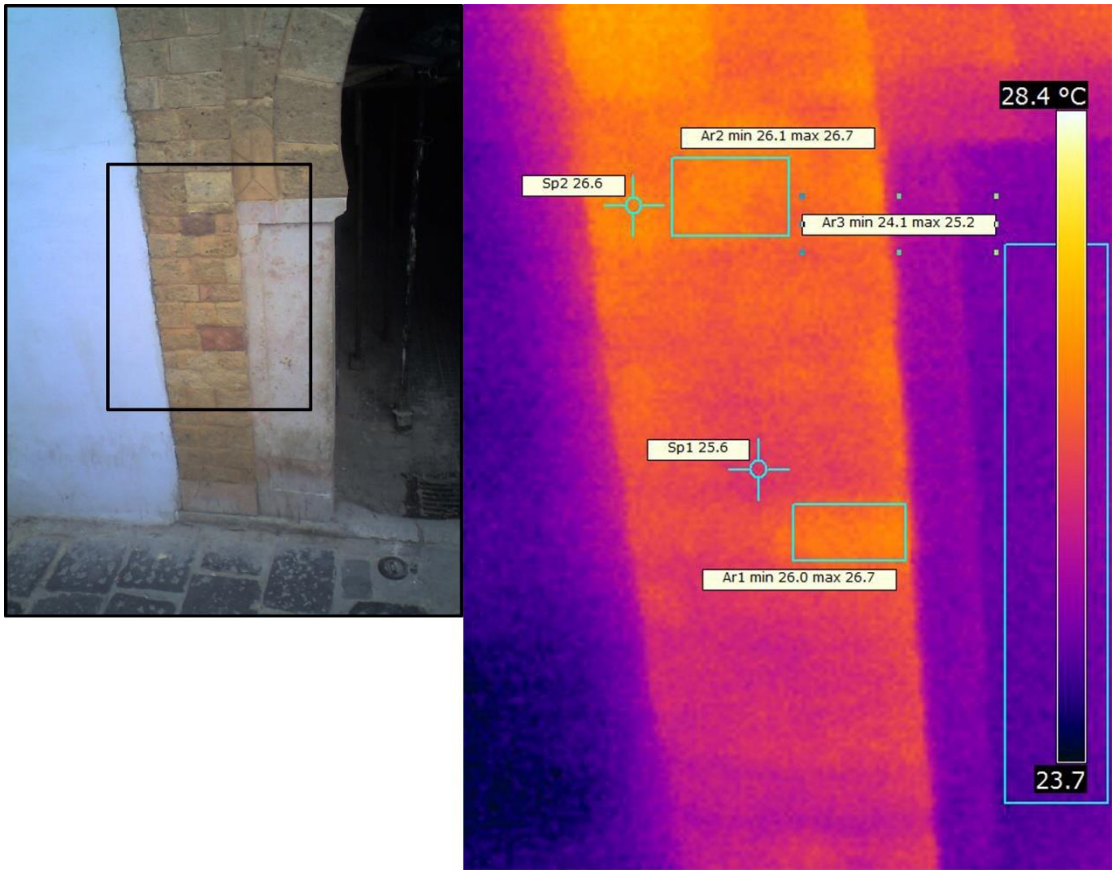
Εικόνα 68: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



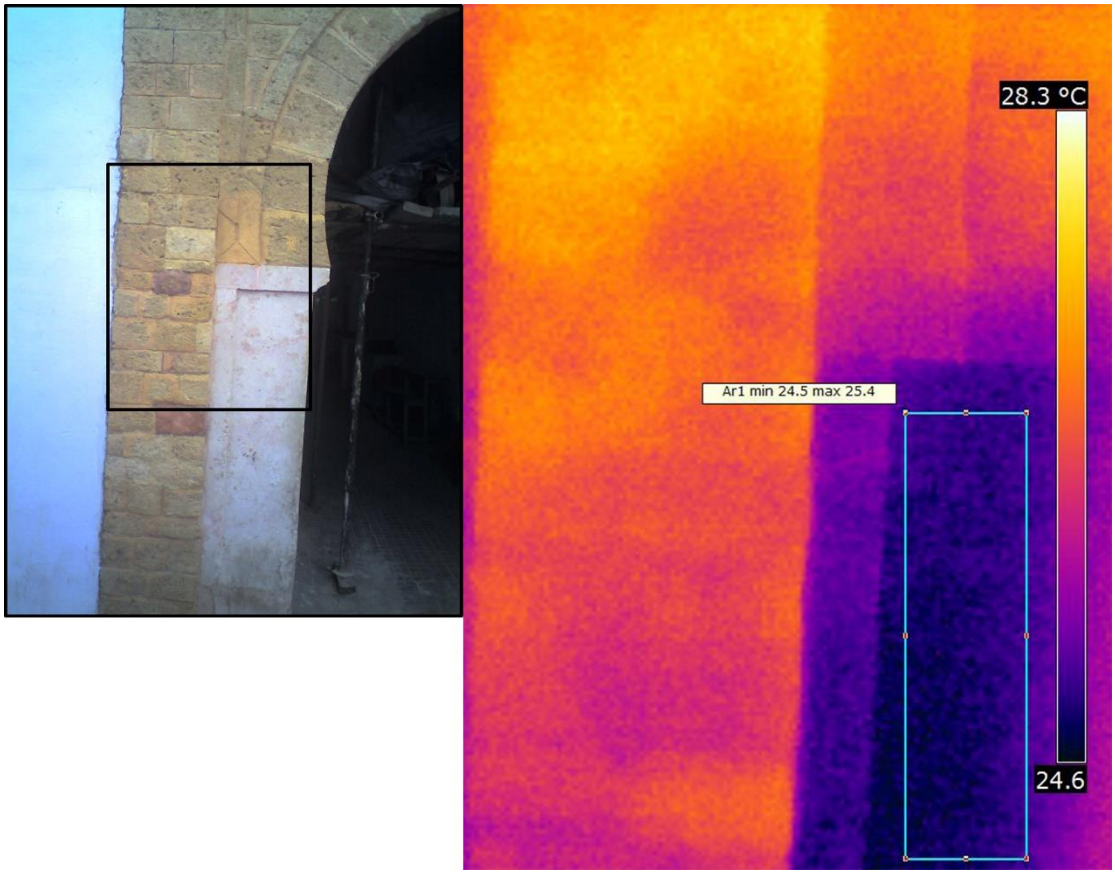
Εικόνα 69: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής. **Α.** Ψαμμίτες με υψηλότερη μέση θερμοκρασία. **Β.** Ψαμμίτες με χαμηλότερη μέση θερμοκρασία. **Γ.** Ψαμμίτης επικαλυμμένος με το κόκκινου – πορτοκαλί χρώματος επίχρισμα, ως τμήμα προγενέστερης επέμβασης αποκατάστασης της ιστορικής κατασκευής.



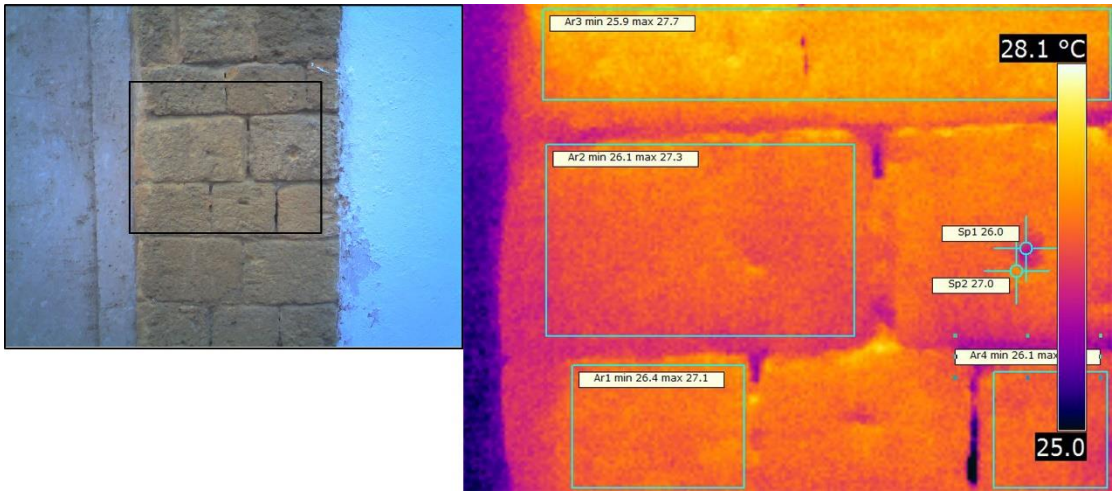
Εικόνα 70: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



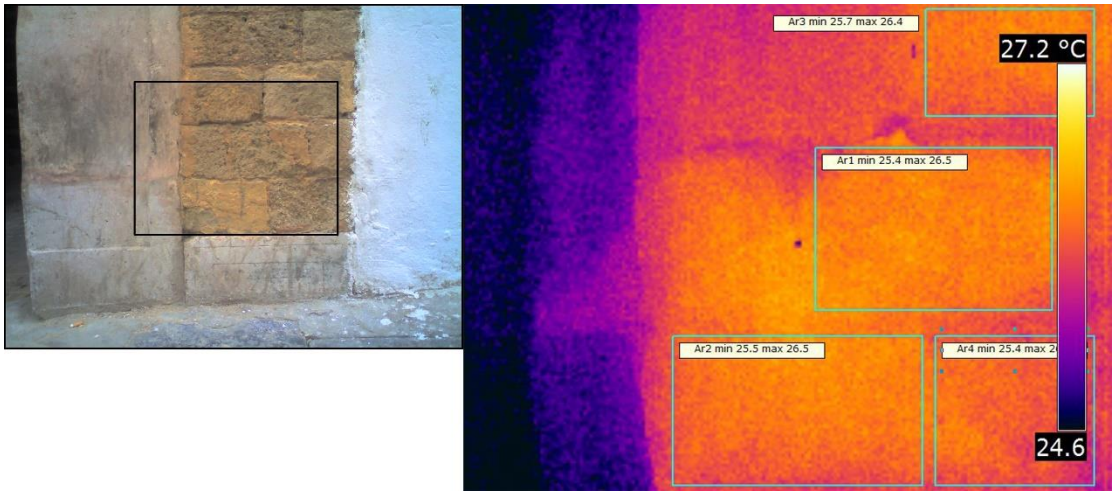
Εικόνα 71: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



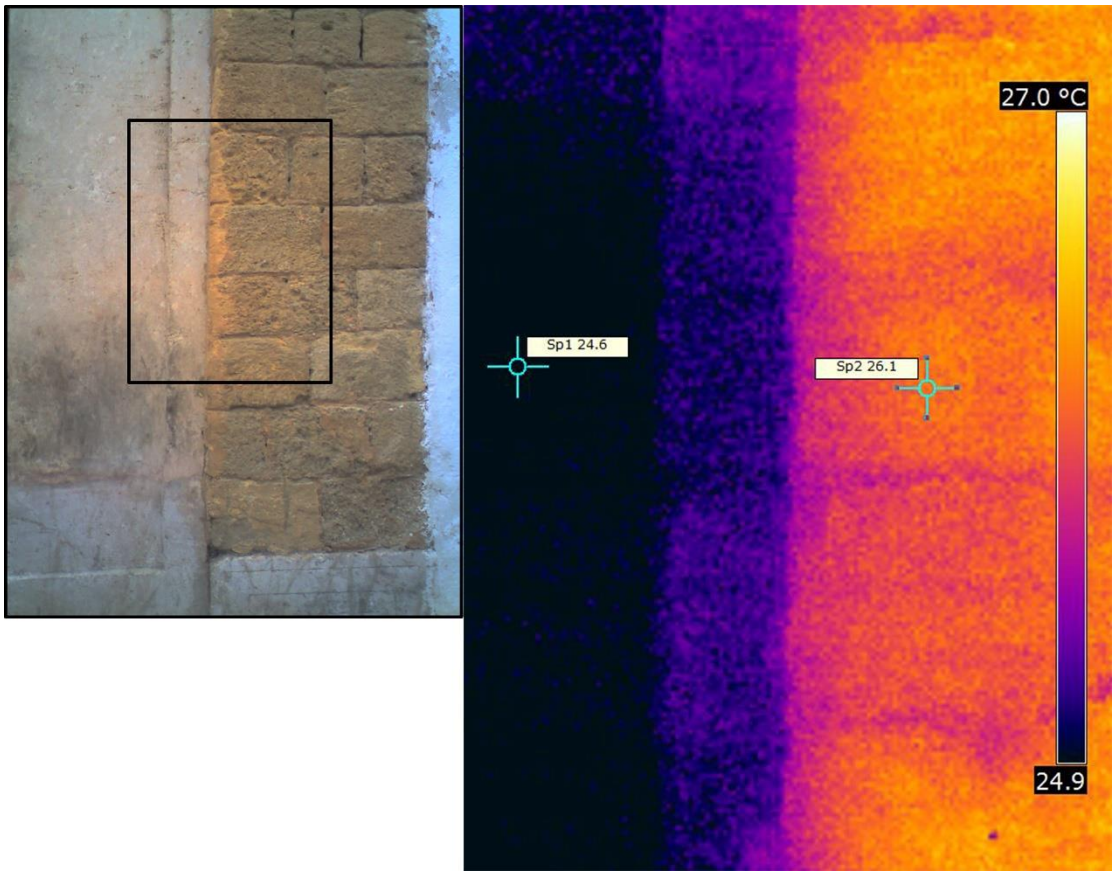
Εικόνα 72: Θερμογράφημα της κατώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



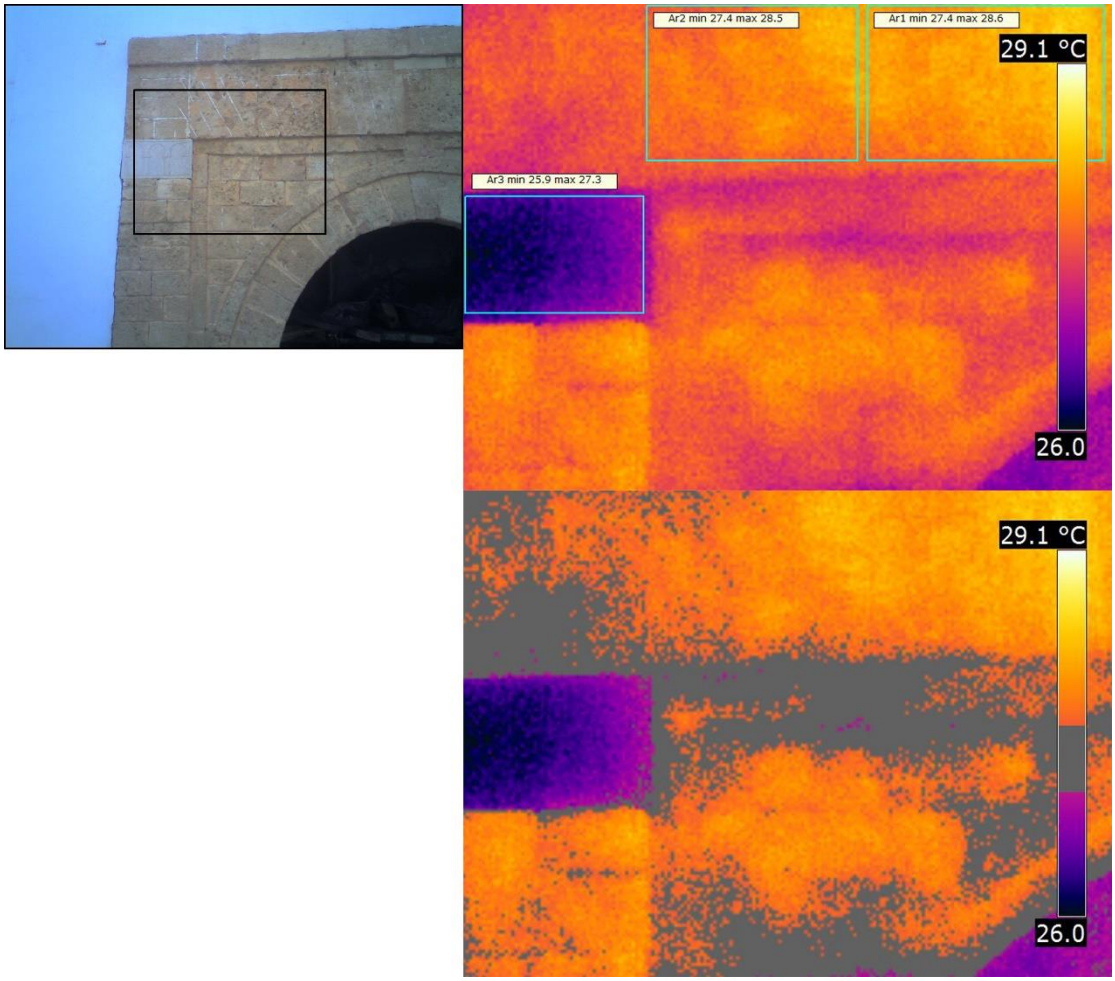
Εικόνα 73: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



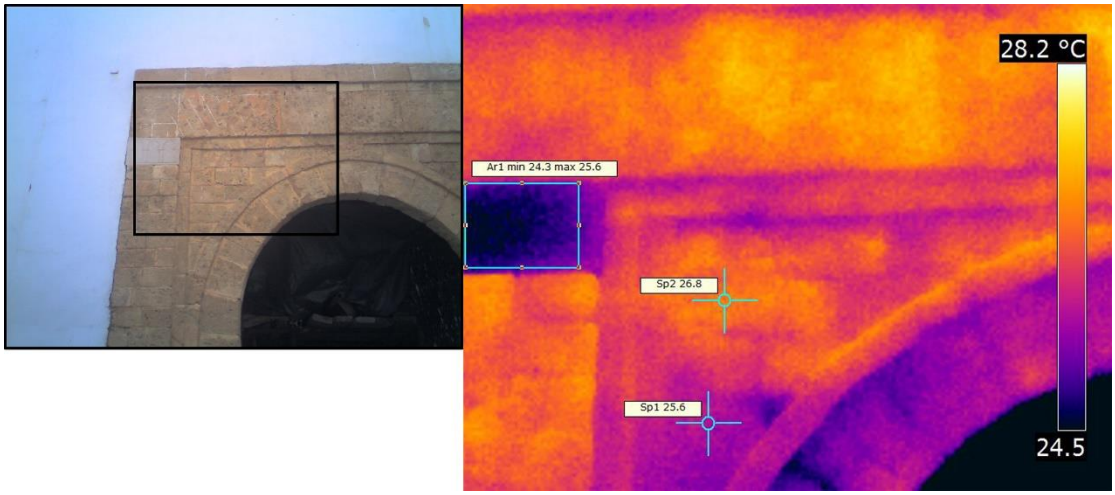
Εικόνα 74: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



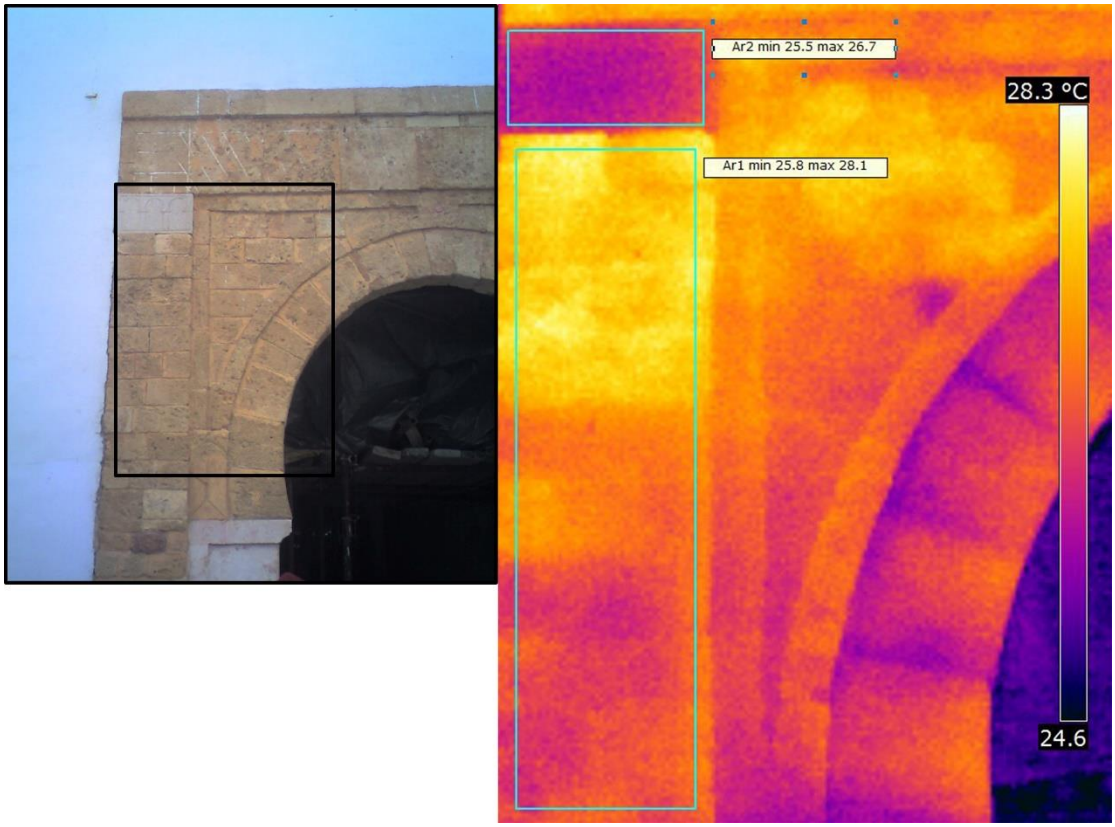
Εικόνα 75: Θερμογράφημα της κατώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



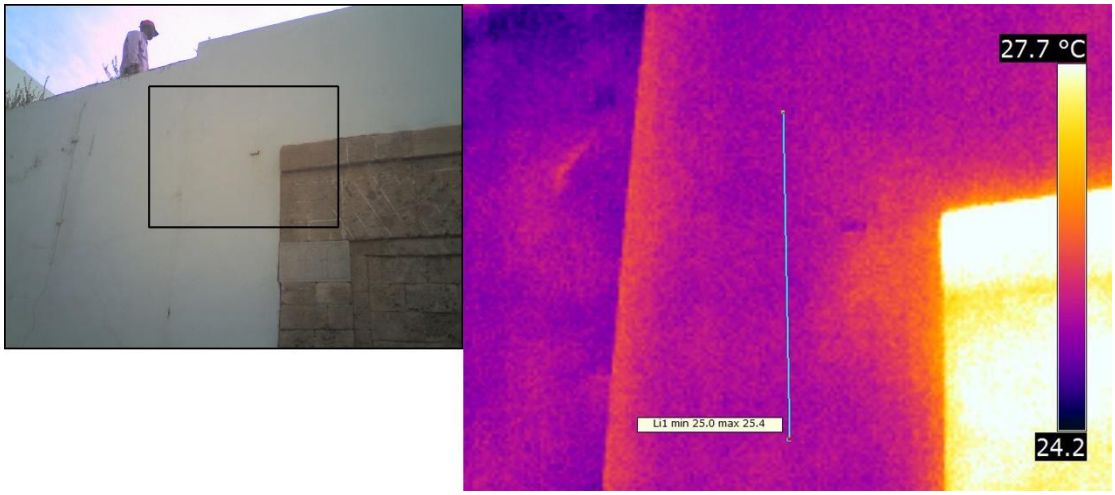
Εικόνα 76: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



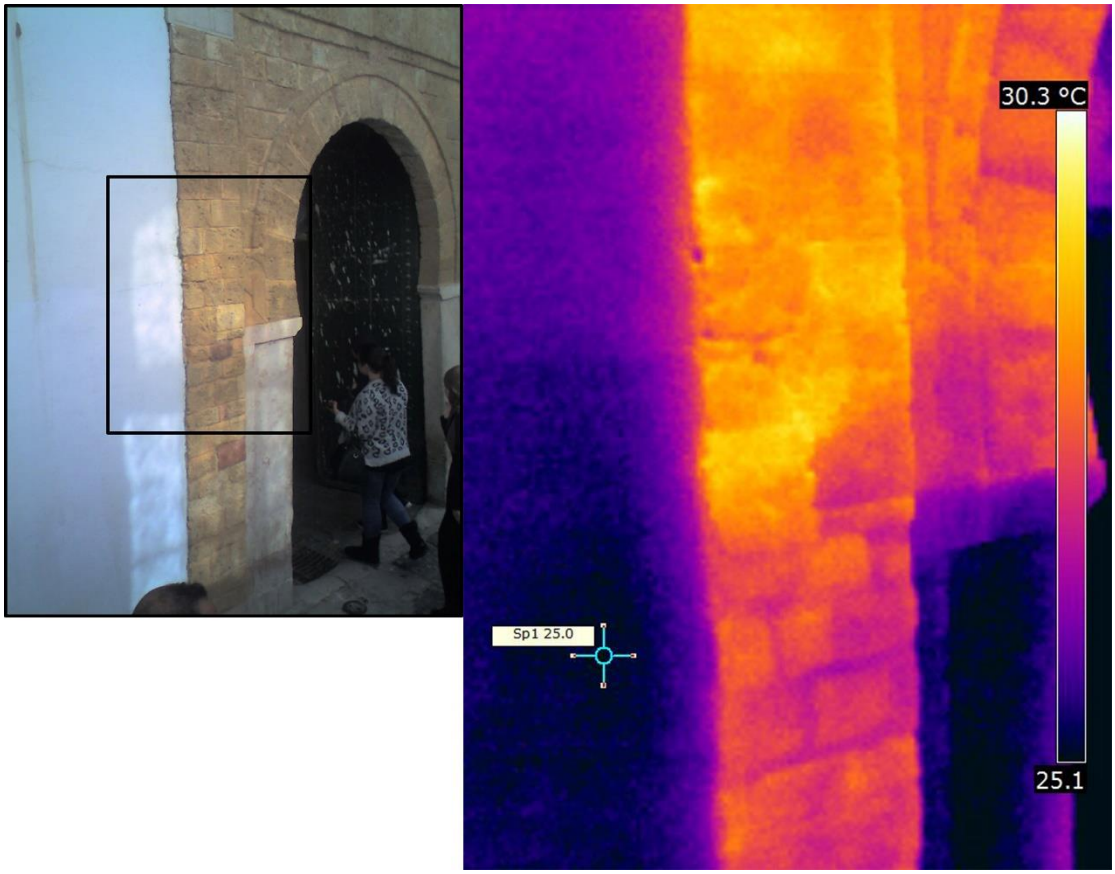
Εικόνα 77: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



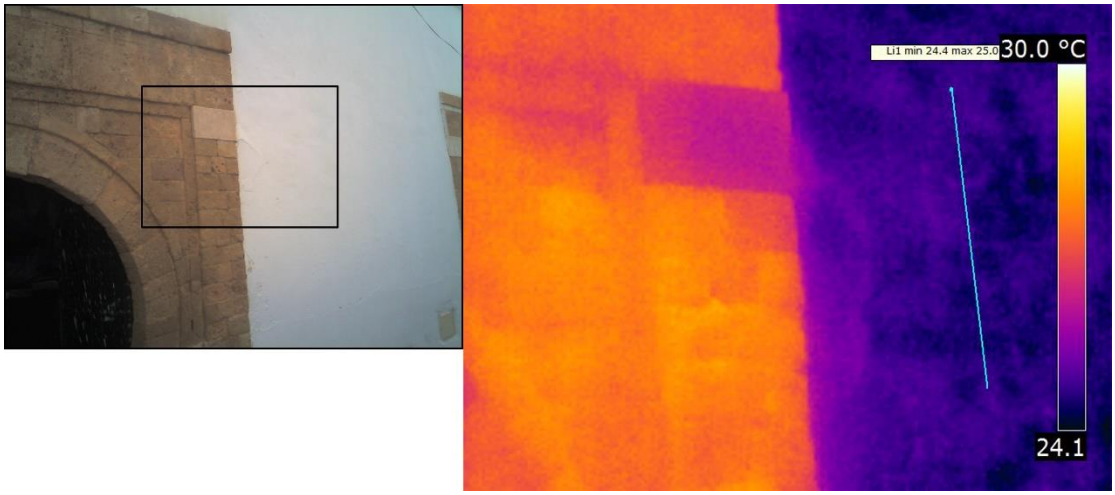
Εικόνα 78: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



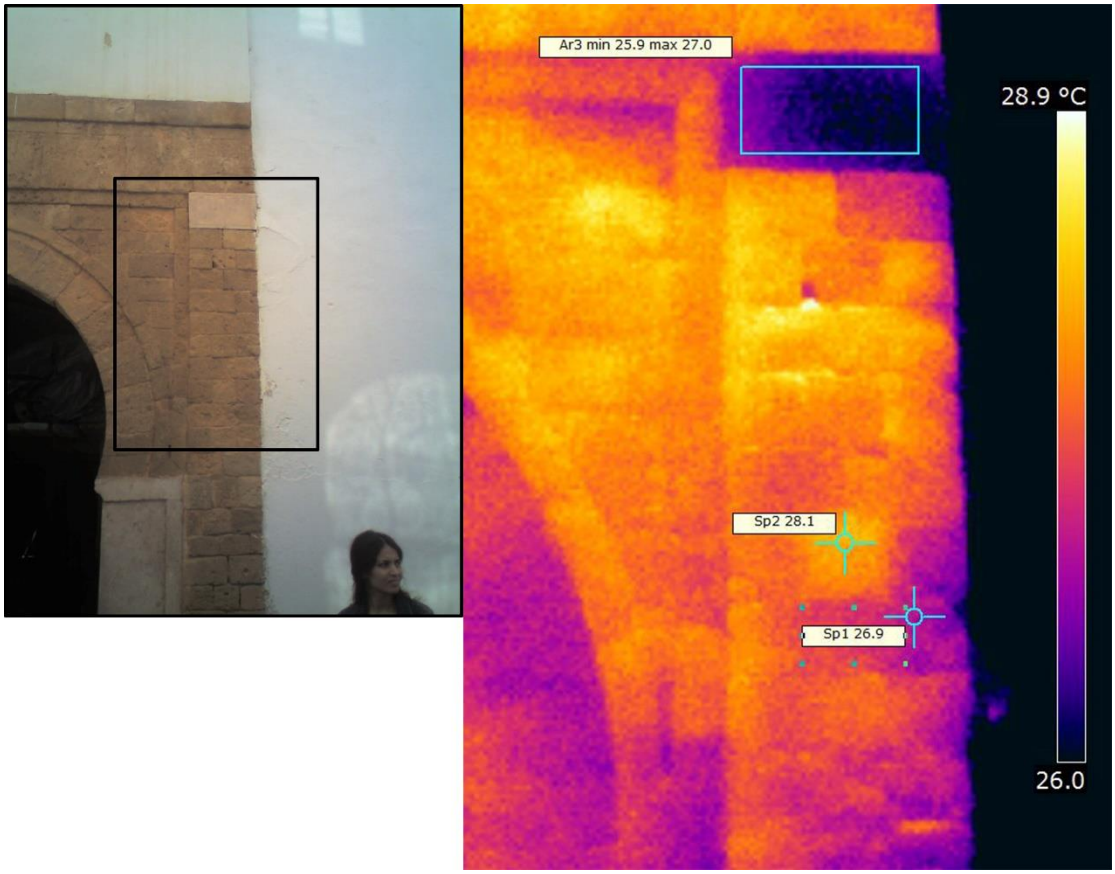
Εικόνα 79: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



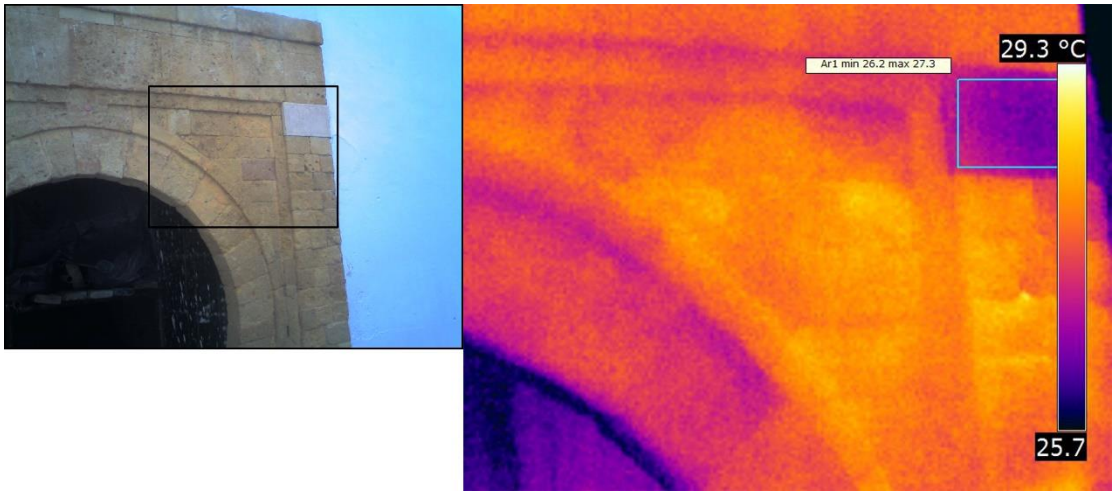
Εικόνα 80: Θερμογράφημα της ανώτερης ανατολικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



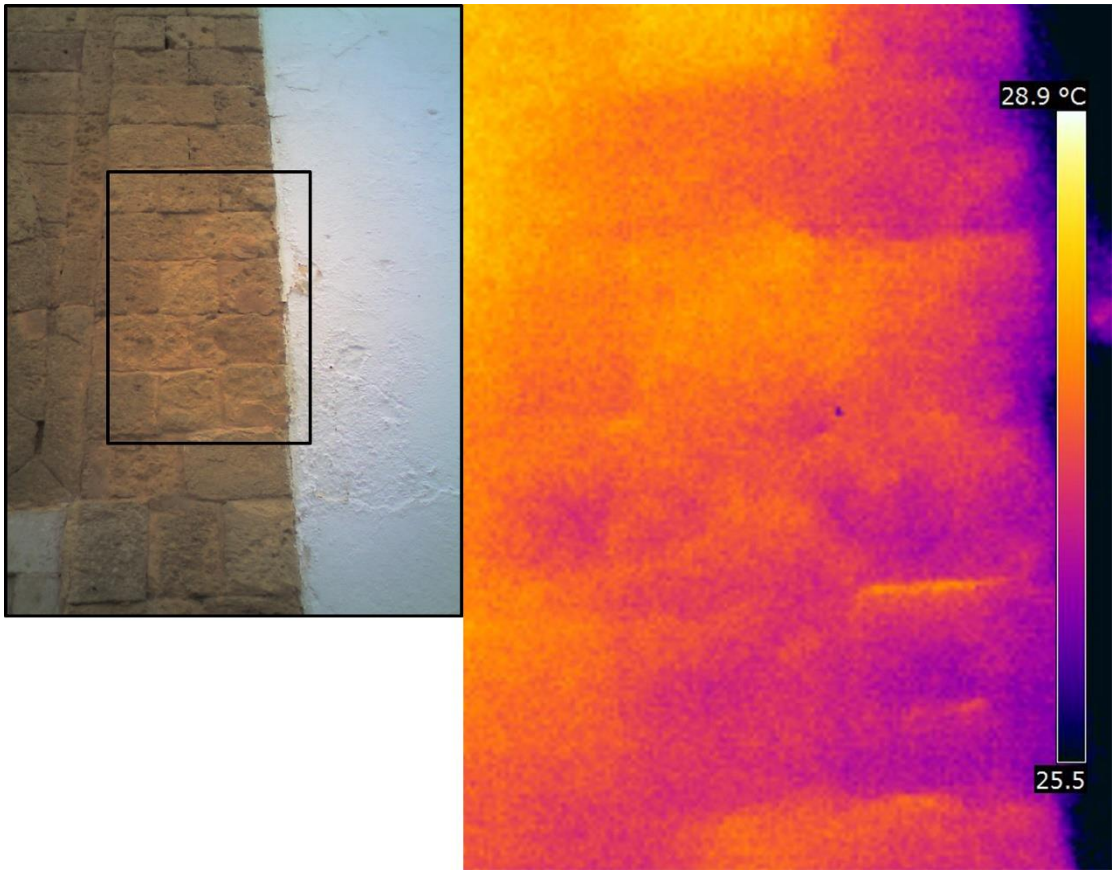
Εικόνα 81: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



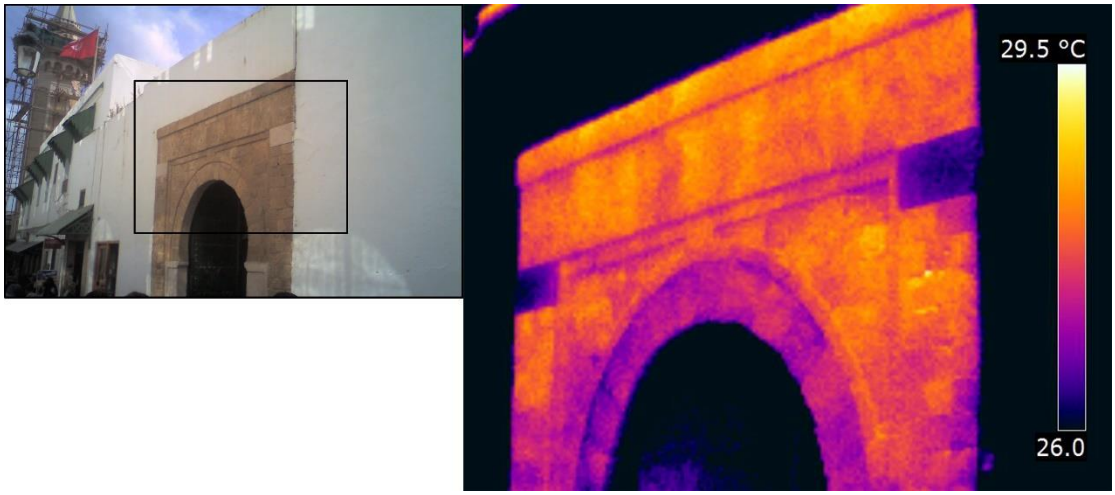
Εικόνα 82: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



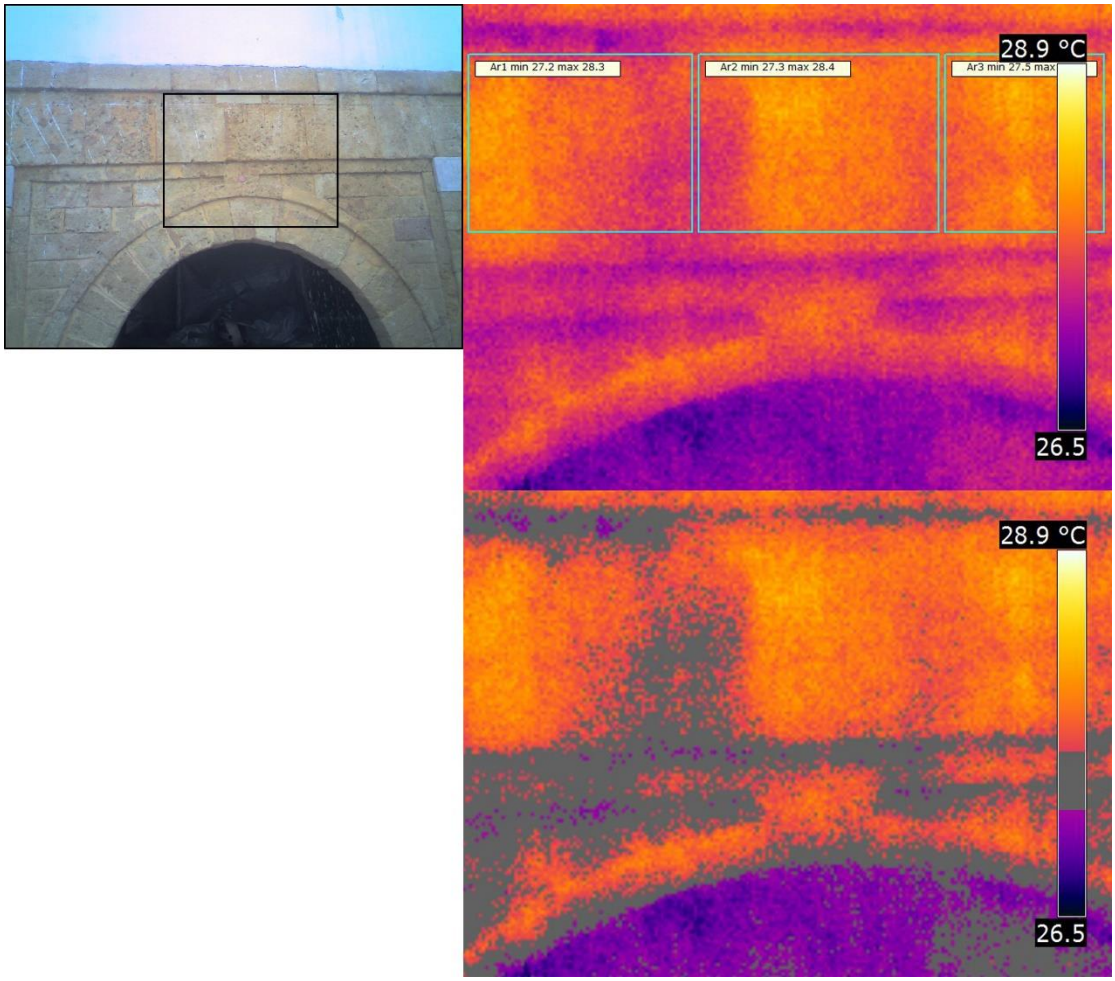
Εικόνα 83: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 84: Θερμογράφημα της ανώτερης δυτικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 85: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



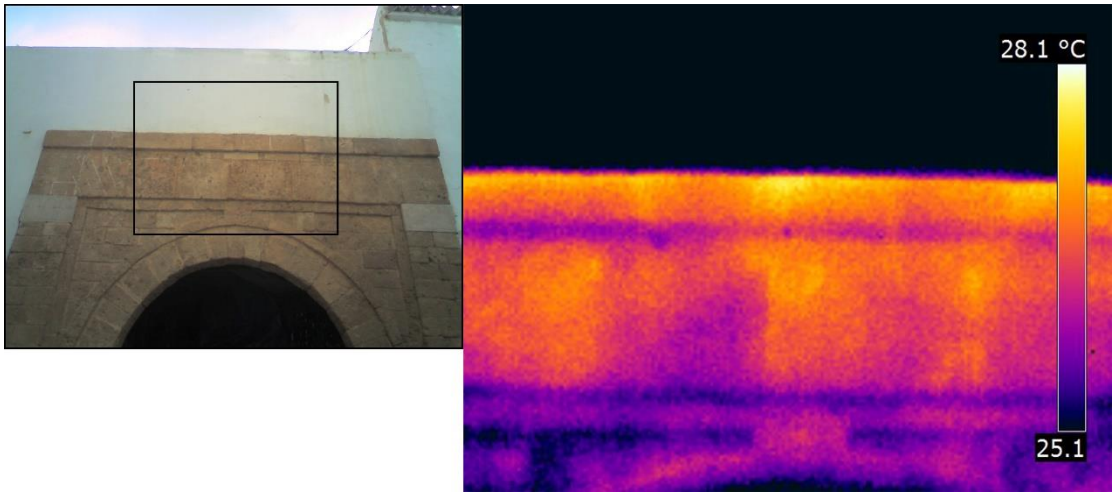
Εικόνα 86: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



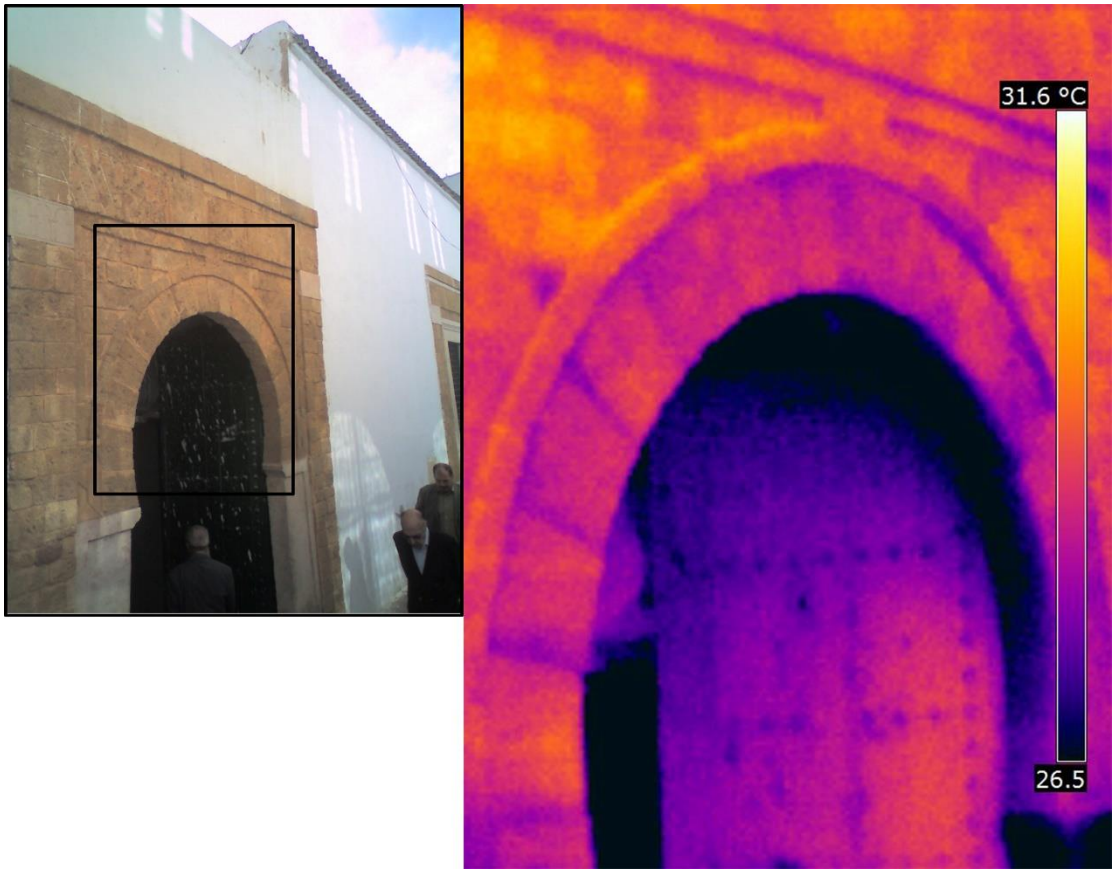
Εικόνα 87: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



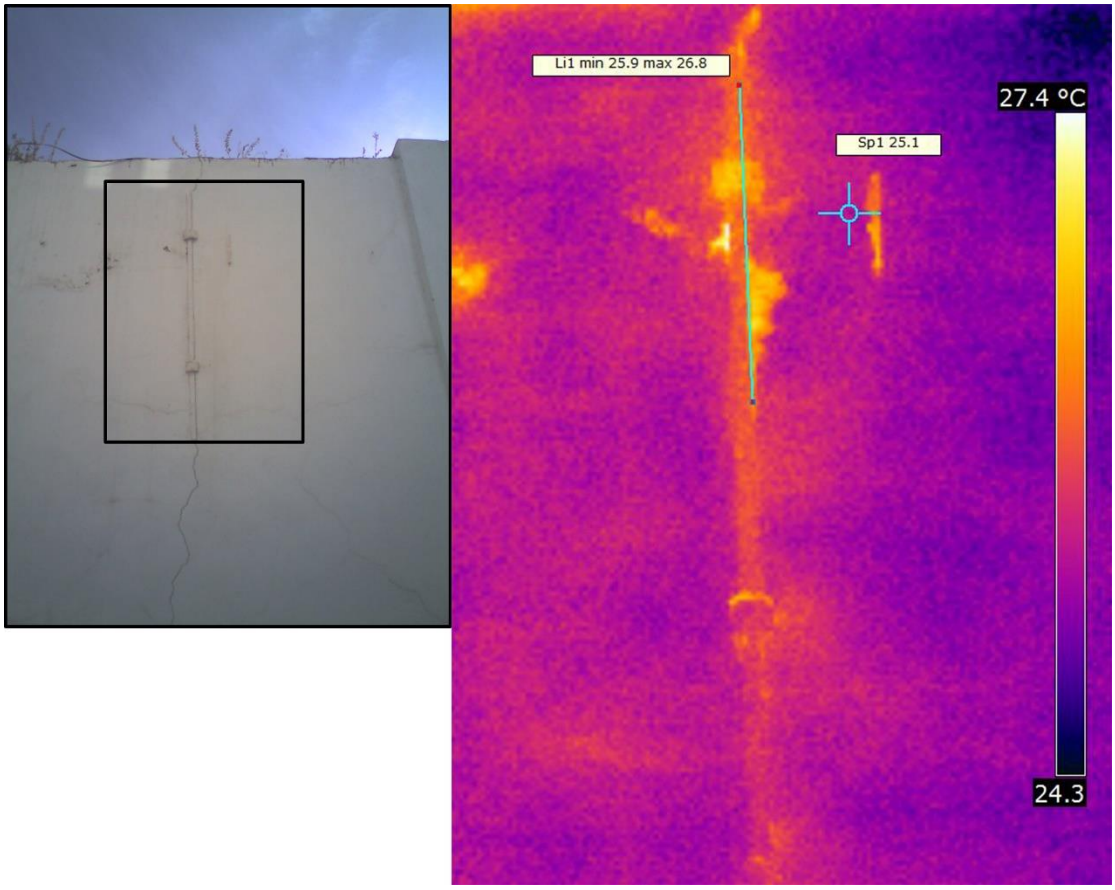
Εικόνα 88: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



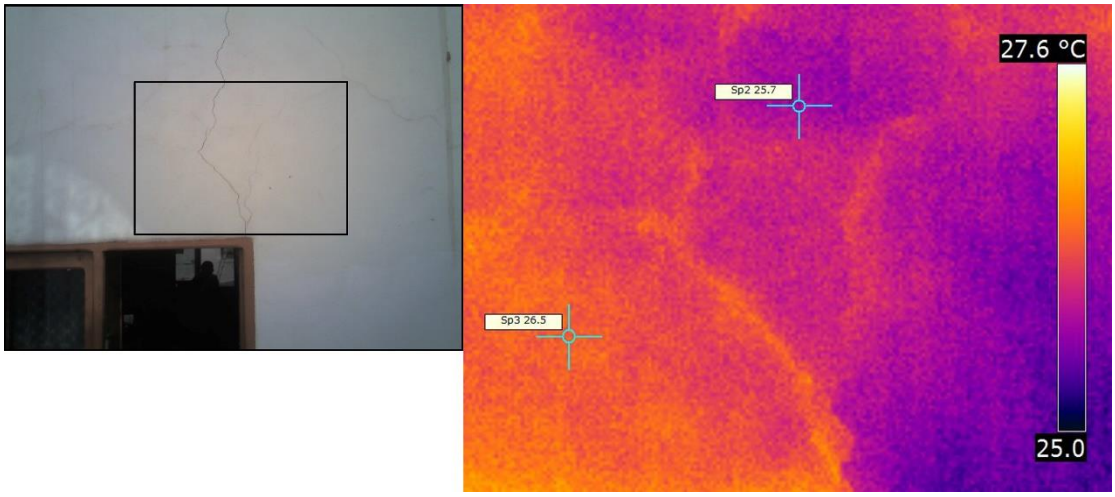
Εικόνα 89: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



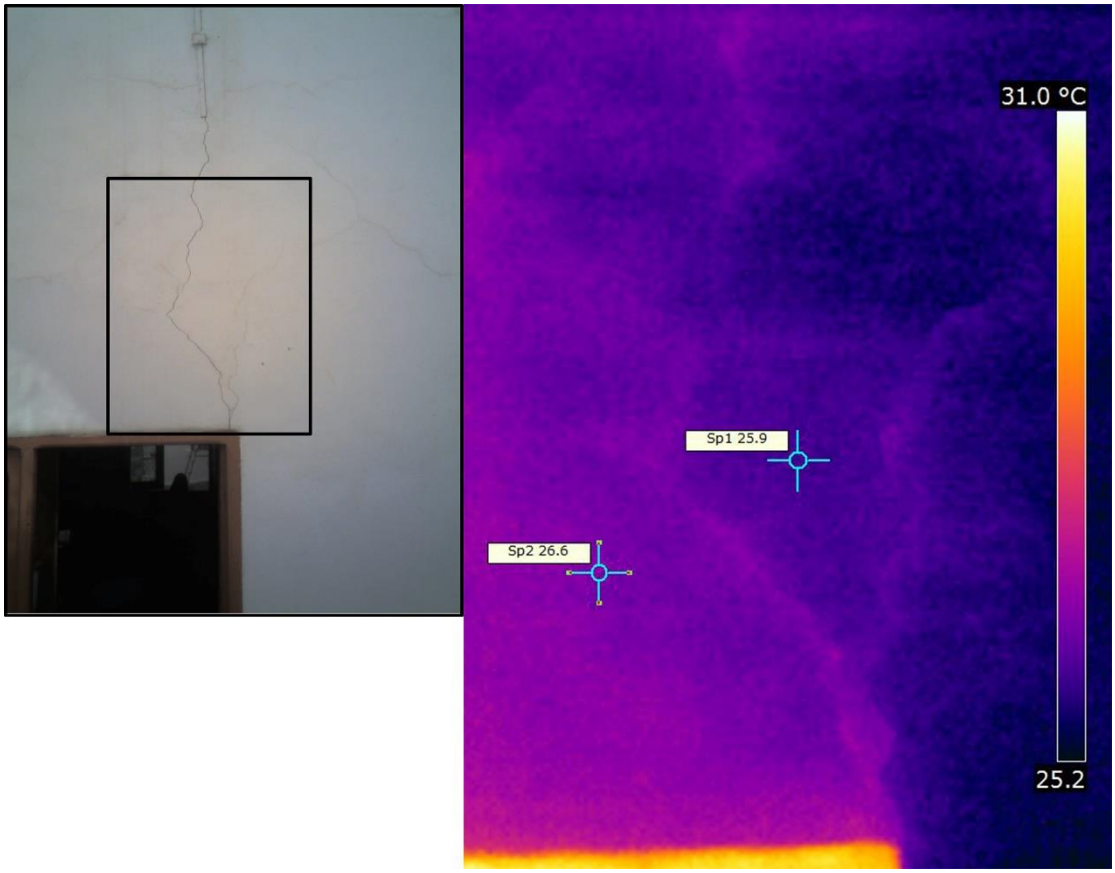
Εικόνα 90: Θερμογράφημα της ανώτερης κεντρικής περιοχής του εξωτερικού της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 91: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 92: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 93: Θερμογράφημα της επιχρισμένης τοιχοποιίας ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής.

4.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Για τις ανάγκες του GPR, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή ProEx, της εταιρίας MALÅ GeoScience, με κεραίες 1,6GHz και 2,3GHz. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Groundvision 2, της εταιρίας MALÅ GeoScience και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό RadExplorer, έκδοση 1.41, της εταιρίας MALÅ GeoScience. Σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία της ιστορικής κατασκευής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 14. Οι ακριβείς θέσεις σάρωσης φαίνονται στις Εικόνες 94 έως 100, ενώ τα αποτελέσματα της σάρωσης φαίνονται στα Σχήματα 47 έως 69, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την τρέχουσα κατάσταση της ιστορικής κατασκευής.

Με τη βοήθεια της σάρωσης V01 (Σχήμα 47), μπορεί να προσδιορισθεί η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην συγκεκριμένη περιοχή. Παρατηρείται ότι η σάρωση έχει πραγματοποιηθεί πάνω στον ασβεστόλιθο της πρόσοψης (Πίνακας 14 και Εικόνα 94). Στο αποτέλεσμα της σάρωσης (Σχήμα 47), παρατηρείται μια περιοχή που φτάνει μέχρι περίπου τα 2,8ns (χρόνος 2 διαδρομών) και αντιστοιχεί στο υλικό της εξωτερικής στρώσης, δηλαδή στον ασβεστόλιθο. Από την μακροσκοπική παρατήρηση του χώρου (Εικόνα 101) φαίνεται ότι ο ασβεστόλιθος αποτελεί τη μοναδική στρώση σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας, στη συγκεκριμένη περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της γεωμετρικής τεκμηρίωσης του χώρου (Σχήμα 44), η εξεταζόμενη περιοχή έχει μήκος 18cm (Σχήμα 70). Κατά συνέπεια, προσδιορίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον ασβεστόλιθο ως εξής:

$$u = \frac{x}{t} = \frac{18}{\frac{2,8}{2}} \cong 13\text{cm/ns}$$

Στη σάρωση V05 (Σχήμα 51) παρατηρείται μία περιοχή μέχρι περίπου τα 2ns, η οποία φανερώνει το πάχος του ασβεστόλιθου. Εντός αυτής της περιοχής δεν υπάρχουν ανακλάσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει τα ευρήματα της MIP, σύμφωνα με τα οποία, ο ασβεστόλιθος είναι εξαιρετικά συμπαγής (βλ. 4.2.3). Το

πάχος του ασβεστόλιθου είναι εμφανές και στη σάρωση V06 (Σχήμα 52). Μάλιστα, σε αυτό το σημείο παρατηρούνται τρεις περιοχές: 0 – 2,3 ns, 2,3 – 4,5 ns και 4,5 – 7 ns. Το γεγονός αυτό δηλώνει την ύπαρξη πολλαπλών στρώσεων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, η εξωτερική εκ των οποίων είναι αυτή του ασβεστόλιθου.

Η εκτός επιπέδου κάμψη της εξωτερικής στρώσης της τοιχοποιίας (Εικόνα 8), είναι εμφανής στη σάρωση V08 (Σχήμα 54). Αναλυτικότερα, παρατηρείται μία διεπιφάνεια, η οποία μάλιστα εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη, όσο σαρώνονται τα πιο ψηλά σημεία της τοιχοποιίας. Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα και στη σάρωση V09 (Σχήμα 55), η οποία έχει πραγματοποιηθεί στην ίδια περιοχή, σε μικρή απόσταση από τη σάρωση V08 (Εικόνα 95). Η στρώση της τοιχοποιίας που κάμπτεται είναι μόνο η εξωτερική (προς την πλευρά του δρόμου), ενώ αντίθετα η εσωτερική (εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής) δεν κάμπτεται. Το γεγονός αυτό είναι που δικαιολογεί το ότι η εκτός επιπέδου κάμψη φαίνεται στις σαρώσεις, καθώς διαφορετικά με την παράλληλη κάμψη όλων των στρώσεων, οι σαρώσεις του GPR δεν εμφάνιζαν τη διαστρωμάτωση υπό γωνία. Με άλλα λόγια, η ταυτόχρονη παράλληλη μετατόπιση όλων των στρώσεων της τοιχοποιίας, κατά το ίδιο διάστημα dx, δεν θα προκαλούσε αποτέλεσμα εμφανές με τη χρήση GPR. Η ύπαρξη της εκτός επιπέδου κάμψης, πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η καμάρα βρίσκεται στο άκρο μιας σειράς από καμάρες, που παράγουν μια ώθηση στην τελευταία καμάρα. Στρώσεις της τοιχοποιίας με κακή σύνδεση, μπορεί να υποστούν μια εσωτερική ρηγμάτωση και έναν διαχωρισμό που ακολουθείται από κάμψη.

Το εσωτερικό τμήμα του θόλου της ιστορικής κατασκευής παρουσιάζει εκτεταμένη φθορά. Συγκεκριμένα, στις σαρώσεις R15 (Σχήμα 59) και R16 (Σχήμα 60) είναι εμφανείς δύο περιοχές: στην αριστερή περιοχή της σάρωσης δεν υπάρχουν ανακλάσεις, ενώ στη δεξιά υπάρχουν. Το γεγονός αυτό φανερώνει την παρουσία υγρασίας στο πρώτο μισό μήκος σάρωσης, που αντιστοιχεί στην ανατολική πλευρά του θόλου (οι σαρώσεις R15 και R16 έχουν πραγματοποιηθεί με φορά από τα δυτικά προς τα ανατολικά του θόλου). Στη δεξιά περιοχή της σάρωσης, δηλαδή στη δυτική πλευρά του θόλου,

διακρίνονται τρεις περιοχές: 0 – 3 ns, 3 – 6 ns και 6 – 9,8 ns. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τοιχοποιία δεν είναι κατασκευασμένη από ένα υλικό, αλλά αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις διαφορετικών υλικών, από τις οποίες φαίνονται οι τρεις. Το γεγονός ότι υγρασία δεν μεταδίδεται από την ανατολική στη δυτική περιοχή του θόλου, μπορεί να ερμηνευτεί με βάση τα αποτελέσματα της IRT. Πιο συγκεκριμένα, η ρωγμή αποτελεί ασυνέχεια, η οποία εμποδίζει τη διάδοση της υγρασίας (βλ. §4.1.2Α). Επιπρόσθετα, η παρουσία της υγρασίας στην ανατολική πλευρά του θόλου μπορεί να ερμηνευτεί παρατηρώντας την Εικόνα 17. Η βλάστηση εμφανίζεται έντονα στην ανατολική περιοχή της οροφής της καμάρας και αποτελεί την πηγή της υγρασίας, η οποία μεταφέρεται στο εσωτερικό της καμάρας και παρατηρείται στην ανατολική πλευρά του θόλου.

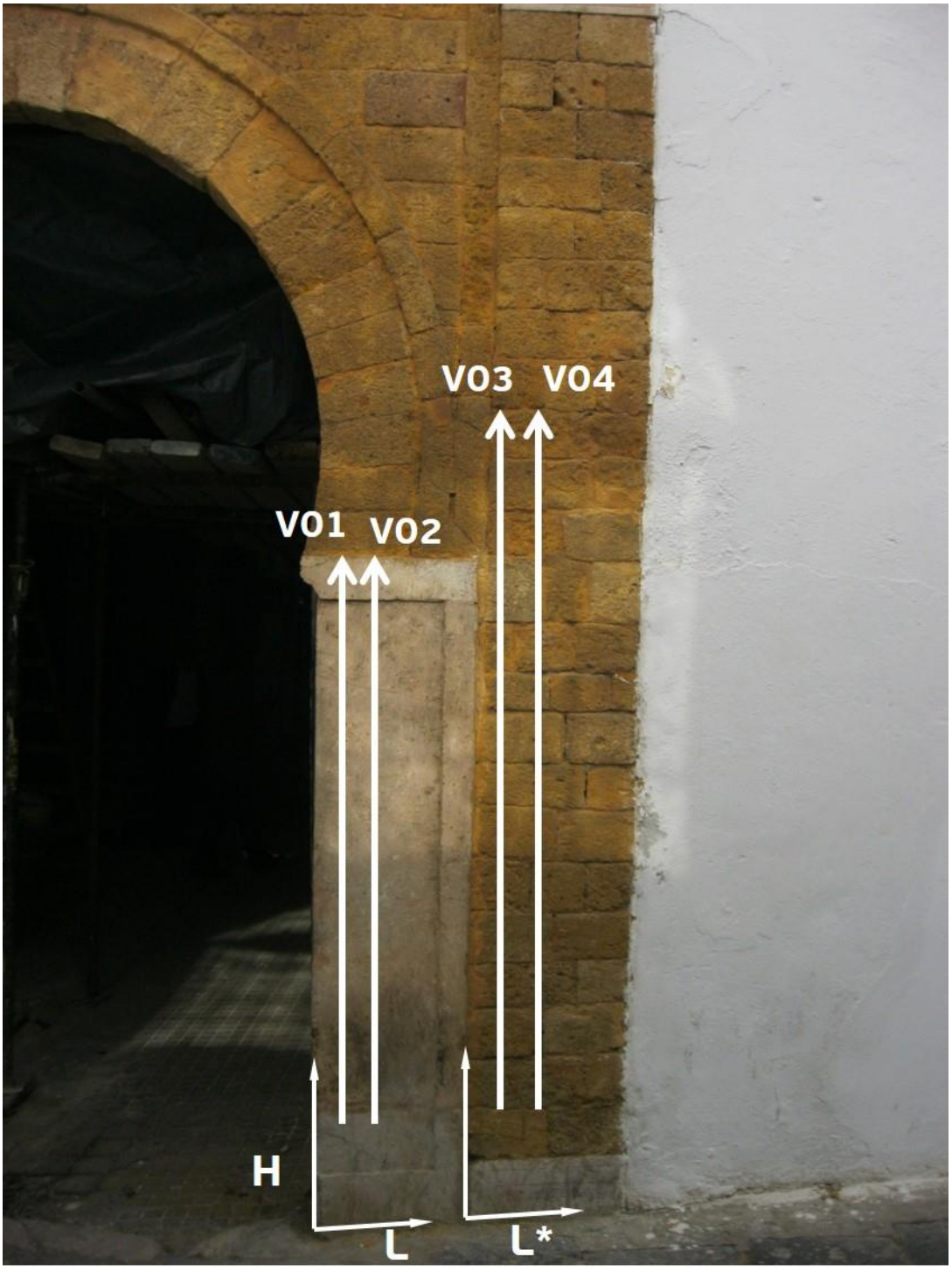
Επιχειρώντας να ερμηνευτεί η εκτεταμένη φθορά που παρουσιάζεται στη δυτική τοιχοποιία, εξετάζονται οι σαρώσεις V10 (Σχήμα 56), V11 (Σχήμα 57) και V14 (Σχήμα 58). Παρόλα αυτά, η υγρασία της τοιχοποιίας δεν αφήνει το σήμα του GPR να διεισδύσει, με συνέπεια να μην μπορούν να ληφθούν συμπεράσματα για την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας. Η πηγή της υγρασίας δεν φαίνεται να είναι η οροφή της καμάρας, καθώς όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, βλάστηση δεν εμφανίζεται σε αυτήν την περιοχή. Πιθανή πηγή της υγρασίας από το δρόμο δεν είναι πολύ πιθανόν να υφίσταται, καθώς σε μία τέτοια περίπτωση πιθανότατα θα επηρέαζε και την ανατολική τοιχοποιία, γεγονός που δεν συμβαίνει. Αντίθετα, είναι πολύ πιθανόν η υγρασία να προέρχεται από την νεότερη κατασκευή με την οποία συνορεύει η ιστορική κατασκευή από τη συγκεκριμένη πλευρά (βλ. στο Σχήμα 7 την περιοχή που βρίσκεται πάνω από την περιοχή που είναι σημειωμένη με Χ). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το μεταλλικό στοιχείο που υπάρχει στην συγκεκριμένη περιοχή, αποτελεί την αιτία της παρατήρησης πολλαπλών ανακλάσεων στη σάρωση V11 (Σχήμα 57).

Προκειμένου να καταγραφεί μια πρώτη εικόνα του υπεδάφους της ιστορικής κατασκευής, αξιολογείται η σάρωση G28 (Σχήμα 69). Φαίνεται το πάχος που έχουν οι πλάκες, καθώς και τα διάφορα στρώματα του εδάφους. Θεωρώντας ότι το έδαφος που βρίσκεται κάτω από την ιστορική κατασκευή είναι ίδιο με

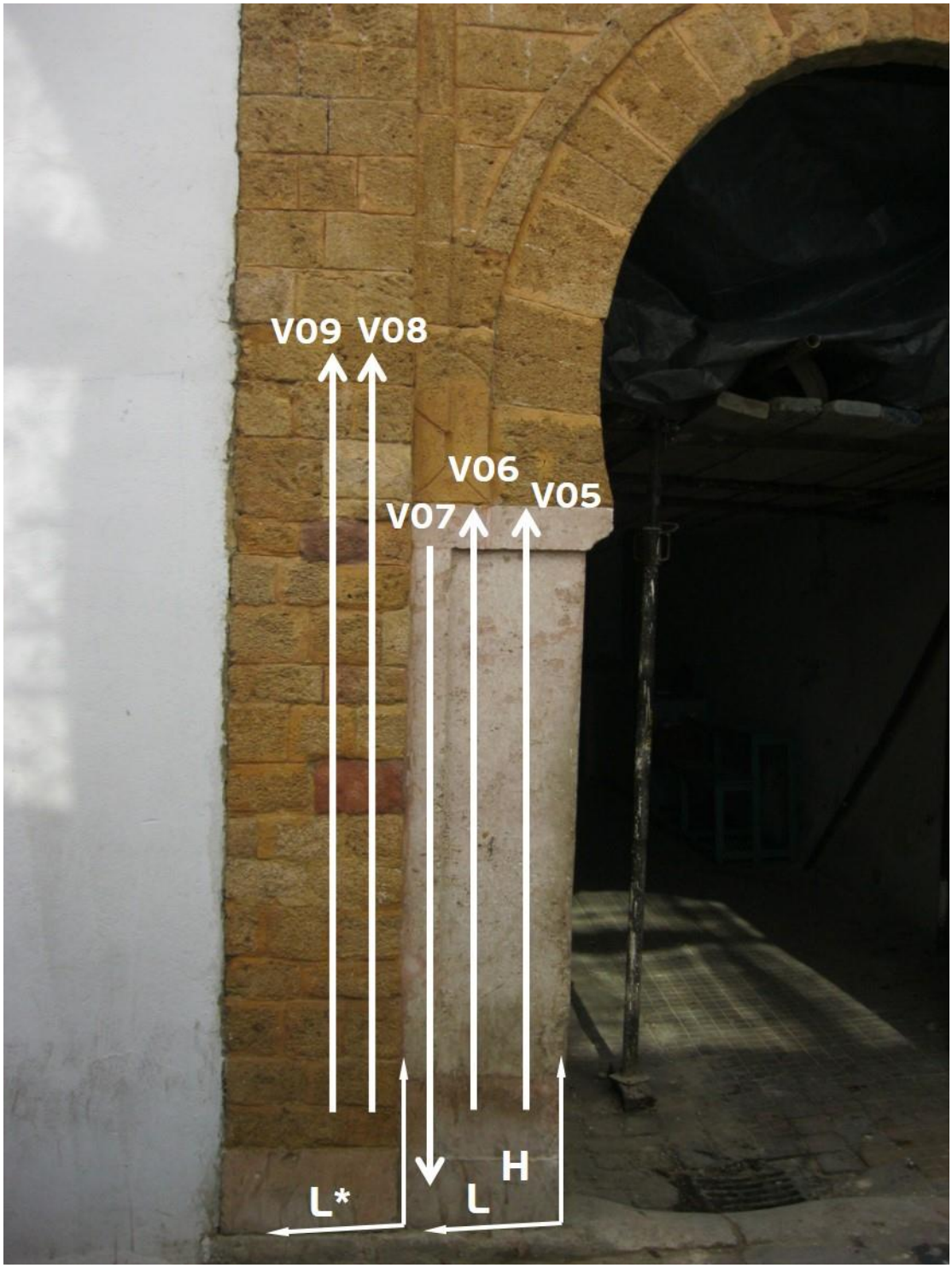
αυτό που βρίσκεται στο εξωτερικό αυτής, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα για το υπέδαφος κάτω από την ιστορική κατασκευή.

Πίνακας 14: Θέσεις της ιστορικής κατασκευής, όπου πραγματοποιήθηκε σάρωση με χρήση GPR. Η θέση εκκίνησης αναφέρεται σε απόσταση (σε cm) από κάθε άξονα (όπως φαίνονται στις Εικόνες 94 έως 100). Οι σαρώσεις, των οποίων ο κωδικός ξεκινάει με V είναι κάθετες προς το έδαφος σαρώσεις, αυτών που ξεκινάει με H είναι παράλληλες προς το έδαφος σαρώσεις, αυτών που ξεκινάει με R είναι τοξοειδείς σαρώσεις και αυτών που ξεκινάει με G είναι σαρώσεις στο έδαφος.

Κωδικός Σάρωσης	***Θέση Εκκίνησης***	***Μήκος Σάρωσης (m)***	***Υλικό***
V01	H30 L10	1,60	Ασβεστόλιθος
V02	H30 L20	1,60	Ασβεστόλιθος
V03	H30 L*10	1,96	Ψαμμίτης
V04	H30 L*20	1,94	Ψαμμίτης
V05	H30 L10	1,58	Ασβεστόλιθος
V06	H30 L25	1,58	Ασβεστόλιθος
V07	βλ. Εικόνα 95	1,68	Ασβεστόλιθος
V08	H30 L*10	2,06	Ψαμμίτης
V09	H30 L*20	1,96	Ψαμμίτης
V10	H30 L10	2,06	Διάφορα
V11	H30 L40	2,10	Διάφορα
V14	H30 L75	2,86	Διάφορα
R15	W20	4,10	Διάφορα
R16	W50	4,54	Διάφορα
H17	βλ. Εικόνα 97	2,26	Διάφορα
H18	βλ. Εικόνα 97	1,88	Διάφορα
H19	Μέση του θόλου	2,34	Διάφορα
H21	H10 L00	1,16	Διάφορα
H22	H20 L00	1,06	Διάφορα
H23	H40 L15	1,04	Διάφορα
H24	H60 L15	0,96	Διάφορα
H25	H80 L15	0,80	Διάφορα
G28	βλ. Εικόνα 100	8,16	Πλάκες εδάφους



Εικόνα 94: Οι σαρώσεις V01, V02, V03 και V04, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εξωτερικό δυτικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 95: Οι σαρώσεις V05, V06, V07, V08 και V09, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εξωτερικό ανατολικό τμήμα της ιστορικής κατασκευής.



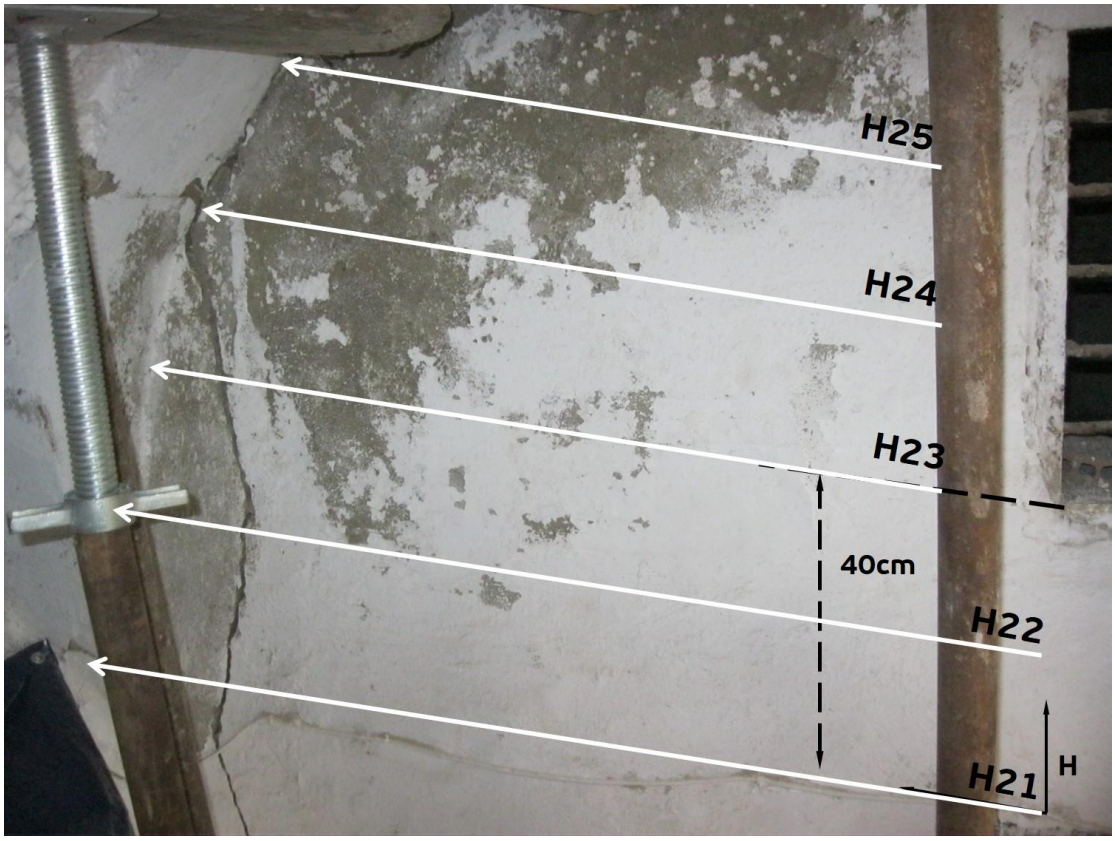
Εικόνα 96: Οι σαρώσεις V10, V11 και V14, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



Εικόνα 97: Οι σαρώσεις R15, R16, H17 και H18, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



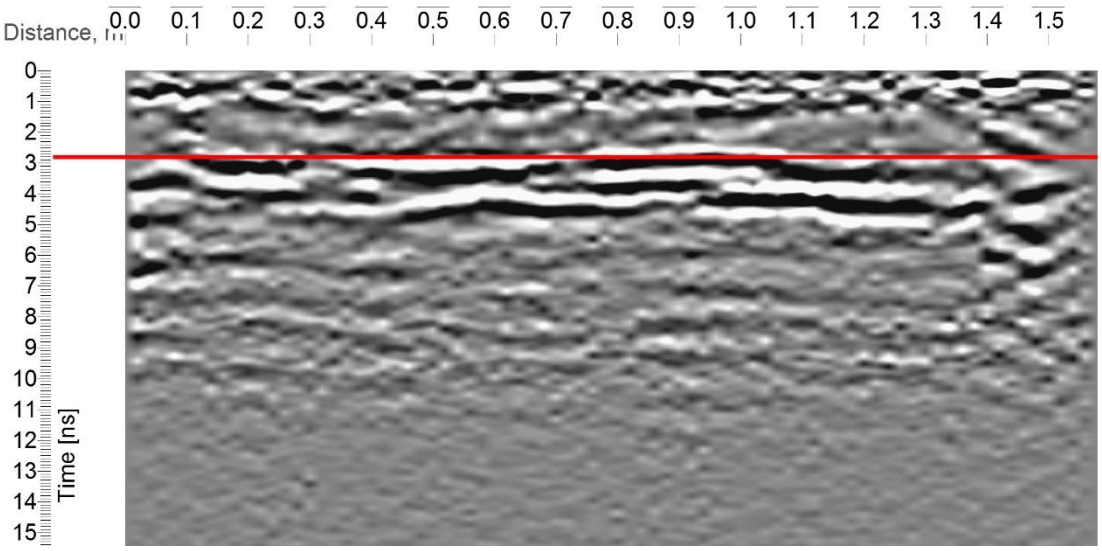
Εικόνα 98: Η σάρωση H19, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στη μέση του θόλου (εσωτερικό) της ιστορικής κατασκευής.



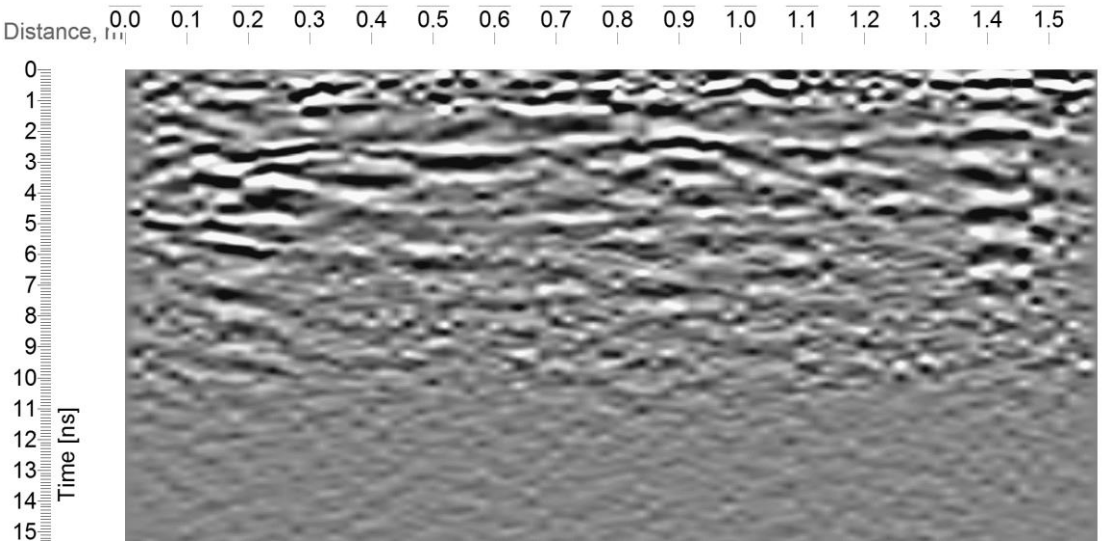
Εικόνα 99: Οι σαρώσεις H21, H22, H23, H24 και H25, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής.



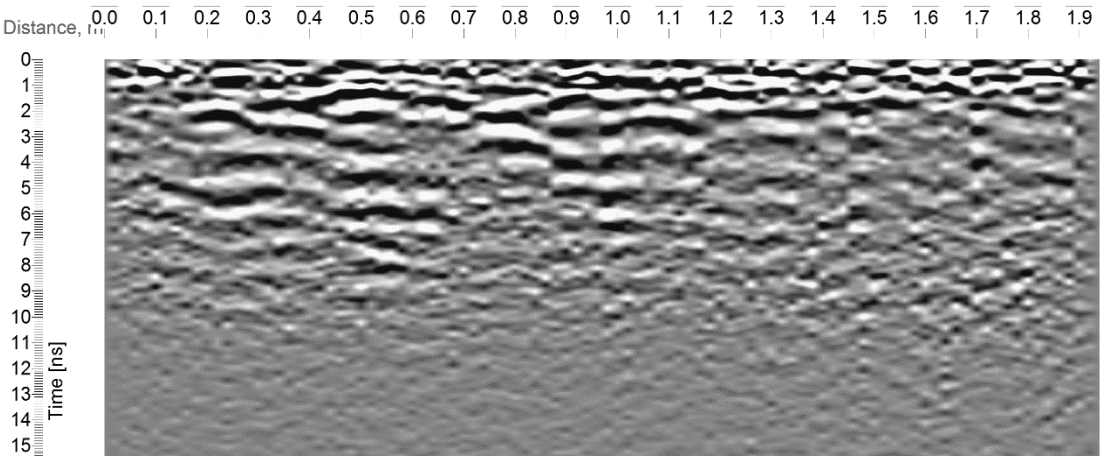
Εικόνα 100: Η σάρωση G28, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στις πλάκες του εδάφους, εξωτερικά της ιστορικής κατασκευής. **Α.** Η αρχή της σάρωσης. **Β.** Το τέλος της σάρωσης.



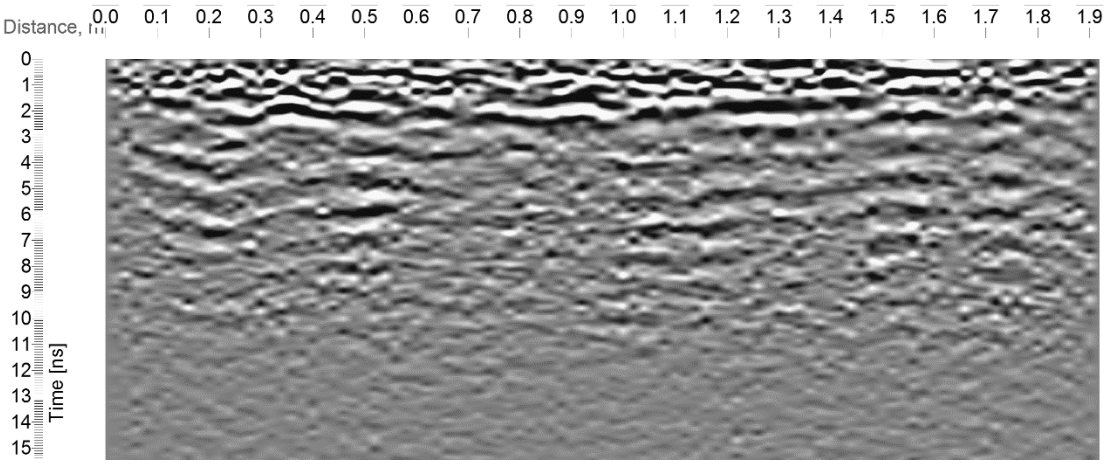
Σχήμα 47: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V01.



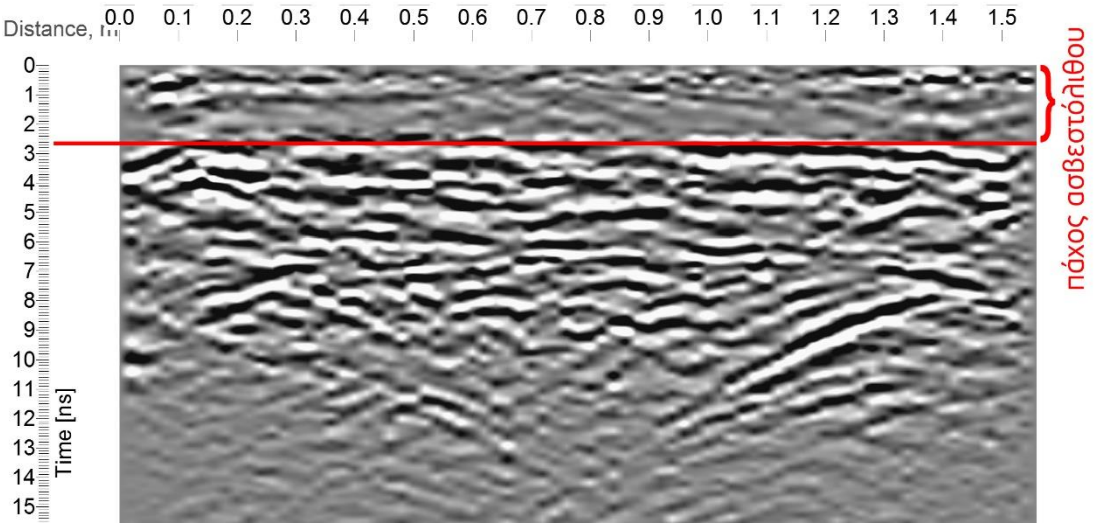
Σχήμα 48: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V02.



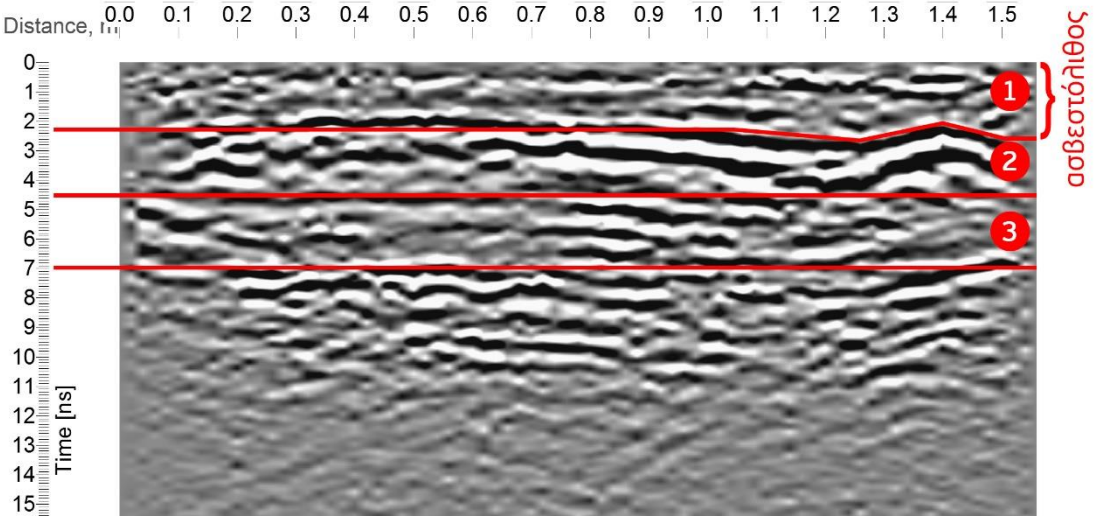
Σχήμα 49: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V03.



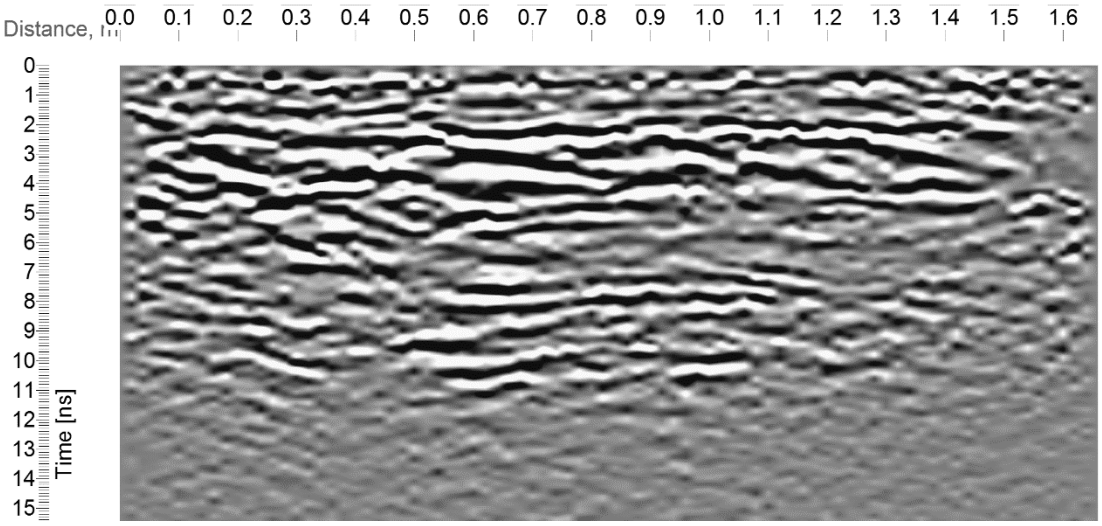
Σχήμα 50: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V04.



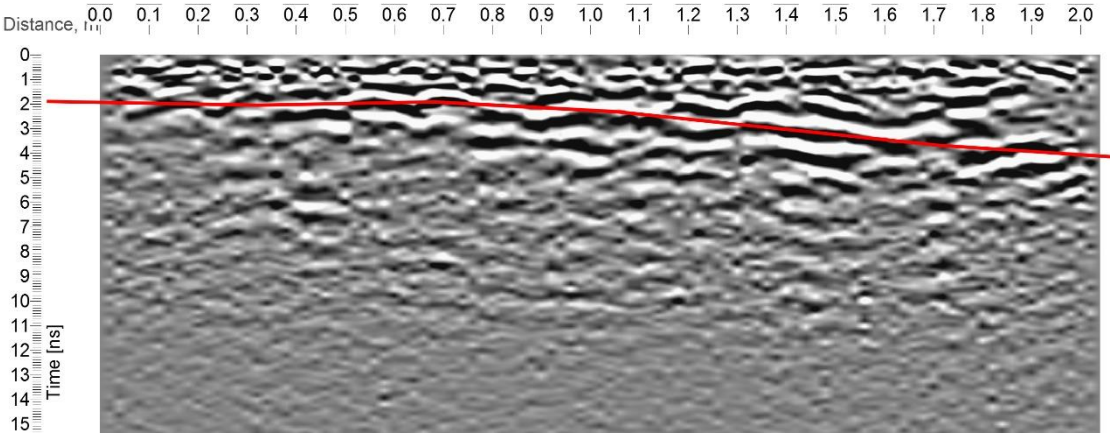
Σχήμα 51: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V05.



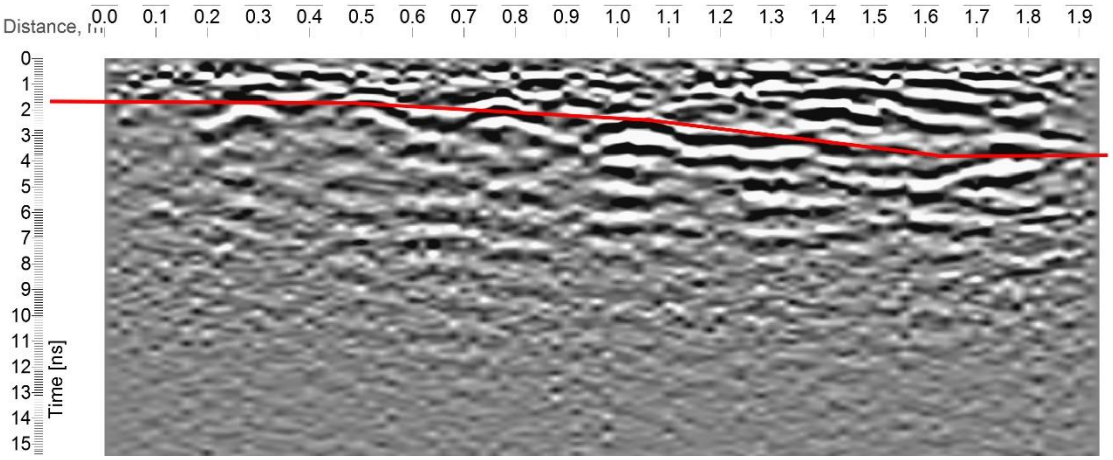
Σχήμα 52: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V06.



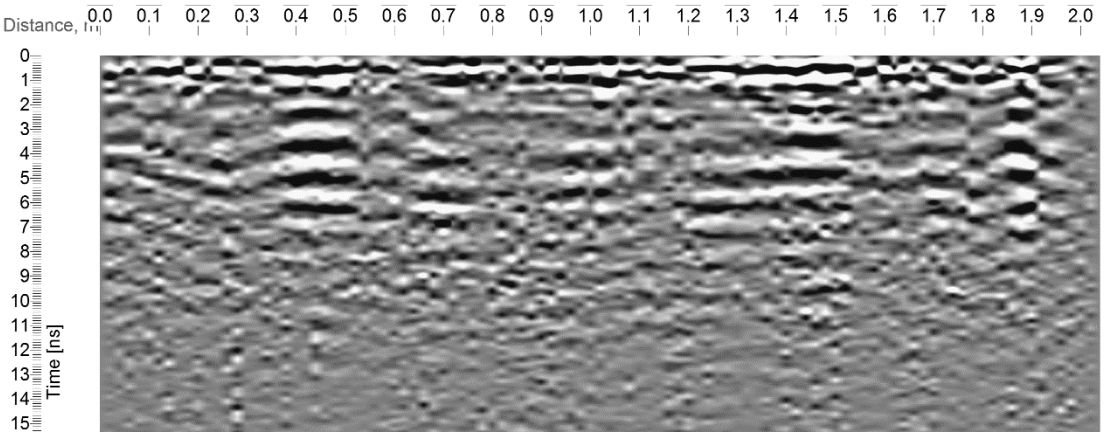
Σχήμα 53: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V07.



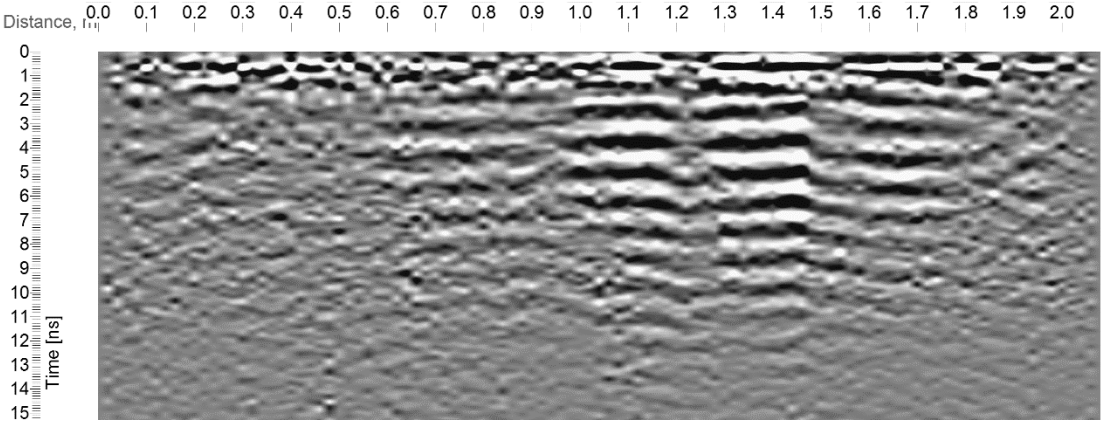
Σχήμα 54: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V08.



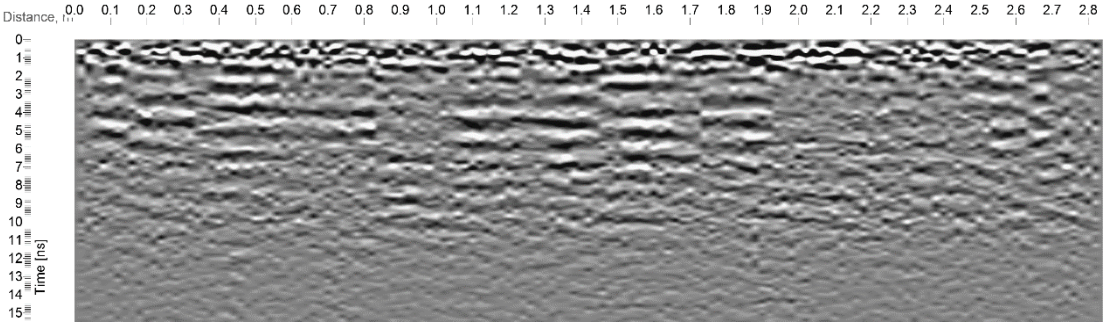
Σχήμα 55: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V09.



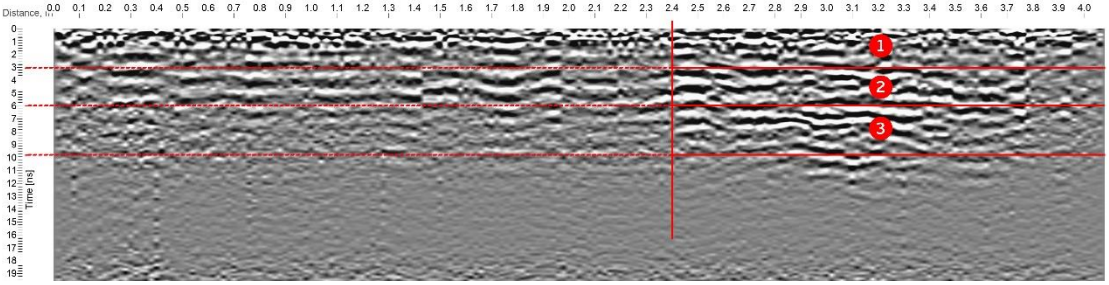
Σχήμα 56: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V10.



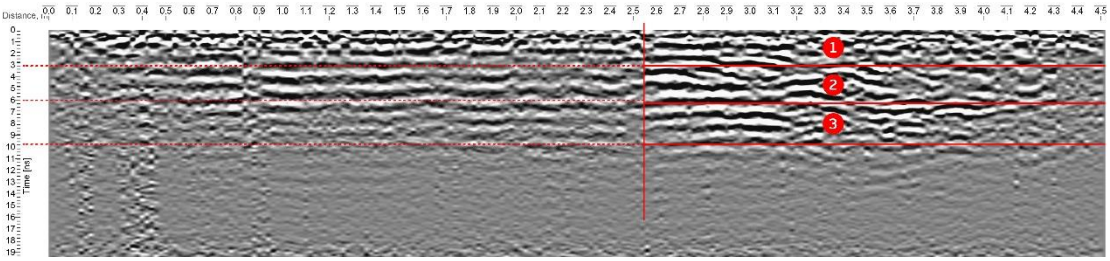
Σχήμα 57: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V11.



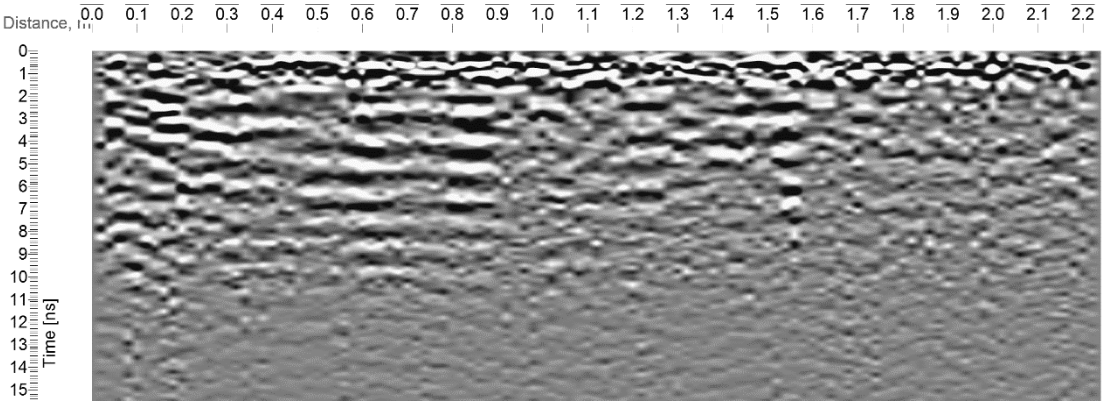
Σχήμα 58: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση V14.



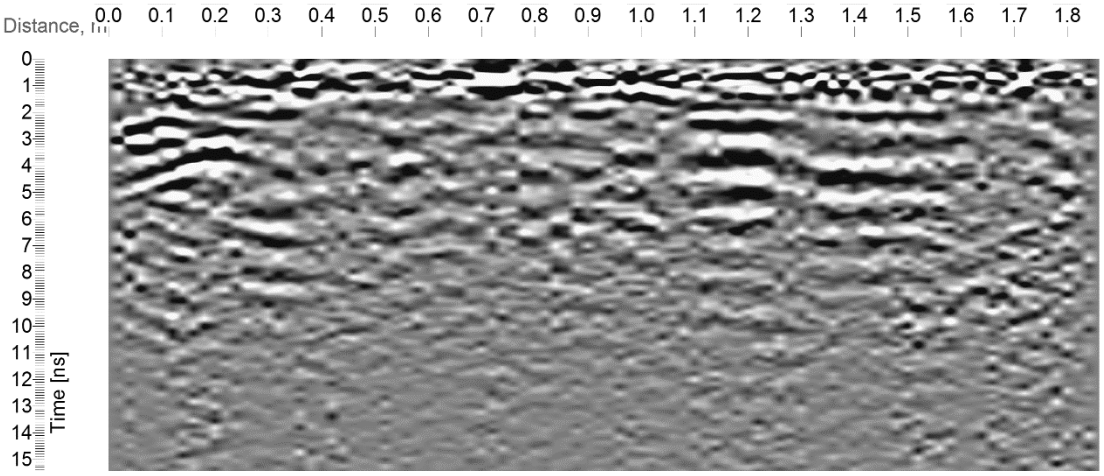
Σχήμα 59: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση R15.



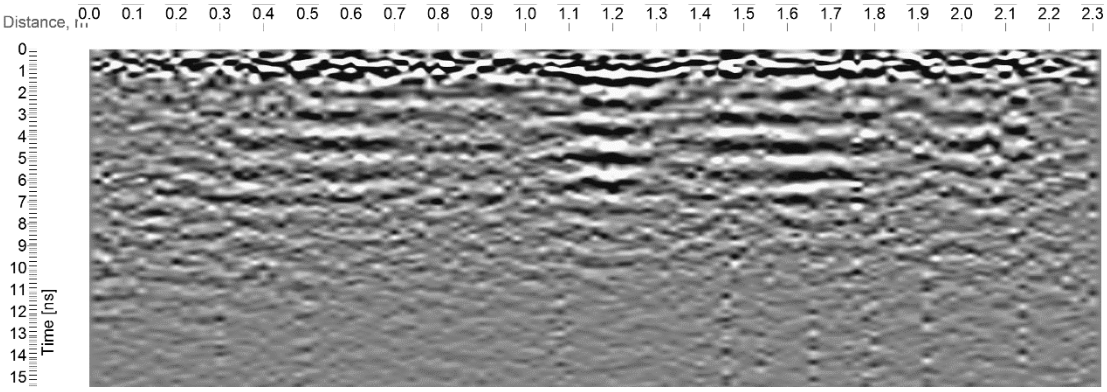
Σχήμα 60: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση R16.



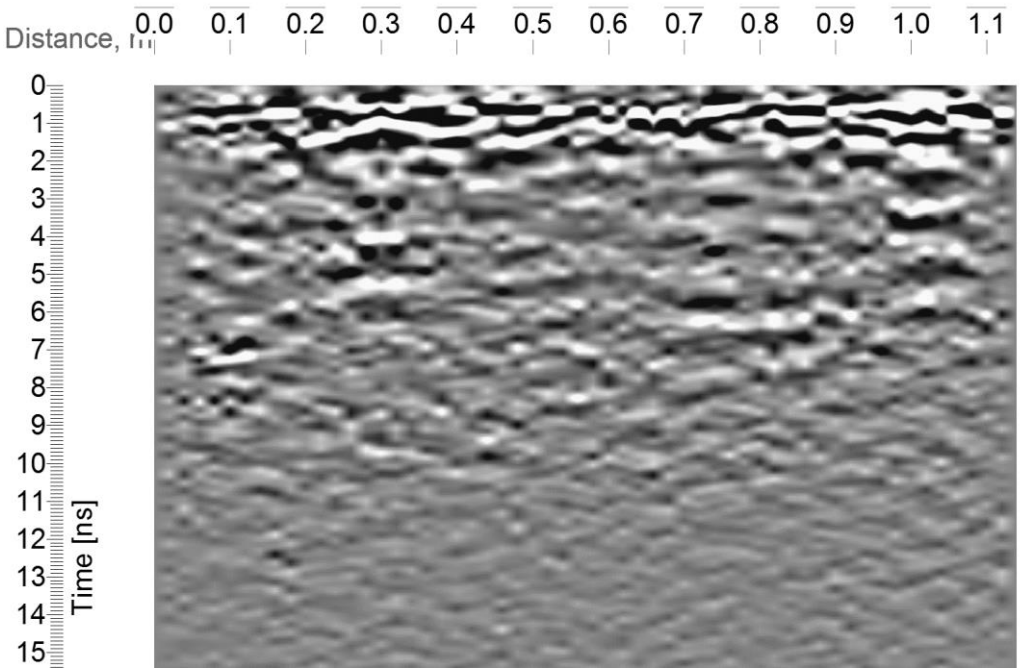
Σχήμα 61: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H17.



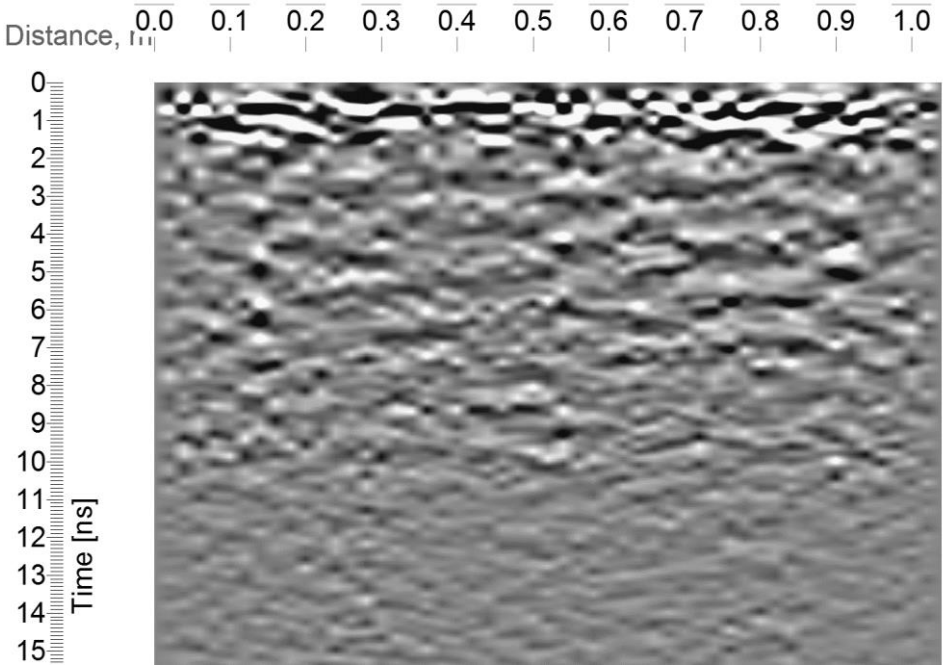
Σχήμα 62: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H18.



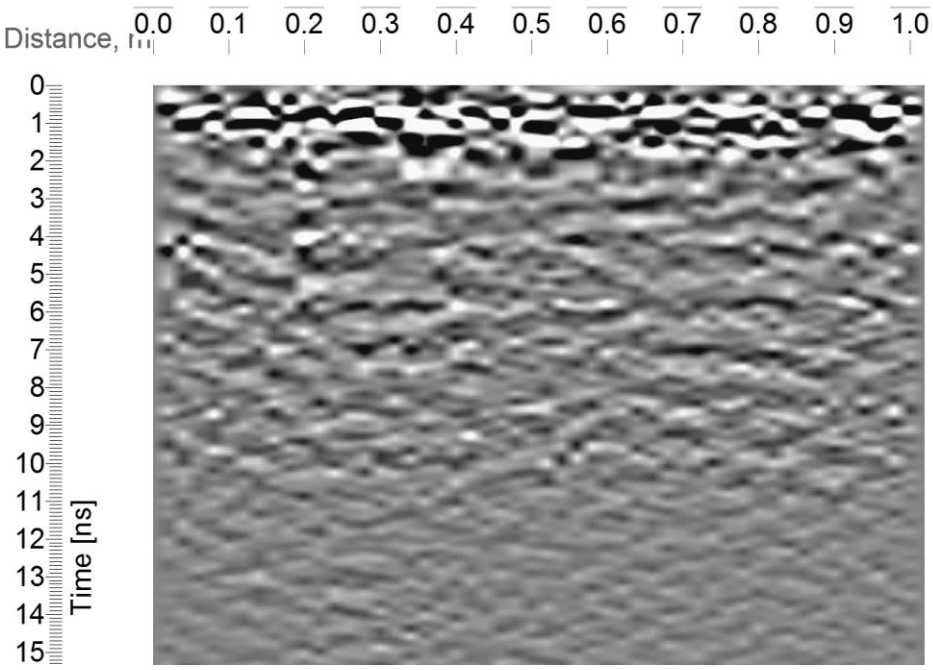
Σχήμα 63: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H19.



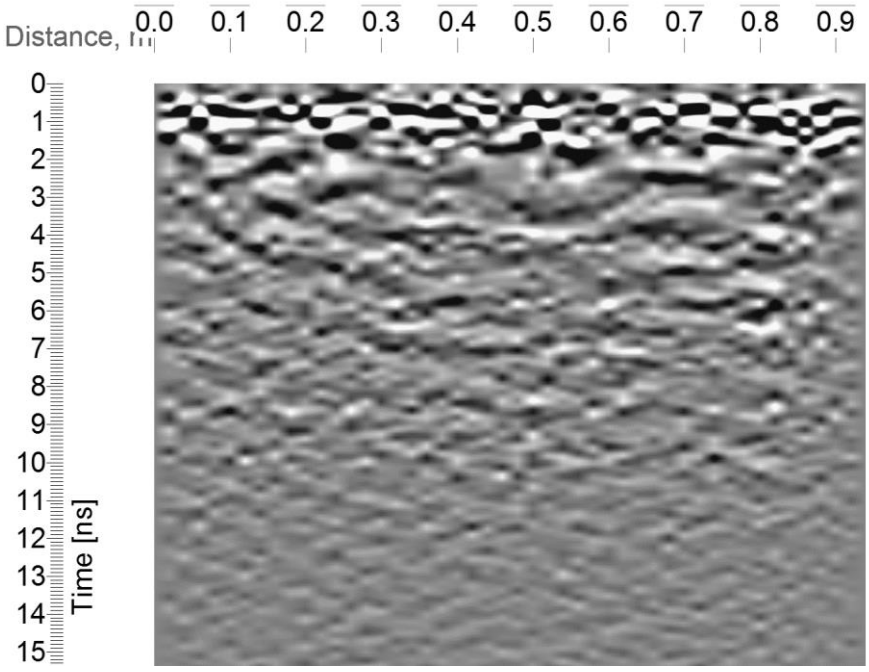
Σχήμα 64: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H21.



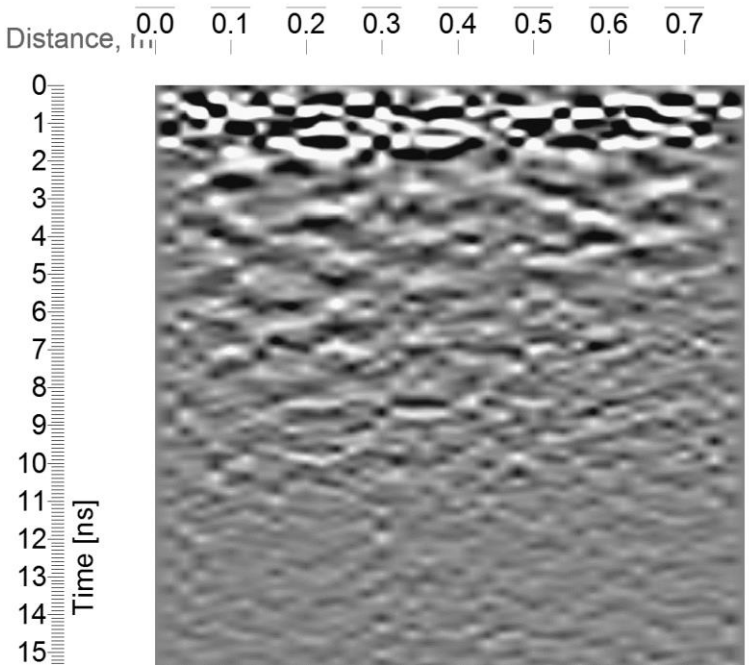
Σχήμα 65: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H22.



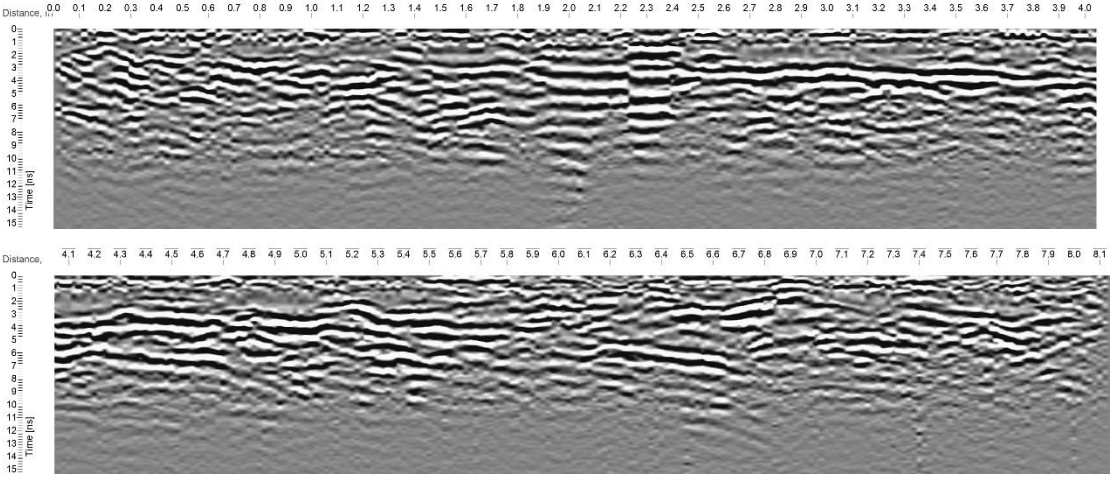
Σχήμα 66: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H23.



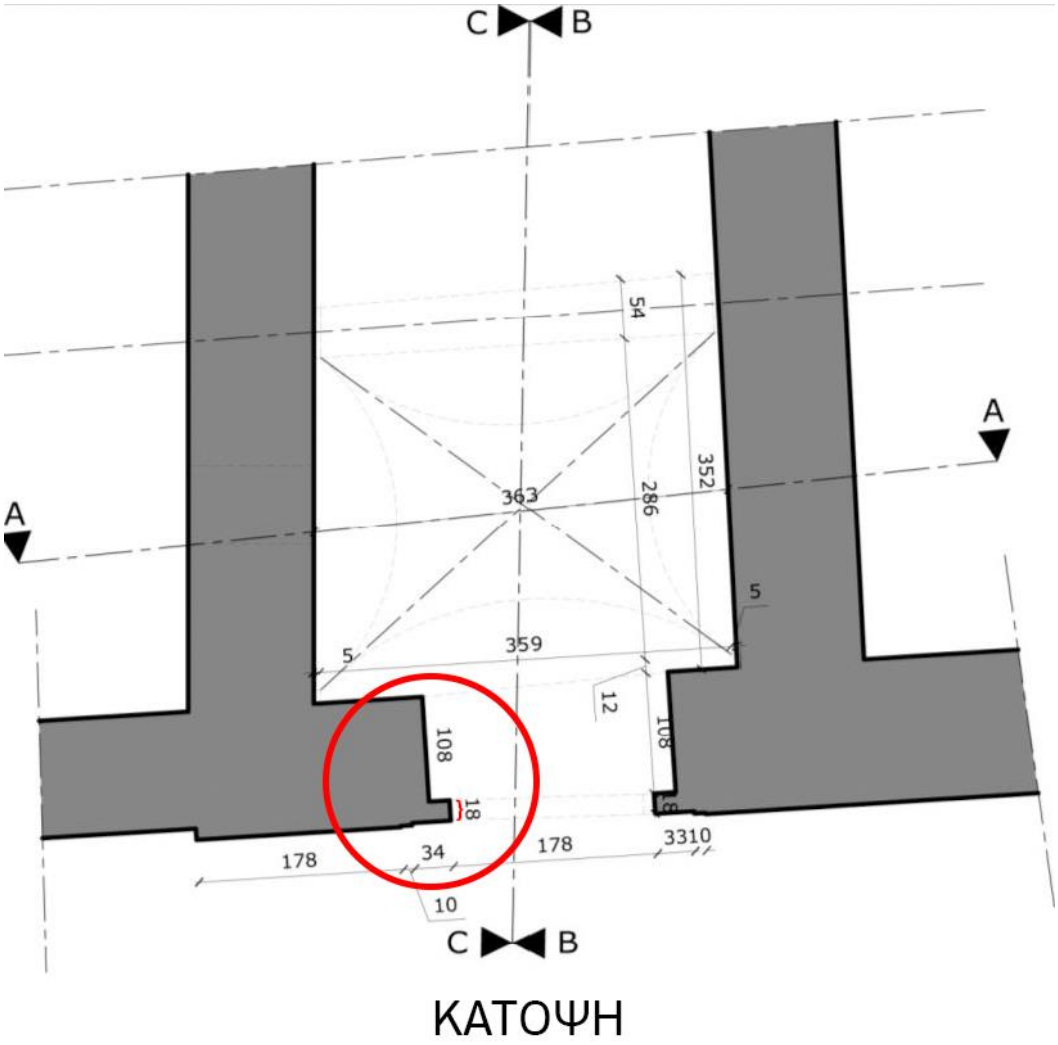
Σχήμα 67: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H24.



Σχήμα 68: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση H25.

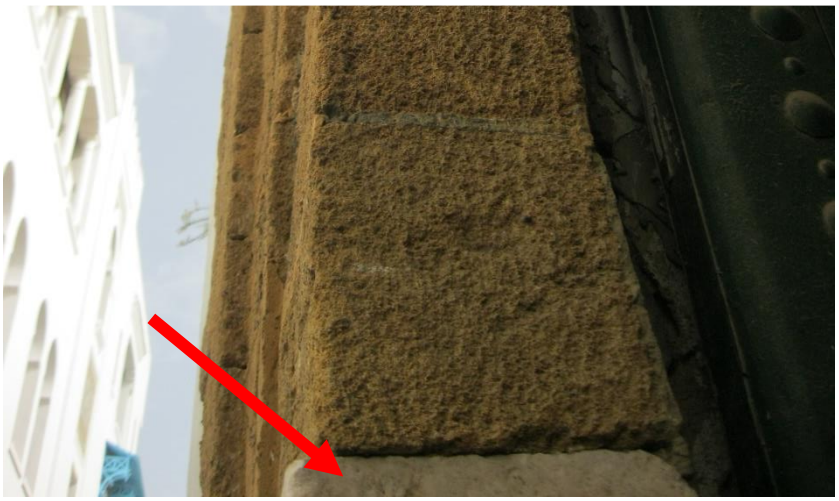


Σχήμα 69: Το αποτέλεσμα του GPR από τη σάρωση G28. Η παρουσίαση σε δύο τμήματα εξυπηρετεί την καλύτερη αναγνωσιμότητα του σχήματος, καθώς το δεύτερο τμήμα αποτελεί συνέχεια του πρώτου.



ΚΑΤΟΨΗ

Σχήμα 70: Λεπτομέρεια της γεωμετρικής τεκμηρίωσης της ιστορικής κατασκευής (Σχήμα 44), όπου φαίνονται ορισμένες διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του GPR.



Εικόνα 101: Λεπτομέρεια της ανατολικής πλευράς της εισόδου της ιστορικής κατασκευής, όπου φαίνεται ότι ο ασβεστόλιθος αποτελεί τη μοναδική στρώση σε όλο το πάχος της τοιχοποιίας στη συγκεκριμένη περιοχή.

4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.2.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο οπτικών ινών i-Scope USB, της εταιρίας MORITEX Corporation, τους φακούς View 30XPL lens, View 50XPL lens και View 120X lens, της εταιρίας MORITEX Corporation και το λογισμικό Moritex Viewer, έκδοση 2.2, της εταιρίας MORITEX Corporation, πραγματοποιήθηκε λήψη εικόνων από όλα τα δείγματα. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στις Εικόνες 102 έως 108, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να εξαχθούν ορισμένες πρώτες παρατηρήσεις για τα δείγματα.

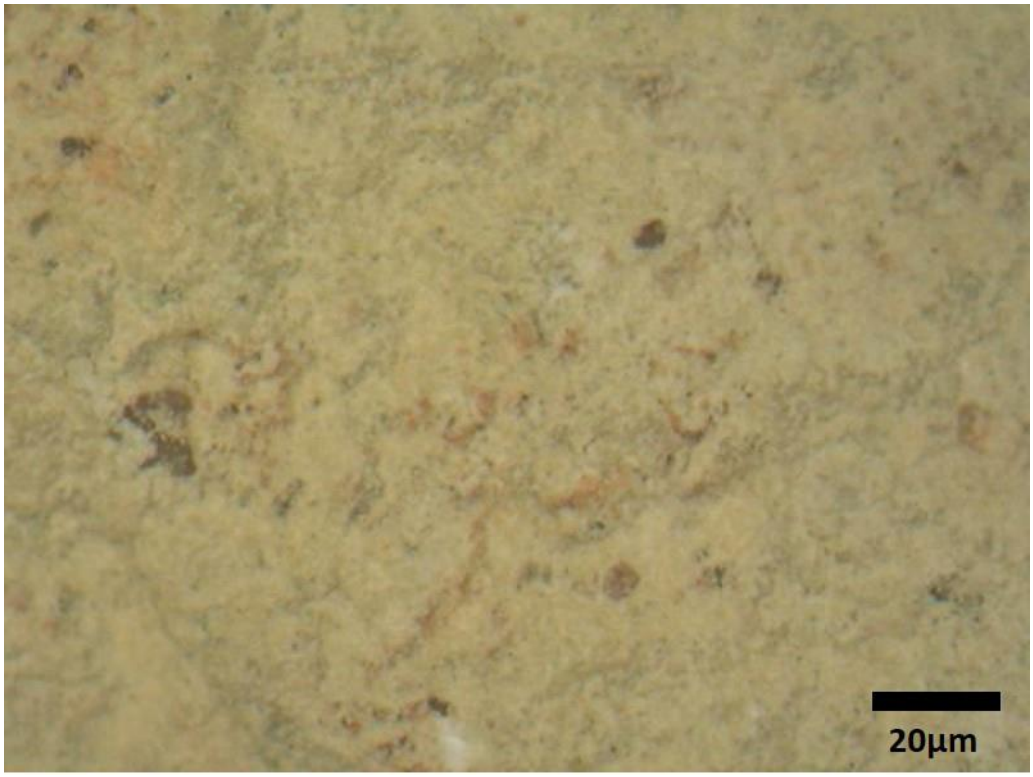
Στην Εικόνα 102 παρατηρείται ότι το κεραμικό M_c_y έχει ορισμένες μαύρες επικαθίσεις. Ακόμα, φαίνονται περιοχές κόκκινου χρώματος, ίδιες με το εσωτερικό του κεραμικού (κεραμικό M_c_r). Από τις εικόνες FOM για το κεραμικό M_c_r (Εικόνα 103) μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το υλικό παρουσιάζει υψηλό πορώδες. Αντίστοιχα, φαίνονται περιοχές κίτρινου χρώματος, ίδιες με το εξωτερικό του κεραμικού (κεραμικό M_c_y).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 104, ο ψαμμίτης M_s_p εμφανίζει υψηλό πορώδες, ενώ παρατηρούνται υπολείμματα λευκού φιλμ σε σημεία της επιφάνειάς του, καθώς και μικρές μαύρες επικαθίσεις. Στην Εικόνα 105 παρατηρείται ότι ο ασβεστόλιθος M_s είναι εξαιρετικά συμπαγής και παρουσιάζει πολύ χαμηλό πορώδες, ενώ παράλληλα και αυτός εμφανίζει ορισμένες μικρές μαύρες επικαθίσεις.

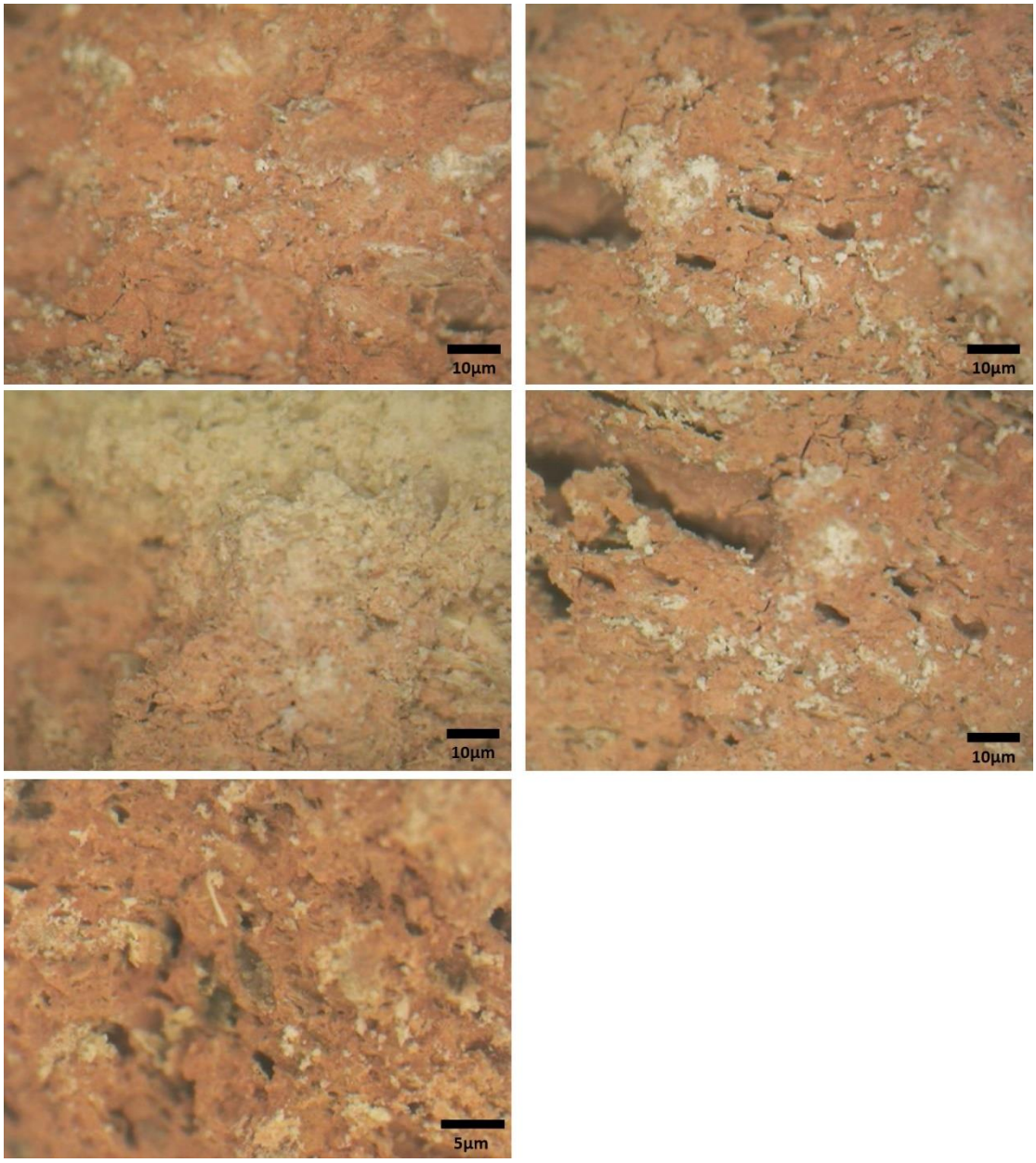
Στην Εικόνα 106 είναι εμφανές ότι το κονίαμα M_m_w έχει ορισμένες μαύρες επικαθίσεις, ενώ όσα από τα αδρανή φαίνονται είναι μικρού μεγέθους. Παράλληλα, παρατηρείται ότι εμφανίζει πολλούς, αλλά μικρής διαμέτρου πόρους. Αντίθετα, το κονίαμα M_m_g (Εικόνα 107) περιέχει πολύ μεγαλύτερα

αδρανή, διαφόρων χρωματισμών, όπως κόκκινα, καφέ και μαύρα και φαίνεται συμπαγές.

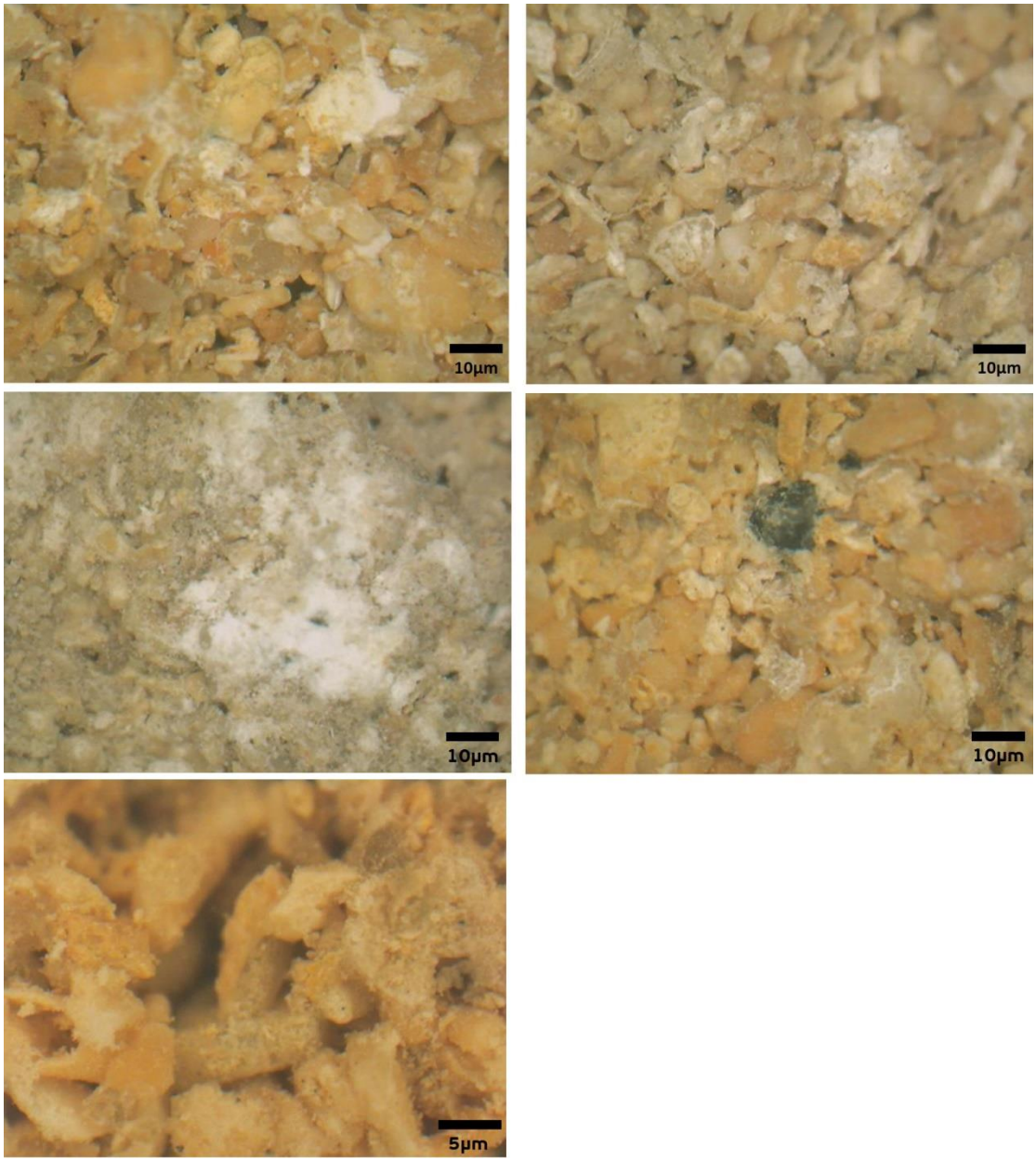
Στο μέταλλο M_steel (Εικόνα 109) παρατηρείται ότι έχει πραγματοποιηθεί διάβρωση του μετάλλου σε πολύ μεγάλο βαθμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαβρωμένη περιοχή (κόκκινο χρώμα) είναι πολύ μεγαλύτερη της υγιούς περιοχής (πράσινο χρώμα). Το γεγονός αυτό είναι ορατό και μακροσκοπικά.



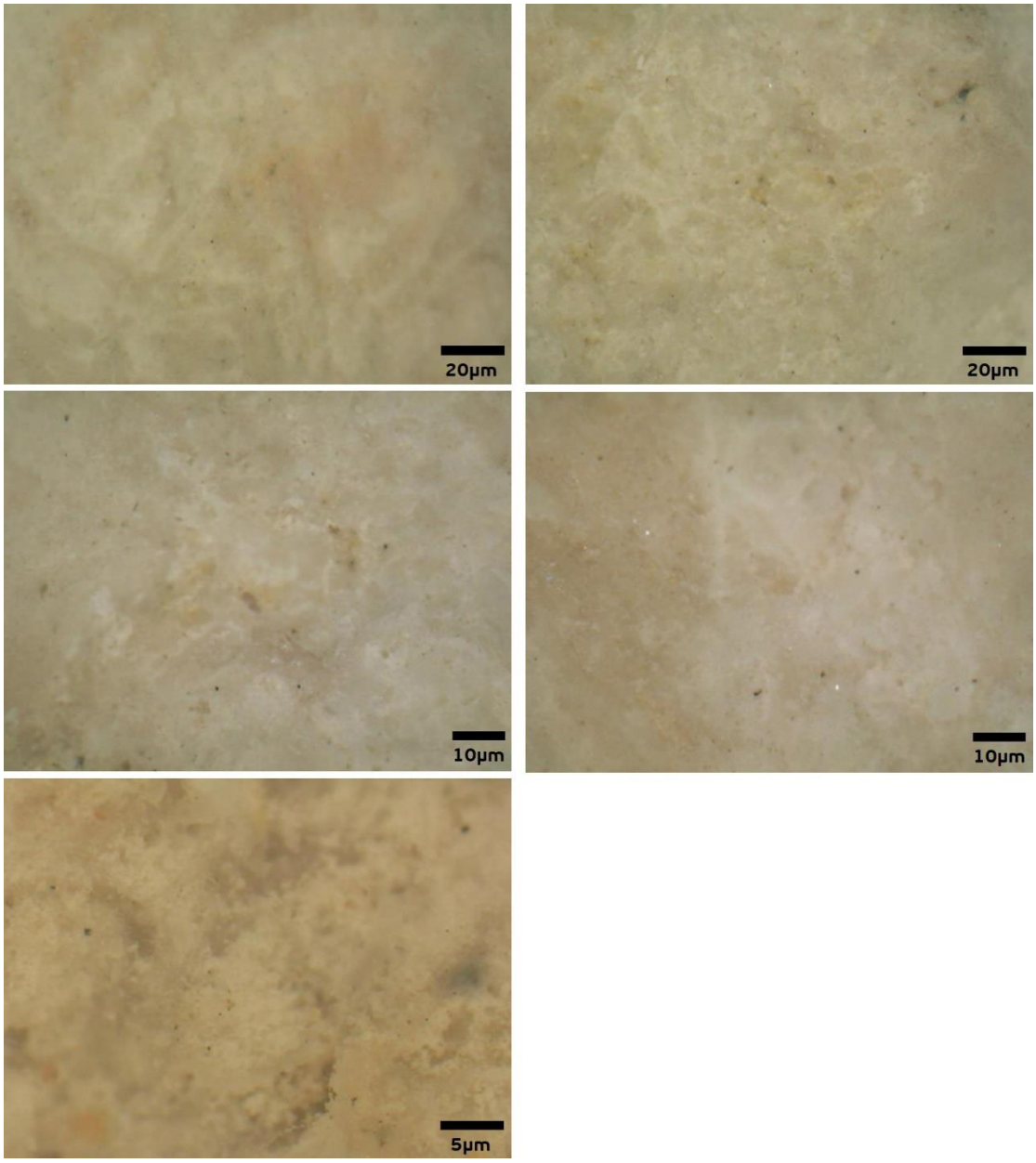
Εικόνα 102: Αποτελέσματα FOM του κεραμικού M_c_y.



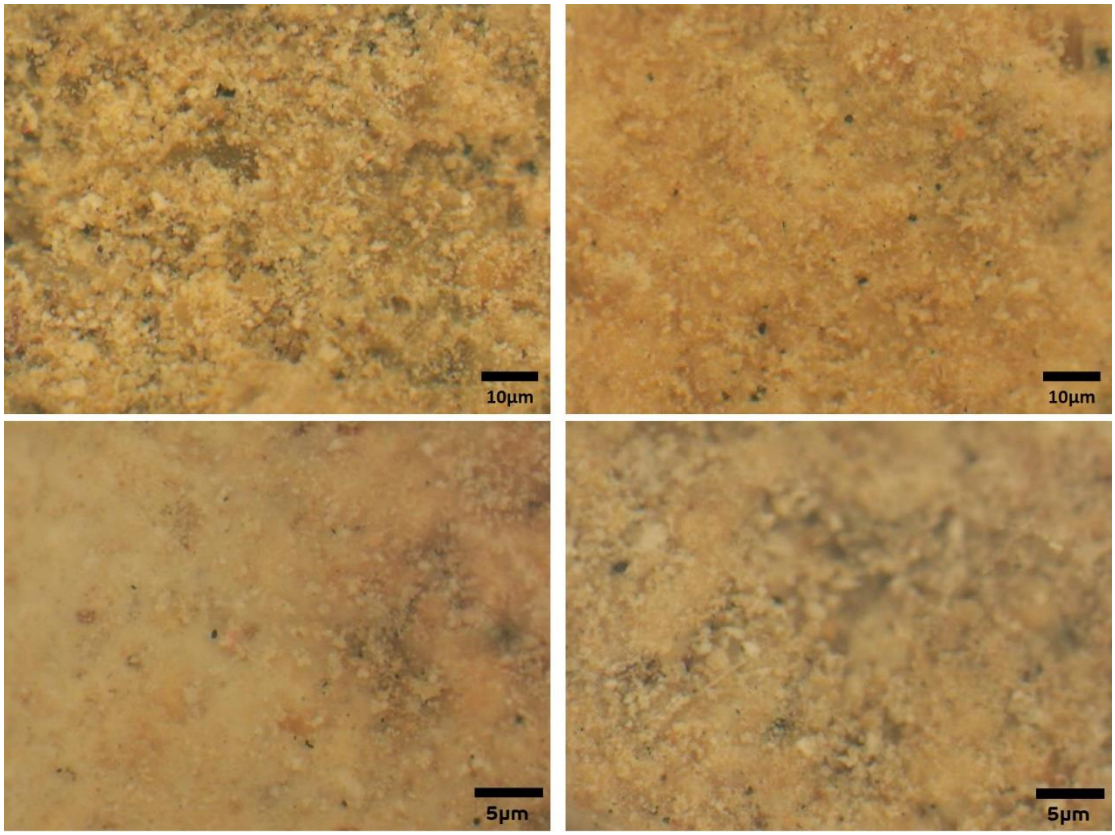
Εικόνα 103: Αποτελέσματα FOM του κεραμικού M_c_r.



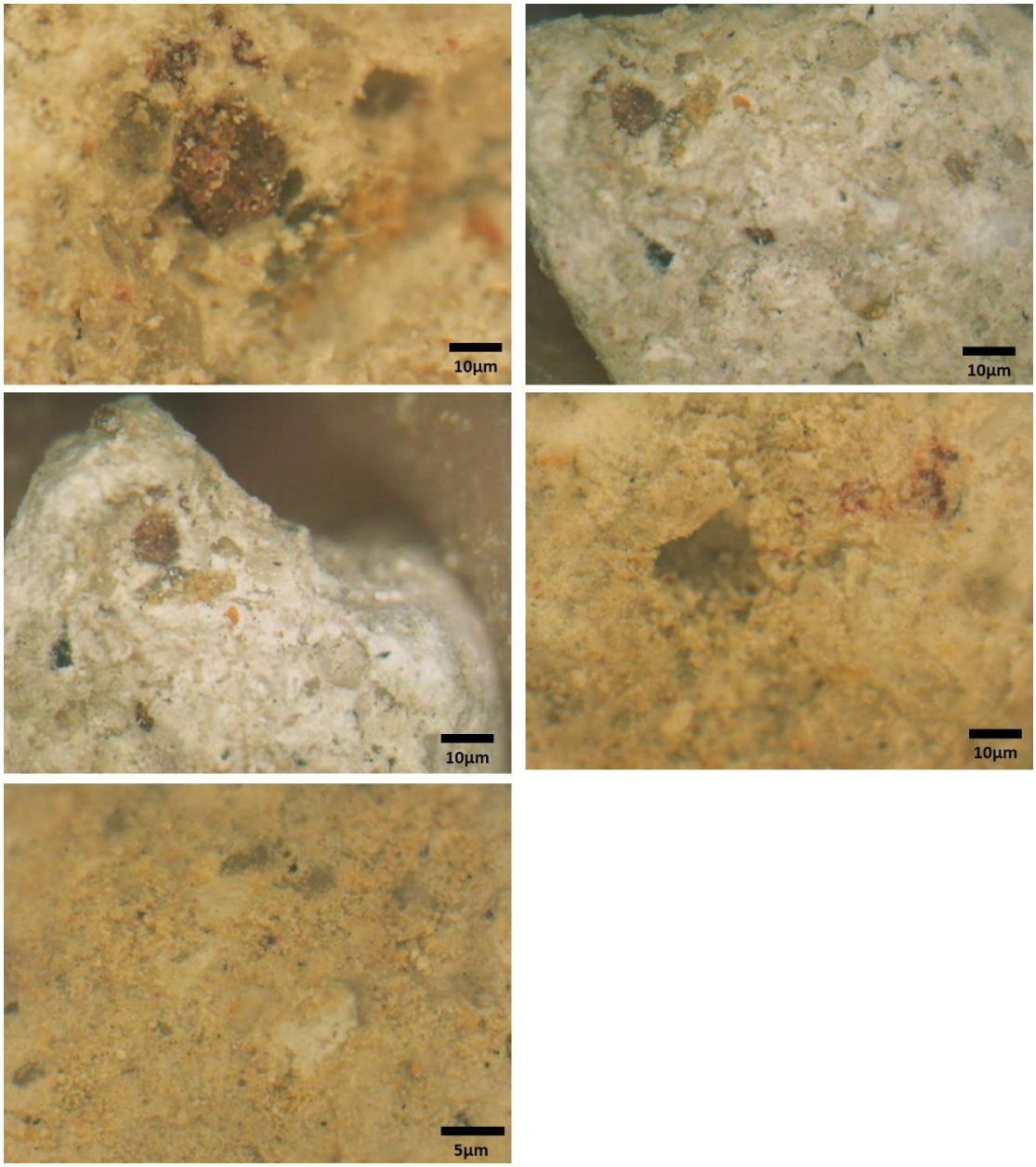
Εικόνα 104: Αποτελέσματα FOM του ψαμμίτη M_s_p.



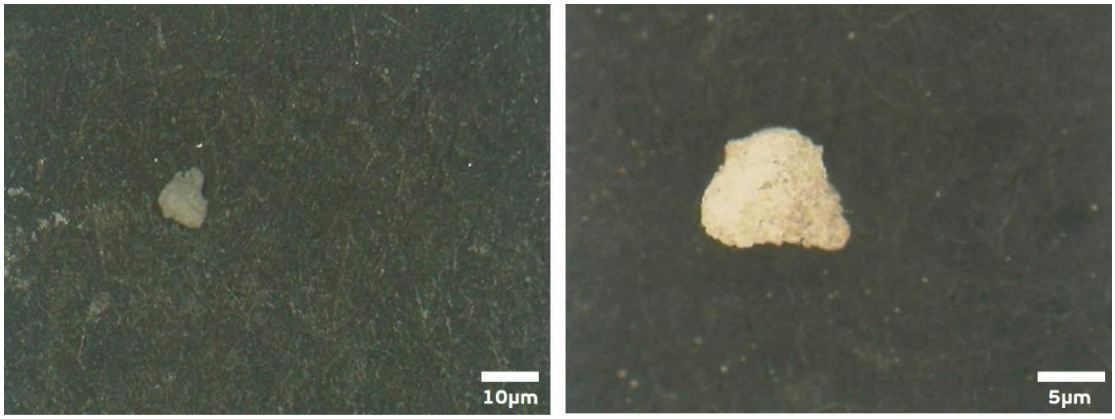
Εικόνα 105: Αποτελέσματα FOM του ασβεστόλιθου M_s.



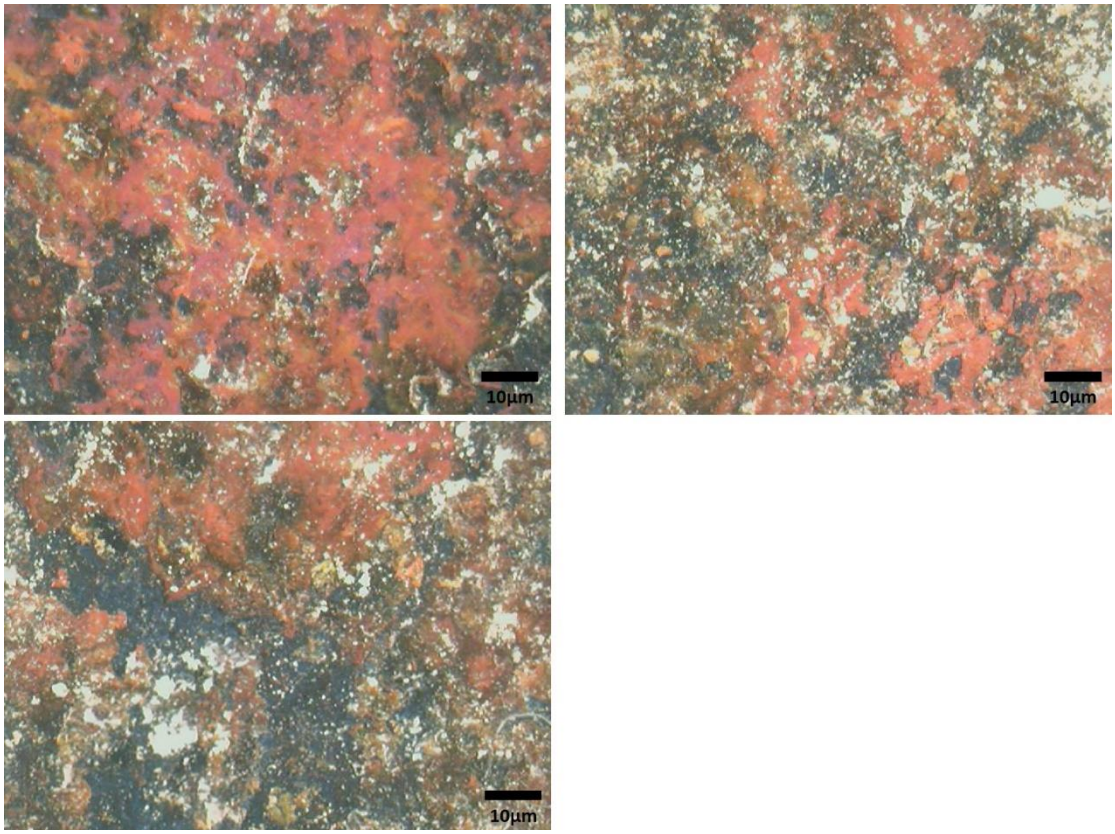
Εικόνα 106: Αποτελέσματα FOM του κονιάματος M_m_w.



Εικόνα 107: Αποτελέσματα FOM του κονιάματος M_m_g.



Εικόνα 108: Αποτελέσματα FOM του φιλμ M_film.



Εικόνα 109: Αποτελέσματα FOM του μετάλλου M_steel.

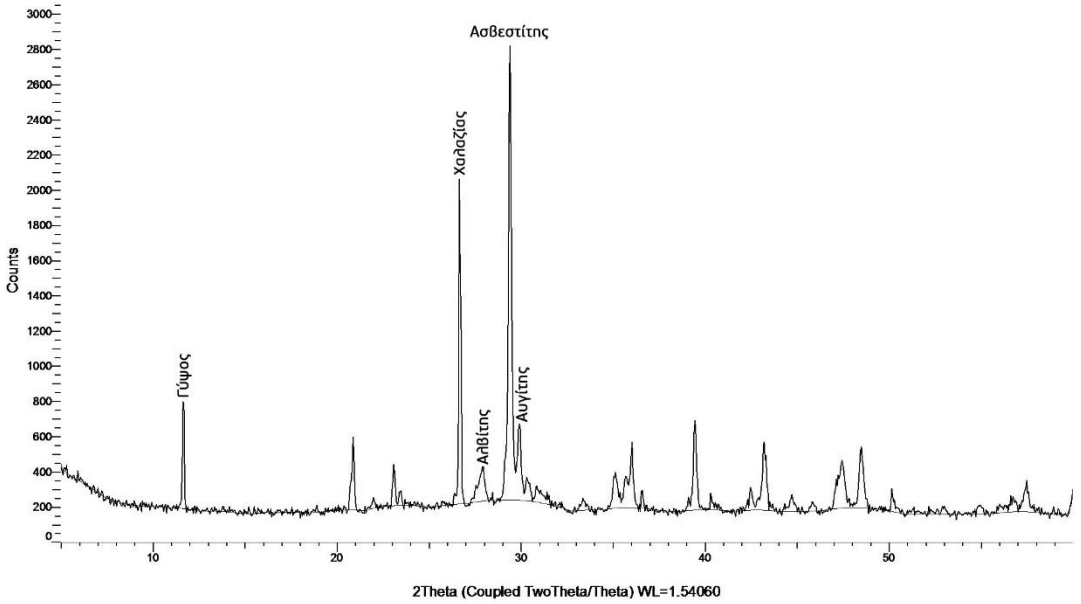
4.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Τα δείγματα κονιορτοποιήθηκαν με τη χρήση ιγδίου πορσελάνης και τοποθετήθηκαν στη συσκευή D8 Advance, της εταιρίας Bruker AXS. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Diffrac.Measurement Centre, έκδοση 4.0, της εταιρίας Bruker AXS και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Diffrac.Eva, έκδοση 3.1, της εταιρίας Bruker AXS. Η λυχνία ήταν χαλκού και η σάρωση πραγματοποιήθηκε για γωνίες 2θ (2 Theta) από 5^{o} έως 60^{o}. Το βήμα αύξησης της γωνίας 2θ ήταν $0,05^{o}$, το διάφραγμα της λυχνίας ήταν 0,681mm, το διάφραγμα του ανιχνευτή ήταν επίσης 0,681mm και το άνοιγμα του ανιχνευτή ήταν $2,95^{o}$. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στα Σχήματα 71 έως 76, στα οποία έχουν σημειωθεί οι κύριες κορυφές κάθε ορυκτού που εμφανίζεται (rruff.info). Τα αποτελέσματα αυτά αποκαλύπτουν την ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 15.

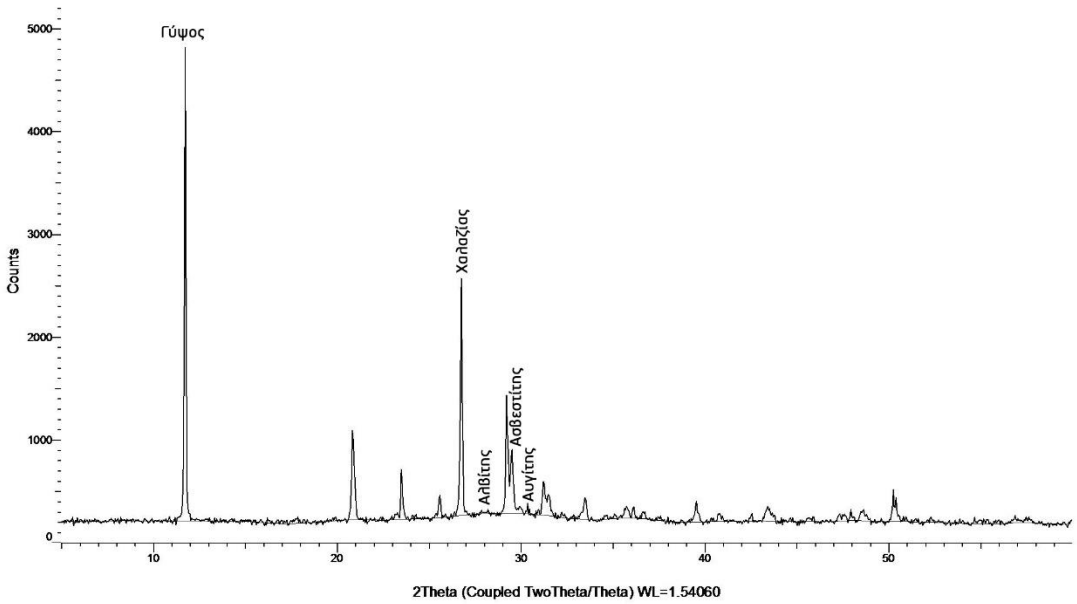
Παρατηρείται ότι το κεραμικό M_c_y (Σχήμα 71) παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις ασβεστίτη και χαλαζία και ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις γύψο, αυγίτης και αλβίτη. Το κεραμικό M_c_r (Σχήμα 72) παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις γύψο και χαλαζία, ενώ ανιχνεύονται επίσης αυγίτης, αλβίτης και ασβεστίτης. Ο ψαμμίτης M_s_p (Σχήμα 73) παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις χαλαζία και ασβεστίτη, ενώ ανιχνεύονται επίσης μελίλιθος και σανίδιο. Ο ασβεστόλιθος M_s (Σχήμα 74) παρουσιάζει ως κύρια ορυκτολογική φάση ασβεστίτη. Το κονίαμα M_m_w (Σχήμα 75) παρουσιάζει ως κύρια ορυκτολογική φάση ασβεστίτη, ενώ ανιχνεύονται επίσης γύψος, αλίτης και δολομίτης. Το κονίαμα M_m_g (Σχήμα 76) παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις γύψο και ασβεστίτη και ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις χαλαζία και ακερμανίτη. Ο γύψος που ανιχνεύεται σε αρκετά από τα δείγματα είναι προϊόν διάβρωσης, λόγω της παρουσίας υγρασίας στο εσωτερικό του υλικού.

Πίνακας 15: Ορυκτολογική σύνθεση των δειγμάτων, ως αποτέλεσμα της ανάλυσης XRD. Τα ορυκτά είναι καταγεγραμμένα κατά φθίνουσα σειρά, ξεκινώντας από αυτό που εμφανίζεται σε μεγαλύτερη ποσότητα.

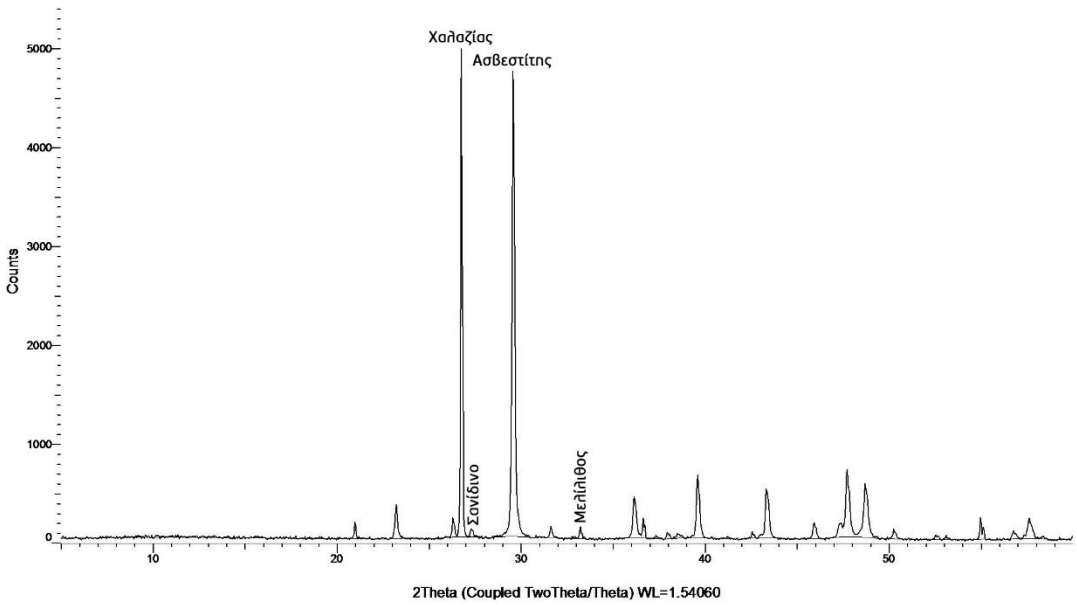
Δείγμα	***Ορυκτολογική Σύνθεση***
M_c_y	Ασβεστίτης, Χαλαζίας, Γύψος, Αυγίτης, Αλβίτης
M_c_r	Γύψος, Χαλαζίας, Αυγίτης, Αλβίτης, Ασβεστίτης
M_s_p	Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Μελίλιθος, Σανίδιο
M_s	Ασβεστίτης
M_m_w	Ασβεστίτης, Γύψος, Αλίτης, Δολομίτης
M_m_g	Γύψος, Ασβεστίτης, Χαλαζίας, Ακερμανίτης



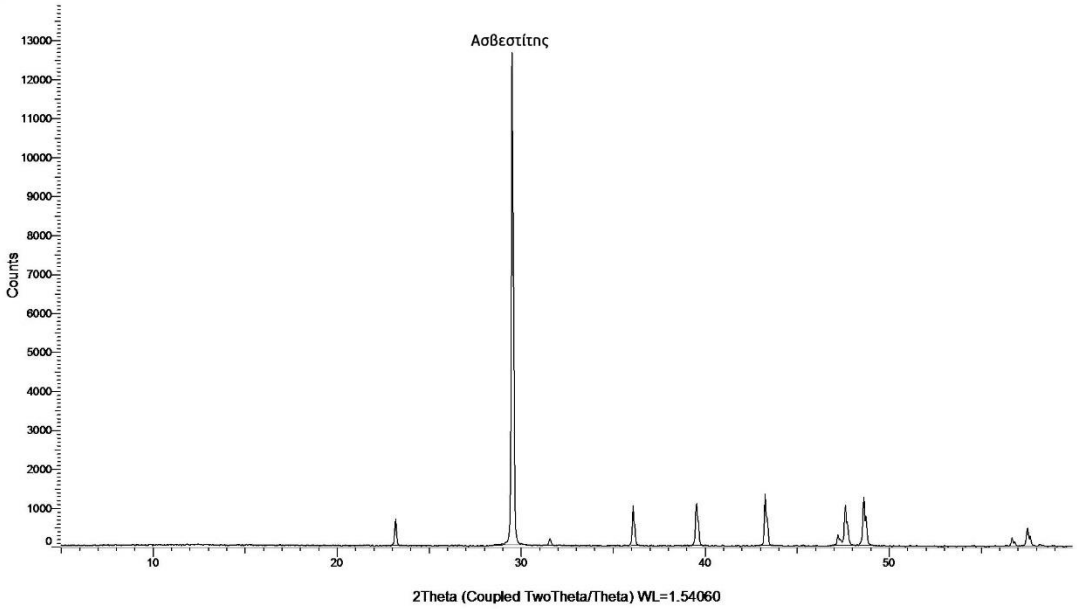
Σχήμα 71: Διάγραμμα XRD για το κεραμικό M_c_y.



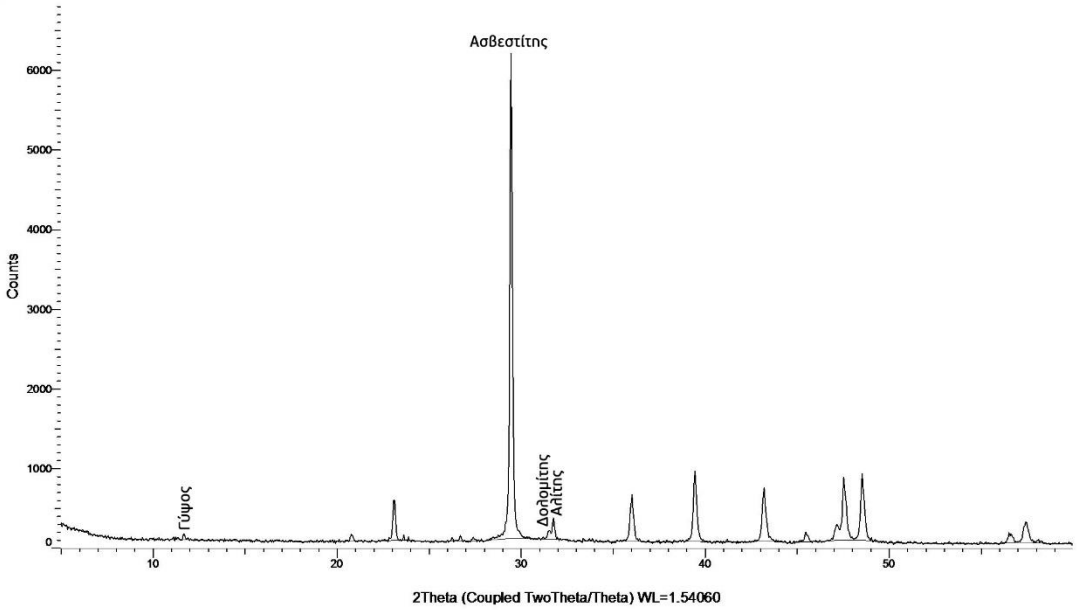
Σχήμα 72: Διάγραμμα XRD για το κεραμικό M_c_r.



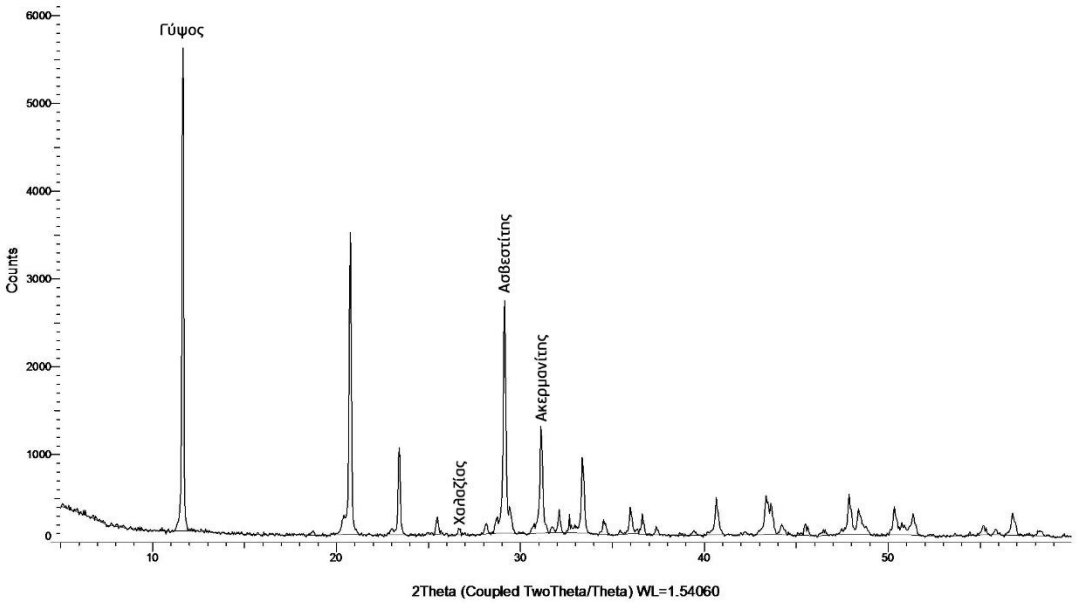
Σχήμα 73: Διάγραμμα XRD για τον ψαμμίτη M_s_p.



Σχήμα 74: Διάγραμμα XRD για τον ασβεστόλιθο M_s.



Σχήμα 75: Διάγραμμα XRD για το κονίαμα M_m_w.



Σχήμα 76: Διάγραμμα XRD για το κονίαμα M_m_g.

4.2.3. Αποτελεσματα Πορσιμετριας Υδραργυρου

Τα δείγματα προετοιμάστηκαν κατάλληλα (μάζα, σχήμα) για τη μέτρηση του πορώδους τους, τοποθετήθηκαν σε πυριατήριο, στους 60^{o}C για περίπου 72h και τέλος τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα, για περίπου 120h. Για τη μέτρηση του μακροπορώδους, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Macropores Unit 120, της εταιρίας Carlo Erba Instruments. Για τη μέτρηση του μικροπορώδους, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Pascal 440 Series, της εταιρίας Thermo Electron Corporation. Τέλος, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pascal 120/240/440, έκδοση 1.03, της εταιρίας Thermo Electron Corporation. Οι ιδιότητες της μικροδομής των δειγμάτων, όπως προκύπτουν ως αποτελέσματα της MIP, φαίνονται στον Πίνακα 16, ενώ οι καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου και ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για κάθε δείγμα, φαίνονται στα Σχήματα 77 έως 84.

Παρατηρείται ότι το κεραμικό M_c_r και το κονίαμα M_m_w παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλό πορώδες, ο ψαμμίτης M_s_p παρουσιάζει υψηλό πορώδες, ενώ ο ασβεστόλιθος M_s παρουσιάζει χαμηλότερο πορώδες. Συγκριτικά, λοιπόν, ο ψαμμίτης παρουσιάζει υψηλότερο πορώδες από τον ασβεστόλιθο, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, καθώς ο ασβεστόλιθος φαίνεται πιο συμπαγής. Έτσι, επιβεβαιώνεται ένα εκ των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την επί τόπου εφαρμογή FOM στην ιστορική κατασκευή (βλ. §4.1.1), σύμφωνα με το οποίο, ο ψαμμίτης μπορεί να χαρακτηριστεί ως πωρόλιθος. Παράλληλα, επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή FOM στα δείγματα (βλ. §4.2.1), σύμφωνα με τα οποία το κεραμικό M_c_r, το κονίαμα M_m_w και ο ψαμμίτης M_s_p παρουσιάζουν υψηλό πορώδες. Τέλος, επιβεβαιώνεται ένα εκ των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή GPR (βλ. §4.1.3), σύμφωνα με το οποίο ο ασβεστόλιθος είναι εξαιρετικά συμπαγής.

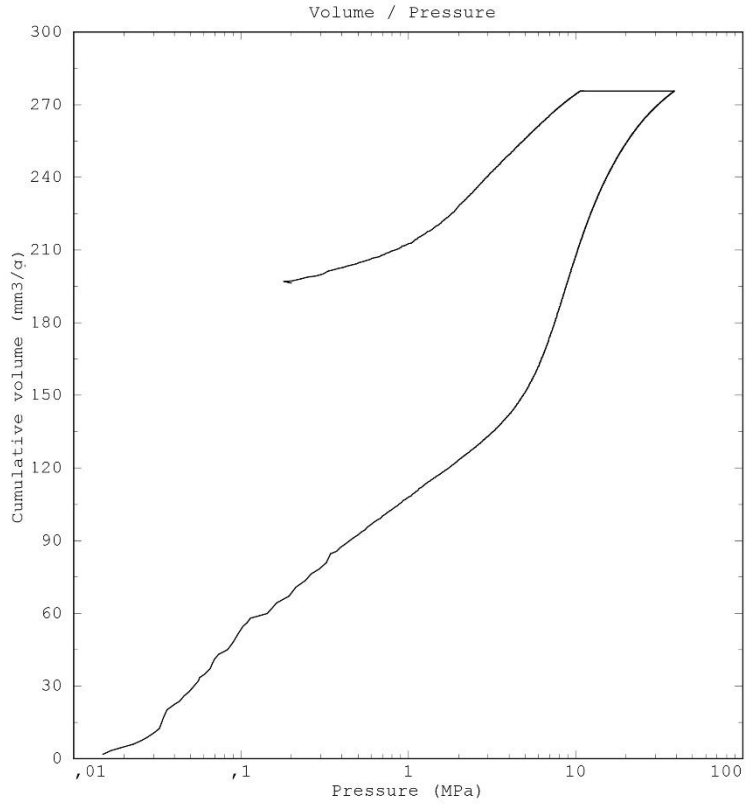
Επιπρόσθετα, ο ψαμμίτης παρουσιάζει μέτρια προς υψηλή ειδική επιφάνεια και παράλληλα πολύ υψηλή μέση ακτίνα πόρων, γεγονός που τον καθιστά επιρρεπή στη φθορά και εξηγεί την εκτεταμένη φθορά που παρατηρείται στο

υλικό αυτό της ιστορικής κατασκευής. Υψηλή ειδική επιφάνεια παρουσιάζει το κεραμικό και το κονίαμα, γεγονός που επίσης τα καθιστά επιρρεπή στη φθορά.

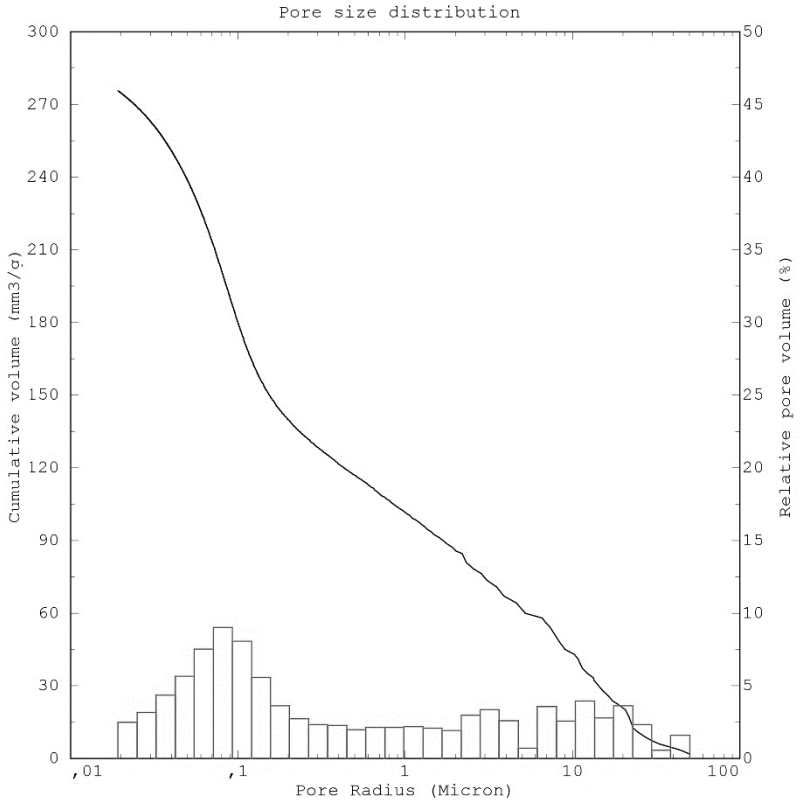
Στο κεραμικό M_c_r (Σχήμα 78) παρατηρείται μια κορυφή σε μικρό εύρος πόρων, η οποία εμφανίζει συγκέντρωση του υψηλότερου ποσοστού των πόρων σε ακτίνα 0,1 – 0,5 μm και μια σχετικά ισοϋψής κατανομή σε μεγαλύτερο εύρος πόρων. Στον ψαμμίτη M_s_p (Σχήμα 80) παρατηρείται μια μονοκόρυφη κατανομή στην περιοχή του μακροπορόδους, η οποία εμφανίζει συγκέντρωση του υψηλότερου ποσοστού των πόρων σε ακτίνα 30 – 50 μm, ενώ χαμηλό ποσοστό πόρων εμφανίζεται στην περιοχή του μικροπορόδους. Στον ασβεστόλιθο M_s (Σχήμα 82) παρατηρείται μια μονοκόρυφη κατανομή, η οποία εμφανίζει συγκέντρωση του υψηλότερου ποσοστού των πόρων σε ακτίνα 1 – 4 μm. Στο κονίαμα M_m_w (Σχήμα 84) παρατηρείται μια μονοκόρυφη κατανομή, η οποία εμφανίζει συγκέντρωση του υψηλότερου ποσοστού των πόρων σε ακτίνα 0,5 – 2 μm, ενώ χαμηλό ποσοστό πόρων εμφανίζεται στην περιοχή του μικροπορόδους. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η αρχή των διαγραμμάτων ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, του κεραμικού M_c_r (σε μεγάλο βαθμό) και του κονιάματος M_m_w (σε μικρότερο βαθμό) δεν είναι παράλληλες προς τον άξονα της διαμέτρου των πόρων (άξονας x), γεγονός που δηλώνει ότι υπάρχουν μικρότεροι πόροι, τους οποίους η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε δεν μπόρεσε να προσδιορίσει. Αντίθετα, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στα αντίστοιχα διαγράμματα του ψαμμίτη M_s_p και του ασβεστόλιθου M_s.

Πίνακας 16: Ιδιότητες της μικροδομής των δειγμάτων, ως αποτέλεσμα MIP.

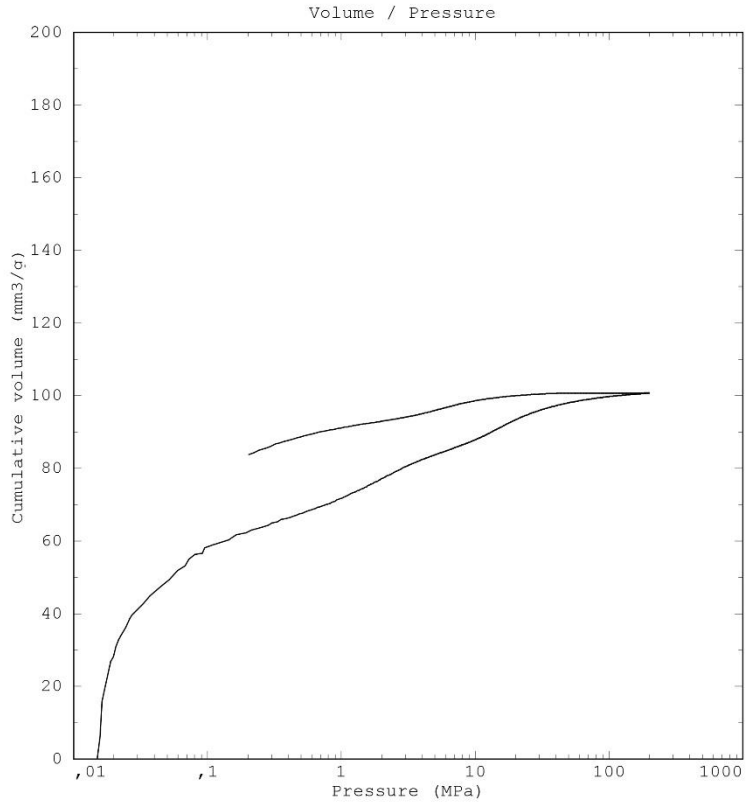
Δείγμα	***Ολικός Ειδικός Όγκος TCV (mm^3/g)***	***Φαινόμενη Πυκνότητα d_b (g/cm^3)***	***Ολικό Ανοιχτό Πορώδες P%***	***Μέση Ακτίνα Πόρων r_a (μm)***	***Ειδική Επιφάνεια A (m^2/g)***
M_c_r	275,688	1,436	39,581	0,212	4,811
M_s_p	100,829	2,056	20,735	12,542	1,516
M_s	65,136	2,165	14,103	3,512	0,256
M_m_w	375,798	1,241	46,623	0,870	6,665



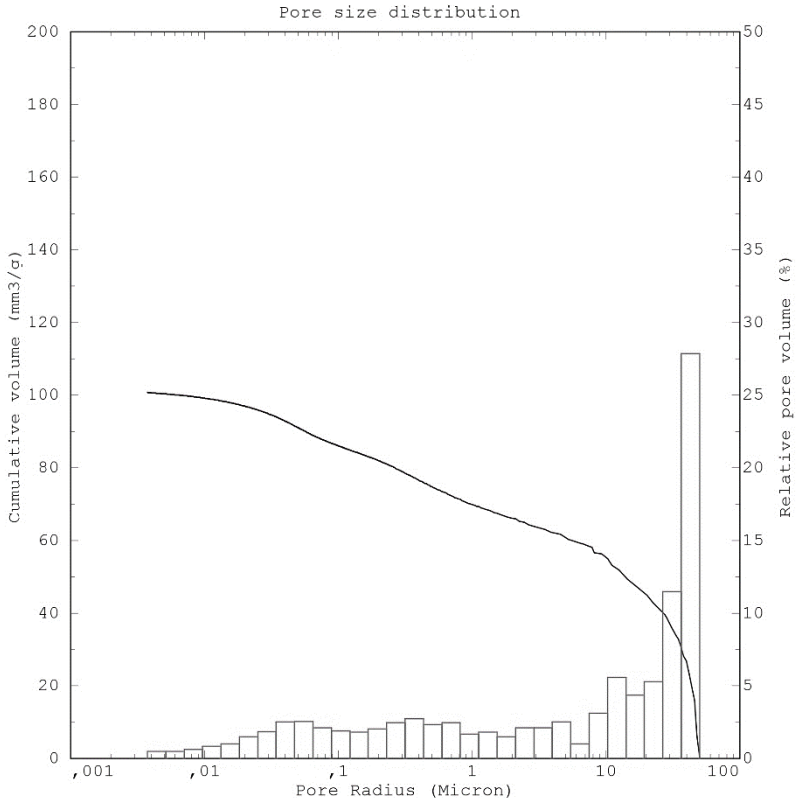
Σχήμα 77: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για το κεραμικό M_c_r.



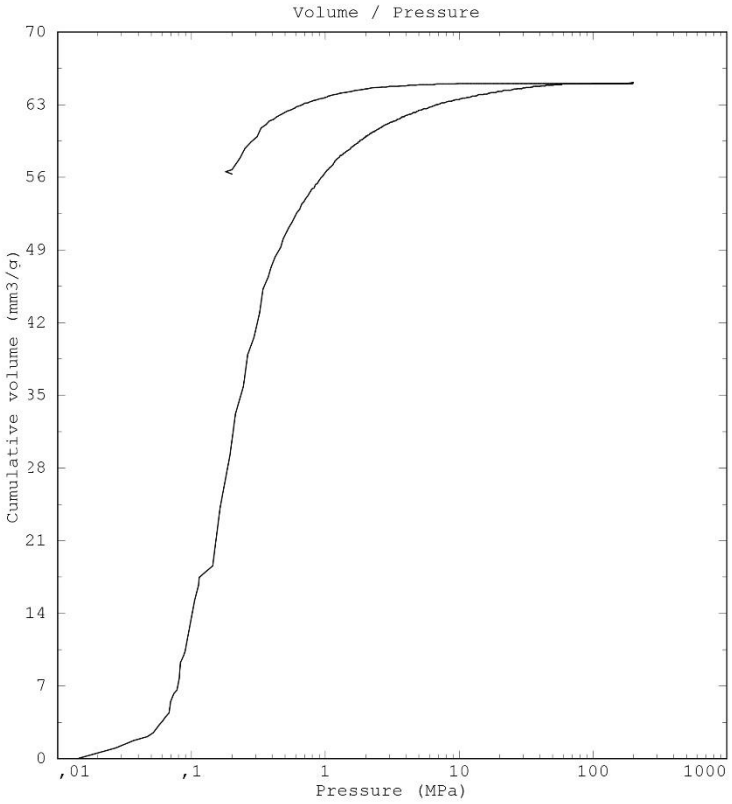
Σχήμα 78: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για το κεραμικό M_c_r.



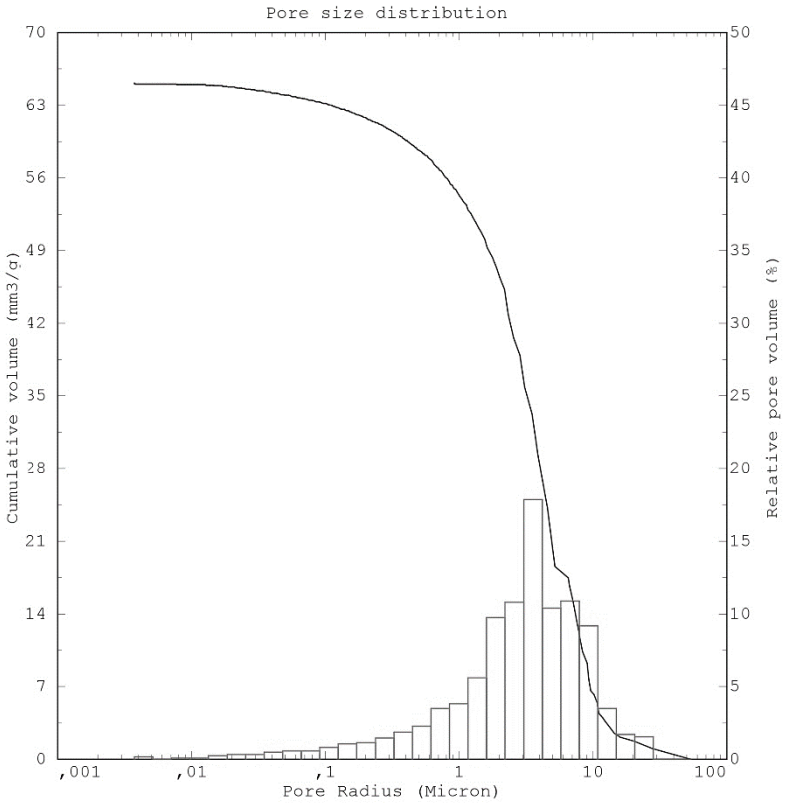
Σχήμα 79: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για τον ψαμμίτη M_s_p.



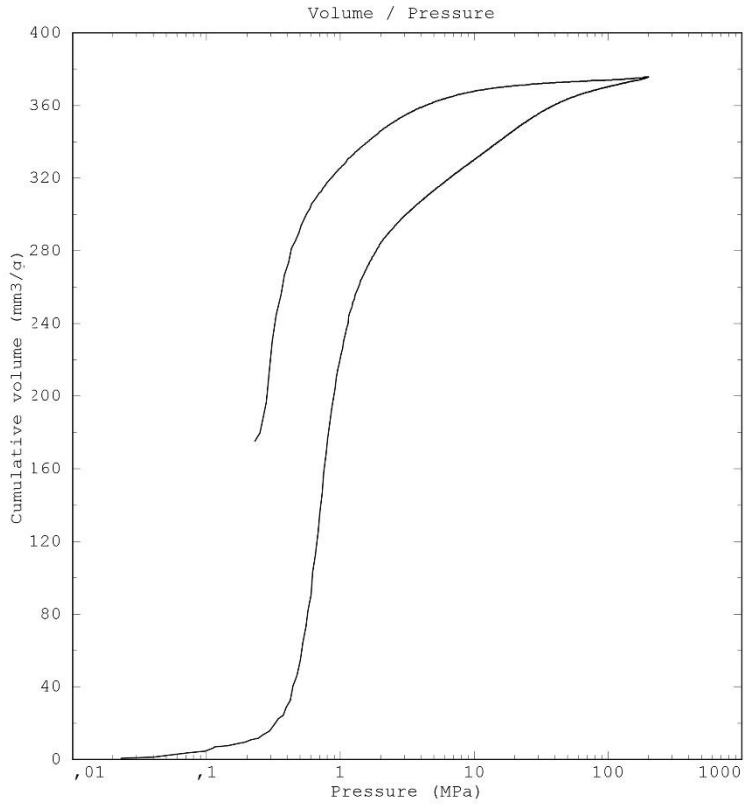
Σχήμα 80: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για τον ψαμμίτη M_s_p.



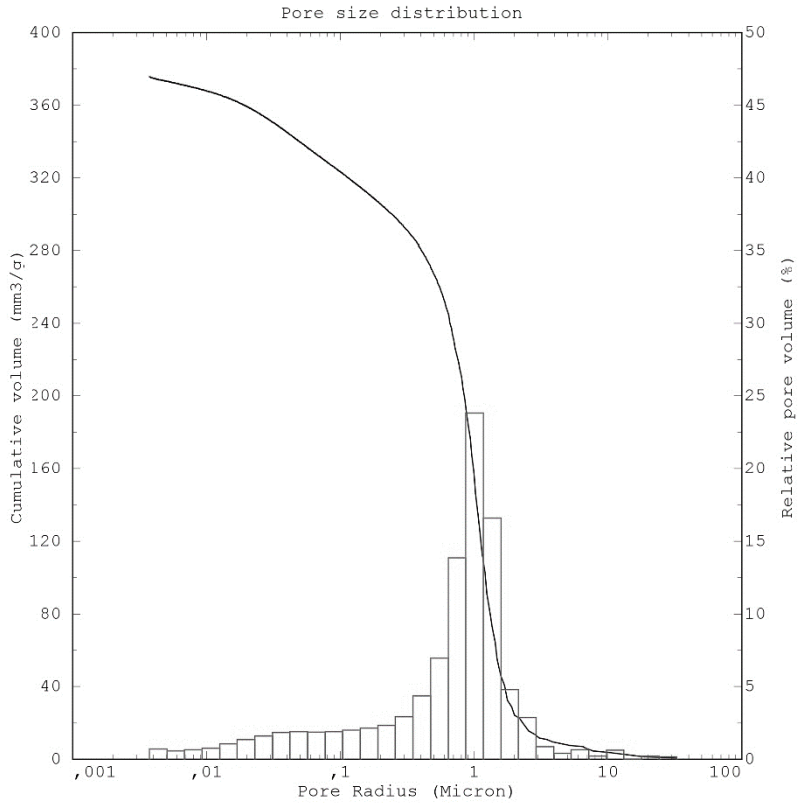
Σχήμα 81: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για τον ασβεστόλιθο M_s.



Σχήμα 82: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για τον ασβεστόλιθο M_s.



Σχήμα 83: Καμπύλες εισχώρησης – απομάκρυνσης υδραργύρου για το κονίαμα M_m_w.



Σχήμα 84: Διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής πόρων ως προς το μέγεθος της ακτίνας τους, για το κονίαμα M_m_w.

4.2.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ / ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Τα δείγματα κονιορτοποιήθηκαν με τη χρήση ιγδίου πορσελάνης και τοποθετήθηκαν στη συσκευή STA Simultaneous Thermal Analysis 409 EP, της εταιρίας NETZXSCH. Η λήψη και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού TA 200, έκδοση 3.0, της εταιρίας NETZXSCH. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στα Σχήματα 85 έως 90. Από την επεξεργασία των εν λόγω διαγραμμάτων, προκύπτει η ποσοστιαία απώλεια μάζας σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 15.

Το κεραμικό M_c_y εμφανίζει απώλεια μάζας 1,13% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 1,76% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 3,16% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 15,15% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 142,7°C οφείλεται στην παρουσία γύψου. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 567,6°C οφείλεται στην αλλαγή φάσης του α–χαλαζία (τριγωνικό σύστημα) σε β–χαλαζία (εξαγωνικό σύστημα) και δε συνοδεύεται από απώλεια βάρους. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 832,6°C αποδίδεται στη διάσπαση του ασβεστίτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει ασβεστίτη, γύψο και χαλαζία. Επιπλέον, από την ποσοστιαία απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C υπολογίζεται ότι το δείγμα περιέχει ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) σε ποσοστό περίπου 34,4%. Η υψηλή του κεραμικού σε $CaCO_3$ σχετίζεται με τις πρώτες ύλες που έχουν χρησιμοποιηθεί (αργιλικές πρώτες ύλες, πλούσιες σε ασβέστιο), καθώς και με την τεχνολογία παραγωγής του.

Το κεραμικό M_c_r εμφανίζει απώλεια μάζας 0,59% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 0,59% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 2,29% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 2,89% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που

εκδηλώνεται στους 125°C οφείλεται στην παρουσία γύψου. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 565,1°C οφείλεται στη μετατροπή του α–χαλαζία σε β–χαλαζία και δε συνοδεύεται από απώλεια βάρους. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 949,1°C υποδεικνύει μετασχηματισμούς στερεάς φάσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει γύψο και χαλαζία. Επιπλέον, από την ποσοστιαία απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C υπολογίζεται ότι το δείγμα περιέχει $CaCO_3$ σε ποσοστό περίπου 6,6%.

Ο ψαμμίτης M_s_p εμφανίζει απώλεια μάζας 0,67% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 0,41% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 1,62% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 34,09% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 566,2°C οφείλεται στη μετατροπή του α–χαλαζία σε β–χαλαζία και δε συνοδεύεται από απώλεια βάρους. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 877,8°C αποδίδεται στη διάσπαση του ασβεστίτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει χαλαζία και ασβεστίτη.

Ο ασβεστόλιθος M_s εμφανίζει απώλεια μάζας 0,11% στο θερμοκρασιακό διάστημα από 120°C μέχρι 600°C και 33,05% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 899,2°C αποδίδεται στη διάσπαση του ασβεστίτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει ασβεστίτη.

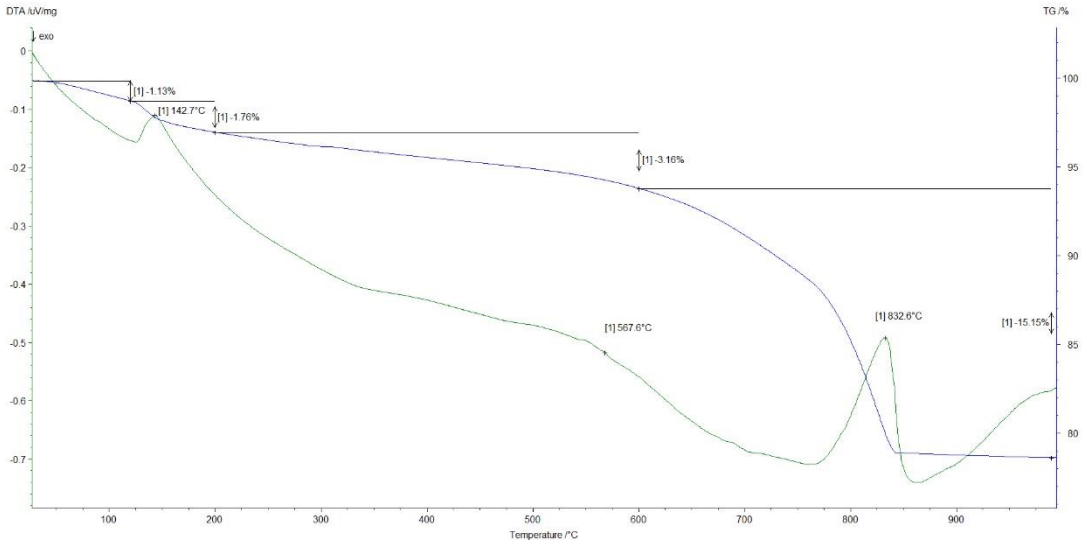
Το κονίαμα M_m_w εμφανίζει απώλεια μάζας 1,72% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 1,49% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 7,97% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 31,4% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που εκδηλώνεται στους 153,3°C οφείλεται στην παρουσία γύψου. Η εξώθερμη κορυφή στους 461,6°C προκαλείται από την παρουσία οργανικών. Οι ενδόθερμες κορυφές που εμφανίζονται στους 861,2°C και 882,3°C αποδίδονται

στη διάσπαση του ασβεστίτη και του δολομίτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει ασβεστίτη, γύψο και δολομίτη.

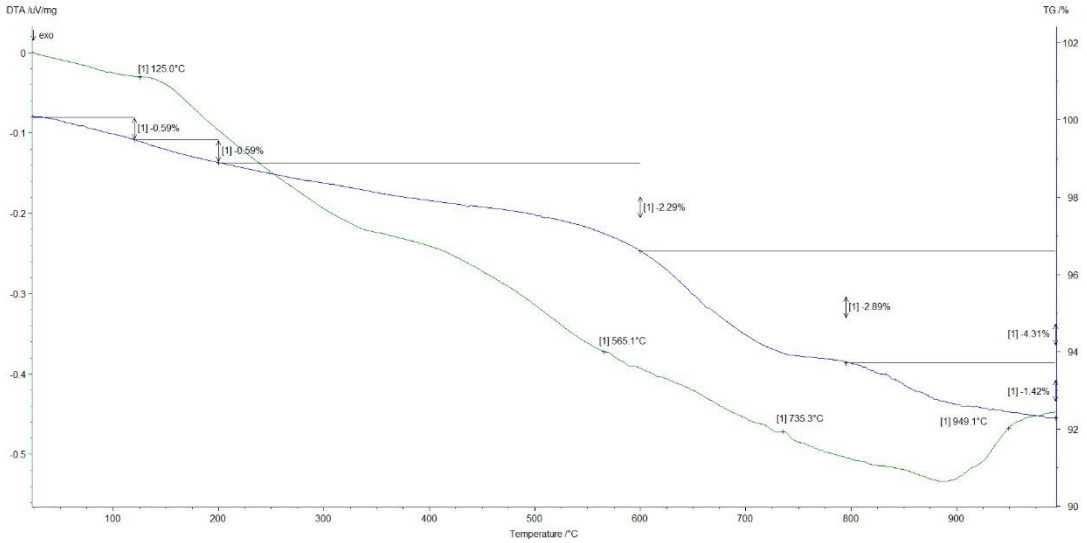
Το κονίαμα M_m_g εμφανίζει απώλεια μάζας 0,7% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 16,7% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 2,57% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 2,6% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Η ενδόθερμη κορυφή που εκδηλώνεται στους 151°C οφείλεται στην παρουσία γύψου. Η εξώθερμη κορυφή στους 450°C προκαλείται από την παρουσία οργανικών. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 500°C οφείλεται στη μετατροπή του α–χαλαζία σε β–χαλαζία και δε συνοδεύεται από απώλεια βάρους. Η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται στους 735,1°C αποδίδεται στη διάσπαση του ασβεστίτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της XRD (βλ. §4.2.2), σύμφωνα με τα οποία το δείγμα περιέχει γύψο, ασβεστίτη και χαλαζία.

Πίνακας 17: Ποσοστιαία απώλεια μάζας των δειγμάτων, σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, ως αποτέλεσμα DTA/TG.

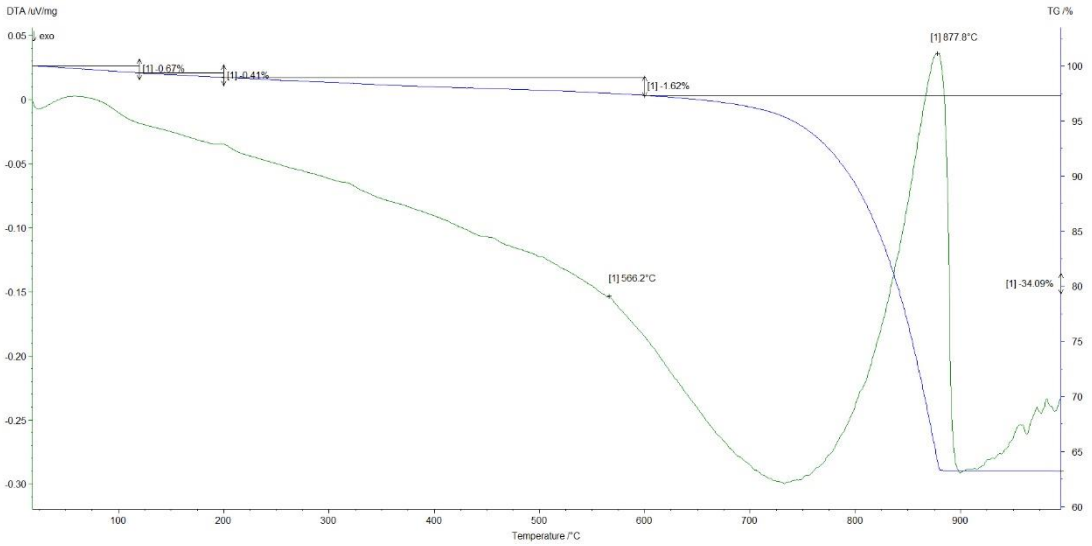
Δείγμα	***Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας Σε κάθε Θερμοκρασιακό Διάστημα (%)***			
	< 120 °C	***120 – 200 °C***	***200 – 600 °C***	***> 600 °C***
M_c_y	1,13	1,76	3,16	15,15
M_c_r	0,59	0,59	2,29	2,89
M_s_p	0,67	0,41	1,62	34,09
M_s	0,11			43,05
M_m_w	1,72	1,49	7,97	31,40
M_m_g	0,70	16,7	2,57	2,60



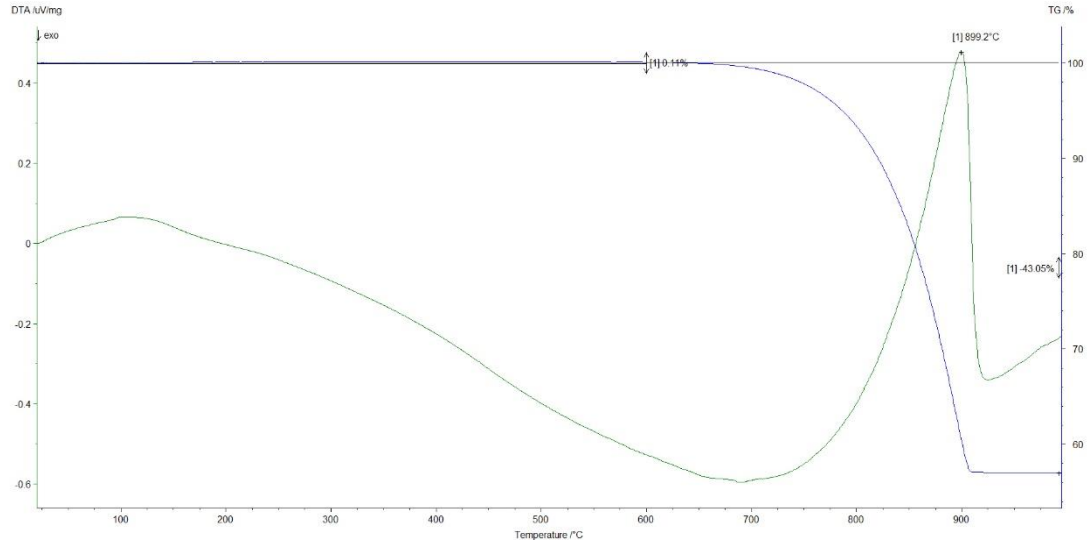
Σχήμα 85: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_c_y.



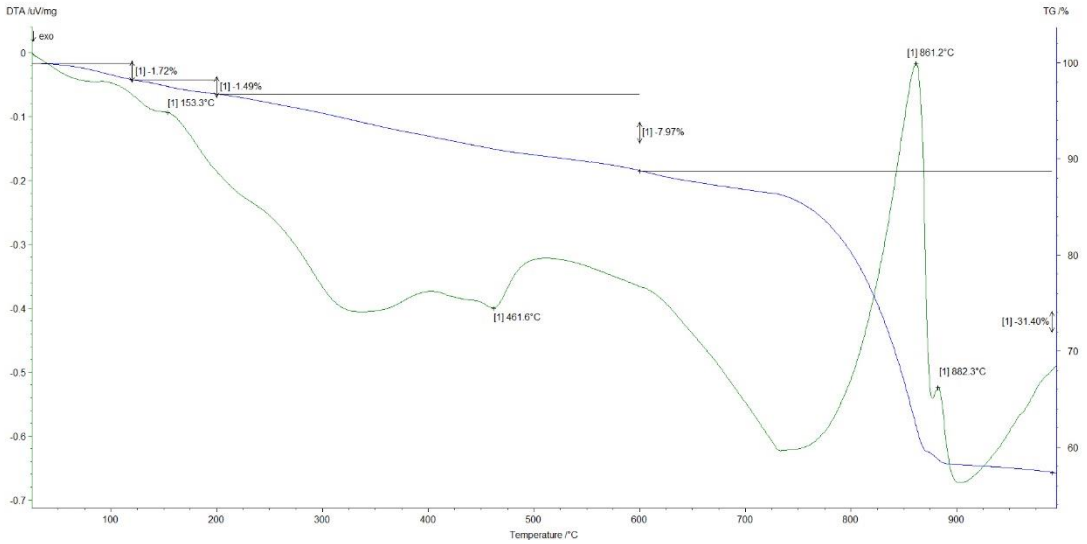
Σχήμα 86: Καμπύλη DTA/TG του κεραμικού M_c_r.



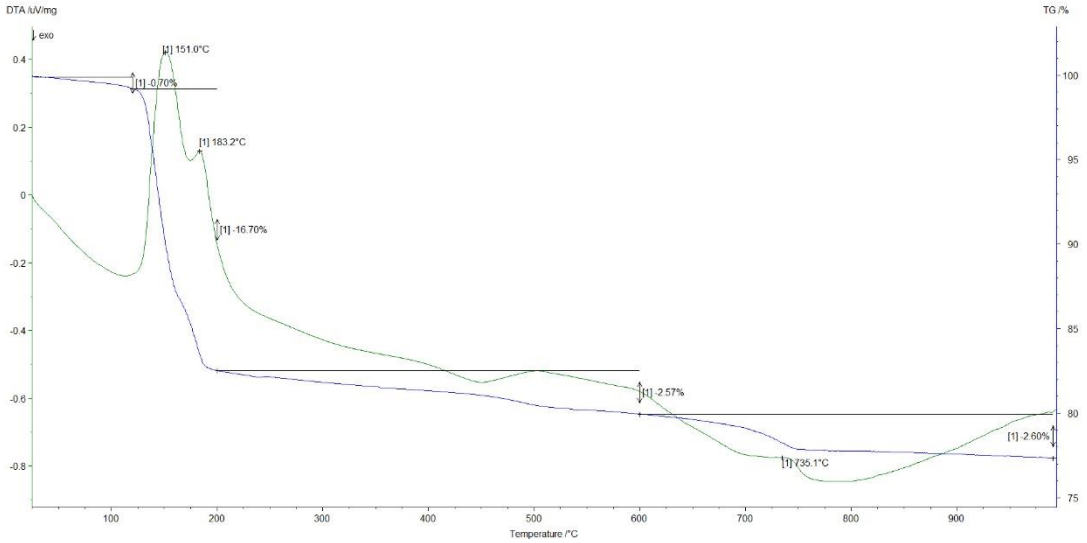
Σχήμα 87: Καμπύλη DTA/TG του ψαμμίτη M_s_p.



Σχήμα 88: Καμπύλη DTA/TG του ασβεστόλιθου M_s.



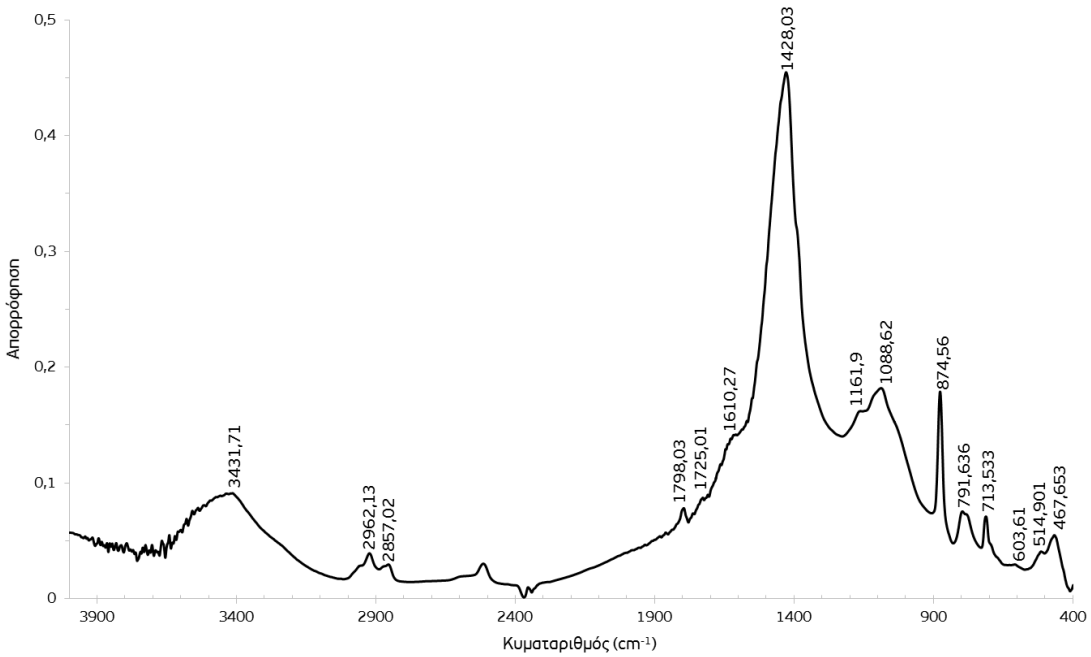
Σχήμα 89: Καμπύλη DTA/TG του κονιάματος M_m_w.



Σχήμα 90: Καμπύλη DTA/TG του κονιάματος M_m_g.

4.2.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ FOURIER

Το φιλμ λευκού χρώματος M_film τοποθετήθηκε στη συσκευή Excalibur FTS 30000 MX, της εταιρίας Bio–Rad. Το φάσμα απορρόφησης του δείγματος, μετά την ανάλυση FTIR φαίνεται στο Σχήμα 91.



Σχήμα 91: Φάσμα απορρόφησης του φιλμ λευκού χρώματος M_film, ως αποτέλεσμα FTIR. Είναι σημειωμένοι οι κυματαριθμοί που αντιστοιχούν στις κορυφές που εκδηλώνονται.

Η κορυφή που παρατηρείται στους 3431 κυματαριθμούς αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του δεσμού οξυγόνου – υδρογόνου (O–H) μορίων νερού πλέγματος, ενώ η κορυφή που φαίνεται στους 1610 κυματαριθμούς αντιστοιχεί στη δόνηση κάμψης του δεσμού οξυγόνου – υδρογόνου (O–H).

Στην κορυφή που εκδηλώνεται στους 1428,03 κυματαριθμούς αντιστοιχεί η δόνηση τάσης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη (ανθρακικό ασβέστιο –

$CaCO_3$), ενώ στην κορυφή που παρατηρείται στους 874,56 κυματαριθμούς αντιστοιχεί η δόνηση κάμψης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη.

Στους 1161,9 και 1088,62 κυματαριθμούς εκδηλώνονται δύο κορυφές που αντιστοιχούν στη δόνηση τάσης του δεσμού πυριτίου – οξυγόνου (Si–O) του χαλαζία (SiO_2). Η κορυφή που φαίνεται στους 791,636 κυματαριθμούς αντιστοιχεί στον πολυμερισμό του χαλαζία. Στους 514,09 κυματαριθμούς παρατηρείται κορυφή, η οποία αντιστοιχεί στη δόνηση κάμψης του δεσμού πυριτίου – οξυγόνου (Si–O)

Οι τρεις κορυφές μέτριας έντασης που παρατηρούνται στους 2857,02, 2962,13 και 3431,71 κυματαριθμούς αντιστοιχούν στις δονήσεις τάσεων των δεσμών άνθρακα – υδρογόνου (C–H) κορεσμένων υδρογονανθράκων. Η κορυφή μέτριας έντασης που εκδηλώνεται στους 1725,01 κυματαριθμούς, αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του διπλού δεσμού άνθρακα – οξυγόνου (C=O) της καρβονυλικής ομάδας.

Συνοψίζοντας, τα φιλμ λευκού χρώματος είναι ένα πυριτικό υλικό προστασίας. Λόγω της παρουσίας οργανικών ενώσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι πιθανότατα πρόκειται για σιλοξανικό προστατευτικό υλικό.

4.2.6. Αποτελεσματα Προσδιορισμου Ολικων Διαλυτων Αλατων Και Δοκιμων Ποιοτικης Χημικης Ανιχνευσης

Για τον προσδιορισμό των ολικών διαλυτών αλάτων των δειγμάτων, έγινε εφαρμογή του ιταλικού προτύπου «Dosaggio dei sali solubili, Normal 13/83» (Normal 13/83, 1983). Ζυγίστηκαν 100 ± 5 mg κονιορτοποιημένου δείγματος και προστέθηκαν 100mL απιονισμένου νερού. Μετά από 24h, ελήφθησαν τιμές της αγωγιμότητας των διαλυμάτων, προσδιορίστηκε η μέση τιμή και εν συνεχεία, εφαρμόζοντας τη σχέση που περιγράφεται στην §3.2.5, προσδιορίστηκε η τιμή των ολικών διαλυτών αλάτων (SST). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 18.

Παρατηρείται ότι εξαιρετικά υψηλό ποσοστό SST έχει το κονίαμα M_m_g. Επιπλέον, υψηλά ποσοστά SST ανιχνεύονται στο κεραμικό M_c_r και στο κονίαμα M_m_w. Το κεραμικό M_c_y περιέχει μικρό ποσοστό SST, ενώ ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος έχουν ίχνη ποσότητας SST, σε βαθμό που κρίνεται αμελητέα.

Πίνακας 18: Τιμή των ολικών διαλυτών αλάτων SST% των δειγμάτων.

Δείγμα	*Μάζα (mg)*	*Μέση Τιμή Αγωγιμότητας (μS)*	*Ολικά Διαλυτά Άλατα SST%*
H_2O	–	4,26	–
M_c_y	102,40	100,30	6,45
M_c_r	99,80	254,57	17,26
M_s_p	103,30	45,90	2,77
M_s	102,30	44,37	2,70
M_m_w	101,90	194,27	12,83
M_m_g	96,30	578,60	41,03

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (spot tests), για τον προσδιορισμό χλωριούχων ιόντων (Cl^-) και θειικών ιόντων (SO_4^{-2}), με προσθήκη χρήση νιτρικού αργύρου ($AgNO_3$) και χλωριούχου βαρίου ($BaCl_2$) αντίστοιχα. Η παρατήρηση έντονου θολώματος του διαλύματος δηλώνει υψηλή παρουσία ιόντων και αντίστροφα. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στον Πίνακας 19.

Παρατηρείται ότι στο κονίαμα M_m_g προσδιορίστηκε η ύπαρξη ορισμένης ποσότητας Cl^- και πολύ υψηλής ποσότητας SO_4^{-2}. Στο κεραμικό M_c_r ανιχνεύεται πολύ υψηλή ποσότητα SO_4^{-2} και στο κονίαμα M_m_w ανιχνεύεται πολύ υψηλή ποσότητα Cl^-. Αντίθετα, στα υπόλοιπα δείγματα δεν ανιχνεύεται σημαντική ποσότητα κανενός από τα δύο ιόντα.

Πίνακας 19: Προσδιορισμός χλωριούχων ιόντων και θειικών ιόντων στα δείγματα, με χρήση spot tests.

Δείγμα	***Cl^-***	***SO_4^{-2}***
M_c_y	Ίχνη	Ίχνη
M_c_r	Ίχνη	Πολύ υψηλή
M_s_p	Ίχνη	Ίχνη
M_s	Ίχνη	Ίχνη
M_m_w	Πολύ υψηλή	Ίχνη
M_m_g	Μέτρια	Πολύ υψηλή

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η είσοδος του Σουκ των Σέσια (Souk des Chéchias), στην οδό Rue de la Kasbah, στη Μεδίνα της Τύνιδας (Τυνησία), μελετήθηκε, με σκοπό την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης των δομικών υλικών, όπως επίσης και το χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς που αυτά παρουσιάζουν. Δείγματα ελήφθησαν από υλικά της ιστορικής κατασκευής: κεραμικό κίτρινου χρώματος (εξωτερικό δείγματος), κεραμικό κόκκινου χρώματος (εσωτερικό δείγματος), ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, ιστορικό κονίαμα λευκού χρώματος, ιστορικό κονίαμα γκρι χρώματος, φιλμ λευκού χρώματος και μέταλλο.

Το **κεραμικό κίτρινου χρώματος** παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις ασβεστίτη και χαλαζία και ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις γύψο, αυγίτης και αλβίτη. Το κεραμικό εμφανίζει απώλεια μάζας 1,13% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 1,76% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 3,16% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 15,15% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Το τελευταίο ποσοστό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το δείγμα περιέχει ανθρακικό ασβέστιο σε ποσοστό 34,4%. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη κορυφή στους 142,7°C (παρουσία γύψου), ενδόθερμη κορυφή στους 567,6°C (παρουσία χαλαζία) και ενδόθερμη κορυφή στους 832,6°C (παρουσία ασβεστίτη). Το κεραμικό περιέχει μικρή ποσότητα ολικών διαλυτών αλάτων, χλωριούχων ιόντων και θειικών ιόντων.

Το **κεραμικό κόκκινου χρώματος** παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις γύψο και χαλαζία, ενώ ανιχνεύονται επίσης αυγίτης, αλβίτης και ασβεστίτης. Το κεραμικό παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλό πορώδες, γεγονός που φαίνεται με παρατήρηση του δείγματος με FOM και επιβεβαιώνεται με MIP. Επιπλέον, η MIP αποκαλύπτει την υψηλή ειδική επιφάνεια του κεραμικού, το γεγονός ότι το υψηλότερο ποσοστό των πόρων έχει ακτίνα 0,1 – 0,5 μm και μια σχετικά ισοϋψή κατανομή σε μεγαλύτερο εύρος πόρων. Το κεραμικό εμφανίζει απώλεια μάζας 0,59% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 0,59% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 2,29% στο θερμοκρασιακό

διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 2,89% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Το τελευταίο ποσοστό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κεραμικό περιέχει ανθρακικό ασβέστιο σε ποσοστό 6,6%. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη κορυφή στους 125°C (παρουσία γύψου), ενδόθερμη κορυφή στους 565,1°C (παρουσία χαλαζία) και ενδόθερμη κορυφή στους 949,1°C (μετασχηματισμοί στερεάς φάσης). Το κεραμικό περιέχει υψηλό ποσοστό ολικών διαλυτών αλάτων και εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση θειικών ιόντων, ενώ τα χλωριούχα ιόντα είναι ίχνη.

Συμπερασματικά, η υψηλή περιεκτικότητα και των δύο κεραμικών σε ανθρακικό ασβέστιο σχετίζεται με τις πρώτες ύλες που έχουν χρησιμοποιηθεί (αργιλικές πρώτες ύλες, πλούσιες σε ασβέστιο), καθώς και με την τεχνολογία παραγωγής τους (θερμοκρασία και περιβάλλον όπτησης). Η φθορά που παρατηρείται οφείλεται στην παρουσία υγρασίας στο εσωτερικό του υλικού, που οδηγεί στην συνδυασμένη παρουσία γύψου, ολικών διαλυτών αλάτων και θειικών ιόντων (στο κεραμικό κόκκινου χρώματος).

Ο **ψαμμίτης** παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις χαλαζία και ασβεστίτη, ενώ ανιχνεύονται επίσης μελίλιθος και σανίδιο. Παρουσιάζει υψηλό πορώδες και χαρακτηρίζεται ως πωρόλιθος. Παράλληλα, παρουσιάζει μέτρια προς υψηλή ειδική επιφάνεια και πολύ υψηλή μέση ακτίνα πόρων, με το υψηλότερο ποσοστό των πόρων να έχει ακτίνα 30 – 50 μm. Το γεγονός αυτό τον καθιστά επιρρεπή στη φθορά και εξηγεί την εκτεταμένη φθορά που παρατηρείται σε αυτό το υλικό της ιστορικής κατασκευής. Ο ψαμμίτης εμφανίζει απώλεια μάζας 0,67% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 0,41% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 1,62% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 34,09% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη κορυφή στους 566,2°C (παρουσία χαλαζία) και ενδόθερμη κορυφή στους 877,8°C (παρουσία ασβεστίτη). Ο ψαμμίτης περιέχει ίχνη ολικών διαλυτών αλάτων, χλωριούχων ιόντων και θειικών ιόντων.

Ο **ασβεστόλιθος** παρουσιάζει ως κύρια ορυκτολογική φάση ασβεστίτη. Είναι εξαιρετικά συμπαγής, καθώς παρουσιάζει χαμηλό πορώδες, με το υψηλότερο ποσοστό των πόρων να έχει ακτίνα 1 – 4 μm. Ο ασβεστόλιθος εμφανίζει απώλεια μάζας 0,11% στο θερμοκρασιακό διάστημα από 120°C μέχρι 600°C και 33,05% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη κορυφή στους 899,2°C (παρουσία ασβεστίτη). Ο ασβεστόλιθος περιέχει ίχνη ολικών διαλυτών αλάτων, χλωριούχων ιόντων και θειικών ιόντων.

Το **κονίαμα λευκού χρώματος** παρουσιάζει ως κύρια ορυκτολογική φάση ασβεστίτη, ενώ ανιχνεύονται επίσης γύψος, αλίτης και ολομίτης. Το κονίαμα παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλό πορώδες και υψηλή ειδική επιφάνεια, γεγονός που φαίνεται με παρατήρηση του δείγματος με FOM και επιβεβαιώνεται με MIP. Το υψηλότερο ποσοστό των πόρων έχει ακτίνα 0,5 – 2 μm. Το κονίαμα εμφανίζει απώλεια μάζας 1,72% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 1,49% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 7,97% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 31,4% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη κορυφή στους 153,3°C (παρουσία γύψου), εξώθερμη κορυφή στους 461,6°C (παρουσία οργανικών) και ενδόθερμες κορυφές στους 861,2°C και 882,3°C (παρουσία ασβεστίτη και δολομίτη). Το κονίαμα περιέχει υψηλό ποσοστό ολικών διαλυτών αλάτων και εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων, ενώ τα θειικά ιόντα είναι ίχνη.

Συμπερασματικά, η φθορά που παρουσιάζει το κονίαμα λευκού χρώματος, οφείλεται στην παρουσία γύψου, ολικών διαλυτών αλάτων και χλωριούχων ιόντων. Περιέχει ασβεστιτικά αδρανή και πιθανόν οργανικές προσμίξεις.

Το **κονίαμα γκρι χρώματος** παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις γύψο και ασβεστίτη και ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις χαλαζία και ακερμανίτη. Το κονίαμα εμφανίζει απώλεια μάζας 0,7% στο θερμοκρασιακό διάστημα μέχρι 120°C, 16,7% στο θερμοκρασιακό διάστημα 120°C μέχρι 200°C, 2,57% στο θερμοκρασιακό διάστημα 200°C μέχρι 600°C και 2,6% στο θερμοκρασιακό διάστημα πάνω από 600°C. Επιπλέον, εμφανίζει ενδόθερμη

κορυφή στους 151°C (παρουσία γύψου), εξώθερμη κορυφή στους 450°C (παρουσία οργανικών), ενδόθερμη κορυφή στους 500°C (παρουσία χαλαζία) και ενδόθερμη κορυφή στους 735,1°C (παρουσία ασβεστίτη). Το κονίαμα περιέχει εξαιρετικά υψηλό ποσοστό ολικών διαλυτών αλάτων και εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση θειικών ιόντων, ενώ η παρουσία χλωριούχων ιόντων είναι μέτρια.

Συμπερασματικά, το κονίαμα γκρι χρώματος είναι γυψοκονίαμα. Η φθορά που παρουσιάζει οφείλεται στην εξαιρετικά υψηλή παρουσία ολικών διαλυτών αλάτων, θειικών ιόντων και χλωριούχων ιόντων.

Το **φιλμ λευκού χρώματος** είναι ένα πυριτικό υλικό προστασίας. Λόγω της παρουσίας οργανικών ενώσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι πιθανότατα πρόκειται για σιλοξανικό προστατευτικό υλικό.

Συνοψίζοντας, εξάγεται το συμπέρασμα η φθορά της πλειοψηφίας των υλικών οφείλεται στην παρουσία υγρασίας στο εσωτερικό τους. Ο μηχανισμός εισχώρησης της υγρασίας στο εσωτερικό των υλικών μπορεί να είναι η τριχοειδής αναρρίχηση ή η κατερχόμενη υγρασία.

Επιπρόσθετα, μία σειρά από μη καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου των υλικών εφαρμόστηκαν: μικροσκοπία οπτικών ινών, θερμογραφία υπέρυθρου και γεωραντάρ.

Η **μικροσκοπία οπτικών ινών** έδειξε ότι δύο ήδη ψαμμίτη έχουν χρησιμοποιηθεί στην ιστορική κατασκευή. Το πρώτο είδος ψαμμίτη έχει σκούρο μπεζ – πορτοκαλί χρώμα και είναι εκείνο που έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στην πρόσοψη της ιστορικής κατασκευής. Έχει μεσαίους προς μεγάλους κόκκους και μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού. Το δεύτερο είδος ψαμμίτη έχει ανοιχτό μπεζ χρώμα και έχει χρησιμοποιηθεί σε μικρότερο βαθμό. Έχει μικρούς προς μεσαίους κόκκους και επαρκή ποσότητα συνδετικού υλικού. Και τα δύο είδη ψαμμίτη έχουν μικρή συνοχή ανάμεσα στο συνδετικό υλικό και τα αδρανή. Το γεγονός αυτό, τους προσδίδει χαμηλή μηχανική αντοχή και τα καθιστά επιρρεπή στην φθορά λόγω της κρυστάλλωσης των αλάτων. Παρατηρείται ότι οι ψαμμίτες έχουν υποστεί εκτεταμένη φθορά, μέσω της αποσάθρωσης των κόκκων τους. Επιπλέον, η τοποθέτηση του λευκού φιλμ είναι φυσικοχημικά

ασύμβατη, αφού καθώς το φιλμ τοποθετήθηκε πάνω στο πορώδες υλικό, εμπόδισε τη διαπνοή του. Ασύμβατες είναι και οι επεμβάσεις, κατά τις οποίες τοποθετήθηκαν επιχρίσματα κόκκινου – πορτοκαλί και καφέ χρώματος. Ειδικότερα, το επίχρισμα έχει καλύψει τα κενά του ψαμμίτη, αλλά, καθώς είναι πιο συμπαγές υλικό, εμποδίζει τη διαπνοή του ψαμμίτη. Επιπλέον, έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής, γεγονός που προκαλεί φθορά κατά τη διάρκεια των κύκλων θέρμανσης – ψύξης του ψαμμίτη, λόγω των μεταβολών της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Συνέπεια όλων των παραπάνω είναι η απόσπαση τμημάτων των ψαμμιτών που εμφανίζεται εκτεταμένα στην ιστορική κατασκευή. Η παρατήρηση των ασβεστόλιθων έδειξε ότι υπάρχουν ορατές φλέβες κόκκινου χρώματος, γεγονός που αποτελεί ένδειξη παρουσίας οξειδίων του σιδήρου, μαύρες επικαθίσεις και υπολείμματα του λευκού φιλμ. Το συγκεκριμένο υλικό είναι φυσικοχημικά ασύμβατο και με τον ασβεστόλιθο, παρά το γεγονός ότι ο ασβεστόλιθος είναι πιο συμπαγής από τον ψαμμίτη. Η διαπνοή της επιφάνειας εμποδίζεται, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εμφάνιση αποσπάσεων. Τέλος, μικρές κοιλότητες του ασβεστόλιθου έχουν πληρωθεί με ένα ροζ χρώματος υλικό. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη επέμβαση αισθητικά είναι μη συμβατή (λόγω της διαφοροποίησης στο χρώμα), το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται φυσικοχημικά συμβατό, καθώς δεν έχουν δημιουργηθεί ρωγμές, αποσπάσεις τμημάτων ή άλλου τύπου φθορά.

Τα αποτελέσματα της **θερμογραφίας υπέρυθρου στο εσωτερικό** της ιστορικής κατασκευής, αποκαλύπτουν τις περιοχές όπου η τοιχοποιία έχει υγρασία. Η εν λόγω υγρασία παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό σε αρκετά σημεία και αποτελεί την αιτία της απόσπασης του επιχρίσματος που λαμβάνει χώρα εκτεταμένα στο εσωτερικό της ιστορικής κατασκευής. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν ρωγμές, ορισμένες από τις οποίες δεν ήταν ορατές μακροσκοπικά. Οι ρωγμές αποτελούν ασυνέχεια, η οποία εμποδίζει τη διάδοση της υγρασίας, δημιουργώντας χαρακτηριστικές ψυχρές και θερμές περιοχές στην τοιχοποιία.

Τα αποτελέσματα της **θερμογραφίας υπέρυθρου στο εξωτερικό** της ιστορικής κατασκευής, αποκαλύπτουν εξαιρετικά υψηλή διακύμανση των

θερμοκρασιών της τοιχοποιίας. Ειδικότερα, οι διαφορές στη θερμοκρασία και κατά συνέπεια στη διαπνοή των αυθεντικών ψαμμιτών, των ψαμμιτών που έχουν αποκατασταθεί με χρήση του κόκκινου – πορτοκαλί χρώματος επιχρίσματος (παρουσιάζει υψηλότερη θερμοκρασία από τον ψαμμίτη και άρα εμποδίζει τη διαπνοή του), των ψαμμιτών που έχουν αποκατασταθεί με χρήση του μπεζ – καφέ επιχρίσματος (παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον ψαμμίτη και άρα αποτελεί ένδειξη παρουσίας υγρασίας) και στο κονίαμα που βρίσκεται ανάμεσα στους ψαμμίτες, αποδίδονται τόσο στις διαφορές στη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση, όσο και κυρίως στη διαφορά στη μικροδομή τους. Η διαφορά στη διαπερατότητα των υλικών από το νερό, εξηγεί την φυσικοχημική ασυμβατότητα μεταξύ τους. Αποτέλεσμα αυτής της ασυμβατότητας είναι η εμφάνιση διαφόρων μορφών φθοράς, που παρατηρούνται μακροσκοπικά, όπως η απώλεια αυθεντικού υλικού, μέσω της απόσπασης τμημάτων του ψαμμίτη. Επιπλέον, ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον ψαμμίτη, γεγονός που αποδίδεται στο ότι ο ασβεστόλιθος είναι πολύ πιο συμπαγής, όπως προέκυψε από τις αναλυτικές τεχνικές ελέγχου. Οι δύο λίθοι που βρίσκονται στο ανώτερο ανατολικό και στο ανώτερο δυτικό τμήμα της εισόδου είναι επίσης ασβεστόλιθοι, καθώς παρουσιάζουν την ίδια θερμοκρασία με τον ασβεστόλιθο. Στην περιοχή ανατολικά της εισόδου της ιστορικής κατασκευής, η οποία παρουσιάζει εκτός επιπέδου κάμψη, εντοπίστηκε ένα δίκτυο ρωγμών, τμήματα του οποίου δεν είναι ορατά μακροσκοπικά, καθώς και προσδιορίστηκε η παρουσία υγρασίας και πιθανών αλάτων. Τέλος, η σύγχρονη τοιχοποιία που περιβάλει την ιστορική κατασκευή έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα του **γεωραντάρ**, έδειξαν την ύπαρξη πολλαπλών στρώσεων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Επιπλέον, προσδιορίστηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον ασβεστόλιθο είναι περίπου 13cm/ns. Η εκτός επιπέδου κάμψη της τοιχοποιίας εξετάστηκε και βρέθηκε ότι κάμπτεται μόνο η εξωτερική στρώση (προς την πλευρά του δρόμου). Τέλος, έγινε αντιληπτή η εκτεταμένη παρουσία υγρασίας, καθώς δεν επιτρέπει στο σήμα να διεισδύσει στο εσωτερικό και εντοπίστηκαν ορισμένες ρωγμές της τοιχοποιίας.

Η παρουσία υγρασίας μόνον στο μισό τμήμα του εσωτερικού του θόλου της ιστορικής κατασκευής, συνδέεται με την παρουσία ρωγμής, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί ασυνέχεια που εμποδίζει τη μετάδοση της υγρασίας. Η υγρασία του θόλου έχει προέλευση την οροφή της ιστορικής κατασκευής, καθώς στο σημείο αυτό παρατηρείται έντονη βλάστηση. Αντίθετα, η υγρασία στη δυτική τοιχοποιία δε δείχνει να συνδέεται με την οροφή, ούτε με τον δρόμο. Είναι πολύ πιθανόν η υγρασία να προέρχεται από την νεότερη κατασκευή με την οποία συνορεύει η ιστορική κατασκευή από τη συγκεκριμένη πλευρά. Η ύπαρξη της εκτός επιπέδου κάμψης, πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η καμάρα βρίσκεται στο άκρο μιας σειράς από καμάρες, που παράγουν μια ώθηση στην τελευταία καμάρα. Στρώσεις της τοιχοποιίας με κακή σύνδεση, μπορεί να υποστούν μια εσωτερική ρηγμάτωση και έναν διαχωρισμό που ακολουθείται από κάμψη.

Οι άμεσες ενέργειες που προτείνονται, με στόχο τη βελτίωση της κατάστασης τη ιστορικής κατασκευής περιλαμβάνουν την αφαίρεση όλων των επιχρισμάτων που έχουν τοποθετηθεί, στα πλαίσια των προηγούμενων επεμβάσεων αποκατάστασης. Η υγρασία από το εσωτερικό πρέπει να απομακρυνθεί και παράλληλα να αντιμετωπιστούν οι πηγές της υγρασίας. Το φιλμ λευκού χρώματος θα πρέπει να απομακρυνθεί και όλες οι επιφάνειες να καθαριστούν. Στον ψαμμίτη θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια επέμβαση αφαλάτωσης. Ο ασβεστόλιθος μπορεί, εν συνεχεία, να προστατευτεί με ένα υδροφοβιωτικό υλικό. Εφόσον είναι δυνατόν, εναπομείναντες ιστορικοί λίθοι και κεραμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την αποκατάσταση. Εναλλακτικά, η προέλευση των υλικών θα πρέπει να είναι η ίδια με την προέλευση των ιστορικών υλικών. Τέλος, όλα τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι φυσικοχημικά συμβατά με τα αυθεντικά υλικά. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται η πιλοτική εφαρμογή επεμβάσεων αποκατάστασης και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που έχουν στην ιστορική κατασκευή.

Οι επόμενες μελέτες που κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθούν, αφορούν την εφαρμογή περεταίρω αναλυτικών τεχνικών ελέγχου των υλικών. Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η δυνατότητα λήψης παραπάνω δειγμάτων και η

ταυτοποίηση της ακριβούς θέσης δειγματοληψίας των δειγμάτων που μελετήθηκαν, με σκοπό την λεπτομερέστερη χαρτογράφηση της φθοράς των υλικών. Εφόσον προκύψουν αρκετά δεδομένα, αυτά μπορεί να τοποθετηθούν σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, με σκοπό την ψηφιακή χαρτογράφηση της φθοράς, καθώς και την κατηγοριοποίηση και απεικόνιση της παθολογίας της ιστορικής κατασκευής. Προτού πραγματοποιηθεί η αποκατάσταση, πρέπει να λάβουν χώρα τόσο αρχιτεκτονική, όσο και δομοστατική τεκμηρίωση. Εφόσον κριθεί αναγκαίο, μια χρηματοοικονομική μελέτη μπορεί να εκπονηθεί, ώστε να προκύψει ο ακριβής προϋπολογισμός του έργου. Σε κάθε περίπτωση, η αποκατάσταση πρέπει να γίνει υπό την επίβλεψη εξειδικευμένου προσωπικού και η ιστορική κατασκευή πρέπει να εξετάζεται στο διηνεκές, με σκοπό την έγκαιρη διάγνωση και αποκατάσταση καινούριων τύπων φθοράς που τυχών εμφανιστούν. Οι νέες χρήσεις (συμπεριλαμβανομένου του τουρισμού) που τυχών δοθούν στην ιστορική κατασκευή πρέπει να είναι συμβατές με τη φιλοσοφία της κατασκευής, τις συνήθειες και τη ζωή των κατοίκων και να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην προστασία του περιβάλλοντος. Με αυτόν τον τρόπο, το Σουκ των Σέσια θα συνεχίσει να είναι φορέας πολιτισμού, λαϊκής παράδοσης και τέχνης, να αποτελεί σημείο αναφοράς στην καθημερινότητα των κατοίκων της Μεδίνας της Τύνιδας και θα συμβάλει ουσιαστικά στην δυναμική τουριστική και οικονομική άνθιση της Τυνησίας τις επόμενες δεκαετίες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αβδελίδης, Π. Ν. (2002). "Εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας για τον ελεγχο δομικών υλικών σε κατασκευές." Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αθανασίου, Κ. Δ. (2013). "Μελέτη της Κρυστάλλωσης Εστερασών του Γλυκουρονικού Οξέος από το Μύκητα Podospora anserina (Διπλωματική Εργασία)." Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Βαλαβανίδης, Π. Α. (2006). "Φασματοσκοπία Οργανικών Ενώσεων" Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Αθηνών: 33–76.

Βερνάρδου, Δ. (2011α) "Περίθλαση ακτίνων – Χ από έναν κρύσταλλο." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Δομική και Χημική Ανάλυση Υλικών, Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Βερνάρδου, Δ. (2011β). "Φασματοσκοπία Raman, Φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Δομική και Χημική Ανάλυση Υλικών, Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Δημοσθένους, Α. Μ., Στυλιανίδης, Χ. Κ. (2000). "Κριτήρια επιλογής μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης μνημείων και παραδοσιακών κτιρίων από τοιχοποιία." Πρακτικά 1ου Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες επεμβάσεις για την προστασία ιστορικών κατασκευών, Θεσσαλονίκη: 445–461.

Δρίτσος, Σ. (2001). Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα." Πανεπιστήμιο Πατρών.

Η' Αναθεωρητική Βουλή των Ελλήνων (2008). "Σύνταγμα της Ελλάδας." Αναθεώρηση βάση του Ψήφισματος της 27ης Μαΐου 2008.

Θεοδωρίδης, Χ. Δ. (2006). "Συμβατά Υλικά και Μέθοδοι Συντήρησης και Αποκατάστασης Ιστορικών Κτιρίων." 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Τ.Ε.Ε., Ε.Τ.Ε.Κ., Αλεξανδρούπολη.

"Θερμοκρασία sol–air." Διδακτικές Σημειώσεις Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. http://courses.arch.ntua.gr/fsr/143842/Eidiko_Solair.pdf Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

Κορρές, Μ. (2014). "Αρχιτεκτονική Κληρονομιά, από τον 2ο στον 21ο αι. Απολογισμός και Προοπτικές." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουή, Μ., Χειλάκου, Ε., Θεοδωρακέας, Π. και Ομάδα Συγγραφέων (2014). "Θερμογραφία με μέτρηση της ανακλώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (Εργαστηριακός Οδηγός Μαθήματος Επιστήμη και Τεχνική Υλικών)." 7ο Εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουλουμπή, Ν., Μοροπούλου, Α., Μπατής, Γ., Χρυσουλάκη,ς Ι., Βασιλείου, Π., Κουή Μ. (2000). "Σημειώσεις Ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών Μαθήματος Υλικά Ι." 9ο Εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαΐστρου, Ε. (2014). "Εξέλιξη της Έννοιας του Μνημείου και των Αρχών της Αποκατάστασης". Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μανίτα, Π., Πανταζόπουλος, Σ. (2000). "Παθολογία και Μηχανισμοί φθοράς Ιστορικών Κτιρίων" Πρακτικά 1ου Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες επεμβάσεις για την προστασία ιστορικών κατασκευών, Θεσσαλονίκη: 331–341.

Μοροπούλου, Α. "Δομικά Υλικά (Πλίνθοι, Κέραμοι)" Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Δομικά Υλικά, 9ο εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "FOM Μικροσκοπία Οπτικών Ινών." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "GPR Γεωραντάρ" Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "IRT Θερμογραφία Υπερύθρου." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "Εξέταση Μικροδομής των Υλικών." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "Θερμική Ανάλυση" Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2009). "Ποροσιμετρία Υδραργύρου." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2010). "Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών – Μεθοδολογία Ενόργανων και μη Καταστρεπτικών Τεχνικών." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Επιστήμη και Τεχνική των Υλικών, 7ο εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2014). "Μη καταστρεπτικές & Ενόργανες Μέθοδοι Χαρακτηρισμοί & Διάγνωσης της Φθοράς και Ελέγχου Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.2, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2014). "Ολοκληρωμένη Μεθοδολογία Διάγνωσης, Ανάλυσης και Χαρτογράφησης των Δομικών Υλικών και της Φθοράς στα Κτίρια." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.1, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2014). "Περιβαλλοντικά Αίτια – Φαινόμενα και Μηχανισμοί της Φθοράς – Σχέση Φθοράς και Παθολογίας." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.2, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α. (2014). "Στρατηγικός Σχεδιασμός των Επεμβάσεων Συντήρησης σε Μνημεία, Βάση των Δεδομένων της Διάγνωσης και της Χαρτογράφησης της Φθοράς των Υλικών." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 2.2, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Β' Κατεύθυνση: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α., Κουή, Μ., Κροκίδα, Μ., Μπακόλας, Α. Κ. (2014). "Σημειώσεις Ασκήσεων του Μαθήματος Δομικά Υλικά." 9ο εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μοροπούλου, Α., Μούνδουλας, Π. (2014). "Συμβατά και Επιτελεστικά Κονιάματα Αποκατάστασης." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.2, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σίδερης, Κ. (1984). "Τεχνολογία των δομικών υλικών, τόμος Α." Ξάνθη, Εκδόσεις Δ.Π.Θ..

Στεργιούδης, Γ. "Ακτίνες – Χ (XRD)." Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τάσιος, Θ. Π., Αλιζάκη, Κ. (1993). "Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος." Αθήνα, Εκδόσεις Φοίβος.

Τριανταφύλλου, Θ.Χ. (1997). "Δομικά Υλικά." Πάτρα.

Τσόπελας, Φ. (2014α). "Θερμική Ανάλυση Thermal Analysis." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Ενόργανη Χημική Ανάλυση Φ.Μ.Α., 5ο Εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τσόπελας, Φ. (2014β). "Φασματομετρία ακτίνων Χ." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος Ενόργανη Χημική Ανάλυση Φ.Μ.Α., 5ο Εξάμηνο Σχολής Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Φλώρος, Π. (2010). "Παθητική Κτηριακή Θερμογραφία και Εφαρμογή σε Κτήριο Κατοικίας (Διπλωματική Εργασία)." Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Χατζοπούλου – Τζίκα, Α. (2014). "Ιστορική Εξέλιξη της Νομοθεσίας για την Προστασία της Αρχιτεκτονικής Κληρονομιάς." Διδακτικές Σημειώσεις Μαθήματος 1.3, Δ.Μ.Π.Σ. Προστασία Μνημείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Adamson, A. W. (1982). "Physical Chemistry of Surfaces." John Wiley & Sons, New York 349.

Allen, T. (1997). "Particle Size Measurement, Vol. 2." Chapman & Hall 162.

Annan, A. P. (2005). "Ground–penetrating radar. In Near surface geophysics, Butler DK (ed)." Society of exploration geophysicists: Tulsa, Investigations in Geophysics 13: 357–438.

Appleby, J. R., Brook, M. S., Vale, S. S. MacDonald–Creevey, A. M. (2010). "Structural glaciology of a temperate maritime glacier: Lower Fox glacier, New Zealand." Geografiska annaler: series a, physical geography 92: 451–467.

Ashby M. F., Jones D. R. H. (1996). "Engineering Materials 1. An introduction to their Properties and Applications, 2nd Edition." Butterworth–Heinemann, Oxford, UK.

Ashworth, P. J., Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Bridge, J. S., Lane, S. N., Lunt, I. A., Reesink, A. J. H., Simpson, C. J., Thomas, R. E. (2011). "Evolution and sedimentology of a channel fill in the sandy braided South Saskatchewan River and its comparison to the deposits of an adjacent compound bar." Sedimentology 58: 1860–1883.

ASM (2014). "Historic Buildings Related to ACDs in the Central Medina of Tunis." Introduction Report to the ENPI CBCMED Project "MEDNETA – Mediterranean cultural network to promote creativity in the arts, crafts and design for communities' regeneration in historical cities." ASM de Tunis.

Balaras, C. A., Argiriou, A. A. (2002). "Infrared thermography for building diagnostics''. Energy and Buildings 34.

Barnhardt, W. A., Sherrod, B. L. (2006). "Evolution of a Holocene delta driven by episodic sediment delivery and coseismic deformation, Puget Sound, Washington, USA." Sedimentology 53: 1211–1228.

Benediktsson, Í. Ö., Ingólfsson, Ó., Schomacker, A., Kjær, K. H. (2009). "Formation of submarginal and proglacial end moraines: implications of ice–flow mechanism during the 1963–64 surge of Búarjökull, Iceland." Boreas 38: 440–457.

Bennett, M. R., Cassidy, N. J., Pile, J. (2009). "Internal structure of a barrier beach as revealed by ground penetrating radar (GPR): Chesil beach, UK." Geomorphology 104: 218–229.

Bhosle, B., Parkash, B., Awasthi, A. K., Singh, V. N., Singh, S. (2007). "Remote sensing–GIS and GPR studies of two active faults, Western Gangetic Plains, India." Journal of applied geophysics 61: 155–164.

Bonomo, N., Bullo, D., Villela, A., Osella, A. (2015). "Ground–penetrating radar investigation of the cylindrical pedestal of a monument." Journal of Applied Geophysics 113: 1–13.

Bristow, C. S., Augustinus, P. C., Wallis, I. C., Jol, H. M., Rhodes, E. J. (2010). "Investigation of the age and migration of reversing dunes in Antarctica using GPR and OSL, with implications for GPR on Mars." Earth and planetary science letters 289: 30–42. doi:10.1016/j.epsl.2009.10.026

Bristow, C. S., Duller, G. A. T., Lancaster, N. (2007). "Age and dynamics of linear dunes in the Namib Desert." Geology 35:555–558.

Bristow, C. S., Pucillo, K. (2006). "Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south–east South Australia." Sedimentology 53: 769–788.

Buynevich, I.,V., Filho, P. W. M. S., Asp, N. E. (2010). "Dune advance into a coastal forest, equatorial Brazil: A subsurface perspective." Aeolian research 2: 27–32.

Christie, M., Tsoflias, G. P., Stockli, D. F. Black, R. (2009). "Assessing fault displacement and off–fault deformation in an extensional tectonic setting using 3–D ground–penetrating radar imaging." Journal of applied geophysics 68: 9–16.

Clemmensen, L. B., Nielsen, L., Bendixen, M., Murray, A. (2012). "Morphology and sedimentary architecture of a beach–ridge system (Anholt, the Kattegat sea): a record of punctuated coastal progradation and sealevel change over the past ~1000 years." Boreas 41: 422–434.

Comas, X., Slate,r L., Reeve, A. (2005). "Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR)." Journal of hydrology 315: 40–51.

Comas, X., Slater, L., Reeve, A. (2004). "Geophysical evidence for peat basin morphology and stratigraphic controls on vegetation observed in a northern peatland." Journal of hydrology 295: 173–184.

Comas, X., Slater, L., Reeve, A. (2011). "Pool patterning in a northern peatland: geophysical evidence for the role of postglacial landforms." Journal of hydrology 399: 173–184.

Connolly, R. J. (2005) "Introduction to X–ray Powder Diffraction." EPS400–002, Introduction to X–Ray Powder Diffraction: Spring 2005.

Conyers, L. B., Goodman, D. (1997) "Ground-penetrating radar, an introduction for archaelogists." Altamira Press, Walnut Creek, CA.

CSI (Comunications Specialties, Inc.) (2009). "Introduction to Fiber Optics." www.commspecial.com/assets/eduguides/Introduction to Fiber Optics.pdf

Daniels, D. J. (2004). "Ground penetrating radar (2nd edition)." The Institution of Electrical Engineers, London.

De Oliveira, M. A. T., Porsani, J. L., de Lima, G. L., Jeske-Pieruschka, V., Behling, H. (2012). "Upper Pleistocene to Holocene peatland evolution in Southern Brazilian highlands as depicted by radar stratigraphy, sedimentology and palynology." Quaternary research 77: 397–407.

Degenhardt, J. J. (2009). "Development of tongue-shaped and multilobate rock glaciers in alpine environments – interpretations from ground penetrating radar surveys." Geomorphology 109: 94–107.

FLIR Systems (2008). "User's Manual FLIR B series, FLIR T series."

Földvári, M. (2011). "Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice." Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary 213.

Franke, R. (2005). "Thermal Analysis An introduction." NETZSCH Gerätebau GmbH.

Fröberg, L. "Thermal Analysis TGA / DTA." Process Chemistry centre, Åbo Akademi University, Finland.

Gibbard, P. L, West, R. G., Boreham, S., Rolfe, C. J. (2012). "Late Middle Pleistocene icemarginal sedimentation in East Anglia, England." Boreas 41: 319–336.

Giesche, H. (2006): "Mercury Porosimetry:AGeneral (Practical) Overview." Part. Part. Syst. Charact. 23: 9–19.

Gutsell, J. E., Clague, J. J., Best, M. E., Bobrowsky, P. T., Hutchinson, I. (2004). "Architecture and evolution of a fjord–head delta, western Vancouver Island, British Columbia." Journal of Quaternary science 19: 497–511.

Hart, J. K., Rose, K. C., Martinez, K. (2011). "Temporal englacial water content variability associated with a rapidly retreating glacier." Earth surface processes and landforms 36: 1230–1239.

Holden, J., Burt, T. P., Vilas, M. (2002). "Application of ground–penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat." Earth surface processes and landforms 27: 235–249.

http://kiska.giseis.alaska.edu/input/west/proj/introgeophys/18_gpr/offset_depth.jpg Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://lartisanet.com/en/fez/239-red-chechia.html "Red fez – Chechia." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://rruff.info "RRUFF Project." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://southpacificberets.com/tunisia---chechias.php "Tunisia – Chechias." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://whc.unesco.org/en/criteria "UNESCO The Criteria for Selection." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://whc.unesco.org/en/list/36 "UNESCO Medina of Tunis." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://www.flir.com "FLIR Systems." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://www.icdd.com "ICDD The International Centre for Diffraction Data." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

http://www.medneta.eu/project-overview "MEDNETA 2014 – 2015 Project Overview." Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

https://www.draw.io "draw.io." Διαδικτυακή εφαρμογή δημιουργίας διαγραμμάτων ροής. Ανακτήθηκε 30 Μαΐου 2015.

ICOMOS (1964). "International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964)." Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1964.

Irvine-Fynn, T. D. L., Moorman, B. J., Williams, J. L. M., Walter, F. S. A. (2006). "Seasonal changes in ground-penetrating radar signature observed at a polythermal glacier, Bylot Island, Canada." Earth surface processes and landforms 31: 892-909.

Johnson, B. A., Carpenter, P. J. (2013). "Geophysical response of slackwater and sandy terrace deposits near Savanna, Northwestern Illinois." Environmental earth sciences 69: 955-964.

Jol, H. M., Bristow, C. S. (2003). "GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In Ground penetrating radar in sediments, Bristow CS and Jol HM (eds)." Geological Society: London, Special Publication 211: 9-28.

Jol, H. M., Smith, D. G. (1991). "Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas." Canadian journal of earth sciences 28: 1939-1947.

Kaufmann, J. "Mercury Intrusion Porosimetry." EMPA Materials Science and Technology.

Kettridge, N., Comas, X., Baird, A., Slater, L., Strack, M, Thompson, D., Jol, H., Binley, A. (2008). "Ecohydrologically important subsurface structures in peatlands revealed by groundpenetrating radar and complex conductivity surveys [on-line]." Journal of geophysical research 113.

Kim, K. Y., Lee, J., Hong, M. H., Hong, J. K., Jin, Y. K., Shon H. (2010). "Seismic and radar investigations of Fourcade Glacier on King George Island, Antarctica." Polar research 29: 298-310.

Klobek, J. (1981). "Hysteresis in Porosimetry." Powder Technol. 29: 63-73.

Kordatos, E. Z., Exarchos, D. A., Stavrakos, C., Moropoulou, A., Matikas, T. E. (2013) "Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments." Construction and Building Materials 48: 1261–1265.

Kostic, B., Aigner, T. (2007). "Sedimentary architecture and 3D ground–penetrating radar analysis of gravelly meandering river deposits (Neckar Valley, SW Germany)." Sedimentology 54: 789–808.

Langston, G., Bentley, L. R., Hayashi, M., McClymont A., Pidlisecky A. (2011). "Internal structure and hydrological functions of an alpine proglacial moraine." Hydrological processes 25: 2967–2982.

Leckebusch, J. (2003). "Ground–penetrating radar: a modern three–dimensional prospection method." Archaeological Prospection 10: 213–240.

Leopold, M., Williams, M.W., Caine, N., Völkel, J., Dethier D. (2011). "Internal structure of the Green Lake 5 rock glacier, Colorado Front Range, USA." Permafrost and periglacial processes 22: 107–119.

Lowry, C. S., Fratta, D., Anderson, M. P. (2009). "Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland." Journal of hydrology 373: 68–79.

Lunt, I. A., Bridge, J. S. (2004). "Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska." Sedimentology 51: 415–432.1

Malik, J. N., Sahoo, A. K., Shah, A. A., Shinde, D. P., Juyal, N., Singhvi, A. K. (2010). "Paleoseismic evidence from trench investigation along Hajipur fault, Himalayan Frontal Thrust, NW Himalaya: implications of the faulting pattern on landscape evolution and seismic hazard." Journal of structural geology 32: 350–361.

Mayer, R.P., Stowe, R. A. (1965). "Mercury Porosimetry – Breakthrough Pressure for Penetration Between Packed Spheres." J. Colloid Sci. 20: 893–911.

MEDNETA – Tecnical Report (2015). "Basic Principles, Advantages and Risks of the Applied Pilot Conservation and Rehabilitation Actions." Technical Report – Deliverable of WP5 of the ENPI CBCMED Project "MEDNETA – Mediterranean cultural network to promote creativity in the arts, crafts and design for communities' regeneration in historical cities." National Technical University of Athens.

Mellett, J. S. (1995) "Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology" J. Appl. Geophysics 33 [1–3]: 157–166.

Monnier, S., Camerlynck, C., Rejiba, F., Kinnard, C., Feuillet, T., Dhemaied A. (2011). "Structure and genesis of the Thabor rock glacier (Northern French Alps) determined from morphological and ground–penetrating radar surveys." Geomorphology 134: 269–279.

Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Koui, M., Aggelopoulos, A., Karmis, P. (2002). "Infrared Thermography and ground penetrating radar for airport pavements assessment." Nondestructive testing and Evaluation, 18 [1]: 37–42.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (1995a). "Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques." Thermochimica Acta 269/270: 779–795.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (1995b). "Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies." Thermochimica Acta 2570: 743–753.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, E., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S. (2005). "Strenght development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries." Cement & Concrete Composites 27: 289–294.

Motomura, K., Celiz, L. L. (2011). "Technical know–how in thermal analysis measurement –Evolved gas analysis by thermogravimetry–differential thermal analysis–mass spectrometry (TG–DTA–MS) technique–."The Rigaku Journal 27 [1].

Murray, T., Booth, A. D. (2010). "Imaging glacial sediment inclusions in 3–D using ground–penetrating radar at Kongsvegen, Svalbard." Journal of Quaternary science 25: 754–761.

Neal, A. (2004). "Ground–penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress." Earth science reviews 66: 261–330.

Nielsen, L., Clemmensen, L. B. (2009). "Sealevel markers identified in ground–penetrating radar data collected across a modern beach ridge system in a microtidal regime." Terra nova 21: 474–479.

Nobes, D. C., Ferguson, R. J., Brierley, G. J. (2001). "Ground–penetrating radar and sedimentological analysis of Holocene floodplains: insight from the Tuross valley, New South Wales." Australian journal of earth sciences 48: 347–355.

Normal 13/83 (1983). "Dosaggio dei Sali Solubili.", CNR-ICR, Roma, Italy.

Olhoeft, G.R. (1998). "Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. Proceedings of GPR'98, seventh international conference on ground penetrating radar." University of Kansas, Lawrence: 477–483.

Olson, D., Kennedy, D. M., Dawe, I., Calder, M. (2012). "Decadal–scale gravel beach evolution on a tectonically–uplifting coast: Wellington, New Zealand." Earth surface processes and landforms 37: 1133–1141.

Pascucci, V., Martini. I. P., Endres, A. L. (2009). "Facies and ground–penetrating radar characteristics of coarse–grained beach deposits of the uppermost Pleistocene glacial Lake Algonquin, Ontario, Canada." Sedimentology 56: 529–545.

Phillips, A. (2003). "Turning ideas on their head: the new paradigm for protected areas." The George Wright Forum 20 No. 2: 8–32.

Plado, J., Sibul, I., Mustasaar, M., Jõeleht, A. (2011). "Ground–penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia." Estonian journal of earth sciences 60: 31–42.

Powers, M.H. (1997). "Modelling frequencydependent GPR." The leading edge 16: 1657–1662.

Rice, S. P., Church, M., Wooldridge, C. L., Hickin, E. J. (2009). "Morphology and evolution of bars in a wandering gravel–bed river; Lower Fraser river, British Columbia, Canada." Sedimentology 56: 709–736.

Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J., Ruffell A. (2013). "Ground Penetrating Radar." Geomorphological Techniques, Part 1, Sec. 5.5.

Rodridues, D. J. (1996). "In the search for tentative recommendations regarding compatible restoration mortars." Proceedings of the 8th International congress on deterioration and conservation of stone, Vol. 3: 141–147.

Rosa, E., Larocque, M., Pellerin, S., Gagné, S., Fournier, B. (2009). "Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar." Earth surface processes and landforms 34: 377–383.

Słowik, M. (2011). "Reconstructing migration phases of meandering channels by means of ground–penetrating radar (GPR): the case of the Obra River, Poland." Journal of soils and sediments 11: 1262–1278.

Stevens, K. M., Lodha, G. S., Holloway, A. L., Soonawala, N. M. (1995). "The application of ground penetrating radar for mapping fractures in plutonic rocks within the Whiteshell Research Area, Pinawa, Manitoba, Canada." J. Appl. Geophysics 33 [1–3]: 125–141.

Tamura, T., Kodama, Y., Bateman, M. D., Saitoh, Y., Watanabe, K., Matsumoto, D., Yamaguchi, N. (2011). "Coastal barrier dune construction during sea-level highstands in MIS 3 and 5a on Tottori coast-line, Japan." Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology 308: 492–501.

UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN (2013). "Managing Cultural World Heritage." United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France.

Vriend, N. M., Hunt, M. L., Clayton, R. W. (2012). "Sedimentary structure of large sand dunes: examples from Dumont and Eureka dunes, California." Geophysical journal international 190: 981–992.

Webb, A. P. (2001). "An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data." Micromeritics Instrument Corp. Norcross, Georgia.