



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ

# Διάγνωση της φθοράς διακοσμητικής αρχιτεκτονικής επιφάνειας της πρόσοψης του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μαρέτση Αλεξάνδρα**

**Επιβλέπουσα**

**Αντωνία Μοροπούλου**

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αντιπρύτανης Ακαδημαϊκών Υποθέσεων &  
Προσωπικού

**Τριμελής επιτροπή:**

Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Φ. Κολίσης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Μπακόλας, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

**Αθήνα, 2014**









*Στους γονείς μου*



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται με τη διαγνωστική μελέτη της φθοράς στην πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως. Ο Ναός αυτός αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και αρχαιότερα μνημεία του χριστιανισμού και έχει δεχθεί επιρροές από πλήθος πολιτισμών. Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη και η κατανόηση των τύπων και των μηχανισμών φθοράς που εμφανίζονται στην πρόσοψη του μνημείου, προκειμένου να ακολουθήσουν μελλοντικές εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης.

Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Α. Μοροπούλου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012 – 2013. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος της πρόσοψης με Θερμογραφία Υπερύθρου, καθώς και η δειγματοληψία στην παράπλευρη επιφάνεια της πρόσοψης έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της προκαταρκτικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2011 κατόπιν πρόσκλησης από το Πατριαρχείο Ιεροσολύμων στο Ε.Μ.Π. και συγκεκριμένα στον Τομέα III «Επιστήμη και Τεχνική των Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών με επιστημονική υπεύθυνη την καθηγήτρια Α. Μοροπούλου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Α. Μοροπούλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να εργαστώ στην επιστημονική ομάδα της υπό την καθοδήγησή της.

Επιπλέον ευχαριστώ θερμά το Λέκτορα Α. Μπακόλα για την πολύτιμη αρωγή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τη διδάκτορα Α. Δελέγκου για την άψογη συνεργασία, την επιστημονική και ψυχολογική υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές της. Ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω και στη διδάκτορα Μ. Καρόγλου για την καθοδήγηση και τη συνέπεια και την αμέριστη βοήθειά της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που όλα αυτά τα χρόνια στέκονται δίπλα μου με αγάπη και με βοηθούν να πραγματοποιήσω τα όνειρά μου.

Αθήνα, 2014



## Περίληψη

Ο Πανιέρος Ναός της Αναστάσεως οικοδομήθηκε το 325 μ.Χ. ύστερα από εντολή του Μεγάλου Κωνσταντίνου. Στην έκτασή του περιλαμβάνει το Πανάγιο Τάφο και το λόφο του Γολγοθά. Η νότια όψη αποτελεί την πρόσοψη του Ναού και ανήκει στην οικοδομική φάση των Σταυροφόρων (12<sup>ος</sup> αι.). Η πρόσοψη εξετάστηκε με τη μη καταστρεπτική μέθοδο της Θερμογραφίας Υπερύθρου, εξαιτίας όμως του ειδικού καθεστώτος διαχείρισής της (καθώς αυτή συνανήκει από κοινού σε όλες τις χριστιανικές κοινότητες), πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία και έλεγχος με Θερμογραφία Υπερύθρου στην παράπλευρη επιφάνεια (ανατολικό γείσο της πρόσοψης), επειδή αυτή ανήκει στην Ελληνορθόδοξη κοινότητα.

Τα δείγματα εξετάστηκαν με τη μέθοδο της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ και της Υπέρυθρης Φασματοσκοπίας με Μετασχηματισμό Fourier, έτσι ώστε να διαγνωστεί η φθορά. Για το χαρακτηρισμό του λίθου του ανατολικού γείσου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Περίθλασης Ακτίνων Χ και της Ποροσιμετρίας Υδραργύρου, όπου και διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για πορώδη ασβεστόλιθο με δολομιτικές προσμίξεις. Από τη μελέτη της φθοράς διακρίνονται δύο κατηγορίες επιφανειών: αυτές που προστατεύονται από το νερό της βροχής και εκείνες που είναι εκτεθειμένες σε αυτό. Οι προστατευμένες επιφάνειες παρουσιάζουν είτε την τυπική μορφολογία των μαύρων κρουστών ή περιοχές πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού. Και οι δύο περιπτώσεις είναι γυψοποιημένες επιφάνειες, ενώ κάτω από τη στοιβάδα του γύψου ανιχνεύεται στρώμα πυριτικού υλικού, καθώς και ρωγμές του υγιούς τμήματος του λίθου που είναι πληρωμένες από το υλικό αυτό. Η χαρακτηριστική πορτοκαλοκάστανη χροιά οφείλεται αφενός στην παρουσία οξαλικών τα οποία πιθανότατα έχουν προκύψει από διάσπαση της γλυκερίνης που προστίθεται στο πυριτικό υλικό αυτό, για να το καθιστά πιο ελαστικό, και αφετέρου στην παρουσία οξειδίων του σιδήρου, που προστίθεται στην πυριτική γέλη για την επιτάχυνση της σκλήρυνσής της. Οι περιοχές που είναι εκτεθειμένες στο βρόχινο νερό διακρίνονται σε αποπλυμένες επιφάνειες και επιφάνειες βιοδιάβρωσης, ενώ συχνά εμφανίζεται και η συνέργεια των δύο αυτών φαινομένων. Παράλληλα σε τμήματα των περιοχών αυτών φαίνεται ότι έχει λάβει χώρα προσθήκη λευκής χρωματικής επίστρωσης από τιτάνιο και μόλυβδο.

Στην νότια όψη της πρόσοψης εντοπίστηκαν από τη μακροσκοπική παρατήρηση και την Υπέρυθρη Θερμογραφία αποφλοιωμένοι λίθοι εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησής τους και της εκτριβής τους από σωματίδια σκόνης. Παράλληλα παρατηρείται απώλεια υλικού εξαιτίας της κρυστάλλωσης αλάτων και των κύκλων ύγρانشης - ψύξης. Τέλος, ήταν εμφανείς επιφάνειες μαύρης κρούστας, πορτοκαλόχρωμες περιοχές, καθώς και αποπλυμένες επιφάνειες.



## Abstract

The Holy Church of the Resurrection was constructed in 325 AD after Constantine's the Great order and encompasses the Holy Sepulchre and the hill of Calvary, as well. The façade of the temple is south facing and belongs to the construction phase of the Crusades (12th century). The façade was examined by the non-destructive testing method of Infrared Thermography. However, due to the special status – since the façade belongs to all the Christian communities– samples were taken only from the collateral east molding of the façade, which belongs to the Greek Orthodox Patriarchate. The specific area was also tested by Infrared Thermography.

The samples were inspected by the method of Fiber Optical Microscopy, by the Scanning Electron Microscopy with X-ray Microanalysis and by Fourier Transform Infrared Spectroscopy, to diagnose the decay. For the characterization of the stone, the methods of X-ray diffraction and Mercury Porosimetry were used. The laboratory testing findings showed that the building material was a porous limestone with dolomitic admixtures. According to the decay examination, two categories of surfaces were distinguished: areas, which were sheltered from the rainwater, and those, which were exposed to rain. Sheltered areas presented either the typical morphology of black crusts, or surfaces with orange-brown color. In both cases, gypsum formation was detected on the surfaces. However, under the gypsum layer a silicate zone was found, which in some cases had penetrated the cracks of the stone. The characteristic orange-brown color could be firstly attributed to the oxalates, which were produced from the transformation of glycerin, and secondly to the iron oxide. Glycerin rendered the silica gel more elastic, while iron oxide accelerated the hardening reaction. The areas exposed to rainwater were distinguished to washed out surfaces and biodecay surfaces. Moreover, in some parts of those areas it seemed that a white coating with titanium and lead had been applied.

With the help of the macroscopic observation and the Infrared Thermography exfoliated stones were traced on the south view of the façade. The exfoliation was caused by the false placement of the stones and the erosion from the dust particles. In addition, material loss was observed because of the salt crystallization and the wetting-cooling circles. Finally, black crusts, orange surfaces and washed out areas were apparent on the south view of the façade.





## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	7
Περίληψη.....	9
Abstract .....	11
1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος.....	15
1.1 Φθορά των δομικών υλικών .....	15
1.1.1 Επιφανειακή φθορά .....	16
1.1.2 Βιολογική διάβρωση .....	21
1.2 Περιβαλλοντικά δεδομένα για την πόλη της Ιερουσαλήμ .....	28
1.2.1 Κλίμα.....	28
1.2.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση .....	30
1.2.3 Βιολογική φθορά στην Ιερουσαλήμ.....	32
1.2.4 Σεισμικότητα στην περιοχή της Ιερουσαλήμ .....	34
1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της Ιερουσαλήμ .....	35
2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος.....	39
2.1 Ο Πανιέρος ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα .....	39
2.1.1 Ιστορική αναδρομή και οικοδομικές φάσεις .....	41
2.1.2 Η πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως .....	46
3. Πειραματικό Μέρος .....	51
3.1 Παρουσίαση επιφανειών ελέγχου και θέσεων δειγματοληψίας – Μακροσκοπικές παρατηρήσεις.....	51
3.1.1 Παρουσίαση θέσεων δειγματοληψίας στερεών δειγμάτων .....	56
3.1.2 Θέσεις δειγματοληψίας δειγμάτων σκόνης.....	60
3.2 Μέθοδοι και τεχνικές διαγνωστικής μελέτης .....	61
3.2.1 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ανάλυσης.....	61
3.2.2 Εργαστηριακές μέθοδοι ανάλυσης .....	63
4. Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων .....	67
4.1 Χαρακτηρισμός δομικού υλικού .....	67
Ποροσιμετρία υδραργύρου .....	68
4.2 Διάγνωση τύπων φθοράς.....	70
4.2.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών .....	70
4.2.1.1 Αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων.....	70
4.2.1.2 Δείγματα που προέρχονται από περιοχές μαύρης κρούστας .....	72
4.2.1.3 Δείγμα από περιοχή πορτοκαλοκάστανης χροιάς.....	80

4.2.1.4	Δείγματα από λευκές αποπλυμένες επιφάνειες .....	82
4.2.1.5	Δείγματα από περιοχές βιολογικής διάβρωσης .....	87
4.2.1.6	Συμπεράσματα από την εξέταση των δειγμάτων με τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών	92
	Παρατηρήσεις από την εξέταση του υγιούς τμήματος του λίθου .....	93
4.2.2	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ (SEM – EDX)	97
4.2.2.1	Δείγματα από περιοχή μαύρης κρούστας .....	97
4.2.2.2	Δείγμα από πορτοκαλοκάστανη περιοχή .....	113
4.2.2.3	Δείγμα από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια .....	121
4.2.2.4	Δείγματα από επιφάνειες που έχουν υποστεί βιολογική διάβρωση .....	124
4.2.2.5	Συμπεράσματα από την εξέταση των δειγμάτων με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ.....	143
4.2.3	Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με Μετασχηματισμό Fourier (FTIR) .....	149
4.2.3.1	Δείγματα από περιοχές μαύρης κρούστας .....	150
4.2.3.2	Δείγμα από περιοχή πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού .....	152
4.2.3.3	Δείγμα από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια .....	153
4.2.3.4	Δείγματα από περιοχές με βιολογική διάβρωση.....	154
4.2.3.5	Μερικά συμπεράσματα από τον έλεγχο με την Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με Μετασχηματισμό Fourier .....	157
4.2.4	Θερμογραφία υπερύθρου.....	159
5.	Τελικά Συμπεράσματα .....	187
	Βιβλιογραφία .....	191

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

## 1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος

### 1.1 Φθορά των δομικών υλικών

Η φθορά των υλικών αποτελεί συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Οι ενδογενείς παράγοντες σχετίζονται με το ίδιο το υλικό. Αυτοί περιλαμβάνουν τον τύπο του υλικού (π.χ. λίθοι, κονιάματα, κεραμικά, μέταλλα, ξύλο, προηγμένα υλικά όπως το σκυρόδεμα κ.α.), τις ιδιότητές του (ορυκτολογικές, φυσικές, φυσικοχημικές, χημικές και μηχανικές), την κατανομή της μάζας του (μακροδομή, μικροδομή, νανοδομές) καθώς και την πηγή και την τεχνολογία επεξεργασίας (π.χ. θέση του λατομείου, κύκλοι κόπωσης του υλικού κ.λπ.). (1), (2) Επιπλέον, η ιστορία του υλικού (από την αρχική φάση κατασκευής μέχρι όλες τις εφαρμοζόμενες επεμβάσεις συντήρησης – ανακατασκευές του) και η συμβατότητα του με άλλα υλικά μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν ως ενδογενείς παράγοντες. (3)

Οι εξωγενείς παράγοντες αναφέρονται στην επίδραση που έχει το περιβάλλον στο υλικό και μπορούν γενικά να διακριθούν σε εκείνους που αφορούν την ατμόσφαιρα και εκείνους που σχετίζονται με τη χρήση του υλικού. Σημαντικό ρόλο σχετικά με την ατμοσφαιρική επίδραση πάνω στο υλικό παίζει ο «τύπος» της ατμόσφαιρας. Το ίδιο υλικό παρουσιάζει διαφορετική αντοχή στη φθορά, όταν βρίσκεται σε ένα αστικό – ρυπασμένο, αγροτικό ή θαλάσσιο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται συχνά στη μεγάλη διάρκεια ζωής των κατασκευών που βρίσκονται σε αγροτικό περιβάλλον, σε αντίθεση με εκείνες που εκτίθενται σε αστικά περιβάλλοντα υψηλής ρύπανσης. (3), (4), (5)

Άλλοι σημαντικοί εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος, όπως η κατανομή, ο προσανατολισμός και το εύρος των κύριων περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, pH, άνεμος, συγκέντρωση αέριων ρύπων και αερολυμάτων, κατακρημνίσεις κ.α.). Επιπλέον καθοριστικό παράγοντα αποτελεί και το μικροκλίμα, δηλαδή ο προσανατολισμός και η τοποθεσία του κτιρίου σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες, η μορφολογία της επιφάνειας και ο τρόπος προσβολής από τις βροχοπτώσεις. Από το μικροκλίμα μπορεί επομένως να γίνει σαφές, πως το ίδιο υλικό μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικούς τύπους φθοράς σε διαφορετικές περιοχές μίας κατασκευής. (3), (6), (7), (8)

Το νερό είναι ένας άλλος ουσιαστικός εξωγενής παράγοντας. Το νερό έρχεται σε επαφή με τα δομικά υλικά μέσω της ατμόσφαιρας (βροχή, χιόνι, συμπύκνωση

υγρασίας, αερολύματα) ή μέσω του εδάφους (ανερχόμενη υγρασία) και διαδραματίζει κύριο ρόλο στην κρυστάλλωση αλάτων, ένα σημαντικό φαινόμενο φθοράς για τα πορώδη δομικά υλικά. (9) Επιπλέον, πολλές αντιδράσεις μεταξύ των δομικών υλικών και των ατμοσφαιρικών ρύπων λαμβάνουν χώρα σε υδατικό περιβάλλον έχοντας σαν συνέπεια για παράδειγμα τη δημιουργία κρούστας ή τη διάλυση των λίθων από την όξινη βροχή. (10)

Οι μηχανικές φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται τα δομικά υλικά κατατάσσονται στους εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με τη χρήση του. Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται στη στατική (θλίψη, εφελκυσμός, διάτμηση και στρέψη), σε δυναμικά φορτία (π.χ. σεισμός), σε φορτία λόγω θερμικής συστολής – διαστολής, σε διαφορική διαστολή γειτονικών υλικών, σε φορτία από την κρυστάλλωση αλάτων και από τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης. Τέλος, ως εξωγενής παράγοντας μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί η παρουσία χλωρίδας και πανίδας στα δομικά υλικά. (3)

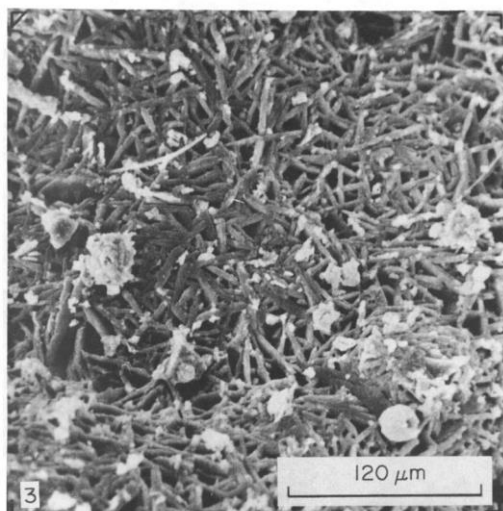
### **1.1.1 Επιφανειακή φθορά**

Οι μηχανισμοί φθοράς λειτουργούν με διάφορους τρόπους. Ένας από τους σημαντικότερους είναι η εμφάνιση των επιφανειακών κρουστών λόγω όξινων αερίων και ατμοσφαιρικών αιωρημάτων. (3), (11), (12) Η σύνθεση αυτών των κρουστών οφείλεται στο συνδυασμό δράσεων φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων. Αναφέρονται συχνά διάφοροι τύποι κρουστών οι οποίοι διακρίνονται από το χρώμα, την υφή και τη σύσταση. (13)

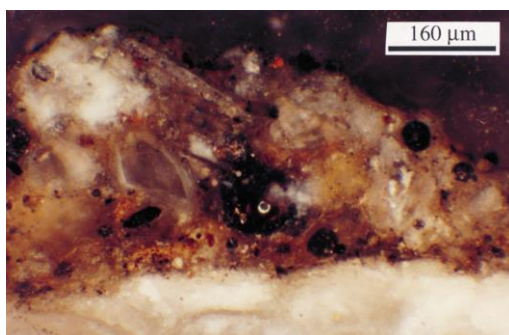
#### **Μαύρες κρούστες**

Οι μαύρες κρούστες αναπτύσσονται σε επιφάνειες του λίθου που προστατεύονται από το νερό και η σύνθεσή τους οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της ρυπασμένης ατμόσφαιρας από διοξείδιο του θείου και της επιφάνειας του λίθου. Γενικά παρουσιάζουν υψηλή ευθραυστότητα και έντονο ανάγλυφο και έχουν πάχος από 100 μm έως μερικά mm. Ο σχηματισμός των μαύρων κρουστών συνδέεται με τον αποχρωματισμό και την ανάπτυξη μίας επικάλυψης με κόκκινη – καφέ έως καφέ – μαύρη απόχρωση. (14) Τα κύρια συστατικών των μαύρων κρουστών είναι ο γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ) και αργιλικά ορυκτά τα οποία προέρχονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις επικαθίσεις σκόνης, ενώ μπορεί να ανιχνεύονται και οργανικές ενώσεις σε μικρή συγκέντρωση. (15) Επίσης στις μαύρες κρούστες ενσωματώνονται σφαιρικά σωματίδια ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Τα σωματίδια αυτά περιέχουν πυρίτιο, αργίλιο, θείο, σίδηρο, τιτάνιο μόλυβδο, ψευδάργυρο, και μαγγάνιο και είναι συνδεδεμένα με την καύση πετρελαίου και άνθρακα. (16), (17) Περιστασιακά ενδέχεται να περιέχονται στις μαύρες κρούστες και νιτρικά άλατα, τα οποία προκύπτουν από την αντίδραση των συστατικών του λίθου με το νιτρικό οξύ, που περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Τα

νιτρικά άλατα μπορούν επίσης να προέρχονται από βιολογικές ή μεταβολικές δράσεις των πτηνών. (17) Το έντονο μαύρο χρώμα τους αποδίδεται στην παρουσία μαύρων ανθρακικών σωματιδίων τα οποία είναι προϊόντα καύσης. (10) Επίσης στο σώμα των μαύρων κρουστών μπορούν να παρατηρηθούν μικρά λευκά σωματίδια, τα οποία κυρίως συνδέονται με την παρουσία κρυστάλλων γύψου και ανακρυσταλλωμένου ασβεστίτη. (4)



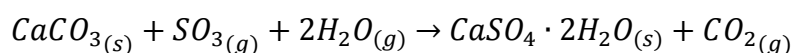
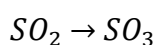
Εικόνα 1.1: Εικόνα SEM. Περιοχή μαύρης κρούστας στην οποία παρουσιάζεται ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου (10)



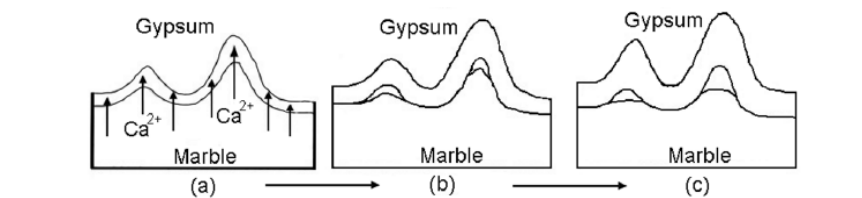
Εικόνα 1.2: Κρύσταλλοι ασβεστίτη στη μαύρη κρούστα (τομή) (4)

### Μηχανισμός γυψοποίησης

Ο σχηματισμός του γύψου παρατηρείται κυρίως σε επιφάνειες που προστατεύονται από το νερό της βροχής και βρίσκονται σε περιβάλλοντα με μεγάλη συγκέντρωση  $SO_2$ . Οι περιοχές αυτές είναι απαλλαγμένες από την εντατική απόπλυση και έτσι το  $SO_2$  μαζί με υδρατμούς ή με το νερό τη βροχής διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στους πόρους, προς το σχηματισμό μίας διεπιφάνειας ασβεστίτη – γύψου. Η γυψοποίηση πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια:



Καθώς το πάχος του γύψου αυξάνεται, μειώνεται ο αριθμός και το μέγεθος των πόρων εξαιτίας του μεγαλύτερου μοριακού βάρους του γύψου σε σύγκριση με τον ασβεστίτη και τελικά όταν το πάχος της κρούστας του γύψου γίνει περίπου 30 nm, οι πόροι παύουν να υπάρχουν. Μετά από αυτό ακολουθεί διάχυση στερεάς κατάστασης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον. (1)

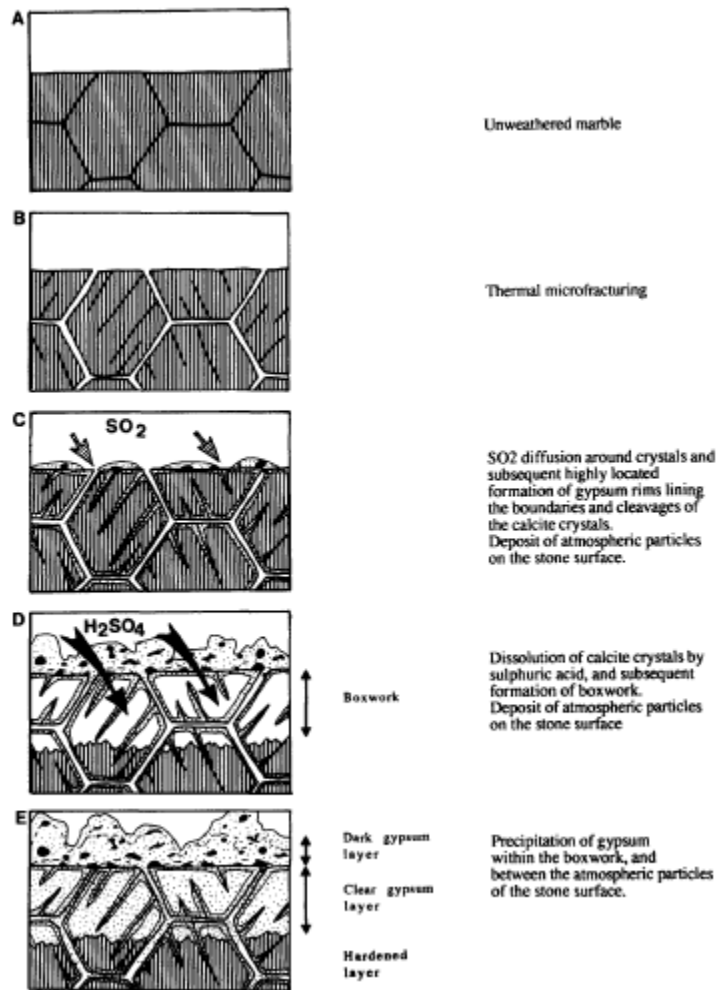


Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση της γυψοποίησης επιφάνειας μαρμάρου και της εξάλειψης των λεπτομερειών της (18)

### Ψευδομορφισμός γύψου

Η διατήρηση του όγκου ή του σχήματος του ορυκτού του υποστρώματος κατά τη διάρκεια αντιδράσεων διάβρωσης ονομάζεται ψευδομορφισμός. (19) Στην περίπτωση του σχηματισμού κρούστας γύψου σε λίθινη επιφάνεια, ο ψευδομορφισμός εμφανίζεται, όταν εντοπίζονται πάνω στο στρώμα του γύψου κόκκοι ασβεστίτη, ενώ τεκμηριώνεται και από την παρουσία πολλών στρωμάτων με διαφορετικές συστάσεις στη διαβρωμένη επιφάνεια. Ο ψευδομορφισμός σαν φαινόμενο διάβρωσης αναπτύσσεται σε τρία στάδια, όπως περιγράφεται από τη V. Verges – Belmin: (20)

1. τον επιφανειακό σχηματισμό του γύψου,
2. το σχηματισμό κοιλοτήτων μέσω της διάλυσης του ασβεστίτη, οι οποίες έχουν το σχήμα και το μέγεθος κρυστάλλων ασβεστίτη, αλλά περιβάλλονται από στρώμα γύψου (boxwork)
3. την απόθεση του γύψου στις ρωγμές που έχουν σχηματιστεί από τη διάλυση του ασβεστίτη και τη διάσπαση του λίθου εξαιτίας των κύκλων συστολής – διαστολής.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία σχηματισμού στρωμάτων γύψου σε επιφάνεια μαρμάρου (20)

Αρχικά εξαιτίας της θερμικής διαστολής προκαλείται κοκκώδης αποσάθρωση στην επιφάνεια η οποία προχωράει σε βάθος. Ακολουθεί διάχυση του διοξειδίου του θείου ( $SO_2$ ) γύρω από τους κρυστάλλους ασβεστίτη η οποία οδηγεί σε σχηματισμό του γύψου στο εσωτερικό των ρωγμών. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται άκρα του γύψου στην επιφάνεια του μαρμάρου ή του λίθου και ενώ η αντίδραση της γυψοποίησης είναι σε εξέλιξη, συμπληρώνονται οι μικρορωγμές και οι ασυνέχειες των ασβεστιτικών κρυστάλλων με γύψο. Ταυτόχρονα παρατηρείται και εναπόθεση σωματιδίων σκόνης. Παράλληλα διαλύεται ο ασβεστίτης εξαιτίας της αντίδρασης με το θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ) και αναπτύσσονται κοιλότητες με το σχήμα και το μέγεθος κρυστάλλων ασβεστίτη των οποίων τα τοιχώματα και οι ασυνέχειες είναι επικαλυμμένα από γύψο (boxworks). Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται με την συμπλήρωση των κενών, που έχουν δημιουργηθεί από τη θερμική διαστολή και τη διάλυση του ασβεστίτη, με γύψο. Επομένως, σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό μπορεί να διεξαχθεί ο εσωτερικός (κάτω από την επιφάνεια του λίθου) και ο εξωτερικός σχηματισμός του γύψου ταυτόχρονα. (20)



## Γκρίζες κρούστες

Εξετάζοντας αυτές τις επιφάνειες ανακαλύφθηκε ότι αυτό το χαρακτηριστικό χρώμα οφείλεται στις επικαθίσεις σκόνης στο λίθο. Ένα διακριτό όριο μεταξύ του στρώματος σκόνης και της υποκείμενης λίθινης επιφάνειας αποδεικνύει ότι δεν πραγματοποιείται καμία χημική ή φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο υλικών. Αν απομακρυνθεί η στοιβάδα της σκόνης, η επιφάνεια του λίθου αποκαλύπτεται χωρίς κανένα σημάδι διάβρωσης. Μερικές φορές το στρώμα της σκόνης μπορεί να απομακρυνθεί με τη μορφή ενός συμπαγούς φιλμ. Αυτή η συμπαγής δομή είναι σαφής ένδειξη ότι οι επικαθίσεις σκόνης έχουν υποστεί μία σειρά από φυσικές και χημικές αντιδράσεις, που οδήγησαν στη σύνδεση μεταξύ του υλικού και των σωματιδίων σκόνης. Οι γκρίζες κρούστες εντοπίζονται συνήθως σε στοές ή αψίδες, όπου δεν έρχονται σε επαφή με το βρόχινο νερό. (10), (21)

## Πάτινες

Οι πάτινες μοιάζουν με ομοιογενείς και εκτεταμένες επικαλύψεις με χρωματικές διαβαθμίσεις μεταξύ του καφέ και του πορτοκαλί. Οι πάτινες εμφανίζονται σε προστατευμένες και αποπλυμένες επιφάνειες λίθου. Κυρίως αποτελούνται από οξαλικό ασβέστιο ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) και πυριτικά και φωσφορικά άλατα σε μικρές ποσότητες. (17) Τρεις βασικές υποθέσεις έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα σχετικά με την προέλευση της πάτινας:

1. Σύμφωνα με τη «βιολογική» υπόθεση, το οξαλικό ασβέστιο προκύπτει από το οξαλικό οξύ, το οποίο εκκρίνεται από μικροοργανισμούς, όπως είναι οι λειχήνες που αποικούν στα μνημεία. (22)
2. Η «χημική» υπόθεση θεωρεί ότι τα οξαλικά οξέα είναι προϊόντα μετασχηματισμού από παλαιότερες επεμβάσεις για την προστασία ή το γυάλισμα της επιφάνειας του μνημείου, όπου είχαν χρησιμοποιηθεί οργανικά υποστρώματα, όπως λάδι, κερί, μονοδικαρβοξυλικό οξύ, αυγό κτλ. (22), (23), (24), (25), (26)
3. Επιπλέον οι πάτινες συχνά αποδίδονται σε αλληλεπίδραση του λίθου με ατμοσφαιρικούς παράγοντες και σωματίδια σκόνης. (24)

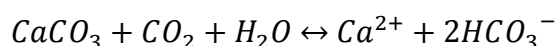
## Αποπλυμένες επιφάνειες

Οι λευκές επιφάνειες εμφανίζονται αρχικά απαλλαγμένες από τη φθορά. Ωστόσο οι επιφάνειες αυτές εκτίθενται σε μεγάλο βαθμό στη διαβροχή, συνεπώς είναι επιδεκτικές στη διάβρωση και την απόθεση σωματιδίων. Εξαιτίας της άμεσης έκθεσης στο βρόχινο νερό εξαφανίζονται τα προϊόντα της διάβρωσης λόγω απόπλυσης. Ο συνδυασμός της διάβρωσης και της απόπλυσης έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια υλικού από το λίθο και η σοβαρότητα αυτού του φαινομένου εξαρτάται από το βαθμό της χημικής προσβολής και της ποσότητας του νερού.



Μερικές φορές στις αποπλυμένες επιφάνειες ανιχνεύεται μικρή ποσότητα γύψου. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του υγιούς και του αποπλυμένου τμήματος διαπιστώνεται ότι μέρος του λίθου, κυρίως ασβεστίτης, έχει διαλυθεί και απομακρυνθεί από τη μεγάλη ποσότητα του νερού. (10), (27)

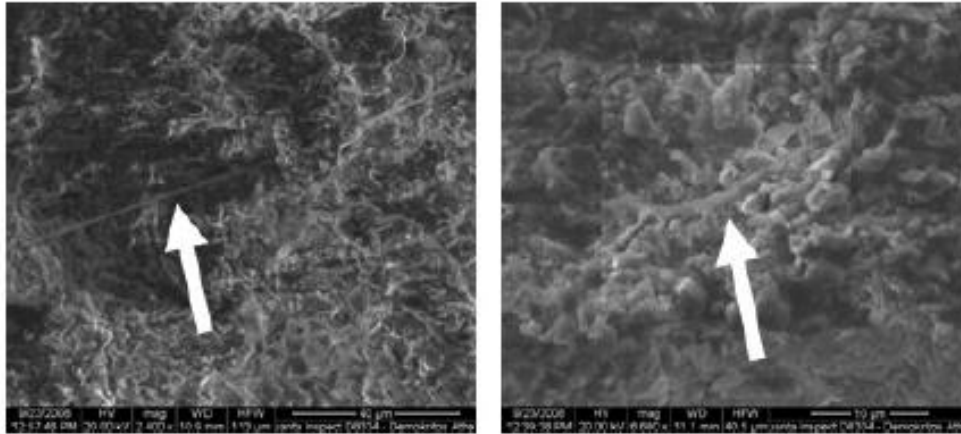
Το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας αποτελεί σημαντικό παράγοντα όξυνσης του βρόχινου νερού. Η διάλυση των ασβεστόλιθων στο νερό αυξάνεται με την παρουσία του CO<sub>2</sub> σύμφωνα με την αντίδραση: (28)



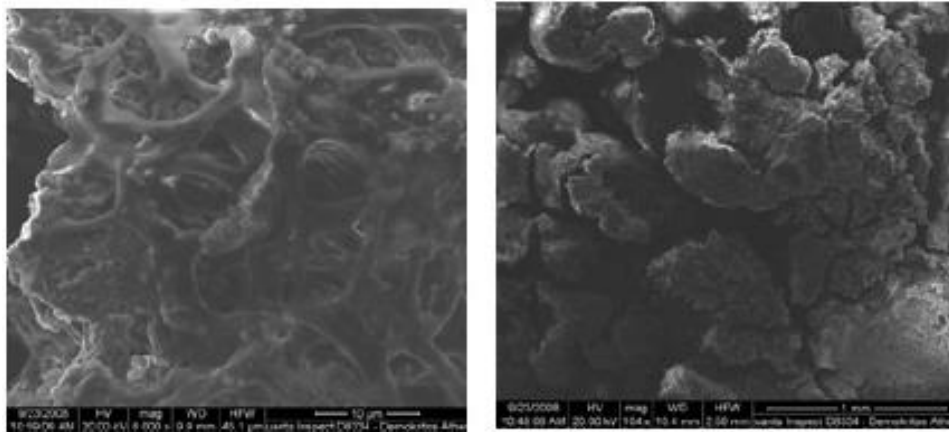
### 1.1.2 Βιολογική διάβρωση

Η βιολογική φθορά στο λίθο είναι ένας από τους πολλούς μηχανισμούς φθοράς που προκαλούν διάλυση και καταστροφή στα ιστορικά μνημεία. Η βιοδιάβρωση συνήθως θεωρούταν σαν μία διαδικασία υποβάθμισης των ανόργανων παραγόντων, η οποία ακολουθεί τα πρώτα αποτελέσματα της φθοράς. Οι παράγοντες φθοράς αρχικά δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες στη δομή του λίθου και προκαλούν τον εμπλουτισμό του με οργανικά και ανόργανα θρεπτικά συστατικά προετοιμάζοντας έτσι την ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε αυτόν. Ωστόσο, μελέτες στον τομέα της βιοδιάβρωσης και συγκεκριμένα στον τομέα των βιοφίλμ, που σχηματίζονται από τους μικροοργανισμούς για να προστατευθούν από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, αναφέρουν ότι οι επιπτώσεις της βιοδιάβρωσης μπορούν να εντοπιστούν στα αρχικά στάδια της έκθεσης του λίθου. (29), (30), (31)

Στις επιπτώσεις αυτές συμπεριλαμβάνεται κατά πρώτο λόγο και η αισθητικά απaráδεκτη εικόνα της χρώσης των λίθινων επιφανειών από τις βιογενείς χρωστικές (χλωροφύλλη, καρροτενοειδή, μελανίνη). (32) Δεύτερον, παρουσιάζονται εξωκυτταρικές πολυμερικές ουσίες οι οποίες προκαλούν μηχανικές τάσεις στο ορυκτό, εξαιτίας των κύκλων συστολής – διαστολής των κολλοειδών βιογενών προϊόντων στο εσωτερικό των πόρων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στη διαφοροποίηση της μικροδομής του λίθου. (12) Μηχανικές τάσεις ασκούνται και από τη διείδυση των υφών των μικροοργανισμών μέσα στο λίθο. (33) Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία βιοφίλμ σε λίθινες επιφάνειες επιταχύνει τη συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων. (34) Η απελευθέρωση των βιογενών διαβρωτικών οξέων είναι ίσως ο πιο γνωστός και καταστρεπτικός βιοχημικός μηχανισμός για τα ανόργανα υλικά. Οι μικροοργανισμοί εκκρίνουν οργανικά ή ανόργανα οξέα και λαμβάνει χώρα η διεργασία υποβάθμισης του λίθου που ονομάζεται οξεόλυση. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελονοειδή διάβρωση και σε απώλεια υλικού σε μεγάλη κλίμακα. (35)



**Εικόνα 1.4:** Εικόνες SEM. Διακρίνεται η ανάπτυξη υφών οι οποία οδηγεί στην επιφανειακή πυκνή ανάπτυξη μυκηλίων (36)



**Εικόνα 1.5:** Εικόνα SEM. Η ανάπτυξη μυκηλίων, τα οποία εισέρχονται κάθετα στο κύριο σώμα του λίθου και προκαλούν επιφανειακές ρωγμές (36)

### Επιδεκτικότητα λίθου στη βιολογική διάβρωση

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω τα χαρακτηριστικά φθοράς του λίθου επηρεάζονται από τους ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. (3) Μία εκτεταμένη εσωτερική επιφάνεια πόρων διευκολύνει την διάδοση της μικροχλωρίδας μέσα στο πορώδες του λίθου. Τα υψηλά ποσοστά πορώδους επιτρέπουν την βαθιά είσδυση της υγρασίας στο υλικό, ώστε να προετοιμαστεί το έδαφος για την ανάπτυξη μικροοργανισμός με βάθος από 3 έως 5 cm. Ενώ στους λίθους με μεγάλους πόρους εξαιτίας της σύντομης παραμονής της υγρασίας στο εσωτερικό τους επιτρέπεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών μόνο περιστασιακά, οι λίθους με μικρούς πόρους, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραμονή υγρασίας, προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες για τον αποικισμό μικροοργανισμών. (12)

Η υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικές ενώσεις (>3% w/v  $\text{CaCO}_3$ ) στο λίθο οδηγεί στη ρύθμιση των βιογενών μεταβολικών προϊόντων διατηρώντας ένα σταθερό pH,

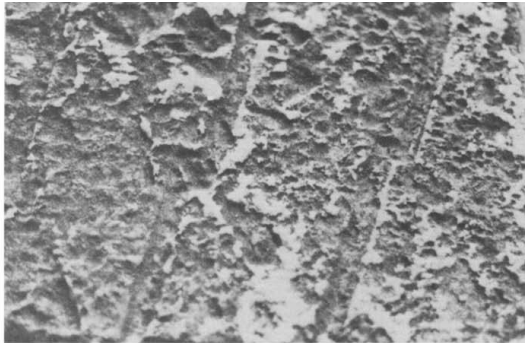
κατάλληλο για την ανάπτυξη βακτηρίων. (12) Ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο αποτελούνται συνήθως από μία πυκνή ασβεστιτική μήτρα, η οποία επιτρέπει την επιφανειακή μικροβιακή μόλυνση. Ωστόσο τα υλικά αυτά φαίνεται να υποβάλλονται υπό την επίθεση λειχήνων και μυκήτων. (37), (38)

## Μηχανισμοί της βιολογικής διάβρωσης

### Βιοχημική διάβρωση

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

Η απελευθέρωση βιογενών διαβρωτικών οξέων είναι πιθανόν η πιο γνωστή και περισσότερο διερευνημένη διεργασία βιοχημικής διάβρωσης στα ανόργανα υλικά. Η διεργασία αυτή γνωστή και με τον όρο «biocorrosion», προκαλείται από τις μικροβιακές εκκρίσεις ανόργανων και οργανικών οξέων (οξεόλυση και συμπλοκοποίηση). Οι ουσίες αυτές διαλύουν και χαράσσουν την μήτρα του ορυκτού με ταυτόχρονη υποβάθμιση της συνοχής. (39), (12) Ανάλογα με τις ορυκτολογικές, μορφολογικές και φυσικοχημικές παραμέτρους του λίθου η βιοδιάβρωση προκαλεί βελονοειδείς σχηματισμούς ή σε μεγαλύτερη κλίμακα αποφλοίωση της επιφάνειας. (40)



Εικόνα 1.6: Βελονοειδής διάβρωση σε λίθο (25)

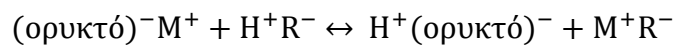


Εικόνα 1.7: Βελονοειδής διάβρωση εξαιτίας της ανάπτυξης λειχήνων σε δολομιτικά εγκλείσματα λίθου (41)



Εικόνα 1.8: Βελονοειδής διάβρωση (33)

Η οξείδωση είναι μία αντίδραση οξέων (π.χ. ανθρακικό, νιτρικό, θειικό, μυρμηκικό, οξικό, γαλακτικό, γλυκονικό) που ακολουθεί τον παρακάτω τύπο: (42)



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

Η ανταλλαγή πρωτονίου – κατιόντος μπορεί να προκύψει κυρίως από την αντίδραση χημειολιθοτροφικών μικροοργανισμών και συγκεκριμένα βακτηρίων που παράγουν νιτρικά και θειικά οξέα. Τα νιτροποιητικά βακτήρια προκαλούν την οξείδωση της δυσδιάλυτης αμμωνίας (που προέρχεται κυρίως από γεωργικά λιπάσματα) και των νιτρωδών (που προέρχονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση) σε νιτρώδη και νιτρικά οξέα που είναι ευδιάλυτα. Η αντίδρασή τους με το ανθρακικό ασβέστιο και άλλα ορυκτά οδηγεί στο σχηματισμό νιτρικών και νιτρωδών, τα οποία διαλύονται ευκολότερα από τις φάσεις του ορυκτού. Τα θειο – οξειδωτικά βακτήρια εκκρίνουν θειικό οξύ κατά τη διάρκεια της μεταβολικής δράσης τους το οποίο αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο προς το σχηματισμό θειικού ασβεστίου (γύψου). (12)

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

κυτταρική αναπνοή. (29), (12) Αυτά το οξέα έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν κατιόντα όπως Ca, Al, Si, Fe, Mn, και Mg από τα ορυκτά προς σχηματισμό σταθερών συμπλόκων. (43), (42)

Έχει αποδειχτεί ότι τα βιογενή οργανικά οξέα είναι αισθητά πιο καταστρεπτικά από ότι τα ανόργανα για τα ορυκτά και θεωρούνται ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διάβρωσης των λίθων. Πολλοί μικροοργανισμοί είναι σε θέση να παράγουν αυτά τα οξέα, αλλά οι μύκητες χαρακτηρίζονται ως οι πλέον σημαντικοί οργανισμοί στη φύση για τη βιοδιάβρωση των λίθων. (12), (44)

Η βιοδιάβρωση στους λίθους μπορεί να λάβει χώρα και μέσω αλκαλικών αντιδράσεων. Η ικανότητα αποικοδόμησης νιτρικών συμπλόκων και αλάτων νατρίου οργανικών οξέων είναι διαδεδομένη στους μικροοργανισμούς. Τα προϊόντα αυτής της διεργασίας (αμμωνίας ή άλας νατρίου) αυξάνουν το pH του διαλύματος στους πόρους του λίθου και προκαλούν (σε τιμές pH>9) τη διάλυση του πυριτίου. Η παγίδευση του διοξειδίου του άνθρακα από τη φωτοσύνθεση προκαλεί επίσης μία ελαφρά αλκαλοποίηση του μικροβιακού περιβάλλοντος (pH 8,3) και τη ρύθμιση των εκκρίσεων της κυτταρικής αναπνοής. (12)

Ένας επιπλέον σημαντικός βιοχημικός μηχανισμός διάβρωσης, που απαντάται συχνά σε λίθους προκαλείται από διάφορα χημειοργανοτροφικά βακτήρια και μύκητες τα οποία είναι σε θέση να απομακρύνουν κατιόντα σιδήρου και μαγγανίου από το ορυκτό μέσω οξειδωσης. (45)

### **Βιοφυσική διάβρωση**

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι οι μικροοργανισμοί μπορεί να συμβάλλουν στην ανάπτυξη μαύρης κρούστας, επιταχύνοντας ή δρώντας σαν καταλύτες στις αντιδράσεις. Η βιογενής επιρροή σχετίζεται άμεσα με την ανάπτυξη μικροβιακών βιοφίλμ στις επιφάνειες των μνημείων. (35) Ενώ οι βασικές παράμετροι για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών διατίθενται από το υλικό και το περιβάλλον, η ανάπτυξη των βιοφίλμ διευκολύνει τη διαδοχή των μικτών κοινοτήτων μικροοργανισμών. Ακόμα και συνθήκες έλλειψης θρεπτικών συστατικών και υγρασίας μπορούν να βελτιωθούν από το σχηματισμών διαδοχικών σύνθετων βιοφίλμ. Τα βιοφίλμ αποτελούνται από μικροβιακά κύτταρα που βρίσκονται στην επιφάνεια του λίθου (υπόστρωμα), τα οποία συχνά είναι ενσωματωμένα σε οργανική πολυμερική μήτρα μικροβιακής προέλευσης. Η μήτρα αυτή έχει σχηματιστεί από εξωκυτταρικές πολυμερικές ουσίες, όπως πολυσακχαρίτες, λιποπολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, γλυκοπρωτεΐνες, λιπίδια, γλυκολιπίδια, λιπαρά οξέα και ένζυμα. Δεν χρειάζεται να βρίσκονται σε άμεση επαφή με το υπόστρωμα όλοι οι μικροοργανισμοί του σύνθετου βιοφίλμ, οι οποίοι μπορούν να προσβάλλουν το λίθο. (46), (35)

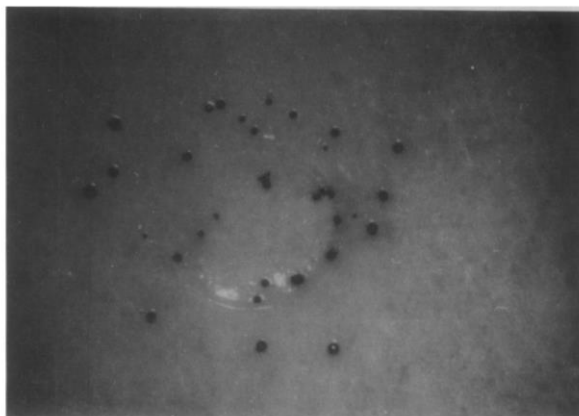
Ο μικροβιακός αποχρωματισμός των λίθινων επιφανειών θεωρείται ως πρωτογενής βιοφυσική επίπτωση, επειδή δρα σαν πρόδρομος του σχηματισμού μαύρης κρούστας. Αρχικά μειώνεται η αισθητική αξία του μνημείου, αλλά μπορεί να επηρεαστούν και οι θερμικές ιδιότητες του λίθου προκαλώντας σημαντικές φθορές, ιδιαίτερα σε λίθους με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλαζία ή σε ορυκτά που περιέχουν άργιλο. (12)

Η πρώτη αναφορά σε βιογενή μαύρο χρωματισμό σε λίθο, που προκλήθηκε από χλωροφύλλη, έγινε από το Jaag το 1945. Οι χρωματικές αλλαγές πάνω στην επιφάνεια του λίθου αποδόθηκαν στην παραγωγή χλωροφύλλης από κυανοβακτήρια και φύκη. Στον αποχρωματισμό συμβάλλουν και άλλες βιογενείς χρωστικές όπως οι φυκοχολινοπρωτεΐνες και τα καροτενοϊδή. Η αλλοίωση του χρώματος του λίθου από βιογενείς χρωστικές ουσίες μπορεί να διαιρεθεί σε: (12), (47)

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

Κατά την έρευνα της χρωματικής αλλοίωσης του λίθου από μικροοργανισμούς δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην προέλευση και τη λειτουργία των καφέ – μαύρων μελανίνων. Ο Willimzing απέδωσε το μαύρο χρωματισμό των λίθων σε ενζυματικές δραστηριότητες πολλών μικροοργανισμών που βρέθηκαν σε λίθινες επιφάνειες. Τεκμηριώνει ότι η τυροσινάση, ένα ευρέως διαδεδομένο ένζυμο στη φύση, απελευθερώνεται από νεκρά μικροβιακά κύτταρα και προκαλεί το σχηματισμό της μελανίνης. Η μελανίνη αναφέρεται ότι προστατεύει τους μικροοργανισμούς από την UV – ακτινοβολία και τις αλλαγές της θερμοκρασίας. (12)

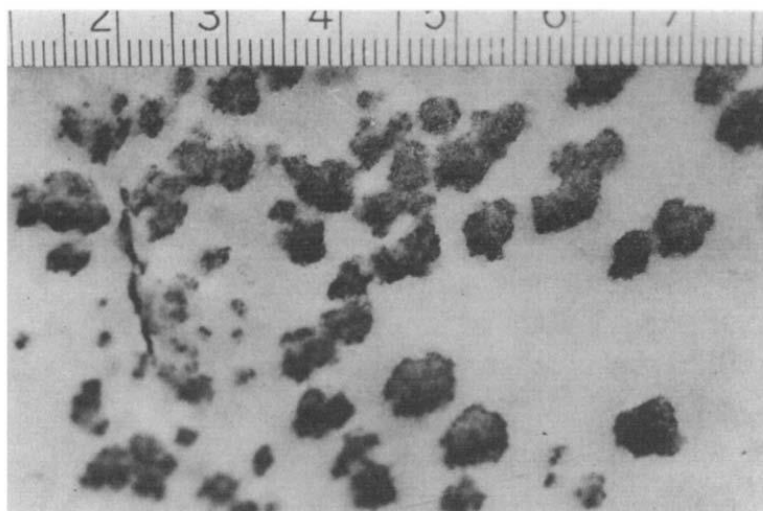




**Εικόνα 1.9: Μαύρες κηλίδες στην επιφάνεια μαρμάρου από την επίδραση βιογενών χρωστικών (32)**

Επιπλέον, τα μικροβιακά βιοφίλμ επηρεάζουν την υδαταπορρόφηση των λίθων προκαλώντας σοβαρές αλλαγές στην διάχυση του νερού στους πόρους του υλικού. (35)

Τα βιοφίλμ επίσης, συγκεντρώνουν αιωρούμενα σωματίδια, όπως αιθάλη και σκόνη, ενώ απορροφούν και διαβρωτικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι επιταχύνουν το φαινόμενο της χημικής διάβρωσης. Η παραγωγή οξαλικών, φωσφορικών, θειικών, ανθρακικών και μελανίνων από τη βιολογική δράση ενισχύει το σχηματισμό κρουστών. (12)



**Εικόνα 1.10: Κυανοβακτήρια σε επιφάνεια μαρμάρου (25)**

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

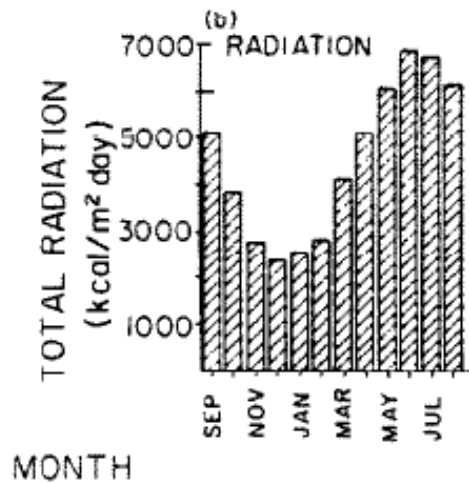
## 1.2 Περιβαλλοντικά δεδομένα για την πόλη της Ιερουσαλήμ

### 1.2.1 Κλίμα

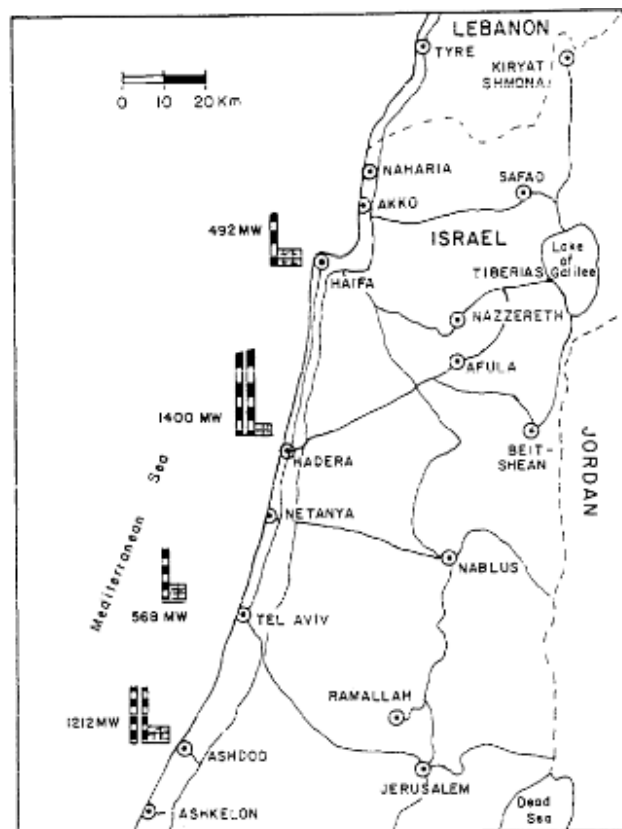
Η Ιερουσαλήμ παρουσιάζει μοναδικές κλιματολογικές συνθήκες, καθώς έχει τις υψηλότερες τιμές μέσης βροχόπτωσης σε σχέση με περιοχές υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας ( $\geq 3250$  ώρες ετησίως κατά μέσο όρο), ενώ εμφανίζει και την υψηλότερη ηλιοφάνεια συγκριτικά με περιοχές αντίστοιχης μέσης βροχόπτωσης (περίπου 500 mm/γ). Οι συνθήκες αυτές οφείλονται σε τρεις σημαντικούς παράγοντες. Αρχικά, η Ιερουσαλήμ βρίσκεται στην υποτροπική ζώνη, δεύτερον, χαρακτηρίζεται από έλλειψη σύννεφων και τρίτον, παρουσιάζει χαρακτηριστικά ερήμου εξαιτίας της γειτονικής της περιοχής. Ο μέσος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας είναι περίπου 3474 ώρες. Η τιμή αυτή αποδίδεται στην υψομετρική τοποθεσία της πόλης και στο γεγονός ότι συνορεύει με την έρημο. Η έρημος της Ιουδαίας με 100 mm ετήσια βροχόπτωση απέχει περίπου 20 χιλιόμετρα από την πόλη, ενώ στην Ιερουσαλήμ η βροχόπτωση φτάνει τα 493 mm ετησίως. (48), (49) Χιονοπτώσεις συμβαίνουν κάθε 3 – 5 χρόνια. Η βροχερή περίοδος ξεκινάει από τον Οκτώβρη και διαρκεί έξι μήνες. (50) Η απόσταση της πόλης από τη μεσογειακή ακτή είναι 60 χιλιόμετρα και έχει υψόμετρο 700 – 800 m. Η βροχή έχει κατά κύριο λόγο δυτική – βορειοδυτική κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό επηρεάζει την υγρασία στις τοιχοποιίες, καθώς οι δυτικές τοιχοποιίες διαβρέχονται πιο συχνά από της ανατολικές.

Επίσης η ύπαρξη υγρασίας καθορίζεται και από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία στην πόλη είναι αυξημένη συγκριτικά με άλλες πυκνοκατοικημένες περιοχές στον κόσμο. Η μέγιστη και η ελάχιστη μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται τον Ιούνιο και το Δεκέμβριο αντίστοιχα. Οι τιμές του ακόλουθου σχήματος υποδεικνύουν ότι η φωτοχημική δραστηριότητα στην Ιερουσαλήμ μπορεί να λαμβάνει χώρα ολόκληρο το χρόνο, ενώ εντονότερο γίνεται το φαινόμενο στις ξηρές περιόδους. Οι νότιες τοιχοποιίες δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας από τις βόρειες. Επομένως εμφανίζουν την περισσότερη υγρασία με αύξουσα σειρά: οι νότιες, ανατολικές, δυτικές και βόρειες όψεις. (50), (51)





Σχήμα 1.2: Μηνιαία μέση συνολική ηλιακή ακτινοβολία στην Ιερουσαλήμ για την περίοδο 1979-1983 (Πηγή: Μετεωρολογικό Ινστιτούτο Ισραήλ, Beit Dagan)

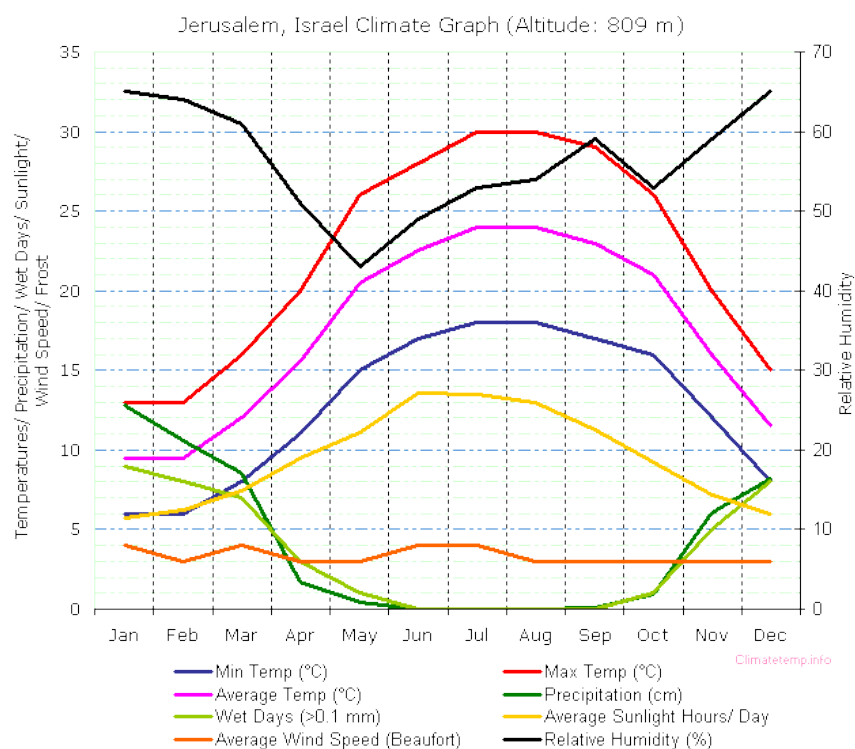


Εικόνα 1.11: Χάρτης Ισραήλ. Τοποθεσία Ιερουσαλήμ (50)

Σύμφωνα με τη Μετεωρολογική Υπηρεσία της Ιερουσαλήμ η μέση θερμοκρασία στην περιοχή κυμαίνεται από 10 – 17°C, ενώ η σχετική υγρασία παίρνει τιμές από 43% (το Μάιο) έως 65%. (52), (53)

**Πίνακας 1.1: Στοιχεία θερμοκρασιών και μέση βροχόπτωσης στην Ιερουσαλήμ (52)**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	13	13	16	20	26	28	30	30	29	26	20	15	22
Μέση θερμοκρασία (°C)	10	10	12	16	21	23	24	24	23	21	16	12	17
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	6	6	8	11	15	17	18	18	17	16	12	8	13
Σχετική υγρασία (%)	65	64	61	51	43	49	53	54	59	53	59	65	56
Μέση βροχόπτωση (mm)	128	106	85	17	4	0	0	0	1	9	61	82	493
Πιθανότητα βροχοπτώσεων μέσα στη μέρα (%)	29	28	23	10	3	0	0	0	0	3	17	26	12



**Σχήμα 1.3: Γράφημα ετήσιες κλιματολογικές συνθήκες στην πόλη της Ιερουσαλήμ (52)**

### 1.2.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Οι πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της ατμόσφαιράς στην πόλη της Ιερουσαλήμ είναι διαθέσιμες από το 1979. Σύμφωνα με αυτές οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προέρχονται κυρίως από τις μεταφορές και τη βαριά βιομηχανική

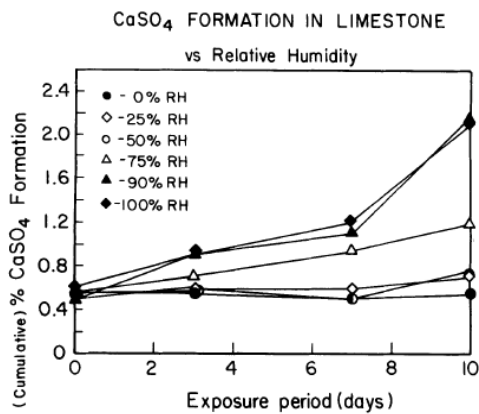
παραθαλάσσια περιοχή που απέχει 50 – 100 χιλιόμετρα από την Ιερουσαλήμ. (54), (50) Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος του Ισραήλ στις δύο παραπάνω πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης προστίθεται και η παραγωγή ενέργειας. Ο αριθμός των οχημάτων και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχουν δεκαπλασιαστεί. Οι αναλύσεις της ρύπανσης του αέρα δείχνουν αυξημένα επίπεδα εκπομπών όλων των ρύπων. Έτσι παρατηρούνται: (50), (54), (55), (56)

1. αιωρούμενα σωματίδια (PM) από τη χρήση ντιζελοκινητήρων, από τα λατομεία, τις βιομηχανίες, τα διυλιστήρια και τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
2. οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) που αποδίδονται στη χρήση οχημάτων, στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στις βιομηχανίες,
3. υδρογονάνθρακες από τα οχήματα, τα διυλιστήρια και την αποθήκευση καυσίμων,
4. όζον (O<sub>3</sub>) που σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των οξειδίων του αζώτου και των υδρογονανθράκων,
5. μονοξείδιο του άνθρακα από τα βενζινοκίνητα οχήματα,
6. διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) από τα διυλιστήρια, τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τις βιομηχανίες και
7. μόλυβδος (Pb) από τα οχήματα που κινούνται με βενζίνη με μόλυβδο.

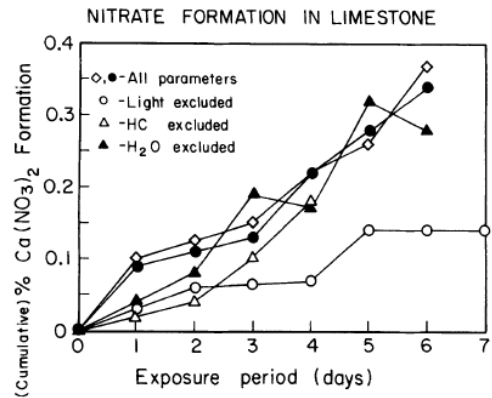
**Πίνακας 1.2: Κύριες πηγές των βασικών ρυπαντών και τα ποσοστά που τους αναλογούν (Πηγή: Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ισραήλ)**

Ρυπαντής	Βιομηχανία	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Οχήματα	Θέρμανση
SPM	31%	38%	30%	<1%
SO <sub>2</sub>	25%	70%	4%	1%
NO <sub>x</sub>	5%	39%	55%	<1%
CO <sub>2</sub>	14%	59%	22%	5%

Η ετήσια μέση συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου στην Ιερουσαλήμ είναι περίπου ίση με 0,005 και 0,025 ppm αντίστοιχα. (50) Σύμφωνα με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα από τα τείχη της πόλης, η υγρασία επηρεάζει την προσβολή του λίθου από διοξείδιο του θείου. Ταυτόχρονα η φθορά από την επίδραση των διοξειδίων του αζώτου επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία και την παρουσία υδρογονανθράκων. Παρά τα υψηλότερα επίπεδα των οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα συγκριτικά με του διοξειδίου του θείου, παρατηρήθηκε υψηλότερο ποσοστό θεικών από ότι νιτρικών στις εκτεθειμένες τοιχοποιίες. Ενδεχομένως αυτό να οφείλεται στη μεγαλύτερη διαλυτότητα του νιτρικού ασβεστίου από το νερό της βροχής. (57)



Σχήμα 1.4: Σχηματισμός γύψου σε συνάρτηση με τη σχετική υγρασία (57)

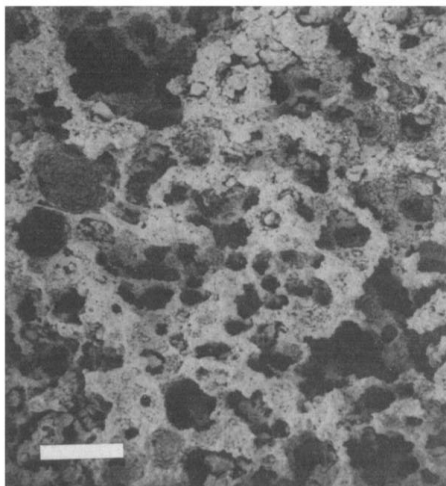


Σχήμα 1.5: Σχηματισμός νιτρικού ασβεστίου σε συνάρτηση με περιβαλλοντικούς παράγοντες (57)

### 1.2.3 Βιολογική φθορά στην Ιερουσαλήμ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κύρια κατεύθυνση της βροχής είναι δυτική – βορειοδυτική εξαιτίας του ανέμου. Επομένως οι τοίχοι ανατολικής, νότιας και νοτιοανατολικής όψης παραμένουν σχεδόν στεγνοί εκτός από περιπτώσεις περιστασιακών βροχοπτώσεων. Στις παρυφές των τοίχων αυτών που βρίσκονται δίπλα σε τοίχους που βρέχονται δημιουργείται μία υγρή ζώνη. Όσο ισχυρότεροι είναι οι άνεμοι, τόσο μεγαλύτερη είναι η υγρή ζώνη.

Τις περισσότερες επιφάνειες τοίχων της Ιερουσαλήμ δυτικής – νοτιοδυτικής όψης που είναι παλαιότερες των 100 ετών καταλαμβάνουν σφαιρικά κυανοβακτήρια με καστανοκίτρινο περίβλημα και κυανόφιλες λειχήνες. (25), (51) Η επιφάνεια του λίθου κάτω από τους μικροοργανισμούς έχει σπογγοειδή μορφή. Το χρώμα των όψεων στις οποίες βρίσκονται αυτοί οι μικροοργανισμοί είναι γκρίζο, όταν οι επιφάνειες είναι στεγνές και μαύρο, όταν οι επιφάνειες είναι υγρές. Οι τοιχοποιίες βορειοανατολικής, ανατολικής και νοτιοανατολικής όψης έχουν καστανό, καστανοκίτρινο ή κίτρινο χρώμα. Αυτές προστατεύονται από τους ανέμους και τις βροχοπτώσεις. Οι καστανές κρούστες που έχουν σχηματιστεί στους τοίχους αυτούς αποτελούνται από οξειδία σιδήρου και άργιλο, ενώ διαφέρουν αισθητά από το υγιές τμήμα του λίθου που είναι ασβεστιτικής και δολομιτικής σύστασης. (25)



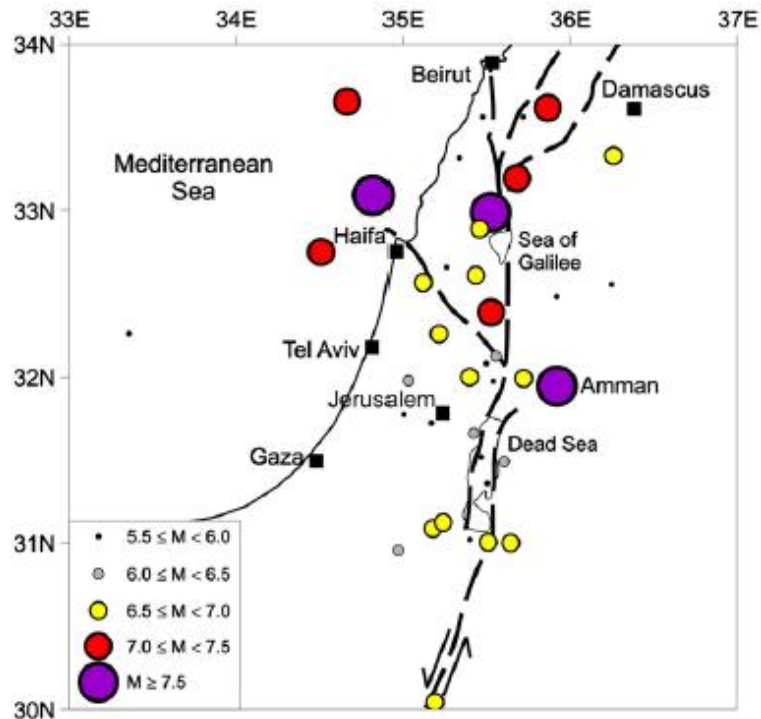
Εικόνα 1.12: Σπογγοειδής επιφάνεια ασβεστόλιθου που έχει διαβρωθεί από κυανοβακτήρια και κυανόφιλες λειχήνες (25)

Η διαβρωτική δράση των κυανοβακτηριών μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως εξής: (25)

1. Εγκατάσταση κυανοβακτηριών σε σχισμές του λίθου,
2. Ανάπτυξη και πολλαπλασιασμός των οργανισμών εσωτερικά των σχισμών,
3. Διαβροχή και διαστολή των υγρών κυανοβακτηριών, τα οποία επιβάλλουν εσωτερικές τάσεις στα τοιχώματα του λίθου,
4. Διάλυση ανθρακικών αλάτων στην περιοχή γύρω από τα βακτηριακά κύτταρα  $[Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2]$ . Για κάθε μόριο  $CO_2$  που καταναλώνεται εξαιτίας της φωτοσύνθεσης των κυανοβακτηριών, διαλύεται ένα μόριο  $CaCO_3$  από την γειτονική περιοχή των κυττάρων.
5. Σταδιακή αύξηση των ρωγμών και συνέχιση των παραπάνω φαινομένων,
6. Διείσδυση σωματιδίων σκόνης και κόκκων σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς (pollen grains) στις ρωγμές,
7. Θάνατος μερικών βακτηριακών κυττάρων στις περιοχές με αυξημένη σκόνη, γεγονός που μπορεί να προκαλείται από αλλαγές των συνθηκών στη νανοκλίμακα,
8. Εγκατάσταση μυκήτων, ετερότροφων βακτηριών και εντόμων στις ασυνέχειες που έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της χημικής και μηχανικής διάβρωσης,
9. Αυξημένη άσκηση πίεσης στο λίθινο στρώμα επικάλυψης εξαιτίας όλων των προαναφερθέντων παραγόντων,
10. Αποκόλληση της επιφάνειας επικάλυψης.

### 1.2.4 Σεισμικότητα στην περιοχή της Ιερουσαλήμ

Η κοιλάδα του Ιορδάνη βρίσκεται στην περιοχή, όπου συνορεύουν η Αφρικανική με την Αραβική τεκτονική πλάκα. Για το λόγο αυτό είναι η περισσότερο σεισμικά ενεργή περιοχή της Μέσης Ανατολής, ενώ βρίσκεται πολύ κοντά στην Ιερουσαλήμ. Αυτός ο μετασχηματισμός έχει ιστορία 4000 χρόνων κατά τα οποία έχουν καταγραφεί καταστροφικοί σεισμοί. Ωστόσο οι ισχυροί σεισμοί δεν αποτελούν ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο στο Ισραήλ. (58), (56)



Εικόνα 1.13: Η σεισμικότητα από το ιστορικό σεισμών (αποδίδεται με κύκλους) και τα κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά (διακεκομμένες γραμμές). (Τα δεδομένα έχουν επανασχεδιαστεί από την Claudia Migowski και άλλους. (58), (59)

Στην περίπτωση του Ναού της Αναστάσεως έχουν καταγραφεί δομικές καταστροφές, οι οποίες προκλήθηκαν από σεισμούς. Έτσι αναφέρονται δύο σεισμοί το 774 – ο οποίος αμφισβητείται – και το 808 κατά τους οποίους υπέστη σημαντική φθορά η Ροτόντα. Μεταξύ του 1033 και 1034 παρατηρήθηκε πλήθος σεισμικών δονήσεων. Ύστερα από τις εργασίες αποκατάστασης των Σταυροφόρων οι δύο επάνω όροφοι του κωδωνοστασίου καταστράφηκαν εξαιτίας του σεισμού το 1545, ενώ κατέρρευσε ο τρούλος το 1546. Μετά το σεισμό του 1927 ( $M=6,2$ ) ο Ναός θεωρούταν πλέον ασφαλής, ενώ κάποια τμήματά του όπως η Ροτόντα υποστηρίζονταν με μεταλλικά κριώματα. Από τη σεισμική δόνηση του 1937 προκλήθηκε στο μνημείο φθορά μικρής έκτασης. (60)

### 1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της Ιερουσαλήμ

Στο Ισραήλ και ειδικότερα στην Ιερουσαλήμ η σύσταση του εδάφους παρουσιάζει έντονες διαφορές από περιοχή σε περιοχή. Τα πετρώματα είναι κυρίως ιζηματογενή και δημιουργήθηκαν από την επίκλυση<sup>1</sup> της Κρητιδικής θάλασσας από νοτιοδυτικά προς το μεγαλύτερο τμήμα της Μέσης Ανατολής. Η συνεχιζόμενη επίκλυση της θάλασσας πάνω στην υποθαλάσσιας κρηπίδα οδήγησε σε μία στρωματογραφία ανθρακικής σύστασης πετρωμάτων μεγάλου πάχους που φτάνει το ένα χιλιόμετρο στην περιοχή των Ιεροσολύμων και η οποία με τεκτονικές κινήσεις οδήγησε στη δημιουργία αντικλινών και συγκλινών δομών.

Η κατηγορία των πετρωμάτων χωρίζεται σε τρεις ομάδες:

1. Η Κατώτερη Κρητιδική ομάδα αποτελείται από κλαστικά πετρώματα (ψαμμίτης και κάποια ανθρακικά στρώματα) και εμφανίζεται κάτω από την επιφάνεια του πυρήνα των αντικλινών της Ιουδαίας και της Χεβρώνας και είναι ορατή μόνο στα βαθύτερα στρώματα ρεμάτων ή λεκανών.
2. Η υπερκείμενη Ανώτερη Κρητιδική Ιουδαϊκή ομάδα δημιουργεί τις αντικλινείς.
3. Η Ανώτερη Κρητιδική ομάδα στο όρος των Ελαιών (mount Scopus) (κιμωλία και συμπαγής πυριτόλιθος).

Τα πετρώματα των ομάδων της Ιουδαίας και του όρους των Ελαιών είναι τα βασικά της περιοχής των Ιεροσολύμων και αποτελούνται από ασβεστόλιθο, δολομίτη, μάργες και πυριτόλιθο. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν χωριστεί σε έξι γεωτεχνικές ενότητες.

Η ομάδα της Ιουδαίας από την εποχή του Κενομανίου έως το Τουρώνιο έχει πάχος 900 μέτρα στην περιοχή των Ιεροσολύμων. Η ομάδα αυτή υποδιαιρείται σε ένα χαμηλότερο στρώμα δολομίτη με λίγη ποσότητα ασβεστόλιθου και μάργας και ένα ανώτερο πιο συμπαγές στρώμα ασβεστόλιθου και δολομίτη με παρουσία κιμωλίας και μάργας. Ο σχηματισμός Moza από μάργες, άργιλο και λίγο ασβεστόλιθο χωρίζει το στρώμα αυτό. Ο υπερκείμενος σχηματισμός Amminadav αποτελείται από συμπαγή ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός Kefar Sha' ul περιλαμβάνει ασβεστόλιθο, κιμωλία και λίγη μάργα. Τα δύο υπερκείμενα στρώματα των σχηματισμών Weradim – που χαρακτηρίζεται από καρστικούς σχηματισμούς (σπήλαια) – και Bina αποτελούνται από μικριτικό υποκίτρινο και λευκό, κρυσταλλικό ασβεστόλιθο. Αυτά τα πετρώματα εξορύσσονται και σήμερα για δομική χρήση. Οι υπερκείμενοι

---

<sup>1</sup> Επίκλυση χαρακτηρίζεται η προέλαση της θάλασσας στη ηπειρωτική περιοχή. Αναγνωρίζεται από τον τρόπο ιζηματογένεσης, έχει τοπικό η ευρύτερο χαρακτήρα και οφείλεται γενικά σε τεκτονικές κινήσεις και κυρίως σε ανοδικές οι καθοδικές μεταβολές του στερεού φλοιού της γης ή ακόμα και σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Συνοδεύεται από σχηματισμό χαρακτηριστικού κροκαλοπαγούς επάνω στο οποίο αποτίθενται διαδοχικά νεότερα ιζήματα. Τα στρώματα που σχηματίζονται βρίσκονται σε γωνιακή συμφωνία με το υπόβαθρό τους.

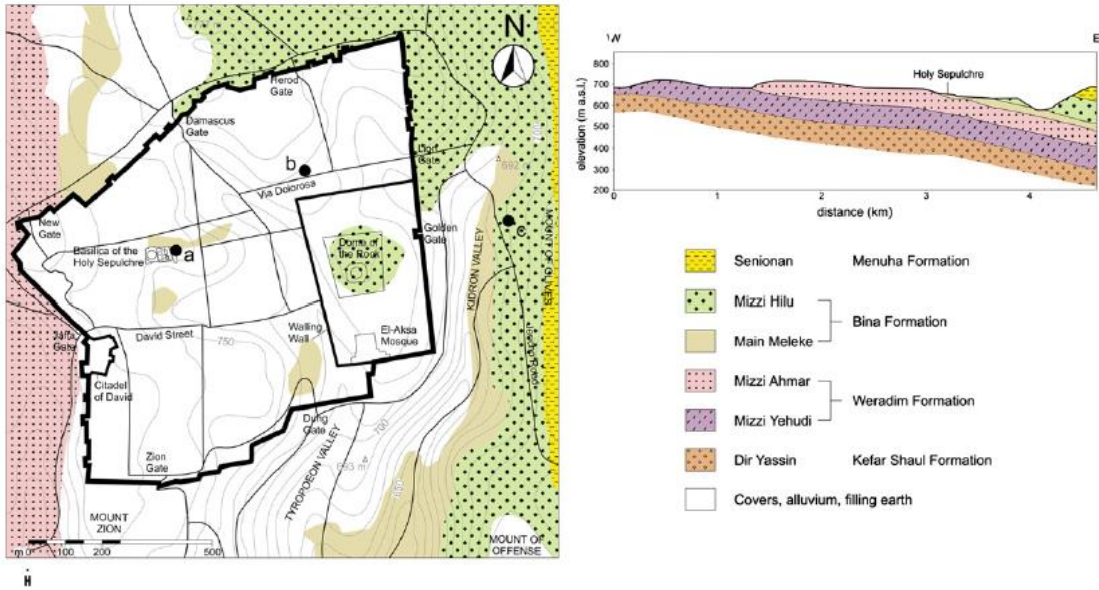
σχηματισμοί των ανώτερων στρωμάτων ανήκουν χρονολογικά στην ανώτερη Κρητιδική έως το Παλαιόκενο. Ο βασικός σχηματισμός είναι ο Menuha που αποτελείται από λευκή κιμωλία με άργιλο κατά τόπους. Ο υπερκείμενος σχηματισμός Mishash αποτελείται από καφέ κερατόλιθο και πυριτόλιθο. (58), (21), (56), (61)

Για την οικοδόμηση της Ιερουσαλήμ χρησιμοποιήθηκαν οι λίθοι από την περίοδο του Τουρωνίου του σχηματισμού Bina, που είναι σκληροί συμπαγείς ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Οι λίθοι του σχηματισμού Μελέκη, που βρίσκεται στο λατομείο του Γολγοθά, δεν είναι ιδιαίτερα συμπαγείς. (58), (56)

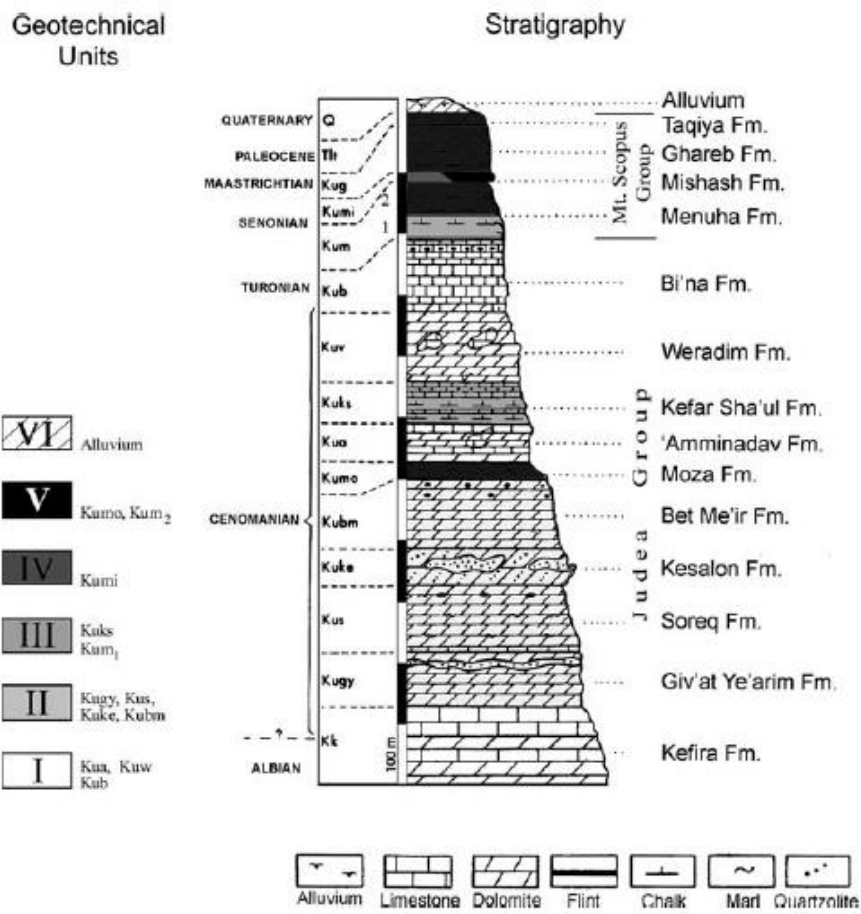
**Πίνακας 1.3:** Συνοπτικός πίνακας γεωλογικών σχηματισμών, γεωτεχνικών ενοτήτων και πετρωμάτων στην περιοχή της Ιερουσαλήμ (58), (61)

Ομάδα	Βαθμίδα	Ομάδα	Σχηματισμός	Λίθοι	Λιθολογία	
Κρητιδική	Σενωνίου	Όρος των Ελαιών	Menuha	Har Hatzofirm	Κιμωλία	
				Kakula		
	Τουρωνίου		Bina	Mizzi Hilu	Λιθογραφικός ασβεστόλιθος	
				Meleke	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος	
				Mizzi Ahmar	Δολομίτης	
	Κενομανίου	Όρος Ιουδαίας	Kefar Shaul	Weradim	Mizzi Yahudi	Δολομιτικός ασβεστόλιθος
				Dir Yassin	Κοκκινωπός, δολομιτικός ασβεστόλιθος	
	Κενομανίου			Kefar Shaul	Laminated Limestone	Ασβεστόλιθος με στρώσεις
					Argillaceous Limestone	Συμπαγής, κίτρινος, αργιλικός ασβεστόλιθος
					Amminadav	Δολομίτης
					Moza	Ασβεστόλιθος
					Bet Meir	Ασβεστόλιθος και δολομίτης





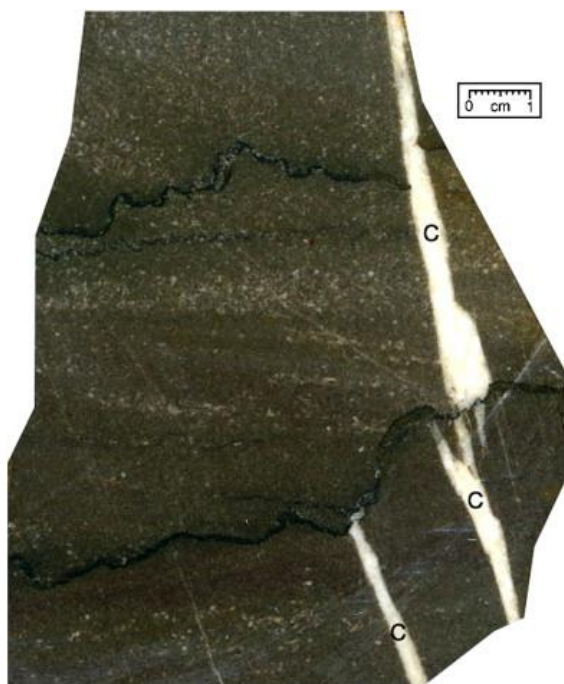
Εικόνα 1.14: Γεωλογικά στρώματα στην περιοχή γύρω από την Ιερουσαλήμ (Τροποποιημένα σχέδια του Θ. Μητρόπουλου), (58)



Εικόνα 1.15: Στρωματογραφική τομή γεωλογικών σχηματισμών και γεωτεχνικών ενοτήτων (61)

## Στυλόλιθοι

Οι στυλόλιθοι είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό για μερικούς ασβεστόλιθους του Ισραήλ. Με τον όρο στυλόλιθος χαρακτηρίζεται η λοβοειδής αιχμηρή γραμμή ραφής των στρωμάτων κάποιων ασβεστόλιθων. (62) Οι στυλόλιθοι εμφανίζονται ως πιο σκούρες κυματοειδής γραμμές ραφής, παράλληλες με τα στρώματα του λίθου που αποτελούνται από ένα λεπτό σχηματισμό με μορφή στήλης που βρίσκεται σχεδόν σε ορθή γωνία ως προς το στρώμα του λίθου. Οι στυλόλιθοι πιστεύεται ότι έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της διάλυσης του πετρώματος λόγω ενός συστήματος συμπίεσης κάθετο στην κύρια κατεύθυνση του λίθου. Σαν αποτέλεσμα το αδιάλυτο υλικό του ασβεστόλιθου συγκεντρώνεται κατά μήκος των επιπέδων. Μία ραφή μπορεί να είναι εμφανής σε λειασμένες πλάκες. Επίσης ακόμα και αν σφυρηλατηθεί ο λίθος, είναι πολύ πιθανό να σπάσει κατά μήκος των γραμμών αυτών, ενώ δε θα διαλυθεί. Δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες για τη φύση, τη συμπεριφορά και τη σύσταση των στυλόλιθων. Πιθανώς να είναι αργιλικά υλικά άγνωστης σύστασης, λειμονίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), γκαιτίτης ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) και αιματίτης. (21)

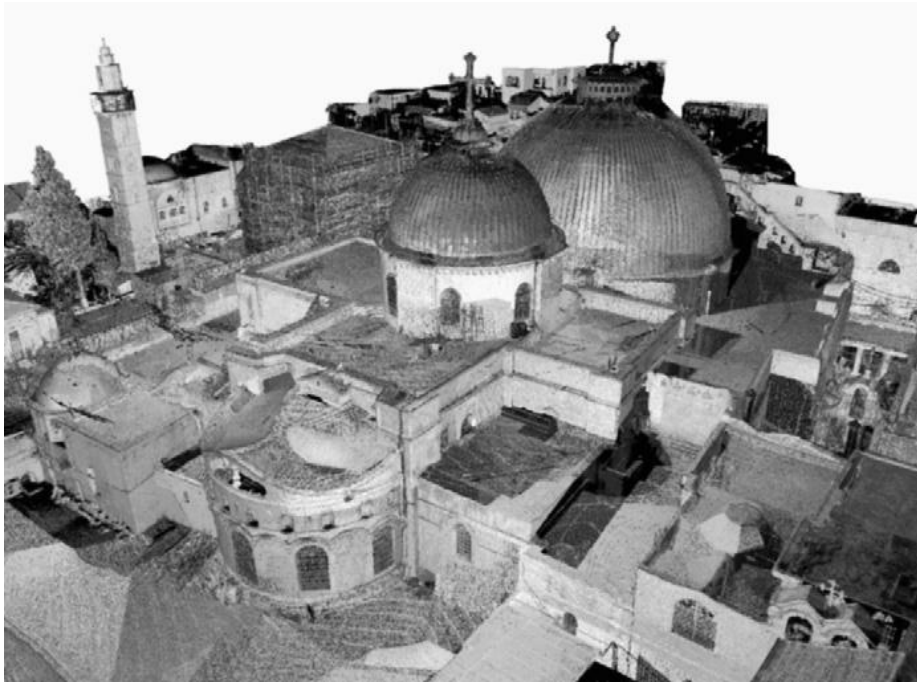


Εικόνα 1.16: Δύο μεγάλοι οριζόντιοι στυλόλιθοι που διασχίζονται από κανάλια ασβεστιτικής σύστασης (C) (63)

## 2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος

### 2.1 Ο Πανίερος ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα

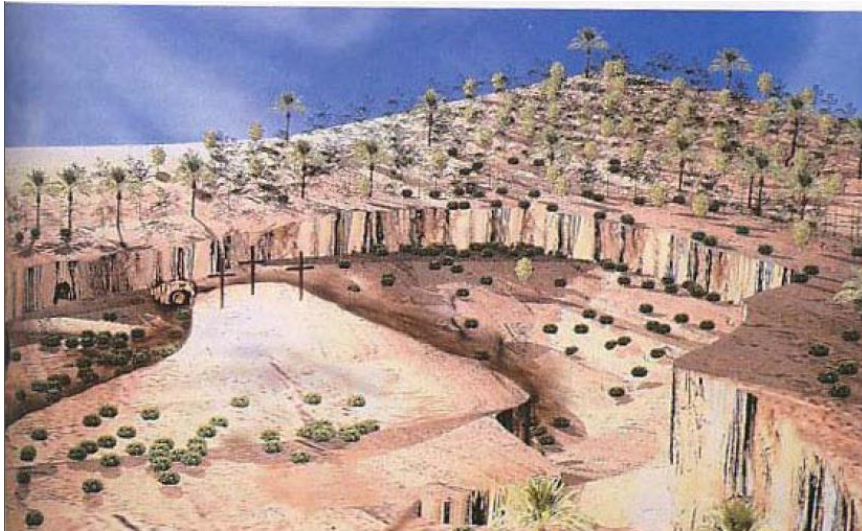
Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως στην πόλη των Ιεροσολύμων είναι ένας από τους σημαντικότερους ιστορικούς χώρους του Χριστιανισμού. Κάθε χρόνο τον επισκέπτονται χιλιάδες προσκυνητές για να προσευχηθούν στο μέρος που αναγνωρίζεται από τη παράδοση ως ο τόπος του θανάτου και της ανάστασης του Ιησού Χριστού. Αρχικά στην τοποθεσία του Ναού βρισκόταν ένα μεγάλο λατομείο στα περίχωρα της αρχαίας πόλης της Ιερουσαλήμ, ενώ στη συνέχεια μετατράπηκε σύμφωνα με τον Κορβο σε καλλιεργήσιμη έκταση και νεκροταφείο με ένα μεγάλο αριθμό ταφικών θαλάμων σκαλισμένων στα τοιχώματα του βράχου. Η κατασκευή του Ναού χρονολογείται το 325 μ.Χ., όταν ο Μέγας Κωνσταντίνος έδωσε εντολή για την ανέγερση της βασιλικής, ενσωματώνοντας τον τάφο και του Χριστού και το λόφο του Γολγοθά. (8<sup>ος</sup> αι. π.Χ. – 1<sup>ος</sup> αι. μ.Χ.) (58), (64), (21)



Εικόνα 2.1: Εξωτερικά ΒΑ όψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως και των παρακείμενων κτιρίων (Έργο του καθηγητή G. Tucci, Τμήμα Κατασκευών και Αποκατάστασης του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας) (58)

Ο Ναός βρίσκεται στην Παλαιά Πόλη των Ιεροσολύμων στη χριστιανική συνοικία. Καταλαμβάνει μία έκταση 12.000 m<sup>2</sup> και έχει ύψος περίπου 35 μέτρων. Το Ιερό Συγκρότημα περιλαμβάνει την κύρια μεγάλη ελληνική ορθόδοξη εκκλησία, το Καθολικό, τον Ιερό βράχο του Γολγοθά, τον Πανάγιο Τάφο και τον τόπο όπου ανακαλύφθηκε ο Τίμιος Σταυρός. Παρακείμενα από τα κύρια σημεία λατρείας βρίσκονται και πολλά μικρά παρεκκλήσια, κελιά μοναχών, αποθηκευτικοί χώροι,

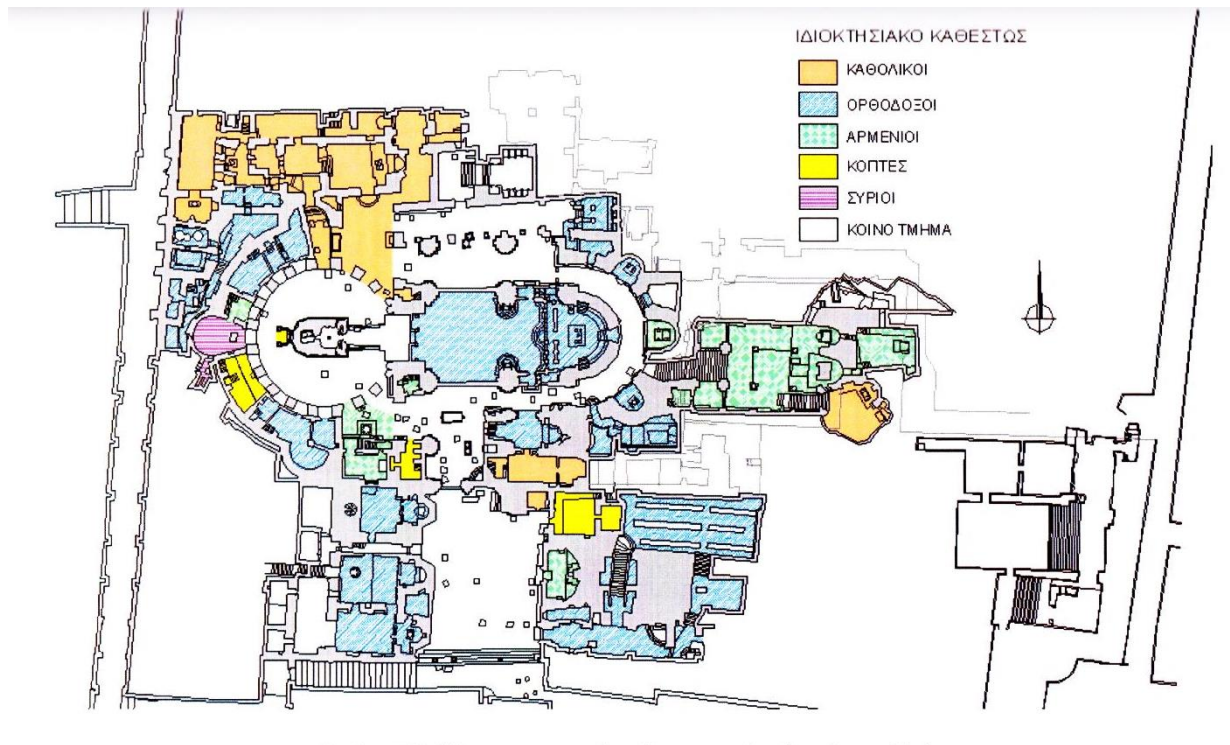
διάδρομοι και σκάλες. Στο σημερινό Ιερό συγκρότημα απεικονίζεται η συνύπαρξη πολλών θρησκευτικών κοινοτήτων, οι οποίες στο πέρασμα των αιώνων άφησαν το στίγμα τους. (65), (56)



**Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση του Γολγοθά και του λόφου Γαρήβ με το λατομείο - κήπο ενδιάμεσα (Γ.Π. Λάββας / Μ. Λεφαντζής) (66)**

Το κυρίως κτήριο συνορεύει με το Ελληνορθόδοξο Πατριαρχείο, το Πατριαρχείο της Συρίας, το Ρωμαιοκαθολικό Μοναστήρι, και το Μοναστήρι της Αιθιοπίας. Εντός του Ναού βρίσκονται και έχουν ενεργό ρόλο όλες οι Χριστιανικές Κοινότητες. Ελληνορθόδοξοι, Ρωμαιοκαθολικοί, Αρμένιοι και Κόπτες ιερείς συνυπάρχουν στον Ναό, ενώ το μνημείο είναι διαιρεμένο σε τμήματα, το καθένα από τα οποία ανήκει σε κάποια Κοινότητα. Φυσικά υπάρχουν και κοινά τμήματα. Αυτή ιδιαίτερη κατάσταση αποτελεί το status quo του Ιερού Ναού της Αναστάσεως και οι ρίζες του βρίσκονται στην ιστορική παράδοση. (65)





Εικόνα 2.3: Η κάτοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως με το ισχύον ιδιοκτησιακό καθεστώς (67)

### 2.1.1 Ιστορική αναδρομή και οικοδομικές φάσεις

Οι διάφορες φάσεις της οικοδομικής δραστηριότητας στην περιοχή αυτή είναι επαρκώς γνωστές στην επιστημονική έρευνα.

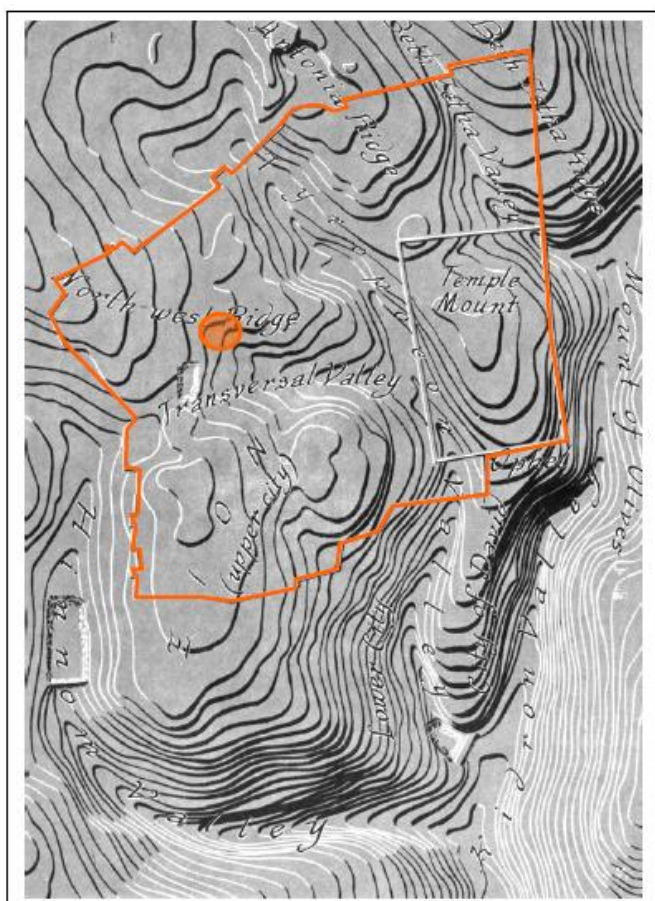
#### Η Αδριάνεια Οικοδομική Φάση (135 μ.Χ.)

Η πρώτη χρονολογείται το 135 μ.Χ., όταν ο αυτοκράτορας Αδριανός ξανάχτισε την Ιερουσαλήμ, που είχε καταστραφεί το 70 μ.Χ. από τον Τίτο, με νέο ρωμαϊκού τύπου σχέδιο και της έδωσε το όνομα Αιλία Καπιτωλίνα. Στο πλαίσιο της αδριάνειας ανοικοδόμησης το όρυγμα του λατομείου επιχωματώθηκε με φερτά υλικά, και ο Τάφος και ο Γολγοθάς καλύφθηκαν. Στο τεχνητό επίπεδο που προέκυψε αναγέρθηκε ο ειδωλολατρικός ναός της Αφροδίτης, ώστε να αποστερηθούν από τους χριστιανούς τα ερείσματα της μνήμης τους για τα γεγονότα του Θείου Πάθους. (68), (69)

#### Η Κωνσταντίνεια Οικοδομική Φάση (4<sup>ος</sup> αι. μ.Χ.)

Ωστόσο στη συλλογική μνήμη των χριστιανών διασώθηκε το ακριβές σημείο όπου έλαβε χώρα το Θείο δράμα, όπως αποδεικνύει η απόφαση του Μεγάλου Κωνσταντίνου να ανεγερθεί ο Ναός του Πανάγιου Τάφου εκεί που παλαιότερα βρισκόταν ο ειδωλολατρικός ναός της Αφροδίτης. Έτσι με εντολή του αυτοκράτορα το 326 μ.Χ., ο επίσκοπος Μακάριος προχωρά στην κατεδάφιση των παλαιότερων οικοδομικών κτισμάτων και την αναδιαμόρφωση του χώρου γύρω από τον Πανάγιο

Τάφο, με βάση τα σχέδια των διασημότερων αρχιτεκτόνων της εποχής, του Ζηνοβίου και του Ευσταθίου, τα οποία προέβλεπαν την ανέγερση της Ροτόντας και της πεντάκλιτης βασιλικής. Για την υλοποίηση του σχεδίου ο Μέγας Κωνσταντίνος εξασφάλισε μεγάλα χρηματικά ποσά, ακριβά οικοδομικά υλικά και τη συνδρομή άξιων καλλιτεχνών. Είναι επομένως το πρώτο κτίσμα της χριστιανοσύνης με αξιώσεις κορυφαίου αρχιτεκτονικού μνημείου προς δοξολογία του νέου Θεού. (68), (56), (69)

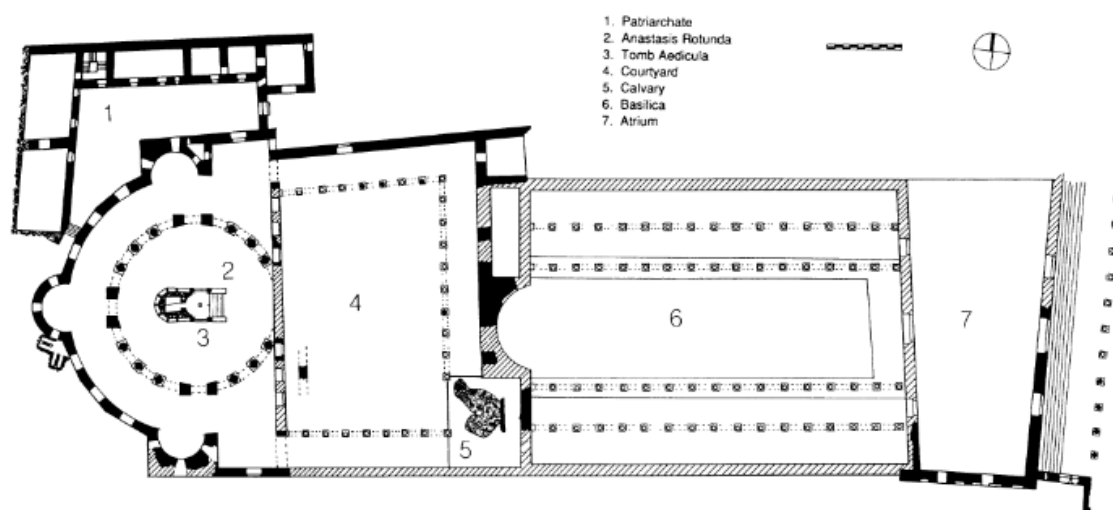


Εικόνα 2.4: Παλαιά πόλη της Ιερουσαλήμ και η θέση του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως (21)

Από την οργάνωση των τοίχων και των αξόνων του όλου κτιριακού συγκροτήματος, όπως αυτή έχει αποτυπωθεί από διάφορες αναπαραστάσεις, προκύπτει ότι η οικοδομική φάση του 4<sup>ου</sup> αι. μπορεί να χωριστεί σε δύο υποπεριόδους. Η πρώτη περιλαμβάνει την οικοδόμηση της βασιλικής, του ανατολικού αιθρίου και της μνημειακής εισόδου, ενώ η δεύτερη την προσθήκη της Ροτόντας και του εσωτερικού αιθρίου. Αν το συγκρότημα είχε σχεδιαστεί από την αρχή ως ενιαίο σύνολο, τότε τα μέρη του μνημείου θα είχαν συναρθρωθεί διαφορετικά. Όπως φαίνεται λοιπόν, κατά την κωνσταντίνηα οικοδομική φάση δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο σημείο που βρέθηκε ο Τίμιος Σταυρός. Αυτό θα μπορούσε ίσως να εξηγηθεί από τα αισθήματα ευγνωμοσύνης που πρέπει να ένιωθε ο Μέγας Κωνσταντίνος για τις νίκες του εναντίον του Μαξεντίου (312 μ.Χ.) και του Λικινίου

(324 μ.Χ.), τις οποίες απέδιδε στη χρήση του σταυρού ως εμβλήματός του. Αν δε συνέβαινε κάτι τέτοιο, το συγκρότημα θα είχε οργανωθεί αρχιτεκτονικά έτσι που να αναδεικνύει το Γολγοθά και τον Πανάγιο Τάφο, όπου και έλαβε χώρα το Θείο Δράμα.

Σύμφωνα με ιστορικές πηγές κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Μεγάλου Κωνσταντίνου το Ιερό Συγκρότημα δεν είχε αποκτήσει ακόμα το κέλυφος της Ροτόντας με το μεγάλο τρούλο. Είναι πιθανό η προσθήκη της Ροτόντας να πραγματοποιήθηκε τα τελευταία χρόνια της βασιλείας του αυτοκράτορα Κωνσταντίνου Β' (337 – 361 μ.Χ.). Η βασιλικά εγκαινιάστηκε το Σεπτέμβριο του 335 μ.Χ., ίσως την ημέρα που εορτάζεται η Ύψωση του Τιμίου Σταυρού (14 Σεπτεμβρίου), μία ακόμη ένδειξη για τη σχέση του κωνσταντίνειου σταυρικού συμβολισμού με το Ναό του Πανάγου Τάφου. (68)



Εικόνα 2.5: Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως κατά την κωνσταντίνεια περίοδο (Σχέδιο V. Corbo με τροποποιήσεις του Robert Ousterhout ) (70)

### Η Οικοδομική Φάση του 7<sup>ου</sup> Αιώνα

Η απουσία οποιασδήποτε αναφοράς σχετικά με την ύπαρξη κάποιου κτίσματος στο Γολγοθά και η επιτόπια, ανασκαφική κυρίως, έρευνα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο Ιερός Βράχος διαμορφώθηκε αρχιτεκτονικά για πρώτη φορά κατά την οικοδομική φάση του 7<sup>ου</sup> αι., μετά την επιδρομή των Περσών. (68)

Οι Πέρσες με το βασιλιά Χοσρόη Β' εισέβαλαν το Μάιο του 614 στην Παλαιστίνη και αφού κατέστρεψαν το Ναό του Πανάγιου Τάφου άρπαξαν τον Τίμιο Σταυρό και τον μετέφεραν στην Περσία. Το 617 ο ηγούμενος και μετέπειτα πατριάρχης Μόδεστος

ξεκίνησε εργασίες για την αναστήλωση των Αγίων Τόπων. (64) Το 629 ανέκτησε τον Τίμιο Σταυρό και τον επέστρεψε στο Ναό, έχει αναστηλωθεί. Ο ανακαινισμένος Ναός διατήρησε τα βασικά χαρακτηριστικά του κωνσταντίνειου κτίσματος. (68), (69), (71)

### Η Επισκευή του Τρούλου το 813 επί Χαλιφείας του Αλ-Μαμούν

Το 637 ο χαλίφης Ομάρ έγινε κύριος της Ιερουσαλήμ. Μετά από συνεννοήσεις με τον πατριάρχη Σωφρόνιο, εξέδωσε διάταγμα με το οποίο εξασφάλισε την κυριαρχία των Ρωμαίων επί των Αγίων Τόπων, ρύθμιζε τις υποχρεώσεις και τα δικαιώματα των χριστιανών και εγγυόταν την ασφάλεια τόσο των κατοίκων όσο και των προσκυνητών των Αγίων Τόπων και των προσκυνημάτων.

Το 813 μ.Χ. επί χαλιφείας του αλ-Μαμούν, ο πατριάρχης Ιεροσολύμων Θωμάς ξεκίνησε εργασίες επισκευής του τρούλου. Η αναγκαία ξυλεία μεταφέρθηκε από την Κύπρο και οι εργασίες ολοκληρώθηκαν το 814. Στο μέσο του τρούλου ο πατριάρχης ανέγειρε άλλο μικρό τρουλίσκο ύψους ανθρώπινης μορφής περίπου ώστε να εμποδίσει την εισροή των όμβριων υδάτων. (56)

### Η Καταστροφή και Ανοικοδόμηση του 11<sup>ου</sup> Αιώνα

Κατά τη διάρκεια του 10<sup>ου</sup> αι. η πολιτική κατάσταση στην Παλαιστίνη γινόταν όλο και πιο δύσκολη για τους χριστιανούς και ο Ναός της Αναστάσεως δεχόταν συχνά επιθέσεις. Με την ανάληψη της εξουσίας στην Αίγυπτο και την Παλαιστίνη από τη δυναστεία των Φατιμιδών το 969 τα πράγματα έγιναν ακόμα χειρότερα. (68) Εκείνη τη χρονιά εξαγριωμένο πλήθος μωαμεθανών εισέβαλε στο Ναό της Αναστάσεως και τον σύλησε, ως αντίποινα για την κατάληψη της Αντιόχειας από το στρατό του Νικηφόρου Β΄ Φωκά. (56)

Το 995 ανήλθε στο θρόνο της Αιγύπτου ο χαλίφης αλ-Χακίμ, ο οποίος το 1008 απαγόρευσε την τελετή της θριαμβευτικής εισόδου την ημέρα της Κυριακής των Βαΐων και τον επόμενο χρόνο διέταξε να ισοπεδώσουν το Ιερό συγκρότημα. Αυτή ήταν και η πρώτη σχεδόν καθολική καταστροφή του μνημείου στη μέχρι τότε ιστορία του, η οποία ωστόσο δε σήμαινε και την ολοκληρωτική εξαφάνισή του, αφού τα ερείπια εξακολούθησαν να είναι ορατά. Σχετικά σύντομα επιτράπηκαν και πάλι οι τελετές, καθώς και μία περιορισμένη αναστήλωση του Ναού, ιδιαίτερα του Πανάγιου Τάφου. (68), (56), (69)

Γύρω στο 1020 ρυθμίστηκαν οι σχέσεις χριστιανών και μουσουλμάνων σε επισημότερο επίπεδο, μεταξύ χαλίφη και πατριάρχη και άρχισε η ανακατασκευή του Ιερού Συγκροτήματος που θα καταλάμβανε πλέον μικρότερη έκταση. Οι εργασίες ανακατασκευής φαίνεται ότι άρχισαν πολύ νωρίς, ήδη από το 1012, χάρη στην οικονομική και άλλου είδους υποστήριξη των Βυζαντινών αυτοκρατόρων. Ο νέος Ναός ολοκληρώθηκε το 1048. (64), (68)



## Η Οικοδομική Φάση του 12<sup>ου</sup> Αιώνα

Στις 15 Ιουλίου 1099 τα Ιεροσόλυμα περιήλθαν στα χέρια των Σταυροφόρων. (69) Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν συνοπτικά και οι πολιτικές εξελίξεις του 11<sup>ου</sup> αιώνα. Το 1054 πραγματοποιήθηκε το οριστικό Σχίσμα μεταξύ ορθόδοξων και καθολικών και οι Νορμανδοί με την υποστήριξη του Πάπα κατέλαβαν τη Νότια Ιταλία και τη Σικελία βάζοντας έτσι τέρμα στη βυζαντινή κυριαρχία στη Δύση. Στην Ανατολή οι Σελτζούκοι Τούρκοι κατακτώντας σταδιακά ολόκληρη τη Μικρά Ασία προκάλεσαν ένα ακόμα σημαντικό πλήγμα στη Βυζαντινή Αυτοκρατορία. Εν μέσω αυτών των πολιτικών εξελίξεων γεννιέται στη Δύση το κίνημα της peregrinatio, του προσκυνήματος δηλαδή στους Αγίους Τόπους, που μόνο ως πολεμική επιχείρηση μπορούσε να πραγματοποιηθεί, καθώς η Παλαιστίνη είχε καταληφθεί για πολλούς αιώνες από αλλόθρησκους. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσονται και οι εκστρατείες των Σταυροφόρων, των οπλισμένων προσκυνητών. Για την έναρξη της Α΄ Σταυροφορίας δόθηκε έναυσμα από τον Πάπα Ουρβανό Β΄ στη Σύνοδο του Clermont το 1095. (68), (72)

Μετά την κατάληψη της Ιερουσαλήμ από τους Σταυροφόρους ο Ναός του Πανάγιου Τάφου θα ανακαινιστεί για ακόμα μία φορά και θα μεταμορφωθεί αρχιτεκτονικά σε ένα μίγμα βυζαντινής, ρομανικής και γοθτικής τεχνοτροπίας. Ουσιαστικά ύστερα από τις εργασίες αυτές απέκτησε το μνημείο την αρχιτεκτονική ετερομέρεια που παρουσιάζει έως και σήμερα, καθώς ο νέος Ναός προέκυψε από προσθήκες στο προϋπάρχον οικοδόμημα, οι οποίες ενώ διατήρησαν την υφιστάμενη δομή, νόθευσαν το βυζαντινό χαρακτήρα στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του μνημείου. Την εποχή εκείνη κατασκευάστηκε στη βορειοδυτική γωνία της Αγίας Αυλής και ο πύργος του κωδωνοστασίου, το οποίο όμως έχασε τη στέψη και τους δύο επάνω ορόφους κατά το σεισμό του 1545. (64), (68)

## Η Πυρκαγιά του 1808 και η Οικοδομική Φάση του 19<sup>ου</sup> αιώνα

Το 1808 ο Ναός της Αναστάσεως υπέστη σημαντικές φθορές εξαιτίας μίας μεγάλης πυρκαγιάς. Τότε καταστράφηκαν σημαντικά τμήματα του Ιερού Συγκροτήματος, όπως η Ροτόντα, το Άγιο Κουβούκλιο, η κόγχη του Καθολικού, το Παρεκκλήσιο του Γολγοθά, η Αποκαθήλωση κ.α. (68), (69) Ο πατριάρχης Ιεροσολύμων Πολύκαρπος με τη συνδρομή του οικουμενικού πατριάρχη Καλλίνικου, ανέλαβε τον αγώνα για την ανέγερση του νέου οικοδομήματος. Μετά την έκδοση της σχετικής άδειας από το σουλτάνο προσήλθε ο βασιλικός αρχιτέκτονας Ν. Κομνηνός από τη Μυτιλήνη και ανέλαβε τις εργασίες, που ξεκίνησαν την άνοιξη του 1809. Παρά τις δυσκολίες που προέβλεπαν οι ετερόδοξοι και αλλόθρησκοι ο Ναός ανακαινίσθηκε και οι εργασίες περατώθηκαν. Τα εγκαίνια πραγματοποιήθηκαν στις 13 Σεπτεμβρίου του 1810. (56)

## Οι Εργασίες Αναστήλωσης τα Επόμενα Χρόνια

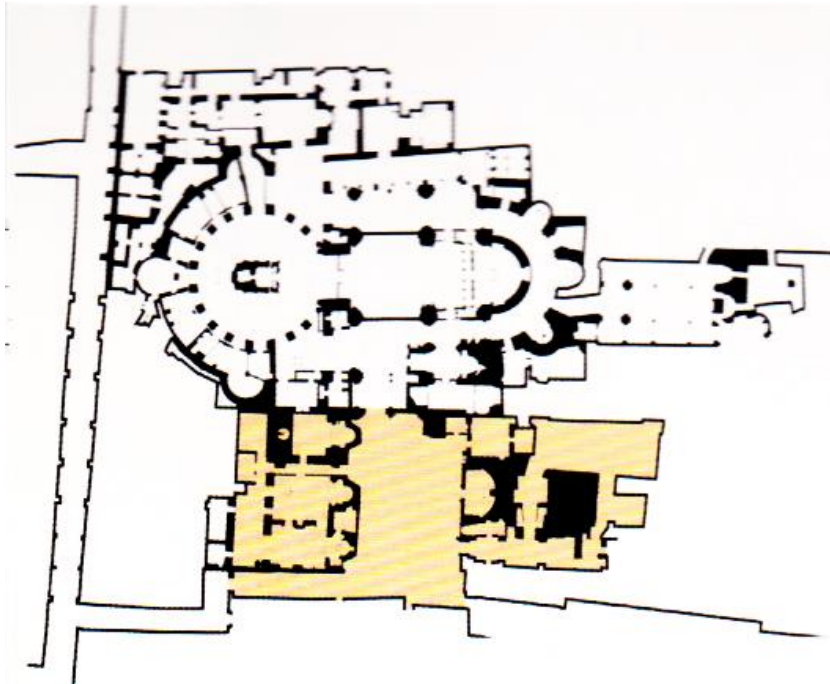
Εκτεταμένες ζημιές προκλήθηκαν στο οικοδόμημα από τους σεισμούς του 1832 και 1837. Νέες επισκευές ξεκίνησαν το 1841, 1867, καθώς και μετά το σεισμό του 1927, το 1935 όταν η Παλαιστίνη βρισκόταν υπό Βρετανική Αρμοστεία (1917 – 1945). Σημαντικός σταθμός στην ιστορία του μνημείου είναι η ίδρυση του τεχνικού γραφείου του Πατριαρχείου Ιεροσολύμων. Εκτεταμένες αναστηλωτικές εργασίες έγιναν το διάστημα 1960 – 1980, κατά τις οποίες διατηρήθηκαν ελάχιστα στοιχεία από την οικοδομική φάση του 1808 – 1810 και για τις οποίες δεν υπάρχουν δημοσιευμένα επαρκή στοιχεία. (68), (56)

### 2.1.2 Η πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως

Η σημαντικότερη αρχιτεκτονική πρόσοψη του Ναού είναι η νότια, που ανήκει στην οικοδομική φάση της εποχής των Σταυροφόρων (12<sup>ος</sup> αι.), όπως δείχνουν και τα χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικά μοτίβα ρομανογοθτικής τεχνοτροπίας. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της προέρχονται από τη γύρω περιοχή, ενώ και οι τεχνίτες θα πρέπει να ήταν ντόπιοι. Και οι δύο πυλώνες της εισόδου επιστρέφονται με γοθικά τόξα, μοτίβο που επαναλαμβάνεται αξονικά στο ανώτερο τμήμα της μνημειακής πρόσοψης με δύο παρόμοια διαμορφωμένα μεγάλα ανοίγματα, που φέρουν πλούσια, μερικώς κατεστραμμένη και αλλοιωμένη σήμερα γλυπτή διακόσμηση. (73) Η ζωφόρος με το πεπλατυσμένο σχέδιο ροζέτας γύρω από της αφίδες στο χαμηλότερο επίπεδο ενδεχομένως να είναι προϊόν επιρροής από τη Συρία, άλλα σημεία της όψης φανερώνουν τις ισλαμικές επιρροές, ενώ οι ζωφόροι στα παράθυρα με σχήμα αμπέλου βασίζονται σε δυτικοευρωπαϊκά πρότυπα. (67) Μεγάλες φθορές έχουν υποστεί και τα θαυμάσια γλυπτά που κοσμούσαν άλλοτε τα τύμπανα των δύο θυρών και σήμερα φυλάσσονται στο Μουσείο Ροκφέλερ (Rockefeller Museum, Jerusalem). Από τον υπόλοιπο διάκοσμο, ό,τι σώζεται παραμένει στη θέση του, εκτεθειμένο στην καταστροφική επίδραση των δυσμενών καιρικών συνθηκών, αλλά και των εξίσου επιβλαβών ραμφισμάτων των περιστεριών. Ο γλυπτός διάκοσμος στο σύνολό του αποτελεί τεκμήριο της γόνιμης καλλιτεχνικής συνεργασίας των Βυζαντινών καλλιτεχνών και μαστόρων με τους Σταυροφόρους. Η νότια πρόσοψη, οι δύο τρούλοι του Ναού, της Ροτόντας και του Καθολικού των Ελλήνων, και το κωδωνοστάσιο συναποτελούν μία αρχιτεκτονική σύνθεση μνημειακού χαρακτήρα. (73)

Στη νότια όψη παρατηρείται υποχώρηση του τοίχου στη δεξιά από τις δίδυμες πύλες. Τη νότια όψη τη συγκρίνουν με τη Χρυσή Πύλη της Ιερουσαλήμ, αν και στις αναλογίες ταιριάζει στη νότια πτέρυγα του Santiago de Compostela. Υπάρχουν όμως διαφορές στο γλυπτό διάκοσμο, καθώς στο Ναό της Αναστάσεως συναντάμε spolia

(επαναχρησιμοποιημένα κομμάτια). Οι κολώνες στις παραστάδες έχουν σρολία από τουλάχιστον τέσσερα διαφορετικά είδη μαρμάρου. Συναντάμε στον ίδιο τοίχο και τα crypto-srolia όσον αφορά στην επαναχρησιμοποίηση υλικού. (67)



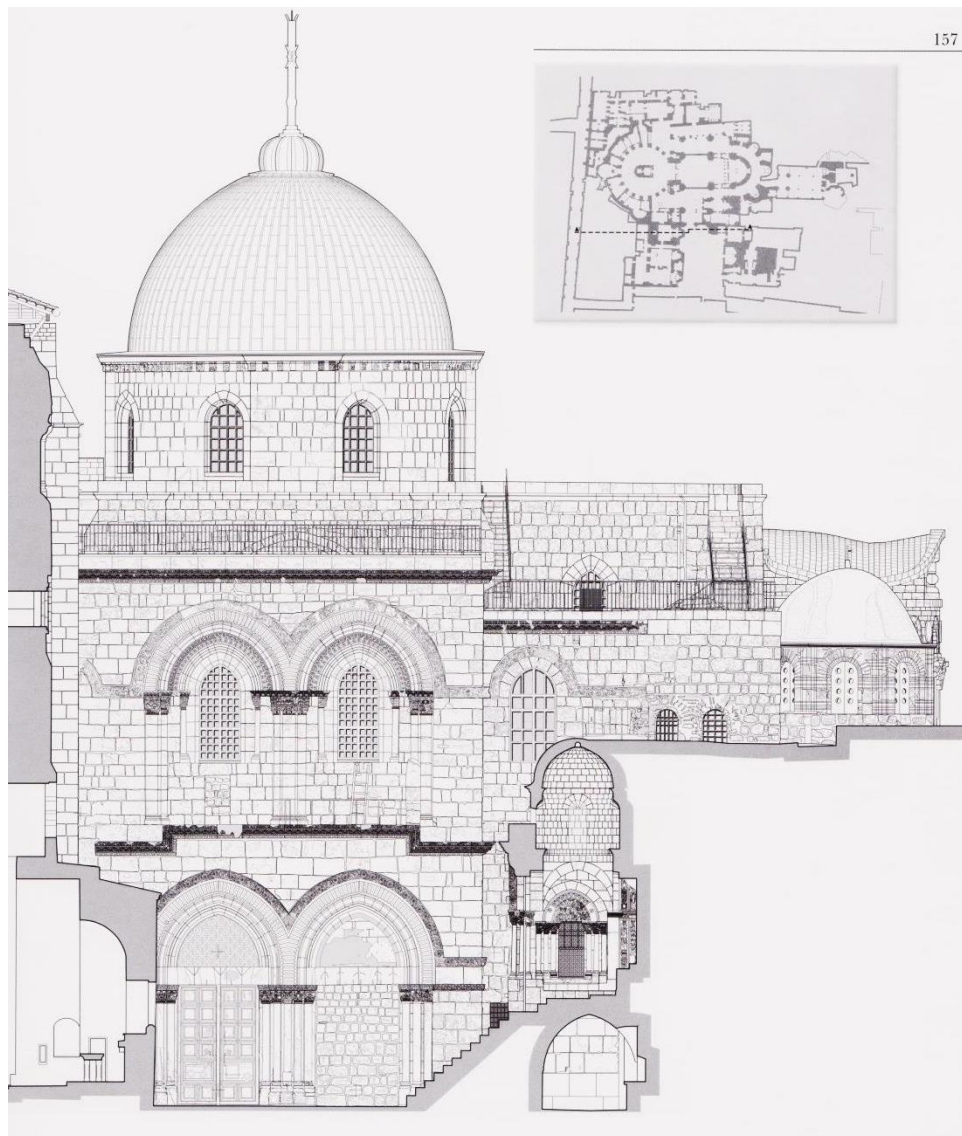
Εικόνα 2.6: Κάτοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως. Στην σκιαγραφημένη περιοχή βρίσκονται η δυτική και ανατολική πύλη, η Αγία Αυλή και η νότια πρόσοψη (73)



**Εικόνα 2.7: Νότια όψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως**

Για την είσοδο στο Ναό χρησιμοποιείται σήμερα η μία μόνο από τις άλλοτε δίδυμες θύρες της πρόσοψης, η αριστερή, η λεγόμενη Αγία Πόρτα, καθώς η δεξιά αποκλείστηκε το 1246 με διαταγή του Σαλαδίνου. Τις δύο θύρες πλαισιώνουν έντεκα συνολικά κορινθιακοί κίονες, κατασκευασμένοι από λευκό και πράσινο μάρμαρο. Άξια μνείας είναι η σχισμή σε ένα από αυτούς, αριστερά της σημερινής εισόδου, η οποία σύμφωνα με τη –διπλή, αρμένικη και ελληνορθόδοξη– παράδοση, έγινε για να εξέλθει το Άγιο Φως. Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα ανώφλια των δύο εισόδων έφεραν πλούσιο διάκοσμο. Την αριστερή κοσμούσαν γλυπτές παραστάσεις (Εγερσης του Λάζαρου, Βαϊοφόρος, Ιερός Νιπτήρ και Μυστικός Δείπνος) και τη δεξιά, μία ψηφιδωτή εικόνα της Θεοτόκου εντός πλαισίου με γλυπτά εμβλήματα, η οποία σωζόταν μέχρι και το 1801. (73)





Εικόνα 2.8: Η νότια πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως (74)

Τα θυρόφυλλα της σημερινής εισόδου είναι ξύλινα με μεταλλική ενίσχυση, ενώ η εσωτερική πλευρά τους έχει επενδυθεί με ξύλο καρυδιάς. (73) Οι διαστάσεις της είναι 2,98x4,33 m και έχει πάχος 18 cm. Δέκα τετράγωνα φατνώματα 0,58x0,58 m κοσμούν κάθε φύλλο της πόρτας σχηματίζοντας έξι σειρές εκ των οποίων η πέμπτη έχει ένα ολόσωμο ορθογώνιο φάτνωμα που ανοίγει από την εσωτερική πλευρά της πόρτας. Ο λόγος της ύπαρξης του και στα δύο φύλλα ήταν το άνοιγμα και το κλείσιμο της πόρτας του Ναού που ήταν κάτι σαν τελετουργία. (67) Η θύρα φέρει επίσης δύο ρόπτρα κατασκευασμένα από σίδηρο. Το προνόμιο της φύλαξης των κλειδιών της εισόδου ανήκει από τη μουσουλμανική περίοδο σε μωαμεθανούς θυρωρούς, οι οποίοι όμως υπακούουν στις εντολές των αρχηγών των εκκλησιαστικών κοινοτήτων, που έχουν δικαιώματα στο μνημείο. (73)



**Εικόνα 2.9:** Ξυλογραφία από το 1483 που απεικονίζει την Αγία Αυλή και την είσοδο του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως όπως διαμορφώθηκαν από τους Σταυροφόρους (73)



**Εικόνα 2.10:** Η είσοδος του Ναού

Πάνω από την κύρια είσοδο, σε ένα περβάζι είναι τοποθετημένη σκάλα ήδη από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα που χρησίμευε για τη μεταφορά τροφής στους Αρμένιους μοναχούς που ήταν κλειδωμένοι μέσα στο Ναό. (67)

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

## 3. Πειραματικό Μέρος

### 3.1 Παρουσίαση επιφανειών ελέγχου και θέσεων δειγματοληψίας – Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Η επιφάνεια που μελετήθηκε είναι η νότια όψη (πρόσοψη) του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Όπως αναφέρθηκε και στο Θεωρητικό μέρος η νότια όψη, όπου αποτελεί σήμερα τη μοναδική είσοδο στο Ναό, ανήκει σε όλες τις θρησκευτικές κοινότητες. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατή η δειγματοληψία στην επιφάνεια αυτή. Ωστόσο υπήρχε η δυνατότητα να ληφθούν δείγματα από την ανατολική όψη της πρόσοψης, η οποία είναι και αντιπροσωπευτική της φθοράς. Επομένως, μελετήθηκαν η νότια και ανατολική όψη της πρόσοψης μακροσκοπικά και με Θερμογραφία Υπερύθρου, ώστε να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά είδη φθοράς. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επί τόπου έλεγχος στο γείσο της ανατολικής όψης με Μικροσκοπία Οπτικών Ινών και ακολούθησε η δειγματοληψία από αντιπροσωπευτικές περιοχές.

Οι μετρήσεις και η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκαν στις 27 Ιανουαρίου 2011 στο ανάγλυφο γείσο της ανατολικής όψης που αποτελεί συνέχεια της πρόσοψης του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως. Στις εικόνες που ακολουθούν τεκμηριώνεται το ακριβές σημείο της δειγματοληψίας. Τα δείγματα που ελήφθησαν είναι αντιπροσωπευτικά της διάβρωσης στην επιφάνεια που εξετάζεται και προέρχονται από περιοχές μαύρης κρούστας, αποπλυμένης επιφάνεια, επιφάνειας πορτοκαλί χρωματισμού και βιολογικής διάβρωσης.

Οι μετρήσεις με Θερμογραφία Υπερύθρου έλαβαν χώρα στις 27 και 28 Ιανουαρίου 2011. Η μέση θερμοκρασία την πρώτη ημέρα ήταν 18°C και η σχετική υγρασία 57%. Στις 28 Ιανουαρίου η μέση θερμοκρασία ήταν 16°C και η σχετική υγρασία 70%. (75)





**Εικόνα 3.1:** Η πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως (νότια όψη). Το βέλος υποδεικνύει την επιφάνεια δειγματοληψίας.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η νότια όψη του Ναού, όπου το βέλος υποδεικνύει τη θέση δειγματοληψίας. Όπως παρατηρείται από την Εικόνα είναι εμφανείς διάφοροι τύποι φθοράς ακόμα και μακροσκοπικά. Έτσι εντοπίζονται λίθοι με ανοιχτόχρωμη καστανή απόχρωση, άλλοι πορτοκαλί χρωματισμού, λευκοί λίθοι καθώς και αρκετοί με φαιόμαυρη ή σκούρα καστανή χροιά. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι οι φαιόμαυροι λίθοι συναντώνται τις περισσότερες φορές σε περιοχές προστατευμένες από το βρόχινο νερό. Επίσης διακρίνονται και λευκοί σχηματισμοί που έχουν προκύψει από τη ροή του νερού στην επιφάνεια. Όσον αφορά στη μορφολογία τους εμφανίζονται λίθοι που παρουσιάζουν αποφλοιώση και άλλοι με απώλεια υλικού.

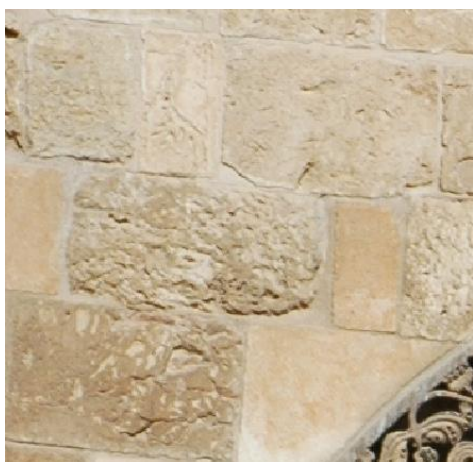
Στο ανώτερο τμήμα της μνημειακής πρόσοψης παρατηρούνται δύο τόξα με κατεστραμμένο γοθικό διάκοσμο στις ζωφόρους. Κάτω από το αριστερό παράθυρο της πρόσοψης παρουσιάζεται προσθήκη διαφορετικών λίθων. Στο περβάζι κάτω



από τα παράθυρα είναι επίσης εμφανή τα επιβλαβή προϊόντα από τη μεταβολική δράση των πτηνών.



**Εικόνα 3.2:** Φαιόμαυρες περιοχές σε επιφάνεια που προστατεύεται από το βρόχινο νερό



**Εικόνα 3.3:** Διαφορετικοί χρωματισμοί και υφές στους λίθος της νότιας όψης.



**Εικόνα 3.4:** Διαφορετικοί τύποι φθοράς στην τοιχοποιία γύρω από τα παράθυρα της νότιας όψης



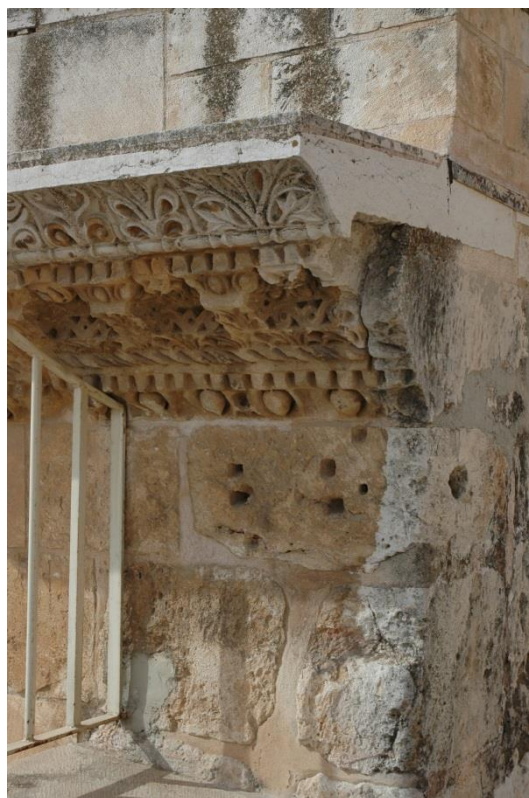
**Εικόνα 3.5:** Λευκοί σχηματισμοί στην τοιχοποιία που έχουν προκληθεί από τη ροή του νερού



**Εικόνα 3.6:** Προσθήκη λίθων στην τοιχοποιία της νότιας όψης

Στην τοιχοποιία που σφραγίζει τη δεξιά πύλη εμφανίζονται λίθοι διαφορετικού χρωματισμού και υφής. Ιδιαίτερα στο κατώτερο μέρος της τοιχοποιίας παρουσιάζεται έντονη απώλεια υλικού στους λίθους, που πιθανώς να οφείλεται και

σε κρυστάλλωση αλάτων. Παρόμοια είναι η κατάσταση και στην τοιχοποιία δεξιά της σφραγισμένης πύλης. Το υπέρθυρο της δεξιάς πύλης έχει κατεστραμμένο μοτίβο, ενώ φαίνεται να αποτελείται και από περιοχές διαφορετικών υλικών. Τέλος, οι κίονες που πλαισιώνουν τις πύλες και αποτελούνται από μάρμαρο, εμφανίζουν καστανούς και φαιόμαυρους σχηματισμούς.



**Εικόνα 3.7: Ανατολική όψη, συνέχεια πρόσοψης. Θέση δειγματοληψίας**

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η ανατολική όψη της πρόσοψης του Ναού στην οποία πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία. Παρατηρώντας μακροσκοπικά την επιφάνεια διακρίνονται περιοχές με διαφορετικούς χρωματισμούς και υφές. Στο ανώτερο τμήμα του γείσου παρουσιάζεται περιοχή λευκού χρωματισμού με έντονο διακοσμητικό ανάγλυφο. Στις εσοχές του ανάγλυφου είναι εμφανή τμήματα πορτοκαλί χροιάς και μαύροι σχηματισμοί. Παράλληλα στις προστατευμένες από το νερό της βροχής επιφάνειες εντοπίζονται περιοχές μαύρης και καστανής απόχρωσης. Επιπλέον είναι ευδιάκριτες πορτοκαλόχρες επιφάνειες που πιθανώς να οφείλονται σε παλαιότερες επεμβάσεις προστασίας. Στο δεξί τμήμα του γείσου φαίνονται διακοσμητικές ανάγλυφες λεπτομέρειες λευκού χρώματος οι οποίες ενδεχομένως να είναι αποπλυμένες.

Στο γείσο παρατηρείται και μία ρωγμή, δεξιά της οποίας υπάρχει λευκό τμήμα του λίθου με μαύρους και κίτρινους σχηματισμούς που ίσως αποτελούν προϊόντα βιολογικής φθοράς.



Εικόνα 3.8: Διακοσμητική λεπτομέρεια λευκής απόχρωσης με μαύρους σχηματισμούς και πορτοκαλί τμήματα στις εσοχές



Εικόνα 3.9: Περιοχές μαύρης και καστανής χροιάς σε τμήματα του γείσου που προστατεύονται από τη βροχή



Εικόνα 3.10: Επιφάνεια με μαύρους και κίτρινους σχηματισμούς που οφείλονται στη βιοδιάβρωση



Εικόνα 3.11: Λεπτομέρεια γείσου

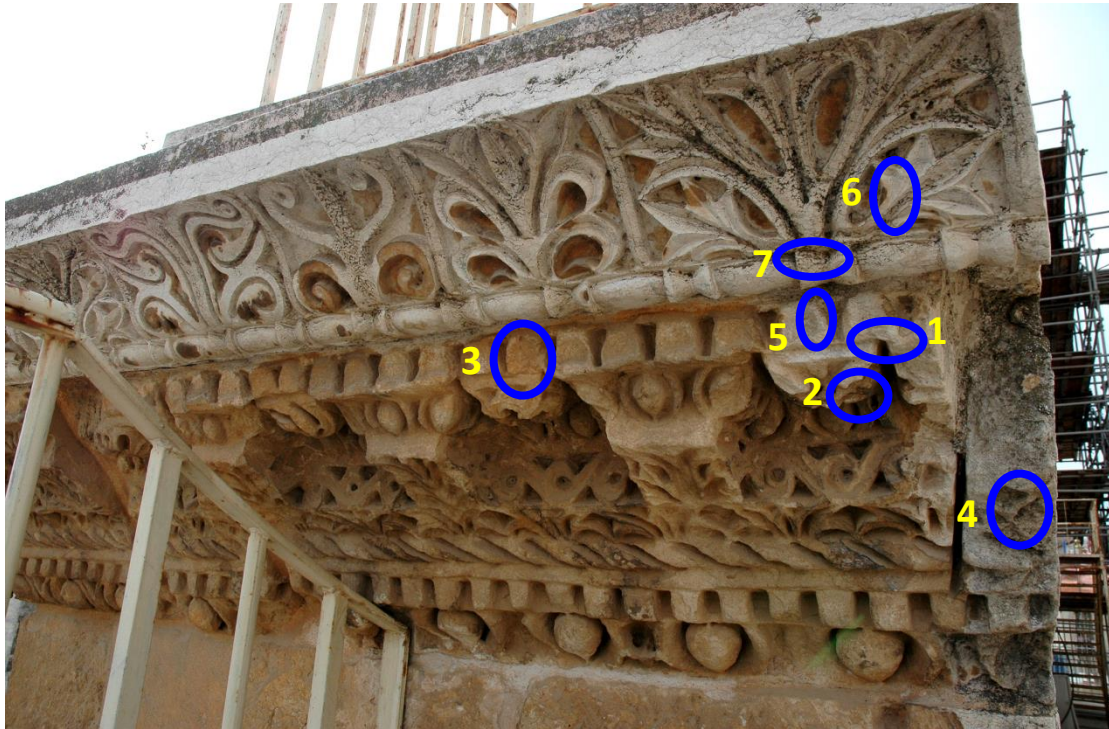
Τέλος, όμοια είναι η κατάσταση και στην τοιχοποιία κάτω από το γείσο. Εκεί παρατηρούνται χρωματικές διαφορές στους λίθους και στα κονιάματα αρμολόγησης.



### 3.1.1 Παρουσίαση θέσεων δειγματοληψίας στερεών δειγμάτων

Αρχικά παρουσιάζονται οι θέσεις δειγματοληψίας και τα δείγματα που ελήφθησαν προκειμένου να εξεταστούν με τη μέθοδο της Περίθλασης Ακτίνων Χ, της Ποροσιμετρίας Υδραργύρου, της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών και του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης.

Θέσεις Δειγματοληψίας



Εικόνα 3.12: Θέσεις δειγματοληψίας – Στερεά δείγματα

Πίνακας 3.1: Στερεά δείγματα

1	J_F_OM	Μεγάλο δείγμα για OM από αποπλυμένη επιφάνεια	5	J_F_white	Γείσο, λευκή αποπλυμένη επιφάνεια
2	J_F_black1	Γείσο, μαύρη κρούστα, J_F_black	6	J_F_black2	9, πάνω μέρος γείσου, μαύρη κρούστα, J_F_black_up
3	J_F_orange	Γείσο, πορτοκαλοκάστανη περιοχή	7	J_F_bio2	10, πάνω μέρος γείσου, μαύρη βιοδιάβρωση σε λευκή περιοχή, J_F_bio_up
4	J_F_bio1	Γείσο, λευκή-μαύρη βιοδιάβρωση, J_F_bio			

## Παρουσίαση στερεών δειγμάτων

### 1. J\_F\_OM



Εικόνα 3.13: J\_F\_OM



Εικόνα 3.14: J\_F\_OM

Το δείγμα J\_F\_OM προέρχεται από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια. Από την παρατήρησή του διαπιστώνεται αλλοίωση της επιφάνειας και έντονο ανάγλυφο. Επίσης ο λίθος έχει λευκό χρώμα.

### 2. J\_F\_black 1

Το δείγμα αυτό έχει ληφθεί από περιοχή μαύρης κρούστας και παρουσιάζει περιοχές με μαύρη και καστανή απόχρωση.



Εικόνα 3.15: J\_F\_black 1



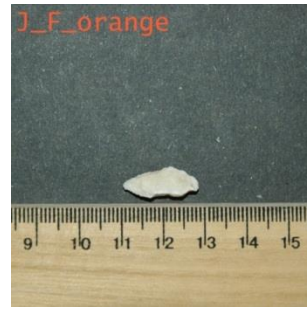
Εικόνα 3.16: J\_F\_black 1

### 3. J\_F\_orange

Αυτό το δείγμα εμφανίζει μία περιοχή πορτοκαλί χροιάς και μία πορτοκαλοκάστανη περιοχή. Επίσης στην πλαϊνή πλευρά του έχει αποκαλυφθεί υγιές τμήμα του λίθου εξαιτίας της αποκόλλησης της πορτοκαλί επικάλυψης.



Εικόνα 3.17: J\_F\_orange



Εικόνα 3.18: J\_F\_orange

#### 4. J\_F\_bio 1



Εικόνα 3.19: J\_F\_bio 1



Εικόνα 3.20: J\_F\_bio 1

Το δείγμα J\_F\_bio 1 παρουσιάζει έντονα ανομοιόμορφη επιφάνεια, ενώ εμφανίζει και φαιόμαυρους και κίτρινους σχηματισμούς που οφείλονται στη δράση μικροοργανισμών.

#### 5. J\_F\_white



Εικόνα 3.21: J\_F\_white



Εικόνα 3.22: J\_F\_white

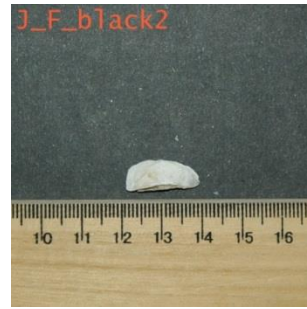
Το δείγμα J\_F\_white προέρχεται από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια. Από τη μακροσκοπική παρατήρησή του διαπιστώνεται έντονη αλλοίωση της επιφάνειας.

#### 6. J\_F\_black 2

Το δείγμα αυτό έχει ληφθεί από περιοχή μαύρης κρούστας. Σε ένα σημείο του έχει αποκολληθεί η κρούστα αυτή και έχει αποκαλυφθεί το υγιές τμήμα του λίθου. Η μαύρη κρούστα αποτελείται από μία μαύρη και μία καστανή περιοχή.

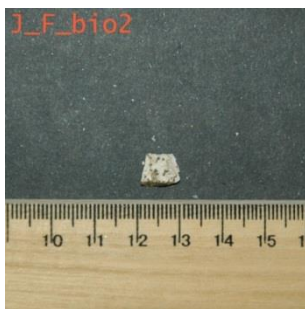


Εικόνα 3.23: J\_F\_black 2

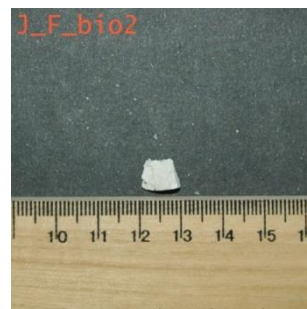


Εικόνα 3.24: J\_F\_black 2

## 7. J\_F\_bio 2



Εικόνα 3.25: J\_F\_bio 2



Εικόνα 3.26: J\_F\_bio 2

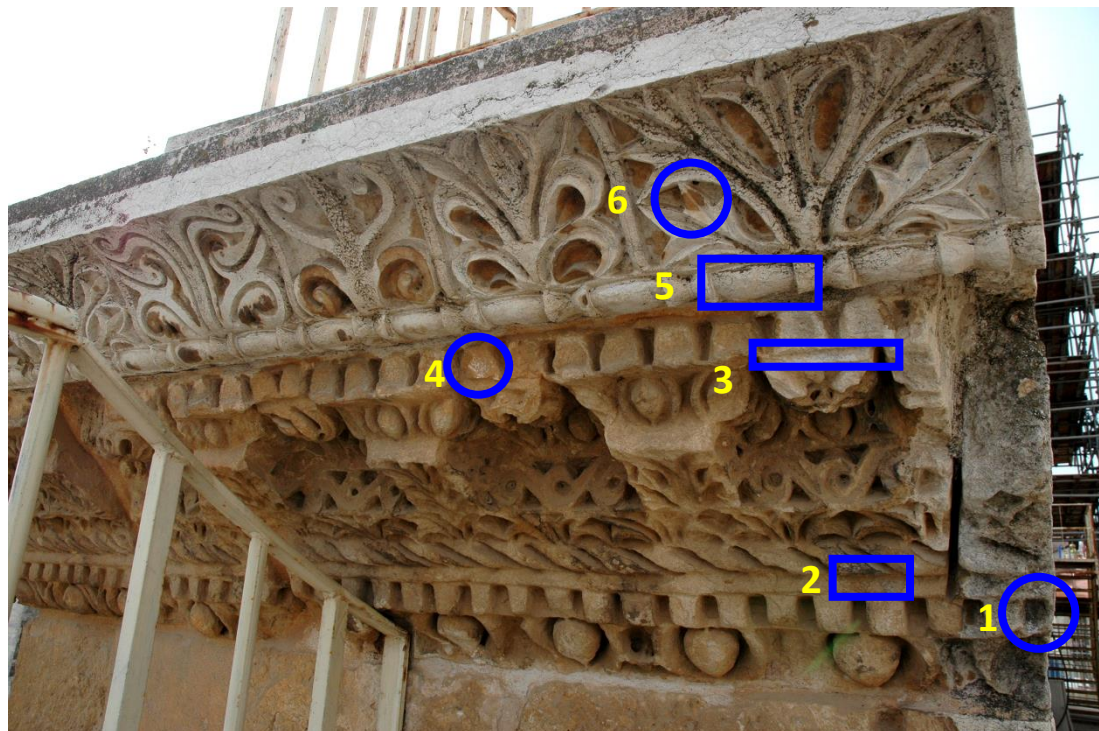
Το δείγμα J\_F\_bio 2 προέρχεται από περιοχή που έχει υποστεί βιοδιάβρωση. Πάνω στη λευκή επιφάνειά του εντοπίζονται μαύρα στίγματα τα οποία πιθανότατα να οφείλονται στη δράση των μικροοργανισμών.



### 3.1.2 Θέσεις δειγματοληψίας δειγμάτων σκόνης

Παράλληλα ελήφθησαν από την ίδια επιφάνεια και δείγματα σκόνης, έτσι ώστε να εξεταστούν με την αναλυτική μέθοδο της Υπέρυθρης Φασματομετρίας Μετασχηματισμού Fourier.

Θέσεις Δειγματοληψίας



Εικόνα 3.27: Θέσεις δειγματοληψίας - Δείγματα σκόνης

Πίνακας 3.2: Δείγματα σκόνη

1	J_F_bio3	3, λευκό-μαύρο βιοδιάβρωσης J_F_bio	4	J_F_bez6	6, περιοχή πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού, J_F_orange
2	J_F_black4	4, μαύρη κρούστα, J_F_black1	5	J_F_bio7	7, πάνω μέρος γείσου, λευκό με βιοδιάβρωση, J_F_bio_up
3	J_F_white5	5, λευκή αποπλυμένη επιφάνεια J_F_white	6	J_F_8	8, πάνω μέρος γείσου, μαύρο μέσα στη λευκή αποπλυμένη επιφάνεια, J_F_black_up



## 3.2 Μέθοδοι και τεχνικές διαγνωστικής μελέτης

### 3.2.1 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ανάλυσης

#### Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM)

Η χρήση φορητού μικροσκοπίου οπτικών ινών επιτρέπει τον επί τόπου έλεγχο της επιφάνειας του λίθου. Η μη καταστρεπτική αυτή μέθοδος ελέγχου στηρίζεται στις οπτικές επικοινωνίες. Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στη μετάδοση σημάτων φωτός, αντί ηλεκτρικού ρεύματος, μέσω οπτικών ινών, αντί για μεταλλικούς αγωγούς, οι οποίες βρίσκονται συζευγμένες σε κατάλληλη διάταξη. Στο ένα άκρο της ζεύξης ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικούς παλμούς οι οποίοι μεταδίδονται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων παγιδευμένοι εντός οπτικών ινών. Στο άλλο άκρο της ζεύξης οι οπτικοί παλμοί μετατρέπονται εκ νέου σε ηλεκτρικό σήμα. (76)

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών είναι ένα μη καταστρεπτικό μικροσκόπιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιτόπιο έλεγχο για να ληφθούν μεγεθυμένες εικόνες. Ενώ στην περίπτωση του οπτικού μικροσκοπίου απαιτείται η λήψη δείγματος για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος, με το μικροσκόπιο οπτικών ινών μπορούν να ληφθούν εικόνες *in situ*. Οι εικόνες της μικροσκοπίας οπτικών ινών έχουν υψηλή ανάλυση και μεγέθυνση έως και X600, ενώ αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή για περαιτέρω επεξεργασία.

Στον τομέα της προστασίας μνημείων η μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι διάφορες υφές μίας επιφάνειας, να γίνει ταξινόμηση των υλικών (π.χ. ταξινόμηση κονιαμάτων), για τη μελέτη των φαινομένων φθοράς, τον έλεγχο της μορφολογίας των επιφανειών, για να εντοπιστούν ατέλειες, να πραγματοποιηθεί χαρακτηρισμός των υλικών, να μελετηθεί η κατάσταση των ψηφιδωτών, να αξιολογηθούν επεμβάσεις καθαρισμού καθώς και η συμβατότητα επεμβάσεων αποκατάστασης. (77)

Η λήψη εικόνων κατά τη διάρκεια του εργαστηριακού ελέγχου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μικροσκοπίου *i\_scope moritex* και των φακών μεγεθύνσεων X30, X50, X120.

#### Θερμογραφία Υπερύθρου

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μία εδραιωμένη μη καταστρεπτική τεχνική με μεγάλο πεδίο εφαρμογών, από τη βελτίωση της νυχτερινής όρασης μέχρι την ανακάλυψη ελαττωμάτων σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Στον τομέα της προστασίας

μνημείων η θερμογραφία υπέρυθρου είναι μία πολύ σημαντική μη καταστρεπτική μέθοδος για τη διερεύνηση της δομής των κατασκευών, των έλεγχο των οικοδομικών υλικών και της κατάστασης διατήρησης, καθώς διαθέτει το πλεονέκτημα της διερεύνησης χωρίς την ανάγκη δειγματοληψίας και είναι σε θέση να εξετάσει μεγάλες περιοχές. (77) Η θερμογραφία υπέρυθρου καταγράφει τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του υλικού. Το αποτέλεσμα της καταγραφής αυτής είναι το θερμογράφημα, το οποίο είναι μία θερμική εικόνα και η οποία μπορεί να παρουσιαστεί είτε σε έγχρωμη είτε σε ασπρόμαυρη μορφή. (78)

Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα υλικά, λόγω θερμικής κίνησης των μορίων τους. Όταν η ακτινοβολία αυτή, η οποία εκπέμπεται από την πηγή, συναντήσει ένα υλικό, μέρος αυτής το διαπερνά, ανακλάται ή απορροφάται από αυτό. Εάν όλη η ακτινοβολία πέσει επάνω στο υλικό, τότε ισχύει η σχέση:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

Όπου  $\tau$ ,  $\rho$  και  $\alpha$  είναι αντίστοιχα η διαπερατότητα, η ανάκλαση και η απορρόφηση του υλικού. (76)

Η εκπομπή που καταγράφει μία κάμερα υπέρυθρου, εξαρτάται μεταξύ άλλων από τη θερμοκρασία και την υφή του υλικού, ενώ βάσει του προτύπου ASTM E1933 είναι εφικτός και ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής. (78)

Δύο προσεγγίσεις υπάρχουν για τον έλεγχο με θερμογραφία υπέρυθρου στον τομέα της προστασίας μνημείων. Η παθητική θερμογραφία χρησιμοποιείται όταν τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται φυσιολογικά σε διαφορετική θερμοκρασία από ότι το περιβάλλον. Η παθητική προσέγγιση χρησιμοποιείται συνήθως για τον έλεγχο αρχιτεκτονικών επιφανειών, όπου τα υλικά συνήθως εξετάζονται ποιοτικά (π.χ. ανίχνευση ατελειών, ασυνεχειών, κενών). Από την άλλη πλευρά όταν τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον και ως εκ τούτου είναι δύσκολο να διαφοροποιηθούν, χρησιμοποιείται η ενεργητική θερμογραφία. Τότε μία πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για να παραχθεί θερμική αντίθεση (θέρμανση ή ψύξη) μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος.

Στην πράξη η τεχνική αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την αξιολόγηση των επιδόσεων των διαφόρων επεμβάσεων συντήρησης (όπως η εφαρμογή των υλικών αποκατάστασης και ο καθαρισμός και στη αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης των ιστορικών τοιχοποιιών (ανίχνευση υπολειμματικής υγρασίας), καθώς και για τη μελέτη των αρχιτεκτονικών επιφανειών της καλλιτεχνικής αξίας όπως είναι τα ψηφιδωτά. (77), (79)

Το θερμογραφικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το FLIR\_B 200\_Western της εταιρίας FLIR SYSTEMS. Ο έλεγχος στη νότια όψη πραγματοποιήθηκε με το φακό FOL18 με γωνία 25°, ενώ στο γείσο της ανατολικής όψης με τον ευρυγώνιο φακό 45°. Το σύστημα αυτό μπορεί να μετρήσει σε ανοιχτούς χώρους στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 7,5 – 13 μm και έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει θερμοκρασίες αντικειμένων από -20°C έως +120°C. (80)

### 3.2.2 Εργαστηριακές μέθοδοι ανάλυσης

#### Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων Χ δίνει πληροφορίες για την τρισδιάστατη διάταξη των ατόμων ή μορίων σε ένα κρυσταλλικό υλικό. Με την XRD προκύπτει η κρυσταλλική δομή των υλικών, η οποία συμπληρώνει τη στοιχειακή ανάλυση στην ταυτοποίηση μίας ουσίας. Βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος  $\lambda$ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων και στον προσδιορισμό των διαστημάτων  $d$  των κρυσταλλικών επιπέδων, μέσω του προσδιορισμού της περιθλώμενης γωνίας  $\theta$  της ακτινοβολίας Χ, σύμφωνα με το νόμο του Bragg.

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

Μέσω του προσδιορισμού των κρυσταλλικών επιπέδων  $d$  που είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση γίνεται η ποιοτική ανάλυση της εξεταζόμενης ουσίας, ενώ από τη μέτρηση της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε μία επιλεγμένη γωνία  $\theta$  γίνεται η ποσοτική ανάλυση μίας κρυσταλλικής ένωσης. (81)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για να την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών φάσεων στο εξεταζόμενο κονιορτοποιημένο δείγμα, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός του δομικού υλικού. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την ορυκτολογική εξέταση είναι το D 5000 X – Ray Diffractometer της εταιρίας SIEMENS.

#### Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους εκτίμησης και ανάλυσης της μικροδομής των πορωδών υλικών και προσδιορισμού του πορώδους τους. Η πειραματική τεχνική βασίζεται στη βαθμιαία είσδυση υδραργύρου σε ένα πορώδες υλικό εκκενωμένο από αέρα, με αύξηση της

εξωτερικής πίεσης και στη συνέχεια απομάκρυνσης του υδραργύρου, καθώς η πίεση ελαττώνεται. Η επιβολή εξωτερικής πίεσης είναι απαραίτητη για την είσδυση του υδραργύρου, καθώς ο υδράργυρος αποτελεί μη διαβρέχον υγρό για το σύνολο σχεδόν των υλικών. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται ο υδράργυρος προοδευτικά εισβάλλει και στους μικρότερους πόρους με την προϋπόθεση, ότι όταν επιβληθεί μία αρκετά μεγάλη πίεση, το πορώδες δείγμα θα κορεσθεί με υδράργυρο. Καθώς η διαβρέχουσα φάση είναι αέρας πολύ χαμηλής πίεσης (κενό) με ατμούς υδραργύρου, δεν παρουσιάζει καμία αντίσταση στην είσδυση υδραργύρου. (76)

Το ποροσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο όργανα: το MacroPores Unit 120 της εταιρίας Carlo Erba και το Porosimeter Pascal 440 της εταιρίας Thermo Electron Corporation. Το πρώτο όργανο χρησιμεύει για τη μέτρηση των μεγάλων πόρων ακτίνας 7,5 – 100 μm και το δεύτερο όργανο για τη μέτρηση μικρότερων πόρων με ακτίνα 37,5 Å – 7,5 μm. Τα δύο στοιχεία συνδέονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα και παρουσιάζει τα αποτελέσματα, δηλαδή της καμπύλης είσδυσης και απομάκρυνσης του υδραργύρου, τον ολικό ειδικό όγκο, τη φαινόμενη πυκνότητα, το ολικό πορώδες, τη μέση ακτίνα πόρων και την ειδική επιφάνεια. (82)

### Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ (SEM – EDX)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα τα πιο ευέλικτα όργανα ανάλυσης της μικροδομής μεγάλης ποικιλίας στερεών υλικών. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ μίας προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων και του προς εξέταση δείγματος. Η αλληλεπίδραση αυτή αποκαλύπτει πλήθος πληροφοριών σχετικά με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες Χ. (76), (83) Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του SEM σε σχέση με άλλες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής είναι η εξαιρετική ανάλυση που παρέχει και φτάνει συχνά μέχρι και 1 – 5 nm. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η αίσθηση τρισδιάστατης παρουσίασης της εικόνας που είναι αποτέλεσμα του μεγάλου βάθους πεδίου που παρέχει η μέθοδος όπως επίσης και του φαινομένου σκίασης που παρέχουν τα δευτερογενή και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια.

Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων Χ (EDS) που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού. (76) Με το φάσμα ακτίνων Χ που εκπέμπεται από το δείγμα μπορεί να πραγματοποιηθεί ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Μετρώντας το μήκος κύματος (ή την ενέργεια) του φάσματος ακτίνων Χ

που εκπέμπεται διαπιστώνεται ποια στοιχεία εμπεριέχονται στο δείγμα. Παράλληλα μετρώντας την ποσότητα των χαρακτηριστικών ακτίνων που εκπέμπονται από το κάθε στοιχείο, πραγματοποιείται ημιοσοτική ανάλυση. (83)

Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο Quanta 200 της εταιρίας FEI συνδυασμένο με φασματόμετρο ακτίνων Χ ενεργειακής διασποράς – EDAX. Το όργανο αυτό επιτυγχάνει μεγεθύνσεις μεγαλύτερες του Χ100000 με διακριτική ικανότητα 6 nm.

### Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με Μετασχηματισμό Fourier (FT – IR)

Η υπέρυθρη φασματοσκοπία βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια μίας ένωσης, τα οποία διεγείρονται σε υψηλότερες στάθμες δόνησης ή περιστροφής. Ενεργά υπέρυθρες ενώσεις είναι μόνον αυτές στις οποίες οι δονήσεις και οι περιστροφές των ατόμων τους έχουν μία διαρκή διπολική ροπή. Η περιοδική αλλαγή της διπολικής ροπής λόγω περιστροφής ή δόνησης επιτυγχάνεται μόνο με ορισμένες συχνότητες. Απορρόφηση συμβαίνει όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα του διπόλου.

Γενικά το φάσμα απορρόφησης υπέρυθρου αποτελεί μία θεμελιώδη ιδιότητα κάθε μορίου και χρησιμεύει κυρίως στην ποιοτική ανάλυση, για τη διαλεύκανση της δομής μίας ένωσης, δηλαδή για τη φύση των ατόμων που βρίσκονται στο μόριο και τη διάταξή τους στο χώρο, δίνοντας το δακτυλικό αποτύπωμα μίας ουσίας. Από την άλλη πλευρά επειδή το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας είναι συνάρτηση του αριθμού των υπαρχόντων μορίων, προκύπτουν από το IR φάσμα και πληροφορίες και ως προς τη συγκέντρωση ενός συστατικού σε ένα δείγμα. (81)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των χαρακτηριστικών ενώσεων του δομικού υλικού, αλλά και των προϊόντων φθοράς. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο Excalibur series Bio\_Rad.



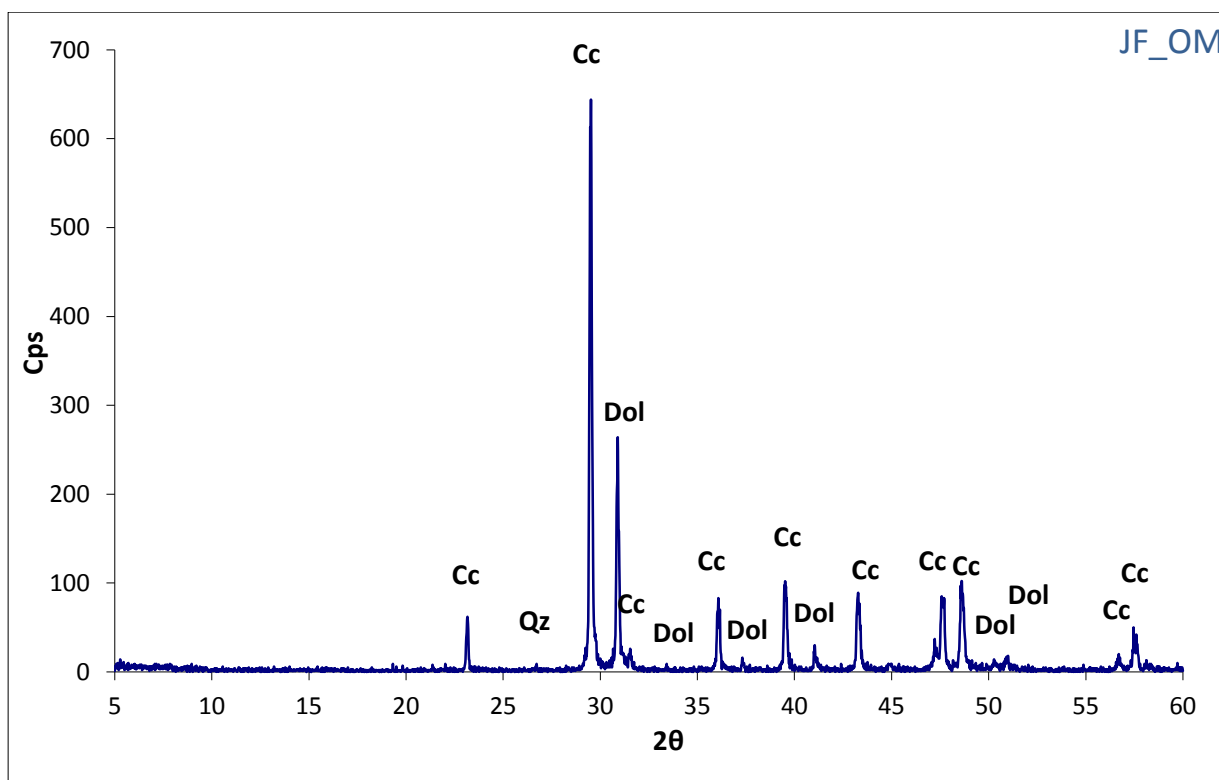
# ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

## 4. Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων

### 4.1 Χαρακτηρισμός δομικού υλικού

#### Περίθλαση Ακτίνων Χ

Το δείγμα J\_F\_OM εξετάστηκε με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων Χ για να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός του δομικού υλικού. Από τον ορυκτολογικό προσδιορισμό του δείγματος προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα. Όπως είναι φανερό οι πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις είναι του ασβεστίτη και του δολομίτη, ενώ ανιχνεύεται και χαλαζίας. (84), (85), (86)



Διάγραμμα 4.1: Περίθλαση ακτίνων Χ στο δείγμα J\_F\_OM

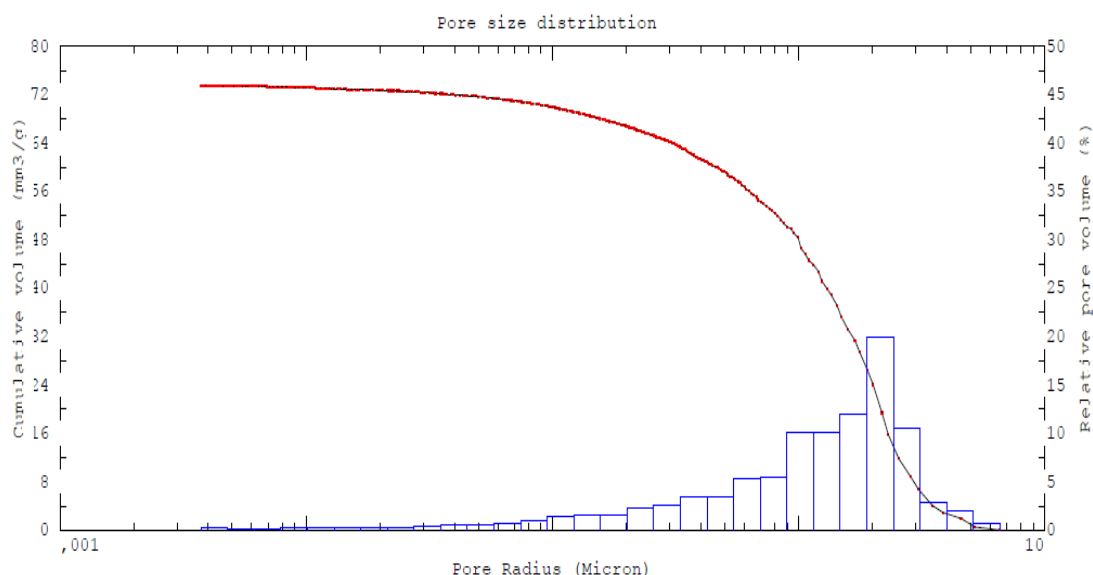
## Ποροσιμετρία υδραργύρου

Η Ποροσιμετρία υδραργύρου εφαρμόστηκε στο δείγμα J\_F\_OM για την εξέταση της μικροδομής του δομικού υλικού. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι ο ολικός ειδικός όγκος, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα πόρων, το ολικό ανοιχτό πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα, ενώ ελήφθη και το διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής των πόρων του όγκου των κενών ανά μονάδα μάζας προς την ακτίνα τους.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα εξέτασης του δείγματος J\_F\_OM με Ποροσιμετρία υδραργύρου

Κωδικός δείγματος	Ολικός ειδικός όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Ολικό ανοιχτό πορώδες (%)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική Επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)
J_F_OM	73,56	2,17	15,93	1,43	0,49

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Ποροσιμετρίας υδραργύρου παρατηρούμε ότι ο λίθος που εξετάστηκε δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό πορώδες (15,93%), ενώ όπως φαίνεται από το διάγραμμα η μονοκόρυφη κατανομή είναι μετατοπισμένη σε μεγαλύτερες ακτίνες πόρων περίπου 0,7 έως 0,9μm (μέση ακτίνα κατανομής πόρων 1,43μm).



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα κατανομής ακτίνας πόρων του δείγματος J\_F\_OM

Συγκρίνοντας τη μικροδομή του δείγματος J\_F\_OM με αυτή άλλων δειγμάτων που προέρχονται από διαφορετικά τμήματα του μνημείου, διαπιστώνεται η αντιστοιχία



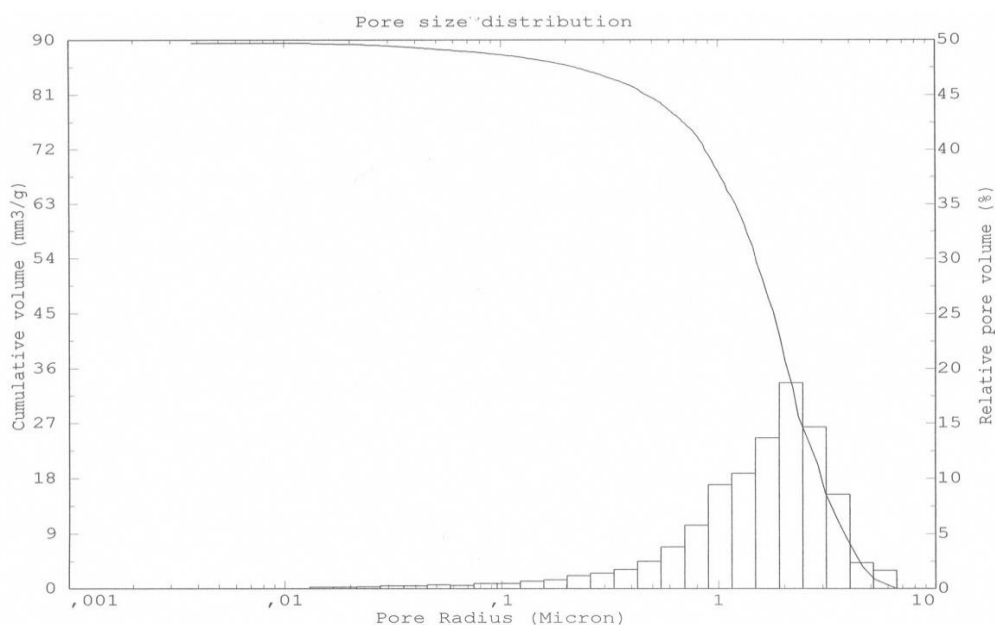
του δομικού λίθου του δείγματος με το λίθο με τον κωδικό J\_CS. Το δείγμα J\_CS είναι λίθος και προέρχεται από το εσωτερικό του καθολικού στη βορειοανατολική γωνία του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως.

Με βάση τα δεδομένα παλαιότερων μετρήσεων ο λίθος J\_CS παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

**Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα εξέτασης με Πορομετρία υδραργύρου του δείγματος J\_CS (87), (82)**

Κωδικός δείγματος	Ολικός ειδικός όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Ολικό ανοιχτό πορώδες (%)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική Επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)
<b>ΛΙΘΟΣ</b>					
<b>J_CS</b>	89,46	2,10	18,82	2,15	0,26

Παράλληλα δίνεται και το διάγραμμα κατανομής ακτίνας πόρων.



**Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα κατανομής ακτίνας πόρων του δείγματος J\_CS (87), (82)**

Ο λίθος αυτός έχει πορώδες 18,82% και η κατανομή παρουσιάζει επίσης μετατόπιση προς μεγαλύτερες ακτίνες πόρων (μέση ακτίνα κατανομής πόρων 2,15μm). Συνεπώς οι δύο αυτοί λίθοι εμφανίζουν μία συνάφεια.

### Μερικά Συμπεράσματα από το Χαρακτηρισμό του Λίθου

Από τις μετρήσεις για το χαρακτηρισμό του λίθου προκύπτει το συμπέρασμα ότι πρόκειται για πορώδη ασβεστόλιθο με δολομιτικές προσμίξεις (ολικό ανοιχτό πορώδες: ~ 16% και μέση ακτίνα κατανομής πόρων: 1,4 μm).

## 4.2 Διάγνωση τύπων φθοράς

### 4.2.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών

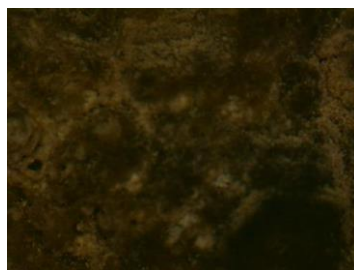
Ο έλεγχος με τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών πραγματοποιήθηκε επί τόπου στην ανατολική όψη της πρόσοψης, καθώς και στο σύνολο των δειγμάτων για να διαπιστωθούν τα είδη φθοράς. Η αρίθμηση των εικόνων ξεκινάει για κάθε δείγμα από την αρχή.

#### 4.2.1.1 Αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν κάποιες επιτόπιες μετρήσεις στις διαβρωμένες επιφάνειες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Για τη λήψη όλων των παρακάτω εικόνων χρησιμοποιήθηκε φακός με μεγέθυνση X50.



Εικόνα 1: Περιοχή μαύρης κρούστας



Εικόνα 2: Περιοχή μαύρης κρούστας



Εικόνα 3: Αποκόλληση μαύρης κρούστας



Εικόνα 4: Περιοχή μαύρης κρούστας



Εικόνα 5: Περιοχή μαύρης κρούστας

Στις Εικόνες 1 έως 5 μελετώνται περιοχές μαύρης κρούστας. Στις Εικόνες 1 και 3 η μαύρη κρούστα έχει καστανή απόχρωση ενώ πάνω στην επιφάνεια παρατηρούνται και μαύρες επικαθίσεις. Επιπλέον και στις δύο Εικόνες έχει αποκαλυφθεί τοπικά το υγιές τμήμα του λίθου. Στις Εικόνες 2 και 4 είναι εμφανείς οι περιοχές μαύρης κρούστας στις οποίες εντοπίζεται η ανάπτυξη λευκών κόκκων. Στην Εικόνα 5 η περιοχή της μαύρης κρούστας έχει καστανή χροιά, ενώ η επιφάνεια παρουσιάζει και έντονο ανάγλυφο.



**Εικόνα 6: Περιοχή αποπλυμένης επιφάνειας**



**Εικόνα 7: Περιοχή αποπλυμένης επιφάνειας**

Οι Εικόνες 6 και 7 παρουσιάζουν περιοχές αποπλυμένης επιφάνειας. Στις Εικόνες 6 και 7 παρατηρούνται οι κόκκοι και οι ραβδόμορφες δομές του λίθου. Κατά τόπους διακρίνονται και τμήματα καστανής απόχρωσης.

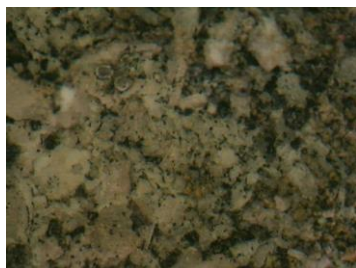


**Εικόνα 8: Περιοχή πορτοκαλή χρωματισμού**

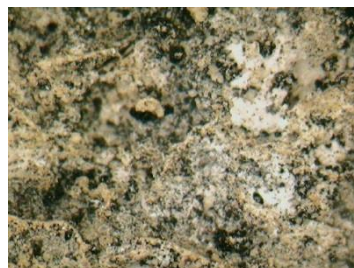


**Εικόνα 9: Περιοχή πορτοκαλή χρωματισμού**

Στις Εικόνες 8 και 9 εξετάζονται πορτοκαλόχρες περιοχές στην επιφάνεια του λίθου. Και οι δύο εικόνες παρουσιάζουν έντονο ανάγλυφο. Στην Εικόνα 8 παρατηρούνται μαύρα στίγματα πάνω στην πορτοκαλί επιφάνεια, ενώ σε κάποιο σημείο έχει αποκαλυφθεί τμήμα του λίθου.



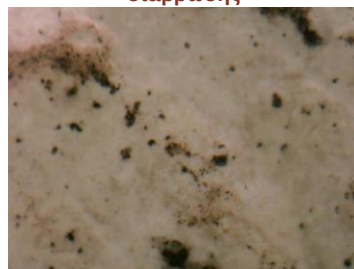
**Εικόνα 10: Περιοχή βιολογικής διάβρωσης**



**Εικόνα 11: Περιοχή βιολογικής διάβρωσης**



**Εικόνα 12: Βιολογική διάβρωση σε αποπλυμένη επιφάνεια**



**Εικόνα 13: Βιολογική διάβρωση σε αποπλυμένη επιφάνεια**

Στην Εικόνες 10 έως 13 εξετάζονται περιοχές που έχουν υποστεί βιολογική διάβρωση. Στην Εικόνα 10 είναι εμφανείς λευκές καρπικές δομές. Επιπλέον στην Εικόνα 11 παρατηρούνται οι κόκκοι του λίθου, ενώ η επιφάνεια παρουσιάζει φαιόμαυρα στίγματα που έχουν προκληθεί από τη βιολογική φθορά. Ο κατακερματισμός του λίθου πιθανώς να έχει προέλθει από τη συνέργεια απόπλυσης και βιοδιάβρωσης. Στις Εικόνες 12 και 13 πρόκειται για περιοχή βιολογικής φθοράς πάνω σε αποπλυμένη επιφάνεια. Οι μαύροι σχηματισμοί οφείλονται στην ανάπτυξη βιοδιάβρωσης.

#### 4.2.1.2 Δείγματα που προέρχονται από περιοχές μαύρης κρούστας

##### J\_F\_black 1

Στις Εικόνες 1 και 2 παρουσιάζεται επιφάνεια μαύρης κρούστας με πορτοκαλοκάστανες περιοχές. Τα τμήματα αυτά μπορεί να προέκυψαν από επικαθίσεις σκόνης. Στη συνέχεια στις Εικόνες 3 και 4 παρατηρούνται λευκές περιοχές ανάμεσα στη μαύρη κρούστα, στο σημείο αυτό έχει αποκαλυφθεί τμήμα του λίθου.

Στην Εικόνα 5 είναι εμφανής η επιφάνεια της μαύρης κρούστας με πορτοκαλοκάστανη απόχρωση. Επιπλέον στην Εικόνα 8 παρατηρείται πορτοκαλοκάστανη επιφάνεια με μαύρα στίγματα, που ίσως να οφείλονται σε επικαθίσεις σωματιδίων αιθάλης. Στη Εικόνα 9 η πορτοκαλοκάστανη επιφάνεια εκτός από μαύρες επικαθίσεις εμφανίζει και λευκούς κόκκους. Οι κόκκοι αυτοί ενδεχομένως να αποδίδονται στην ανάπτυξη κρυστάλλων ασβεστίτη στην επιφάνεια της κρούστας. Στις Εικόνες 6 και 7 εντοπίζεται λευκός κόκκος πάνω στην μαύρη κρούστα. Παράλληλα στην επιφάνεια της Εικόνας 7 εμφανίζονται και πορτοκαλί κηλίδες.



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30. Μαύρη κρούστα με πορτοκαλοκάστανες περιοχές

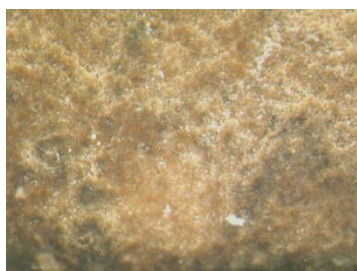


Εικόνα 2: Μεγέθυνση X30. Μαύρη κρούστα με πορτοκαλοκάστανες περιοχές



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X50. Μαύρη κρούστα με λευκούς σχηματισμούς





**Εικόνα 4: Μεγέθυνση Χ50.  
Φαίωμαυρες και λευκές περιοχές**



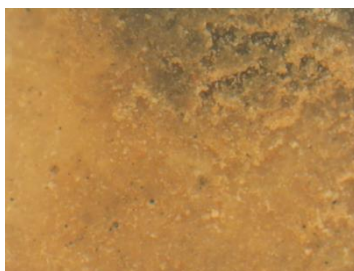
**Εικόνα 5: Μεγέθυνση Χ120.  
Μαύρη κρούστα με  
πορτοκαλοκάστανες περιοχές**



**Εικόνα 6: Μεγέθυνση Χ120.  
Μαύρη κρούστα με λευκό κόκκο  
ασβεσίτη**



**Εικόνα 7: Μεγέθυνση Χ120.  
Μαύρη κρούστα με λευκό κόκκο**



**Εικόνα 8: Μεγέθυνση Χ120.  
Πορτοκαλοκάστανη επιφάνεια**



**Εικόνα 9: Πορτοκαλοκάστανη  
επιφάνεια με μαύρες και λευκές  
κηλίδες**

Στις Εικόνες που ακολουθούν εξετάζεται το ίδιο σημείο του δείγματος σε διαφορετικές μεγεθύνσεις. Στις Εικόνες 10 έως 12 παρατηρείται αποκόλληση της μαύρης κρούστας και αποκάλυψη του υγιούς τμήματος του λίθου. Στις Εικόνες 13 έως 16 μελετάται το σημείο αυτό σε μεγέθυνση Χ120. Έτσι είναι εμφανείς διαφορές των αποχρώσεων (πορτοκαλοκάστανες, λευκές και μαύρες περιοχές), όπως επίσης παρατηρούνται και ανάγλυφοι σχηματισμοί στην επιφάνεια, ιδιαίτερα στις Εικόνες 14 και 15.



**Εικόνα 10: Μεγέθυνση Χ30.  
Αποκόλληση μαύρης κρούστας**



**Εικόνα 11: Μεγέθυνση Χ50.  
Αποκόλληση μαύρης κρούστας**



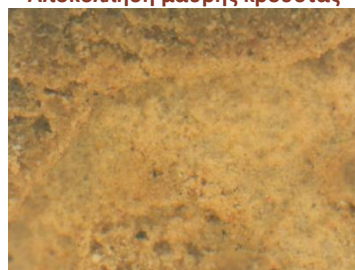
**Εικόνα 12: Μεγέθυνση Χ50.  
Αποκόλληση μαύρης κρούστας**



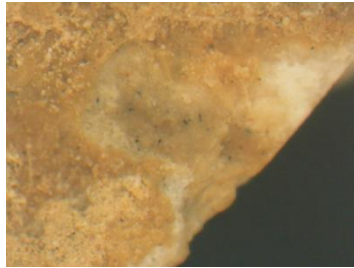
**Εικόνα 13: Μεγέθυνση Χ120.  
Πορτοκαλοκάστανη επιφάνεια με  
μαύρη κηλίδα**



**Εικόνα 14: Μεγέθυνση Χ120.  
Περιοχή μαύρης κρούστας με  
απώλεια υλικού**

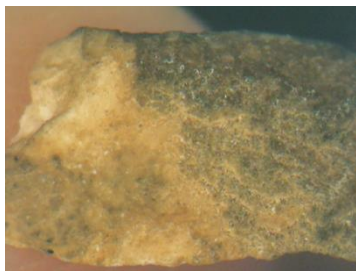


**Εικόνα 15: Μεγέθυνση Χ120.  
Αποκόλληση κρούστας**

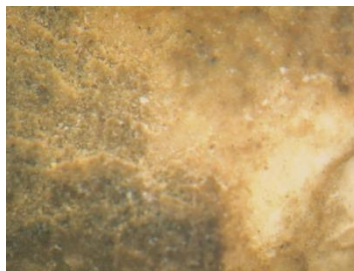


**Εικόνα 16: Μεγέθυνση Χ120.  
Αποκόλληση κρούστας**

Στις Εικόνες 17 έως 20 εμφανίζεται περιοχή μαύρης κρούστας με καστανές αποχρώσεις. Στην Εικόνα 18 έχει αποκαλυφθεί τμήμα του λίθου.



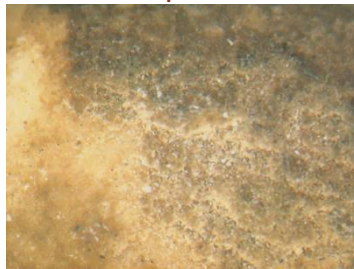
**Εικόνα 17: Μεγέθυνση Χ30.  
Μαύρη και καστανή απόχρωση  
στην κρούστα**



**Εικόνα 18: Μεγέθυνση Χ50.  
Μαύρη κρούστα και λευκή  
επιφάνεια**

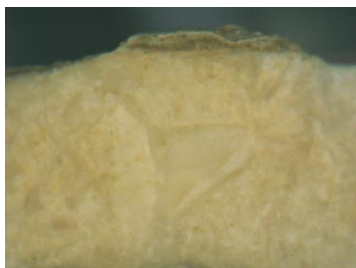


**Εικόνα 19: Μεγέθυνση Χ50.  
Μαύρη κρούστα και λευκή  
επιφάνεια**



**Εικόνα 20: Μεγέθυνση Χ50**

Στις Εικόνες 21 μέχρι 30 παρατηρείται η διεπιφάνεια της κρούστας και του λίθου. Στην Εικόνα 26 φαίνεται ότι ανάμεσα στη μαύρη κρούστα και στο λίθο παρεμβάλλεται ένα πορτοκαλί στρώμα. Επιπλέον στις Εικόνες 27 και 30 φαίνεται το πορτοκαλί στρώμα έχει εισχωρήσει ανάμεσα σε υγιή τμήμα του λίθου.



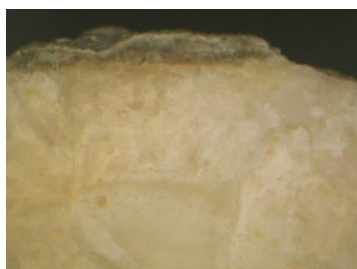
**Εικόνα 21: Μεγέθυνση Χ30.  
Διεπιφάνεια λίθου και κρούστας**



**Εικόνα 22: Μεγέθυνση Χ30.  
Διεπιφάνεια λίθου και κρούστας**



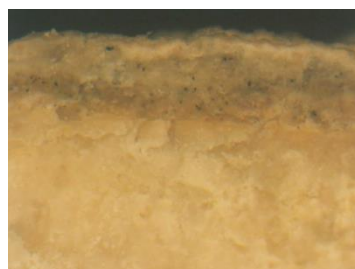
**Εικόνα 23: Μεγέθυνση Χ30.  
Διεπιφάνεια λίθου και κρούστας**



Εικόνα 24: Μεγέθυνση X50.  
Διεπιφάνεια λίθου και κρούστας



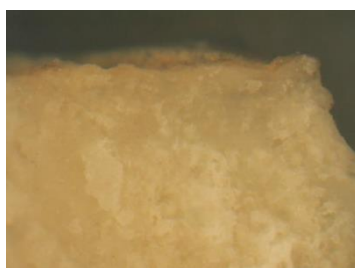
Εικόνα 25: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 26: Μεγέθυνση X120.  
Διεπιφάνεια λίθου και κρούστας



Εικόνα 27: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 28: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 29: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 30: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες από 34 έως 39 παρουσιάζονται σε διαφορετικές μεγεθύνσεις υγιή τμήματα του λίθου και είναι εμφανείς οι κόκκοι του δομικού υλικού. Ο λίθος έχει λευκό χρώμα και φαίνεται συμπαγής.



Εικόνα 34: Μεγέθυνση X30. Υγιές  
τμήμα λίθου



Εικόνα 35: Μεγέθυνση X50. Υγιές  
τμήμα λίθου



Εικόνα 36: Μεγέθυνση X50. Υγιές  
τμήμα λίθου



Εικόνα 37: Μεγέθυνση X120. Υγιές  
τμήμα λίθου



Εικόνα 38: Μεγέθυνση X120. Υγιές  
τμήμα λίθου



Εικόνα 39: Μεγέθυνση X120. Υγιές  
τμήμα λίθου



J\_F\_black 2



**Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30.  
Περιοχή μαύρης κρούστας και  
αποπλυμένης επιφάνειας**



**Εικόνα 2: Μεγέθυνση X30**



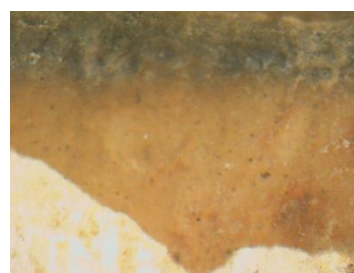
**Εικόνα 3: Μεγέθυνση X30**



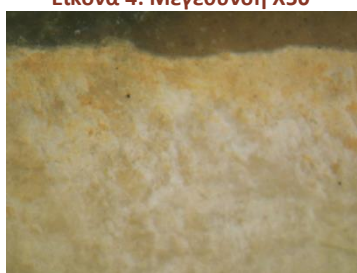
**Εικόνα 4: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 5: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 6: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 7: Μεγέθυνση X50**



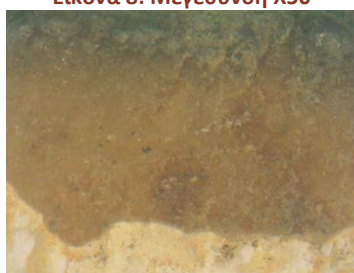
**Εικόνα 8: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 9: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 10: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 11: Μεγέθυνση X50**

Το δείγμα J\_F\_black 2 προέρχεται από επιφάνεια, ένα τμήμα της οποίας προφυλασσόταν από τη βροχή και ένα άλλο έμενε εκτεθειμένο στο νερό. Στις Εικόνες 1 έως 11 παρουσιάζονται η περιοχή της μαύρης κρούστας και η αποπλυμένη επιφάνεια. Στις Εικόνες 4 και 6 είναι εμφανής η χρωματική διαβάθμιση στην επιφάνεια της κρούστας, συγκεκριμένα στο ανώτερο μέρος του δείγματος η κρούστα έχει μαύρο χρώμα, ενώ στο κάτω μέρος έχει πορτοκαλοκάστανη απόχρωση. Στην επιφάνεια της μαύρης κρούστας είναι επίσης εμφανείς επικαθίσεις μαύρης απόχρωσης και λευκοί κόκκοι (Εικόνα 4). Επιπλέον παρατηρούνται στο αποπλυμένο τμήμα του λίθου πορτοκαλί σχηματισμοί.



**Εικόνα 12: Μεγέθυνση X120.  
Μαύρη και πορτοκαλοκάστανη  
περιοχή κρούστας**



**Εικόνα 13: Μεγέθυνση X120.  
Πορτοκαλοκάστανη περιοχή  
κρούστας**



**Εικόνα 14: Μεγέθυνση X120.  
Μαύρη και πορτοκαλοκάστανη  
περιοχή κρούστας**



**Εικόνα 15: Μεγέθυνση X120.  
Μαύρη περιοχή κρούστας**

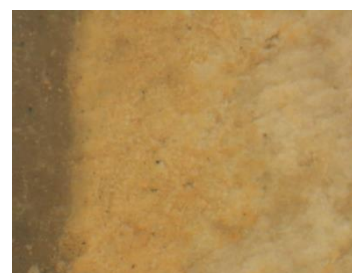
Στις Εικόνες 12 και 14 εξετάζεται η διεπιφάνεια της μαύρης και πορτοκαλοκάστανης περιοχής της κρούστας. Εντοπίζονται επικαθίσεις σκόνης και ιδιαίτερα στις Εικόνα 12 παρατηρείται κάποια αλλοίωση στην επιφάνεια. Στην Εικόνα 13 εξετάζεται η πορτοκαλοκάστανη περιοχή της κρούστας, όπου είναι εμφανείς μαύροι κόκκοι, ο οποίοι ενδεχομένως να αποδίδονται στην ύπαρξη αιθάλης. Επίσης εντοπίζονται λευκές κηλίδες. Στην Εικόνα 15 μελετάται η μαύρη περιοχή της κρούστας. Εκεί παρατηρούνται λευκοί και μαύροι κόκκοι. Γίνεται αντιληπτό ότι η μαύρη επιφάνεια της κρούστας έχει εντονότερο ανάγλυφο αντίθετα με την πορτοκαλοκάστανη που εμφανίζεται περισσότερο λεία.



**Εικόνα 16: Μεγέθυνση X120.  
Διεπιφάνεια κρούστας και  
αποπλυμένης περιοχής**



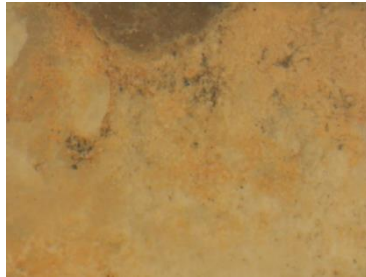
**Εικόνα 17: Μεγέθυνση X120**



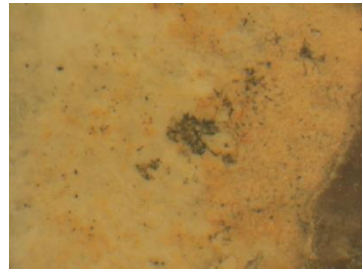
**Εικόνα 18: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 19: Μεγέθυνση X120.  
Τμήμα του λίθου που έχει  
αποπλυθεί**



**Εικόνα 20: Μεγέθυνση X120**

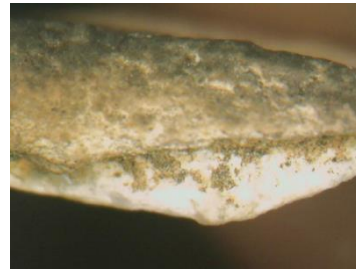


**Εικόνα 21: Μεγέθυνση X120**

Στις Εικόνες 16 έως 21 εμφανίζεται επιφάνεια μεταξύ της κρούστας και της αποπλυμένης περιοχής του λίθου. Στην αποπλυμένη επιφάνεια παρατηρείται ο σχηματισμός κηλίδων πορτοκαλί χροιάς. Επίσης σε μερικά σημεία έχουν απομείνει υπολείμματα της κρούστας (Εικόνα 21).



**Εικόνα 22: Μεγέθυνση X30.  
Πλαϊνό τμήμα δείγματος**



**Εικόνα 23: Μεγέθυνση X50**



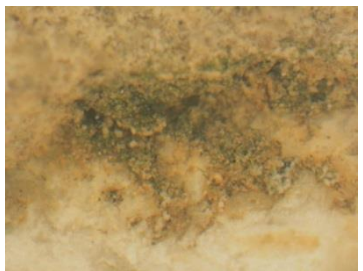
**Εικόνα 24: Μεγέθυνση X50**



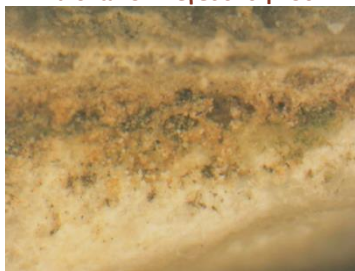
**Εικόνα 25: Μεγέθυνση X50**



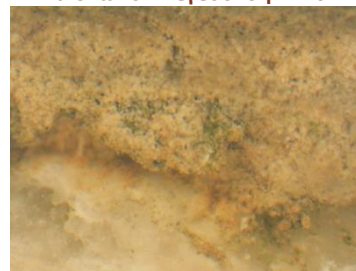
**Εικόνα 26: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 27: Μεγέθυνση X120**



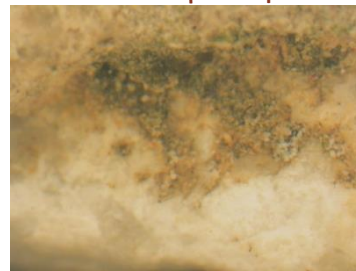
**Εικόνα 28: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 29: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 30: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 31: Μεγέθυνση X120**



Στις Εικόνες 22 έως 31 παρουσιάζεται η πλαϊνή πλευρά του δείγματος. Στη διεπιφάνεια κρούστας και λίθου παρατηρείται ότι των δύο στρωμάτων παρεμβάλλεται ένα στρώμα πορτοκαλί απόχρωσης, το οποίο στις Εικόνες 29 και 30 φαίνεται να εισέρχεται στο λίθο. Στις Εικόνες 22 και 25 διακρίνεται και κατά τόπους ανάπτυξη βιοδιάβρωσης στο πλαϊνό τμήμα του δείγματος. Επιπλέον στις Εικόνες 22 και 30 είναι εμφανής ρωγμή που ενδεχομένως να προέκυψε κατά τη δειγματοληψία.

Είναι προφανές ότι η μαύρη κρούστα είχε σχηματιστεί στο τμήμα του λίθου που προστατευόταν από το βρόχινο νερό. Η πορτοκαλοκάστανη περιοχή αντιστοιχεί στην επιφάνεια που ήταν σε μεσαίο βαθμό εκτεθειμένη στη βροχή. Έτσι με την έκπλυση άρχισε να λειαιίνεται η ανάγλυφη περιοχή της μαύρης κρούστας και να μεταβάλλεται και ο χρωματισμός. Τέλος, η επιφάνεια που δεχόταν τη μεγαλύτερη έκθεση στο νερό έχει αποπλυθεί, ενώ εμφανίζει και πορτοκαλί σχηματισμούς και υπολείμματα της μαύρης κρούστας.



Εικόνα 32: Μεγέθυνση X30. Υγιές τμήμα του λίθου



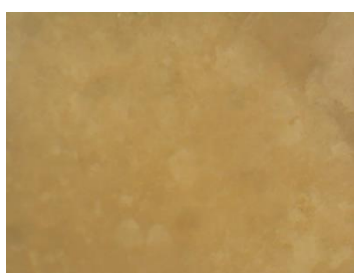
Εικόνα 33: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 34: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 35: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 36: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 37: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 32 έως 37 παρουσιάζεται το υγιές τμήμα του δείγματος. Ο λίθος έχει λευκό χρώμα, ενώ είναι εμφανείς και οι κόκκοι του υλικού.

### 4.2.1.3 Δείγμα από περιοχή πορτοκαλοκάστανης χροιάς

J\_F\_orange

Το δείγμα J\_F\_orange προέρχεται από επιφάνεια πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού και πιθανώς να πρόκειται για πάτινα. Στο δείγμα διακρίνονται δύο περιοχές διαφορετικής χροιάς και υφής, η πρώτη περιοχή έχει πορτοκαλή απόχρωση και είναι λεία και η δεύτερη είναι καστανή με έντονο ανάγλυφο.



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30.  
Αποκόλληση πορτοκαλί  
επιφάνειας



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 4: Μεγέθυνση X120.  
Πορτοκαλί επιφάνεια



Εικόνα 5: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 6: Μεγέθυνση X120.  
Διεπιφάνεια καστανής και  
πορτοκαλί περιοχής

Στις Εικόνες 1 έως 3 παρατηρείται επιφάνεια στην οποία έχει αποκολληθεί η πορτοκαλόχροα περιοχή και έχει αποκαλυφθεί το λευκό στρώμα του λίθου στο πλαϊνό σημείο του δείγματος. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 3, 4 και 5 εντοπίζονται επάνω στην πορτοκαλί επιφάνεια μαύρες επικαθίσεις. Στην Εικόνα 5 είναι εμφανής και ένας ανομοιογενής σχηματισμός στην πορτοκαλόχροα περιοχή. Στην Εικόνα 6 εξετάζεται η διεπιφάνεια της καστανής και της πορτοκαλί περιοχής. Από τη μία πλευρά η πορτοκαλί περιοχή είναι ομοιόμορφη και λεία, ενώ η καστανή περιοχή παρουσιάζει ανομοιογένεια στην επιφάνεια. Η καστανή περιοχή έχει την ίδια απόχρωση με το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της πρόσοψης.



Εικόνα 7: Μεγέθυνση X30.  
Αποκόλληση καστανής περιοχής



Εικόνα 8: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 9: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 10: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 11: Μεγέθυνση X120.  
Καστανή περιοχή



Εικόνα 12: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 7 έως 10 εξετάζεται η περιοχή από την οποία έχει αποκολληθεί το καστανό τμήμα της επίστρωσης. Στο τμήμα του λίθου που έχει αποκαλυφθεί εντοπίζονται υπολείμματα της καστανής περιοχής και επικαθίσεις σκόνης. Στις Εικόνες 11 και 12 εξετάζεται η καστανή περιοχή σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Η επιφάνεια αυτή παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, ενώ στην Εικόνα 12 παρατηρείται έντονη αλλοίωση της επιφάνειας και απώλεια υλικού.



Εικόνα 13: Μεγέθυνση X30. Υγιής  
περιοχή δείγματος



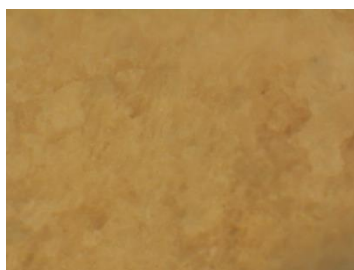
Εικόνα 14: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 15: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 16: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 17: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 13 έως 17 μελετάται η υγιής περιοχή του δείγματος. Στην Εικόνα 16 είναι εμφανείς ραβδοειδείς δομές του υλικού.



#### 4.2.1.4 Δείγματα από λευκές αποπλυμένες επιφάνειες

J\_F\_white



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30. Κόκκοι υλικού



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 4: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 5: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 6: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 7: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 8: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 9: Μεγέθυνση X120.  
Μαύρος σχηματισμός

Στις Εικόνες 1 έως 8 είναι εμφανείς οι κόκκοι του λίθου στα όρια των οποίων έχουν δημιουργηθεί σχηματισμοί πορτοκαλή και μαύρου χρωματισμού, που αποδίδονται σε επικαθίσεις σκόνης. Στις Εικόνες 6 και 7 ο κόκκοι του λίθου έχουν ραβδοειδή μορφή. Επιπλέον στις παραπάνω εικόνες είναι εμφανής η αλλοίωση της επιφάνειας εξαιτίας της απόπλυσης. Στις Εικόνες 8 και 9 εντοπίζεται μαύρος σχηματισμός στην επιφάνεια του λίθου.



Εικόνα 10: Μεγέθυνση X120.  
Ραβδοειδείς κρύσταλλοι λίθου



Εικόνα 11: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 12: Μεγέθυνση X120



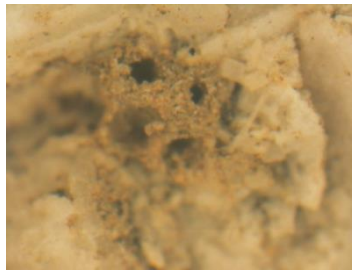
Εικόνα 13: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 14: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 15: Μεγέθυνση X120. Οπές στην επιφάνεια του λίθου



Εικόνα 16: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνα 10 έως 16 τεκμηριώνεται ο κατακερματισμός του λίθου εξαιτίας της απόπλυσης. Είναι εμφανείς ραβδοειδείς και πολυγωνικοί κρύσταλλοι του υλικού, ενώ διαπιστώνεται και έλλειψη συνοχής στην επιφάνεια. Στις Εικόνες 10 έως 12 εντοπίζονται επιπλέον μαύρες και πορτοκαλί επικαθίσεις που αποδίδονται στην ύπαρξη σωματιδίων σκόνης. Παράλληλα διακρίνεται ανάπτυξη βιοδιάβρωσης στις Εικόνες 14, 15 και 16. Στις Εικόνες 15 και 16 παρατηρείται ο σχηματισμός οπών στην επιφάνεια του λίθου, που πιθανώς να οφείλεται στη δράση των μικροοργανισμών.



Εικόνα 17: Μεγέθυνση X30. Υγιές τμήμα του λίθου



Εικόνα 18: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 19: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 20: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 21: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 22: Μεγέθυνση X50





Εικόνα 23: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 24: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 17 έως 24 παρουσιάζεται το υγιές τμήμα του δείγματος. Ο λίθος έχει λευκό χρώμα και οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη έχουν ραβδοειδή και πολυγωνική μορφή.

### J\_F\_OM



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30.  
Αλλοιωμένη επιφάνεια



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 4: Μεγέθυνση X30.  
Φαιόμαυρες περιοχές



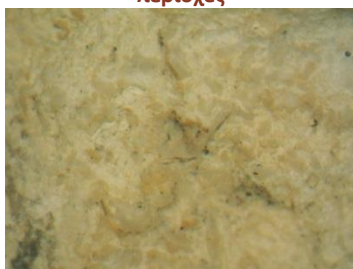
Εικόνα 5: Μεγέθυνση X30.  
Απώλεια υλικού στις καστανές περιοχές



Εικόνα 6: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 7: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 8: Μεγέθυνση X30

Οι επιφάνεια του δείγματος όπως φαίνεται στις παραπάνω Εικόνες είναι αλλοιωμένη από την απόπλυση. Στις Εικόνες 1 και 4 εντοπίζονται μαύρα στίγματα στην επιφάνεια του δείγματος. Στις Εικόνες 2, 5, 6 και 7 παρατηρούνται οι

κρύσταλλοι του λίθου και έντονο ανάγλυφο ιδιαίτερα στις καστανές περιοχές. Στις Εικόνες 3 και 8 είναι εμφανής η ανομοιομορφία της επιφάνειας.



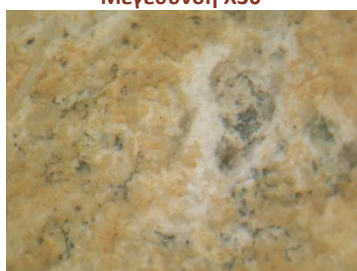
**Εικόνα 9: Μαύρες επικαθίσεις.  
Μεγέθυνση X30**



**Εικόνα 10: Μεγέθυνση X30**



**Εικόνα 11: Μεγέθυνση X30**



**Εικόνα 12: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 13: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 14: Μεγέθυνση X50**



**Εικόνα 15: Μεγέθυνση X50.  
Ραβδοειδείς κρύσταλλοι**



**Εικόνα 16: Μεγέθυνση X50.  
Επιφανειακή αλλοίωση**

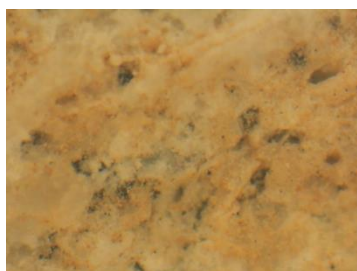


**Εικόνα 17: Μεγέθυνση X50**

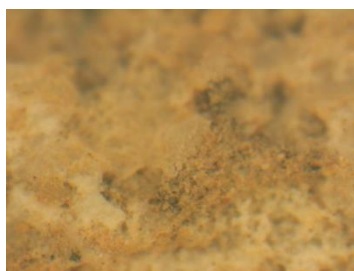


**Εικόνα 18: Μεγέθυνση X50.  
Ραβδοειδείς κρύσταλλοι**

Στις Εικόνες 9 έως 13 παρατηρούνται μαύρες επικαθίσεις πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Μάλιστα, στην Εικόνα 13 είναι εμφανής και η απώλεια υλικού στο σημείο την μαύρης περιοχής. Στις Εικόνες 14 έως 18 παρουσιάζονται οι ραβδοειδείς σχηματισμοί και κόκκοι του λίθου. Επιπλέον στην Εικόνα 16 παρατηρείται έντονο ανάγλυφο και ανομοιομορφία στην επιφάνεια.



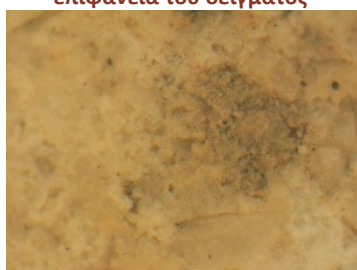
Εικόνα 19: Μεγέθυνση X120.  
Μαύρες επικαθίσεις στην  
επιφάνεια του δείγματος



Εικόνα 20: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 21: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 22: Μεγέθυνση X120

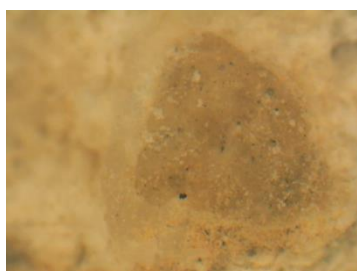


Εικόνα 23: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 24: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 19 έως 24 εξετάζονται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση οι μαύρες επικαθίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης διακρίνονται οι κόκκοι του λίθου.



Εικόνα 25: Μεγέθυνση X120.  
Καστανή περιοχή



Εικόνα 26: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 27: Μεγέθυνση X120

Στην Εικόνα 25 είναι εμφανής καστανή περιοχή πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται μαύρες επικαθίσεις. Στις Εικόνες 26 και 27 παρατηρούνται οι κόκκοι του λίθου που έχουν αποκαλυφθεί από την απόπλυση.



Εικόνα 28: Μεγέθυνση X30. Υγιές  
τμήμα του λίθου



Εικόνα 29: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 30: Μεγέθυνση X30





Εικόνα 31: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 32: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 33: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 34: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 35: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 28 έως 35 παρουσιάζεται το υγιές τμήμα του λίθου. Είναι εμφανείς και εδώ οι κόκκοι και οι ραβδοειδείς κρύσταλλοι του λίθου. Επιπλέον στην Εικόνα 33 εντοπίζεται μαύρο στίγμα στο λίθο.

#### 4.2.1.5 Δείγματα από περιοχές βιολογικής διάβρωσης

##### J\_F\_bio 1

Το δείγμα J\_F\_bio 1 προέρχεται από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια η οποία έχει υποστεί και βιολογική διάβρωση. Επομένως εξετάζοντας το δείγμα αυτό είναι εμφανείς οι συνέπειες και των δύο τύπων φθοράς. Στις Εικόνες 1, 3 και 7 παρατηρείται κατακερματισμός του λίθου, οποίος έχει προκληθεί και από τα δύο αίτια διάβρωσης. Ενδιάμεσα από τους κόκκους του λίθου έχουν σχηματιστεί μαύρες περιοχές. Στην Εικόνα 2 εκτός από του κόκκους του λίθου είναι εμφανής η ανάπτυξη καρπικών δομών, δηλαδή περιοχών όπου παράγονται οι σπόροι του μύκητα.



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30. Κατακερματισμένος λίθος από την απόπλυση και τη βιολογική διάβρωση



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X30. Καρπικές δομές



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X30



**Εικόνα 4: Μεγέθυνση Χ30.  
Καρπικές δομές και μαύρες  
κρούστες**



**Εικόνα 5: Μεγέθυνση Χ30**



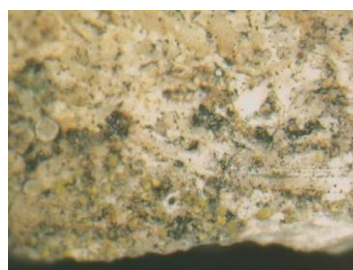
**Εικόνα 6: Μεγέθυνση Χ50.  
Ραβδοειδείς κρύσταλλοι λίθου**



**Εικόνα 7: Μεγέθυνση Χ50**

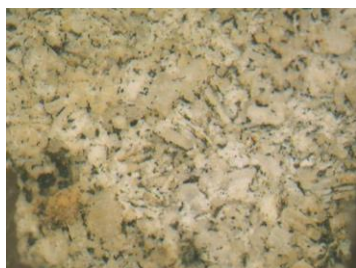


**Εικόνα 8: Μεγέθυνση Χ50.  
Φαιόμαυρη περιοχή και  
ανάπτυξη κίτρινων σχηματισμών**



**Εικόνα 9: Μεγέθυνση Χ50.  
Καρπικές δομές και  
κατακερματισμός λίθου**

Στις Εικόνες 4 και 9 εντοπίζονται καρπικές δομές καθώς και κίτρινοι σχηματισμοί που οφείλονται στη δράση των μικροοργανισμών. Επίσης έχουν σχηματιστεί και φαιόμαυρες περιοχές από την ανάπτυξη της βιοδιάβρωσης. Στις Εικόνες 5 και 8 παρατηρούνται κίτρινοι και μαύροι σχηματισμοί, προϊόντα της βιολογικής φθοράς. Στην Εικόνα 6 φαίνονται οι ραβδοειδείς σχηματισμοί και οι κόκκοι του λίθου που έχουν αποκαλυφθεί από την απόπλυση.



**Εικόνα 10: Μεγέθυνση Χ50.  
Κατακερματισμός λίθου και  
μαύροι σχηματισμοί**



**Εικόνα 11: Μεγέθυνση Χ50.  
Καρπικές δομές**



**Εικόνα 12: Μεγέθυνση Χ120.  
Μαύροι σχηματισμοί ανάμεσα  
στους κόκκους του λίθου**



**Εικόνα 13: Μεγέθυνση Χ120.  
Μαύροι σχηματισμοί από τη  
βιοδιάβρωση**



**Εικόνα 14: Μεγέθυνση Χ120**

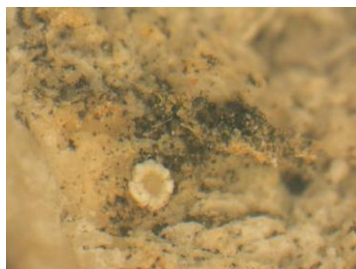


**Εικόνα 15: Μεγέθυνση Χ120**



Στην Εικόνα 10 παρατηρούνται οι ραβδοειδείς και πολυγωνικοί κρύσταλλοι του λίθου περιμετρικά των οποίων έχουν αναπτυχθεί μαύροι σχηματισμοί. Στο κάτω αριστερά τμήμα της ίδιας εικόνας εντοπίζονται φαιόμαυροι σχηματισμοί που οφείλονται στη βιοδιάβρωση. Στο αριστερό τμήμα της Εικόνας 11 διακρίνονται καρπικές δομές ενώ εμφανής είναι και η κατά τόπους ανάπτυξη κίτρινων σχηματισμών. Στις Εικόνες 12 και 13 εξετάζονται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση οι φαιόμαυροι σχηματισμοί ανάμεσα στους κόκκους του λίθου. Στην Εικόνα 15 είναι εμφανείς οι συνέπειες της απόπλυσης, καθώς ο λίθος παρουσιάζει έντονη ασυνέχεια και απώλεια υλικού.

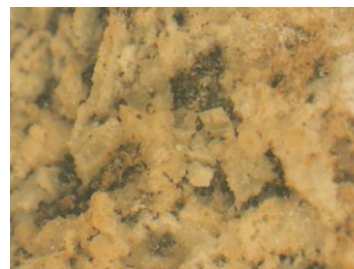
Στην Εικόνα 16 παρατηρούνται καρπικές δομές και κίτρινοι και μαύροι σχηματισμοί. Στις Εικόνες 17 και 18 ανάμεσα στους κόκκους του λίθου έχουν αναπτυχθεί επίσης φαιόμαυροι σχηματισμοί.



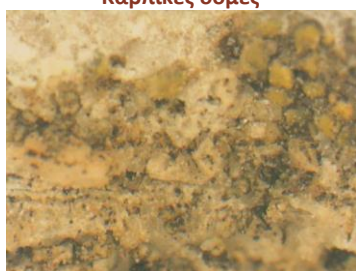
**Εικόνα 16: Μεγέθυνση X120.  
Καρπικές δομές**



**Εικόνα 17: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 18: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 19: Μεγέθυνση X120.  
Κίτρινοι σχηματισμοί**



**Εικόνα 20: Μεγέθυνση X120**



**Εικόνα 21: Μεγέθυνση X120.  
Διεπιφάνεια διαβρωμένης και  
υγιούς περιοχής**



**Εικόνα 22: Μεγέθυνση X120.  
Διεπιφάνεια διαβρωμένης και  
υγιούς περιοχής**

Στις Εικόνες 19 και 20 τεκμηριώνεται η ανάπτυξη κίτρινων σχηματισμών. Παράλληλα στην Εικόνα 20 παρατηρείται και η μαύρη χροιά στην επιφάνεια του λίθου, αποτέλεσμα των χρωστικών που παράγονται από του μικροοργανισμούς.

Επίσης στην Εικόνες 21 και 22 εξετάζεται η διεπιφάνεια της διαβρωμένης με την υγιή περιοχή του λίθου.



Εικόνα 23: Μεγέθυνση X30. Υγιής περιοχή δείγματος



Εικόνα 24: Μεγέθυνση X30



Εικόνα 25: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 26: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 27: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 23 έως 27 εξετάζεται το η υγιής περιοχή του λίθου, όπου παρατηρούνται οι ραβδοειδείς και πολυγωνικοί κρύσταλλοι του λίθου.

## J\_F\_bio 2



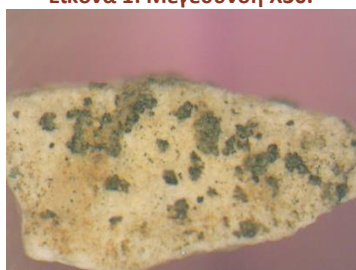
Εικόνα 1: Μεγέθυνση X30.



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 4: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 5: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 6: Μεγέθυνση X120.  
Βελονοειδής διάβρωση

Στις Εικόνες 1 και 2 είναι εμφανείς μαύροι σχηματισμοί στην επιφάνεια του δείγματος, ενώ οι ρωγμές που διακρίνονται μπορεί να είναι στυλόλιθοι. Στις Εικόνες



4 και 5 παρατηρούνται οπές μαύρου χρωματισμού μέσα στις οποίες έχουν αναπτυχθεί πορτοκαλοκάστανοι σχηματισμοί. Στην Εικόνα 6 εξετάζονται οι οπές σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Μέσα σε αυτές έχουν αναπτυχθεί δομές πορτοκαλή και φαιόμαυρης χροιάς που οφείλονται στην ανάπτυξη βιοδιάβρωσης.



Εικόνα 7: Μεγέθυνση X120.



Εικόνα 8: Μεγέθυνση X120.



Εικόνα 9: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 10: Μεγέθυνση X120

Στην Εικόνα 7 εξετάζεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση η ρωγμή. Μέσα στη ρωγμή παρατηρούνται μαύροι σχηματισμοί. Στις Εικόνες 8 έως 10 είναι εμφανής στο εσωτερικό των μαύρων κοιλοτήτων η ανάπτυξη μαύρων και καστανών σχηματισμών.



Εικόνα 11: Μεγέθυνση X30. Υγιής περιοχή δείγματος



Εικόνα 12: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 13: Μεγέθυνση X50



Εικόνα 14: Μεγέθυνση X120



Εικόνα 15: Μεγέθυνση X120

Στις Εικόνες 11 έως 15 παρουσιάζεται η υγιής περιοχή του δείγματος. Στην Εικόνα 11 έως 13 είναι εμφανής η ρωγμή στο πίσω μέρος του δείγματος. Στην Εικόνα 14 παρατηρούνται μαύρα στίγματα στο εσωτερικό του λίθου.

#### **4.2.1.6 Συμπεράσματα από την εξέταση των δειγμάτων με τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών**

Με τη βοήθεια της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών έγιναν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με την επιφανειακή φθορά των δειγμάτων. Εδώ αξίζει να αναφερθούν οι ομοιότητες που εντοπίζονται στα δείγματα που προέρχονται από τους ίδιους τύπους φθοράς.

**Δείγματα από περιοχές που προστατεύονται από το νερό της βροχής**

##### **Επιφάνειες μαύρης κρούστας**

Αρχικά τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν χρωματικές διαβαθμίσεις στην επιφάνεια της κρούστας και συγκεκριμένα εμφανίζουν μαύρες και καστανές περιοχές. Εμφανείς στα δύο αυτά δείγματα είναι επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης και αιθάλης, κυρίως με πορτοκαλοκάστανο και μαύρο χρώμα αντίστοιχα. Στο δείγμα **J\_F\_black 1** παρουσιάζεται συμπαγής συνεκτική μαύρη κρούστα που κατά τόπους έχει αποκολληθεί. Στο δείγμα **J\_F\_black 2** διακρίνονται περιοχές με διαφορετική μορφολογία εξαιτίας της χωροθέτησης τους. Η περιοχή που βρίσκεται εντός της εσοχής του ανάγλυφου και προστατεύεται από το νερό παρουσιάζει μία συνεκτική επιφάνεια μαύρης κρούστας με έντονο ανάγλυφο. Η περιοχή του δείγματος που εκτίθεται σε μεσαίο βαθμό στη βροχή εμφανίζει λεία υφή και καστανή χροιά. Τέλος, η λευκή επιφάνεια βρίσκεται τελειώς εκτεθειμένη στο βρόχινο νερό και έχει αποπλυθεί. Επομένως στο δείγμα αυτό παρουσιάζεται η σταδιακή απόπλυση της επιφάνειας.

Μελετώντας τις διεπιφάνειες κρούστας – λίθου παρατηρείται και στα δύο δείγματα η παρεμβολή μίας πορτοκαλόχρωμης ζώνης ανάμεσα στα δύο στρώματα. Η πορτοκαλόχροα ζώνη μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη ενδιάμεσου στρώματος διαφορετικής ενδεχομένως σύστασης κάτω από την μαύρη κρούστα.

##### **Επιφάνειες πορτοκαλοκάστανης χροιάς**

Το δείγμα από την πορτοκαλόχροα περιοχή **J\_F\_orange** έχει μία πορτοκαλί και μία καστανή περιοχή. Η πορτοκαλή περιοχή είναι λεία και εμφανίζει μαύρες επικαθίσεις, ενώ αντίθετα στην καστανή περιοχή διακρίνεται ιδιαίτερη ανομοιογένεια και επιφανειακή αλλοίωση.

## Δείγματα από περιοχές εκτεθειμένες στο νερό της βροχής

### Αποπλυμένες επιφάνειες

Στην περίπτωση των δειγμάτων από αποπλυμένες επιφάνειες (**J\_F\_white, J\_F\_OM**) παρατηρείται έντονα ανάγλυφη επιφάνεια και έλλειψη συνοχής του υλικού. Ο λίθος έχει κατακερματιστεί από την απόπλυση και έχουν αποκαλυφθεί οι ραβδοειδείς και οι πολυγωνικοί κόκκοι του ασβεστίτη. Ανάμεσα στους κόκκους είναι εμφανείς πορτοκαλί και μαύροι σχηματισμοί, οι οποίοι οφείλονται σε επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης και αιθάλης. Στο δείγμα **J\_F\_white** παρατηρήθηκε και ανάπτυξη βιοδιάβρωσης, καθώς και οπές σε περιοχή του λίθου που πιθανώς να προκλήθηκαν από τη συνέργεια απόπλυσης και βιολογικής φθοράς.

### Επιφάνειες βιοδιάβρωσης

Στο πρώτο δείγμα βιοδιάβρωσης (**J\_F\_bio 1**) που εξετάστηκε είναι εμφανείς οι συνέπειες της βιοδιάβρωσης αλλά και της απόπλυσης. Παρατηρείται απώλεια υλικού και κατακερματισμός του λίθου που οφείλονται και στους δύο τύπους φθοράς. Το δείγμα παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, ενώ είναι ευδιάκριτοι και οι λοβοειδείς και πολυγωνικοί κόκκοι του λίθου. Ανάμεσα στους κόκκους παρατηρούνται μαύρες και καστανές περιοχές που προέρχονται από χρωστικές λόγω του κύκλου μεταβολισμού των μικροοργανισμών και σε επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Παράλληλα στο δείγμα αυτό εντοπίζονται πορτοκαλοκάστανι και κίτρινοι σχηματισμοί καθώς και καρπικές δομές, που είναι αποτέλεσμα της βιοδιάβρωσης.

Στο δεύτερο δείγμα γίνονται επίσης αντιληπτές οι συνέπειες της βιοδιάβρωσης. Στο δείγμα **J\_F\_bio 2** διακρίνονται ρωγμές που μπορεί να αποδίδονται σε στυλόλιθους. Στις παρυφές της ρωγμής έχουν αναπτυχθεί φαιόμαυροι και καστανοί σχηματισμοί που οφείλονται στη βιοδιάβρωση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί σε δύο πιθανά σενάρια. Το πρώτο σενάριο είναι η ρωγμή αυτή να προϋπήρχε και να αποτέλεσε κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη βιοδιάβρωσης. Με βάση το δεύτερο σενάριο, η ρωγμή προκλήθηκε εξαιτίας της άσκησης τάσεων στο λίθο από την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Ωστόσο, πιθανότερη είναι η πρώτη υπόθεση. Στην επιφάνεια του δείγματος παρατηρούνται και μαύρες οπές, εσωτερικά των οποίων βρίσκονται καστανοί σχηματισμοί, που σχετίζονται με τη βιολογική φθορά.

### Παρατηρήσεις από την εξέταση του υγιούς τμήματος του λίθου

Στο σημείο αυτό αξίζει αναφερθούν κάποιες παρατηρήσεις που προέκυψαν από την εξέταση των υγιών τμημάτων των δειγμάτων με τη μέθοδο της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών.

1. Ο λίθος που εξετάστηκε έχει λευκό χρώμα, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τη μακροσκοπική παρατήρηση της πρόσοψης του Ναού, όπου διαπιστώνεται ότι ολόκληρη η επιφάνεια έχει καστανή και πορτοκαλί χροιά.
2. Σε όλα τα δείγματα ο λίθος ήταν συμπαγής και οι κόκκοι ήταν εμφανείς.
3. Τα δείγματα J\_F\_black 1, J\_F\_black 2 και J\_F\_bio 2 έχουν ίδιο μέγεθος και ίδιο σχήμα κόκκων. Επιπλέον τα δείγματα J\_F\_orange, J\_F\_white, J\_F\_OM και J\_F\_bio1 παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογία κόκκων.



Εικόνα 1: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_black 1



Εικόνα 2: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_black 2



Εικόνα 3: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_bio2



Εικόνα 4: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_black 1



Εικόνα 5: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_black 2



Εικόνα 6: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_bio2

Στις Εικόνες 1 έως 6 παρουσιάζονται οι υγιείς πλευρές των δειγμάτων J\_F\_black 1, J\_F\_black 2 και J\_F\_bio 2. Οι κόκκοι στα δείγματα αυτά έχουν σχετικά ίδια μορφολογία και μέγεθος, επίσης είναι κυρίως πολυγωνικού σχηματισμού.



Εικόνα 7: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_orange



Εικόνα 8: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_white



Εικόνα 9: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_OM



Εικόνα 10: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_orange



Εικόνα 11: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_white



Εικόνα 12: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_OM



Εικόνα 13: Μεγέθυνση X50.  
J\_F\_bio1

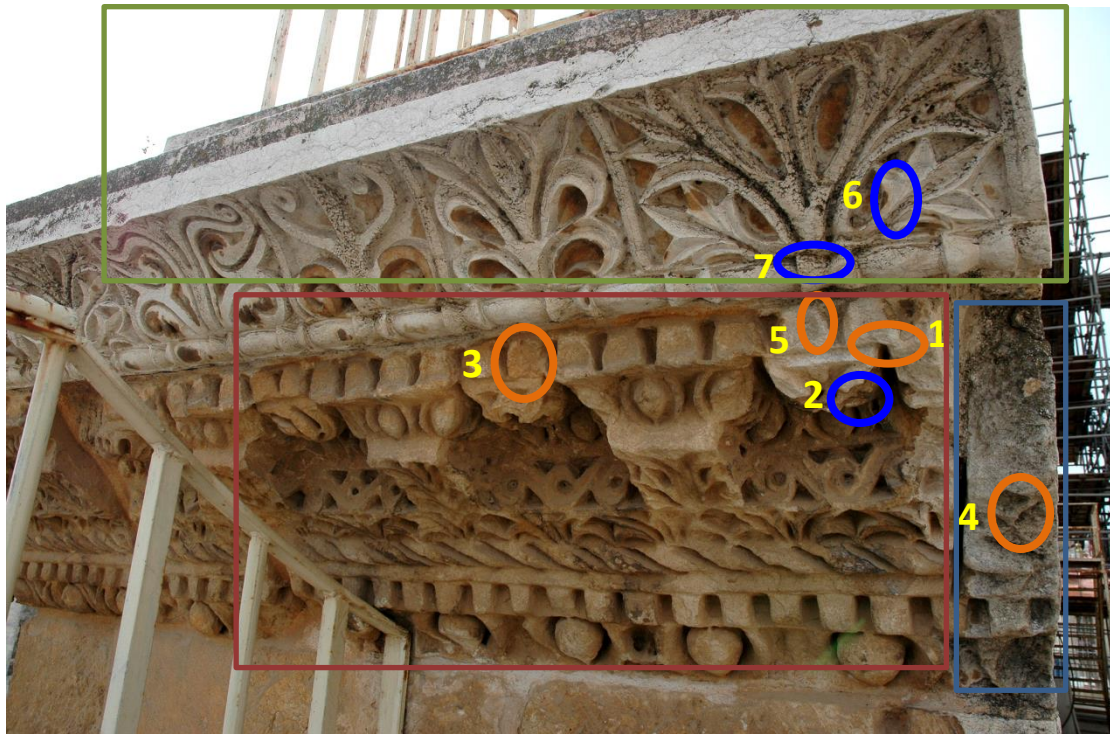


Εικόνα 14: Μεγέθυνση X120.  
J\_F\_bio1

Επιπρόσθετα στις Εικόνες 7 έως 14 ελέγχεται η υγιής επιφάνεια των δειγμάτων J\_F\_orange, J\_F\_white, J\_F\_OM και J\_F\_bio1. Στην επιφάνεια αυτή παρατηρείται έντονη ανομοιογένεια καθώς και οι λοβοειδείς κόκκοι του ασβεστίτη. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι συναντώνται δύο τύποι μορφολογίας κόκκων στα δείγματα.

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση του γείσο δεν είναι δυνατό να διαπιστώσουμε, αν είναι κατασκευασμένο από ένα ενιαίο ή τρεις διαφορετικούς δομόλιθους. Υπάρχει η πιθανότητα το γείσο να αποτελείται από τρεις δομόλιθους, οι οποίοι βρίσκονται εντός των πλαισίων της Εικόνας 4.1. Όπως φαίνεται στη Εικόνα τα δείγματα J\_F\_black 1, J\_F\_black 2 και J\_F\_bio 2 έχουν ληφθεί από τα σημεία 2, 6 και 7 αντίστοιχα. Επίσης τα δείγματα J\_F\_orange, J\_F\_white, J\_F\_OM και J\_F\_bio1 προέρχονται από τα σημεία 3, 5, 1 και 4 αντίστοιχα. Από την παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων των υγιών περιοχών των δειγμάτων προκύπτει η χρήση του ίδιο δομικού λίθου είτε πρόκειται για ενιαίο είτε για τρεις διαφορετικούς δομόλιθους.





Εικόνα 4.1: Θέσεις δειγματοληψίας – Στερεά δείγματα

Πίνακας 4.3: Στερεά δείγματα

1	J_F_OM	Μεγάλο δείγμα για OM από αποπλυμένη επιφάνεια	5	J_F_white	Γείσο, λευκή αποπλυμένη επιφάνεια
2	J_F_black1	Γείσο, μαύρη κρούστα, J_F_black	6	J_F_black2	9, πάνω μέρος γείσου, μαύρη κρούστα, J_F_black_up
3	J_F_orange	Γείσο, πορτοκαλοκάστανη περιοχή	7	J_F_bio2	10, πάνω μέρος γείσου, μαύρη βιοδιάβρωση σε λευκή περιοχή, J_F_bio_up
4	J_F_bio1	Γείσο, λευκή-μαύρη βιοδιάβρωση, J_F_bio			



#### **4.2.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων X (SEM – EDX)**

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης έλαβαν χώρα προκειμένου να διαπιστωθεί η φθορά που οφείλεται τόσο στην ατμοσφαιρική ρύπανση όσο και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών. Ελέγχθηκε η επιφάνεια των δειγμάτων, ενώ σε μερικές περιπτώσεις και η τομή τους κατόπιν ειδικής κατεργασίας και εγκυβοτισμού τους σε ρητίνη, έτσι ώστε να υπολογισθεί το πάχος της φθοράς. Η στοιχειακή ανάλυση έγινε εφικτή με τη βοήθεια της μικροανάλυσης ακτίνων X. Η αρίθμηση των εικόνων και των σχημάτων ξεκινάει από την αρχή για κάθε δείγμα.

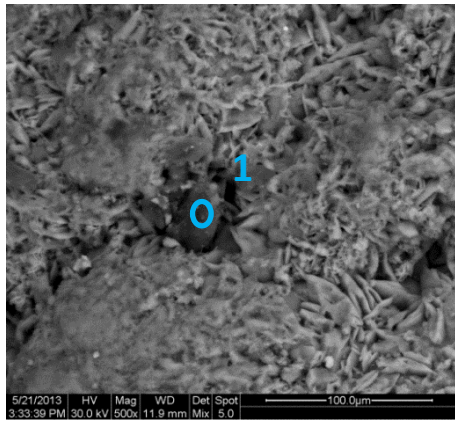
##### **4.2.2.1 Δείγματα από περιοχή μαύρης κρούστας**

###### **J\_F\_black 1**

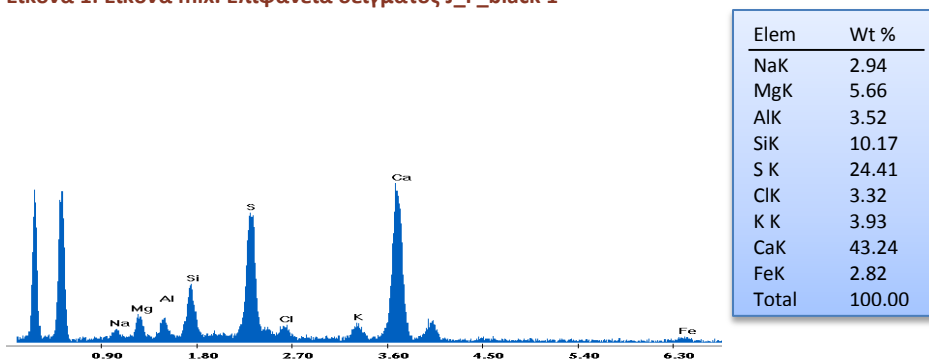
Το δείγμα με τον κωδικό J\_F\_black1 προέρχεται από περιοχή μαύρης κρούστας. Από τη μακροσκοπική παρατήρηση του δείγματος παρατηρούνται περιοχές μαύρης και μπεζ απόχρωσης, οι οποίες θα εξεταστούν ξεχωριστά.

###### **Μπεζ περιοχή**

Από τις μετρήσεις που έγιναν στην επιφάνειά του δείγματος διαπιστώνεται η έντονη παρουσία του γύψου με διάφορες μορφές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 ο γύψος εμφανίζεται κυρίως με φυλλοειδή, βελονοειδή μορφή και ομοιόμορφους σχηματισμούς.

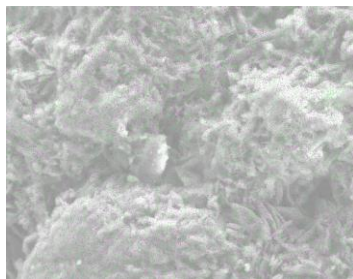


**Εικόνα 1: Εικόνα mix. Επιφάνεια δείγματος J\_F\_black 1**

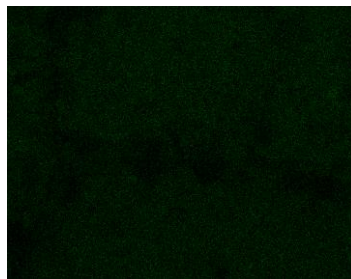


**Σχήμα 1: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο σημείο 1 της Εικόνας 1**

Με τη βοήθεια της μικροανάλυσης ακτίνων Χ διαπιστώθηκε ότι ο μαύρος κόκκος που εντοπίζεται στην επιφάνεια αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από ασβεστίτη και γύψο (περιεκτικότητα σε θείο 24,4% κ.β.), ενώ περιέχει και κάποια ποσότητα πυριτίου (10% κ.β.) και μαγνησίου (5,66% κ.β.). Στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση στην ευρύτερη επιφάνεια με μικροανάλυση ακτίνων Χ, έτσι ώστε να απεικονιστούν οι διάφορες περιοχές στις οποίες απαντάται το κάθε στοιχείο.



**Εικόνα 2: Εικόνα SEI**



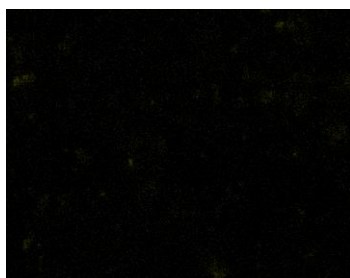
**Εικόνα 3: Κατανομή ασβεστίου (Ca)**



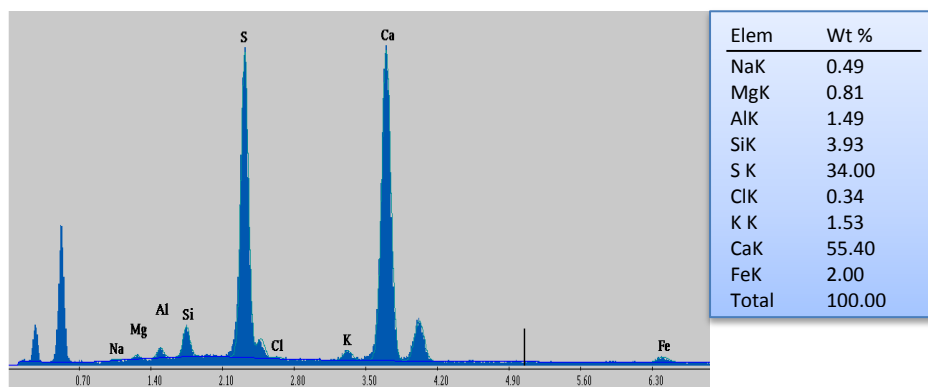
**Εικόνα 4: Κατανομή θείου (S)**



Εικόνα 5: Κατανομή σιδήρου Fe



Εικόνα 6: Κατανομή πυριτίου (Si)

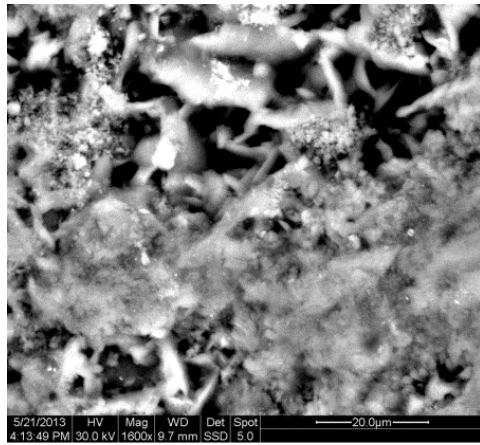


Σχήμα 2: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια της Εικόνας 2

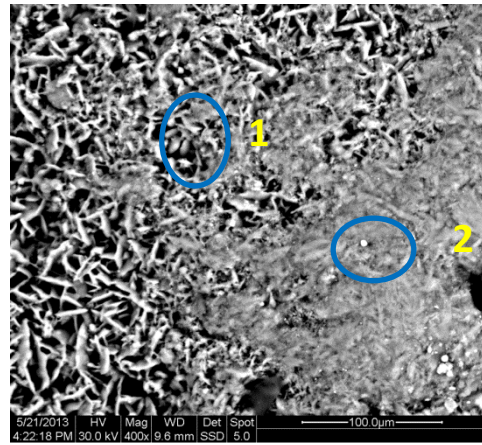
Από τις εικόνες που ακολουθούν διαπιστώνεται ότι ο γύψος βρίσκεται σε ολόκληρη την εξεταζόμενη επιφάνεια και η σύστασή του είναι 34% κ.β. Επίσης στο κάτω αριστερά τμήμα της Εικόνας 2 εμφανίζεται συγκεντρωμένος ο σίδηρος ο οποίος έχει περιεκτικότητα 2%. Τέλος οι σχηματισμοί του πυριτίου (3,93%) είναι εμφανής σε πολλά σημεία της περιοχής αυτής.

### Μαύρη περιοχή

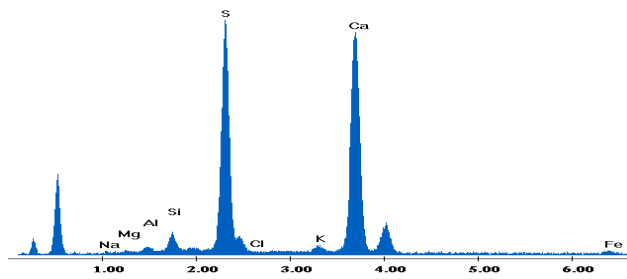
Στην Εικόνα 7 απαντάται ο γύψος με βελονοειδή μορφή, ενώ διακρίνονται και λείοι ομοιογενείς σχηματισμοί. Στην Εικόνα 8 παρατηρείται εναλλαγή της βελονοειδούς μορφής με ομοιόμορφους σχηματισμούς. Σε δύο σημεία της Εικόνας 8 πραγματοποιήθηκε μεγέθυνση. Η Εικόνα 9 αποτελεί μεγέθυνση στο Σημείο 1, όπου εντοπίζεται ο γύψος σε μορφή κόκκου. Η Εικόνα 10 είναι μεγέθυνση στο Σημείο 2. Ο λευκός σχηματισμός βρέθηκε ύστερα με μικροανάλυση ακτίνων X ότι οφείλεται στην ύπαρξη βαρίου (54,78%).



**Εικόνα 7: Εικόνα BSE**

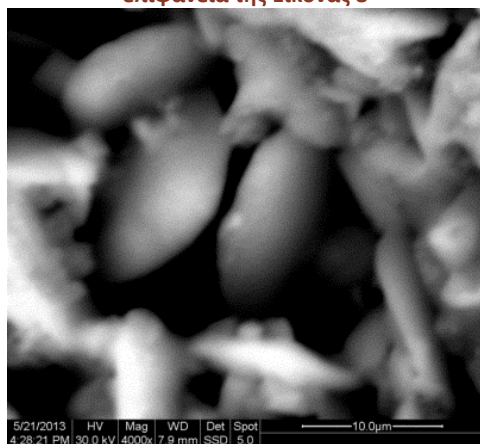


**Εικόνα 8: Εικόνα BSE**

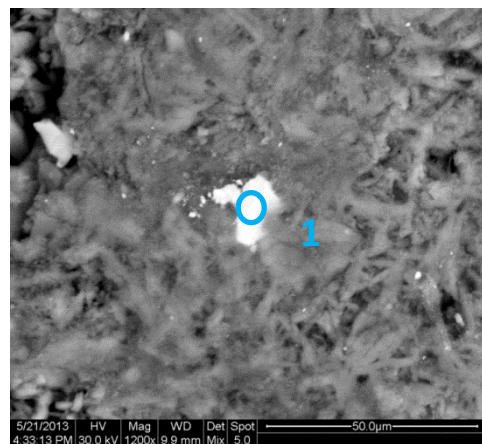


**Σχήμα 3: Μικροανάλυση ακτίνων X στην συνολική επιφάνεια της Εικόνας 8**

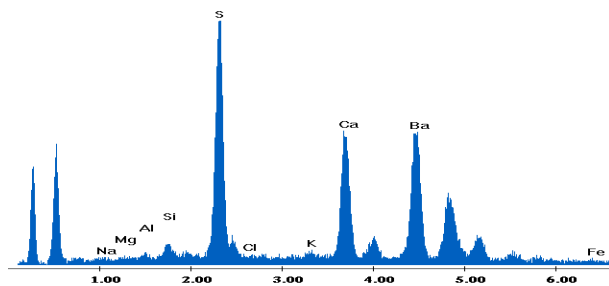
Elem	Wt %
NaK	0.68
MgK	0.36
AlK	0.99
SiK	3.22
S K	35.47
K K	1.44
CaK	56.37
FeK	1.49
Total	100.00



**Εικόνα 9: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση X4000 στο σημείο 1 της Εικόνας 8. Ο κοκκώδης σχηματισμός αποτελείται κυρίως από γύψο.**



**Εικόνα 10: Εικόνα mix. Μεγέθυνση X1200 στο σημείο 2 της Εικόνας 8. Ο λευκός σχηματισμός έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε βάριο**



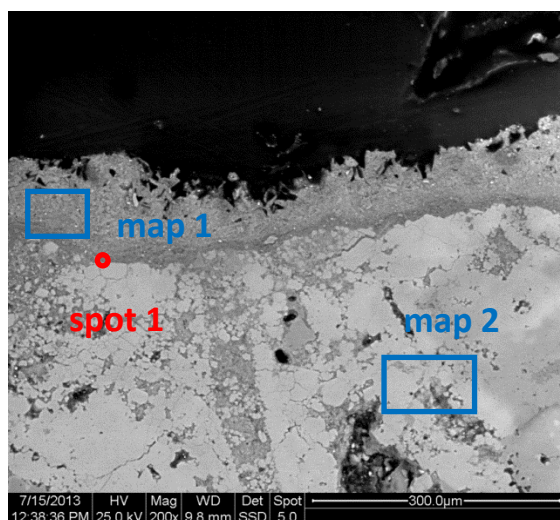
Elem	Wt %
NaK	0.72
MgK	0.56
AlK	0.86
SiK	2.05
S K	25.65
ClK	0.38
K K	0.78
CaK	13.71
BaL	54.78
FeK	0.49
Total	100.00

Σχήμα 4: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο σημείο 1 της Εικόνας 10

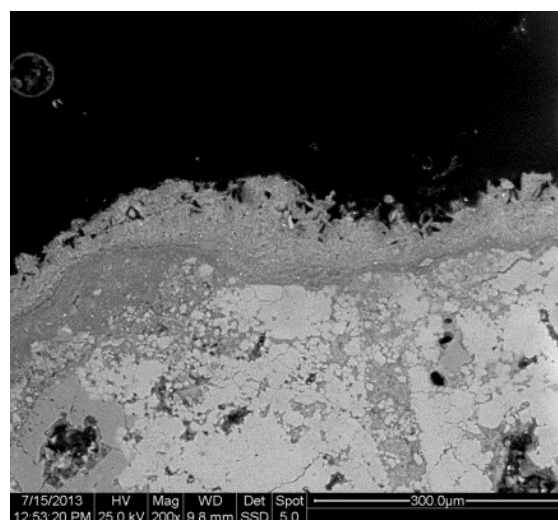
### Πλάγια τομή

Στη συνέχεια εξετάστηκε και η πλάγια τομή του δείγματος J\_F\_black 1. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκαν τα στρώματα της φθοράς και προσδιορίστηκε το πάχος τους.

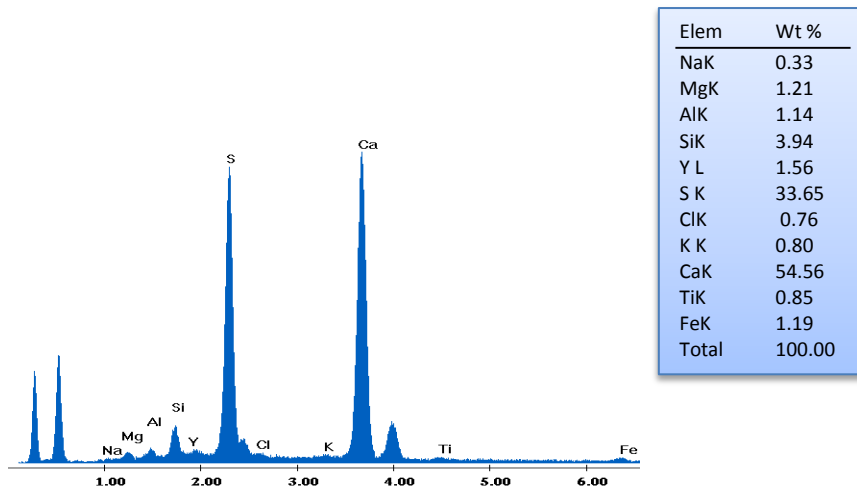
Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η τομή του δείγματος J\_F\_black 1. Παρατηρούνται το στρώμα του γύψου, ένα ενδιάμεσο στρώμα και το στρώμα του ασβεστίτη. Πραγματοποιείται στοιχειακή ανάλυση για τις τρεις περιοχές, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η σύστασή τους.



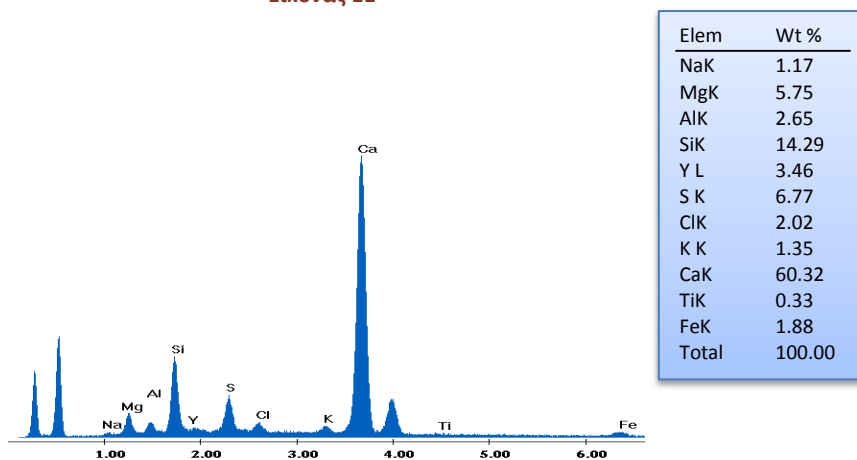
Εικόνα 11: Εικόνα BSE. Τομή δείγματος J\_F\_black 1



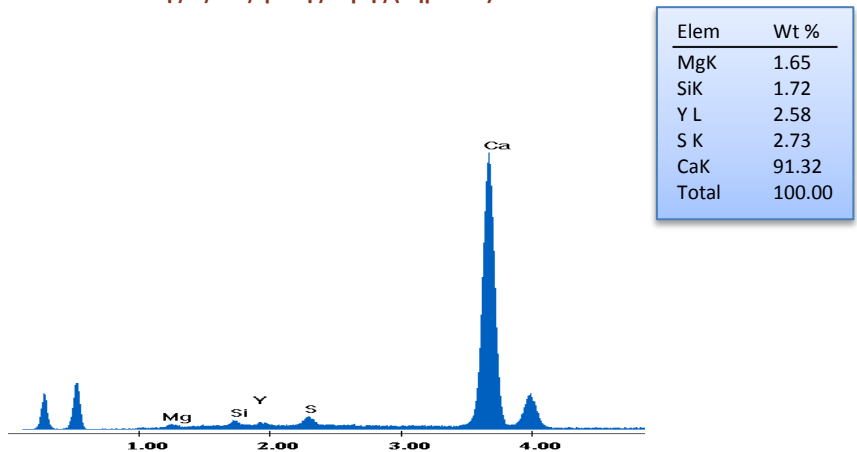
Εικόνα 12: Εικόνα BSE. Τομή J\_F\_black 1



Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων X στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 11



Σχήμα 6: Μικροανάλυση ακτίνων X στο ενδιάμεσο στρώμα της εξεταζόμενης τομής (Σημείο 1)



Σχήμα 7: Μικροανάλυση ακτίνων X στο τρίτο στρώμα της τομής (map2)

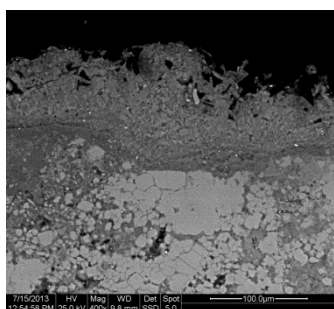
Από τη στοιχειακή ανάλυση διαπιστώνεται ότι το πρώτο στρώμα της επιφάνειας αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από γύψο (33,65% κ.β.), ενώ εντοπίζεται και μικρή ποσότητα πυριτίου (3,94% κ.β.), μαγνησίου (1,21% κ.β.) και σιδήρου (1,19% κ.β.). Το πάχος του στρώματος αυτού υπολογίζεται περίπου ίσο με 85μm.



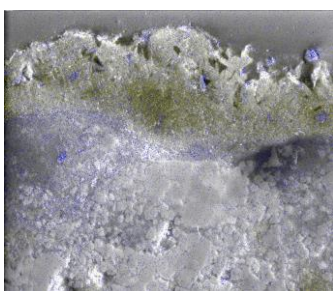
Η ενδιάμεση περιοχή παρουσιάζει μεγάλη ποσότητα ασβεστίου (60,32%) και πυριτίου (14,29% κ.β.), όπως φαίνεται από την μικροανάλυση ακτίνων Χ. Επίσης ανιχνεύεται ποσότητα μαγνησίου (5,75% κ.β. ), αργιλίου (2,65% κ.β.) και σιδήρου (1,88% κ.β.). Το πάχος της ενδιάμεσης περιοχής υπολογίζεται περίπου ίσο με 25  $\mu\text{m}$ .

Στην τρίτη περιοχή ανήκει το σχεδόν υγιές τμήμα του λίθου, αφού αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ασβεστίτη. Ο γύψος εμφανίζεται με πολύ μικρή σύσταση (S: 2,73% κ.β.), ενώ εντοπίζεται και μαγνήσιο (5,75% κ.β.). Επιπλέον ανιχνεύεται πυρίτιο με σύσταση 1,72% κ.β.

Από την Εικόνα 12 το πάχος του πρώτου στρώματος που περιέχει γύψο υπολογίστηκε περίπου 100  $\mu\text{m}$ , ενώ το πάχος του στρώματος πυριτικής σύστασης είναι περίπου ίσο με 30  $\mu\text{m}$ . Σε κάποια σημεία της Εικόνας 12 η πυριτική περιοχή φαίνεται να εισχωρεί στο υγιές τμήμα του λίθου, συνεπώς θα μπορούσε να αποτελεί ένα είδος στερεωτικού ή προστατευτικού μέσου, που είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν.



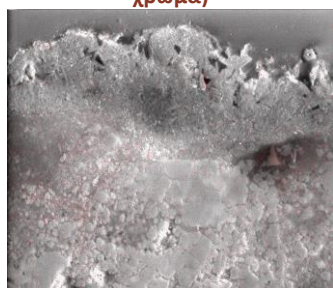
Εικόνα 13: BSE τομή J\_F\_black 1



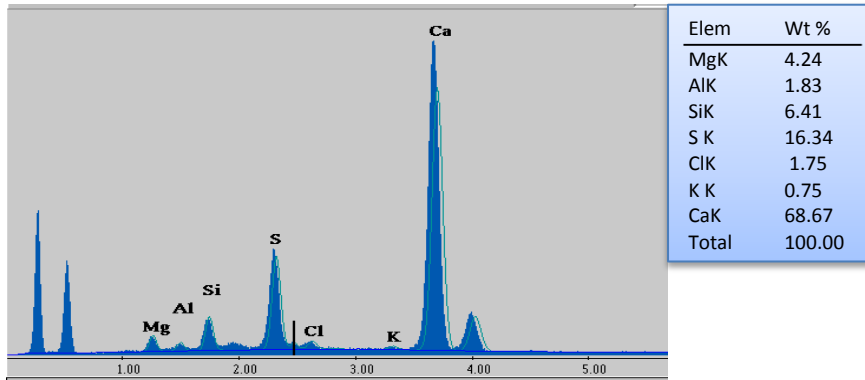
Εικόνα 14: Κατανομή θείου (κίτρινο χρώμα) – πυριτίου (μπλε χρώμα)



Εικόνα 15: Κατανομή ασβεστίου (κόκκινο χρώμα) – θείου (κίτρινο χρώμα)

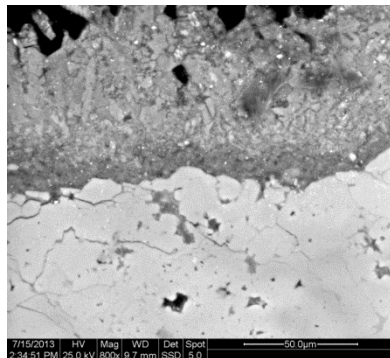


Εικόνα 16: Κατανομή μαγνησίου (κόκκινο χρώμα)

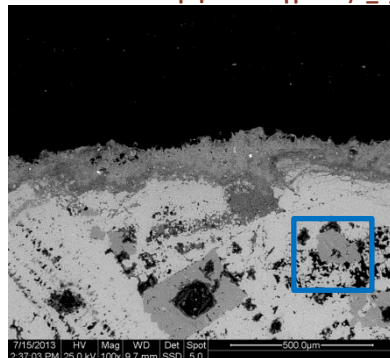


Σχήμα 8: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 13

Στην περιοχή της Εικόνας 13 έγινε και χαρτογράφηση με μικροανάλυση ακτίνων Χ για να διαπιστωθεί η κατανομή των διάφορων στοιχείων στην επιφάνεια. Από τις τρεις κατανομές επιβεβαιώνεται η παρουσία του γύψου στην εξωτερική επιφάνεια του δείγματος και του πυριτίου στην ενδιάμεση. Ωστόσο το πυρίτιο παρατηρείται και στη ζώνη του γύψου αλλά και σε περιοχές της ζώνης του ασβεστίου, όπου το στρώμα πυριτικής σύστασης φαίνεται να εισχωρεί ανάμεσα στους κόκκους του λίθου. Το πυρίτιο φαίνεται να εισχωρεί από την επιφάνεια της κρούστας στο λίθο μέχρι περίπου 172  $\mu\text{m}$ , ενώ από το τέλος της κρούστας φτάνει περίπου 82  $\mu\text{m}$  στο εσωτερικό του λίθου. Επίσης το μαγνήσιο εντοπίζεται κυρίως στο τρίτο στρώμα της τομής και συγκεκριμένα σε περιοχές που υπάρχουν κρύσταλλοι δολομίτη. Στο σύνολο της περιοχής το θείο έχει περιεκτικότητα 16,34%, το ασβέστιο 68,67% , το πυρίτιο 6,41% και το μαγνήσιο 4,24% κ.β.



Εικόνα17: Εικόνα BSE. Τομή του δείγματος J\_F\_black 1

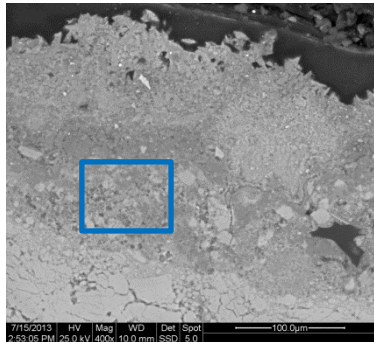


Εικόνα 18: Εικόνα BSE. Τομή του δείγματος J\_F\_black 1

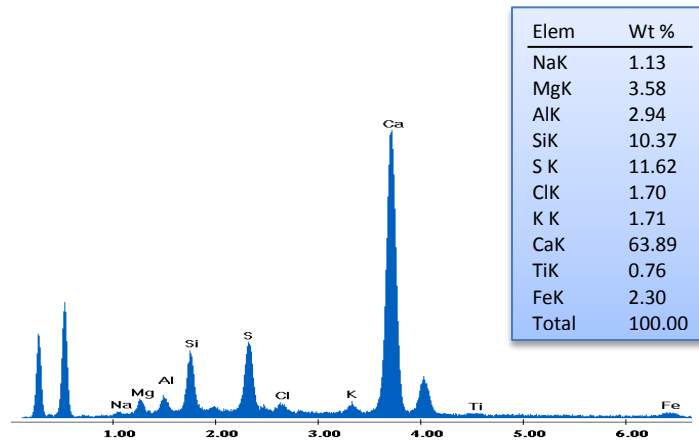
Και την Εικόνα 17 είναι ευδιάκριτες οι τρεις ζώνες.

Στην Εικόνα 18 εμφανίζεται και ένας κρύσταλλος δολομίτη.

Για την κατανόηση της σύστασης στην ενδιάμεση περιοχή πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση στο τμήμα που συνδέεται η ζώνη του πυριτίου με την ζώνη του ασβεστίτη, το οποίο απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Από τη στοιχειακή ανάλυση διαπιστώνεται ότι ο ασβεστίτης, το πυρίτιο και ο γύψο συνυπάρχουν σε αυτή την περιοχή. Επίσης εμφανίζεται μαγνήσιο, αργίλιο και σίδηρος.

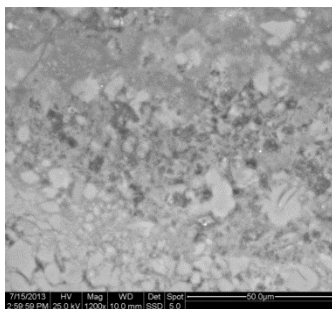


**Εικόνα 19:** Εικόνα BSE. Περιοχή μεταξύ πυριτικής ζώνης και ζώνης ασβεστίου

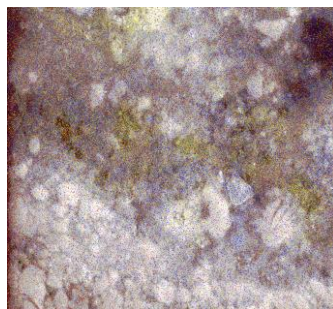


**Σχήμα 9:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην περιοχή ανάμεσα στη ζώνη πυριτίου και ασβεστίτη

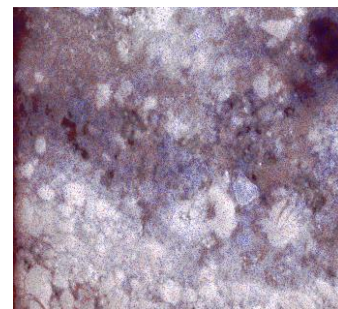
Επιπλέον στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση με μικροανάλυση ακτίνων Χ προκειμένου να γίνει σαφής η κατανομή των στοιχείων. Στην κατανομή που ακολουθεί διακρίνεται η διάταξη του θείου, οι κόκκοι του ασβεστίτη, καθώς και οι σχηματισμοί του πυριτίου.



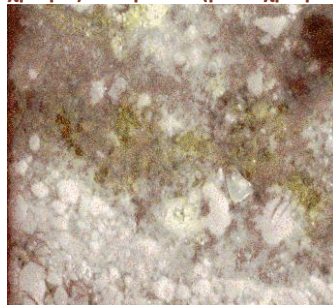
**Εικόνα 20:** Εικόνα BSE. Περιοχή μεταξύ ζώνης πυριτίου και ασβεστίου



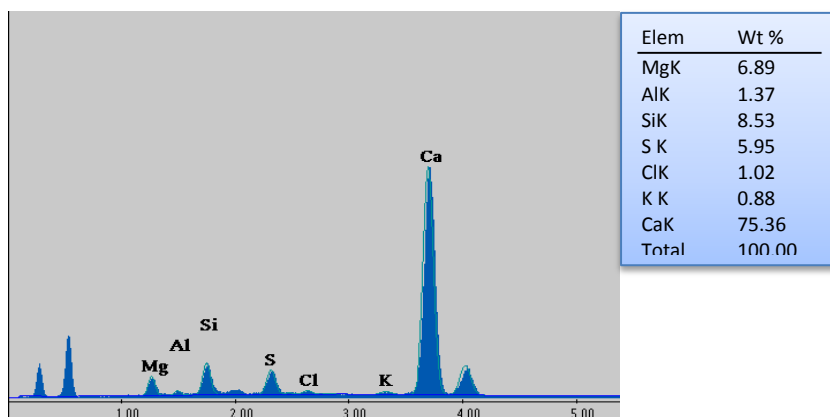
**Εικόνα 21:** Κατανομή ασβεστίου (κόκκινο χρώμα) – θείου (κίτρινο χρώμα) – πυριτίου (μπλε χρώμα)



**Εικόνα 22:** Κατανομή ασβεστίου (κόκκινο χρώμα) – πυριτίου (μπλε χρώμα)



**Εικόνα 23:** Κατανομή ασβεστίου (κόκκινο χρώμα) – θείου (κίτρινο χρώμα)



Σχήμα 10: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 20

Όπως γίνεται σαφές, η πυριτική ένωση βρίσκεται κάτω από τη στοιβάδα του γύψου και σε περιοχές βρίσκεται και γύρω από τους κρυστάλλους του ασβεστίτη, συνεπώς δεν μπορεί να προέρχεται από επικαθίσεις σκόνης αλλά πρόκειται για υλικό πυριτικής σύστασης που έχει χρησιμοποιηθεί για την προστασία του λίθου.

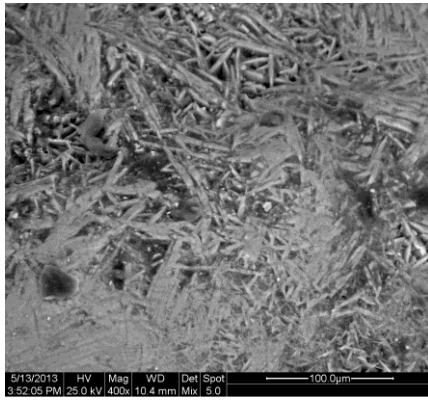
### J\_F\_black 2

Το δείγμα J\_F\_black 2 προέρχεται επίσης από περιοχή μαύρης κρούστας. Όπως διαπιστώθηκε από τη φωτογραφική τεκμηρίωση και τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών το δείγμα αποτελείται από 3 περιοχές: τη μαύρη, την καφέ και τη λευκή.

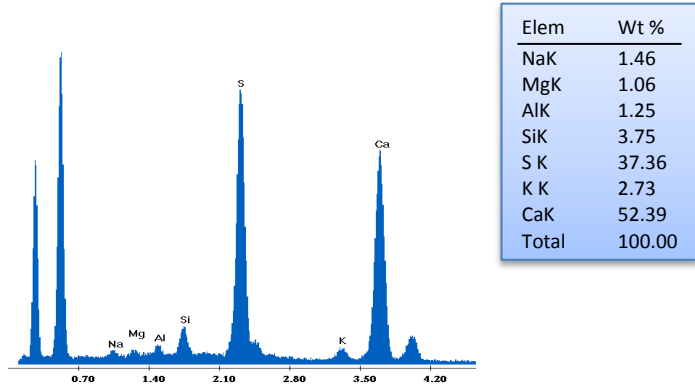
### Μαύρη περιοχή

Στην Εικόνα 1 παρατηρούνται ομοιόμορφοι και ραβδόμορφοι σχηματισμοί του γύψου. Από τη μικροανάλυση με ακτίνες Χ στην επιφάνεια επιβεβαιώνεται η ύπαρξη του γύψου από την υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (37,36%), ενώ εμφανίζεται και πυρίτιο (3,75%).

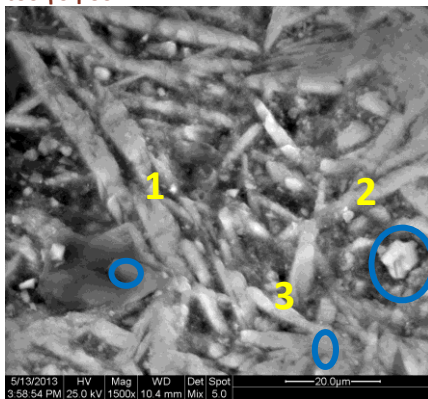
Μελετώντας αναλυτικότερα την επιφάνεια (Εικόνα 2) παρουσιάζεται η ραβδόμορφη δομή του γύψου, ενώ εντοπίζονται και άλλου είδους σχηματισμοί στην επιφάνεια, όπως λευκοί και γκριζοί κόκκοι, οι οποίοι μπορούν να αποδοθούν σε επικαθίσεις σκόνης. Πραγματοποιήθηκε μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 2, στο οποίο βρίσκεται γκριζος λείος σχηματισμός και διαπιστώθηκε ότι τα κύρια συστατικά του είναι το ασβέστιο (44,51%) και το θείο (32,74%). Επίσης περιέχονται σε αυτό το σχηματισμό χλώριο (7,65%), νάτριο (5,50%), κάλιο (5,47%), πυρίτιο (2,85%) και αργίλιο (1,28%).



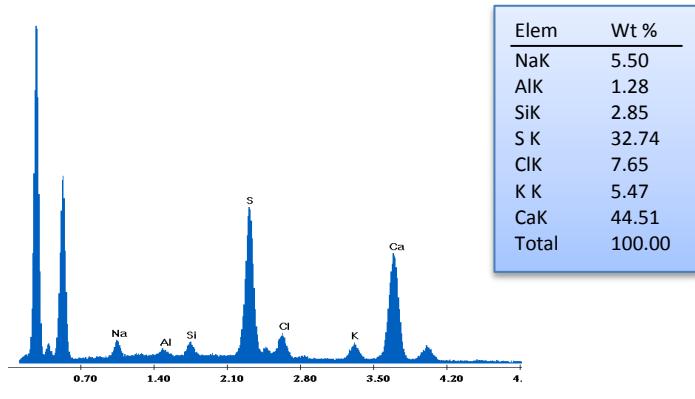
**Εικόνα 4.2:** Εικόνα μικ. Ραβδόμορφοι και ομοιόμορφοι σχηματισμοί κρυστάλλων του γύψου



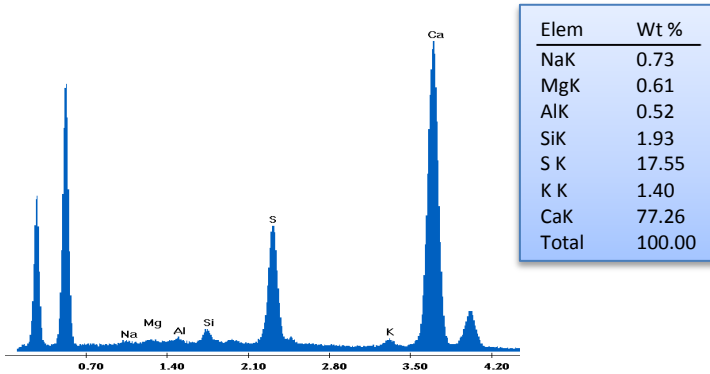
**Σχήμα 1:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 1



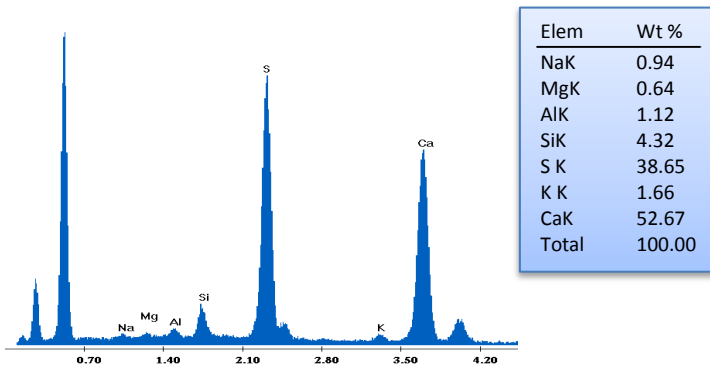
**Εικόνα 2:** Εικόνα μικ. Ραβδόμορφοι, κοκκώδεις και ομοιόμορφοι σχηματισμοί που οφείλονται στην παρουσία γύψου



**Σχήμα 2:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 2



**Σχήμα 3:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 2 της Εικόνας 2



**Σχήμα 4:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 3 της Εικόνας 2

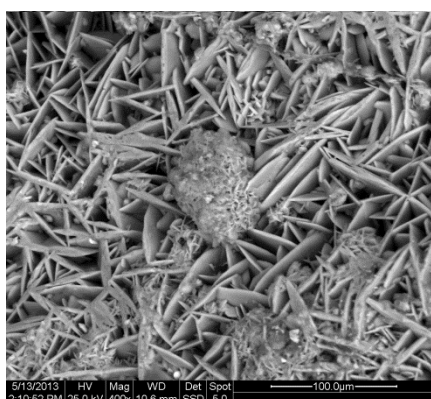


Μικροανάλυση ακτίνων Χ πραγματοποιήθηκε και στο λευκό κόκκο (Σημείο 2) της Εικόνας 2. Η δομή αυτή αποτελείται κυρίως από ασβέστιο (77,26%). Η περιεκτικότητα σε θείο είναι ίση με 17,55%, ενώ στη δομή αυτή περιέχονται επίσης πυρίτιο (1,93%) και κάλιο (1,40%).

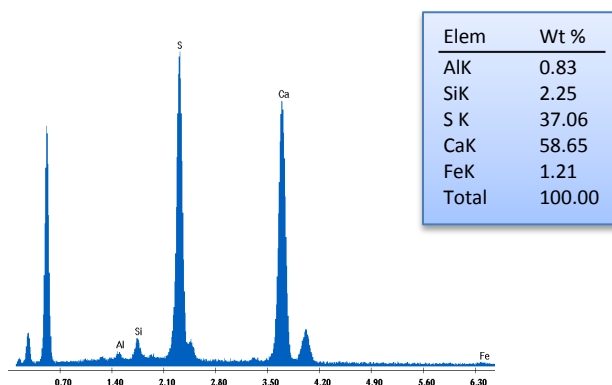
Από τη στοιχειακή ανάλυση στη βελονοειδή δομή της Εικόνας 2 (Σημείο 3) συμπεραίνεται ότι αυτή αποτελείται κυρίως από ασβέστιο (52,67%) και θείο (38,65%). Παράλληλα ανιχνεύεται και κάποια ποσότητα πυριτίου (4,32%), καλίου (1,66%) και αργιλίου (1,12%).

### Καφέ περιοχή

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται σπογγοειδείς σχηματισμοί συσσωματωμάτων κρυστάλλων του γύψου ραβδοειδούς μορφής, ορατοί είναι και λευκοί κόκκοι. Από τη μικροανάλυση ακτίνων Χ επιβεβαιώνεται η ύπαρξη του γύψου. Στη συνέχεια μελετάται λεπτομερώς η σπογγοειδής δομή (Εικόνα 4). Από τη στοιχειακή ανάλυση στην περιοχή της Εικόνας 4 διαπιστώθηκε ότι τα κύρια συστατικά της επιφάνειας είναι το ασβέστιο (58,65%) και γύψος (37,06%). Επίσης περιέχονται πυρίτιο (2,25%) και σίδηρος (1,21%).



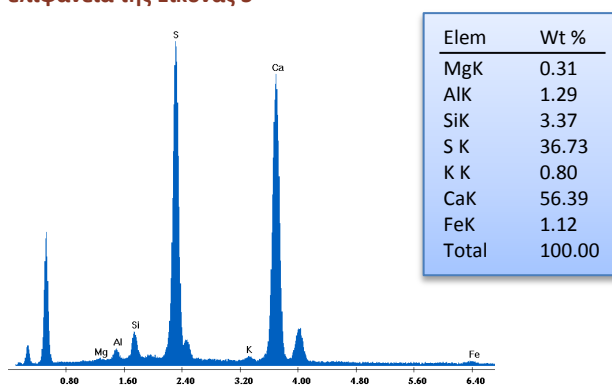
Εικόνα 3: Εικόνα BSE. Σπογγοειδείς σχηματισμοί κρυστάλλων του γύψου



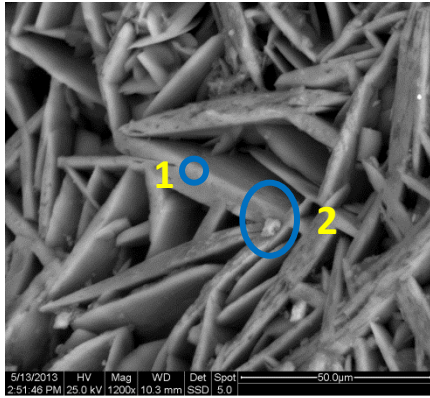
Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 3



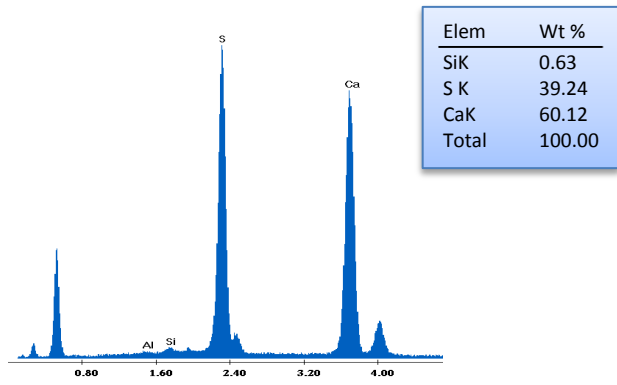
Εικόνα 4: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση X1300 στον σπογγοειδή σχηματισμό



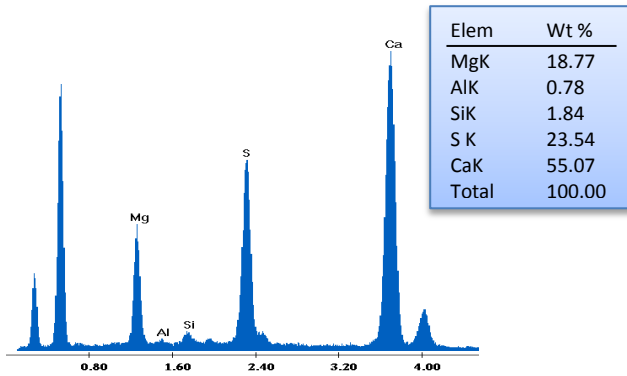
Σχήμα 6: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 4



Εικόνα 5: Εικόνα BSE. Ραβδοειδείς δομές και λευκοί κόκκοι

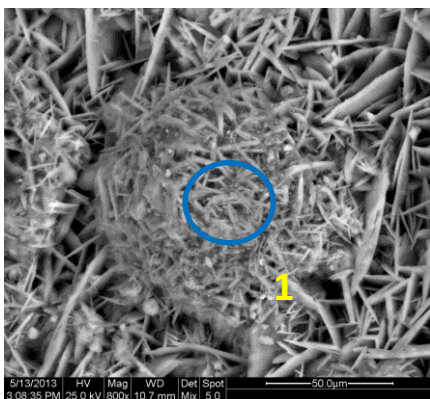


Σχήμα 7: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 5

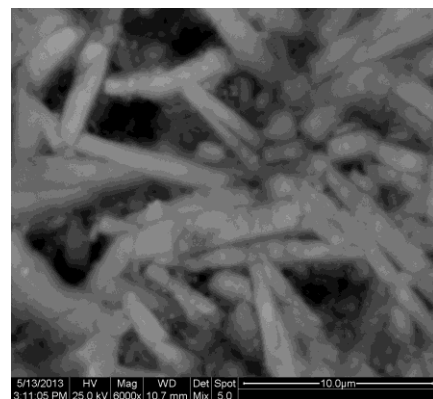


Σχήμα 8: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 2 της Εικόνας 5

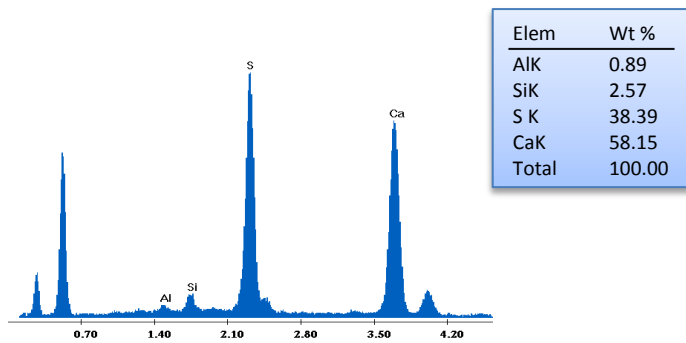
Στην Εικόνα 5 εξετάστηκαν αναλυτικότερα οι ραβδοειδείς δομές. Η στοιχειακή ανάλυση στο Σημείο 1 επιβεβαιώνει την ύπαρξη του γύψου, καθώς τα κύρια συστατικά είναι το ασβέστιο (60,12%) και το θείο (39,24%). Παράλληλα μελετήθηκε και ο λευκός κόκκος της Εικόνας 5 (Σημείο 2), ο οποίος αποτελείται από ασβέστιο (55,07%), θείο (23,54%), μαγνήσιο (18,77%) και πυρίτιο (1,84%).



Εικόνα 6: Εικόνα mix. Σχηματισμός που αποτελείται από βελονοειδείς δομές

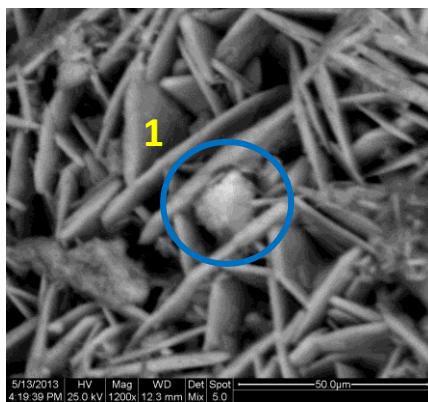


Εικόνα 7: Εικόνα mix. Μεγέθυνση X6000 στο σχηματισμό της Εικόνας 6 (Σημείο 1)

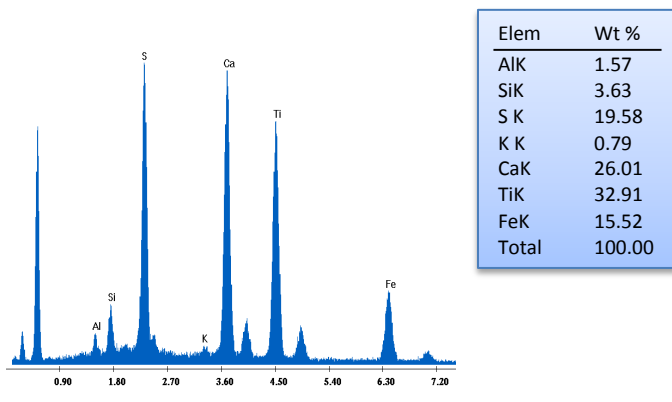


**Σχήμα 9: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική περιοχή της Εικόνας 7**

Στις Εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται επίσης ραβδόμορφοι κρύσταλλοι του γύψου και τα συμπαγή πλέγματα που δημιουργούν.



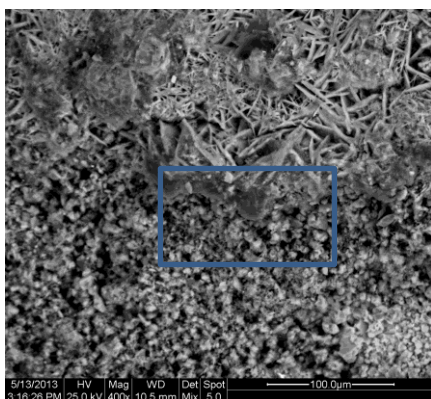
**Εικόνα 8: Εικόνα μικ. Λευκός κόκκος ανάμεσα στις βελονοειδής δομές**



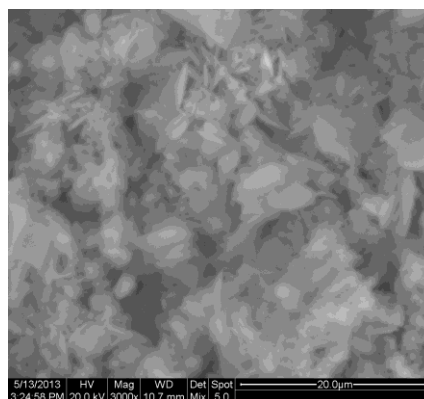
**Σχήμα 10: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο λευκό κόκκο (Σημείο 1) της Εικόνας 8**

Στην Εικόνα 8 εντοπίζεται ένας λευκός κόκκος ανάμεσα στις ραβδοειδείς δομές, όπου κατόπιν στοιχειακής ανάλυσης διαπιστώνεται ότι αποτελείται από τιτάνιο (32,91%), ασβέστιο (26,01%), θείο (19,58%), σίδηρο (15,52%), πυρίτιο (3,63%) και αργίλιο (1,57%).

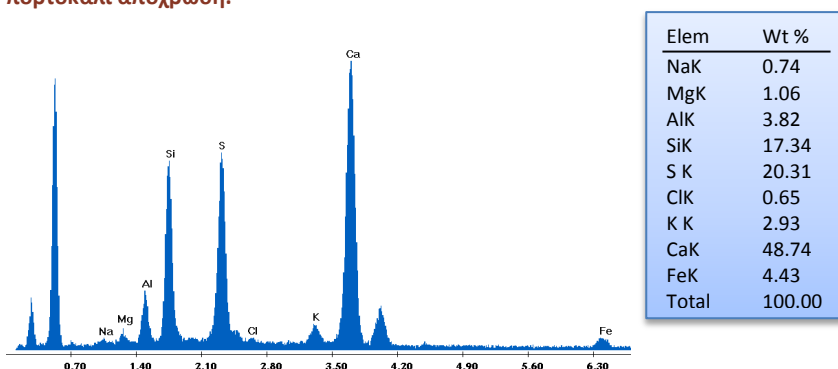
## Διεπιφάνεια μεταξύ λευκής και καφέ περιοχής



Εικόνα 9: Εικόνα μίχ. Διεπιφάνεια μεταξύ λίθου και μαύρης κρούστα. Το επάνω μέρος ανήκει στη μαύρη κρούστα και το κάτω στο λίθο και έχει λευκή και πορτοκαλί απόχρωση.



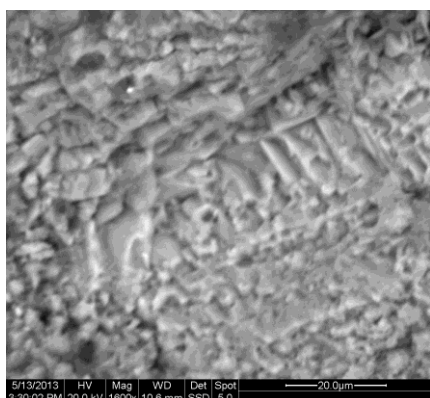
Εικόνα 10: Εικόνα μίχ. Μεγέθυνση X3000 στο σημείο με λευκό και πορτοκαλί χρώμα της Εικόνας 9 (περιοχή εντός του πλαισίου)



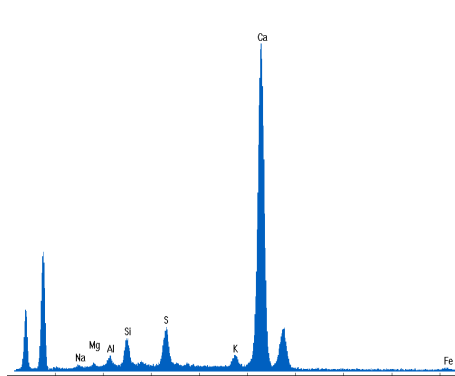
Σχήμα 11: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια της Εικόνας 10

Η Εικόνα 9 προέρχεται από τη διεπιφάνεια της μαύρης κρούστας με την περιοχή της κρούστας που έχει αποπλυθεί. Στο επάνω μέρος της Εικόνας φαίνονται οι χαρακτηριστικές δομές του γύψου, ενώ στο κάτω μέρος παρουσιάζεται μία κοκκώδης δομή χωρίς προσανατολισμό κόκκων. Η Εικόνα 10 αποτελεί μεγέθυνση στην επιφάνεια του λίθου δηλαδή στο κάτω τμήμα της Εικόνας 9, όπου μακροσκοπικά έχει λευκή και πορτοκαλί απόχρωση. Ύστερα από μικροανάλυση ακτίνων X διαπιστώνεται ότι η επιφάνεια της Εικόνας 10 αποτελείται κατά κύριο λόγο από ασβέστιο (48,74%) και θείο (20,31%), ενώ παράλληλα εμπεριέχονται και πυρίτιο (17,34%), σίδηρος (4,43%), αργίλιο (3,82%), κάλιο (2,93%) και μαγνήσιο (1,06%).

## Λευκή περιοχή



Εικόνα 11: Εικόνα BSE από το λευκό τμήμα του λίθου

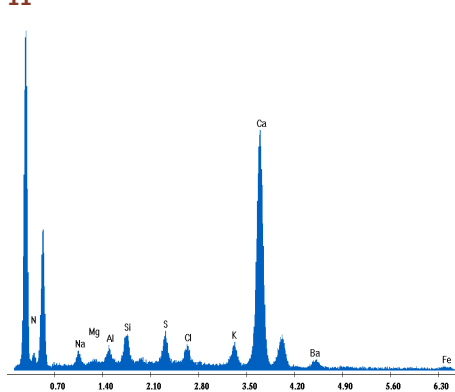


Elem	Wt %
NaK	0.87
MgK	0.84
AlK	1.69
SiK	4.70
S K	6.06
K K	2.36
CaK	82.09
FeK	1.39
Total	100.00

Σχήμα 12: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια της Εικόνας 11

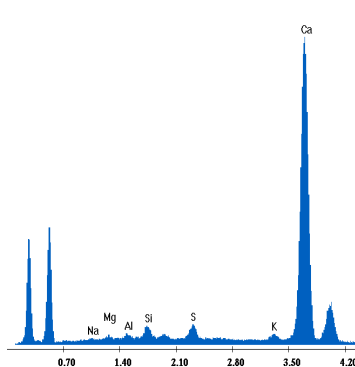


Εικόνα 12: Εικόνα BSE από το λευκό τμήμα του λίθου



Elem	Wt %
N K	33.86
NaK	2.55
MgK	0.62
AlK	1.55
SiK	3.50
S K	3.15
ClK	2.42
K K	3.05
CaK	42.47
BaL	5.59
FeK	1.23
Total	100.00

Σχήμα 13: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 12



Elem	Wt %
NaK	1.11
MgK	1.36
AlK	1.26
SiK	2.89
S K	2.75
K K	1.49
CaK	89.14
Total	100.00

Σχήμα 14: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 2 της Εικόνας 12

Οι Εικόνες 11 και 12 προέρχονται από τη λευκή περιοχή του δείγματος. Εκεί παρουσιάζονται κόκκοι χωρίς προσανατολισμό και με διαφορετικά μεγέθη και σχήματα. Στην Εικόνα 11 παρατηρούνται κατά κύριο λόγο πολυγωνικοί κόκκοι ή με μορφή ράβδων. Από τη μικροανάλυση ακτίνων X διαπιστώνεται ότι το ασβέστιο είναι το κύριο συστατικό με περιεκτικότητα 82,09%. Επίσης στην επιφάνεια αυτή εντοπίζεται θείο με περιεκτικότητα (6,06%), πυρίτιο (4,70%), κάλιο (2,36%), αργίλιο (1,69%) και σίδηρος (1,39%)



Στην Εικόνα 12 εμφανίζονται κόκκοι με διαφορετικά σχήματα και προσανατολισμό, καθώς και λείοι, γκρίζοι σχηματισμοί. Σύμφωνα με τη μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 12 συμπεραίνεται ότι εκτός από αυτή του ασβεστίου (42,47%), υψηλή είναι και η περιεκτικότητα σε άζωτο (33,86%). Παράλληλα εντοπίζεται βάριο (5,59%), πυρίτιο (3,50%), θείο (3,15%) και κάλιο (3,05%). Επιπλέον πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση στο Σημείο 2 της Εικόνας 12 όπου βρίσκεται ένας λευκός κόκκος. Ο κόκκος αυτός αποτελείται κυρίως από ασβέστιο (89,14%).

#### 4.2.2.2 Δείγμα από πορτοκαλοκάστανη περιοχή

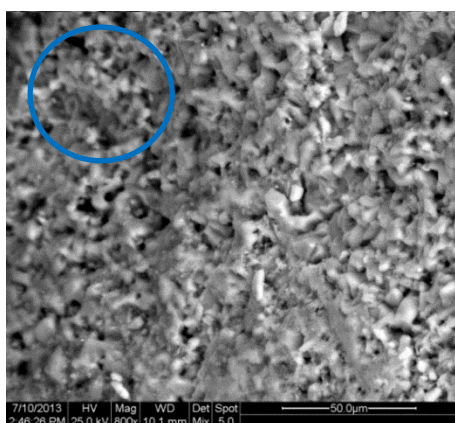
##### J\_F\_orange

Το δείγμα με κωδικό J\_F\_orange προέρχεται από περιοχή πορτοκαλί χρωματισμού. Το δείγμα αυτό παρουσιάζει δύο περιοχές: την πορτοκαλί και την καφέ περιοχή. Η δεύτερη περιοχή έχει την ίδια απόχρωση με ένα μεγάλο τμήμα της πρόσοψης του Ναού. Τα δύο τμήματα εξετάστηκαν ξεχωριστά με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, προκειμένου να κατανοηθεί η σύστασή τους.

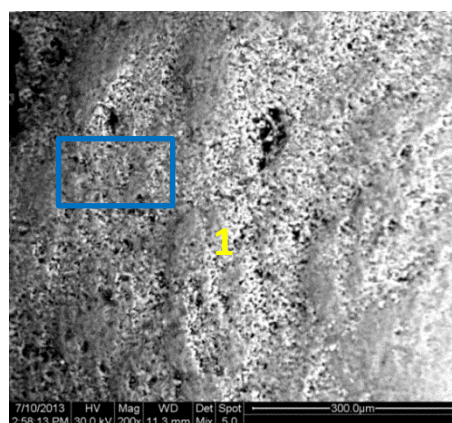
##### Πορτοκαλί περιοχή

Στην επιφάνεια του δείγματος (Εικόνα 1) που εξετάστηκε παρατηρείται ανομοιομορφία στους κόκκους του υλικού, ενώ στο επάνω τμήμα της εικόνας παρατηρείται πιθανή απαρχή βιολογικής διάβρωσης.

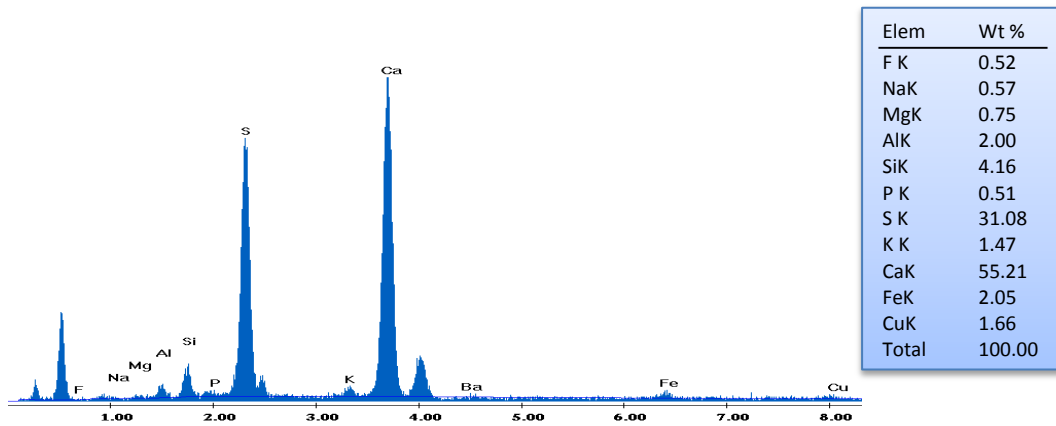
Μελετώντας το δείγμα σε μικρότερη μεγέθυνση παρατηρείται ο σχηματισμός ομοιόμορφων και ανομοιόμορφων δομών (Εικόνα 2). Στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση και διαπιστώθηκε ότι τα κύρια στοιχεία είναι το ασβέστιο και το θείο (με περιεκτικότητα 55,21% και 31,08% κ.β. αντίστοιχα), ενώ επιπλέον εντοπίζεται πυρίτιο με σύσταση 4,16% κ.β.



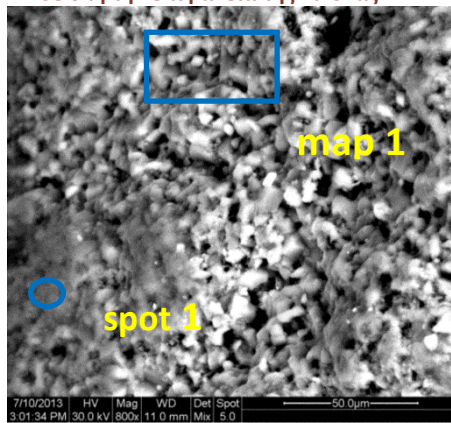
Εικόνα 1: Εικόνα mix



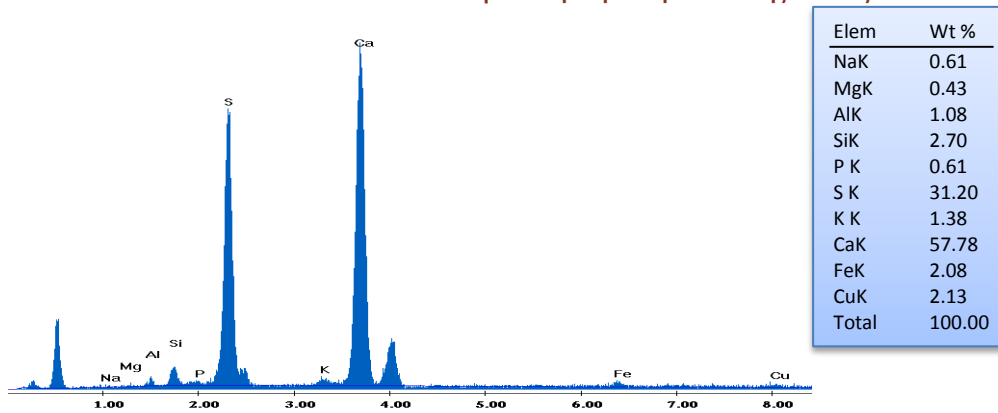
Εικόνα 2: Εικόνα mix



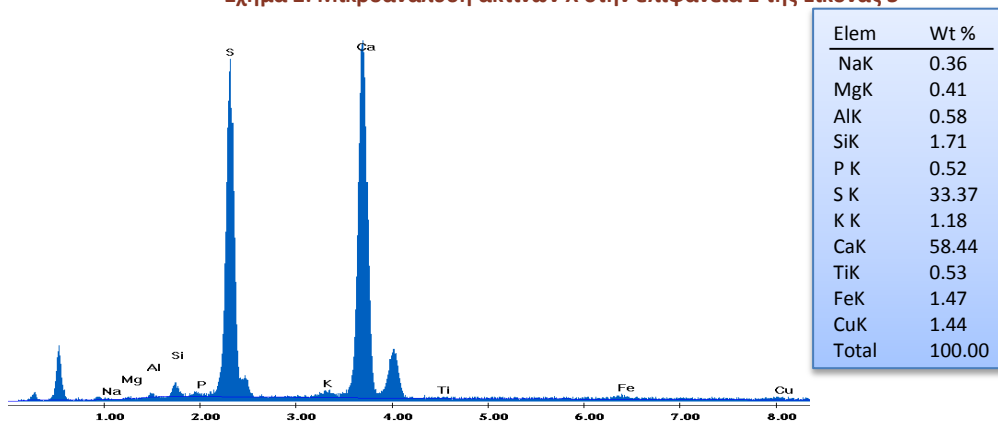
Σχήμα 1: Μικροανάλυση ακτίνων X σε όλη την επιφάνεια της Εικόνας 2



Εικόνα 3: Εικόνα μίχ. Μεγέθυνση στην επιφάνεια 1 της Εικόνας 2.



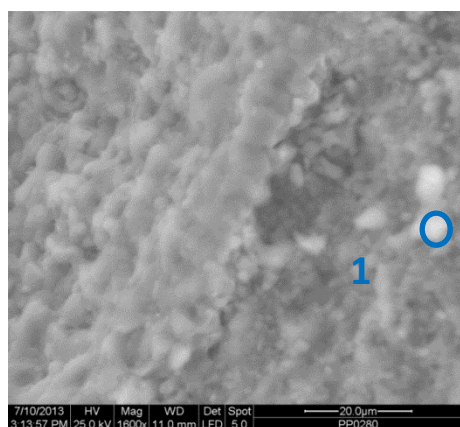
Σχήμα 2: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια 1 της Εικόνας 3



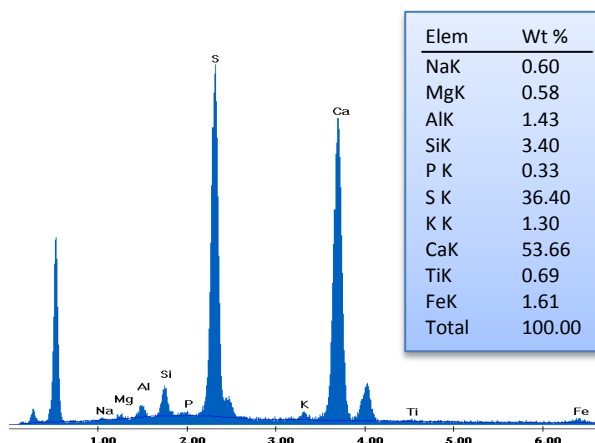
Σχήμα 3: Μικροανάλυση ακτίνων X στο σημείο 1 της Εικόνας 3

Η επιφάνεια 1 της Εικόνας 2 εξετάστηκε σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, προκειμένου να μελετηθούν αναλυτικότερα οι ομοιομορφοί και ανομοιομορφοί σχηματισμοί.

Πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση τόσο την ανομοιομορφη κοκκώδη περιοχή, όσο και στη λεία, ομοιογενή επιφάνεια της Εικόνας 3. Από τα αποτελέσματα της μικροανάλυσης ακτίνων Χ διαπιστώνεται ότι στην κοκκώδη περιοχή πρωτεύοντα στοιχεία είναι το ασβέστιο και το θείο (με περιεκτικότητα 57,78% και 31,20% κ.β. αντίστοιχα), έτσι ώστε να είναι εμφανής η ύπαρξη γύψου. Επίσης στην περιοχή αυτή εντοπίζεται πυρίτιο με περιεκτικότητα 2,7% κ.β., χαλκός (2,13% κ.β.) και σίδηρος (2,08% κ.β.).

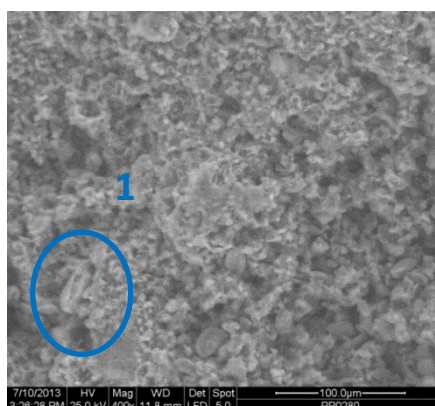


Εικόνα 4: Εικόνα SEI

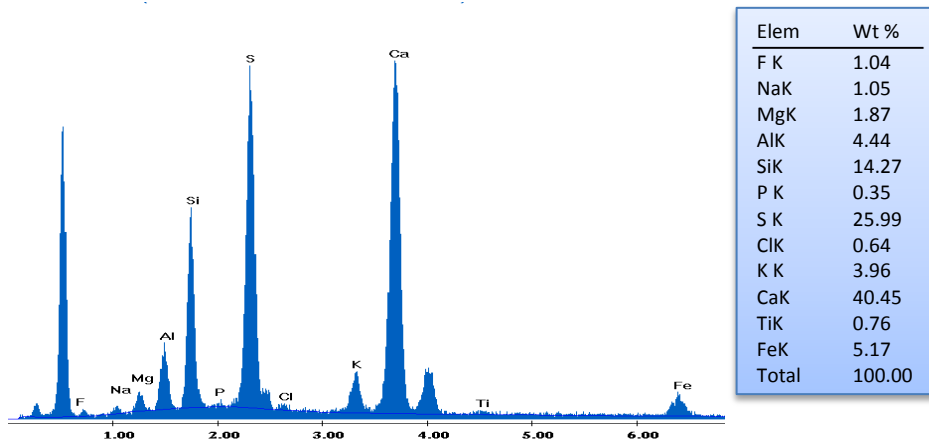


Σχήμα 4: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 4

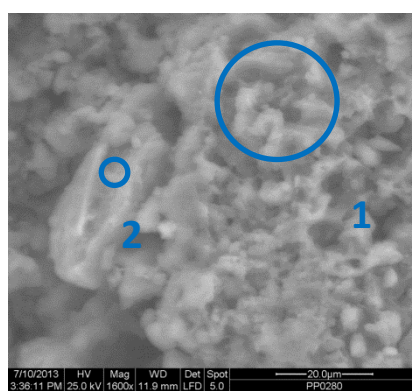
Όπως φαίνεται στο πάνω δεξιά τμήμα της Εικόνας 4 στο δείγμα πιθανόν να έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη μικροοργανισμών. Επιπλέον έγινε στοιχειακή ανάλυση στους λευκούς κόκκους, όπου διαπιστώθηκε η ύπαρξη του γύψου. Επίσης το πυρίτιο έχει περιεκτικότητα 3,40% κ.β.



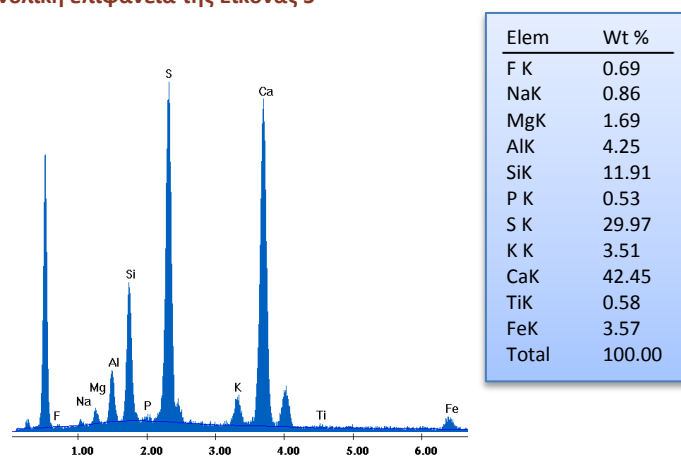
Εικόνα 5: Εικόνα SEI



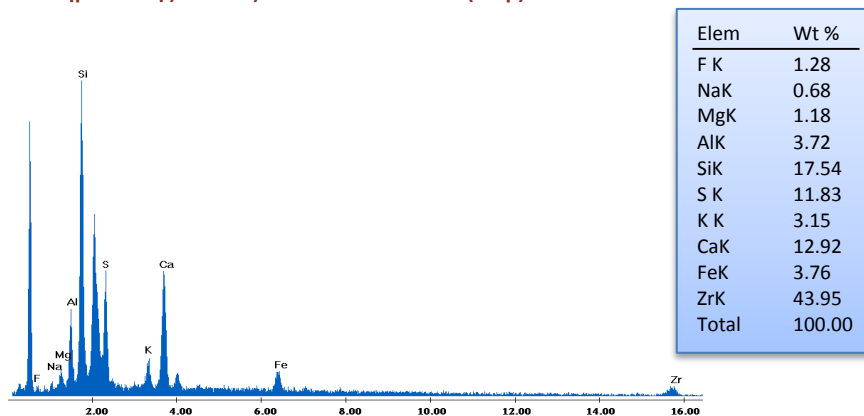
Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 5



Εικόνα 6: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση Χ1600 στο σημείο 1 της Εικόνας 5.



Σχήμα 6: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 6 (map)

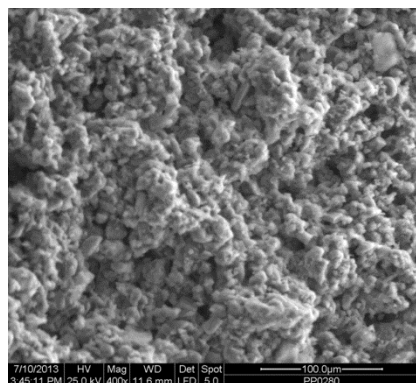


Σχήμα 7: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 2 της Εικόνας 6 (spot)

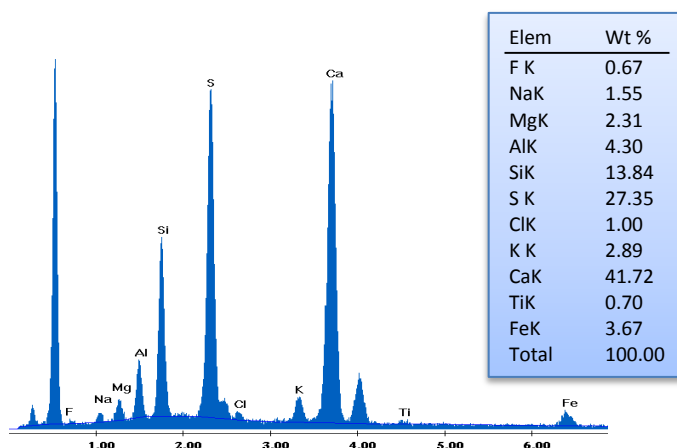
Στην περιοχή της Εικόνας 5 παρατηρούνται έντονα ανάγλυφοι και ανομοιογενείς σχηματισμοί. Από τη μικροανάλυση με ακτίνες Χ παρουσιάζονται σαν κύρια στοιχεία το ασβέστιο και το θείο. Συνεπώς είναι έντονη η παρουσία του γύψου στην επιφάνεια. Επίσης το πυρίτιο έχει περιεκτικότητα 14,27%, ο σίδηρος 5,17% το αργίλιο 4,44% και το κάλιο 3,96% κ.β.

Ένα μέρος της επιφάνειας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5 μελετήθηκε σε μεγέθυνση X1600, για να γίνει ανάλυση στις διάφορες δομές που σχηματίζονται (Εικόνα 6). Η μικροανάλυση ακτίνων Χ στην ανομοιογενή επιφάνεια (Περιοχή 1) παρουσιάζει σαν κύρια στοιχεία το ασβέστιο και το θείο. Επιπλέον η περιεκτικότητα σε πυρίτιο είναι σχετικά υψηλή (11,91%), ενώ εντοπίζεται και κάποια ποσότητα αργιλίου (4,25%), σιδήρου (3,57%) και καλίου (3,51%). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση και στον κρύσταλλο της Εικόνας 6 (Σημείο 2). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι ο σχηματισμός αυτός αποτελείται κατά κύριο λόγο από ζirkόνιο (43,95%) και πυρίτιο (17,54%). Η περιεκτικότητα του ασβεστίου στο κρύσταλλο είναι 12,92%, του θείου 11,83%, του σιδήρου 3,76% και του καλίου 3,15%.

### Καφέ περιοχή



Εικόνα 7: Εικόνα SEI. Ανομοιογενής επιφάνεια



Σχήμα 8: Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 7

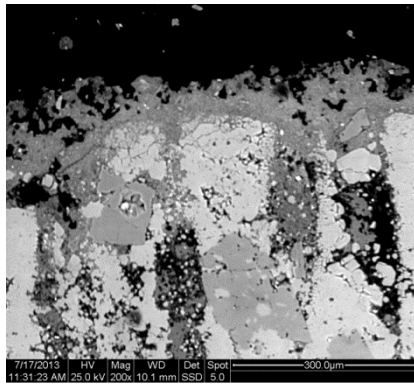
Στην Εικόνα 7 παρατηρούνται επίσης ανομοιομορφες δομές και έντονο ανάγλυφο. Τα αποτελέσματα της μικροανάλυσης ακτίνων Χ εμφανίζουν ως κύρια στοιχεία το ασβέστιο και το θείο. Επίσης το πυρίτιο βρίσκεται σε περιεκτικότητα 13,84%, το αργίλιο 4,30%, ο σίδηρος 3,67%, το κάλιο 2,89% και το μαγνήσιο 2,31%.

### Πλάγια τομή

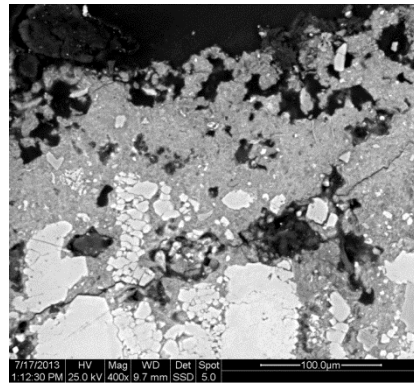
Προκειμένου να υπολογιστεί το πάχος της πορτοκαλί περιοχής εξετάστηκε και η τομή του δείγματος J\_F\_orange.

Στην επιφάνεια που εξετάστηκε υπολογίστηκε το πάχος της κρούστας περίπου 70μm. Όπως φαίνεται, όμως από την Εικόνα 8, είχαν δημιουργηθεί ρωγμές στο δομικό λίθο οι οποίες πληρώθηκαν από το υλικό της επιφάνειας. Το μήκος των ρωγμών υπολογίστηκε περίπου 415μm.



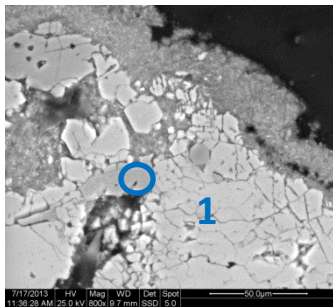


**Εικόνα 8: Εικόνα BSE. Τομή δείγματος J\_F\_orange σε μεγέθυνση X200**

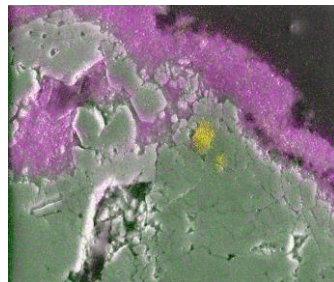


**Εικόνα 9: Εικόνα BSE σε μεγέθυνση X400**

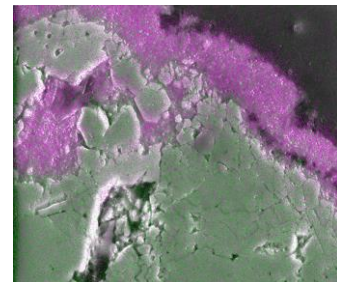
Στην Εικόνα 10 παρατηρούνται το πάχος της πορτοκαλόχρους περιοχής και η επιφάνεια του λίθου. Επίσης εμφανείς είναι οι κόκκοι. Παράλληλα από τα αποτελέσματα της μικροανάλυσης ακτίνων Χ στον γκριζο κόκκο διαπιστώνεται ότι κύριο στοιχείο είναι ο ασβεστίτης με σύσταση κατά βάρος 70,59%. Επίσης μεγάλη είναι η περιεκτικότητα του μαγνησίου 23,81%. Επομένως πρόκειται για κόκκο δολομίτη.



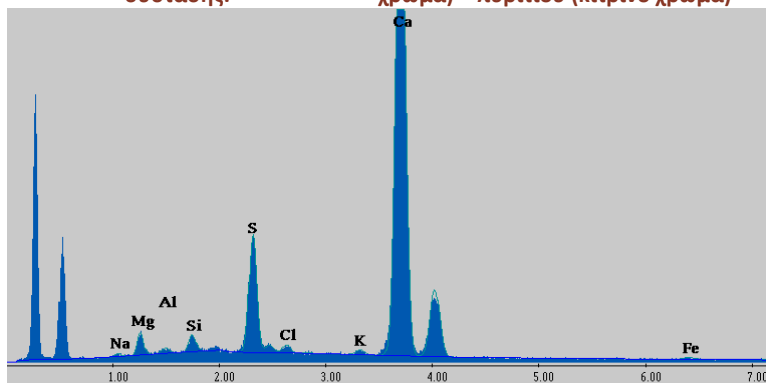
**Εικόνα 10: Εικόνα BSE. Ο κόκκος στο Σημείο 1 είναι δολομιτικής σύστασης.**



**Εικόνα 11: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – θείου (μοβ χρώμα) – πυριτίου (κίτρινο χρώμα)**



**Εικόνα 12: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) - θείου (μοβ χρώμα)**

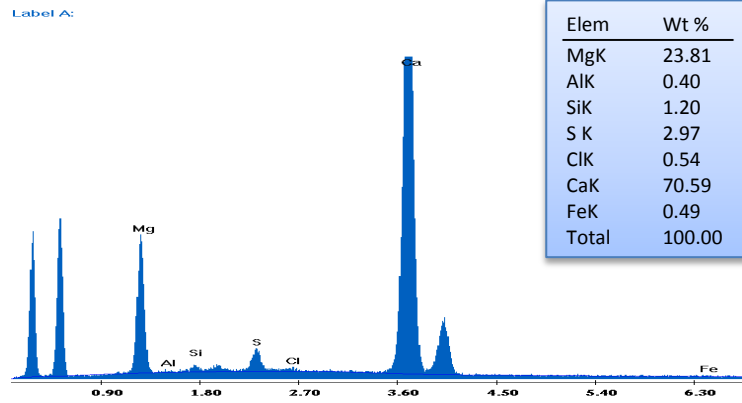


Elem	Wt %
NaK	0.81
MgK	3.92
AlK	0.78
SiK	2.06
S K	12.06
ClK	1.02
KK	0.58
CaK	78.02
FeK	0.75
Total	100.00

**Σχήμα 9: Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 10**



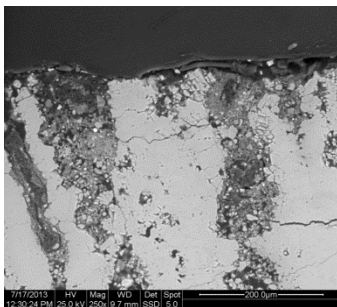
Εικόνα 12: Κατανομή μαγνησίου



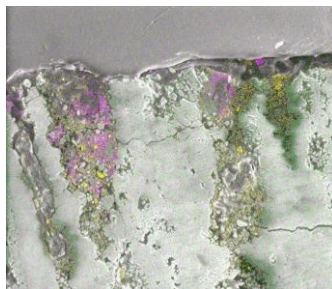
Σχήμα 10: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στον Σημείο 1 της Εικόνας 10

Για να γίνει πλήρης κατανόηση της κατανομής των στοιχείων στην εξεταζόμενη επιφάνεια πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση με μικροανάλυση ακτίνων Χ. Με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτό ότι η πορτοκαλόχρωα περιοχή αποτελείται κατά κύριο λόγο από γύψο, ενώ περιέχει και πυρίτιο. Επίσης εντοπίζεται σχηματισμός πυριτικής σύστασης κάτω από την επιφανειακή κρούστα. Στο σύνολο της επιφάνειας αυτής το ασβέστιο έχει κατά βάρος σύσταση 78,02%, το θείο 12,06%, το μαγνήσιο 3,92% και το πυρίτιο 2,06%.

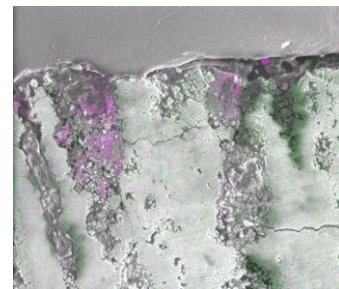
Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται τμήμα της τομής όπου η πορτοκαλί περιοχή έχει αποκολληθεί από την επιφάνεια. Παρατηρούνται ρωγμές οι οποίες έχουν πληρωθεί με γύψο και πυρίτιο. Το μήκος των ρωγμών αυτών είναι περίπου 375μm. Στο τμήμα αυτό της τομής πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση με μικροανάλυση ακτίνων Χ.



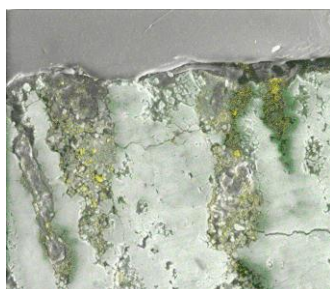
Εικόνα 13: Εικόνα BSE σε μεγέθυνση X250



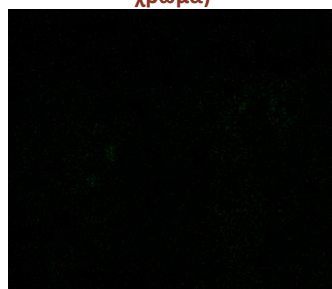
Εικόνα 14: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – θείου (μοβ χρώμα) – πυριτίου (κίτρινο χρώμα)



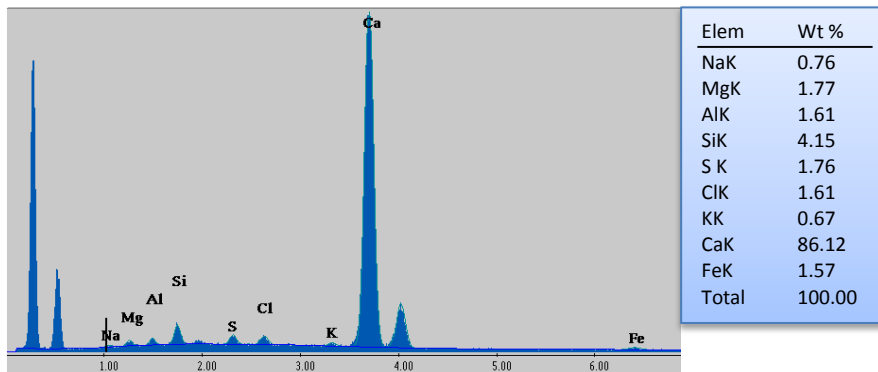
Εικόνα 15: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – θείου (μοβ χρώμα)



Εικόνα 16: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – πυριτίου (κίτρινο χρώμα)



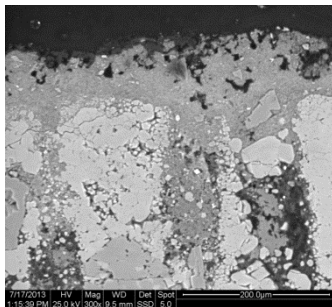
Εικόνα 17: Κατανομή μαγνησίου



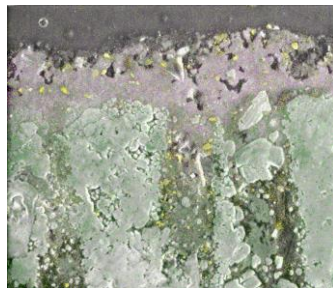
**Σχήμα 11: Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 13**

Από τις κατανομές γίνεται εμφανές ότι η εξωτερική επιφάνεια του λίθου αποτελείται κυρίως από γύψο και πυρίτιο. Παράλληλα επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι τμήμα του λίθου που έχει υποστεί ρωγμές έχει πληρωθεί με υλικό που αποτελείται από γύψο και πυρίτιο. Διακριτοί είναι και οι κόκκοι του πυριτίου. Η περιεκτικότητα της επιφάνειας αυτής σε ασβέστιο είναι 86,12%, του θείου 1,76% και του πυριτίου 4,15% κατά βάρος. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι στο τμήμα αυτό, έχει αποκολληθεί τμήμα της περιοχής πορτοκαλί χρωματισμού.

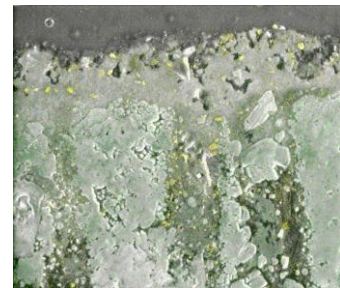
Στις Εικόνες 18 έως 22 είναι εμφανής η επιφανειακή ζώνη της πορτοκαλί περιοχής και οι κόκκοι του υλικού. Στην περίπτωση αυτή όπως φαίνεται από τις κατανομές έχει εισχωρήσει στρώμα πυριτικής σύστασης ανάμεσα στους κόκκους του λίθου.



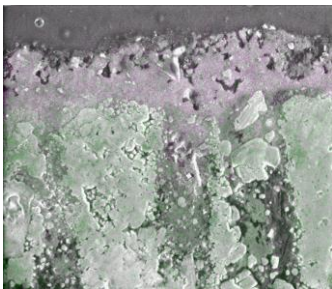
**Εικόνα 18: Εικόνα BSE**



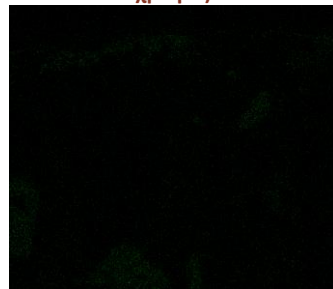
**Εικόνα 19: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – θείου (μωβ χρώμα) – πυριτίου (κίτρινο χρώμα)**



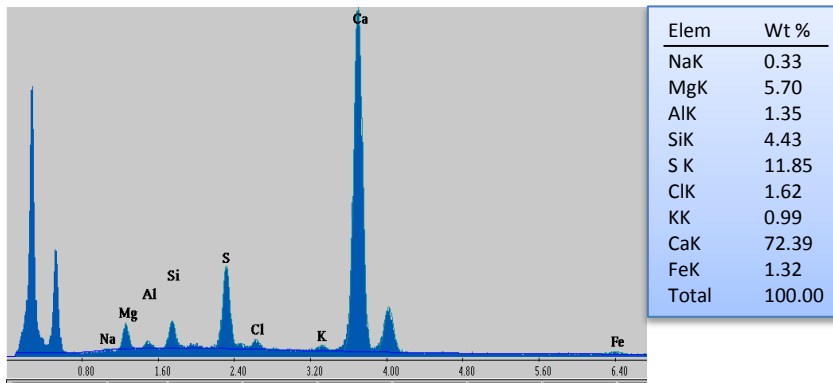
**Εικόνα 20: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) - πυριτίου (κίτρινο χρώμα)**



**Εικόνα 21: Κατανομή ασβεστίου (πράσινο χρώμα) – θείου (μωβ χρώμα)**



**Εικόνα 22: Κατανομή μαγνησίου**



Σχήμα 12: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 18

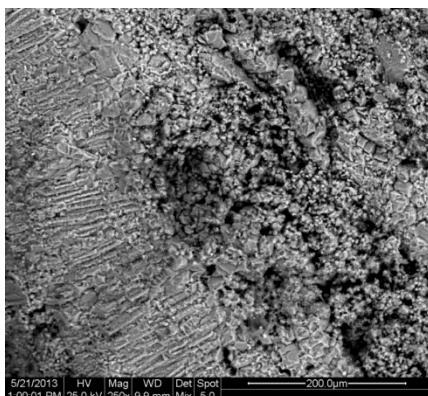
Η περιοχή της Εικόνας 18 περιέχει 72% ασβέστιο, 11,8% θείο, 5,70% μαγνήσιο και 4,4% πυρίτιο.

#### 4.2.2.3 Δείγμα από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια

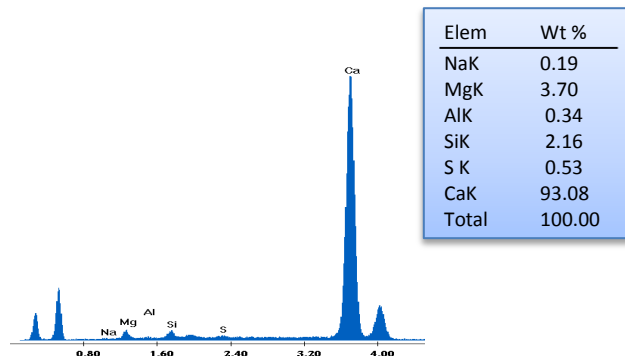
##### J\_F\_white

Στην Εικόνα 1 παρατηρούνται διαφορετικές μορφές κρυστάλλων του ασβεστίτη. Στο αριστερό τμήμα της Εικόνας εμφανίζονται κρύσταλλοι ραβδοειδούς μορφής που παρουσιάζουν κάποιο προσανατολισμό. Στο δεξιό τμήμα από την άλλη πλευρά εμφανίζονται πολυγωνικοί και κυβικοί κρύσταλλοι ασβεστίτη σε διάφορα μεγέθη. Ο κατακερματισμός του λίθου οφείλεται στην απόπλυση.

Οι ραβδοειδείς κρύσταλλοι στο δεξί τμήμα της Εικόνας 1 εξετάστηκαν περαιτέρω στις Εικόνες 2 και 3, όπου πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση. Κύριο συστατικό των δομών αυτών είναι το ασβέστιο (97,59%).

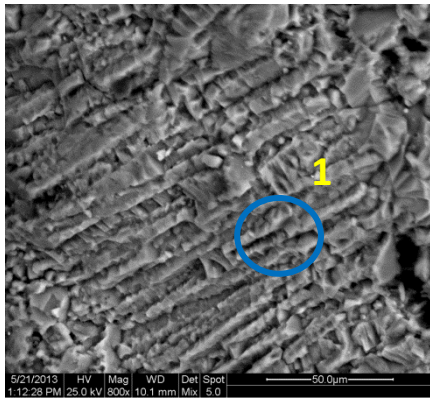


Εικόνα 1: Εικόνα mix. Ραβδόμορφοι κρύσταλλοι και κοκκώδεις δομές

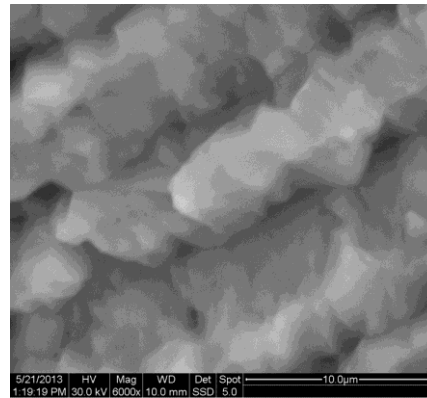


Σχήμα 1: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 1

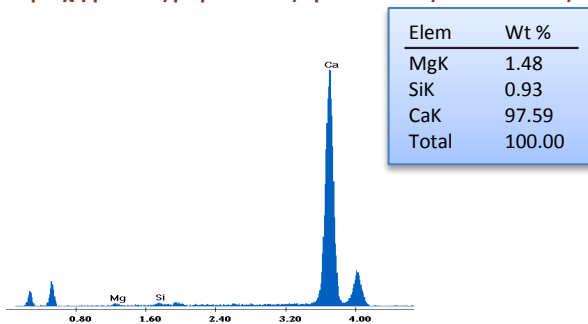




**Εικόνα 2:** Εικόνα μίξ. Μεγέθυνση στην περιοχή με τους ραβδοειδείς κρυστάλλους

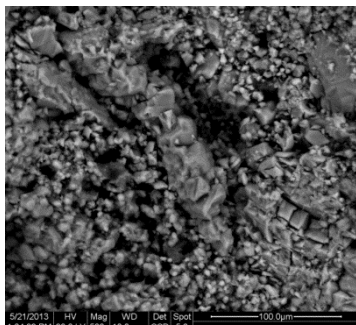


**Εικόνα 3:** Εικόνα BSE. Μεγέθυνση Χ6000 στο Σημείο 1 της Εικόνας 2

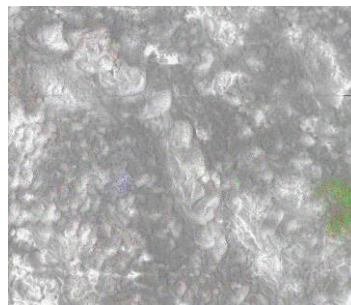


**Σχήμα 2:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 3

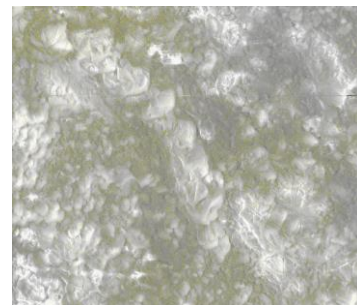
Επιπλέον μελετήθηκε η κοκκώδης περιοχή στο αριστερό τμήμα της Εικόνας 1. Στην Εικόνα 4 είναι εμφανής ο κατακερματισμός του λίθου εξαιτίας της απόπλυσης, αφού παρατηρούνται πολυγωνικοί κρύσταλλοι ασβεστίτη με τυχαίο προσανατολισμό. Στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε και χαρτογράφηση των στοιχείων. Έτσι συμπεραίνεται από την Εικόνα 6 ότι στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας εντοπίζεται το ασβέστιο, ενώ όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 στο δεξί τμήμα της εικόνας υπάρχει ένας σχηματισμός όπου αποτελείται κυρίως από πυρίτιο και μαγνήσιο. Τέλος γίνεται πυκνότερη η κατανομή του θείου στο κεντρικό σημείο της Εικόνας.



**Εικόνα 4:** Εικόνα BSE. Πολυγωνικοί κρύσταλλοι ασβεστίτη

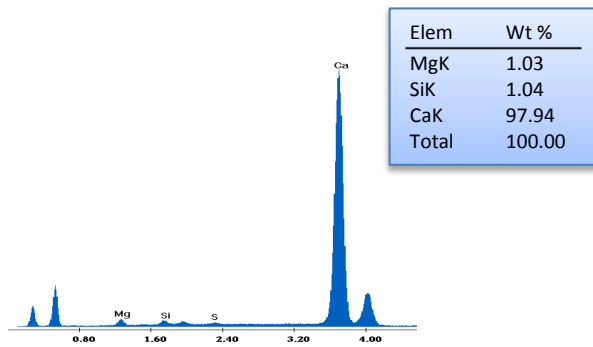


**Εικόνα 5:** Κατανομή μαγνησίου (κόκκινο χρώμα) - πυριτίου (πράσινο χρώμα) - θείο (μπλε χρώμα)



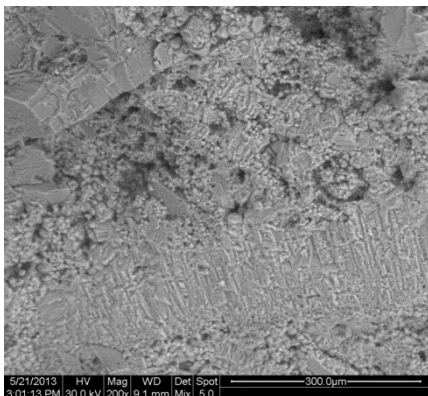
**Εικόνα 6:** Κατανομή ασβεστίου



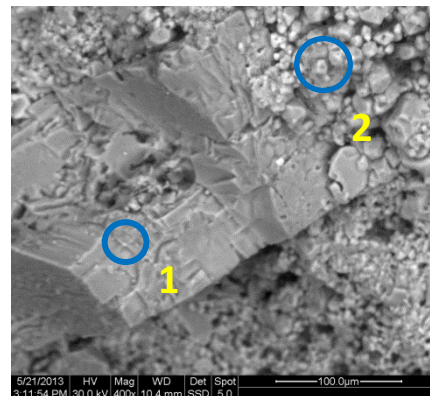


Σχήμα 3: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 4

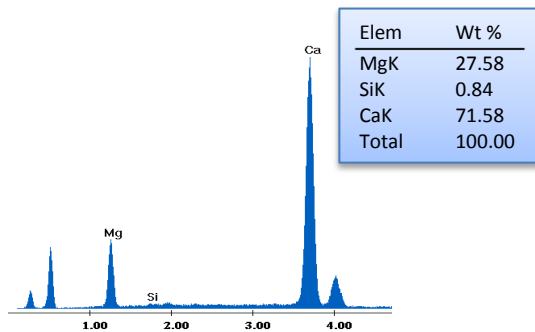
Στο κάτω μέρος της Εικόνας 7 παρατηρούνται επίσης ραβδόμορφοι κρύσταλλοι ασβεστίτη, ενώ στο επάνω μέρος εντοπίζονται κυβικοί και πολυγωνικοί κρύσταλλοι. Οι κυβικοί κρύσταλλοι μελετήθηκαν σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (Εικόνα 8). Από τη στοιχειακή ανάλυση στο Σημείο 1 της Εικόνας 8 διαπιστώνεται ότι κύριο στοιχείο του κρυστάλλου είναι το ασβέστιο (71,58%), αλλά εμφανίζεται και μαγνήσιο (27,58%), συνεπώς ο κρύσταλλός είναι δολομιτικής σύστασης. Από τη μικροανάλυση ακτίνων Χ στους πολυγωνικούς κρυστάλλους (Σημείο 2) γύρω από τον κυβικό κρύσταλλο διαπιστώνεται ότι αυτοί αποτελούνται κυρίως από ασβέστιο (88,19%), ενώ περιέχουν και μαγνήσιο (9,90%).



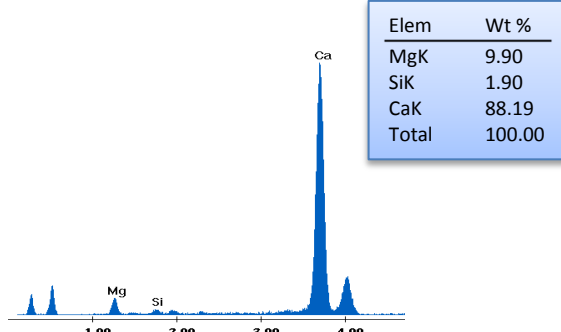
Εικόνα 7: Εικόνα mix. Ραβδόμορφοι, κυβικοί κρύσταλλοι και κόκκοι ασβεστίτη



Εικόνα 8: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στους κυβικούς κρυστάλλους της Εικόνας 7



Σχήμα 4: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 8

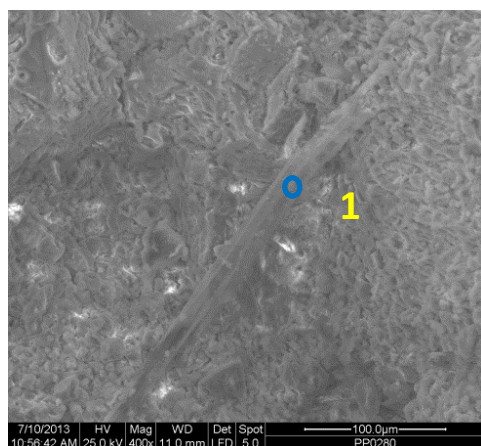


Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 2 της Εικόνας 8

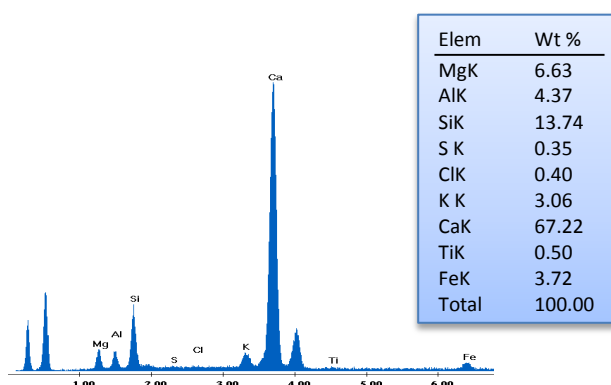
#### 4.2.2.4 Δείγματα από επιφάνειες που έχουν υποστεί βιολογική διάβρωση

J\_F\_bio 1

Στο δεξί τμήμα της Εικόνας 1 είναι εμφανής ο σχηματισμός μυκηλίων μύκητα, ενώ στο κέντρο της ίδιας εικόνας παρουσιάζεται μία υφή μύκητα με διάμετρο περίπου 18,5 μm και μήκος 330 μm.



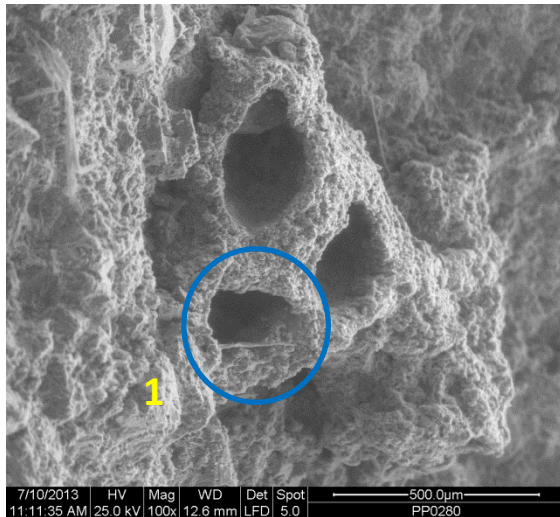
Εικόνα 1: Εικόνα SEI. Υφή μύκητα και μυκήλια



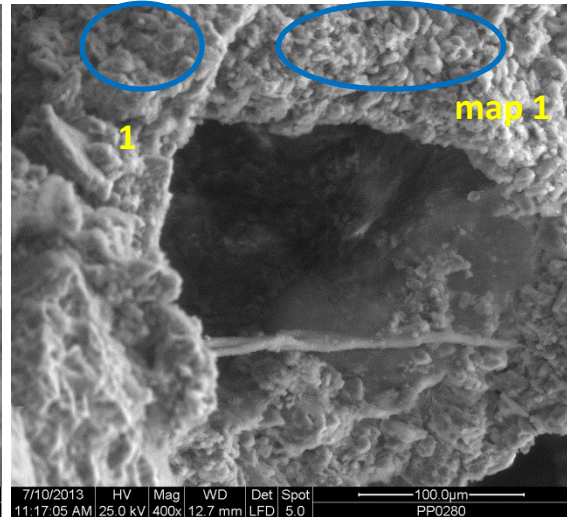
Σχήμα 1: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 1

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οπές οι οποίες έχουν προκληθεί από μύκητες που αναπτύσσονται σε υφές. Η διάμετρος των οπών κατά μέσο όρο είναι περίπου ίση με 235 μm. Παράλληλα η Εικόνα 3 αποτελεί μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 2. Εδώ είναι εμφανής ο τρόπος με τον οποίο η υφή του μύκητα εισχωρεί στο λίθο και προκαλεί την οπή.

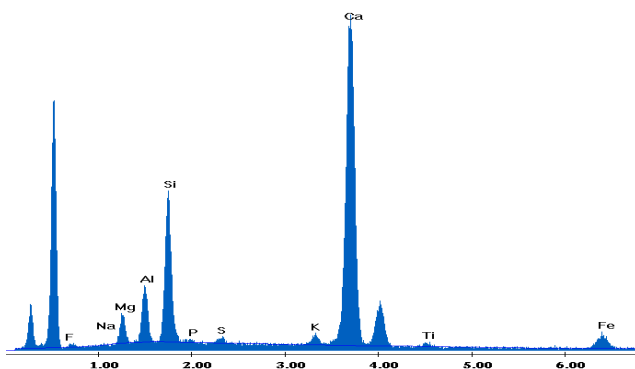
Το Σημείο 1 της Εικόνας 3 μελετήθηκε αναλυτικότερα (Εικόνα 4) και παρατηρήθηκε ανάπτυξη κόκκων με τυχαίο προσανατολισμό και σε διαφορετικά μεγέθη. Αυτοί οι κόκκοι μπορεί να προέρχονται από την απόπλυση της επιφάνειας ενδεχομένως σε συνεργασία με τη βιολογική διάβρωση. Επιπλέον στην επιφάνεια αυτή εντοπίζονται επικαθίσεις σκόνης. Στον λευκό κόκκο (Σημείο 1) της Εικόνας 4 πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση και διαπιστώθηκε ότι έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε ασβέστιο (35,03%), σίδηρο (28,51%) και πυρίτιο (13,05%), περιέχει και κάποια ποσότητα βαρίου (2,19%) και μολύβδου (2,16%).



**Εικόνα 2: Εικόνα SEI. Οπές από μύκητες που αναπτύσσονται σε υφές**

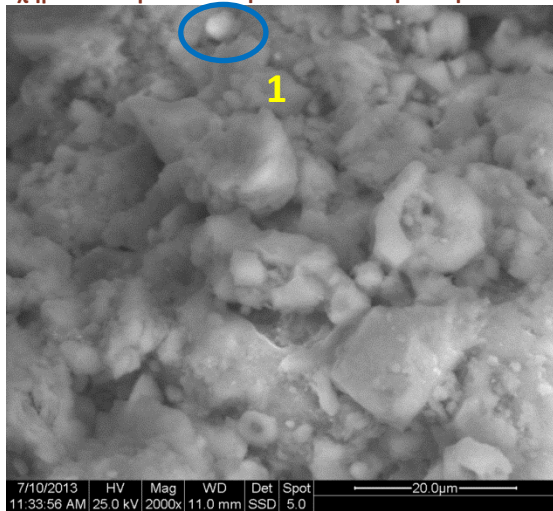


**Εικόνα 3: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 2. Υφή μύκητα που προκαλεί την οπή**

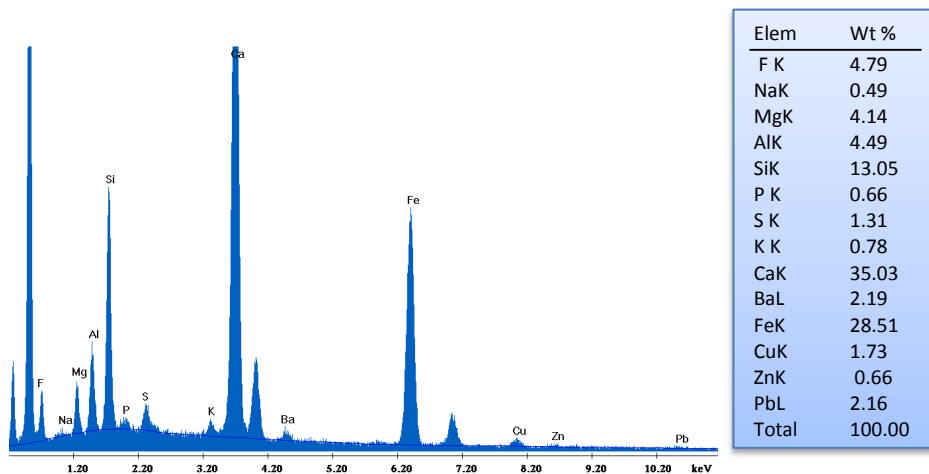


Elem	Wt %
F K	1.49
NaK	0.27
MgK	4.95
AlK	7.14
SiK	20.32
P K	0.48
S K	0.87
K K	1.44
CaK	56.37
TiK	1.11
FeK	5.56
Total	100.00

**Σχήμα 2: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 3**

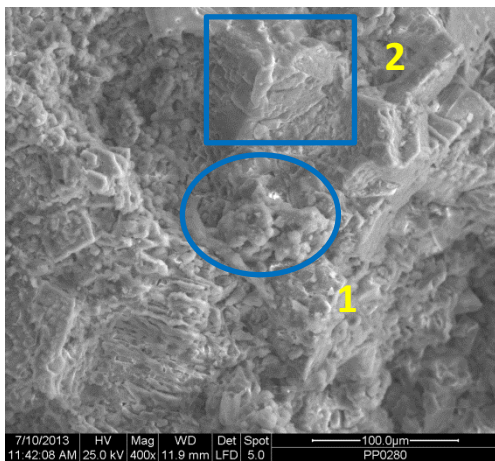


**Εικόνα 4: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 3**

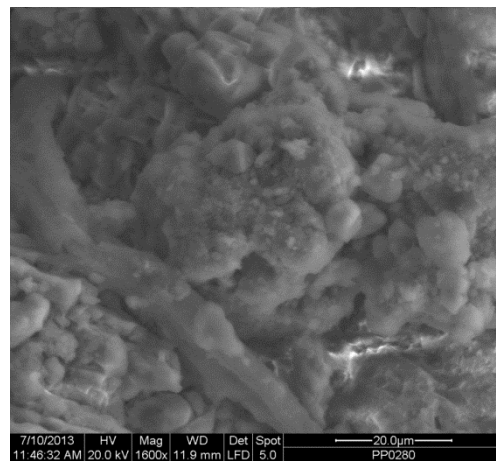


Σχήμα 3: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 4

Στην Εικόνα 5 είναι εμφανής η συνέργεια της βιολογικής διάβρωσης και της απόπλυσης. Αφενός εντοπίζεται στο κέντρο της εικόνας (και σε μεγέθυνση στην Εικόνα 6) η υφή του μύκητα, αφετέρου παρατηρούνται ραβδοειδείς σχηματισμοί κρυστάλλων ασβεστίτη πλήρως προσανατολισμένοι, καθώς και πολυγωνικοί κρύσταλλοι σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα που έχουν προκληθεί από την απόπλυση. Επιπλέον εξετάστηκε λεπτομερέστερα (Εικόνα 7) ο κρύσταλλος που βρίσκεται στο πάνω μέρος της Εικόνας 5 (Σημείο 2). Από την μικροανάλυση ακτίνων X διαπιστώθηκε ότι ο σχηματισμός αυτός αποτελείται κυρίως από ασβέστιο και μαγνήσιο, ενώ ανιχνεύονται και αργίλιο, σίδηρος και μόλυβδος.

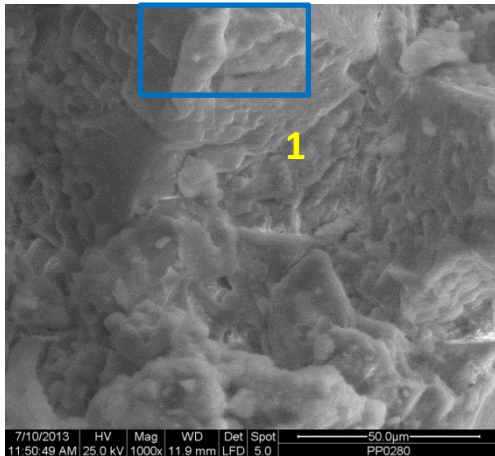


Εικόνα 5: Εικόνα SEI

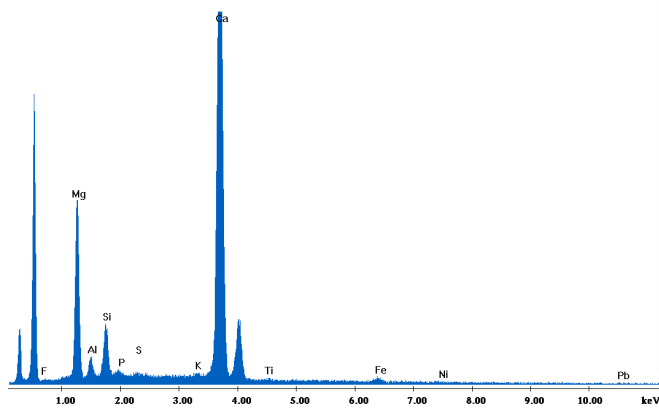


Εικόνα 6: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 5.





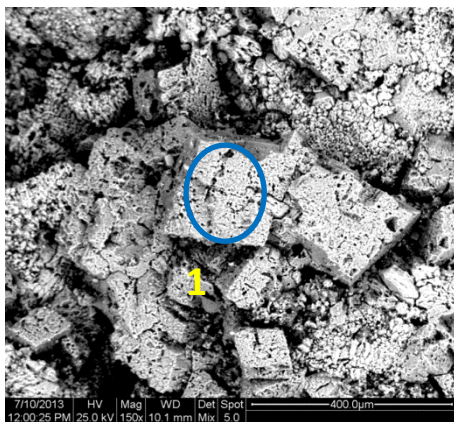
**Εικόνα 7: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 5**



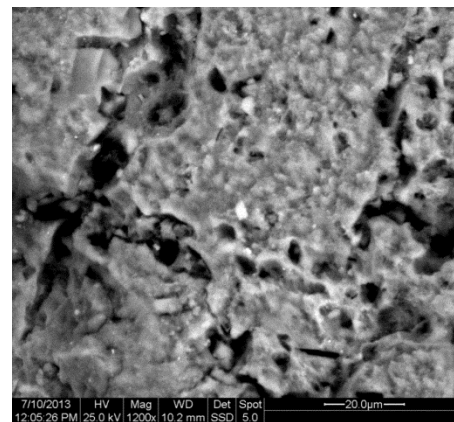
Elem	Wt %
F K	0.64
MgK	22.76
AlK	2.36
SiK	6.41
P K	0.30
S K	0.29
K K	0.61
CaK	62.35
TiK	0.58
FeK	1.30
NiK	0.42
PbL	1.99
Total	100.00

**Σχήμα 4: Μικροανάλυση ακτίνων X στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 7**

Στην Εικόνα 8 είναι εμφανής ο κατακερματισμός του λίθου από τη βιολογική διάβρωση και από την απόπλυση, καθώς παρατηρούνται κυβικοί σχηματισμοί και σημαντική απώλεια της συνοχής του λίθου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 8 (Εικόνα 9). Εκεί εντοπίζεται ανάπτυξη βελονοειδούς διάβρωσης εξαιτίας της δράσης των μικροοργανισμών.

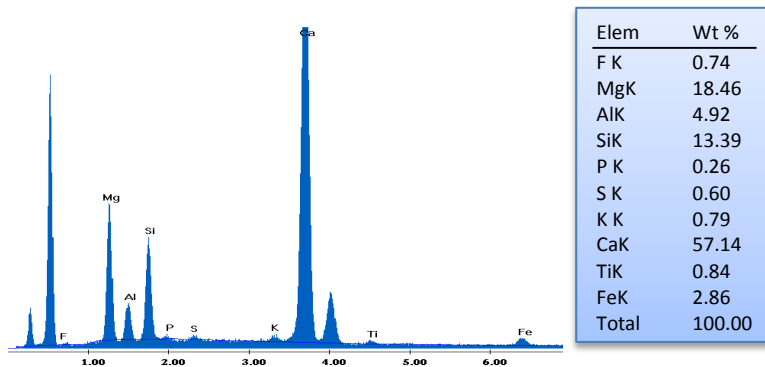


**Εικόνα 8: Εικόνα mix. Κατακερματισμός του λίθου**



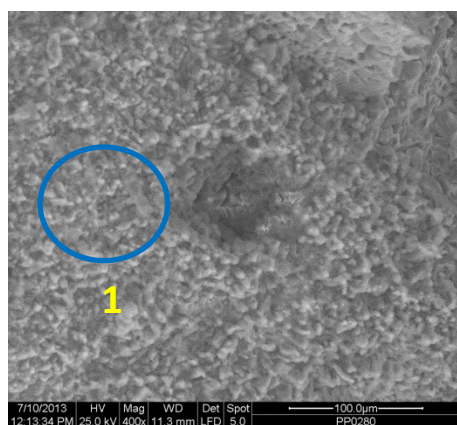
**Εικόνα 9: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 8**



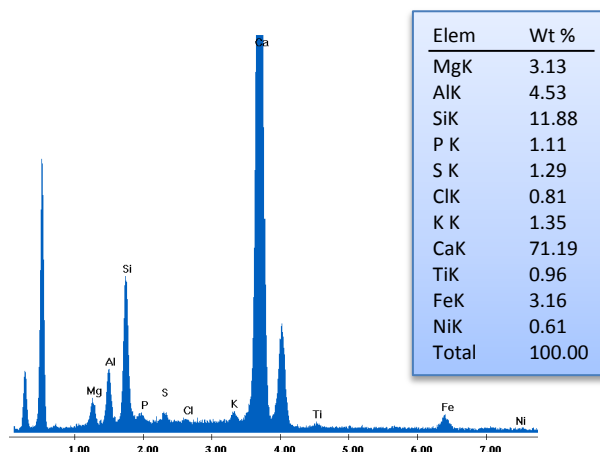


Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια της Εικόνας 9

Στην Εικόνα 10 εντοπίζεται οπή διαμέτρου περίπου 70 μm που ενδεχομένως να έχει προκύψει από τη βιολογική διάβρωση. Επιπλέον η επιφάνεια του λίθου είναι επικαλυμμένη από μυκήλια μύκητα.

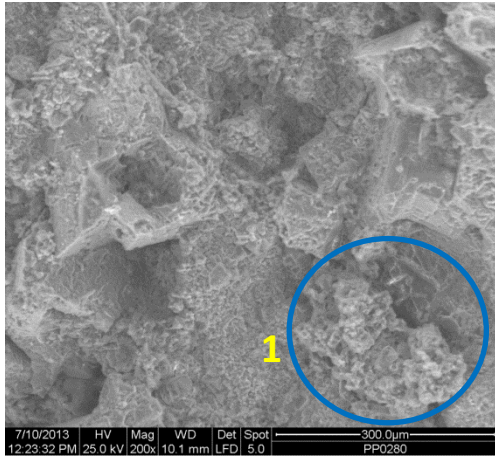


Εικόνα 10: Εικόνα SEI. Οπή και μυκήλια μύκητα

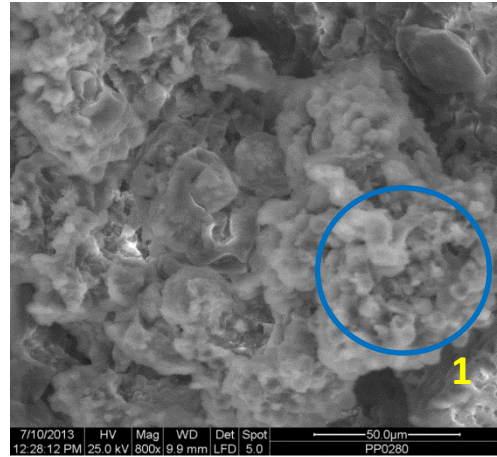


Σχήμα 6: Μικροανάλυση ακτίνων X στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 10

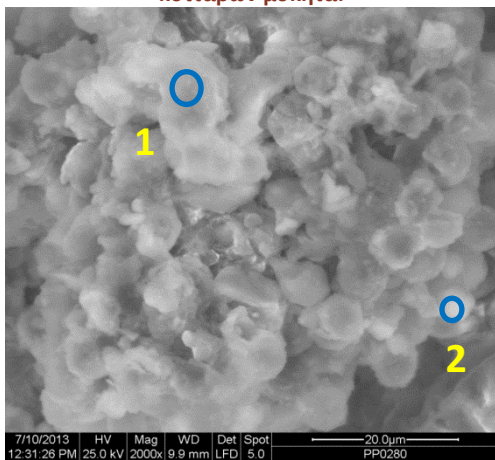
Στις Εικόνες 11, 12 και 13 εμφανίζεται μία αποικία κυττάρων μύκητα. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 11 παρατηρούνται οπές στο λίθο και μυκήλια από το μύκητα. Η αποικία των κυττάρων του μύκητα είναι εμφανής στο κάτω μέρος δεξιά της Εικόνας 11 και έχει μήκος περίπου 230 μm και πλάτος περίπου 130 μm. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μεγέθυνση στο σημείο αυτό. Έτσι στις Εικόνες 12 και 13 γίνονται εμφανείς οι νηματοειδείς σχηματισμοί του μύκητα, καθώς και τα συσσωματώματα κόκκων σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς.



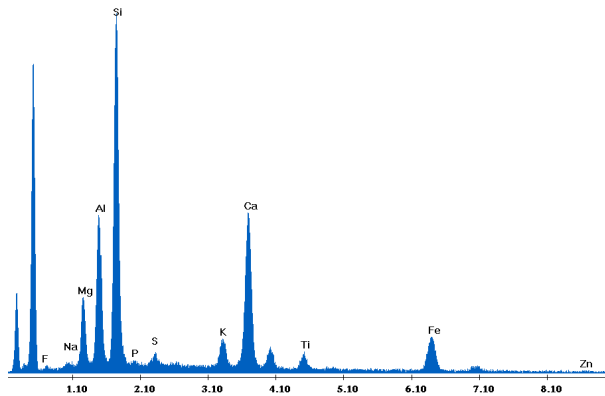
**Εικόνα 11: Εικόνα SEI. Μυκήλια και αποικία κυττάρων μύκητα.**



**Εικόνα 12: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση Χ800 στο Σημείο 1 της Εικόνας 11. Αποικία μύκητα**

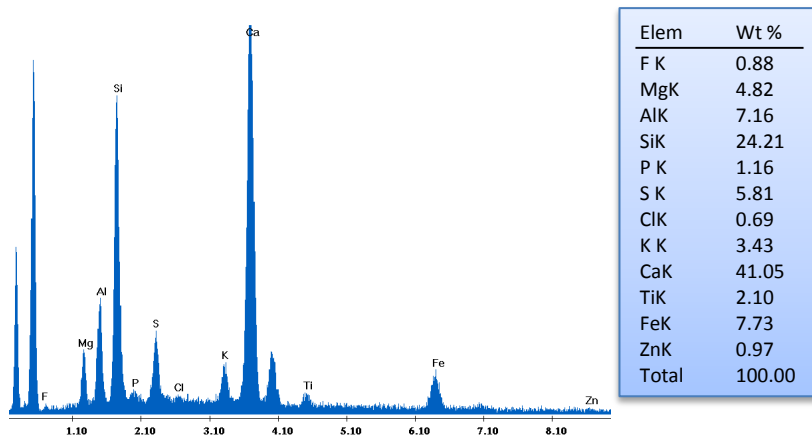


**Εικόνα 13: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση Χ2000 στο Σημείο 1 της Εικόνας 12. Αποικία κυττάρων μύκητα**



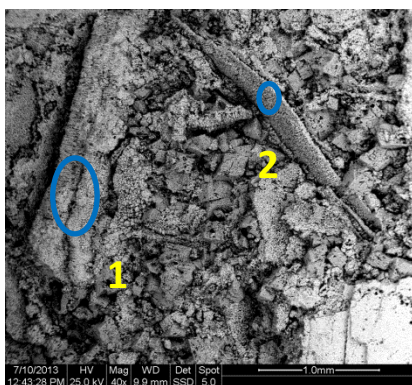
Elem	Wt %
F K	0.60
NaK	0.48
MgK	7.34
AlK	13.29
SiK	38.97
P K	0.50
S K	1.43
K K	3.45
CaK	20.71
TiK	2.74
FeK	9.81
ZnK	0.68
Total	100.00

**Σχήμα 7: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 13**

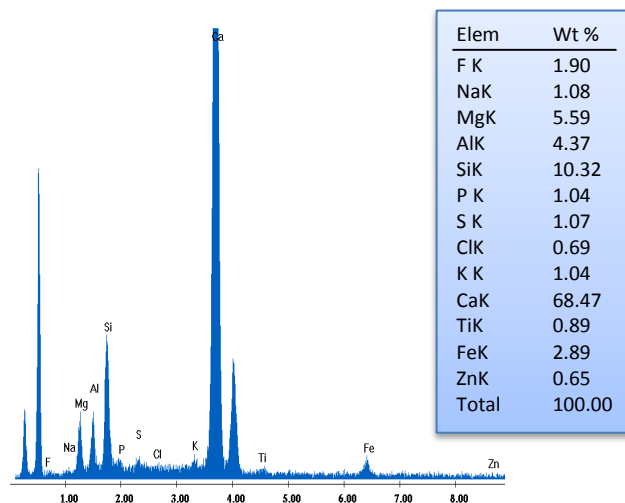


Σχήμα 8: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 2 της Εικόνας 13

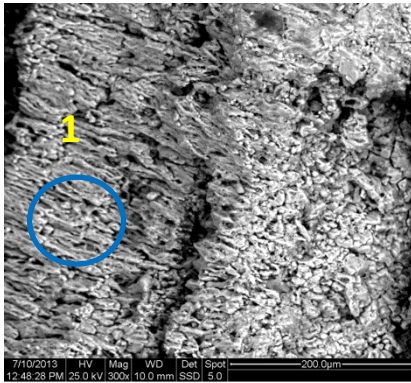
Στην Εικόνα 14 έως 17 είναι επίσης εμφανή τα αποτελέσματα της απόπλυσης και της βιολογικής διάβρωσης στο λίθο. Οι κρύσταλλοι του λίθου απαντώνται με τυχαίο προσανατολισμό και σε διαφορετικά μεγέθη. Επίσης εντοπίζονται δύο ραβδόμορφοι, μακρόστενοι σχηματισμοί οι οποίοι εξετάζονται σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις στις Εικόνες 15, 16 και 17. Έτσι τεκμηριώνεται η έλλειψη συνοχής και κατά συνέπεια η διάβρωση του λίθου.



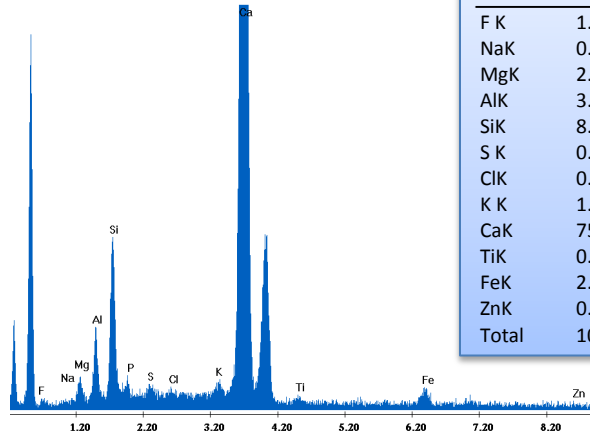
Εικόνα 14: Εικόνα BSE. Κατακερματισμός του λίθου και μακρόστενοι σχηματισμοί



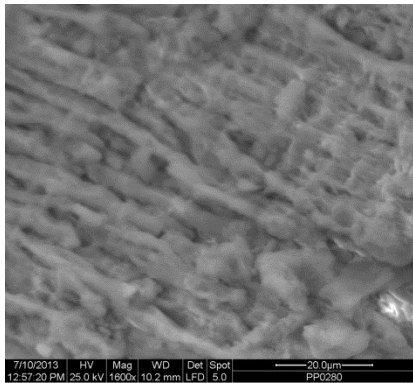
Σχήμα 9: Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 14



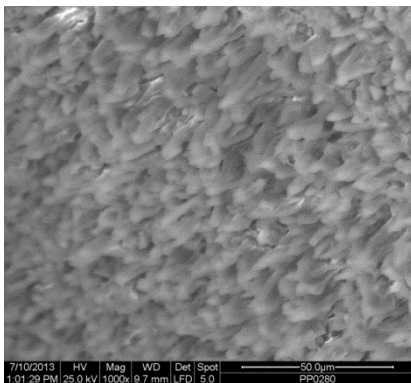
**Εικόνα 15:** Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 14. Ραβδόμορφοι κόκκοι



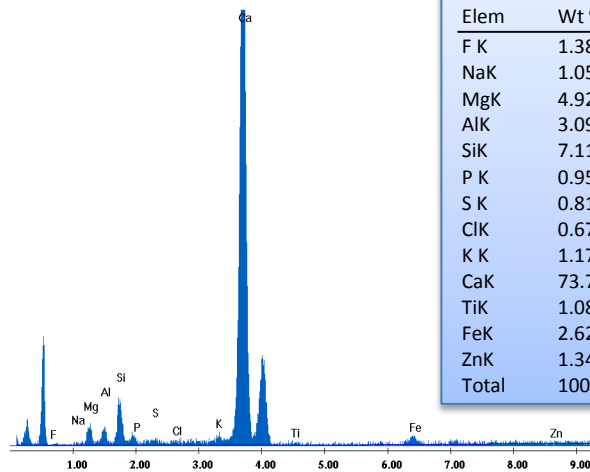
**Σχήμα 10:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την Επιφάνεια της Εικόνας 15



**Εικόνα 16:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 15. Ραβδοειδείς σχηματισμοί

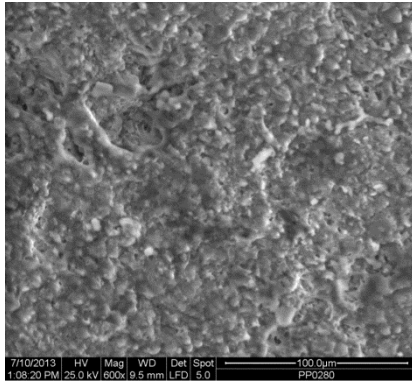


**Εικόνα 17:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 14.

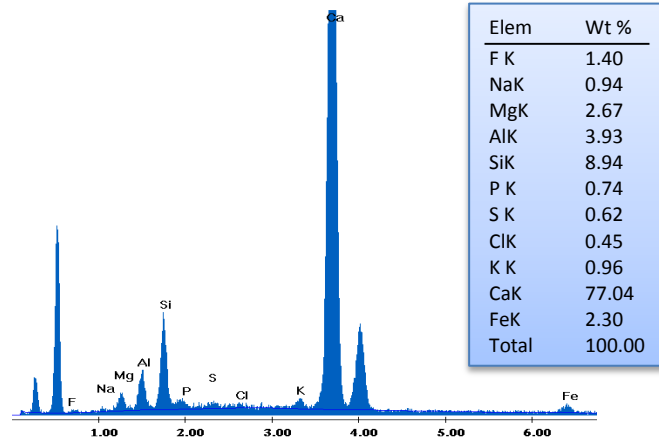


**Σχήμα 11:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη στην Επιφάνεια της Εικόνας 17

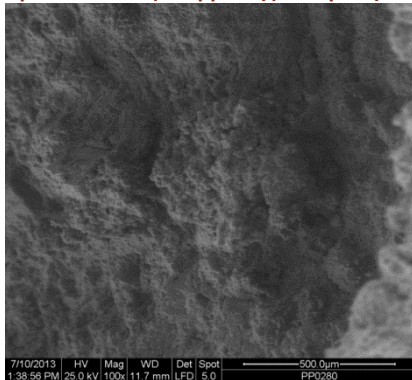
Στην Εικόνα 18 παρατηρείται έναρξη ανάπτυξης βελονοειδούς διάβρωσης στο λίθο, όπως φάνηκε στις Εικόνες 2 και 3. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί μυκήλια σε ολόκληρη της επιφάνεια. Στην Εικόνα 19 οι σχηματισμοί που παρατηρούνται ενδεχομένως να οφείλονται στην ανάπτυξη καρπικών δομών από μικροοργανισμούς.



**Εικόνα 18:** Εικόνα SEI. Έναρξη ανάπτυξης βελονοειδούς διάβρωσης από μύκητα



**Σχήμα 12:** Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 18



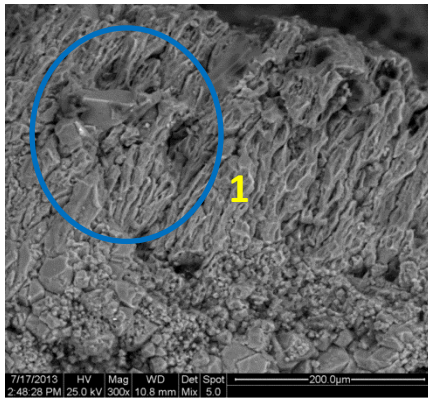
**Εικόνα 19:** Εικόνα SEI. Καρπικές δομές μικροοργανισμών

## Πλάγια τομή

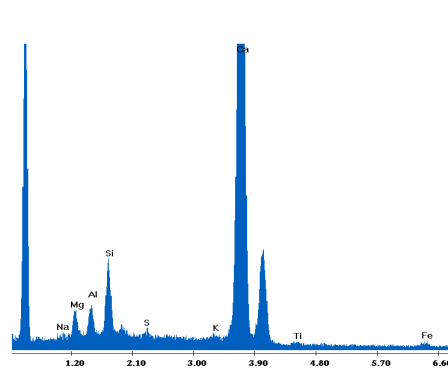
Στη συνέχεια μελετήθηκε και τμήμα της τομής του δείγματος το οποίο δεν έχει υποστεί προηγουμένως καμία ειδική κατεργασία.

Στις Εικόνες 20 έως 22 είναι εμφανείς οι ραβδοειδείς και οι πολυγωνικοί κρύσταλλοι του λίθου, που έχουν προκύψει από την απόπλυση. Συγκεκριμένα στο επάνω τμήμα της Εικόνας 20 παρατηρούνται οι πλήρως προσανατολισμένες ραβδοειδείς κρύσταλλοι του λίθου, ενώ στο κάτω μέρος της Εικόνας διακρίνονται οι πολυγωνικοί κρύσταλλοι.



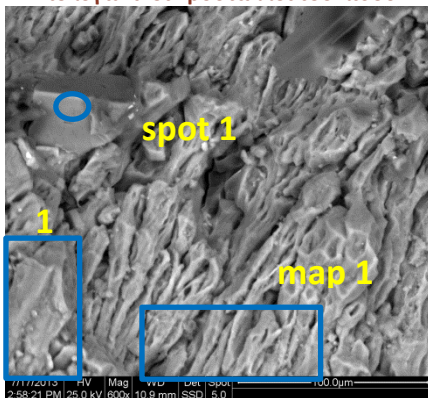


Εικόνα 20: Εικόνα μίχ. Ραβδοειδείς και πολυγωνικοί κρύσταλλοι του λίθου

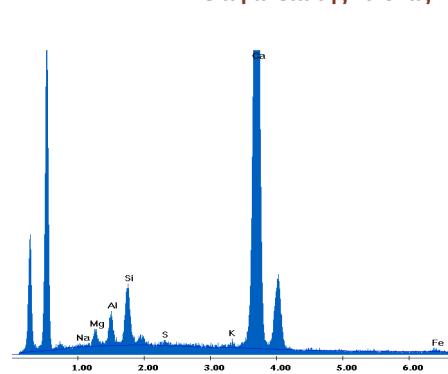


Elem	Wt %
NaK	0.47
MgK	2.73
AlK	2.35
SiK	5.82
S K	0.53
K K	0.61
CaK	85.32
TiK	0.51
FeK	1.67
Total	100.00

Σχήμα 13: Μικροανάλυση ακτίνων Χ σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 20

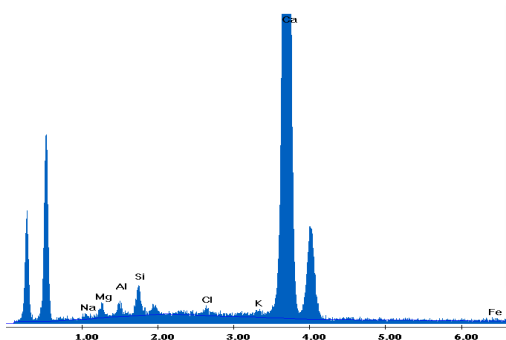


Εικόνα 21: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 20



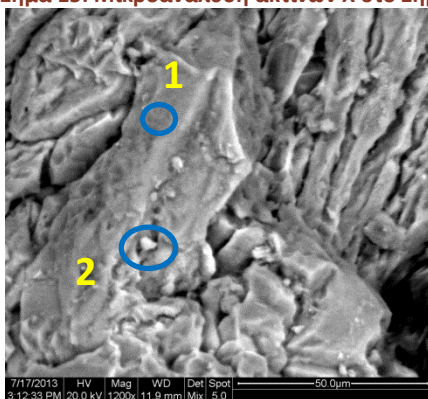
Elem	Wt %
NaK	0.47
MgK	2.13
AlK	2.96
SiK	5.73
S K	0.49
K K	0.71
CaK	86.21
FeK	1.31
Total	100.00

Σχήμα 14: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 21

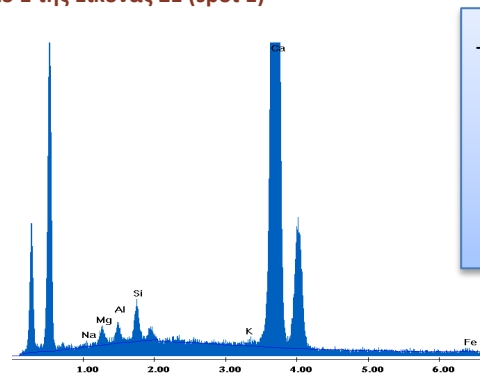


Elem	Wt %
NaK	0.77
MgK	1.53
AlK	1.15
SiK	2.34
ClK	0.67
K K	0.76
CaK	91.93
FeK	0.85
Total	100.00

Σχήμα 15: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 21 (spot 1)

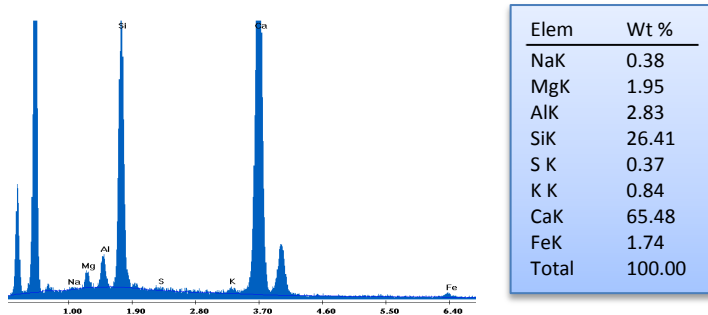


Εικόνα 22: Εικόνα μίχ. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 21



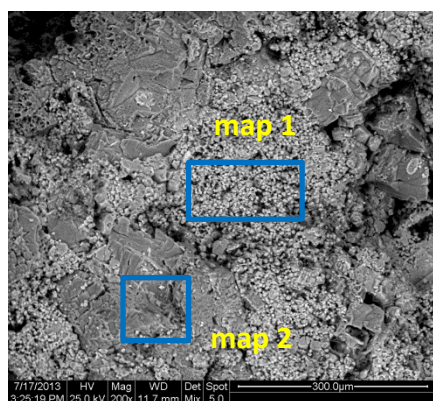
Elem	Wt %
NaK	0.64
MgK	2.23
AlK	1.59
SiK	2.95
K K	0.46
CaK	91.37
FeK	0.75
Total	100.00

Σχήμα 16: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 22

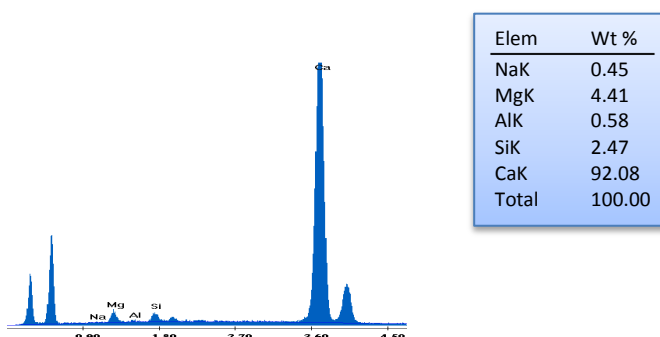


Σχήμα 17: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 2 της Εικόνας 22

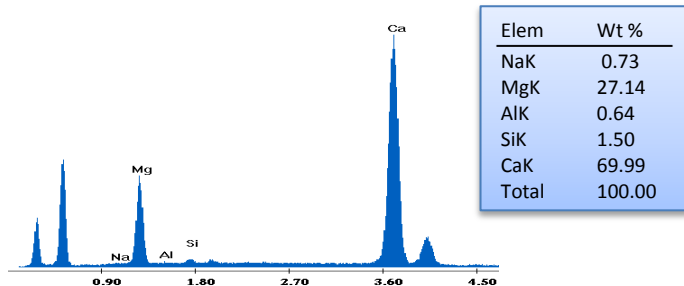
Στην Εικόνα 23 εντοπίζονται κρύσταλλοι δολομιτικής σύστασης, οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα από κοκκώδεις σχηματισμούς, ενώ στην Εικόνα 24 εξετάζονται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση οι κόκκοι του υλικού.



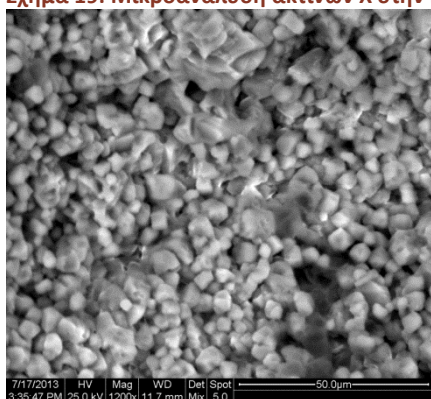
Εικόνα 23: Εικόνα μίχ. Κρύσταλλοι δολομιτικής σύστασης και κόκκοι δομικού υλικού



Σχήμα 18: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 23

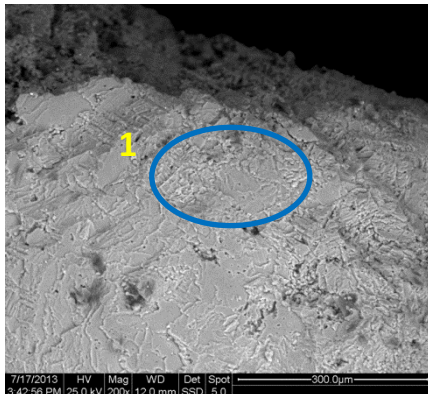


Σχήμα 19: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 2 της Εικόνας 23

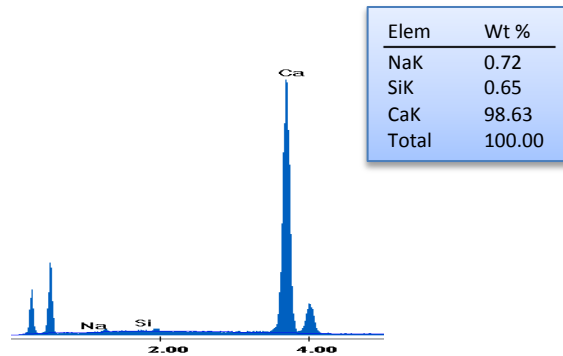


Εικόνα 24: Εικόνα μίχ. Κόκκοι του λίθου

Στην Εικόνα 25 εμφανίζεται κρύσταλλος ασβεστίτη ο οποίος έχει αποκαλυφθεί από την απόπλυση.

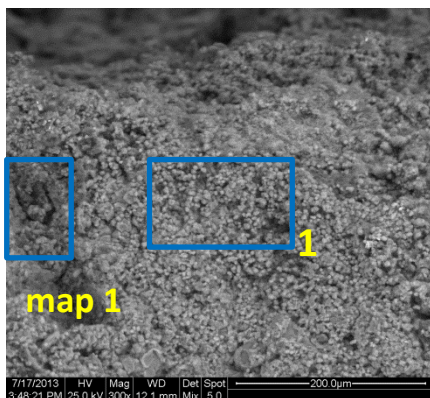


Εικόνα 25: Εικόνα BSE. Κρύσταλλος ασβεστίτη

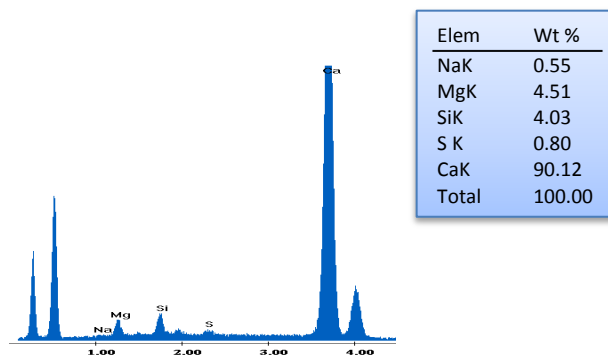


Σχήμα 20: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 25

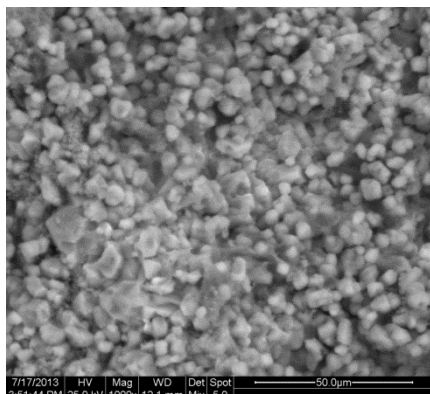
Στις Εικόνες 26 και 27 τεκμηριώνεται η φθορά του λίθου, καθώς είναι εμφανής η ασυνέχεια και η απώλεια υλικού. Οι κρύσταλλοι του λίθου έχουν πολυγωνικό σχήμα και μικρό μέγεθος.



Εικόνα 26: Εικόνα mix.

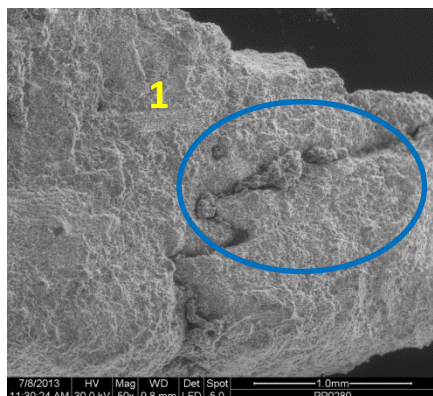


Σχήμα 21: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 26

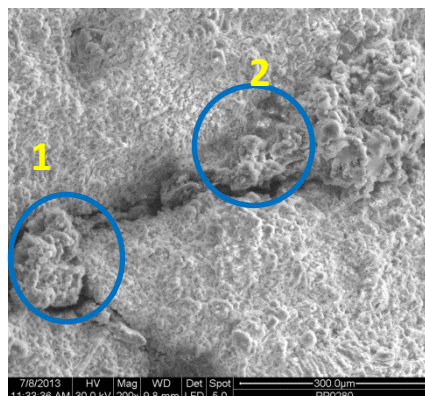


Εικόνα 27: Εικόνα mix. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 26

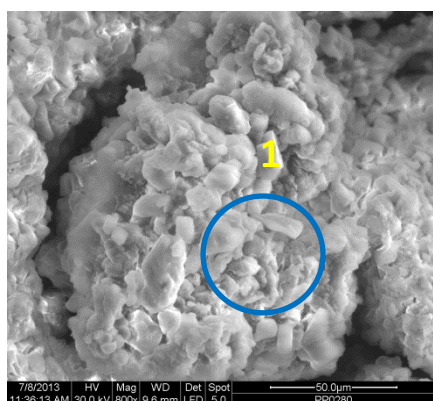
Στις Εικόνα 1 και 2 είναι εμφανής μία ρωγμή με πλάτος περίπου 0,1 mm στις παρυφές τις οποίες έχουν αναπτυχθεί σχηματισμοί που αποτελούνται από μυκήλια και επικαθίσεις σκόνης. Στις Εικόνες 3 και 4 παρατηρείται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση ο ένας από τους δύο σχηματισμούς στον οποίο εντοπίζονται μυκήλια και συσσωματώματα κόκκων σκόνης.



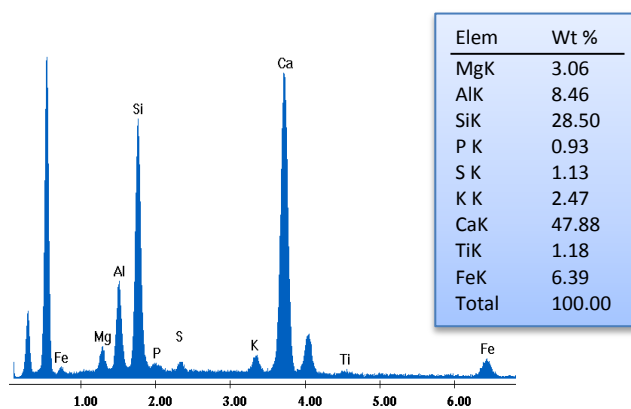
**Εικόνα 1:** Εικόνα SEI. Επικαθίσεις σκόνης και προϊόντα βιολογικής διάβρωσης πάνω στη ρωγμή



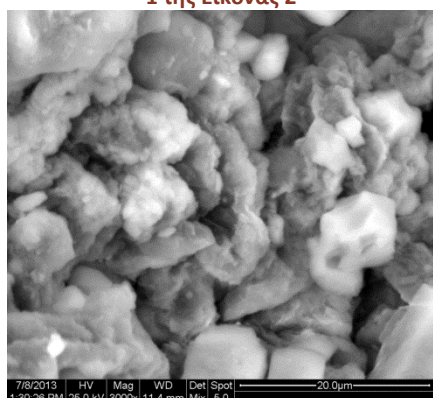
**Εικόνα 2:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 1



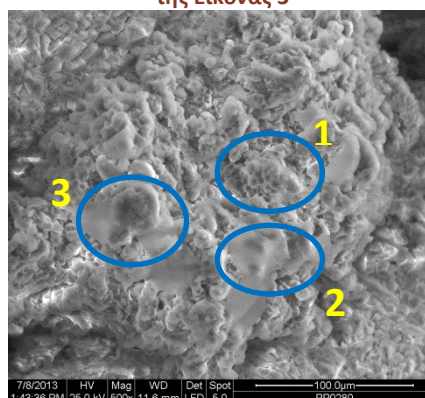
**Εικόνα 3:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 2



**Σχήμα 1:** Μικροανάλυση ακτίνων X στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 3

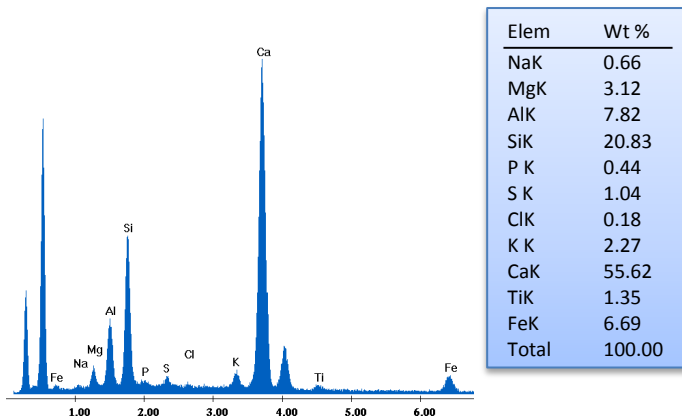


**Εικόνα 4:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 3



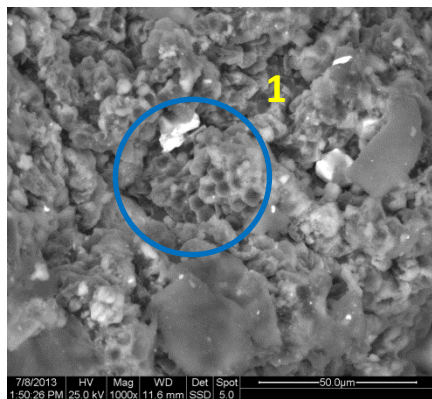
**Εικόνα 5:** Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 2



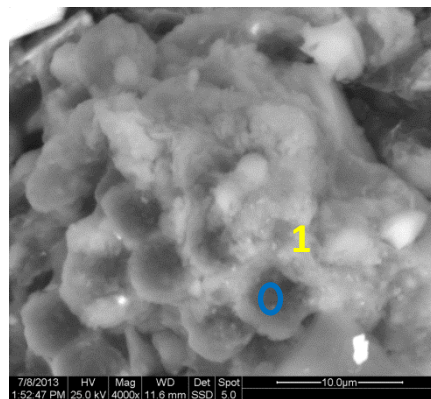


Σχήμα 2: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στη συνολική επιφάνεια της Εικόνας 5

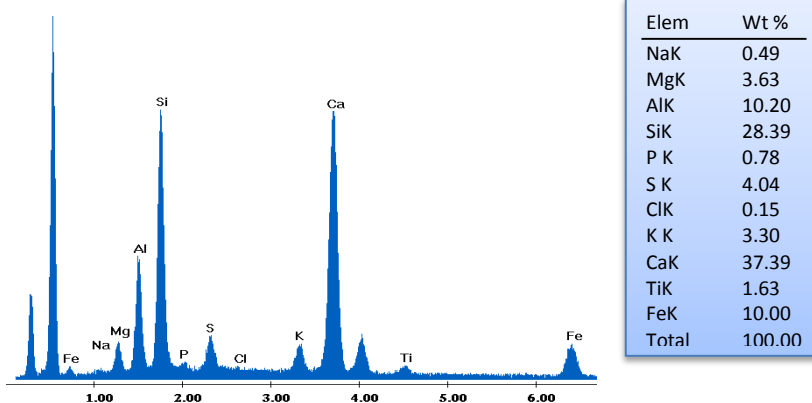
Στις Εικόνες 5 έως 9 εξετάζεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση ο δεύτερος σχηματισμός. Αναλυτικότερα στις Εικόνες 6 και 7 παρατηρούνται αποικίες κυττάρων μύκητα, καθώς επίσης και ανάπτυξη μυκηλίων. Επίσης ο μαύρος κόκκος της Εικόνας 8 αποτελείται από επικαθίσεις σκόνης και αιθάλης, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τη μικροανάλυση ακτίνων Χ. Παράλληλα ο σχηματισμός της Εικόνας 9 οφείλεται στην ύπαρξη κόκκων σκόνης. Η ρωγμή αυτή πιθανώς να οφείλεται στους στυλόλιθους, συνεπώς μπορεί να βρήκαν κατάλληλο περιβάλλον ανάπτυξης οι μικροοργανισμοί στις παρυφές. Μία άλλη υπόθεση είναι να προέκυψε η ρωγμή από τη δράση των μικροοργανισμών.



Εικόνα 6: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 5

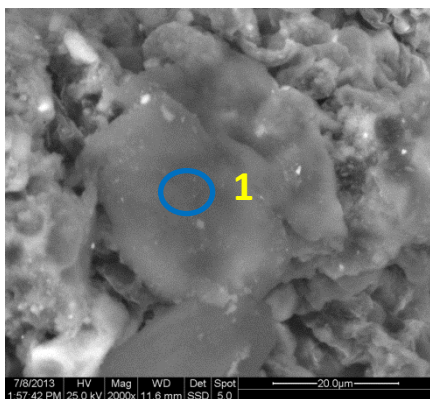


Εικόνα 7: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 6

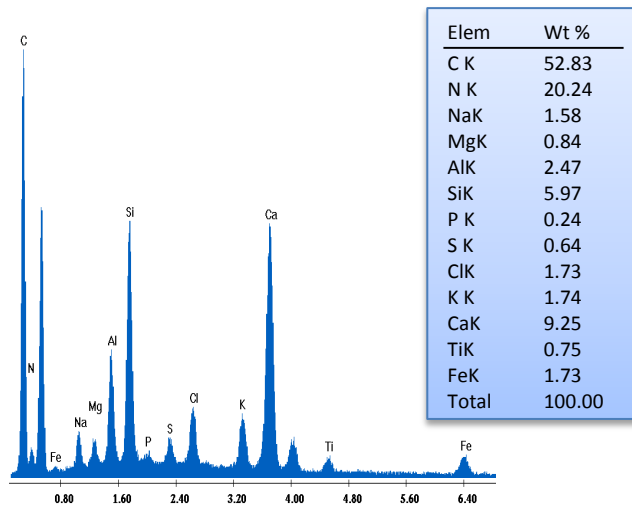


Σχήμα 3: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο σημείο 1 της Εικόνας 7

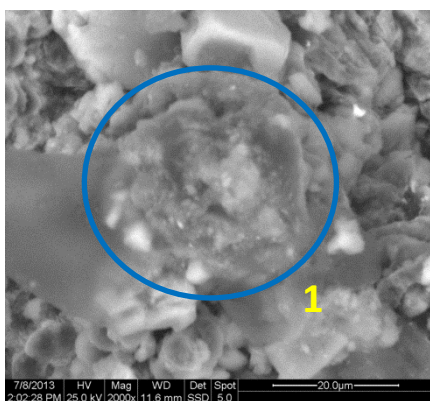




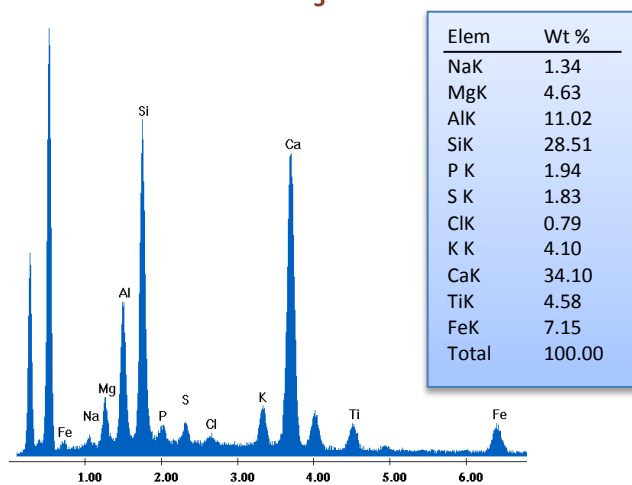
Εικόνα 8: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 5



Σχήμα 4: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 5

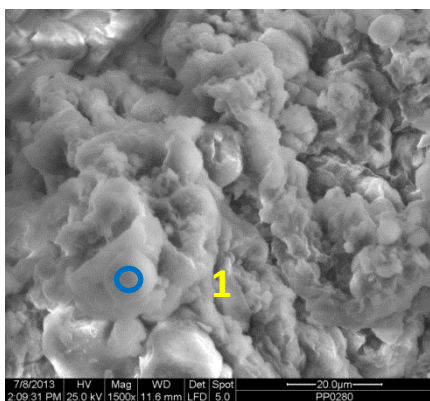


Εικόνα 9: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 3 της Εικόνας 5

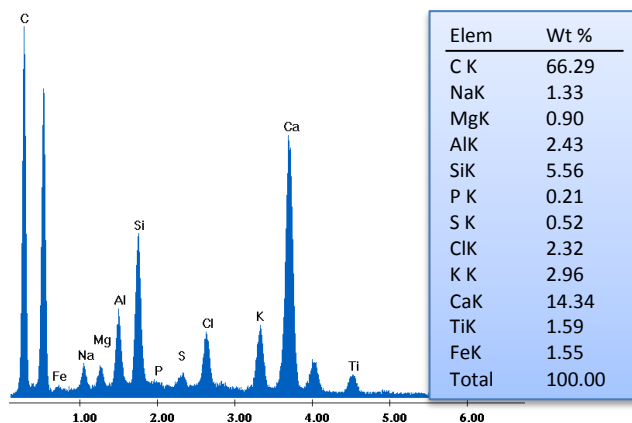


Σχήμα 5: Μικροανάλυση ακτίνων X στην Επιφάνεια 1 της Εικόνας 9

Στην Εικόνα 10 είναι εμφανής η ανάπτυξη μυκηλίων πάνω στην επιφάνεια του λίθου. Οι σφαιρικοί σχηματισμοί επίσης οφείλονται στην ύπαρξη μικροοργανισμών.

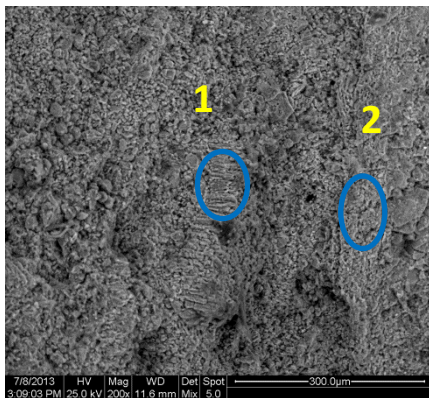


Εικόνα 10: Εικόνα SEI. Σχηματισμός μυκηλίων και συσσωματώματα κόκκων σκόνης

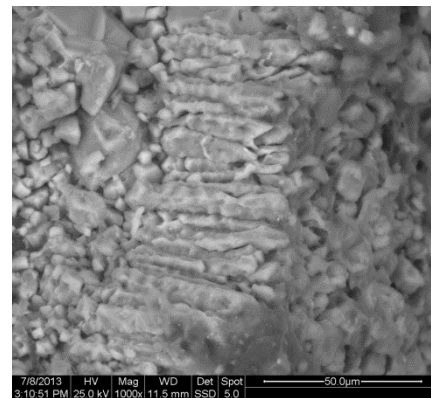


Σχήμα 6: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 10

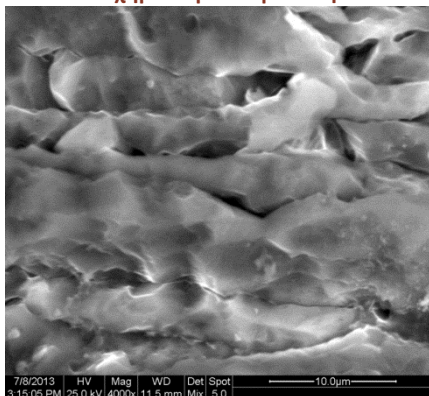
Στην Εικόνα 11 τεκμηριώνεται η διάβρωση του λίθου και η απώλεια υλικού από τη δράση των μικροοργανισμών. Αρχικά παρατηρούνται ραβδοειδείς κρύσταλλοι ασβεστίτη, οι οποίοι μελετώνται αναλυτικότερα στις Εικόνας 12 και 13. Στην Εικόνα 11 παρατηρούνται πολυγωνικοί κρύσταλλοι ασβεστίτη, ανάμεσα στους οποίους εντοπίζονται κόκκοι σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς και ραβδοειδείς κρύσταλλοι ασβεστίτη. Με μεγαλύτερη μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 11 (Εικόνες 14 και 15) διαπιστώνεται κατακερματισμός του λίθου καθώς και μυκήλια και επικαθίσεις σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς. Επίσης είναι εμφανείς οπές που έχουν δημιουργηθεί επάνω στην επιφάνεια του λίθου.



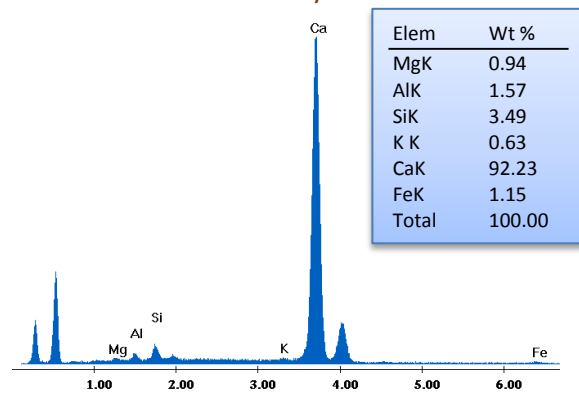
**Εικόνα 11: Εικόνα μίχ. Κόκκοι και ραβδόμορφοι σχηματισμοί ασβεστίτη**



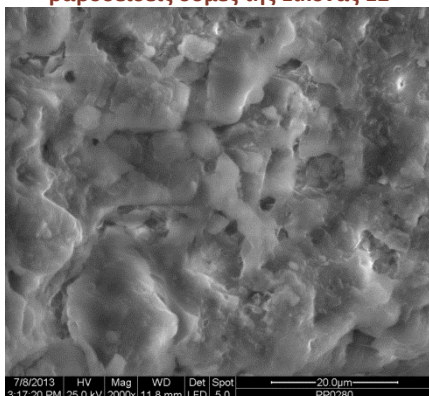
**Εικόνα 12: Εικόνα BSE. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 11**



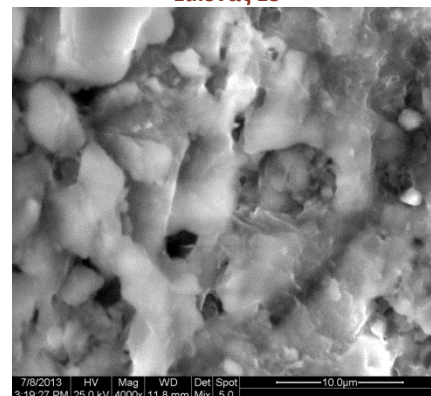
**Εικόνα 13: Εικόνα μίχ. Μεγέθυνση στις ραβδοειδείς δομές της Εικόνας 12**



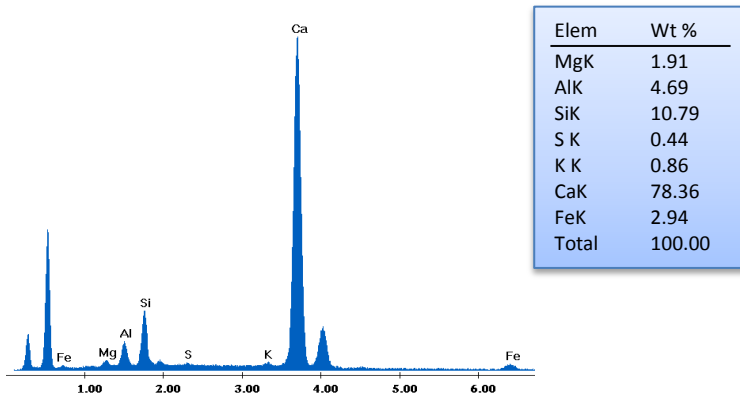
**Σχήμα 7: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 13**



**Εικόνα 14: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 2 της Εικόνας 11**

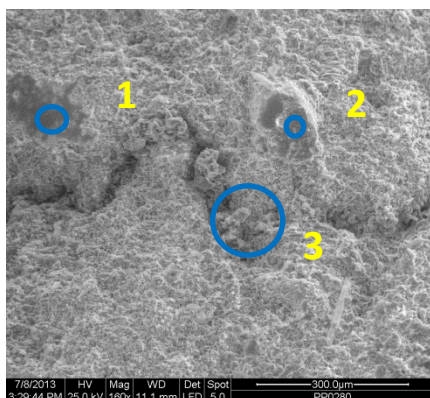


**Εικόνα 15: Εικόνα μίχ. Μεγέθυνση στην επιφάνεια της Εικόνας 14**

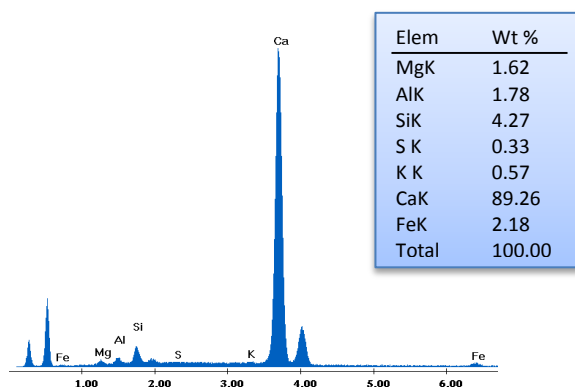


Σχήμα 8: Μικροανάλυση ακτίνων X στην επιφάνεια της Εικόνας 15

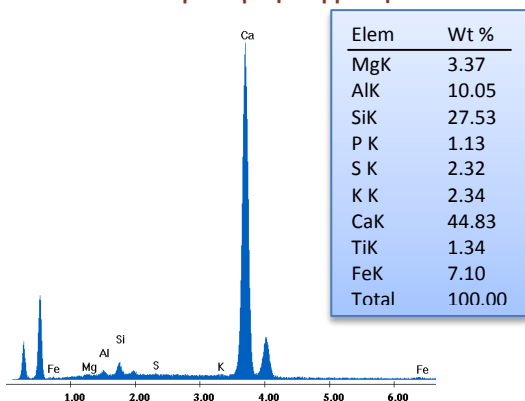
Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται μία ρωγμή με πλάτος περίπου 55 μm στο εσωτερικό της οποίας έχουν αναπτυχθεί σχηματισμοί από τη δράση των μικροοργανισμών. Επίσης παρατηρούνται κόκκοι ασβεστίτη, ενώ σε μεγάλο τμήμα της επιφάνειας εντοπίζονται μυκηλία του μύκητα. Επιπλέον είναι εμφανείς δύο κρύσταλλοι ασβεστίτη στα Σημεία 1 και 2 της Εικόνας 16. Στην Εικόνα 17 εμφανίζεται η ανάπτυξη υφής και μυκηλίων μύκητα στο εσωτερικό της ρωγμής. Η υφή έχει μήκος περίπου 60 μm και διάμετρο 50 μm. Επιπλέον στην επιφάνεια αυτή εντοπίζονται και επικαθίσεις κόκκων σκόνης.



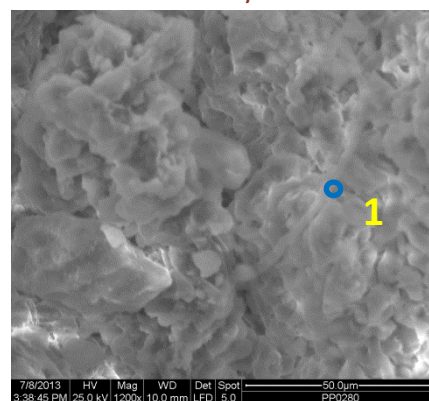
Εικόνα 16: Εικόνα SEI. Ρωγμή που προκλήθηκε από βιολογική διάβρωση



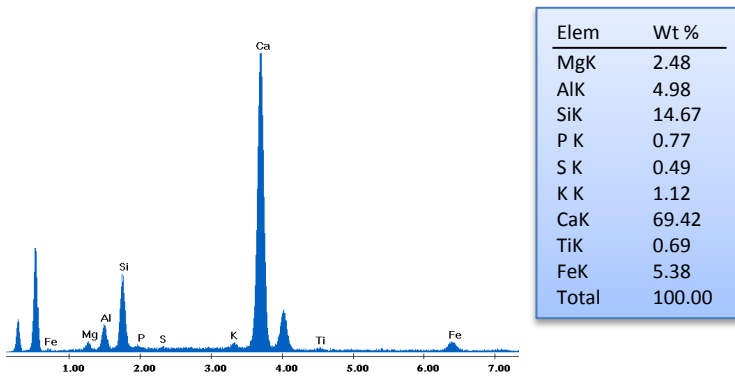
Σχήμα 9: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 1 της Εικόνας 16



Σχήμα 10: Μικροανάλυση ακτίνων X στο Σημείο 2 της Εικόνας 16

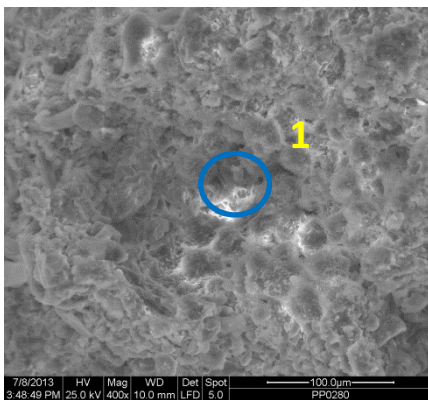


Εικόνα 17: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 3 της Εικόνας 16

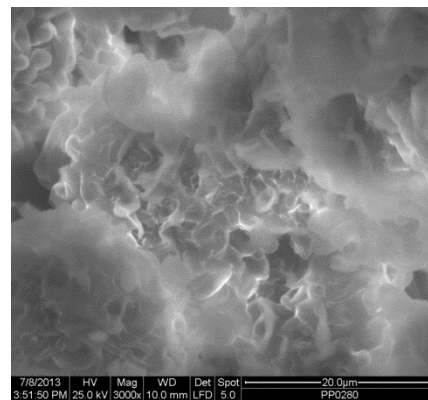


Σχήμα 11: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στο Σημείο 1 της Εικόνας 16

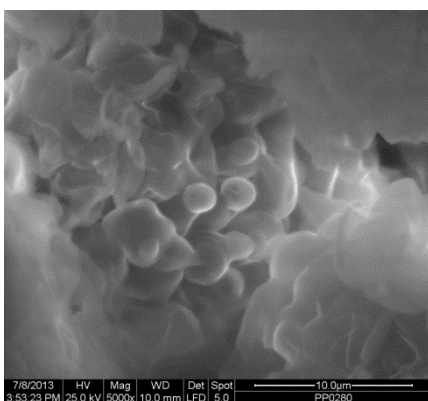
Στην Εικόνα 18 είναι εμφανή τα μυκήλια του μύκητα καθώς και συσσωματώματα κόκκων σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς σε όλη την επιφάνεια που εξετάζεται. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ανάπτυξη μυκηλίων και ινωδών σχηματισμών του μύκητα. Επιπλέον στην Εικόνα 20 παρατηρείται μία αποικία κυττάρων μύκητα καθώς και μυκήλια.



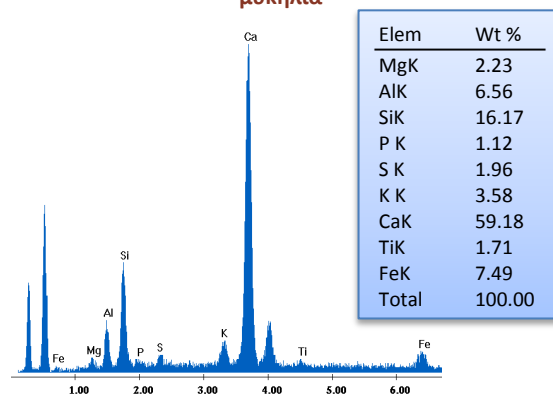
Εικόνα 18: Εικόνα SEI. Ανάπτυξη μυκηλίων και συσσωματωμάτων κόκκων σκόνης



Εικόνα 19: Εικόνα SEI. Μεγέθυνση στο Σημείο 1 της Εικόνας 18. Ινώδης ανάπτυξη μικροοργανισμών και μυκήλια



Εικόνα 20: Εικόνα SEI. Αποικία κυττάρων μύκητα

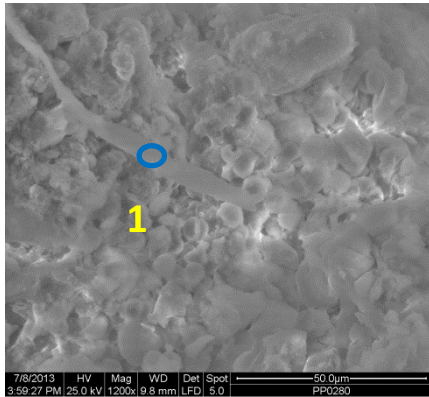


Σχήμα 12: Μικροανάλυση ακτίνων Χ στην επιφάνεια της Εικόνας 20

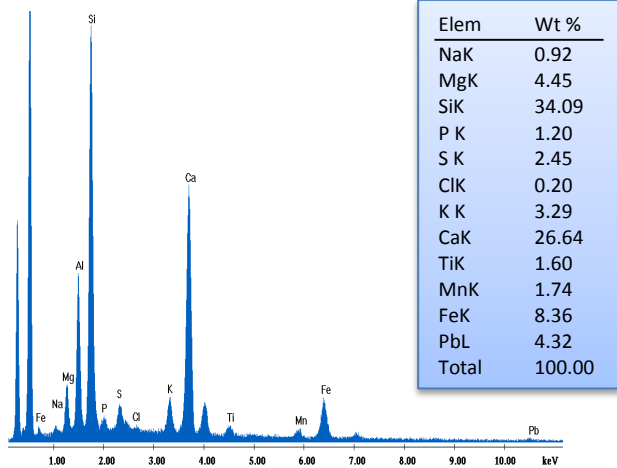
Στην Εικόνα 21 είναι εμφανής μία υφή που αναπτύσσεται από το μύκητα και προκαλεί διάβρωση με τον τρόπο που έχει περιγραφεί παραπάνω. Η υφή αυτή



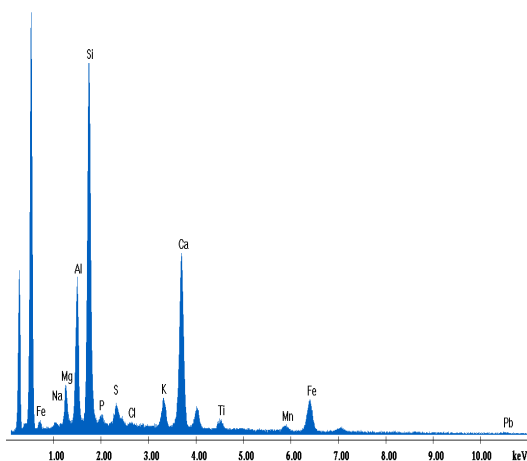
έχει μήκος περίπου 85  $\mu\text{m}$  και διάμετρο 4,5  $\mu\text{m}$ . Παράλληλα στην επιφάνεια αυτή εντοπίζονται και μυκήλια από το μικροοργανισμό, ενώ σε μεγάλο τμήμα της έχουν αναπτυχθεί συσσωματώματα κόκκων σκόνης που αποτελούνται από μικροοργανισμούς.



**Εικόνα 21:** Εικόνα SEI. Ανάπτυξη μυκηλίων και υφής από μύκητα



**Σχήμα 13:** Μικροανάλυση ακτίνων X σε ολόκληρη την επιφάνεια της Εικόνας 21



**Σχήμα 14:** Μικροανάλυση ακτίνων X στην υφή (Σημείο 1) της Εικόνας 21

Elem	Wt %
NaK	0.62
MgK	4.34
AlK	11.64
SiK	37.05
P K	1.00
S K	2.36
ClK	0.31
K K	3.49
CaK	23.98
TiK	1.76
MnK	1.40
FeK	8.54
PbL	3.50
Total	100.00



#### 4.2.2.5 Συμπεράσματα από την εξέταση των δειγμάτων με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Από τον έλεγχο με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ μπορούμε να καταλήξουμε σε σημαντικά συμπεράσματα για την επιφανειακή φθορά, αφενός σε σχέση με τη μορφολογία της και αφετέρου σε σχέση με τη χημική σύστασή της. Στη συνέχεια παρατίθενται οι παρατηρήσεις που προέκυψαν.

Δείγματα από προστατευμένες περιοχές από το νερό της βροχής

##### Επιφάνειες μαύρης κρούστας

Τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή περιεκτικότητα σε γύψο, ενώ περιέχουν και πυρίτιο. Σε αυτά παρατηρούνται οι σχηματισμοί του γύψου στην επιφάνεια της κρούστας. Έτσι ο γύψος έχει αναπτυχθεί με φυλλοειδείς, βελονοειδείς και σπογγοειδείς δομές, ενώ συχνά παρατηρούνται συμπαγή πλέγματα και λείες ομοιόμορφες επιφάνειες με υψηλή περιεκτικότητα σε γύψο. Παράλληλα διακρίνονται μικροί κόκκοι στην επιφάνεια της κρούστας που αποδίδονται σε επικαθίσεις σκόνης. Οι καστανές περιοχές της μαύρης κρούστας έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε σίδηρο συγκριτικά με τις μαύρες.

Συγκεκριμένα μελετώντας την επιφάνεια του δείγματος **J\_F\_black 1** είναι εμφανείς μία μπεζ και μία μαύρη περιοχή. Η μπεζ περιοχή αποτελείται από γύψο (~34%), πυρίτιο (~4%) και σίδηρο (~2%). Επιπλέον στην περιοχή μαύρης απόχρωσης η περιεκτικότητα του δείγματος σε γύψο είναι περίπου 36%, σε πυρίτιο 3% και σε σίδηρο 1,5%. Και στις δύο περιοχές δεν είναι υψηλή η συγκέντρωση του άνθρακα. Μελετώντας την πλάγια τομή διακρίνονται τρεις περιοχές. Το πρώτο επιφανειακό στρώμα πάχους 100 – 85 μm εμφανίζει μεγάλη περιεκτικότητα σε γύψο, ενώ από τις εικόνες διακρίνεται το πλέγμα των βελονοειδών δομών του γύψου. Η συγκέντρωση του γύψου στο επιφανειακό στρώμα είναι περίπου 34%, του πυριτίου 4% και του σιδήρου 12%, ενώ υπάρχει και αρκετή ποσότητα άνθρακα. Ακριβώς από κάτω βρίσκεται στρώμα πυριτικής σύστασης με πάχος περίπου 30 – 25 μm. Το στρώμα αυτό έχει περίπου 7% περιεκτικότητα σε γύψο, 14% σε πυρίτιο, 2% σε σίδηρο, ενώ παρουσιάζεται και αρκετή ποσότητα άνθρακα.

Στο τρίτο στρώμα εισχωρεί το πυριτικό υλικό στους ασβεστιτικούς κόκκους του υγιούς τμήματος του λίθου σε βάθος 100 μm. Συνεπώς, το πυριτικό υλικό δεν προέρχεται από επικαθίσεις σκόνης, αλλά μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υλικού, που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για τη στερέωση και την προστασία της επιφάνειας. Εδώ παρατηρείται μικρότερη περιεκτικότητα σε γύψο (~12%), σημαντική ποσότητα πυριτίου (~10%) και σίδηρος με συγκέντρωση 2,3%.

Τέλος, στο υγιές στρώμα του λίθου μεγάλη είναι η σύσταση του ασβεστίτη, ενώ εντοπίζεται και μαγνήσιο, καθώς ο λίθος περιέχει δολομίτη. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύουν τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις καθώς και τις παρατηρήσεις από την εξέταση των δειγμάτων με τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών.

Το δείγμα **J\_F\_black 2** αποτελείται από μία περιοχή συνεκτικής μαύρης κρούστας, μία καστανή, μια πορτοκαλί περιοχή και μια λευκή αποπλυμένη επιφάνεια. Όπως αναφέρθηκε και στις παρατηρήσεις από τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών οι περιοχές αυτές έχουν προκύψει εξαιτίας του διαφορετικού βαθμού έκθεσής τους στο βρόχινο νερό. Η μαύρη περιοχή περιέχει μεγάλη ποσότητα γύψου (~34%), πυρίτιο με συγκέντρωση ~4%, καθώς και σημαντική ποσότητα άνθρακα. Στην καφέ περιοχή παρουσιάζεται γύψος με συγκέντρωση περίπου 37%, πυρίτιο (~2%), σίδηρος (~1,2%) και ο άνθρακας βρίσκεται σε μικρή ποσότητα. Στην πορτοκαλί περιοχή ιδιαίτερα υψηλή είναι η περιεκτικότητα σε πυρίτιο (~17%) και σίδηρο (~4,5%), ενώ ο γύψος έχει συγκέντρωση περίπου 20% και η ποσότητα του άνθρακα είναι μικρή. Τέλος, στην λευκή επιφάνεια επιβεβαιώνεται η απόπλυση, καθώς εμφανίζεται ως κύριο συστατικό ο ασβεστίτης, ενώ με μικρότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται ο γύψος (~6%), το πυρίτιο (~4,7%) και ο σίδηρος (~1,4%). Και σε αυτή την περιοχή είναι ελάχιστη η ποσότητα του άνθρακα.

#### **Περιοχή πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού**

Στο δείγμα της περιοχής πορτοκαλί χροιάς **J\_F\_orange** διακρίνονται δύο περιοχές, μία πορτοκαλί και μία καστανή, οι οποίες εξετάστηκαν ξεχωριστά με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Στην πορτοκαλί περιοχή παρατηρούνται λείοι ομοιόμορφοι και ανομοιόμορφοι σχηματισμοί με υψηλή περιεκτικότητα σε γύψο (~31%) καθώς και μικρή ποσότητα πυριτίου (~4%), σιδήρου (~2%) και χαλκού (~1,7%). Παράλληλα η καστανή περιοχή εμφανίζει εντονότερο ανάγλυφο και περιέχει μεγάλη ποσότητα γύψου (~27%) και πυριτίου (~14%), επίσης εντοπίζεται σίδηρος (~4%), τιτάνιο (~0,7%), ενώ ο χαλκός απουσιάζει. Από τον έλεγχο της πλάγιας τομής διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιοχές. Στην πρώτη περιοχή παρατηρούνται ρωγμές (βάθους ~400 μm) στο υγιές τμήμα του λίθου χωρίς κάποια επιφανειακή κρούστα. Η συγκέντρωση του γύψου στις ρωγμές είναι μικρή, περίπου 2%, του πυριτίου ~4%, του σιδήρου ~1,5%, ενώ αρκετή είναι και η ποσότητα του άνθρακα. Στην δεύτερη περιοχή είναι εμφανής επιφανειακή κρούστα γύψου πάχους 100 μm και ρωγμές στο εσωτερικό του λίθου. Στην περίπτωση αυτή η περιεκτικότητα σε γύψο είναι περίπου 12%, σε πυρίτιο ~4,5% και σε σίδηρο ~1,3%. Επίσης υπάρχει αρκετή ποσότητα άνθρακα. Τέλος, εντοπίζεται περιοχή με κρούστα γύψου πάχους 25 μm. Η περιεκτικότητα σε γύψο είναι περίπου 12%, σε πυρίτιο 2% και σε σίδηρο 0,75%, ενώ σημαντική είναι και η συγκέντρωση του άνθρακα.

Οι επιφάνειες που είναι προστατευμένες από το νερό της βροχής παρουσιάζουν είτε την τυπική μορφολογία των μαύρων κρουστών ή περιοχές πορτοκαλοκάστανου

χρωματισμού. Και οι δύο περιπτώσεις είναι γυψοποιημένες επιφάνειες με μέσο πάχος στοιβάδας γύψου από 25 έως 100  $\mu\text{m}$ . Επιπλέον κάτω από το στρώμα του γύψου και στις δύο περιπτώσεις ανιχνεύεται στρώμα πυριτικού υλικού, καθώς και ρωγμές του υγιούς τμήματος του λίθου που είναι πληρωμένες με το πυριτικό αυτό υλικό. Παράλληλα στις ενδιάμεσες στιβάδες του πυριτικού υλικού και στις ρωγμές που είναι πληρωμένες από αυτό εντοπίζεται αρκετή ποσότητα άνθρακα, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία και ενός οργανικού υλικού. Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις της Υπέρυθρης Φασματοσκοπίας με Μετασχηματισμό Fourier το οργανικό αυτό υλικό είναι το οξαλικό ασβέστιο. (βλ. σελ. 157 § «Περιοχή πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού»)

Κατά το δεύτερο μισό του 19<sup>ο</sup> αιώνα σύμφωνα με τη Μαραβελάκη και άλλους ερευνητές (17), (23) χρησιμοποιήθηκε αλκαλοπυριτικό υλικό για τη στερέωση και την προστασία των επιφανειών. Το πυριτικό νάτριο ή κάλιο παρασκευάζεται από τήξη χαλαζιακής άμμου και ανθρακικού νατρίου ή καλίου ή με αντίδραση ένυδρης πυριτίας με καυστικό νάτριο. Το προϊόν που λαμβάνεται είναι υδατοδιαλυτό και μετά από υδρόλυση παράγεται πυριτικό οξύ, το οποίο συμπυκνώνεται υπό τη μορφή γέλης ή διαλύματος ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Η πυριτική γέλη είναι υπεύθυνη για τη στερέωση και την υδροφοβίωση της επιφάνειας του λίθου. Ο σχηματισμός της πυριτικής γέλης ρυθμίζεται από την προσθήκη διάφορων ουσιών, όπως φωσφορικό ασβέστιο, οξείδιο του μαγνησίου και οξείδιο του σιδήρου, οι οποίες επιταχύνουν τη σκλήρυνσή της. Τα φωσφορικά αλκάλια, η καζεΐνη και η κυτταρίνη χρησιμοποιούνται για την αποφυγή της ταχείας σκλήρυνσης, ενώ η γλυκερίνη καθιστά την επικάλυψη πιο ελαστική.

Συνεπώς, το πυριτικό υλικό για την προστασία του λίθου ανήκει πιθανόν στην κατηγορία αργιλοπυριτικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρων τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Το οξαλικό ασβέστιο προέκυψε από τη γλυκερίνη μέσω αφυδρογόνωσης του γλυκολικού οξέος.

Δείγμα από εκτεθειμένες περιοχές στο νερό της βροχής

#### **Απιπλυμένες επιφάνειες**

Στο δείγμα της αποπλυμένης επιφάνειας **J\_F\_white** είναι εμφανής ο κατακερματισμός του λίθου και η απώλεια υλικού, καθώς επίσης διακρίνονται και οι κρύσταλλοι του λίθου. Παρατηρούνται πολυγωνικοί και κυβικοί κρύσταλλοι με μικρό μέγεθος και τυχαίο προσανατολισμό, καθώς επίσης και μακρόστενοι ραβδοειδείς προσανατολισμένοι κρύσταλλοι. Με τη βοήθεια της Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ εντοπίστηκαν κρύσταλλοι που περιείχαν ασβεστίτη και δολομίτη, ενώ γύψος ανιχνεύθηκε σε πολύ μικρή ποσότητα.

## Επιφάνειες βιοδιάβρωσης

Το πρώτο δείγμα **J\_F\_bio 1** από την επιφάνεια βιοδιάβρωσης εμφάνιζε και σημάδια απόπλυσης, όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως. Έτσι η φθορά που έχει προκληθεί στην επιφάνεια αυτή οφείλεται στη δράση των μικροοργανισμών, καθώς και στην απόπλυση από το νερό της βροχής. Από τη μία πλευρά παρατηρούνται μυκήλια και υφές μύκητα, οι οποίες ασκούν τάσεις στο λίθο. Μάλιστα, εντοπίστηκαν οπές διαμέτρου περίπου 230 μm σε μία από τις οποίες εισχωρούσε υφή. Έτσι υποδεικνύεται ο μηχανισμός φθοράς από την ανάπτυξη μικροοργανισμών, καθώς οι υφές ασκούν τάσεις στην επιφάνεια του λίθου προκαλώντας οπές. Επιπλέον διακρίνονται επικαθίσεις σκόνης συνεκτικά προσκολλημένες στο λίθο μέσω κυτταρικών υπολειμμάτων μύκητα (pollen grains), ίχνη βελονοειδούς βιοδιάβρωσης και αποικίες κυτάρων μύκητα. Έτσι τεκμηριώνεται ο κατακερματισμός του λίθου και η έλλειψη συνοχής του εξαιτίας της απόπλυσης και της βιολογικής δράσης. Στο δείγμα εμφανίζονται ραβδοειδείς κρύσταλλοι πλήρως προσανατολισμένοι και πολυγωνικοί και κυβικοί κρύσταλλοι σε μικρότερα μεγέθη, όπως στην περίπτωση του δείγματος **J\_F\_white**. Παράλληλα διαπιστώθηκε ότι οι κρύσταλλοι που έχουν σημαντική περιεκτικότητα σε μαγνήσιο εμφανίζονται με κυβική μορφή και μεγάλο μέγεθος, δηλαδή παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Με τη βοήθεια της Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ εντοπίστηκαν ασβέστιο και πυρίτιο σε μεγάλες ποσότητες. Επίσης σημαντική είναι η ποσότητα του αργιλίου και του σιδήρου. Επιπρόσθετα στο δείγμα ανιχνεύονται μαγνήσιο, φώσφορο, τιτάνιο και μόλυβδος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι μελετώντας την πλάγια τομή του δείγματος **J\_F\_bio 1** ήταν μειωμένη η σύσταση του πυριτίου του σιδήρου και του αργιλίου, ενώ απουσίαζαν ο μόλυβδος και το τιτάνιο. Επομένως το τιτάνιο και ο μόλυβδος είχαν τοποθετηθεί επιφανειακά.

Στο δεύτερο δείγμα **J\_F\_bio 2** εντοπίστηκαν δύο ρωγμές πλάτους 0,1 mm και 55 μm, οι οποίες είτε οφείλονται στους στυλόλιθους, είτε δημιουργήθηκαν από τη βιολογική φθορά. Στο εσωτερικό των ρωγμών αυτών παρατηρήθηκαν μυκήλια, επικαθίσεις σκόνης συνεκτικά προσκολλημένες στο λίθο μέσω κυτταρικών υπολειμμάτων μύκητα (pollen grains), υφές και αποικίες μικροοργανισμών. Επιπλέον, από την Μικροανάλυση Ακτίνων Χ βρέθηκε μεγάλη περιεκτικότητα σε ασβέστιο και πυρίτιο. Σημαντική ήταν και η παρουσία του αργιλίου, του σιδήρου, του μαγνησίου και του τιτανίου, ενώ ανιχνεύτηκε και μαγγάνιο.

Η παρουσία του πυριτίου και στα δύο δείγματα μπορεί να δικαιολογηθεί αρχικά από την εφαρμογή υλικού πυριτικής σύστασης για την προστασία της επιφάνειας. Ωστόσο, εξαιτίας της θέσης το υλικό αυτό έχει αποπλυθεί σε κάποιο βαθμό. Επίσης, η παρουσία του πυριτίου, του σιδήρου και μαγγανίου μπορεί να αποδοθεί στη βιογενή παραγωγή τους.

Σύμφωνα με τους Jain, Khan και Rai πολλές μελέτες συνδέουν την παρουσία βακτηρίων με τις αποθέσεις σιδήρου και μαγγανίου σε λίθους χωρίς ωστόσο να είναι γνωστή η μεταβολική οδός που ακολουθείται για την παραγωγή τους. Παράλληλα οι μικροοργανισμοί προκαλούν διάλυση στο χαλαζία. (88) Οι Hiebert και Bennett και ο Feldmann και άλλοι έχουν παρατηρήσει υφές βασιδιομύκητα να εισχωρούν σε κρυστάλλους χαλαζία διαλύοντας το διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>). (89), (90) Σύμφωνα με τους Konhauer και Urrutia οι επιφάνειες βιοδιάβρωσης συμβάλλουν στην βιολογική ορυκτοποίηση των μετάλλων σε μικρές συγκεντρώσεις, οι οποίες στη συνέχεια δρουν αυτοκαταλυτικά στο σχηματισμό πυριτικού αργιλίου και σιδήρου. (91)

Συνεπώς, εφαρμόστηκε στις περιοχές που είναι εκτεθειμένες στη βροχή στρώση πυριτικού υλικού για προστασία, η οποία σταδιακά αποπλύθηκε. Εκεί πιθανώς να αναπτύχθηκαν μικροοργανισμοί. Αργότερα στην επιφάνεια αυτή προστέθηκε και λευκή επίστρωση που αποτελούνταν από τιτάνιο και μόλυβδο (TiO<sub>2</sub> και PbCO<sub>3</sub>) είτε λόγω της αντιβακτηριδιακής τους δράσης ή ως δοκιμή για απόδοση του λευκού χρώματος του λίθου. (92) Η επέμβαση αυτή, ωστόσο, δεν έχει καταγραφεί. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν στην επιφάνεια αυτή μικροοργανισμοί, η παρουσία των οποίων επαύξησε τις συγκεντρώσεις του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου (στην περίπτωση του J\_F\_bio 2 και του μαγγανίου), λόγω βιογενούς παραγωγής τους. Ακολουθούν δύο πίνακες που συνοψίζουν τα αποτελέσματα της Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ για τα κυριότερα στοιχεία που περιέχονται στα δείγματα. Ο πρώτος πίνακας αναφέρεται στις επιφάνειες των στερεών δειγμάτων και ο δεύτερος στις πλάγιες τομές.

**Πίνακας 4.4: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις επιφάνειες των στερεών δειγμάτων που εξετάστηκαν με SEM-EDX**

	Περιοχές δειγμάτων	Ca	S	Si	Mg	Al	Fe	K	Cu	Pb	Ti	Mn
<b>J_F_black1</b>	Μπεζ	**	**	*	*	*	*	*	-	-	-	-
	Μαύρη	**	**	*	*	*	*	*	-	-	-	-
<b>J_F_black2</b>	Μαύρη	**	**	*	*	*	-	*	-	-	-	-
	Καστανή	**	**	*	-	*	*	-	-	-	-	-
	Πορτοκαλί	**	**	**	*	*	*	*	-	-	-	-
<b>J_F_orange</b>	Λευκή	**	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-
	Πορτοκαλί	**	**	*	*	*	*	*	*	-	-	-
<b>J_F_orange</b>	Καστανή	**	**	**	*	*	*	*	-	-	*	-
	Καστανή	**	**	**	*	*	*	*	-	-	*	-
<b>J_F_white</b>		**	*	*	*	-	-	-	-	-	-	-
<b>J_F_bio1</b>		**	*	**	*	*	*	*	-	*	*	-
<b>J_F_bio2</b>		**	*	**	*	*	*	*	-	*	*	*



Πίνακας 4.5: Συνοπτικός πίνακας σύστασης πλάγιων τομών

	Στρώματα τομών	Πάχος στρωμάτων	Ca	S	Si	Mg	Al	Fe	K
<b>J_F_black1</b>	επιφανειακό	100 – 85μm	**	**	*	*	*	*	*
	ενδιάμεσο	30 – 25μm	**	*	**	*	*	*	*
	πυριτικό υλικό ανάμεσα σε κόκκους	100 μm	**	*	*	*	*	*	*
	υγιές		**	*	*	*	-	-	-
<b>J_F_orange</b>		25 – 70μm	**	*	*	*	*	*	*
<b>J_F_bio1</b>			**	*	*	*	*	*	*

### 4.2.3 Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με Μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκοπίας με μετασχηματισμό Fourier πραγματοποιήθηκαν για να διαγνωσθεί η φθορά εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της δράσης των μικροοργανισμών. Για την προετοιμασία των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν 100 mg βρωμιούχου καλίου (KBr) και 1,2 mg σκόνης του δείγματος. Από τη βιβλιογραφία προκύπτει ο ακόλουθος συνοπτικός πίνακας που αντιστοιχίζει τις κυριότερες ενώσεις με τους κυματάριθμους των χαρακτηριστικών κορυφών τους που αφορούν τα δείγματα του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως.

Πίνακας 4.6: Συνοπτικός πίνακας φασμάτων των κυριότερων ενώσεων

Υλικά	Κυματάριθμος (cm <sup>-1</sup> )	Αναφορές στη βιβλιογραφία
Ασβεστίτης (CaCO <sub>3</sub> )	2500, 1796 (υπέρτονες), 1453, 877, 712	(93)
Γύψος (CaSO <sub>4</sub> * 2H <sub>2</sub> O)	3548, 3408, 3250, 1685, 1626, 1142, 1122, 1006, 674, 606, 492, 413	(93), (94)
Νιτρικό κάλιο (KNO <sub>3</sub> )	1380, 824	(93)
Οξαλικό ασβέστιο CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> * nH <sub>2</sub> O	1620, 1316, 782	(93), (94)
Καολινίτης Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	3694, 3668, 3652, 3620, 1114, 1109, 1098, 1034, 1026, 1011, 915, 793, 694, 543, 472, 431	(94), (95)

Ακολουθεί πίνακας με την αντιστοίχιση συμβόλων και ενώσεων.

Πίνακας 4.7: Αντιστοίχιση συμβόλων - ενώσεων

Σύμβολο	Ένωση
Cc	ασβεστίτης
Gy	γύψος
N	νιτρικό κάλιο
Ox	οξαλικό ασβέστιο
Si	δεσμοί πυριτίου
Al	Ενώσεις Al – O – H
Cac	καρβοξυλικό οξύ
Am	N-H αμίνων
OH	υδροξυλιόντα
K	καολινίτης

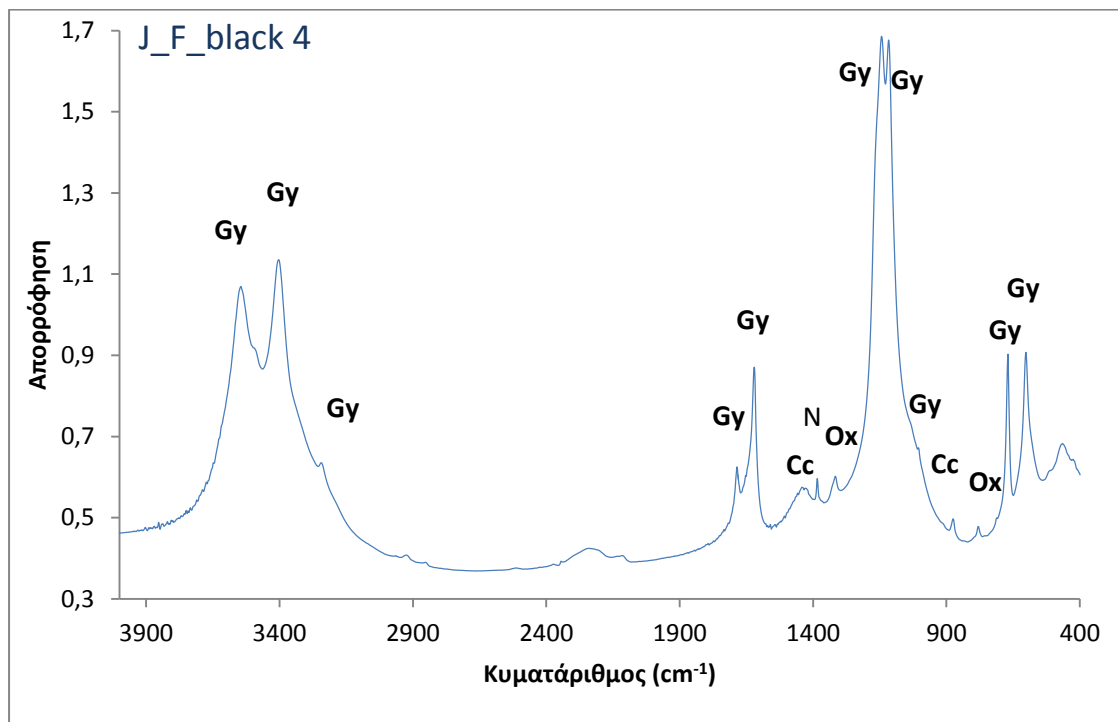
Ύστερα από τις πειραματικές μετρήσεις, προέκυψαν τα παρακάτω φάσματα απορρόφησης.

#### 4.2.3.1 Δείγματα από περιοχές μαύρης κρούστας

##### J\_F\_black 4

Το δείγμα αυτό προέρχεται από μαύρη κρούστα. Στο δείγμα J\_F\_black 4 εντοπίζονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του ασβεστίτη λόγω δόνησης κάμψης του ανθρακικού ανιόντος στους κυματάριθμους  $711\text{ cm}^{-1}$  και  $875\text{ cm}^{-1}$  και λόγω δόνησης τάσης του ανθρακικού ανιόντος στα  $1442\text{ cm}^{-1}$ . (93)

Επίσης οι χαρακτηριστικές κορυφές του γύψου στο φάσμα απορρόφησης δίνονται στους κυματάριθμους  $602$  και  $670\text{ cm}^{-1}$  εξαιτίας των δονήσεων κάμψης και στα  $1005$ ,  $1117$  και  $1143\text{ cm}^{-1}$  λόγω των δονήσεων τάσης του θειικού ανιόντος. Τα κρυσταλλικά νερά του γύψου εμφανίζουν κορυφές λόγω δόνησης κάμψης του υδροξυλίου του νερού στους κυματάριθμους  $1621$  και  $1685\text{ cm}^{-1}$ , ενώ λόγω δόνησης τάσης στους κυματάριθμους  $3244$ ,  $3403$  και  $3545\text{ cm}^{-1}$ . (93), (94)



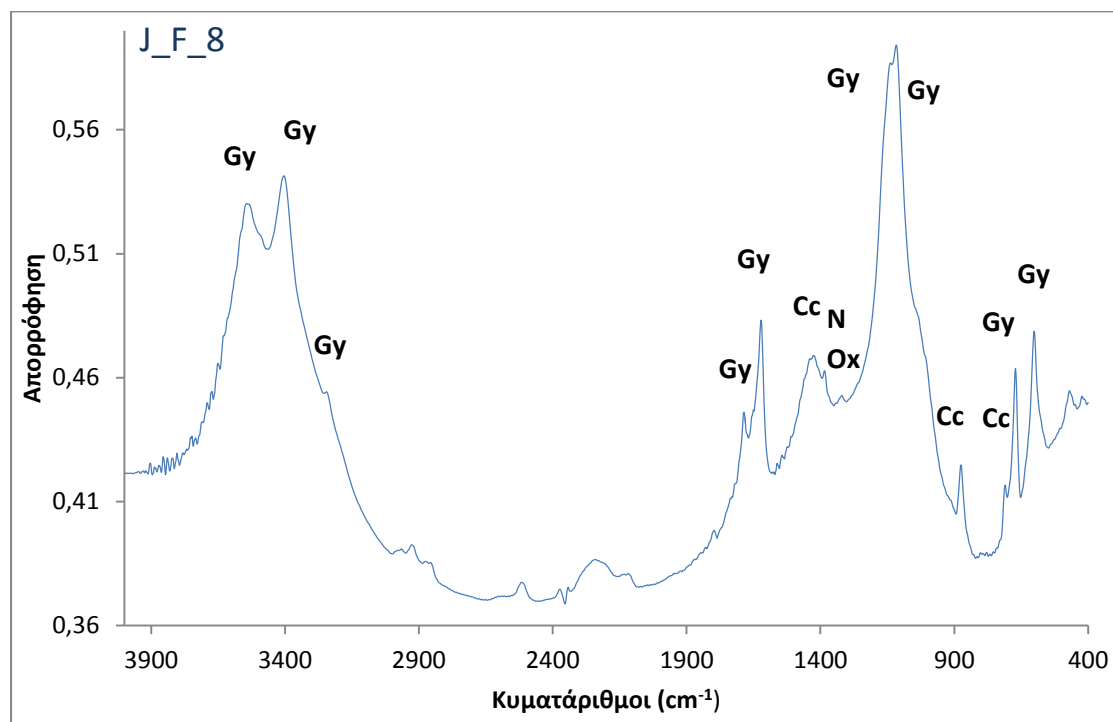
Διάγραμμα 4.4: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_black 4

Το οξαλικό ασβέστιο εμφανίζει χαρακτηριστικές κορυφές στο συγκεκριμένο φάσμα απορρόφησης στα  $781\text{ cm}^{-1}$ , λόγω κάμψης του δεσμού  $\text{C} - \text{O} - \text{C}$ , στα  $1316\text{ cm}^{-1}$  λόγω δόνησης τάσης του δεσμού μετάλλου – καρβοξυλίου του οξαλικού ασβεστίου. (93)

Επιπλέον στο δείγμα αυτό εντοπίζεται και νιτρικό κάλιο ( $\text{KNO}_3$ ) από τη χαρακτηριστική κορυφή στον κυματάριθμο  $1384 \text{ cm}^{-1}$  που αποδίδεται σε δόνηση τάσης αζώτου – οξυγόνου. (94)

Στο δείγμα J\_F\_black 4 διαπιστώνεται από τα ύψη των κορυφών η έντονη παρουσία του γύψου έναντι του ασβεστίτη.

### J\_F\_8



Διάγραμμα 4.5: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_8

Το δείγμα J\_F\_8 προέρχεται από μαύρη κρούστα σε λευκή αποπλυμένη επιφάνεια. Από το φάσμα απορρόφησης του δείγματος J\_F\_8 διαπιστώνεται, εκτός από την ύπαρξη ασβεστίτη, η έντονη παρουσία του γύψου και κάποια ποσότητα οξαλικού ασβεστίου. Πιο συγκεκριμένα το φάσμα απορρόφησης του ασβεστίτη δίνει τρεις χαρακτηριστικές ζώνες απορρόφησης για το ανθρακικό ανιόν. Οι κορυφές που εντοπίζονται στους κυματάριθμους  $710, 875 \text{ cm}^{-1}$  οφείλονται στη δόνηση κάμψης του ανθρακικού ανιόντος, ενώ η ευρεία κορυφή στον κυματάριθμο  $1427 \text{ cm}^{-1}$  αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του ανθρακικού ανιόντος. (93)

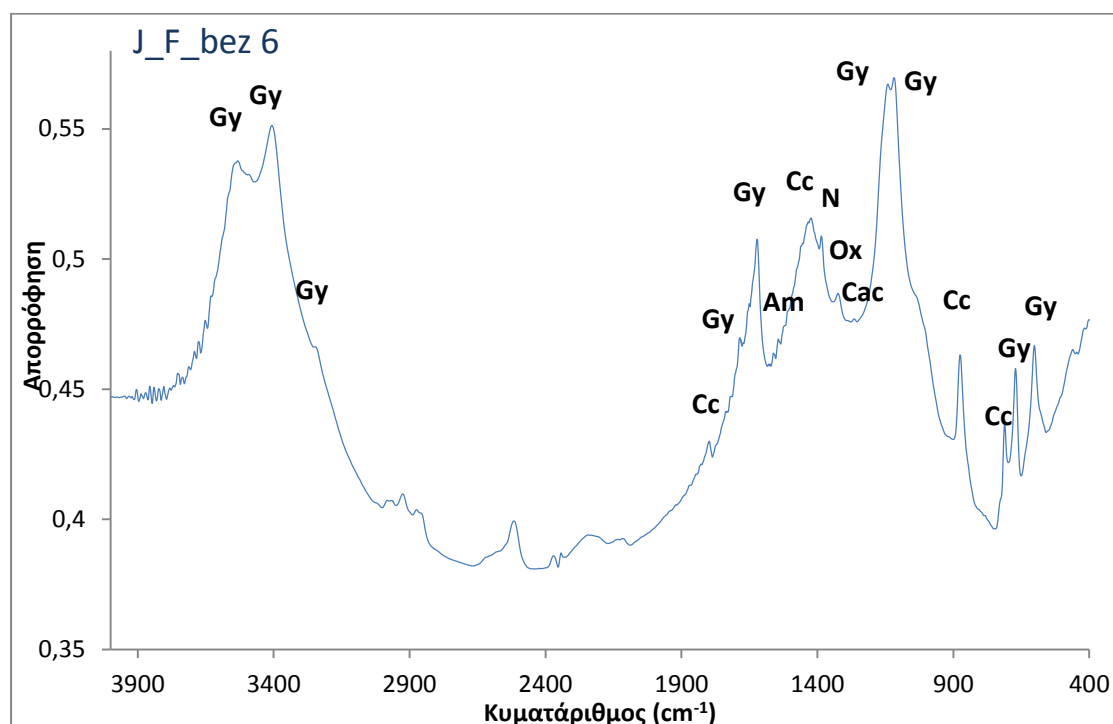
Οι κορυφές στα  $602, 672 \text{ cm}^{-1}$  οφείλονται σε δονήσεις κάμψης του θειικού ανιόντος και αυτές στα  $1117, 1138 \text{ cm}^{-1}$  σε δονήσεις τάσης του θειικού ανιόντος του γύψου. Επίσης οι κορυφές στα  $3245, 3405$  και  $3540 \text{ cm}^{-1}$  εμφανίζονται εξαιτίας των δονήσεων τάσης και στα  $1622$  και  $1686 \text{ cm}^{-1}$  λόγω των δονήσεων κάμψης των κρυσταλλικών νερών του γύψου. (93), (94)

Στα  $1320\text{ cm}^{-1}$  εμφανίζεται χαρακτηριστική κορυφή του οξαλικού ασβεστίου που αντιστοιχεί σε δόνηση τάσης του δεσμού  $\text{O} - \text{C} - \text{O}$ . Επίσης η κορυφή στον κυματάριθμο  $1385\text{ cm}^{-1}$  αποδίδεται στην ύπαρξη νιτρικού καλίου και οφείλεται στην δόνηση τάσης αζώτου – οξυγόνου. (93), (94)

#### 4.2.3.2 Δείγμα από περιοχή πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού

J\_F\_bez 6

Το δείγμα J\_F\_bez 6 προέρχεται από πορτοκαλοκάστανη επιφάνεια. Από το φάσμα απορρόφησης του δείγματος J\_F\_bez 6 δίνονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του ασβεστίτη λόγω δόνησης κάμψης του ανθρακικού ανιόντος στους κυματάριθμους  $711$  και  $875\text{ cm}^{-1}$  και στα  $1423\text{ cm}^{-1}$  λόγω δόνησης τάσης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη. Στον κυματάριθμο  $1798\text{ cm}^{-1}$  εμφανίζεται η υπέρτονη του ασβεστίτη. (93)



Διάγραμμα 4.6: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_bez 6

Ο γύψος εμφανίζεται από τις κορυφές του στους κυματάριθμους  $602$  και  $671\text{ cm}^{-1}$  εξαιτίας των δονήσεων κάμψης και στους  $1118$  και  $1141\text{ cm}^{-1}$  λόγω δονήσεων τάσης του θειικού ανιόντος. Τα κρυσταλλικά νερά του γύψου εντοπίζονται από τις κορυφές στους κυματάριθμους  $1622$  και  $1685\text{ cm}^{-1}$  λόγω δόνησης κάμψης και στους κυματάριθμους  $3248$ ,  $3407$  και  $3534\text{ cm}^{-1}$  λόγω δονήσεων τάσης του υδροξυλίου του μορίου του νερού. (93), (94)



Στο δείγμα αυτό εντοπίζεται και οξαλικό ασβέστιο με χαρακτηριστικές κορυφές στον κυματάρημο 1324 λόγω δόνησης τάσης του δεσμού O – C – O. (94)

Επίσης στο δείγμα υπάρχει νιτρικό κάλιο με κορυφή στα 1385  $\text{cm}^{-1}$  που αποδίδεται στη δόνηση τάσης αζώτου – οξυγόνου. (94)

Η κορυφή στον κυματάρημο 1264  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδεται σε δονήσεις τάσεις του δεσμού C – O καρβοξυλικών οξέων. (96)

Η κορυφή στα 1543  $\text{cm}^{-1}$  οφείλεται στο δεσμό N – H αμινών. (94)

Οι κορυφές από τον κυματάρημο 2930 έως 2840  $\text{cm}^{-1}$  αντιστοιχούν σε δονήσεις τάσης του δεσμού C – H κορεσμένων υδρογονανθράκων. (94)

Συνοψίζοντας στο δείγμα J\_F\_bez 6 είναι μεγαλύτερη η ποσότητα του γύψου σε σχέση με του ασβεστίτη. Επίσης εντοπίζεται και οξαλικό ασβέστιο και νιτρικό κάλιο.

### 4.2.3.3 Δείγμα από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια

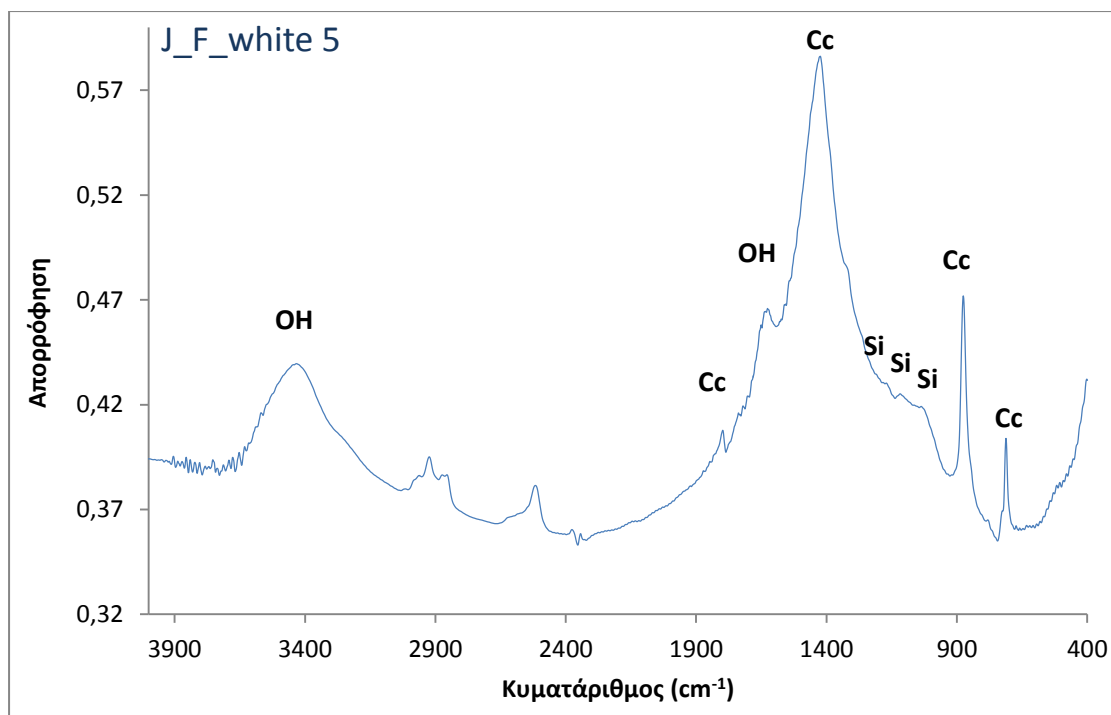
#### J\_F\_white 5

Το δείγμα J\_F\_white 5 προέρχεται από λευκή αποπλυμένη επιφάνεια. Στο φάσμα απορρόφησης του δείγματος διαπιστώνεται η ύπαρξη ασβεστίτη ως κύριο συστατικό του δείγματος. Οι κορυφές του ασβεστίτη δίνονται στους κυματάρημους 712 και 875  $\text{cm}^{-1}$  λόγω δόνησης κάμψης του ανθρακικού ανιόντος και στα 1424  $\text{cm}^{-1}$  λόγω δόνησης τάσης ανθρακικού ανιόντος. Στο φάσμα δίνεται και η υπέρτονη του ασβεστίτη στον κυματάρημο 1798  $\text{cm}^{-1}$ . (93)

Η κορυφή στους κυματάρημους 1037 και 1118  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδεται σε δονήσεις τάσης του δεσμού Si – O – Si. (95), (97) Επιπλέον οι κορυφές στους κυματάρημο 782 και 1171  $\text{cm}^{-1}$  αντιστοιχούν στο δεσμό Si – O λόγω δονήσεων κάμψης και τάσης αντίστοιχα. (95), (98)

Η κορυφή στον κυματάρημο 1634  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδεται σε δόνηση κάμψης του υδροξυλιόντος του μοριακού νερού. (95), (99) Η ευρεία κορυφή στον κυματάρημο 3432  $\text{cm}^{-1}$  αντιστοιχεί σε δόνηση τάσης του υδροξυλίου του μοριακού νερού και των διαστρωματικών δεσμών του υδρογόνου του υδροξυλίου με το οξυγόνο των Al – O – Si δεσμών. (95), (100)

Οι κορυφές μεταξύ των κυματάρημων 2940 και 2840  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδονται σε δονήσεις τάσης του δεσμού C – H κορεσμένων υδρογονανθράκων. (94)



Διάγραμμα 4.7: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_white 5

#### 4.2.3.4 Δείγματα από περιοχές με βιολογική διάβρωση

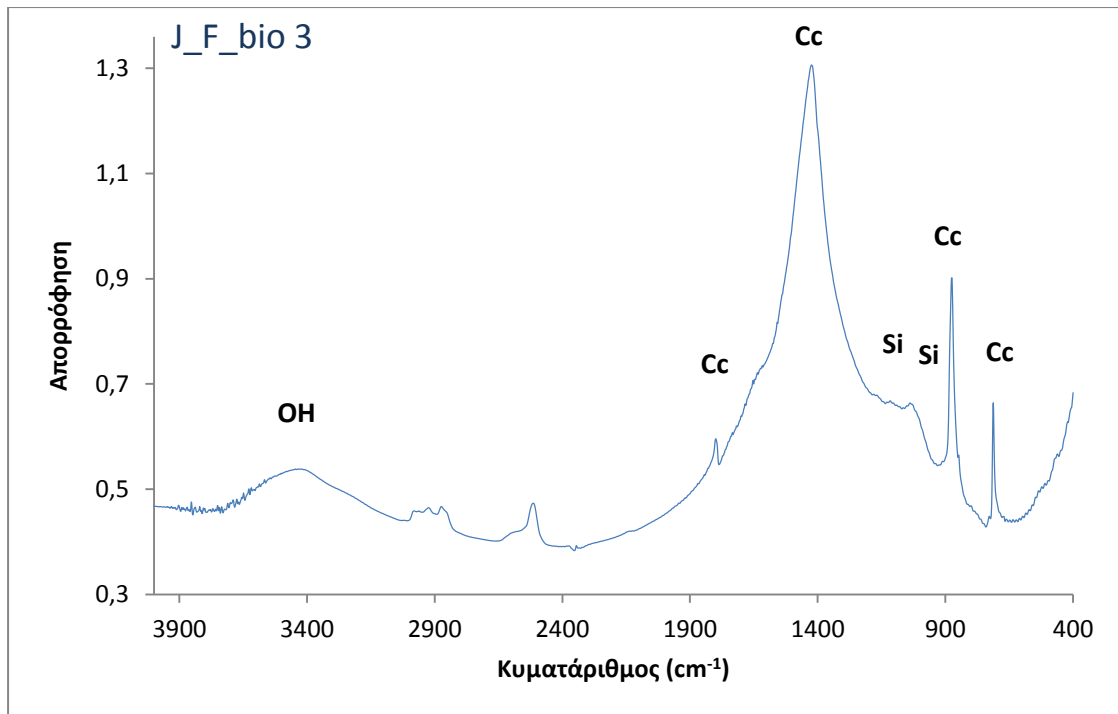
##### J\_F\_bio 3

Το δείγμα J\_F\_bio 3 προέρχεται από περιοχή που έχει υποστεί βιολογική διάβρωση. Όπως φαίνεται από το φάσμα απορρόφησης είναι έντονη η ύπαρξη ασβεστίτη και οι χαρακτηριστικές κορυφές του εμφανίζονται στον κυματάριθο 712 cm<sup>-1</sup> και στον 875 cm<sup>-1</sup> λόγω δόνησης κάμψης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη και στον κυματάριθο 1424 cm<sup>-1</sup> λόγω δόνησης τάσης του ανθρακικού ανιόντος. Επίσης η υπέρτονη κορυφή του ασβεστίτη δίνεται στον κυματάριθο 1799 cm<sup>-1</sup>. (93)

Παράλληλα η κορυφή στους κυματάριθους 1038 και 1116 cm<sup>-1</sup> αποδίδονται σε δονήσεις τάσης του δεσμού Si – O – Si. (95), (97), (98)

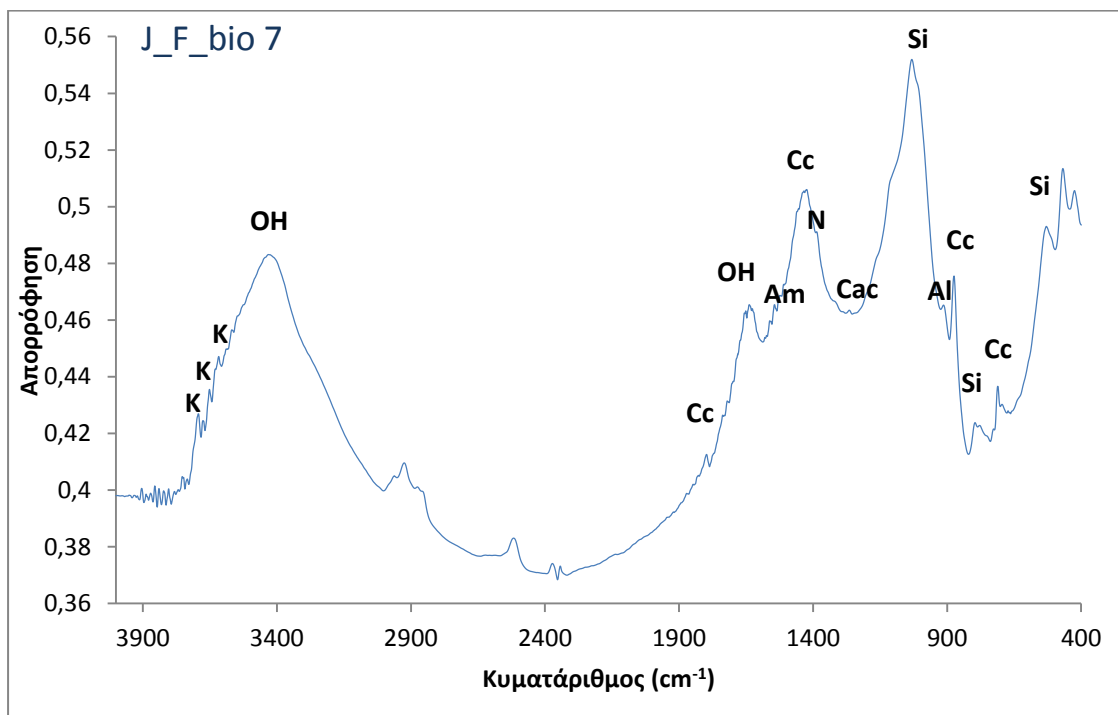
Οι κορυφές μεταξύ των κυματάριθων 2940 και 2840 cm<sup>-1</sup> αντιστοιχούν σε δονήσεις τάσης του δεσμού C – H κορεσμένων υδρογονανθράκων. (94)

Τέλος, η ευρεία κορυφή στον κυματάριθο 3428 cm<sup>-1</sup> αντιστοιχεί σε δόνηση τάσης του υδροξυλίου του μοριακού νερού και των διαστρωματικών δεσμών του υδρογόνου των υδροξυλίων με το οξυγόνο των δεσμών Al – O – Si. (95), (100)



Διάγραμμα 4.8: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_bio 3

J\_F\_bio 7



Διάγραμμα 4.9: Φάσμα απορρόφησης δείγματος J\_F\_bio7

Το δείγμα J\_F\_bio 7 προέρχεται από λευκή επιφάνεια που έχει υποστεί βιολογική διάβρωση. Στο φάσμα απορρόφησης του δείγματος αυτού εμφανίζονται οι

χαρακτηριστικές κορυφές του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη στους ακόλουθους κυματάρια. Οι κορυφές στους κυματάρια 711  $\text{cm}^{-1}$  και 874  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδονται σε δονήσεις κάμψης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη. Επίσης η κορυφή στον κυματάρια 1429  $\text{cm}^{-1}$  εμφανίζεται εξαιτίας της δόνησης τάσης του ανθρακικού ανιόντος. Η υπέρτονη του ασβεστίτη δίνεται στον κυματάρια 1797  $\text{cm}^{-1}$ . (93)

Η κορυφή στον κυματάρια 530  $\text{cm}^{-1}$  οφείλεται σε δονήσεις κάμψης του δεσμού Si – O – Al, ενώ εκείνη στον κυματάρια 796 δίνεται λόγω δόνησης κάμψης του δεσμού Si – O. (94), (96), (99) Στον κυματάρια 913  $\text{cm}^{-1}$  εμφανίζεται κορυφή λόγω του δεσμού Al – O – H. (98) Επιπλέον η κορυφή στα 1032  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδεται σε δονήσεις τάσης του δεσμού Si – O – Si. (97), (98) Η πυριτική ένωση που πιθανά παρουσιάζεται στο δείγμα είναι του καολινίτη εξαιτίας των χαρακτηριστικών κορυφών στους κυματάρια 3616, 3649, 3662 και 3694  $\text{cm}^{-1}$ . Η κορυφή στα 3616  $\text{cm}^{-1}$  οφείλεται στα εσωτερικά υδροξύλια μεταξύ των τετραεδρικών και οκταεδρικών στρωμάτων του καολινίτη. Επιπρόσθετα οι κορυφές στα 3649, 3662 και 3694  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδονται στους διαστρωματικούς δεσμούς υδρογόνου που αναπτύσσονται μεταξύ των υδροξυλίων και του οξυγόνου του δεσμού Si – O – Si. (99)

Η ευρεία κορυφή στον κυματάρια 3428  $\text{cm}^{-1}$  αντιστοιχεί σε δόνηση τάσης του υδροξυλίου του μοριακού νερού και των διαστρωματικών δεσμών του υδρογόνου των υδροξυλίων με το οξυγόνο των δεσμών Al – O – Si. (95), (100)

Στον κυματάρια 1265  $\text{cm}^{-1}$  εμφανίζεται χαρακτηριστική κορυφή που αποδίδεται στις δονήσεις τάσης του δεσμού C – O καρβοξυλικού οξέος. (96)

Η κορυφή στα 1380  $\text{cm}^{-1}$  οφείλεται στην παρουσία νιτρικού καλίου και συγκεκριμένα στις δονήσεις τάσης αζώτου – οξυγόνου. (94)

Η κορυφή στα 1638  $\text{cm}^{-1}$  αποδίδεται σε δονήσεις κάμψης του υδροξυλίου του μοριακού νερού. (95), (99)

Οι κορυφές από τον κυματάρια 2930 – 2840  $\text{cm}^{-1}$  αντιστοιχούν σε δονήσεις τάσης του δεσμού C – H κορεσμένων υδρογονανθράκων. (94)

Τέλος η κορυφή στον κυματάρια 1544  $\text{cm}^{-1}$  μπορεί να αποδοθεί στο δεσμό N – H αμινών. (94)

#### 4.2.3.5 Μερικά συμπεράσματα από τον έλεγχο με την Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με Μετασχηματισμό Fourier

Από την εξέταση των δειγμάτων σκόνης με την τεχνική της Υπέρυθρης Φασματοσκοπίας με Μετασχηματισμό Fourier πραγματοποιείται ποιοτική και ημιποσοτική ανάλυση. Ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της μεθόδου για κάθε ένα τύπο φθοράς ξεχωριστά.

Δείγματα από περιοχές προστατευμένες από το νερό της βροχής

##### Επιφάνειες μαύρης κρούστας

Τα δείγματα από τις επιφάνειες μαύρης κρούστας (**J\_F\_black 4, J\_F\_8**) παρουσιάζουν μεγάλη περιεκτικότητα γύψου σε σχέση με τον ασβεστίτη. Παράλληλα εντοπίζεται ποσότητα νιτρικού καλίου και οξαλικού ασβεστίου. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο και των δύο δειγμάτων εμφανίζουν μεγάλη ταύτιση. Συνεπώς, επιβεβαιώνονται οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις για την ύπαρξη μαύρης κρούστας.

##### Επιφάνειες πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού

Στο δείγμα που προέρχεται από περιοχή αυτή (**J\_F\_bez 6**) είναι έντονη η παρουσία του γύψου, ενώ μικρότερη είναι η συγκέντρωση του ασβεστίτη. Στο δείγμα αυτό ανιχνεύονται επίσης οξαλικό ασβέστιο, καρβοξυλικά οξέα, νιτρικό κάλιο και κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Το οξαλικό ασβέστιο πιθανώς να σχετίζεται με τον μετασχηματισμό οργανικών ενώσεων, που χρησιμοποιήθηκαν για την προστασία των επιφανειών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η γλυκερίνη χρησιμοποιούνταν για να προσδώσει ελαστικότητα σε πυριτικά υλικά για στερέωση και προστασία. Επομένως, ενδέχεται το οξαλικό ασβέστιο να προέκυψε από τη γλυκερίνη μέσω της αφυδρογόνωσης του γλυκολικού οξέος.

Δείγμα από εκτεθειμένες επιφάνειες στο νερό της βροχής

##### Αποπλυμένες επιφάνειες

Το δείγμα από την αποπλυμένη επιφάνεια (**J\_F\_white 5**) περιέχει μεγάλη ποσότητα ασβεστίτη, ενώ απουσιάζει ο γύψος από το δείγμα. Επίσης εντοπίζονται ενώσεις πυριτίου και κορεσμένοι υδρογονάνθρακες.

##### Επιφάνειες βιοδιάβρωσης

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των δύο δειγμάτων διαφέρουν, καθώς αυτά προέρχονται από διαφορετικές επιφάνειες βιολογικής διάβρωσης. Από την εξέταση του πρώτου δείγματος **J\_F\_bio 3** διαπιστώνεται η έντονη παρουσία του ασβεστίτη. Επιπλέον, εντοπίζονται ενώσεις πυριτίου και κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Η



υψηλή συγκέντρωση ασβεστίτη αιτιολογείται από το γεγονός ότι το δείγμα προέρχεται από αποπλυμένη επιφάνεια.

Από τις μετρήσεις του δείγματος **J\_F\_bio 7** βρέθηκε ότι ο ασβεστίτης και οι ενώσεις πυριτίου έχουν μεγάλη συγκέντρωση. Επιπλέον, εντοπίστηκαν τρεις χαρακτηριστικές κορυφές του καολινίτη στο δείγμα, επομένως μπορεί η πυριτική ένωση που παρουσιάζεται στο δείγμα να είναι ο καολινίτης  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ . Παράλληλα, ανιχνεύθηκαν καρβοξυλικά οξέα, κορεσμένοι υδρογονάνθρακες και αμίνες, η παρουσία των οποίων δικαιολογείται από τη βιολογική δράση των μικροοργανισμών.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 4.8: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων FTIR**

	Cc	Cy	Ox	N	Si	K	Am	Cac
<b>J_F_black4</b>	*	*	*	*	-	-	-	-
<b>J_F_8</b>	*	*	*	*	-	-	-	-
<b>J_F_bez6</b>	*	*	*	*	-	-	*	*
<b>J_F_white5</b>	*	-	-	-	*	-	-	-
<b>J_F_bio3</b>	*	-	-	-	*	-	-	-
<b>J_F_bio7</b>	*	-	-	-	*	*	*	*

**Πίνακας 4.9: Αντιστοίχιση συμβόλων και ενώσεων**

Σύμβολο	Ένωση
<b>Cc</b>	ασβεστίτης
<b>Gy</b>	γύψος
<b>N</b>	νιτρικό κάλιο
<b>Ox</b>	οξαλικό ασβέστιο
<b>Si</b>	δεσμοί πυριτίου
<b>Cac</b>	καρβοξυλικό οξύ
<b>Am</b>	N-H αμίνων
<b>OH</b>	υδροξυλιόντα
<b>K</b>	καολινίτης

#### 4.2.4 Θερμογραφία υπερύθρου

Η πρόσοψη του Ιερού Ναού της Αναστάσεως εξετάστηκε και με τη μέθοδο της Θερμογραφίας Υπερύθρου. Όπως αναφέρθηκε στο Πειραματικό Μέρος οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στις 27 και 28 Ιανουαρίου 2011, ενώ μελετήθηκε τόσο η νότια όψη της πρόσοψης όσο και η ανατολική, όπου ήταν και οι περιοχές της δειγματοληψίας. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις για κάθε μία επιφάνεια ελέγχου ξεχωριστά.

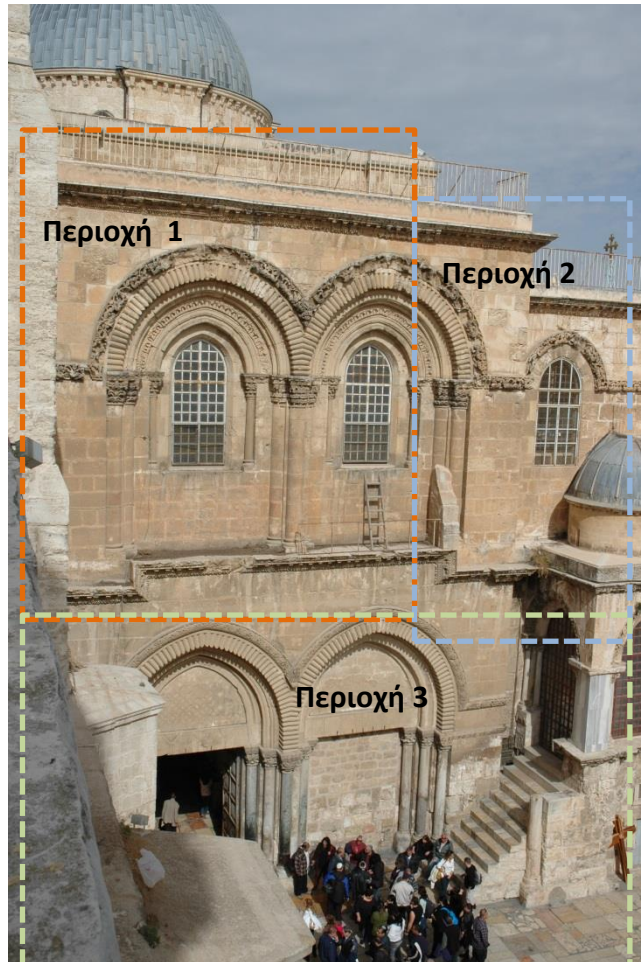
##### Θερμογραφήματα από τη νότια όψη του Ναού

Πριν την παρουσίαση των μετρήσεων είναι σημαντικό να γίνει μία αναφορά στους παράγοντες φθοράς στην νότια όψη του Ναού. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται τόσο με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του λίθου (ενδογενείς), όσο και με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (εξωγενείς). Αρχικά, η απώλεια υλικού της επιφάνειας μπορεί να αποδοθεί στη αποφλοίωση εξαιτίας λανθασμένης τοποθέτησης των λίθων στην τοιχοποιία. Στους λίθους της νότιας όψης του Ναού εντοπίστηκαν μακροσκοπικά στυλόλιθοι που πληρούνται με αργιλοπυριτικά ή άλλα υλικά. Το νερό που εισχωρεί στους στυλόλιθους λόγω συστολοδιαστολών παρασύρει τα πληρωτικά υλικά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά. Εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησης των λίθων στην τοιχοποιία εντείνεται η φθορά των υλικών. Συγκεκριμένα τοποθετώντας τους λίθους σε διαφορετική διεύθυνση από αυτή των στρώσεων τους προκαλείται τοπική αστοχία με κίνδυνο την πιθανή αστοχία του δομικού λίθου. (21) Σημαντικό ρόλο στη διάβρωση παίζει και το πορώδες των λίθων, όπου σε συνδυασμό με την υγρασία οδηγεί στην εξάνθιση ή κρυπτο-εξάνθιση αλάτων, φθορά που συνεπάγεται την απώλεια υλικού. Επίσης ο νοτιοανατολικός άνεμος μεταφέρει σωματίδια σκόνης από τη γειτονική έρημο της Ιουδαίας τα οποία προκαλούν φθορά εξαιτίας της εκτριβής στους λίθους, καθώς επίσης επικάθονται στις επιφάνειες του κτιρίου προσδίδοντας στην επιφάνεια αυτή τη χαρακτηριστική καστανή χροιά. Το κλίμα των Ιεροσολύμων χαρακτηρίζεται από υγρές και ξηρές περιόδους με ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές. Συνεπώς, το κτίριο δέχεται κύκλους ύγρανσης – ψύξης, που με την πάροδο των χρόνων έχουν σαν αποτέλεσμα την απομείωση των μηχανικών αντοχών των υλικών. Παράλληλα εξαιτίας των θερμικών κύκλων και των συστολοδιαστολών μπορεί να προκληθούν ρωγμές στα υλικά.

Ένας άλλος παράγοντας φθοράς είναι οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που προξενούν χρωματικές αλλοιώσεις στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Παραδείγματος χάρη εξαιτίας των οξειδίων του θείου γυψοποιούνται οι επιφάνειες και με τις επικαθίσεις σκόνης και αιθάλης αποκτούν διαφορετικό χρωματισμό. Επίσης με το βρόχινο νερό αποπλένεται η επιφάνεια των λίθων, με αποτέλεσμα την απώλεια υλικού και την απαλοιφή λεπτομερειών από τον ανάγλυφο διάκοσμο. Σημαντικό ρόλο παίζει και η βιοδιάβρωση στην αισθητική και μηχανική υποβάθμιση του κτιρίου, όπως έχει

περιγραφεί εκτενώς στο Θεωρητικό Μέρος. Τέλος τα όξια κατάλοιπα των πτηνών είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για την τοιχοποιία.

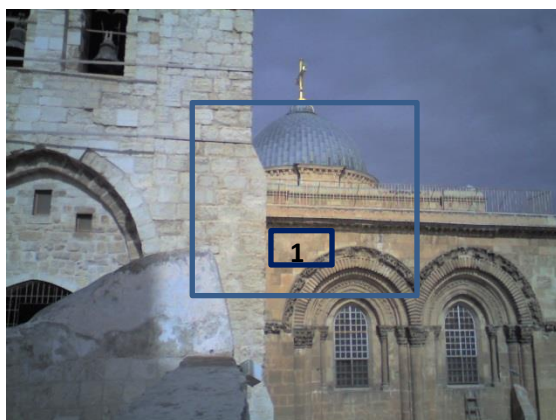
Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η νότια όψη του Ναού, η οποία είναι χωρισμένη σε τρεις περιοχές, προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη των αποτελεσμάτων.



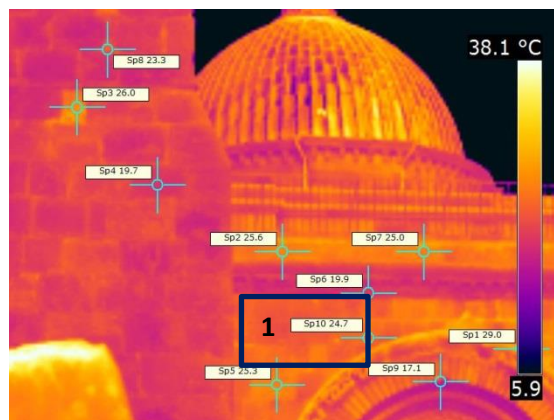
Εικόνα 4.3: Νότια όψη πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως

## Περιοχή 1

Αρχικά εξετάζεται στο ανώτερο αριστερό τμήμα της πρόσοψης του Ναού η τοιχοποιία γύρω από τα δύο παράθυρα.



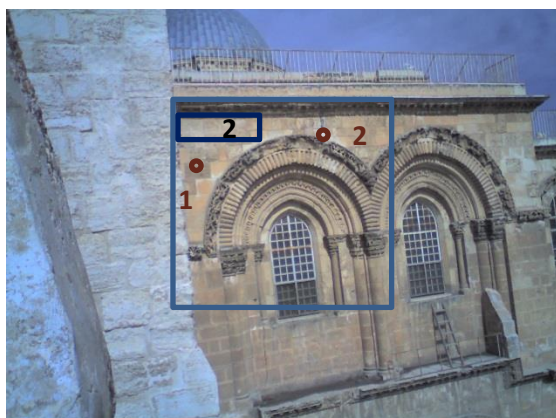
Εικόνα 1: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.34, Θερμοκρασία: 22°C



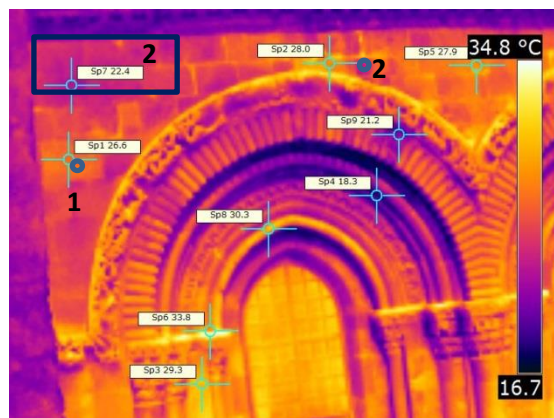
Θερμογράφημα 1: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 1

Στο **Θερμογράφημα 1** εξετάζεται η περιοχή του κωδωνοστασίου και το αριστερό παράθυρο της νότιας όψης. Στο κωδωνοστάσιο παρατηρούνται διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των λίθων. Παράλληλα στην περιοχή του τόξου στην πρόσοψη εμφανίζονται θερμότερες και ψυχρότερες επιφάνειες.

Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του κωδωνοστασίου – δηλαδή στο αριστερό τμήμα της εικόνας – παρουσιάζεται υψηλότερη θερμοκρασία στους αρμούς (23°C) σε σχέση με τους περισσότερους λίθους (19°C), ενώ εμφανίζονται και λίθοι που έχουν ίδια θερμοκρασία με τους αρμούς. Ενδεχομένως οι λίθοι αυτοί να έχουν συμπληρωθεί με το υλικό των αρμών. Στην επιφάνεια πάνω αριστερά του τόξου (Επιφάνεια 1) παρατηρούνται λίθοι με χαμηλότερη θερμοκρασία, περίπου 22°C, σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται στην υπόλοιπη περιοχή.



Εικόνα 2: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία 27.1.2011, Ώρα:12.35, Θερμοκρασία: 22°C

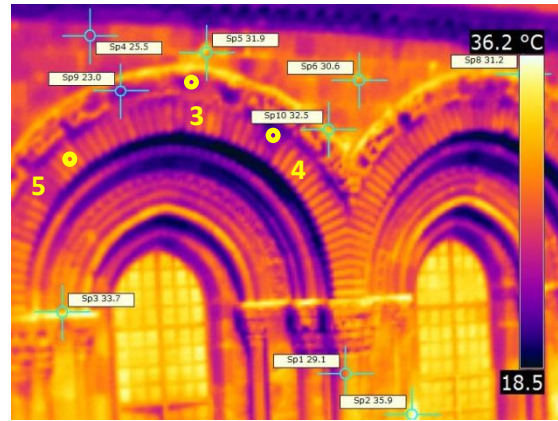


Θερμογράφημα 2: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 2





Εικόνα 3: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία 27.1.2011, Ώρα:12.39, Θερμοκρασία: 22°C



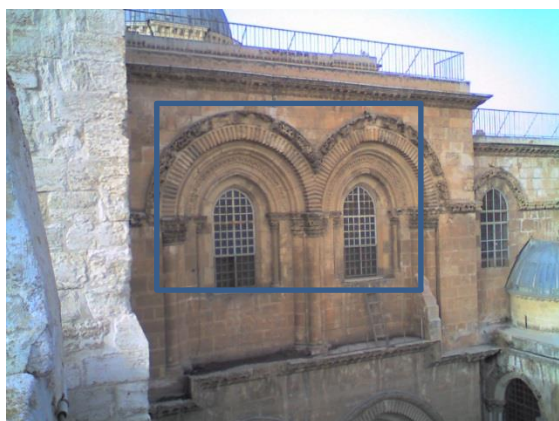
Θερμογράφημα 3 Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 3

Στο **Θερμογράφημα 2** εξετάζεται με περισσότερες λεπτομέρειες η επιφάνεια πάνω από τα παράθυρα της νότιας όψης. Διακρίνονται λίθοι με διαφορετικούς τύπους φθοράς και διαφορετικές αποχρώσεις, όπως σκούροι καστανοί, καστανοί, πορτοκαλί και λευκοί λίθοι. Παρατηρείται ότι οι σκουρόχρωμοι λίθοι έχουν υψηλότερη θερμοκρασία, όπως συμβαίνει στο Σημείο 1, ενώ ψυχρότεροι είναι οι λίθοι με ανοιχτή καστανή απόχρωση (Επιφάνεια 2) που δίνουν την αίσθηση απώλειας υλικού και αποφλοιώσης. Η αποφλοιώση μπορεί να προήλθε τόσο από την παρουσία στυλόλιθων και την λανθασμένη τοποθέτηση των λίθων, όσο και από την εκτριβή από τα σωματίδια σκόνης. Η θερμοκρασιακή διαφορά είναι της τάξης των 4 – 5°C. Χαμηλότερη θερμοκρασία έχουν και οι λευκοί λίθοι, όπως αυτός του Σημείου 2. Στην επιφάνεια πάνω από τα δύο παράθυρα διακρίνονται και οι αρμοί, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία.

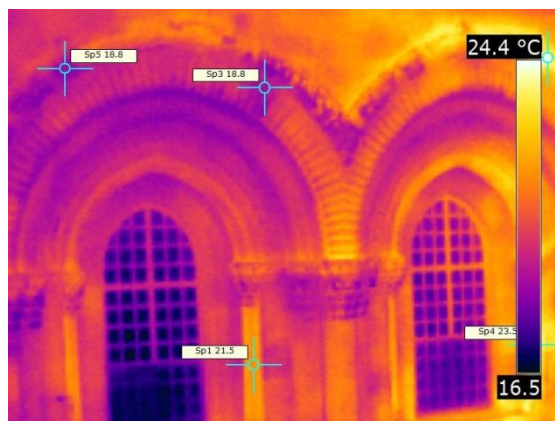
Διαφορά στη θερμοκρασία εμφανίζεται και στις διακοσμητικές επιφάνειες γύρω από τα παράθυρα. Το εξωτερικό τμήμα των τόξων των παραθύρων είναι θερμότερο (30°C) συγκριτικά με τους παρακείμενους λίθους, όπως φαίνεται στο **Θερμογράφημα 3**. Η επιφάνεια αυτή φαίνεται να έχει μαύρη απόχρωση. Επιπλέον θερμοκρασιακή διαβάθμιση παρουσιάζεται και στις ανάγλυφες επιφάνειες των τόξων. Συγκεκριμένα περιοχές, στις οποίες παρατηρούνται οπές ή απώλεια υλικού είναι ψυχρότερες από τα υπόλοιπα τμήματα του τόξου, όπως φαίνεται στα σημεία 3 και 4 της Εικόνας 3. Αντίθετα θερμότερες είναι οι σκούρες επιφάνειες στο τόξο, όπως στο σημείο 5. Υψηλότερη θερμοκρασία παρουσιάζεται και στις κορυφές των κιονόκρανων, με θερμοκρασία 33°C, σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του κίονα (29°C). Και στην περίπτωση των κίωνων εμφανίζονται θερμότερα τα σημεία που έχουν σκούρες αποχρώσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, ότι οι ψυχρές περιοχές έχουν ίδια θερμοκρασία με αυτή του περιβάλλοντος.

Υπήρχε η δυνατότητα να εξεταστεί η ίδια επιφάνεια σε διαφορετικές ώρες, αλλά και την επόμενη ημέρα, έτσι ώστε να διαπιστωθούν διαφορές που μπορεί να εμφανίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

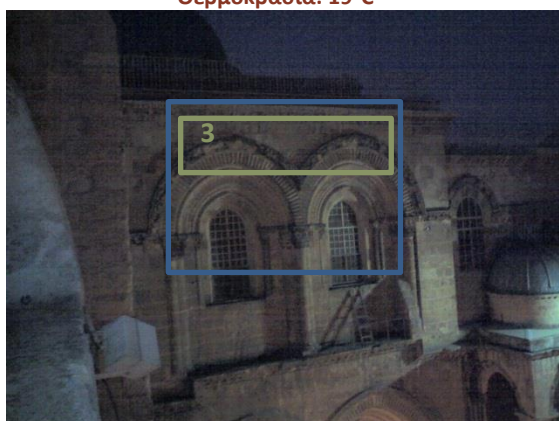




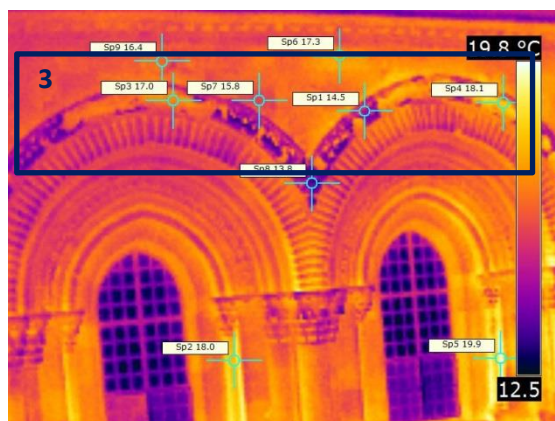
Εικόνα 4: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία 27.1.2011, Ώρα:16.49, Θερμοκρασία: 19°C



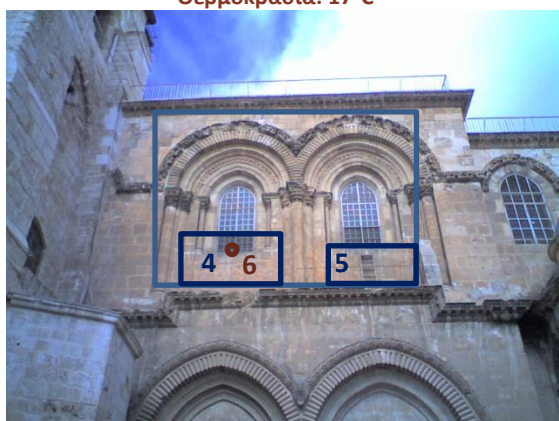
Θερμογράφημα 4: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 4



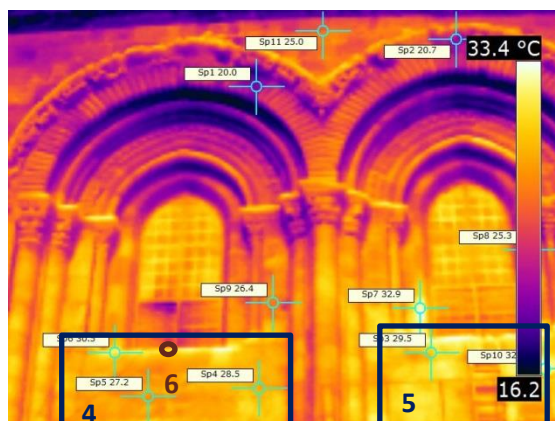
Εικόνα 5: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία 27.1.2011, Ώρα:18.41, Θερμοκρασία: 17°C



Θερμογράφημα 5: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 5



Εικόνα 6: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 28.1.2011, Ώρα:12.56, Θερμοκρασία: 20°C



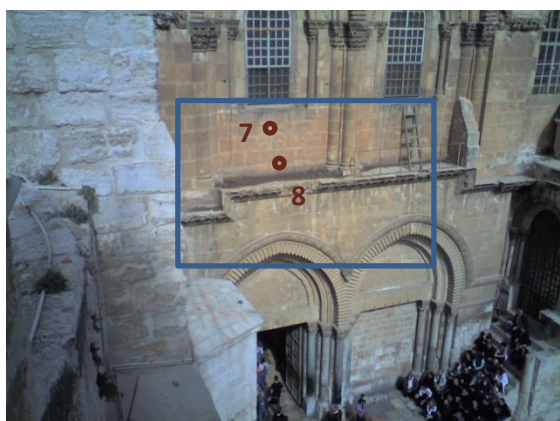
Θερμογράφημα 6: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 6

Στο **Θερμογράφημα 4** εξετάζεται η επιφάνεια σε διαφορετική χρονική στιγμή μέσα στη μέρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι λαμβάνονται κοινές πληροφορίες με τα προηγούμενα θερμογραφήματα. Ωστόσο η περιοχή του δεξιού παραθύρου είναι θερμότερη κατά 2 – 3°C από αυτή του αριστερού. Αιτία για τη διαφορά στη θερμοκρασία αποτελεί η θέση των δύο περιοχών σε σχέση με το φως του ήλιου.

Στο **Θερμογράφημα 5** εξετάζεται η περιοχή σε βραδινή λήψη. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι κατά κύριο λόγο ίδιες με αυτές των υπόλοιπων

θερμογραφημάτων. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η διακοσμητική ανάγλυφη επιφάνεια των τόξων (Επιφάνεια 3), όπου παρατηρούνται αντίθετα αποτελέσματα. Οι περιοχές που δίνουν την αίσθηση απώλειας υλικού στις ανάγλυφες επιφάνειες των τόξων έχουν υψηλότερη θερμοκρασία (17°C) σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του τόξου, ενώ οι σκουρότερες επιφάνειες έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (13°C) από τους υπερκείμενους λίθους.

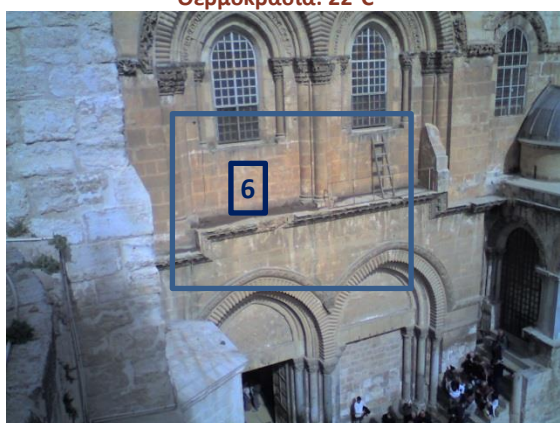
Το **Θερμογράφημα 6** έχει ληφθεί την επόμενη ημέρα. Σε αυτό μελετάται η περιοχή των παραθύρων από διαφορετική οπτική γωνία. Στο κατώτερο τμήμα των παραθύρων, Σημείο 6, παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία από την υπόλοιπη τοιχοποιία με διαφορά περίπου 2 – 3°C. Δεξιά και αριστερά των παραθύρων παρουσιάζονται διαφορές στην θερμοκρασία κάποιων λίθων. Συγκεκριμένα οι αποφλοιωμένοι λίθοι λευκού χρωματισμού είναι ψυχρότεροι (27°C) από τους λίθους με σκουρότερο χρώμα (29°C). Τέλος η Επιφάνεια 5 είναι θερμότερη από την Επιφάνεια 4 κατά 2 – 3°C λόγω διαφορετικής έκθεσης στον ήλιο.



Εικόνα 7: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.51, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 7: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 7



Εικόνα 8: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.51, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 8: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 8

Στο **Θερμογράφημα 7** εξετάζεται η τοιχοποιία κάτω από το αριστερό παράθυρο. Στο κέντρο της περιοχής αυτής εμφανίζονται ψυχρότερες περιοχές, περίπου 31°C που αντιστοιχούν σε ανοιχτόχρωμος καστανούς λίθους, όπως στο Σημείο 7.

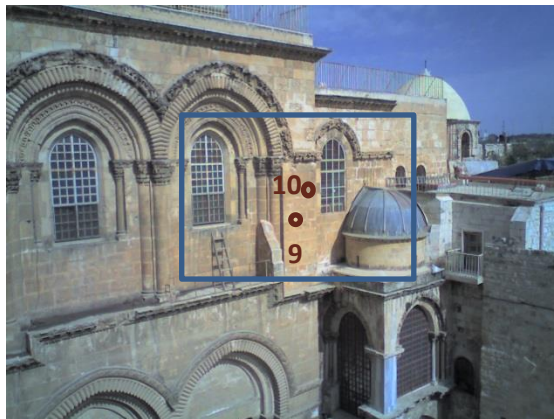


Χαμηλότερη θερμοκρασία εμφανίζεται και στις λευκές περιοχές που έχουν προκύψει από τη ροή του νερού της βροχής. Αντίθετα στο Σημείο 8 διακρίνονται θερμότερες περιοχές με θερμοκρασία 36°C, οι οποίες αντιστοιχούν σε σκουρόχρωμους λίθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην επιφάνεια κάτω από το παράθυρο δεν είναι ευδιάκριτοι οι αρμοί στο θερμογράφημα. Τέλος, στο κάτω μέρος της τοιχοποιίας εμφανίζεται υψηλή θερμοκρασία που έχει προκληθεί από τη μεταβολική δραστηριότητα των πτηνών.

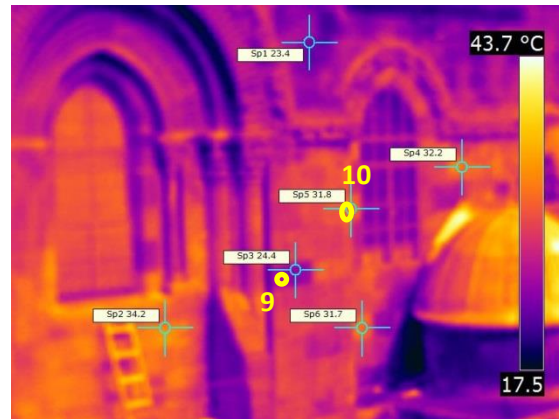
Στην Επιφάνεια 6 του **Θερμογραφήματος 8** εμφανίζουν οι περισσότεροι λίθοι χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή των αρμών, περίπου 32°C, ενώ διακρίνονται και λίθοι που σε κάποια τμήματα έχουν τη ίδια θερμοκρασία με τους αρμούς, 36°C. Είναι εμφανές ότι στο σημείο αυτό έχει γίνει προσθήκη με τη χρήση διαφορετικών λίθων και αρμών.

## Περιοχή 2

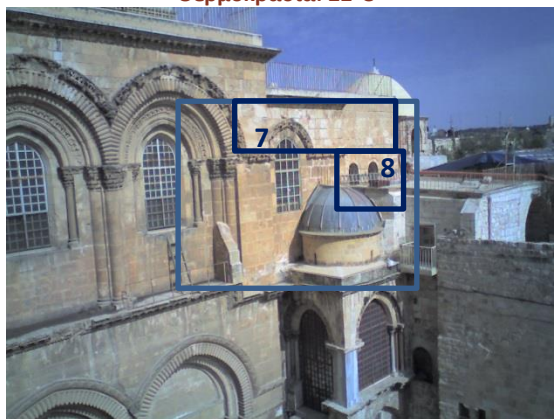
Οι παρακάτω εικόνες και θερμογραφήματα σχετίζονται με το δεξί τμήμα της πρόσοψης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 9: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.37, Θερμοκρασία: 22°C



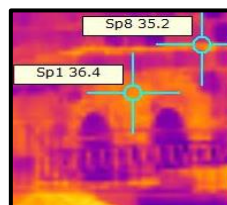
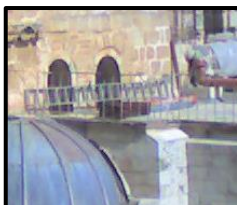
Θερμογράφημα 9: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 9

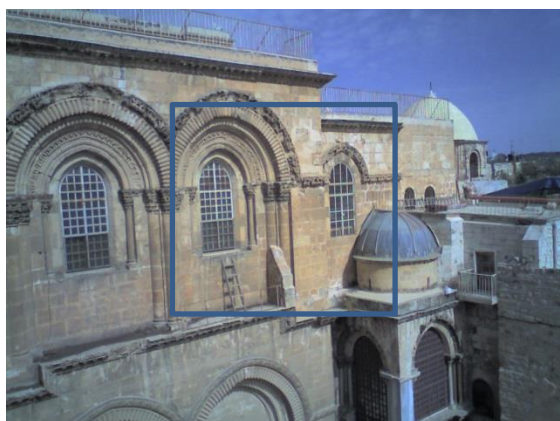


Εικόνα 10: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.39, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 10: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 10





**Εικόνα 11:** Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.39, Θερμοκρασία: 22°C



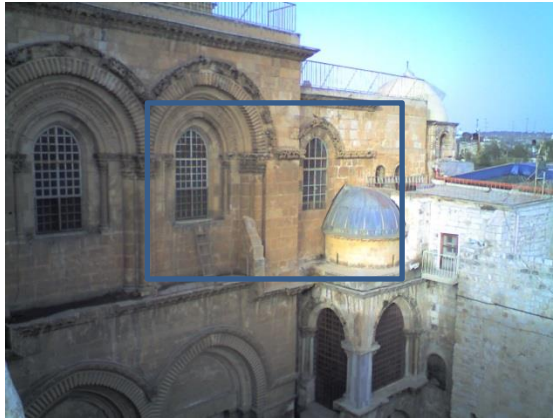
**Θερμογράφημα 11:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 11

Στην τοιχοποιία μεταξύ των δύο παραθύρων έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (24°C) οι ανοιχτόχρωμοι λίθοι που παρουσιάζουν αποφλοιώση, όπως συμβαίνει στο Σημείο 7 του **Θερμογραφήματος 9**. Οι λίθοι με φαιόμαυρη απόχρωση, όπως στο Σημείο 8, φαίνονται θερμότεροι συγκριτικά με τους υπόλοιπους (31°C). Και στην περίπτωση αυτής της τοιχοποιίας δεν είναι εμφανείς οι αρμοί στο θερμογράφημα.

Στην Επιφάνεια 7 της Εικόνας 10 παρατηρούνται λίθοι με διάφορους τύπους φθοράς. Διακρίνονται λευκοί και καστανοί λίθοι με απώλεια υλικού. Η επιφάνεια αυτή εμφανίζεται ψυχρότερη στο **Θερμογράφημα 10**, με θερμοκρασία 22°C, από την υπόλοιπη τοιχοποιία (περίπου 27° – 31°C). Μεταβολές της θερμοκρασίας παρατηρούνται και στην διακοσμητική ανάγλυφη επιφάνεια του τόξου. Η εσωτερική και εξωτερική πλευρά του τόξου έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία (32°C) από κάποια ενδιάμεσα τμήματα (26°C). Επίσης διακρίνονται ορισμένα σημεία ανάγλυφων επιφανειών που έχουν ίδια θερμοκρασία με την εξωτερική πλευρά (Σημείο 11). Παράλληλα παρουσιάζεται η Επιφάνεια 8 σε μεγέθυνση στο κάτω μέρος της Εικόνας και του Θερμογραφήματος 10. Στην περιοχή περιμετρικά των οπών παρατηρούνται λίθοι με ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία (36°C) σε σχέση με τους παρακείμενους ψυχρούς λίθους(29°C). Παράλληλα πάνω από τις οπές διακρίνεται αρμός με υψηλή θερμοκρασία (35°C), επομένως στην περιοχή αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί λίθοι και διαφορετικό υλικό αρμών.

Καθώς υπήρχε η δυνατότητα να εξεταστεί η περιοχή αυτή σε διαφορετικές ώρες τις ημέρας, έχουν ληφθεί θερμογραφήματα και τις απογευματινές ώρες.





Εικόνα 12: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:16.49, Θερμοκρασία: 18°C



Θερμογράφημα 12: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 12

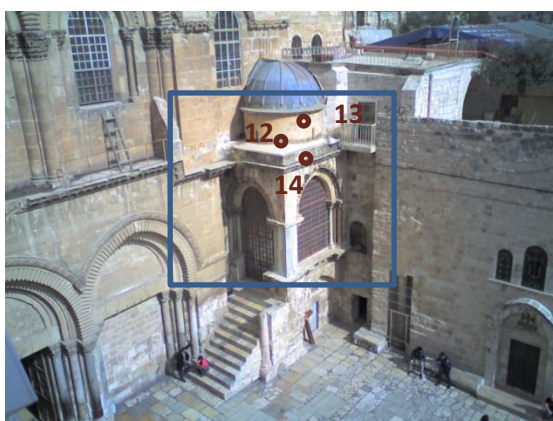


Εικόνα 13: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:16.49, Θερμοκρασία: 18°C



Θερμογράφημα 13: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 13

Στα **Θερμογράφηματα 12 και 13** λαμβάνονται τα ίδια συμπεράσματα για την κατάσταση της επιφάνειας, ωστόσο οι θερμοκρασιακές διαφορές παρουσιάζονται με λιγότερες λεπτομέρειες.



Εικόνα 14: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.38, Θερμοκρασία: 22°C

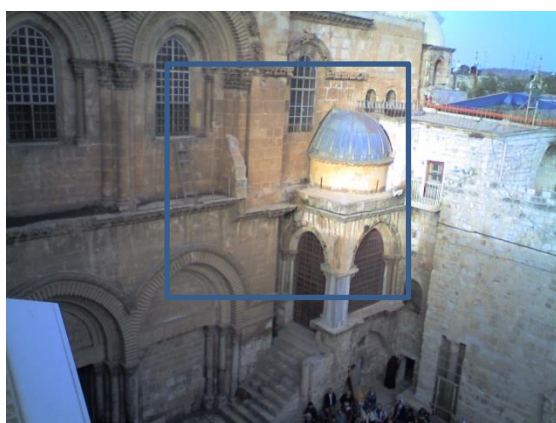


Θερμογράφημα 14: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 15

Στο **Θερμογράφημα 14** εξετάζεται η περιοχή του παρεκκλησίου. Παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία στο Σημείο 12 του τρούλου, περίπου 31°C. Στην επιφάνεια αυτή παρατηρείται φαιόμαυρη απόχρωση. Στην υπόλοιπη επιφάνεια του



τρουλίσκου εντοπίζονται θερμότεροι λίθοι όπως στο Σημείο 13, οι οποίοι έχουν καστανή απόχρωση και δίνουν της αίσθηση απώλειας υλικού. Επιπλέον θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις διακρίνονται και στην τετραγωνική βάση. Οι λίθοι της Επιφάνειας 9 είναι πιο ψυχροί από αυτούς της Επιφάνειας 10. Στην Επιφάνεια 10 αποτελεί εξαίρεση ο λίθος του Σημείου 14. Οι λίθοι της Επιφάνειας 10 έχουν μαύρο χρώμα, ενώ ο λίθος του Σημείο 14 είναι λευκός. Παράλληλα στην Επιφάνεια 11 φαίνεται ότι οι λευκές περιοχές της τοιχοποιίας, που οφείλονται στη ροή του βρόχινου νερού έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (24°C), από του υπόλοιπους λίθους που έχουν σκούρο χρωματισμό (28°C).



Εικόνα 15: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ωρα:16.49, Θερμοκρασία: 18°C

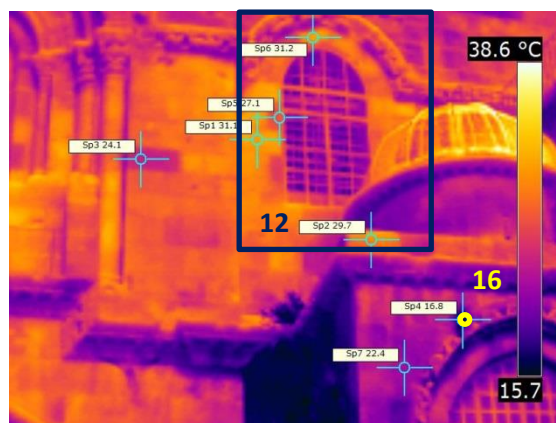


Θερμογράφημα 15: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 14

Στο **Θερμογράφημα 15** εξετάζεται η ίδια περιοχή σε διαφορετική ώρα της ημέρας. Λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες, αλλά με λιγότερες λεπτομέρειες. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το Σημείο 15 έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία συγκριτικά με τη υπόλοιπη επιφάνεια. Το σημείο αυτό έχει πορτοκαλοκάστανη απόχρωση.



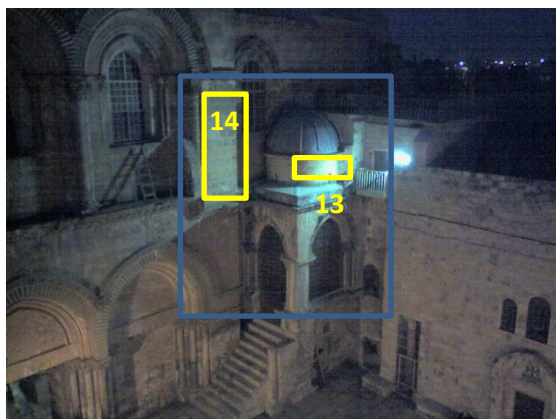
Εικόνα 16: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 28.1.2011, Ωρα:12.57, Θερμοκρασία: 20°C



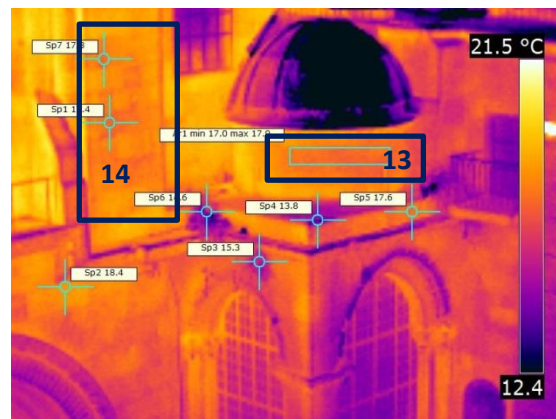
Θερμογράφημα 16: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 16

Το **Θερμογράφημα 16** έχει ληφθεί την επόμενη ημέρα και από άλλη οπτική γωνία. Από την πλευρά αυτή μπορούμε να πάρουμε κάποιες επιπλέον πληροφορίες. Αρχικά εξετάζονται οι λίθοι περιμετρικά του παραθύρου στην Επιφάνεια 12. Παρατηρείται ότι λίθοι με διαφορετικές θερμοκρασίες έχουν και διαφορετικό

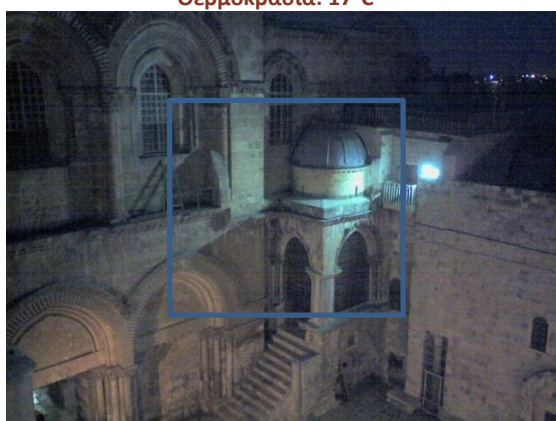
χρώμα, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί είτε σε φαινόμενα φθοράς, είτε σε χρήση διαφορετικών υλικών. Υψηλή θερμοκρασία εμφανίζεται στους λίθους με σκούρο καστανό χρωματισμό, αντίθετα οι ανοιχτόχρωμοι λίθοι είναι κατά περίπου 2°C ψυχρότεροι.



Εικόνα 17: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ωρα:18.41, Θερμοκρασία: 17°C



Θερμογράφημα 17: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 17



Εικόνα 18: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 28.1.2011, Ωρα:18.31, Θερμοκρασία: 17°C



Θερμογράφημα 18: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 18

Οι Εικόνες και τα **Θερμογραφήματα 17 και 18** έχουν ληφθεί για την ίδια επιφάνεια ελέγχου βραδινές ώρες. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με αυτά των πρωινών μετρήσεων. Διαφορές διακρίνονται στην επιφάνεια του τρουλίσκου (Επιφάνεια 13). Εκεί εντοπίζεται μία ψυχρότερη περιοχή με τη θερμοκρασία να μεταβάλλεται από τους 17 έως του 17,9°C. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά πιθανώς να οφείλεται στο φωτισμό του τρουλίσκου. Επιπρόσθετα στην τετραγωνική βάση δεν διακρίνεται κάποια ιδιαίτερη θερμοκρασιακή διαφορά, αντίθετα από ότι συμβαίνει στα θερμογραφήματα που έχουν ληφθεί ημέρα. Μελετώντας την τοιχοποιία στην Επιφάνεια 14 διαπιστώνεται ότι τις βραδινές ώρες έχουν υψηλότερη θερμοκρασία οι λευκοί λίθοι και χαμηλότεροι οι φαυόμαυροι. Τα αποτελέσματα δηλαδή είναι αντίθετα από αυτά των θερμογραφημάτων που έχουν ληφθεί ημέρα.



### Περιοχή 3

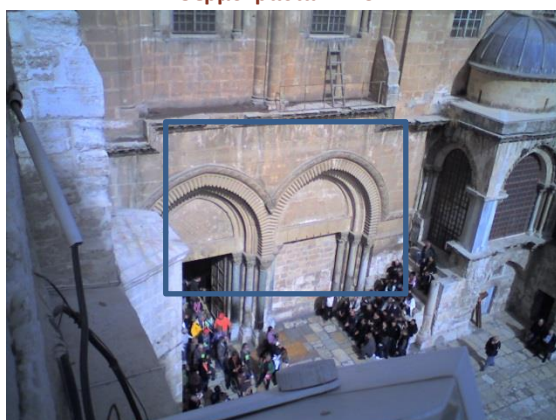
Η Περιοχή 3 περιλαμβάνει τις δύο εισόδους του Ναού.



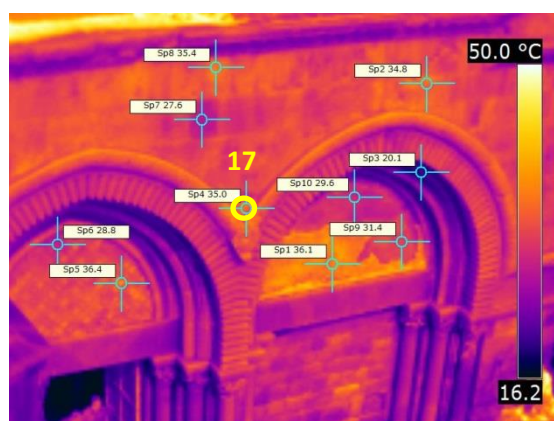
Εικόνα 19: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.37, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 19: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 19



Εικόνα 20: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.50, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 20: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 20

Στα **Θερμογραφήματα 19 και 20** παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές στην περιοχή των τόξων πάνω από τις δύο εισόδους. Αναλυτικότερα, η επιφάνεια στο εξωτερικό τμήμα έχει λευκή απόχρωση και είναι θερμότερη από τα υπόλοιπα τμήματα του τόξου με θερμοκρασία 33°C, ενώ υψηλή θερμοκρασία έχει και η περιοχή, στην οποία ενώνονται τα δύο τόξα (Σημείο 17) με θερμοκρασία 35°C. Στις ανάγλυφες περιοχές των τόξων παρατηρείται εναλλαγή ψυχρών και θερμών περιοχών, καθώς οι επιφάνειες που εξέχουν είναι θερμότερες από αυτές που βρίσκονται στις εσοχές.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα υπέρθυρα των δύο εισόδων. Στο υπέρθυρο της αριστερής εισόδου παρατηρείται θερμοκρασιακή εναλλαγή με θερμοκρασίες από 28°C έως 36°C περίπου. Οι διαφορές αυτές τις θερμοκρασίας ουσιαστικά ακολουθούν τη διακοσμητική διάταξη της επιφάνειας. Στο υπέρθυρο της δεξιάς εισόδου διακρίνονται τρεις περιοχές με διαφορετικές θερμοκρασίες, η πρώτη έχει θερμοκρασία περίπου 36°C, η δεύτερη 31°C και η τρίτη 29°C. Από την παρατήρηση

των Εικόνων 19 και 20 φαίνεται ότι οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν διαφορετική μορφολογία.



Εικόνα 21: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 28.1.2011, Ωρα:16.50, Θερμοκρασία: 18°C

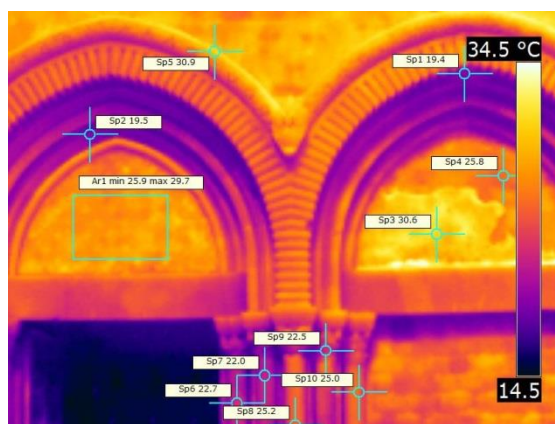


Θερμογράφημα 21: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 21

Οι περιοχή των δύο εισόδων εξετάστηκε σε διαφορετική χρονική στιγμή μέσα στην ημέρα. Λόγω της οπτικής γωνίας μπορούν να ληφθούν κάποιες επιπλέον πληροφορίες στο **Θερμογράφημα 21**. Διαφορετικές θερμοκρασίες παρατηρούνται στους κίονες δεξιά της κύριας εισόδου, αυτό συμβαίνει επειδή οι λίθοι αποτελούνται από μάρμαρο. Συγκεκριμένα θερμότεροι είναι ο πρώτος και ο τρίτος κίονας, ενώ ο τρίτος κίονας έχει και την υψηλότερη θερμοκρασία από τους υπόλοιπους, 20°C. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, ο πρώτος, ο τρίτος και ο πέμπτος κίονας αποτελούνται από μάρμαρο ίδιου χρωματισμού.



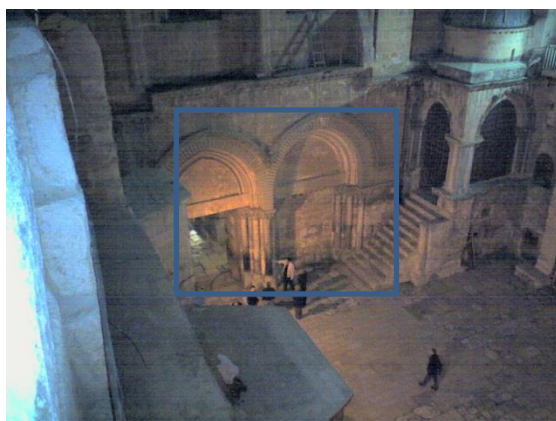
Εικόνα 22: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 28.1.2011, Ωρα:12.57, Θερμοκρασία: 20°C



Θερμογράφημα 22: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 22

Η Εικόνα και το **Θερμογράφημα 22** έχουν ληφθεί την επόμενη ημέρα και από διαφορετική οπτική γωνία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι κοινά με τα προηγούμενα, ωστόσο λόγω της θέσης μπορούμε να λάβουμε κάποιες επιπλέον πληροφορίες. Οι κίονες στο κέντρο της εικόνας έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Αναλυτικά, ο πρώτος και ο δεύτερος κίονας είναι ψυχρότεροι, με θερμοκρασία 22°C, ο τρίτος και ο πέμπτος είναι οι θερμότεροι και παρουσιάζουν την ίδια θερμοκρασία (25°C), ενώ τέλος ο τέταρτος κίονας παρουσιάζει θερμές περιοχές.



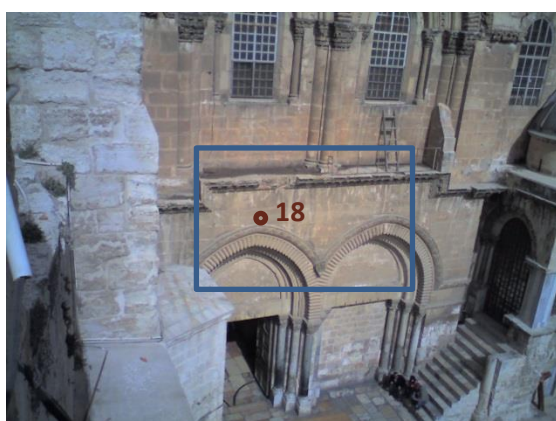


Εικόνα 23: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:18.43, Θερμοκρασία: 17°C

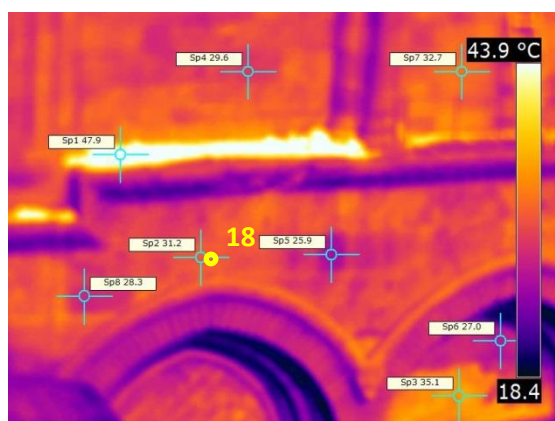


Θερμογράφημα 23: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 23

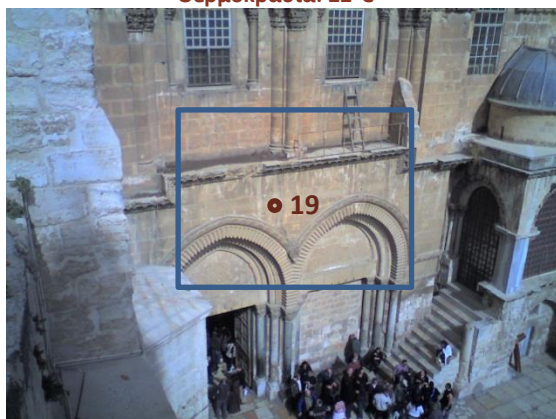
Η ίδια επιφάνεια εξετάζεται στο **Θερμογράφημα 23** σε βραδινή λήψη. Στο υπέρθυρο της κύριας εισόδου του Ναού παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία στην άνω επιφάνεια. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά ενδεχομένως να επηρεάζεται από το φωτισμό της εισόδου. Στην Επιφάνεια 15 διακρίνονται δύο περιοχές με θερμοκρασιακή διαφορά. Θερμότερη είναι η πάνω επιφάνεια με θερμοκρασία 18°C, έναντι της κάτω με θερμοκρασία πάνω από 16°C. Συνεπώς, τα αποτελέσματα είναι αντίθετα με αυτά των θερμογραφημάτων που έχουν ληφθεί ημέρα.



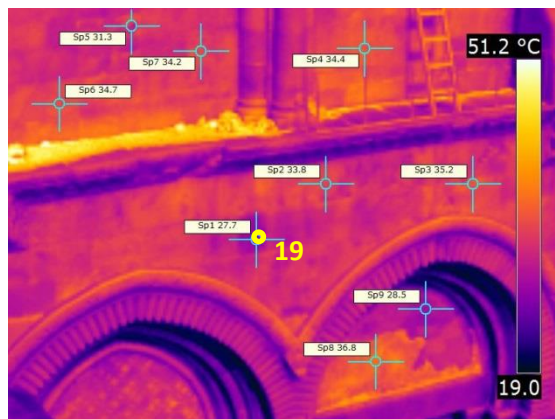
Εικόνα 24: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.36, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 24: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 24

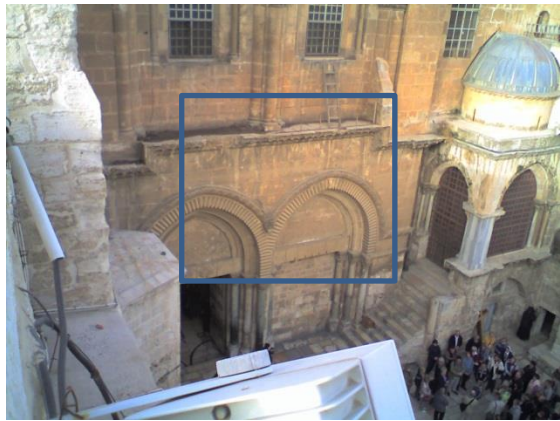


Εικόνα 25: Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.52, Θερμοκρασία: 22°C

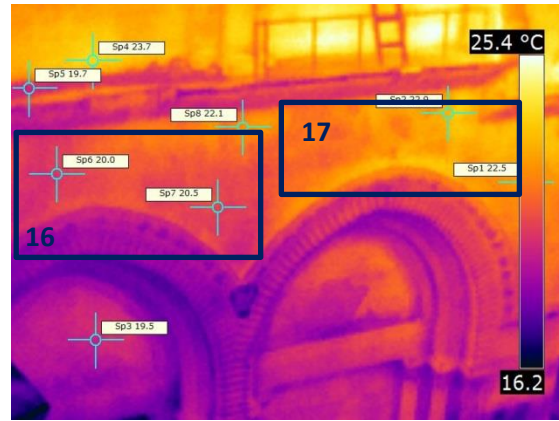


Θερμογράφημα 25: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 25





**Εικόνα 26:** Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ωρα:16.51, Θερμοκρασία: 22°C



**Θερμογράφημα 26:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 26

Στα **Θερμογραφήματα 24, 25 και 26** εξετάζεται η επιφάνεια πάνω από τα τόξα των εισόδων. Στην περιοχή αυτή εμφανίζονται θερμότεροι και ψυχρότεροι λίθοι. Πάνω από τις δύο εισόδους παρατηρούνται θερμοί λίθοι με θερμοκρασία πάνω από 35°C, οι οποίοι έχουν μαύροι απόχρωση, όπως στο Σημείο 18. Οι πιο ανοιχτόχρωμοι λίθοι (Σημείο 19) παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία περίπου 27°C. Θερμότεροι εμφανίζονται και οι αρμοί σε μερικά σημεία της τοιχοποιίας. Παράλληλα οι λευκές περιοχές που έχουν προκύψει από τη ροή του βρόχινου νερού παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία από τους λίθους.

Το **Θερμογράφημα 26** έχει ληφθεί σε διαφορετική χρονική στιγμή μέσα στη μέρα. Παρατηρείται ότι η Επιφάνεια 16 έχει χαμηλότερη θερμοκρασία (20°C) από την Επιφάνεια 17 (22°C). Η διαφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στην διαφορετική έκθεση στον ήλιο.



**Εικόνα 27:** Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ωρα:12.37, Θερμοκρασία: 22°C



**Θερμογράφημα 27:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 27



**Εικόνα 28:** Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:12.37, Θερμοκρασία: 22°C

**Θερμογράφημα 28:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 28

Στις Εικόνες και στα **Θερμογραφήματα 27 και 28** εξετάζεται η δεξιά κλειστή πλέον είσοδος του Ναού. Στην τοιχοποιία που σφραγίζει τη δεξιά είσοδο παρατηρούνται λίθοι διαφορετικού χρωματισμού. Οι λίθοι με σκούρα καστανή απόχρωση έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από τους ανοιχτόχρωμους λίθους, περίπου 33°C. Κυρίως οι ανοιχτόχρωμοι λίθοι παρουσιάζουν έντονη αποφλοιώση εξαιτίας της εξάνθισης αλάτων. Επίσης, οι ψυχρές περιοχές στην τοιχοποιία μπορεί να αποδοθούν στην ύπαρξη υγρασίας. Παράλληλα θερμοί είναι και οι αρμοί της τοιχοποιίας. Οι κίονες δεξιά αυτής της εισόδου έχουν ίδια θερμοκρασία, ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος κίονας εμφανίζουν υψηλή θερμοκρασία στα φαιόμαυρα σημεία τους. Η διαφορετικές θερμοκρασίες στους κίονες πιθανώς να οφείλεται και στη χρήση spolia.

Δεξιά της σφραγισμένης εισόδου παρατηρείται διαφορά στη θερμοκρασία της τοιχοποιίας. Η επιφάνεια του σημείου 20 είναι θερμότερη από την υπόλοιπη περιοχή. Η θερμή επιφάνεια έχει φαιόμαυρη απόχρωση και θερμοκρασία περίπου 32°C, ενώ το ψυχρότερο τμήμα (σημείο 21) της τοιχοποιίας έχει θερμοκρασία 23°C και είναι ανοιχτόχρωμο. Οι λευκές περιοχές πιθανώς να οφείλονται στη φθορά από κρυστάλλωση αλάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η Επιφάνεια 18, όπου διακρίνεται διαφορά στη θερμοκρασία των λίθων κατά 4°C, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται στην Εικόνα 28 διαφορά στα υλικά.



**Εικόνα 29:** Νότια όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:18.42, Θερμοκρασία: 17°C

**Θερμογράφημα 29:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 29

Η ίδια περιοχή εξετάζεται σε βραδινή λήψη στο **Θερμογράφημα 29**, ωστόσο παρατηρούνται κάποιες αλλαγές συγκριτικά με τα αποτελέσματα των θερμογραφημάτων που έχουν ληφθεί την ημέρα. Αρχικά στην Επιφάνεια 19 είναι θερμότερη η πάνω περιοχή (18°C) από την κάτω (15°C), αντίθετα δηλαδή από ότι συμβαίνει στις πρωινές ώρες.

Στην περιοχή της τοιχοποιίας που σφραγίζει την είσοδο δεν παρατηρούνται με λεπτομέρεια οι θερμοκρασιακές διαφορές που επισημάνθηκαν στις πρωινές ώρες, ενώ εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση θερμότεροι και ψυχρότεροι λίθοι. Επίσης οι τρεις κίονες δεξιά της εισόδου φαίνονται να έχουν ίδια θερμοκρασία, αλλά εδώ φαίνονται θερμότεροι σε σχέση με την υπόλοιπη τοιχοποιία, ενώ στον δεύτερο και στον τρίτο κίονα διακρίνονται ψυχρότερες περιοχές στα φαιόμαυρα σημεία τους. Παράλληλα στην Επιφάνεια 20 παρουσιάζονται όμοιες θερμοκρασιακές διαφορές με αυτές των Θερμογραφημάτων 27 και 28.

### **Μερικά Συμπεράσματα από τον έλεγχο της νότιας όψης με τη Θερμογραφία Υπερύθρου**

Με τη βοήθεια της Θερμογραφίας Υπερύθρου ήταν δυνατό να εντοπιστούν στη νότια όψη λίθοι με διαφορετικά χαρακτηριστικά, να διαπιστωθούν επεμβάσεις και προσθήκες που έλαβαν χώρα στο παρελθόν, καθώς και να αποτιμηθεί η συμβατότητα των διαφορετικών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί. Η θερμοκρασιακή διαφορά που εντοπίστηκε στην τοιχοποιία μπορεί να οφείλεται είτε στη φθορά των υλικών και τη μεταβολή των ιδιοτήτων τους, είτε στη χρήση διαφορετικών υλικών, αφού όπως αναφέρεται και στο Θεωρητικό Μέρος έχουν χρησιμοποιηθεί σρόλια σε τμήματα της πρόσοψης.

Η φθορά στη νότια όψη του Ναού οφείλεται στη συνέργεια ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Στους ενδογενείς παράγοντες ανήκουν οι στυλόλιθοι, οι οποίοι δημιουργούν κενά στο λίθο καθώς αποπλένονται, ενώ επιδεινώνεται η

κατάσταση σε περίπτωση λανθασμένης τοποθέτησης των λίθων. Στους ενδογενείς παράγοντες συγκαταλέγεται και το πορώδες, που σε συνεργασία με την υγρασία οδηγεί στην εξάνθιση και κρυπτο-εξάνθιση αλάτων. Ιδιαίτερα σημαντικοί εξωγενείς παράγοντες είναι οι κύκλοι ύγρυνσης-ψύξης που σε συνδυασμό με το πορώδες συντελούν στην απώλεια υλικού, καθώς και οι ακραίες θερμικές μεταβολές, οι οποίες προκαλούν ρηγματώσεις. Παράλληλα, τα σωματίδια σκόνης που μεταφέρονται μέσω του νοτιοανατολικού ανέμου από την έρημο της Ιουδαίας στην πρόσοψη (νότια όψη), συμβάλλουν στη φθορά λόγω εκτριβής και επικάθονται στην επιφάνεια. Τέλος, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προξενούν χρωματικές αλλοιώσεις, ενώ το νερό της βροχής και η υγρασία οδηγούν στην απόπλυση επιφανειών και την ανάπτυξη βιοδιάβρωσης.

Από τον έλεγχο που διεξήχθη διαπιστώθηκαν θερμοκρασιακές μεταβολές στις επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετικούς τύπους φθοράς. Για παράδειγμα οι φαιόμαυρες περιοχές των λίθων φαίνεται να παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες από την υπόλοιπη τοιχοποιία, ενώ αντίστοιχα περιοχές που δίνουν την αίσθηση απώλειας υλικού ή έχουν λευκό χρωματισμό εμφανίζονται σαν ψυχρές. Φαιόμαυρες περιοχές εντοπίστηκαν κυρίως σε επιφάνειες προστατευμένες από το βρόχινο νερό, συνεπώς είναι πιθανό να πρόκειται για μαύρες κρούστες. Επιπρόσθετα απώλεια υλικού εμφανίστηκε τόσο σε λευκές αποπλυμένες περιοχές, όσο και εξαιτίας της κρύπτο-εξάνθισης αλάτων (κυρίως στην κλειστή πύλη της πρόσοψης και στην τοιχοποιία δεξιά της κλειστής πύλης). Επίσης παρατηρούνται αποφλοιωμένοι λίθοι που έχουν υποστεί φθορά πιθανώς λόγω λανθασμένης τοποθέτησης, είτε εξαιτίας της εκτριβής από τα σωματίδια σκόνης. Οι αποφλοιωμένοι λίθοι απαντώνται κατά κύριο λόγο στην κορυφή των τόξων και στην τοιχοποιία γύρω από τα παράθυρα.

Παράλληλα ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι πληροφορίες που ελήφθησαν για τις επεμβάσεις συμπλήρωσης λίθων ή αντικατάστασης τους με άλλα υλικά, ιδιαίτερα σε αυτό το μνημείο, όπου δεν είναι διαθέσιμες επαρκείς σχετικές πληροφορίες. Έτσι παρατηρήθηκαν κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν ως αρμοί και παρουσίαζαν διαφορετική θερμοκρασία, καθώς και λίθοι συμπληρωμένοι με υλικά στερέωσης. Τέλος, είχαμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε την νότια όψη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ώστε να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν διαφορές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά κύριο λόγο υπήρχε ταύτιση στα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων. Ωστόσο υπήρξαν και επιφάνειες στις οποίες τα αποτελέσματα παρουσιάζονταν ανεστραμμένα τις βραδινές ώρες. Οι επιφάνειες αυτές απορροφούν μεγαλύτερη θερμότητα την ημέρα σε σχέση τις βραδινές ώρες.

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση και τα αποτελέσματα τις διαγνωστικής μελέτης πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση της φθοράς στη νότια όψη του Ναού της Αναστάσεως.



- |  |   |   |
|--|---|---|
| <span style="color: blue;">■</span> Αποφλοιωμένοι λίθοι      | <span style="color: brown;">■</span> Μαύρες κρούστες      | <span style="color: orange;">■</span> Πορτοκαλοκάστανη περιοχή      |
| <span style="color: yellow;">■</span> Αποπλυμένες επιφάνειες | <span style="color: red;">■</span> Πιθανή εξάνθιση αλάτων | <span style="color: green;">■</span> Αντικατάσταση/ προσθήκες λίθων |
| <span style="color: magenta;">■</span> Απώλεια υλικού        |   |   |



Εικόνα 4.4: Χαρτογράφηση της φθοράς στο επάνω τμήμα της νότιας όψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως



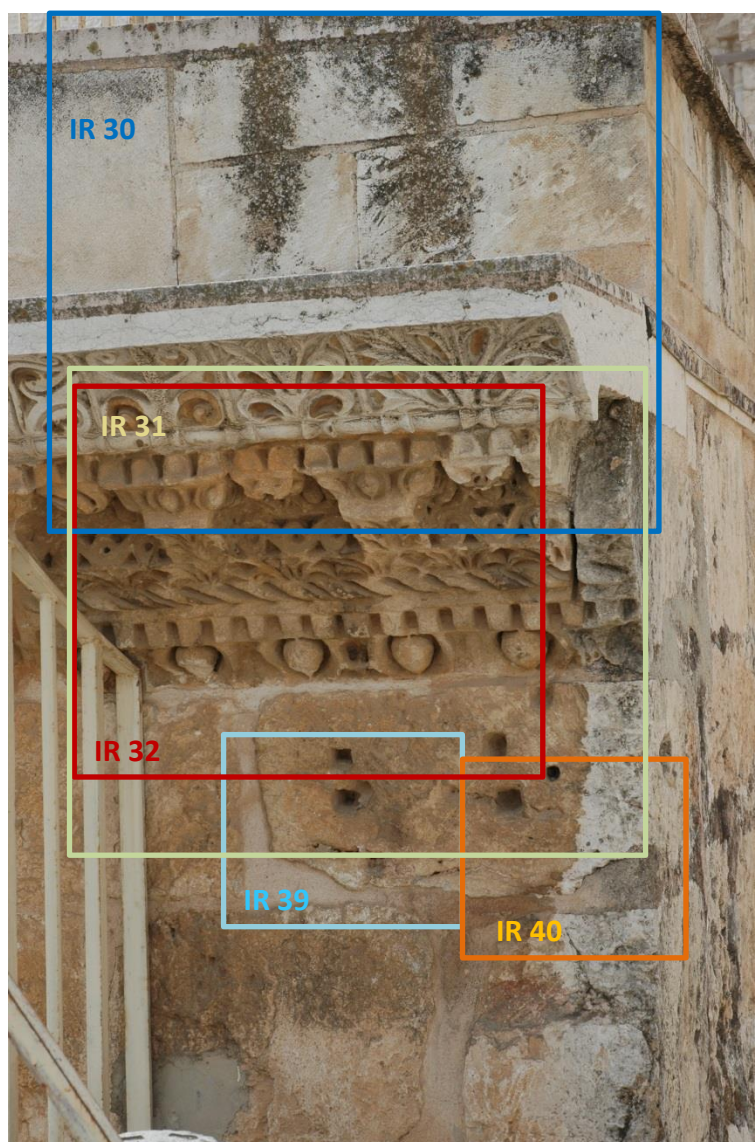
- |  |
|--|
| <span style="color: brown;">■</span> Μαύρες κρούστες                       |
| <span style="color: red;">■</span> Εξάνθιση αλάτων                         |
| <span style="color: yellow;">■</span> Αποπλυμένες επιφάνειες               |
| <span style="color: blue;">■</span> Αποφλοιωμένοι λίθοι                    |
| <span style="color: orange;">■</span> Πορτοκαλοκάστανη περιοχή             |
| <span style="color: magenta;">■</span> Απώλεια υλικού                      |
| <span style="color: green;">■</span> Διαφορετικές περιοχές στην τοιχοποιία |
| <span style="color: purple;">■</span>                                      |

Εικόνα 4.5: Χαρτογράφηση της φθοράς στο κάτω τμήμα της νότιας όψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως

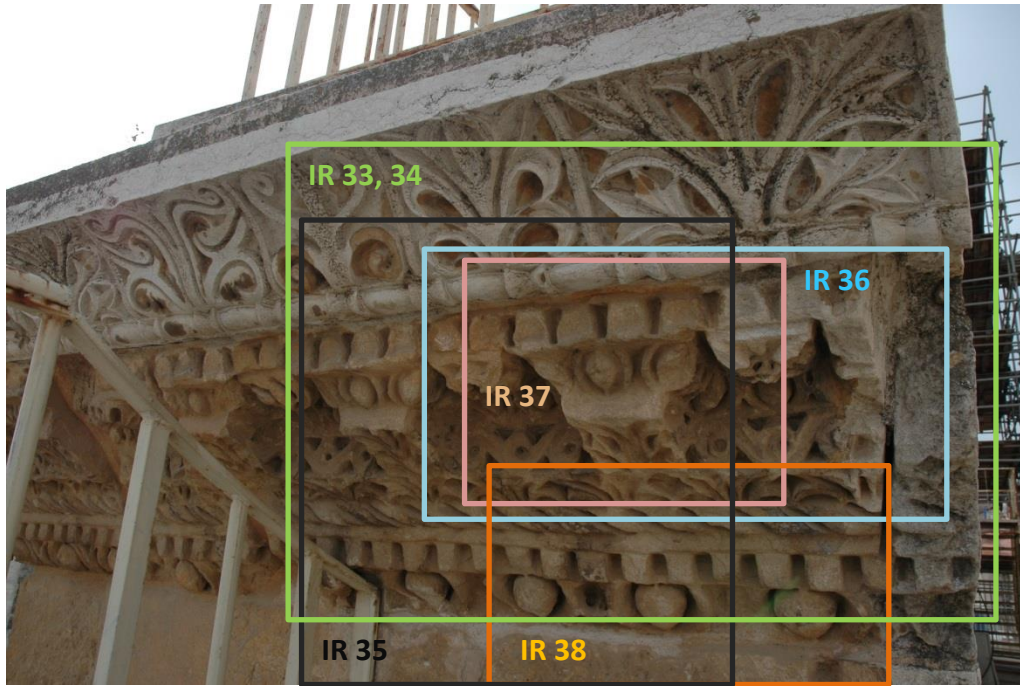


## Θερμογραφήματα από την ανατολική όψη της πρόσοψης

Τον έλεγχο της νότιας όψης της πρόσοψης ακολούθησε η εξέταση της ανατολικής όψης της πρόσοψης, της επιφάνειας δηλαδή στην οποία πραγματοποιήθηκε και δειγματοληψία. Στις Εικόνες 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι περιοχές της επιφάνειας οι οποίες εξετάστηκαν με τη Θερμογραφία Υπερύθρου.



Εικόνα 4.6: Περιοχές που εξετάστηκαν με τη Θερμογραφία υπερύθρου από την ανατολική όψη της πρόσοψης

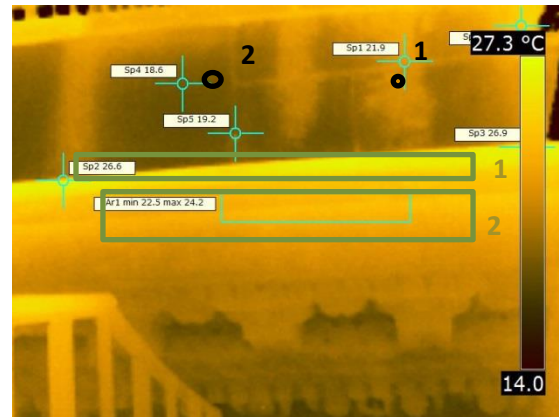


Εικόνα 4.7: Περιοχές που εξετάστηκαν με τη Θερμογραφία Υπερύθρου από την ανατολική όψη της πρόσοψης

Ακολουθώς παρατίθενται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της Θερμογραφίας Υπερύθρου στην ανατολική οψη.



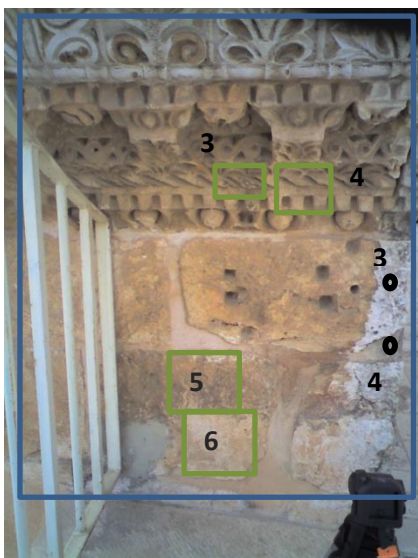
Εικόνα 30: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.21, Θερμοκρασία: 22°C



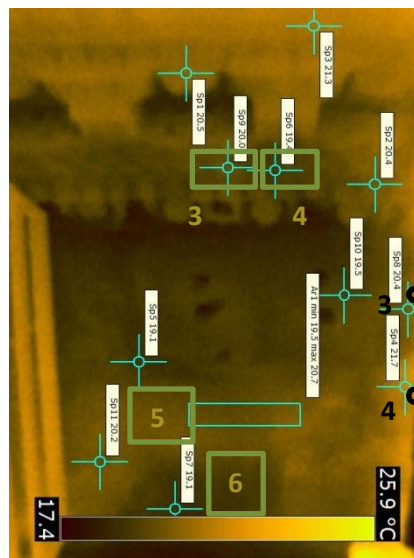
Θερμογράφημα 30: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 30

Στο **Θερμογράφημα 30** εξετάζεται η ευρύτερη περιοχή της ανατολικής όψης της πρόσοψης. Το θερμοκρασιακό εύρος είναι μεταξύ των 14 – 27,3°C. Την υψηλότερη θερμοκρασία, 26°C, παρουσιάζει η οριζόντια Επιφάνεια 1, στην οποία φαίνεται να έχουν σχηματιστεί μαύροι χρωματισμοί. Οι μαύροι σχηματισμοί, όπως αυτός του Σημείου 1 έχουν ίδια απόχρωση με την Επιφάνεια 1, ωστόσο έχουν διαφορετική θερμοκρασία, περίπου 22°C. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη θέση των δύο επιφανειών. Οι σχηματισμοί αυτοί πιθανώς να οφείλονται στην ανάπτυξη βιοδιάβρωσης. Χαμηλότερη θερμοκρασία εντοπίζεται στην επιφάνεια που

βρίσκεται το Σημείο 2, με θερμοκρασία πάνω από 18°C. Η περιοχή αυτή είναι λευκού χρωματισμού. Η Επιφάνεια 2 εμφανίζει επίσης υψηλές θερμοκρασίες, από 22 έως 24°C. Η επιφάνεια αυτή έχει λευκό χρώμα, ενώ παρατηρούνται και μαύροι σχηματισμοί εξαιτίας της βιολογικής φθοράς.



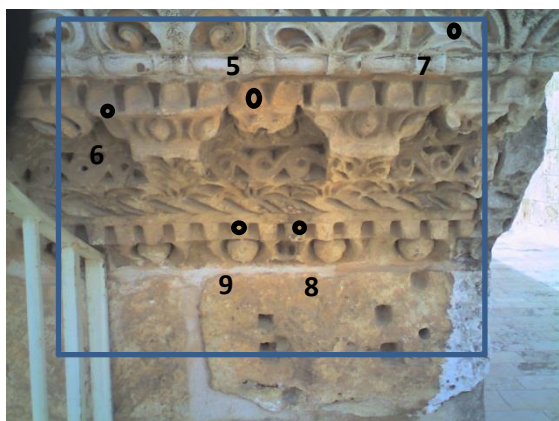
**Εικόνα 31:** Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.16, Θερμοκρασία: 22°C



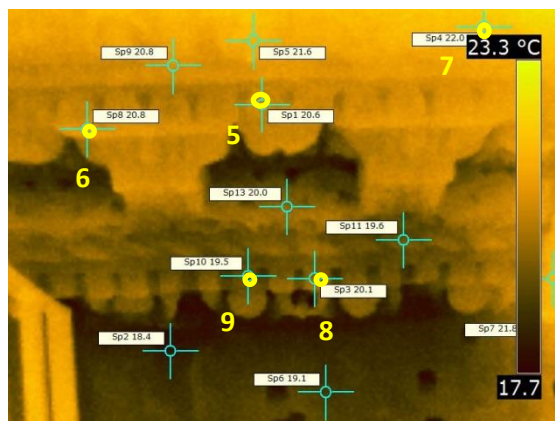
**Θερμογράφημα 31:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 31

Στην Εικόνα και στο **Θερμογράφημα 31** εξετάζεται το γείσο και η τοιχοποιία κάτω από αυτό. Η θερμοκρασία της επιφάνειας μεταβάλλεται μεταξύ 17,4 και 25,9°C. Στις επιφάνειες του γείσου 3 και 4 διακρίνεται θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης του 1°C. Η Επιφάνεια 3 εμφανίζει φαιόμαυρη απόχρωση και είναι θερμότερη, ενώ η 4 είναι ανοιχτόχρωμη. Στο Σημείο 3 εμφανίζεται λευκή επιφάνεια με θερμοκρασία 20°C. Η επιφάνεια αυτή είναι θερμότερη κατά 1°C από το υπόλοιπο τμήμα του λίθου. Επιπλέον ο αρμός στο Σημείο 4 έχει υψηλότερη θερμοκρασία, 21,9°C από το υπόλοιπο τμήμα του αρμού, που έχει θερμοκρασία 19,1°C. Συνεπώς στο σημείο αυτό μπορεί να έχει χρησιμοποιηθεί άλλο υλικό. Επιπλέον οι Επιφάνειες 5 και 6 αν και ανήκουν στον ίδιο λίθο παρουσιάζουν διαφορετική θερμοκρασία. Συγκεκριμένα η σκουρόχρωμη περιοχή του λίθου (Επιφάνεια 5) έχει υψηλότερη θερμοκρασία (περίπου 20°C) από την ανοιχτόχρωμη Επιφάνεια 6 (19°C).



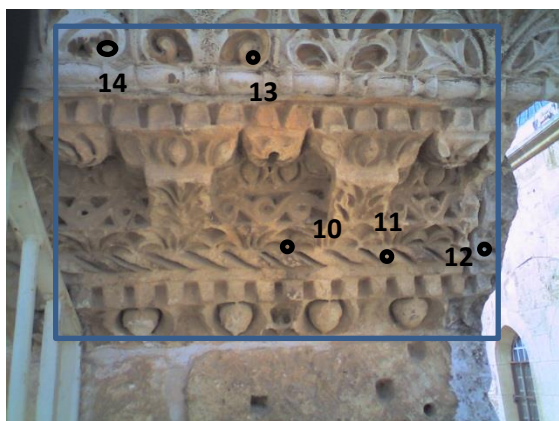


**Εικόνα 32:** Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.15, Θερμοκρασία: 22°C

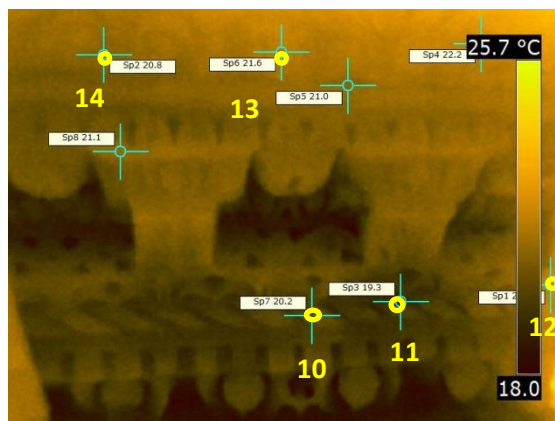


**Θερμογράφημα 32:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 32

Στο **Θερμογράφημα 32** εξετάζεται το γείσο και ένα τμήμα της τοιχοποιίας. Η θερμοκρασιακή διαβάθμιση κυμαίνεται μεταξύ 17,7 και 23,3°C. Στο Σημείο 5 της διακοσμητικής επιφάνειας εντοπίζεται η περιοχή πορτοκαλί χρωματισμού, η οποία έχει θερμοκρασία περίπου 21°C και δεν διαφέρει ιδιαίτερα σε σχέση με την τριγύρω περιοχή. Επίσης σε διαφορετικό σημείο της ανάγλυφης διακόσμησης (Σημείο 6) διακρίνεται θερμότερη περιοχή με μικρή, ωστόσο θερμοκρασιακή διαφορά. Υψηλότερη θερμοκρασία εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από το Σημείο 7 (22°C), όπου διακρίνεται λευκή περιοχή στην οποία έχουν αναπτυχθεί και μαύροι σχηματισμοί βιοδιάβρωσης. Τέλος, στα Σημεία 8 και 9 εντοπίζονται θερμοκρασιακές διαφορές της τάξης του 1°C. Η επιφάνεια του Σημείου 8 είναι θερμότερη και έχει μαύρη απόχρωση.



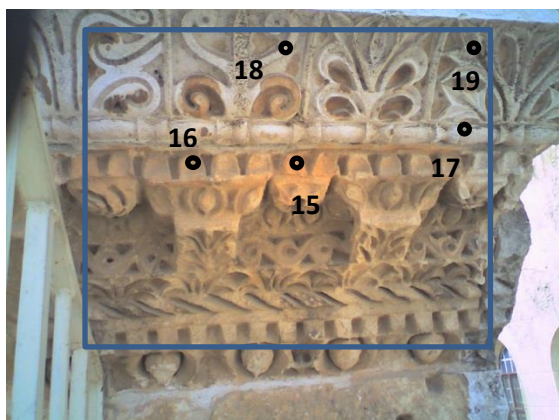
**Εικόνα 33:** Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.17, Θερμοκρασία: 22°C



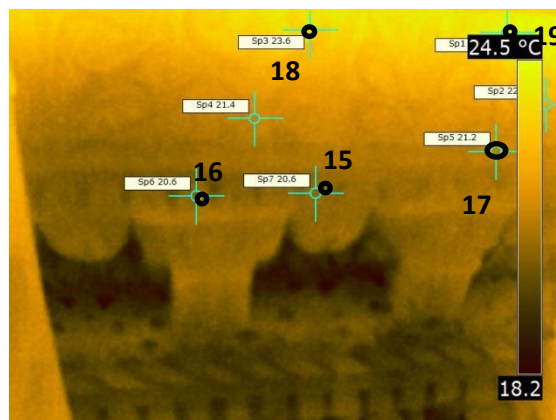
**Θερμογράφημα 33:** Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 33

Στο **Θερμογράφημα 33** μεταβάλλεται η θερμοκρασία μεταξύ 25,7 και 18°C. Στα Σημεία 10 και 11 διακρίνεται θερμοκρασιακή διαφορά 1°C. Στο Σημείο 10 είναι εμφανείς περιοχές μαύρης απόχρωσης και η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Επιπλέον στο δεξιό τμήμα της εικόνας (Σημείο 12) παρατηρείται λευκή αποπλυμένη περιοχή, καθώς και σκουρόχρωμοι σχηματισμοί βιοδιάβρωσης. Στο σημείο αυτό η θερμοκρασία είναι υψηλότερη, 22°C, σε σχέση με την παρακείμενη επιφάνεια. Στα Σημεία 13 και 14 ελέγχεται η θερμοκρασία σε όμοιες περιοχές, στην πρώτη

περίπτωση είναι εμφανής επιφάνεια με πορτοκαλί χροιά και στη δεύτερη διακρίνεται λευκή περιοχή. Η πορτοκαλί περιοχή έχει υψηλότερη θερμοκρασία, περίπου 21,6°C, συγκριτικά με τη λευκή επιφάνεια, 20,8°C.



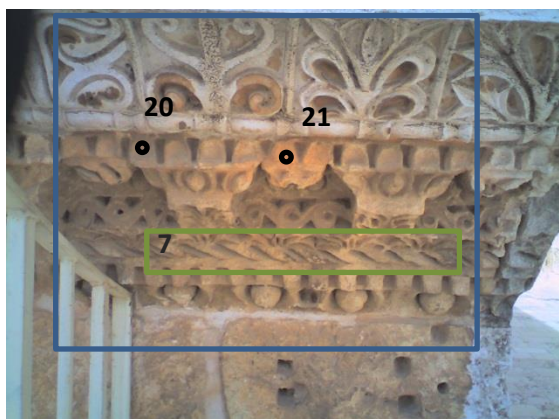
Εικόνα 34: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.18, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 34: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 34

Στο **Θερμογράφημα 34** το θερμοκρασιακό εύρος βρίσκεται μεταξύ 18,2 και 24,5°C. Θερμότερες είναι οι επιφάνειες που βρίσκονται στο ανώτερο τμήμα της εικόνας, όπως στα Σημεία 18 και 19 που πρόκειται για λευκές περιοχές που εμφανίζουν και μαύρους σχηματισμούς. Η υψηλή θερμοκρασία που παρουσιάζουν (περίπου 23°C) πιθανώς να οφείλεται και στην διαφορετική έκθεση που έχουν οι περιοχές αυτές στον ήλιο. Η επιφάνεια στο Σημείο 17 εμφανίζει ίδια χαρακτηριστικά με αυτά των Σημείων 18 και 19, ωστόσο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 2°C.

Παράλληλα στα Σημεία 15 και 16 εξετάζονται όμοιες περιοχές που διαφέρουν χρωματικά, καθώς στο σημείο 15 διακρίνεται πορτοκαλί απόχρωση, ενώ στο 16 καστανή. Παρόλα αυτά και τα δύο σημεία έχουν την ίδια θερμοκρασία.



Εικόνα 35: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.15, Θερμοκρασία: 22°C

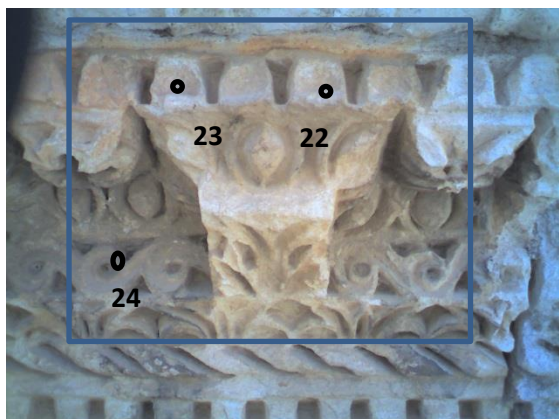


Θερμογράφημα 35: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 35

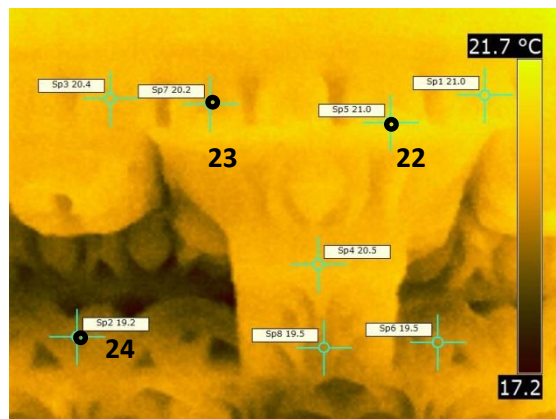
Στο **Θερμογράφημα 35** επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα από τις προηγούμενες μετρήσεις. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται μεταξύ 18 και 24,6°C. Η υψηλότερη θερμοκρασία εντοπίζεται στη λευκή επιφάνεια στην κορυφή του γείσου και κυμαίνεται από 22,7 έως 24,2°C. Οι φαιόμαυρες περιοχές και η πορτοκαλόχρωσα



επιφάνεια (Σημεία 20 και 21) στο προεξέχον ανάγλυφο έχουν θερμοκρασία περίπου 20,6°C. Χαμηλότερες είναι οι θερμοκρασίες στην Επιφάνεια 7, κυρίως εξαιτίας της διαφορετικής έκθεσης. Ωστόσο και σε αυτή παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές, καθώς οι σκουρόχρωμες επιφάνειες είναι θερμότερες.

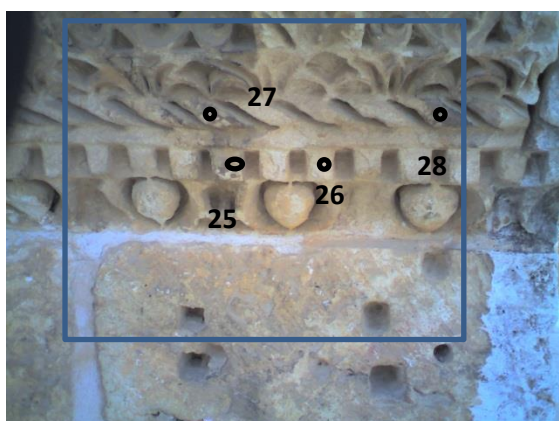


Εικόνα 36: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.14, Θερμοκρασία: 22°C

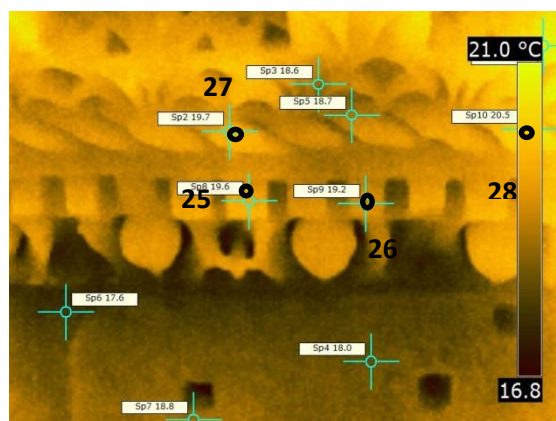


Θερμογράφημα 36: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 37

Στην Εικόνα και στο **Θερμογράφημα 36** εξετάζεται η ίδια επιφάνεια με την Εικόνα 35. Στην προεξέχουσα επιφάνεια παρατηρούνται λευκές περιοχές (π.χ. Σημείο 22) στις οποίες η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και φτάνει τους 21°C, δηλαδή διαφέρει κατά 1°C από την παρακείμενη επιφάνεια (Σημείο 23). Στο Σημείο 24 ελέγχεται η θερμοκρασία σε περιοχή που έχει φαιοκάστανη απόχρωση. Η θερμοκρασία εκεί είναι 19°C.

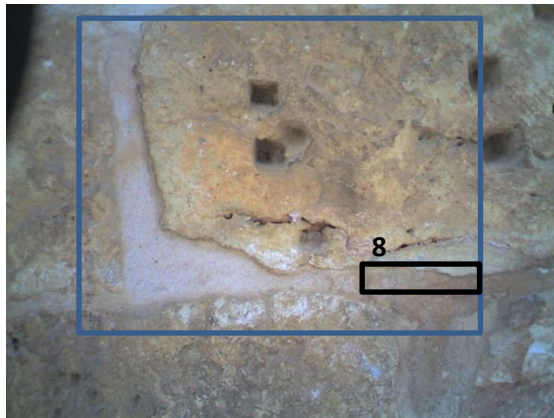


Εικόνα 37: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.13, Θερμοκρασία: 22°C

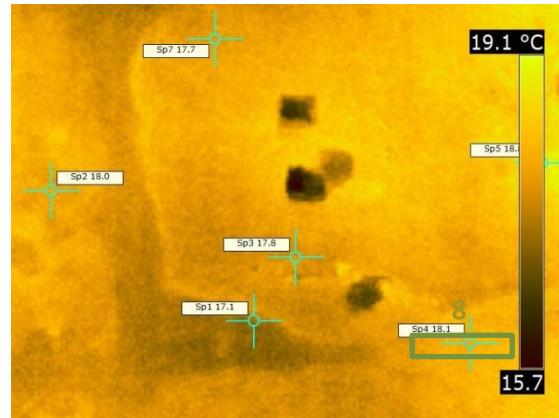


Θερμογράφημα 37: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 38

Στο **Θερμογράφημα 37** εξετάζονται λεπτομέρειες της διακοσμητικής επιφάνειας. Τα Σημεία 25 και 27 εμφανίζουν μαύρες περιοχές και έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία (πάνω από 19°C) σε σχέση με τις ανοιχτόχρωμες επιφάνειες του λίθου (όπως στο Σημείο 26). Ιδιαίτερα υψηλή είναι η θερμοκρασία στο Σημείο 28 (20,5°C), όπου και εκεί εμφανίζεται σκουρόχρωμη επιφάνεια. Επίσης στην τοιχοποιία κάτω από το γείσο, φαίνεται ότι ο αρμός έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το λίθο (17,6°C).

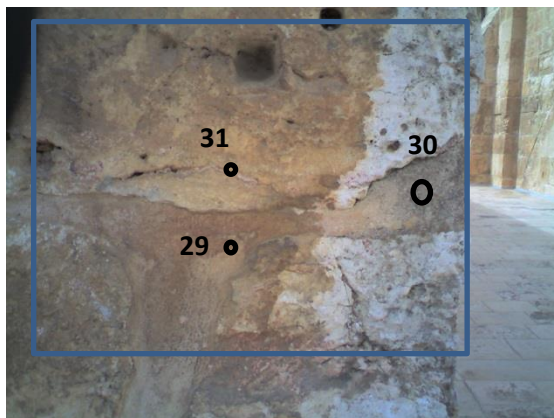


Εικόνα 38: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.10, Θερμοκρασία: 22°C

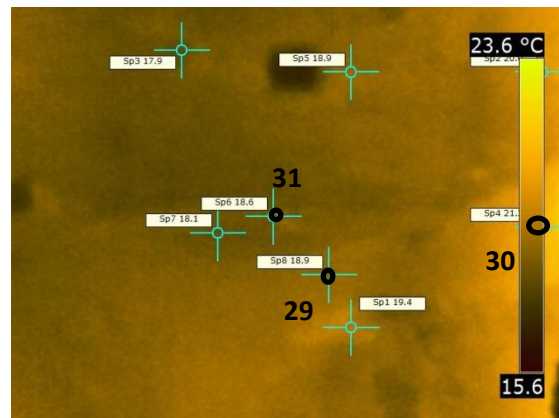


Θερμογράφημα 38: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 39

Στο **Θερμογράφημα 38** εξετάζεται η περιοχή των λίθων κάτω από τη διακοσμητική επιφάνεια. Η θερμοκρασία της περιοχής αυτή κυμαίνεται από 15,7 έως 19,1°C. Η χαμηλότερη θερμοκρασία εντοπίζεται στην περιοχή των αρμών (17°C). Ωστόσο στην Επιφάνεια 8 παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του αρμού στους 18°C, είναι προφανές ότι στο σημείο αυτό χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό υλικό. Επιπλέον στην περιοχή του λίθου διακρίνονται θερμότερες περιοχές στην επιφάνεια δεξιά με θερμοκρασία 18,8°C.



Εικόνα 39: Ανατολική όψη της πρόσοψης του Ιερού Ναού της Αναστάσεως. Ημερομηνία: 27.1.2011, Ώρα:13.11, Θερμοκρασία: 22°C



Θερμογράφημα 39: Θερμογράφημα που αντιστοιχεί στην περιοχή εντός του πλαισίου της Εικόνας 40

Τέλος, στην Εικόνα και στο **Θερμογράφημα 39** εξετάζεται, επίσης, η επιφάνεια κάτω από το γείσο. Στη ρωγμή δεξιά και αριστερά της σπής στο λίθο παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία (18,9°C) σε σχέση με την τριγύρω επιφάνεια. Το ίδιο ισχύει και για τα ρωγμή στο κάτω μέρος του λίθου (Σημείο 31). Η θερμοκρασία του αρμού στο Σημείο 29 είναι περίπου 19°C, ενώ στο Σημείο 30 είναι 21°C. Συνεπώς πρόκειται για διαφορετικά υλικά στα δύο αυτά σημεία. Τέλος, υψηλή θερμοκρασία, 20°C, παρουσιάζει και η λευκή περιοχή στο δεξί τμήμα της εικόνας.

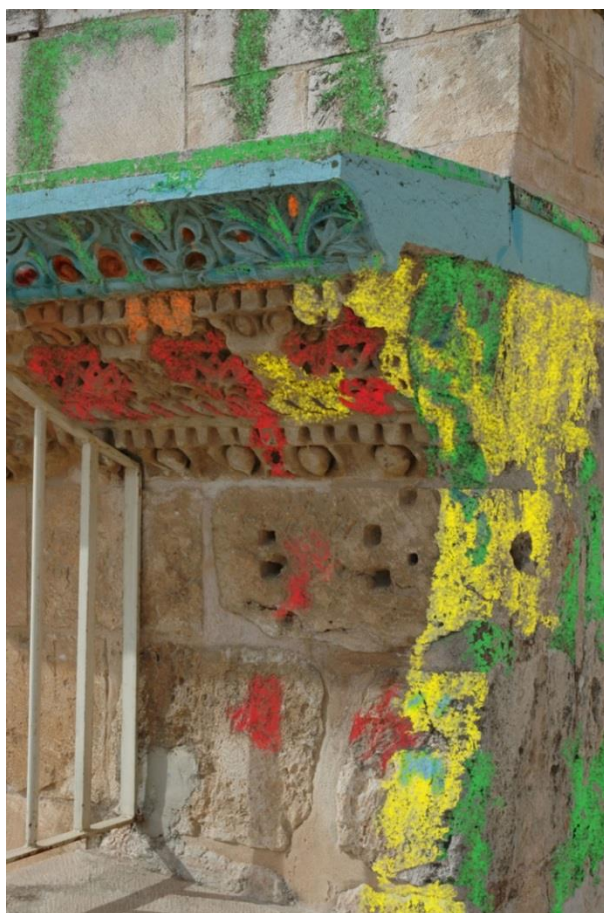
### **Μερικά Συμπεράσματα από τον έλεγχο του ανατολικού γείσου της πρόσοψης με τη Θερμογραφία Υπερύθρου**

Το ανατολικό γείσο της πρόσοψης αποτελεί επιφάνεια με χαρακτηριστικά είδη φθοράς τα οποία γίνονται αντιληπτά και με τη βοήθεια της Θερμογραφίας Υπερύθρου.

Οι λευκές περιοχές του γείσου εμφανίζονται κυρίως στα τμήματα του λίθου που είναι εκτεθειμένα στο νερό της βροχής, επομένως έχουν υποστεί απόπλυση. Ωστόσο λευκή απόχρωση έχει και το ανώτερο τμήμα του γείσου, που μπορεί να οφείλεται σε προσθήκη λευκής επίστρωσης. Στα σημεία αυτά έχουν αναπτυχθεί και μαύροι σχηματισμοί βιοδιάβρωσης. Οι λευκές περιοχές παρουσιάζουν υψηλή θερμοκρασία σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του λίθου. Σε προστατευμένες περιοχές από το νερό της βροχής εντοπίζονται φαιόμαυροι σχηματισμοί, που είναι μαύρες κρούστες. Οι επιφάνειες αυτές είναι θερμότερες σε σχέση με τα καστανά τμήματα του λίθου. Στο γείσο εντοπίστηκαν και τμήματα πορτοκαλί χροιάς τα οποία προέρχονται από επεμβάσεις προστασίας. Οι περιοχές πορτοκαλί πάτινας, ωστόσο, δεν παρουσιάζουν κάποια θερμοκρασιακή διαφορά συγκριτικά με τα παρακείμενα τμήματα του λίθου. Στο δεξί τμήμα του γείσου διακρίνεται λευκή επιφάνεια με μαύρους σχηματισμούς, οι οποίοι έχουν προκληθεί από βιολογική φθορά. Η επιφάνεια αυτή παρουσιάζεται θερμότερη από την υπόλοιπη επιφάνεια του λίθου. Τέλος, στην τοιχοποιία κάτω από το γείσο διαπιστώνεται διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ αρμών και λίθων, καθώς και χρήση διαφορετικών κονιαμάτων για την αρμολόγηση σε τμήματα της τοιχοποιίας.

Στην εικόνα που ακολουθεί πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση της φθοράς στο ανατολικό γείσο της πρόσοψης.





- Μαύρη κρούστα
- Βιολογική διάβρωση
- Αποπλυμένη επιφάνεια
- Πορτοκαλόχρα περιοχή
- Λευκή χρωματική επίστρωση (με μόλυβδο και τιτάνιο)

Εικόνα 4.8: Χαρτογράφηση της φθοράς στο ανατολικό γείσο της πρόσοψης



# ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

## 5. Τελικά Συμπεράσματα

Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως αποτελεί ένα μνημείο εξέχουσας θρησκευτικής, αρχιτεκτονικής και ιστορικής αξίας. Είναι ένα πολυπαθές κτίριο, όπου οι φυσικές και μη καταστροφές που έχει υποστεί (κατεδαφίσεις, πυρκαγιές, σεισμικές δονήσεις, βομβαρδισμοί κλπ.) αποτελούν τεκμήρια της μακραίωνης ιστορίας του. Ταυτόχρονα το ιδιόμορφο ιδιοκτησιακό καθεστώς που βρίσκεται σε ισχύ καθιστά δύσκολη τη συντήρηση και τη διαχείριση αυτού του μνημειακού συνόλου.

Καθώς η πρόσοψη του Ναού ανήκει σε όλες τις χριστιανικές κοινότητες, εξετάστηκε με τη μη καταστρεπτική μέθοδο της Θερμογραφίας Υπερύθρου, ενώ η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο ανατολικό γείσο παραπλεύρως, το οποίο βρίσκεται στην ιδιοκτησία του Ελληνορθόδοξου Πατριαρχείου. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων από την εργαστηριακή μελέτη και το μη καταστρεπτικό έλεγχο οδήγησε σε κάποια σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τους τύπους φθοράς και τα διαφορετικά υλικά που παρουσιάζονται στην πρόσοψη του Ναού.

### Ανατολικό γείσο

Από τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός του λίθου στο ανατολικό γείσο. Πρόκειται για πορώδη ασβεστόλιθο (ολικό ανοιχτό πορώδες ~16% και μέση ακτίνα πόρων ~1,4μm) με δολομιτικές προσμίξεις.

Με βάση τους τύπους φθοράς που εμφανίστηκαν κατά τον εργαστηριακό έλεγχο οι επιφάνειες στο ανατολικό γείσο μπορούν να διακριθούν σε αυτές που προστατεύονται από το βρόχινο νερό και σε αυτές που είναι εκτεθειμένες σε αυτό. Οι προστατευμένες επιφάνειες εμφανίζουν είτε τη μορφολογία μαύρης κρούστας, είτε περιοχές πορτοκαλοκάστανου χρωματισμού. Και στους δύο τύπους αυτούς εντοπίζεται επιφανειακή κρούστα γύψου με πάχος από 25 – 100 μm, κάτω από την οποία βρίσκεται στοιβάδα πυριτικού υλικού, το οποίο σε άλλα σημεία εισχωρεί σε βάθος (έως 100 μm) ανάμεσα στους κόκκους του ασβεστίτη, ενώ αλλού πληρώνει ρωγμές που υπάρχουν στο υγιές στρώμα του λίθου. Στις περιοχές αυτές ανιχνεύθηκαν οξαλικά, καθώς και ποσότητα σιδήρου. Το οξαλικό ασβέστιο προέρχεται από την γλυκερίνη μέσω της αφυδρογόνωσης του γλυκολικού οξέος. Η γλυκερίνη προστίθεται σε πυριτικά υλικά στερέωσης, για να τους προσδώσει ελαστικότητα. Επιπλέον, τα οξείδια του σιδήρου χρησιμοποιούνταν για να επιταχύνουν τη σκλήρυνση της πυριτικής γέλης. Παράλληλα, το οξαλικό ασβέστιο και τα οξείδια σιδήρου προσδίδουν στις πορτοκαλοκάστανες επιφάνειες αυτή τη

χαρακτηριστική απόχρωση. Συνεπώς, το πυριτικό αυτό υλικό ανήκει στην κατηγορία των αργιλοπυριτικών υλικών που εφαρμόζονταν σε μεγάλο βαθμό στο δεύτερο μισό του 19<sup>ου</sup> αιώνα για στερέωση και υδροφοβίωση των επιφανειών.

Οι περιοχές που είναι εκτεθειμένες στο νερό της βροχής αποπλένονται συστηματικά, ενώ λόγω της παρουσίας υγρασίας αναπτύσσεται σε ορισμένα σημεία και βιοδιάβρωση. Οι αποπλυμένες επιφάνειες παρουσιάζουν έντονο ανάγλυφο και έλλειψη συνοχής, ενώ εξαιτίας της διάλυσης της συνδετικής ύλης από το νερό αποκαλύπτονται οι κόκκοι του ασβεστίτη με λοβοειδή, κυβική και πολυγωνική μορφή. Στις επιφάνειες αυτές ανιχνεύτηκε κατά κύριο λόγο ασβεστίτης και κάποιες πυριτικές ενώσεις.

Στην περίπτωση της βιοδιάβρωσης συμβάλλουν διαφορετικοί μηχανισμοί στη φθορά του λίθου. Αρχικά προκαλείται αισθητική υποβάθμιση εξαιτίας της χρώσης των επιφανειών από βιολογικές χρωστικές. Επιπλέον, στις περιοχές αυτές παρατηρήθηκε η ανάπτυξη υφών και μυκηλίων που ασκούν τάσεις στο υλικό οδηγώντας στον κατακερματισμό του λίθου. Εξαιτίας των όξινων προϊόντων της μεταβολικής δράσης των μικροοργανισμών εμφανίζεται κατά τόπους και το φαινόμενο της βελονοειδούς βιοδιάβρωσης. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν καρπικές δομές και επικαθίσεις κόκκων σκόνης συνεκτικά προσκολλημένων στην επιφάνεια του λίθου μέσω κυτταρικών υπολειμμάτων μύκητα (pollen grains). Στις επιφάνειες βιοδιάβρωσης παρατηρήθηκε αυξημένη παρουσία πυριτίου και σιδήρου, η οποία πιθανώς οφείλεται στη βιογενή παραγωγή τους.

Σε τμήματα των περιοχών, που είναι εκτεθειμένες στο νερό της βροχής, διαπιστώθηκε η εφαρμογή λευκής χρωματικής επίστρωσης από τιτάνιο και μόλυβδο, είτε για λόγους αντιβακτηριδιακής δράσης, είτε σαν δοκιμή, για να αποδοθεί το λευκό χρώμα του λίθου.

### Νότια όψη

Η φθορά που παρατηρήθηκε στην πρόσοψη του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως οφείλεται σε συνέργεια ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Οι ενδογενείς παράγοντες που συνέβαλλαν στη φθορά της νότιας όψης είναι:

- οι στυλόλιθοι, οι οποίοι εντοπίστηκαν σε λίθους της νότιας όψης του Ναού. Τα αργιλοπυριτικά ή άλλα υλικά, από τα οποία πληρούνται οι στυλόλιθοι, παρασύρονται από το νερό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά στο λίθο. Η φθορά εντείνεται εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησης των λίθων στην τοιχοποιία, καθώς με την τοποθέτηση των λίθων σε διαφορετική διεύθυνση από αυτή των στρώσεων τους, οδηγείται ο λίθος σε αστοχία.
- το πορώδες, το οποίο σε συνδυασμό με την υγρασία οδηγεί στην εξάνθιση και κρυπτο-εξάνθιση αλάτων, φθορά που συνεπάγεται την απώλεια υλικού.

Οι εξωγενείς παράγοντες είναι οι περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν. Σε αυτούς συγκαταλέγονται:

- οι κύκλοι ύγρανσης – ψύξης (εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών της Ιερουσαλήμ), που σε συνδυασμό με το πορώδες οδηγούν σταδιακά στην απομείωση των μηχανικών αντοχών των υλικών.
- οι έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές, που προκαλούν συστολοδιαστολές και κατ' επέκταση ρωγμές στα υλικά.
- οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, οι οποίοι προξενούν χρωματικές αλλοιώσεις στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μαύρων κρουστών.
- το νερό της βροχής. Οι επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες στο βρόχινο νερό αποπλένονται και ως εκ τούτου απαλείφονται οι λεπτομέρειες.
- η βιοδιάβρωση, η οποία αποτελεί επίσης ένα σοβαρό παράγοντα υποβάθμισης των λίθων τόσο από αισθητικής, όσο και από μηχανικής άποψης.
- τα σωματίδια σκόνης. Ο νοτιοανατολικός άνεμος μεταφέρει σωματίδια σκόνης από τη γειτονική έρημο της Ιουδαίας τα οποία προκαλούν φθορά εξαιτίας της εκτριβής στους λίθους, καθώς επίσης επικάθονται στις επιφάνειες του κτιρίου προσδίδοντας στην επιφάνεια αυτή τη χαρακτηριστική καστανή χροιά.
- η παρουσία των πτηνών. Επιβλαβή είναι και τα όξινα κατάλοιπα των πτηνών στην επιφάνεια της πρόσοψης.

Επιπρόσθετά ελήφθησαν σημαντικές πληροφορίες για επεμβάσεις-αντικαταστάσεις λίθων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν και για τις οποίες δεν υπάρχει καμία αναφορά στη βιβλιογραφία. Διαπιστώθηκε ότι σε μερικά σημεία της πρόσοψης χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσθήκες ασύμβατοι λίθοι, καθώς και ασύμβατα κονιάματα αρμολόγησης και συμπλήρωσης λίθων.

### Προοπτικές

Προκειμένου να αποκτήσουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση της νότιας όψης του Ναού της Αναστάσεως, πρέπει να διεξαχθούν κάποιες επιπλέον μετρήσεις. Επομένως:

- Χρειάζεται να πραγματοποιηθεί αποτύπωση της πρόσοψης και πλήρης χαρτογράφηση των δομικών υλικών και των τύπων φθοράς με τη χρήση σύγχρονων φωτογραμμετρικών μέσων, όπως το Laser Scanner σε συνδυασμό με μία ολοκληρωμένη διαγνωστική μελέτη των δομικών υλικών και της φθοράς της πρόσοψης.
- Είναι αναγκαία η μελέτη της ακριβούς χημικής σύστασης του πυριτικού υλικού με Φασματοσκοπία Raman.

- Απαραίτητη είναι και η διερεύνηση και ο χαρακτηρισμός των μικροοργανισμών, που έχουν αναπτυχθεί στην επιφάνεια.



## Βιβλιογραφία

1. **A. Moropoulou, K. Bisbikou, K. Torfs, R. Van Grieken, F. Zezza, F. Macri.** Oring and Growth of Weathering Crusts on Ancient Marbles in Industrial Atmosphere. *Atmospheric Environment*. Pergamon, 1998, 32.
2. **Jorge Sanjurjo-Sánchez, Carlos Alves.** Pollutant-Induced Decay of Building Materials. [συγγρ. βιβλίου] E. Lichtfouse et al. *Remediation of Air and Water Pollution*. s.l. : Springer, 2012.
3. **Antonia Moropoulou, Kyriakos Labropoulos, Agoritsa Konstanti, Konstantinos Roumpopoulos, Asterios Bakolas, Prodromos Michailidis.** Susceptibility of buiding stones to environmental loads: Evaluation, performance, repair strategies. [συγγρ. βιβλίου] S.K. Kourkoulis. *Fracture and Failure of Natural Building Stones*. s.l. : Springer, 2006.
4. **Roberto Buginia, Marisa Laurenzi Tabassob, Marco Realinia.** Rate of formation of black crusts on marble. A case study. *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier, 2000, 1.
5. **Ákos Török, Tobias Licha, Klaus Simon, Siegfried Siegesmund.** Urban and rural limestone weathering; the contribution of dust to black crust formation. *Environ Earth Sci*. Springer, 2011.
6. **Ruwim Berkowitz, Finn Palmgren, Ole Hertel, Elisabetta Vignati.** Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality - meterological analysis and model calculations. *The Science of the Total Environment*. Elsevier, 1996, 189.
7. **Nicolas L Gilberta, Sandy Woodhouse, David M. Stieb, Jeffrey R. Brook.** Ambient nitrogen dioxide and distance from a major highway. *Science of The Total Environment*. Elsevier, 2003, 312.
8. **Olga V. Taseiko, Sergey V. Mikhailuta, Anne Pitt, Anatoly A. Lezhenin, Yuri V. Zakharov.** Air pollution dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment*. Elsevier, 2009, 43.
9. **Cristina Gentilini, Elisa Franzoni, Simone Bandini, Lucio Nobile.** Effect of salt crystallisation on the shear behaviour of masonry walls: An experimental study. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2012, 37.
10. **Dario Camuffo, Marco Del Monte, Cristina Sabbioni, Ottavio Vittori.** Wetting deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmospheric Environment*. Pergamon Press, 1981, 16.
11. **A. Moropoulou, E.T. Delegou, V. Vlahakis, E. Karaviti.** Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces. *Materials Characterization*. 2007, 58.
12. **Th. Warscheid, J. Braams.** Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Elsevier, 2000, 46.

13. **G. Amoroso, V. Fassina.** Wet and dry deposition of air pollutants on stone and the formation of black scabs. *Stone decay and conservation* . Elsevier, 1983.
14. **P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou.** Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces. *NDT & E International*. Elsevier, 2007, 40.
15. **P. Maravelaki-Kalaitzaki, D. Anglos, V. Kilikoglou, V. Zafirooulos.** Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*. Elsevier, 2001, 56.
16. **Sabbioni, Cristina.** Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers. *The Science of the Total Environment*. Elsevier, 1995, 167.
17. **Maravelaki-Kalaitzaki, P.** Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin. *Analytica Chimica Acta*. Elsevier, 2005, 58.
18. **Theodor Skoulikidis, Panayota Vassiliou, Katerina Tsakona.** Surface Consolidation of Pentelic Marble. Criteria for the selection of methods and materials. The Acropolis case. *Environ Sci & Pollut Res*. Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2005, 12.
19. **Nahon, D.B.** *Introduction to the petrology of soils and chemical weathering*. New York : John Wiley, 1991.
20. **Verges-Belmin, V.** Pseudomorphism of gypsum after calcite, a new textural feature accounting for the marble sulfation mechanism. *Atmospheric Environment*. Pergamon, 1994, 28.
21. **Patriarchate, Conservation Department Israel Antiquities Authority and The Technical Office Greek Orthodox.** *Conservation of the bell tower of the Holy Sepulchre Jerusalem-Final Report*. Jerusalem : s.n., 2001 - 2003.
22. **C. Sabbioni, G. Zappia.** Oxalate patinas on ancient monuments: the biological hypothesis. *Aerobiologia*. Springer, 1991, 7.
23. **Fassina, Vasco.** New findings on past treatments carried out on stone and marble monuments' surfaces. *Science of The Total Environment*. Elsevier, 1995, 167.
24. **M. Garcia-Vallès, M. Vendrell-Saz, J. Molera, F. Blazquez.** Interaction of rock and atmosphere: patinas on Mediterranean monuments. *Environmental Geology*. Springer, 1998, 36.
25. **Avinoam Danin, Giulia Caneva.** Deterioration of Limestone Walls in Jerusalem and Marble Monuments in Rome Caused by Cyanobacteria and Cyanophilous Lichens. *International Biodeterioration*. Elsevier, 1990, 20.

26. **Jesus Martín-Gil, Francisco Javier Martín-Gil, Maria del Carmen Ramos-Sánchez, Pablo Martín-Ramos.** The Orange-Brown Patina of Salisbury Cathedral (West Porch) Surfaces: Evidence of its Man-Made Origin. *Environ Sci & Pollut Res.* 2005, 12.
27. **A. Moropoulou, Th. Tsiourva, K. Bisbikou, V. Tsantila, G. Biscontin, G. Longega, M. Groggia, E. Dalaklis, A. Petritaki.** Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the center of Athens. *Building and Environment.* Pergamon, 2002, 37.
28. **Michael Steiger, A. Elena Charola.** Weathering and Deterioration. [συγγρ. βιβλίου] Rolf Snethlage Siegfried Siegesmund. *Stone in Architecture.* s.l. : Springer, 2011.
29. **M.A. de la Torre, G. Gomez-Alarcon, P. Melgarejo, C. Saiz-Jimenez.** Fungi in weathered sandstone from Salamanca cathedral, Spain. *The Science of the Total Environment.* Elsevier, 1991, 107.
30. **M.A. de la Torre, G. Gomez - Alarcon, C. Vizcaino, M.T. Garcia.** Biochemical mechanisms of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. *Biogeochemistry.* Kluwer Academic Publishers, 1993, 19.
31. **Christine C. Gaylard, L.H. Glyn Morton.** Deteriogenic Biofilms on Buildings and their Control: a Review. *Biofouling.* Taylor & Francis, 1999, 14.
32. **E. Diakumaku, A.A. Gorbushina, W.E. Krumbein, L. Panina, S. Soukharjevski.** Black fungi in marble and limestones - an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments. *The Science of the Total Environment.* Elsevier, 1995, 167.
33. **Parisa Mohammadi, Wolfgang E. Krumbein.** Biodeterioration of ancient stone materials from the Persepolis monuments (Iran). *Aerobiologia.* Springer, 2008, 24.
34. **J. J. Ortega-Calvo, M. Hernandez-Marine, C. Saiz-Jimenez.** Biodeterioration of Building Materials by Cyanobacteria and Algae. *International Biodeterioration.* Elsevier, 1991, 28.
35. **C. Gaylarde, M. Ribas Silva, Th. Warscheid.** Microbial impact on building materials: an overview. *Materials and Structures.* Rilem, 2003, 36.
36. **Kyriakos C. Labropoulos, Nikolaos Katsiotis, Evangelia Xinopoulou, Aikaterini T. Delegou, Asterios Bakolas, Antonia Moropoulou.** Diagnostic Study at the Acropolis of Sarantapicho and the Acropolis of Erimokastro, Rhodes. *Proceedings of MONUBASIN.* 2010.
37. **M.R.D. Seaward, C. Giacobini, M.R. Giuliani, A. Roccardi,.** The role of lichens in the biodeterioration of ancient monuments with particular reference to central Italy. *International Biodeterioration.* Elsevier, 1989, 25.
38. **A. A. Gorbushina, W. E. Krumbein, C. H. Hamman, L. Panina, S. Soukharjevski, U. Wollenzien.** Role of black fungi in color change and biodeterioration of antique marbles. *Ceomicrobiology Journal.* Taylor & Francis, 1993, 11.

39. **J. Mandl, A. Grauer, G. Neuberg.** Solubilization of insoluble matter in nature. II. The part played by salts of organic and inorganic acids occurring in nature. *Biochemica et Biophysica Acta*. Elsevier, 1953, 10.
40. **P. S. Griffin, N. Indictor, R. J. Koestler.** The Biodeterioration of Stone: a Review of Deterioration Mechanisms, Conservation Case Histories, and Treatment. *International Biodeterioration*. Elsevier, 1991, 28.
41. **T.W. Becker, W.E. Krumbein, Th. Warscheid, M.A. Resende.** Investigations into Microbiology. [συγγρ. βιβλίου] H.K. Bianchi. *Investigations into devices against Environmental Attack on Stones*. 1994.
42. **Keller, W.D.** *Principles of Chemical Weathering*. Columbia, Missouri : Lucas Brothers Publishers, 1957.
43. **E.B. Sohalscha, H. Appelt, A. Schatz.** Chelation as a weathering mechanism—I. Effect of complexing agents on the solubilization of iron from minerals and granodiorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Elsevier, 1967, 31.
44. **Maira E.K. Henderson, R.B. Duff.** The release of metallic and silicate ions from minerals, rocks and soils by fungal activity. *Journal of Soil Science*. Wiley, 1963, 14.
45. **M.A. de la Torre, G. Gomez-Alarcon.** Manganese and iron oxidation by fungi isolated from building stone. *Microbial Ecology*. Springer, 1994, 27.
46. **W.G. Characklis, K.E. Cooksey.** Biofilm and microbial fouling. [συγγρ. βιβλίου] Allen I. Laskin. *Advances in applied microbiology*. New York : Academic Press, 1983.
47. **E. Zanardini, P. Abbruscato, L. Scaramelli, E. Onelli, M. Realini, G. Patrignani, C. Sorlini.** Red stains on carrara marble: A case study of the Certosa of Pavia, Italy. [συγγρ. βιβλίου] Victoria H. Koestler, A. Elena Charola, Fernando E. Nieto-Fernandez Robert J. Koestler. *Art, Biology, and Conservation: Biodeterioration of Works of Art*. New York : The Metropolitan Museum of Art, 2003.
48. **Houghton, D.D.** *Handbook of Applied Meteorology*. s.l. : John Wiley, 1985.
49. **Alpert, P.** *The Uniqueness of the Jerusalem Climate*. USA : Bulletin of the American Meteorological Society, 1991.
50. **M. Luria, T. David, M. Peleg.** Five year air quality trends in Jerusalem, Israel. *Atmospheric Environment* . Pergamon, 1985, 19.
51. **Danin, Avinoam.** Weathering of limestone in Jerusalem by cyanobacteria. *Z. Geromorph.* 1983, 27.
52. <http://www.climatemps.com/>. *climatemps.com*. [Ηλεκτρονικό] 2012 - 2013. <http://www.jerusalem.climatemps.com>.
53. <http://www.02ws.co.il/station.php?lang=0>. *Jerusalem Weather Forecast Station*. [Ηλεκτρονικό] 2012 - 2013. <http://www.02ws.co.il/station.php?lang=0>.



54. **M. Luria, H. Almog, M. Peleg.** Transport and transformation of air pollutants from Israel's coastal area. *Atmospheric Environment*. Pergamon, 1984, 18.
55. **M. Luria, Z. Vinig, M. Peleg.** The Contribution of City Buses to Urban Air Pollution in Jerusalem, Israel. *Journal of the Air Pollution Control Association*. Taylor & Francis, 1984, 34.
56. **Επιστημονικός Υπεύθυνος: Α. Μοροπούλου, Κύριος Ερευνητής: Α. Μπακόλας, Ερευνητική Ομάδα: Α. Δελέγκου, Μ. Καρόγλου, Κ. Λαμπρόπουλος, Ν. Κασιώτης, Ε. Ξυνοπούλου, Κ. Γερομήτσου, Δ. Διαμαντίδου, Ε. Παπαφλωράτου.** Σύνοψη προκαταρκτικής διάγνωστικής μελέτης στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2011. σσ. 1-28.
57. **M. Peleg, E. Burla, I. Cohen, M. Luria.** Deterioration of Jerusalem limestone from air pollutants; field observations and laboratory simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*. Kluwer Academic Publishers, 1989, 12.
58. **Andrea Fiaschi, Luca Matassoni, Giovanni Pratesi, Carlo Alberto Garzonio, Piergiorgio Malesani.** Microtremor analysis of the Basilica of the Holy Sepulchre, Jerusalem. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Elsevier, 2012, 41.
59. **Claudia Migowski, Amotz Agnon, Revital Bookman, Joerg F.W. Negendank, Mordechai Stein.** Recurrence pattern of Holocene earthquakes along the Dead Sea transform revealed by varve-counting and radiocarbon dating of lacustrine sediments. *Earth and Planetary Science Letters*. Elsevier, 2004, 222.
60. **Avigdor Rutenberg, Robert Levy.** *Some Comments on Seismicity in Israel, Performance Assessment & Damage to Historic Monuments in Jerusalem*. Haifa, Israel : Technion-Israel Institute of Technology.
61. **Amos Salamon, Oded Katz, Onn Crouvi.** Zones of required investigation for earthquake-related hazards in Jerusalem. *Natural Hazards*. Springer, 2010, 53.
62. *Πρότυπο EN 12670: 2001 (E).*
63. **Katsman, Regina.** Extensional veins induced by self-similar dissolution at stylolites: analytical modeling. *Earth and Planetary Science Letters*. Elsevier, 2010, 299.
64. **Kyriakos Labropoulos, Antonia Moropoulou.** Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2013, 47.
65. **D. Balodimos, G. Lavvas, A. Georgopoulos.** *Wholly Documenting Holy Monuments*. s.l. : Commission V, WG V/5.
66. **Λάββας, Γ.Π.** Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα. Η πρώτη οικοδομική φάση επί Κωνσταντίνου του Μεγάλου. *Corpus*. 2004, 60.
67. **Γερομήτσου, Αικατερίνη.** *Μεταπτυχιακή Εργασία: Αρχιτεκτονική του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα και Επεμβάσεις σε Σχέση με το Ειδικό Καθεστώς Διαχείρισης*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2011. σσ. 37, 49, 76, 156, 170, 171.

68. **Λάββας, Γεώργιος Π.** *Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα*. Αθήνα : Ακαδημία Αθηνών, 2009. σσ. 86-114.
69. **Grenville, G.S.P. Freeman** -. The basilica of the Holy Sepulchre, Jerusalem: History and Future. *Journal of the Royal Asiatic Society*. Cambridge Journals, 1987, 119.
70. **Ousterhout, Robert**. The Temple, the Sepulchre and the Martyrion of the Savior. *Gesta*. The University of Chicago Press and International Center of Medieval Art, 1990, 29.
71. **Foss, Clive**. The Persians in the Roman Near East (602–630 AD). *Journal of the Royal Asiatic Society of Great Britain & Ireland*. Cambridge Journals, 2003, 13.
72. **Jonathan Riley-Smith, Jonathan Simon Christopher**. *The Crusades: A History*. New York : Jonathan Riley-Smith, 2005.
73. **Λάββας, Γεώργιος Π.** *Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα*. Αθήνα : Καπόν, 2009. σσ. 34-40.
74. **Μπαλοδήμος, Διονύσιος-Δημήτριος**. Γεωμετρική και Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα. [συγγρ. βιβλίου] Γεώργιος Π. Λάββας. *Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα*. Αθήνα : Καπόν, 2009, σ. 157.
75. Weather Underground. <http://www.wunderground.com>. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.wunderground.com/history/airport/LLBG/2011/1/28/DailyHistory.html?req\\_city=NA&req\\_state=NA&req\\_statename=NA](http://www.wunderground.com/history/airport/LLBG/2011/1/28/DailyHistory.html?req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA).
76. **Μοροπούλου, Αντωνία**. *Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2012.
77. **Antonia Moropoulou, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas**. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2013.
78. **Μοροπούλου, Αντωνία**. *Έλεγχος ποιότητας δομικών υλικών και έργων*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2012.
79. **N.P.Avdelidis, A. Moropoulou**. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier, 2004, 5.
80. Flir Systems. B\_200 Datasheet. <http://www.flir.com>. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography\\_APAC/Products/Product\\_Literture/B200\\_Datasheet%20TW.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/B200_Datasheet%20TW.pdf).
81. **Πετροπούλου, Μαρία Όξενκιουν** -. *Φασματομετρικές Μέθοδοι*. Αθήνα : Συμμετρία, 2008.
82. **Επιστημονικός Υπεύθυνος: Α. Μοροπούλου, Κύριος Ερευνητής: Α. Μπακόλας, Ερευνητική Ομάδα: Α. Δελέγκου, Μ. Καρόγλου, Κ. Λαμπρόπουλος, Ν. Κασιώτης, Ε.**

**Ξυνοπούλου, Κ. Γερομήτσου, Δ. Διαμαντίδου, Ε. Παπαφλωράτου.** Σύνοψη προκαταρκτικής διάγνωστικής μελέτης στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως. Αθήνα : s.n., 2011.

83. **Peter J. Goodhew, John Humphreys, Richard Beanland.** *Electron Microscopy and Analysis*. New York : Taylor & Francis, 2001.

84. **Christos G. Kontoyannis, Nikos V. Vagenas.** Calcium carbonate phase analysis using XRD and FT-Raman spectroscopy. *The Analyst Full Paper*. 1999.

85. **P. Engler, M.W. Santana, M.L. Mittleman, D. Balazs.** Non - isothermal, in situ XRD analysis of dolomite decomposition. *Thermochimica Acta* . Elsevier, 1989, 140.

86. **Frank R. Feret, Daniel Roy.** Determination of quartz in bauxite by a combined X-ray diffraction and X-ray fluorescence method . *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. Elsevier, 2002, 57.

87. **Ελένη Σ. Παπαφλωράτου, Επιβλέπων Λεκτ. Α. Μπακόλας.** Χαρακτηρισμός και διάγνωση φθοράς των δομικών υλικών του Πανιέρου Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα, Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα : s.n., 2011.

88. **Sudhir K. Jain, Abdul Arif Khan, Mahendra K. Rai.** *Geomicrobiology*. USA : CRC Press, 2010.

89. **Bennett., F.K. Hiebert and P.C.** Microbial control of silicate weathering in organic-rich ground water. *Science*. 1992, 258.

90. **M. Feldmann, J. Neher, W. Jung, and F. Graf.** Fungal quartz weathering and iron crystallite formation in an Alpine environment, Piz Alv, Switzerland. *Ecologiae Geol Helv*. 1997, 90.

91. **Urrutia, K.O. Konhauser and M.M.** Bacterial clay authigenesis: A common biogeochemical process. *Chem Geol*. 1991, 161.

92. **Katja Hühnerfuß, Alex von Bohlen, Dieter Kurth.** Characterization of pigments and colors used in ancient Egyptian boat models. *Spectrochimica Acta Part B*. Elsevier, 2006, 61.

93. **P. Maravelaki-Kalaitzaki, V. Zafirooulos, C. Fotakis.** Excimer laser cleaning of encrustation on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects. *Aplied Surface Science*. Elsevier, 1999, 148.

94. **Maravelaki-Kalaitzaki, P.** Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin. *Analytica chimica acta*. Elsevier, 2005, 532.

95. **Schroeder, P.A.** Infrared Spectroscopy in clay science: In CMS Workshop Lectures. [συγγρ. βιβλίου] A. Rule and S. Guggenheim. *Teaching Clay Science*. s.l. : Aurora, 2002.

96. **R. Arbizzani, U. Casellato, E. Fiorin, L. Nodari, U. Russo, P.A.Vigato.** Decay markers for the preventative conservation and maintenance of paintings. *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier, 2004, 5.

97. **P. Maravelaki-Kalaitzaki, N. Kallithrakas-Kontos.** Pigment and terracotta analyses of Hellenistic figurines in Crete. *Analytica Chimica Acta*. Elsevier, 2003.
98. **D. Bikiaris, Sister Daniilia, S. Sotiropoulou, O. Katsimbiri, E. Pavlidou, A.P. Moutsatsou, Y. Chrissoulakis.** Ochre-differentiation through micro-Raman and micro-FTIR spectroscopies: application on wall paintings at Meteora and Mount Athos, Greece. *Spectrochimica Acta Part A*. Elsevier, 1999, 56.
99. **Madejova, J.** FTIR techniques in clay mineral studies (Review). *Vibrational Spectroscopy*. Elsevier, 2002.
100. **Farmer, V.C.** *The Infrared Spectra of Minerals*. London : Mineralogical Society, 1974.