ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ
265 00 ΠΑΤΡΑ

UNIVERSITY OF PATRAS
SCHOOL OF NATURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOLOGY
SECTION OF EARTH MATERIALS
265 00 PATRAS – GREECE

"Ορυκτοπετρογραφική Μελέτη των Λίθινων Μνημείων του Αρχαιολογικού Χώρου της Ελευσίνας : Ταυτοποίηση των Λιθοτύπων κα Διερεύνηση των Αιτιών Διάβρωσής τους"

ΡΟΥΣΣΟΥ ΙΩΑΝΝΑ

Α.Μ. 08119

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή …….σελ. 5-6

1. Γεωλογικά Χαρακτηριστικά ……..σελ. 7

1.1 Γενικά ……σελ.7

1.2 Υποπελαγονική Ζώνη……..σελ.7

1.3 Γεωλογία Αττικής ……...σελ. 7-10

1.4 Τεκτονική Γεωλογία Αττικής ……...σελ. 10

1.5 Λιθοστρωματογραφία Ανώτερου Τμήματος Υποπελαγονικής Ζώνης .σελ. 10-11

2. Παράγοντες Διάβρωσης Δομικών Λίθων Μνημείων ……σελ. 12

2.1 Γενικά ……σελ. 12

2.2 Διαβρωσιγενείς Διεργασίες……. σελ.12

2.3 Αποσαθρωτικές Διεργασίες ……..σελ.13-16

2.4 Ατμοσφαιρική Ρύπανση Και Ρυπαντές ……σελ.17

2.4.1 Διοξείδιο του Θείου (SO_2) ……..σελ. 17-18

2.4.2 Οξείδια του Αζώτου (NO_x) ……σελ.18

2.4.3 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2) ……σελ.19

2.4.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)……. σελ.19

2.4.5 Οργανικά Πτητικά Συστατικά (VOC) ……..σελ.19

2.4.6 Χλωροφθοράνθρακες (CFC) ……σελ.20

2.4.7 Όζον (O_3) ……..σελ.20

2.4.8 Μόλυβδος (Pb) ……σελ.20

2.4.9 Αιωρούμενα Σωματίδια (PM) ……...σελ.21

2.5 Είδη Φθορών Μαρμάρων – Ασβεστόλιθων ……σελ.21-23

3. Μέθοδοι Ανάλυσης……. σελ.24

3.1 Γενικά ……..σελ.24

3.2 Δειγματοληψία ……σελ.24

3.3 Σαρωτικό Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο (SEM) …….……σελ.25-31

3.4 Περιθλασιμετρία Ακτίνων-Χ (XRD) ……..σελ.31-35

3.5 Οπτικό Μικροσκόπιο ……..σελ.36-41

4. Περιγραφή Του Αρχαιολογικού Χώρου ……σελ.42-45

5. Πετρογραφία Δομικών Λίθων …….σελ.46

5.1 Μακροσκοπική Περιγραφή…… σελ.46

5.1.1 Ακτίτης Λίθος ……σελ.46-48

5.1.2 Ωολιθικός Ασβεστόλιθος ……...σελ.48-50

5.1.3 Ελευσινιακός Ασβεστόλιθος …….σελ.50-52

5.1.4 Μάρμαρο Πεντέλης ……...σελ.52-53

5.1.5 Μάρμαρο Υμηττού ……...σελ.53-54

5.1.6 Δολομιτικό Μάρμαρο ……σελ.54

5.1.7 Ασβεστόλιθος…….. σελ.54

5.1.8 Κεραμικά ……σελ.55

5.1.9 Ανδεσίτης ……...σελ.55-56

5.1.10 Ωμοί Πλίνθοι ……σελ.56

5.2 Μικροσκοπική Περιγραφή ……σελ.57

5.2.1 Ακτίτης Λίθος…….... σελ.57-61

5.2.2 Ωολιθικός Ασβεστόλιθος…….. σελ.61-63

5.2.3 Ελευσινιακός Ασβεστόλιθος …….σελ.64-67

5.2.4 Μάρμαρο Πεντέλης ……...σελ.67-68

5.2.5 Μάρμαρο Υμηττού…….. σελ.69-70

5.2.6 Δολομιτικό Μάρμαρο ……..……σελ.70-72

5.2.7 Ασβεστόλιθος ……...σελ.72-74

6. Μικροανάλυση…….……...σελ.75

6.1 Ανθρακικά Ορυκτά ……..σελ.75-80

6.2 Μαρμαρυγίες ……..….σελ.81-83

6.3 Άστριοι……..… σελ.84-85

6.4 Πυρόξενοι ……..…...σελ.86-87

6.5 Χλωρίτες……..…. σελ.88-89

6.6 Επίδοτο ……....σελ.90-91

7. Ακτινογραφική Μελέτη (XRD) ……....σελ.92-104

8. Περιγραφή των Φθορών ……. σελ.105-107

8.1 Μακροσκοπική Περιγραφή των Φθορών……... σελ.107-115

8.2 Μικροσκοπική Περιγραφή των Φθορών …….……σελ.116

8.2.1 Χρωματικές Αλλοιώσεις ……..……...σελ.116-128

8.2.2 Αλλοιώσεις βάση Μορφολογίας και Μικροδομής…….. σελ.128-130

8.2.3 Αντικείμενα ……...σελ.131

8.2.4 Ρήγμα…… …σελ.131-133

9. Συζητήσεις- Συμπεράσματα ……..σελ.134-136

Βιβλιογραφία……σελ.137-138

Εισαγωγή

Από αρχαιοτάτων χρόνων οι λίθοι έπαιζαν ένα σημαντικό ρόλο στη ζωή των ανθρώπων. Οι προϊστορικοί πρόγονοί μας χρησιμοποιούσαν κάθε είδος πέτρας, όπως διάφορες πυριτικές ποικιλίες (αμέθυστος, οψιδιανός), για την κατασκευή όπλων, εργαλείων, οικιακών συσκευών, κοσμημάτων. Στην Νεολιθική εποχή, ο άνθρωπος άρχισε ήδη να ξεχωρίζει μερικές πέτρες, πολύτιμες ή μη, τις οποίες χρησιμοποιούσε ως κόσμημα και απέδιδε σε αυτές μαγικές ιδιότητες. Στο τέλος της Προϊστορικής περιόδου, οι πέτρες αυτές έγιναν μέσο συναλλαγής και έτσι άρχισε η οικονομική εκμετάλλευση των λίθων. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πιν. 1) με τα σημαντικότερα ορυκτά και πετρώματα αλλά και κάποια στοιχεία που βοήθησαν στην πολιτιστική εξέλιξη του ανθρώπου.

ΟΡΥΚΤΑ- ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΕΠΟΧΗ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ
Βόριο, Ζιρκόνιο, Κάδμιο, Λίθιο, Ουράνιο, Πλουτώνιο, Πυρίτιο	Πυρηνική- Διαστημική	1960- Σήμερα
Αμίαντος, Αργίλιο, Βανάδιο, Βαρίτης, Βηρύλλιο, Βολφράμιο, Διαμάντι (βιομηχανικό), Πετρέλαιο, Σπάνιες Γαίες,	Βιομηχανική	1960- 1760
Λευκόχρυσος, Βισμούθιο, Αντιμόνιο	Αναγέννηση	1760- 1400
Άστριος, Χάλυβας	Μεσαιωνική	1400- 400
Τσιμέντο, Ψευδάργυρος	Ελληνορωμαϊκή	400μ.Χ. – 700π.Χ.
Μάρμαρο, Πολύτιμοι Λίθοι	Σιδήρου (Γεωμετρική)	700- 1000
Αλάβαστρο, Σίδηρος, Άργυρος, Τάλκης	Χαλκού	1000- 3000
Γυαλί, Πήλινα Είδη, Χαλκός, Πλίθοι Αργίλου	Χαλκολιθική	3000- 4000
Ιαδεϊτης, Κεχριμπάρι, Χρυσός, Είδη Αγγειοπλαστικής	Νεολιθική	4000- 7000
Κερατόλιθος, Οψιδιανός, Ώχρα	Μεσολιθική	7000- 10000
Χάλικες	Παλαιολιθική	>10000

Εικ.1 Σημαντικότερα ορυκτά και πετρώματα κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων του ανθρώπου (Τσιραμπίδης Ανανίας).

Η συλλογή των ορυκτών και των πετρωμάτων γινόταν από τους αρχαίους μέσω των λατομείων. Τα αρχαία λατομεία χρησιμοποιούνταν για την εξόρυξη υλικών δομής για την κατασκευή μνημείων, γλυπτών, αγαλμάτων. Διαθέτουν ένα σπάνιο και σύνθετο συνδυασμό τεχνολογίας και τέχνης που αποσκοπεί στη λήψη των υλικών που είναι αναγκαία κάθε φορά. Η μεταλλευτική δραστηριότητα στην Ελλάδα ξεκινάει ήδη από τα προϊστορικά χρόνια σύμφωνα με αναφορές αρχαίων συγγραφέων. Οι τρόποι λατόμευσης ήταν δύο ειδών :

1. Επιφανειακή εξόρυξη για την εκμετάλλευση των υλικών.
2. Διάνοιξη στοών εξόρυξης των μεταλλευμάτων.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η περιγραφή και αναγνώριση των λίθων του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά. Η περιγραφή και αναγνώριση των λίθων έγινε με τη βοήθεια κυρίως πολωτικού μικροσκοπιού αλλά και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου για την αναγνώριση ορυκτών που δεν είναι ορατά με το πολωτικό μικροσκόπιο. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των φθορών που οι λίθοι έχουν υποστεί είτε λόγω φυσικών διεργασιών όπως διάβρωση- αποσάθρωση, είτε λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων πάνω σε αυτούς. Η αναγνώριση και ονοματολογία των φθορών έγινε μακροσκοπικά, ενώ χρησιμοποιήθηκε επίσης και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ. Τέλος, παρατίθενται τρόποι που θα βοηθήσουν στην αντιμετώπιση των φθορών.

1. Γεωλογικά Χαρακτηριστικά

1.1 Γενικά

Η περιοχή της Ελευσίνας, σύμφωνα με τα γεωλογικά και γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά της, υπάγεται στην Υποπελαγονική ζώνη. Η Υποπελαγονική ζώνη ανήκει στις εξωτερικές Ελληνίδες και γενικά θεωρείται η κατωφέρεια της Πελαγονικής ζώνης.

1.2 Υποπελαγονική Ζώνη

Η Υποπελαγονική ζώνη βρίσκεται δυτικά της Πελαγονικής ζώνης και έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Ξεκινάει από την Αλβανία, συνεχίζει στον ελλαδικό χώρο στις περιοχές της δυτικής Θεσσαλίας, ανατολική Στερεά Ελλάδα, Σαλαμίνα, Ύδρα, ανατολική Πελοππόνησο, Κω και καταλήγει στη Μικρά Ασία. Παλαιογραφικά, η Υποπελαγονική ζώνη θεωρείται πως είναι η κατωφέρεια της Πελαγονικής ζώνης λόγω της ύπαρξης των οφιολίθων στην ζώνη αυτή. Όσον αφορά τη λιθολογία, η Υποπελαγονική ζώνη διακρίνεται από προαλπικά, αλπικά και μεταλπικά στρώματα. Το προαλπικό υπόβαθρο της ζώνης αποτελείται από ιζηματογενή και ημιμεταμορφωμένα στρώματα Παλαιοζωϊκής ηλικίας, μαζί με απολιθώματα. Τα αλπικά στρώματα περιλαμβάνουν Τριαδικά ιζήματα, σχιστοκερατόλιθους και οφιόλιθους, ασβεστόλιθους Ιουρασικής ηλικίας και τέλος ιζήματα Μέσο- Άνω Κρητιδικής επίκλυσης. Τα μεταλπικά στρώματα αποτελούνται από μολλασικά ιζήματα της Μεσο-ελληνικής Αύλακας, η οποία λειτούργησε κατά το Ολιγόκαινο-Μέσο Μειόκαινο (Ι.Κ. Κουκουβέλας, Π. Ξυπολιάς, Σ. Κοκκάλας).

1.3 Γεωλογία Αττικής

Η γεωλογική δομή της Αττικής συνίσταται από τους παρακάτω γεωλογικούς σχηματισμούς, από το παλαιότερο προς το νεώτερο :

1. Μεταμορφωμένο σύστημα
    - Ανώτερο μάρμαρο.
    - Σχιστόλιθος Καισαριανής.
    - Κατώτερο μάρμαρο.
    - Δολομίτες Πιρναρής.
    - Σχιστόλιθος Βάρης.

Στην περιοχή της Ανατολικής Πάρνηθας, πάνω στον ηφαιστειακό τόφφο έχει αποτεθεί με ασυμφωνία ένας λευκός ημιμεταμορφωμένος ασβεστόλιθος, που στρωματογραφικά αντιστοιχεί στο ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου, πάχους 0 - 25μ., καθώς και ασβεστιτικοί και άλλοι σχιστόλιθοι.

Στη μεταμορφωμένη Αττική το ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου εμφανίζεται και στη βόρεια Αττική και έχει αποτεθεί πάνω στην ανομοιόμορφη και διαβρωμένη βαρίσκια μορφολογία με ασυμφωνία. Τόσο στη βόρεια Αττική (Μαραθώνας, Πεντέλη) όσο και στη νότια Αττική (Α. Λαυρεωτική) το ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου λόγω της ανομοιογενούς μορφολογίας του υποβάθρου, παρουσιάζει από περιοχή σε περιοχή διαφορετικά πάχη, όπως στη λίμνη του Μαραθώνα έως 7μ., στο Γραμματικό - Α. Πεντέλη - (Ν. Μάκρη) 150-300μ., στη ΝΑ Λαυρεωτική, στην περιοχή Σουνίου - Λεγραινών περίπου 100μ., ανατολικά της Πλάκας 2-30μ., και βορειότερα της Πλάκας και του Δασκαλιού 0-1μ.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της βάσης του ανωτέρου μαρμάρου Λαυρίου σε όλες τις περιοχές που εμφανίζεται είναι η επιγενετική και in situ μεταλλοφορία, ενώ στα κατώτερα στρώματά του εμφανίζονται κλαστικής προέλευσης υλικά, συμπεριλαμβανομένων και μικρών τεμαχίων γραφίτη και με την παρουσία μεταλλικών και μη μεταλλικών ορυκτών. Η παρουσία των μεταλλικών ορυκτών στο ανώτερο μάρμαρο δίνει πολλές φορές στην αποκεκαλυμμένη και διαβρωμένη επιφάνεια του μαρμάρου ερυθρά απόχρωση (Παπαδέας 2002).

Οι σχιστόλιθοι Καισαριανής είναι κυρίως μοσχοβιτικοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες, με ενδιαστρώσεις λεπτοστρωματώδων μαρμάρων, που υπέρκεινται τον ορίζοντα του κατώτερου μαρμάρου ή αποτελούν πλευρική μετάβαση των ανώτερων μελών αυτού του ορίζοντα με αποτέλεσμα τη μεγάλη διακύμανση του πάχους των σχιστόλιθων αυτών. Το πάχος των σχιστόλιθων Καισαριανής κυμαίνεται από λίγα μέχρι και 300m περίπου. Καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις ανατολικά και νοτιοανατολικά της Παιανίας. Στην περιοχή του Κορωπίου υπάρχει εμφάνιση οφιολίθων (Παπαδέας 2002).

Το κατώτερο μάρμαρο είναι στρωματογραφικά ο κατώτερος σχηματισμός της μεταμορφικής Αττικής (Παπαδέας 2002). Είναι ο σημαντικότερος σε πάχος και επιφανειακή εξάπλωση σχηματισμός της σχετικά αυτόχθονης σειράς Υμηττού- νότιας Αττικής. Όλος σχεδόν ο κύριος όγκος του Υμηττού και της Μερέντας δομείται από μάρμαρα αυτού του ορίζοντα, τα οποία είναι συνήθως αδροκρυσταλλικά, υπόλευκα ή τεφροκύανα και κατά θέσεις ροδόχρωμα. Είναι λεπτόκοκκα μάρμαρα (μέγεθος κόκκων 0.4- 0.6 mm) με ζαχαρώδη υφή και παχυστρωματώδεις ενδιαστρώσεις (πάχος > 5m) (Παπαδέας 2002).

Οι δολομίτες Πυρναρής αποτελούνται από δολομίτες και δολομιτικούς σχιστόλιθους στη βάση του Κατώτερου μαρμάρου και συνήθως περιλαμβάνονται στον ορίζοντα αυτού του μαρμάρου.

Τέλος, οι σχιστόλιθοι Βάρης αποτελούνται κυρίως από ασβεστιτικούς σχιστόλιθους που εμφανίζονται στην περιοχή της Βάρης.

2. Κρητιδικό σύστημα
    - Ανώτερη ασβεστολιθική βαθμίδα (Λυκαβηττός).
    - Αθηναϊκός σχιστόλιθος.
    - Κατώτερη ασβεστολιθική βαθμίδα.

Η ανώτερη ασβεστολιθική βαθμίδα αποτελείται κυρίως από Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους, ηλικίας Σενωνίου (Μαρίνος et al 1974) και περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της Καισαριανής και τα νότια περιθώρια των αθηναϊκών λόφων (Ακρόπολη, Λυκαβηττός, Γαλάτσι).

Το σύστημα του Αθηναϊκου σχιστόλιθου αποτελείται από ακολουθίες σχσιτόλιθων- μεταψαμμιτών και παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και τεκτονική καταπόνηση από ρήγματα και διατμίσεις (Μαρίνος Π., Μαρίνος Β., Στούμπος Γ., Νόβακ Μ., Κορκάρης Κ., Μπενίση Μ. (2004) : Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, XXXVI, 1791).

Η κατώτερη ασβεστολιθική ενότητα εντοπίζεται σοτυς δυτικούς πρόποδες του Υμηττού σύμφωνα με τον Lepsius (1893). Ο Ktenas (1907) αναφέρει την ύπαρξη Τριαδικών απολιθωμάτων για τη συγκεντριμένη ενότητα. (Δ.Ι. Παπανικολάου, Σ.Γ. Λόζιος, Κ.Ι. Σούκης, Εμ.Ν. Σκούρτσος (2004) : Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, XXXVI, 1552).

3. Τριτογενές
    - Ανώτερο Τριτογενές (Νεογενές).
    - Κατώτερο Τριτογενές.

Κατά το Νεογενές, η κυριότερη εμφάνιση είναι τα μεταλπικά ιζήματα. Τα μεγαλύτερα πεδία με κλαστικά ιζήματα παρατηρούνται στις νότιες και ανατολικές παρυφές της Πεντέλης και στην περιοχή μεταξύ μεταμορφωμένων και μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα κλαστικά ιζήματα συνίστανται από ολισθόλιθους, ογκόλιθους, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και ερυθρούς πηλούς. Μέσα σε ερυθροκαστανές αργιλοπηλιτικές ενστρώσεις έχει διαπιστωθεί η πικερμική πανίδα σπονδυλωτών, ποντίου ηλικίας (Παπαδέας 2002).

Ποταμολιμναία ιζήματα, ανωτέρου Μειόκαινου κατωτέρου Πλειόκαινου, που συνίστανται από μάργες, τραβερτίνες μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και άργιλους σε εναλλαγή με κροκαλοπαγή, υπερκείμενα των παραπάνω κλαστικών ιζημάτων ,έχουν διαπιστωθεί στις νότιες παρυφές της Πάρνηθας και της Πεντέλης, στο Πικέρμι στη Ραφήνα στη λεκάνη Μεσογαίας στη Καλογρέζα στο Μαρούσι και στη περιοχή Περιστερίου - Λιοσίων. Επίσης αναφέρονται στο Κάλαμο το Μαρκόπουλο και τον Ωρωπό.Οι κλιματολογικές συνθήκες που επεκράτησαν στη διάρκεια της απόθεσης των ποταμολιμναίων ιζημάτων, ευνόησαν τη δημιουργία λιγνιτικών κοιτασμάτων. Θαλάσσια ιζήματα ανωτέρου Πλειόκαινου κατωτέρου Πλειστόκαινου αναφέρονται στην περιοχή Ραφήνας (Μητσόπουλος 1948, Μέτος 1992).

4. Τεταρτογενές (Αλλούβιο- Διλούβιο)

Διλουβιακές και αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από πολυφασικά ιζήματα καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις κυρίως στο εσωτερικό των λεκανών.

Τα ιζήματα του τεταρτογενούς συνίστανται από ερυθρούς πηλούς, αργιλοπηλίτες με διάσπαρτες κροκάλες και λατύπες διαφόρου μεγέθους, παλαιούς και

σύγχρονους κώνους κορημάτων, ποταμοχερσαία κρόκαλο - λατυποπαγή, χειμάρρειες αποθέσεις αναβαθμίδες, παράκτιες άμμους και άλλα ιζήματα.(Μέτος 1992).

1.4 Τεκτονική Γεωλογία Αττικής

Η τεκτονική γεωλογία της Αττικής θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ένα ασσύμετρο μεταμορφικό σύμπλεγμα. Το ανώτερο κομμάτι αυτού του συμπλέγματος περιλαμβάνει μη μεταμορφωμένα πετρώματα της Υποπελαγονικής ζώνης, ενώ αντίθετα το κατώτερο τμήμα αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα υψηλών πιέσεων του δυτικού άκρου της Αττικοκυκλαδικής ζώνης. Το όριο μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου τμήματος θεωρούνταν ότι ήταν μία αλπική επώθηση ή ένα ρήγμα μετασχηματισμού. Παρ'όλα αυτά, η διερεύνηση της κινηματικής του ορίου αυτού αποκάλυψε ότι τελικά αντιπροσωπεύει ένα ρήγμα αποχωρισμού πολλών χιλιομέτρων (detachment fault), ηλικίας Κατώτερου Μειόκαινου- Ανώτερου Πλειόκαινου . Το ρήγμα αυτό, μετακίνησε το ανώτερο κομμάτι της Υποπελαγονικής ζώνης προς τα ΒΔ- ΒΒΔ και έφερε τα μεταμορφωμένα πετρώματα υψηλών πιέσεων του κατώτερου τμήματος στην επιφάνεια. Το ρήγμα αποχωρισμού περιλαμβάνει τεκτονικά θραύσματα της Υποπελαγονικής ζώνης και ιζήματα του Αθηναϊκού υποβάθρου.

1.5 Λιθοστρωματογραφία Του Ανώτερου Τμήματος Της Υποπελαγονικής Ζώνης

Το ανώτερο τμήμα της Υποπελαγονικής ζώνης απαρτίζεται από δύο φλοιϊκά τεμάχη και ένα τέμαχος ωκεάνιας προέλευσης. Οι λιθολογίες που περιλαμβάνονται εδώ, από το παλαιότερο προς το νεώτερο είναι οι εξής :

1. Ενότητα Περμο- Τριαδικής ηλικίας, που περιέχει κόκκινους εώς μπεζ ψαμμίτες, λεπτόκοκκους εώς αδρόκοκκους, αρκόζες, κόκκινους πηλίτες, κροκαλοπαγή, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και τέλος μπλοκ από ασβεστόλιθους Παλαιοζωϊκής ηλικίας και ηφαιστειακά πετρώματα.
2. Ανθρακική πλατφόρμα ιζηματογένεσης Τριαδικής- Ιουρασικής ηλικίας, συμπεριλαμβανομένου και κάποιων ασβεστολίθων και δολομιτών που εκτείθονται κατά μήκος της δυτικής Αττικής.
3. Σερπεντινιωμένοι περιδοτίτες που προέρχονται από οφιόλιθους Μεσοζωϊκής ηλικίας. Σιδηρο-νικελιούχου λατερίτες, που σχηματίστηκαν από την αποσάθρωση σερπεντινιτών, και εντοπίζονται διάσπαρτα στο βόρειο-ανατολικό τμήμα του όρους Παρνασσού.
4. Μάργες και παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι Κρητιδικής ηλικίας, καθώς επίσης και φλύσχη Παλαιοκαινικής ηλικίας που περιλαμβάνει μάργες, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, κόκκινους πηλίτες και μπεζ ψαμμίτες.

Τέλος, η έντονη σεισμική δραστηριότητα, σε μικρά βάθη (<20 km), της Αττικής δείχνει τεκτονική δραστηριότητα που βρίσκεται σε εξέλιξη στον ανώτερο φλοιό.

2. Παράγοντες Διάβρωσης Δομικών Λίθων Μνημείων

2.1 Γενικά

Η διάβρωση και η αποσάθρωση είναι γεωλογικές διεργασίες που συμβαίνουν στη φύση με σκοπό την καταστροφή του πετρώματος, ιστολογική και ορυκτολογική. Με την πάροδο του χρόνου, όπως όλα τα πετρώματα, έτσι και οι δομικοί λίθοι των μνημείων υπόκεινται σε τέτοιες διαδικασίες με αποτέλεσμα τη διαταραχή της συνοχής του πετρώματος.

Εκτός όμως από τις διεργασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης που είναι φυσικές και δεν μπορούμε να τις εμποδίσουμε, τα δομικά υλικά των μνημείων επηρεάζονται, κυρίως τα τελευταία χρόνια, από αθρωπογενείς παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση κ.α.

2.2 Διάβρωτικές Διεργασίες

Διάβρωση ονομάζεται το σύνολο των φυσικών και χημικών παραγόντων που καταστέφουν τα πετρώματα και μεταφέρουν τα κατάλοιπά τους. Γενικά, η διάβρωση προηγείται της αποσάθρωσης.

Η διάβρωση των δομικών υλικών επηρεάζει μόνο την εξωτερική τους επιφάνεια και τις περιοχές που υπάρχουν ρωγμές και διακλάσεις στο πέτρωμα. Δηλαδή την διεπιφάνεια του πετρώματος με το διαβρωσιγενές υλικό.

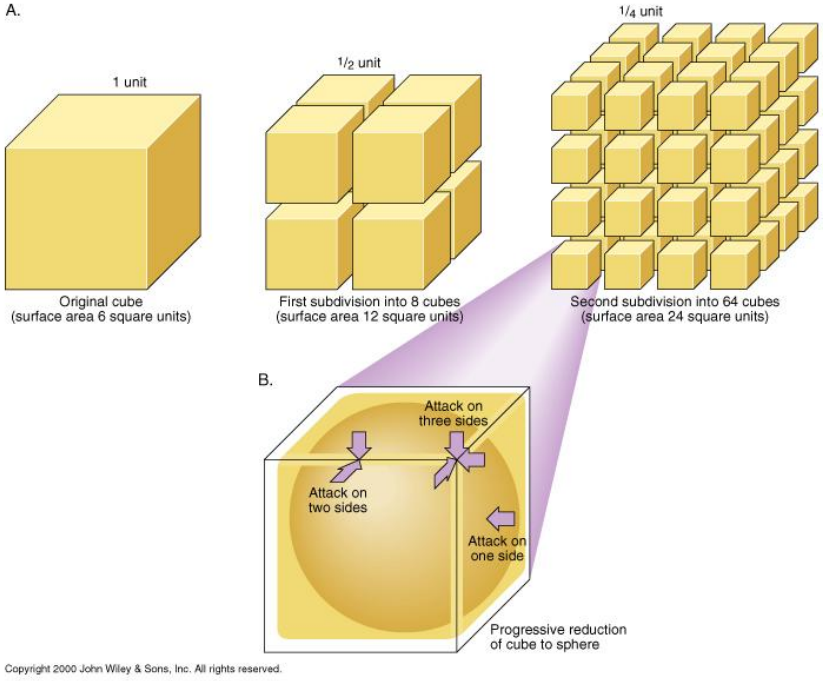
Τέλος, υπάρχουν άλλα δύο είδη διάβρωσης. Η εκβιασμένη διάβρωση επηρεάζει το πέτρωμα λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων πάνω σε αυτό. Οι απότομες αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος, η λανθασμένη χρήση υλικών για τον καθαρισμό ενός μνημείου αλλά και η άγνοια για τη σωστή μεταχείρηση ενός μνημείου είναι κάποια παραδείγματα εκβιασμένης διάβρωσης. Στην αυθόρμητη διάβρωση το πέτρωμα, ως ένα χημικό σύστημα στη φύση, τείνει να έχει την ελάχιστη ελεύθερη ενέργεια Gibbs και τη μέγιστη εντροπία, δηλαδή θερμοδυναμικά σταθερότερο.

2.3 Αποσαθρωτικές Διεργασίες

Αποσάθρωση καλείται η καταστροφή ή η αλλοίωση των ορυκτών και των πετρωμάτων που γίνεται στην επιφάνεια της Γης, με τη βοήθεια εξωγενετικών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί είναι η ηλιακή ακτινοβολία, το νερό, τα αέρια της ατμόσφαιρας, οι ζωντανοί οργανισμοί κ.α. Η αποσάθρωση, ανάλογα με το αίτιο που την προκαλεί διακρίνεται σε :

- Μηχανική ή φυσική αποσάθρωση.
- Χημική αποσάθρωση.
- Βιολογική αποσάθρωση.

Κατά τη μηχανική ή φυσική αποσάθρωση τα πετρώματα παθαίνουν μηχανική καταστροφή, δηλαδή καταστρέφεται μόνο η συνοχή των ορυκτολογικών τους συστατικών σπάζοντας το πέτρωμα σε μικρότερα κομμάτια και αυξάνοντας έτσι το εμβαδόν της επιφάνειας που θα προσβληθεί αργότερα από τη χημική αποσάθρωση. Οι αποσαθρωτικές διαδικασίες προσβάλουν κορυφές κατά μήκος των τριών επιφανειών με αποτέλεσμα τα γωνιώδη κομμάτια να γίνονται γρήγορα αποστρογγυλομένα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Παρ'όλα αυτά, η ορυκτολογική τους δομή ή η χημική τους σύσταση μένει ανεπιρέαστη.



Εικ.2 Απεικόνιση μηχανικής καταστροφής των πετρωμάτων.

Διαδικασίες φυσικής αποσάθρωσης είναι οι εξής :

- Αποσάθρωση με μορφή παγετικής σφήνας.
- Θερμική ηλίαση.
- Υγρή ηλίαση.
- Σχηματισμός αλάτων.
- Εκφόρτωση.

Η αποσάθρωση με τη μορφή παγετικής σφήνας συμβαίνει στην περίπτωση που το νερό ισχωρεί στις ρωγμές και στις διαρρήξεις των πετρωμάτων, παγώνει με τη μείωση της θερμοκρασίας, διαστέλλεται με αποτέλεσμα οι ρωγμές να μεγαλώνουν σιγά σιγά και το πέτρωμα τελικά να σπάει.

Ένα χαρακτηριστικό των πετρωμάτων είναι η ανομοιομορφία. Κάθε πέτρωμα αποτελείται από έναν αριθμό διαφορετικών ορυκτών μέσα στο σύνολό του. Διαφορετικά ορυκτά έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής και συστολής. Συνήθως, τα μελανοκρατικά (φεμικά) ορυκτά έχουν συντελεστές θερμικής διαστολής και συστολής μεγαλύτερους από τα λευκοκρατικά ορυκτά. Είναι γνωστό, έπισης, ότι τα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας. Όλα τα παραπάνω, με συνδιασμό τις απότομες θερμοκρασιακές διαφορές σε τακτά χρονικά διαστήματα επηρεάζουν κάποια χιλιοστά, σε βάθος, από την επιφάνεια του πετρώματος με αποτέλεσμα να προκαλείται ξεφλούδισμα αυτού.

Το νερό που κινείται μέσα στους πόρους και στις ρωγμές του πετρώματος περιέχει και διαλυμένες ουσίες. Οι ουσίες αυτές μπορεί να απομακρυνθούν από το διάλυμα και να σχηματιστούν άλατα. Στη συνέχεια, συμβαίνει θερμική διαστολή των αλατούχων κρυστάλλων που αναπτύχθηκαν και διόγκωση των άνυδρων αλάτων με την απορρόφηση νερού, στους πόρους και στις ρωγμές του πετρώματος. Τέλος, μέσα στους τριχοειδείς σωλήνες σχηματίζονται αλατούχοι κρύσταλλοι λόγω της πίεσης που αναπτύχθηκε.

Η χημική αποσάθρωση περιλαμβάνει τις διαδικασίες για την παραγωγή νέων ορυκτών, με μικρότερη πυκνότητα, σε βάρος προϋπαρχόντων ορυκτών, την αλλαγή στην ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος και την αύξηση του πορώδους. Οι διαδικασίες αυτές είναι οι εξής :

1. Ενυδάτωση.
2. Υδρόλυση.
3. Οξείδωση.
4. Διάλυση.

Υδρόλυση είναι η αντίδραση που οδηγεί στην αποσύνθεση μίας ένωσης με τη συμμετοχή νερού. Θετικά ιόντα του πλέγματος ορισμένων ορυκτών αντικαθίστανται από ελεύθερα ιόντα υδρογόνου του νερού (ιοντοανταλλαγή) με αποτέλεσμα την αποσύνθεση τους. Τα πιο επιρρεπεί ορυκτά για αυτή τη διαδικασία είναι οι άστριοι, οι οποίοι μετατρέπονται σε καολινίτη σύμφωνα με την αντίδραση :

$$2KAlSi_3O_8+2H+2HCO_3+H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4+2K+2HCO_3+4SiO_2$$

Feldspar → Kaolinite

Οξείδωση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα ιόν χάνει ένα ηλεκτρόνιο. Σε αυτή την περίπτωση, η συνηθέστερη αντίδραση είναι ο σχηματισμός αιματίτη :

$$4Fe^{2+}+3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$$

Διάλυση είναι η διαδικασία κατά την οποία χημικές ουσίες των πετρωμάτων διαλύονται σε νερό. Η παρουσία, έστω και μικρής ποσότητας, οξέος μέσα στο νερό αυξάνει πάρα πολύ τη διαλυτική του ικανότητα. Για παράδειγμα, το ανθρακικό οξύ παράγεται με τη διάλυση του ατμοσφαιρικού CO_2 στη βροχή. Στη συνέχεια αντιδρά με τον ασβεστόλιθο που είναι εκτεθιμένος σε αυτό και τον διαλύει (καρστική διάβρωση). Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν σε αυτή την περίπτωση είναι οι εξής :

$$CO_2+H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

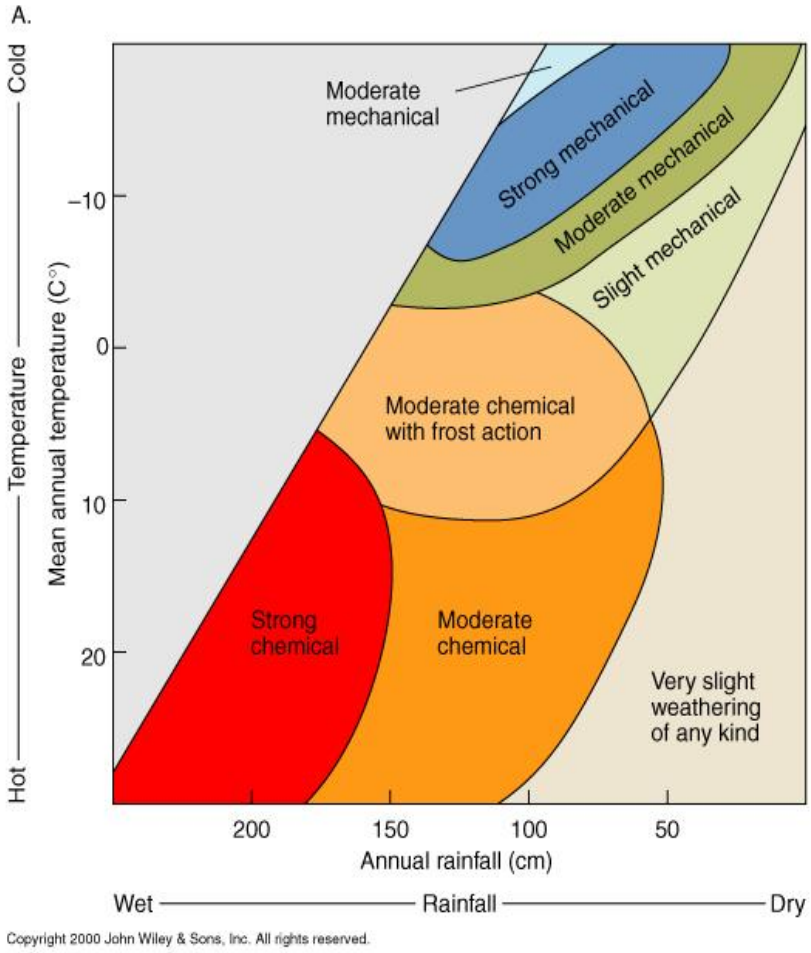
$$CaCO_3+H_2CO_3 \rightarrow Ca+2HCO_3$$

Στην περίπτωση της χημικής αποσάθρωσης, περιλαμβάνονται περισσότεροι από ένα τύποι αποσάθρωσης. Η διάλυση παίζει ρόλο σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες αποσάθρωσης και συνήθως συνοδεύεται από απόπλυση και υδρόλυση. Η χημική αποσάθρωση στον ασβεστόλιθο, που είναι το πιο κοίνο ιζηματογενές πέτρωμα, περιλαμβάνει τη διάλυση και την υδρόλυση. Ο ασβεστίτης διαλύεται σχεδόν ολοκληρωτικά, αφήνοντας μόνο τις αδιάλυτες προσμίξεις (κυρίως άργιλο και χαλαζία) που βρίσκονται πάντα σε μικρές ποσότητες μέσα στο πέτρωμα.

Μία άλλη μορφή αποσάθρωσης είναι η σφαιροειδής. Η σφαιροειδής αποσάθρωση είναι η αποσυμπέτρωση του πετρώματος στις κορυφές και τις ακμές των μπλοκ που παράγονται από ρωγμές του πετρώματος, λόγω διαφορετικών τάσεων, με τη δράση της χημικής αποσάθρωσης.

Η διαφορική αποσάθρωση είναι μία ακόμα αιτία καταστροφής του πετρώματος. Επιφάνειες που εμφανίζουν διαφορετικούς από έναν πετρολογικούς κύκλους παρατηρείται ότι αποσαθρώνονται σε διαφορετικούς ρυθμούς.

Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα θερμοκρασίας (C^o) – βροχόπτωσης (cm) που δείχνει σε ποια κλίματα επικρατεί η χημική και σε ποια η μηχανική αποσάθρωση. Γενικά, η χημική αποσάθρωση επικρατεί κυρίως σε ζεστά και υγρά κλίματα, ενώ αντίθετα η μηχανική σε ψυχρά και ξηρά κλίματα.



Εικ.2.1 Διάγραμμα θερμοκρασίας (C^O)- βροχόπτωσης(cm).

Το τελευταίο είδος αποσάθρωσης είναι η βιολογική. Η βιολογική αποσάθρωση περιλαμβάνει διεργασίες όπως :

- Απλή θραύση.
- Κίνηση και ανάδευση.
- Σχηματισμός ανθρακικού οξέως, από το CO_2 που παράγεται από τις ρίζες με τη διαδικασία της αναπνοής.
- Οργανισμοί που επηρεάζουν την υγρασία του εδάφους.

Οι ζωϊκοι και κυρίως οι φυτικοί οργανισμοί προκαλούν αποσάθρωση στα πετρώματα. Η αποσάθρωση μπορεί να είναι μηχανική με την ανάπτυξη των ριζών των φυτών, αλλά και χημική με τα υπολείμματά τους. Τα τελευταία σχηματίζουν με το νερό οργανικά οξέα, που επιδρούν καταστροφικά στα ορυκτά συσταστικά των πετρωμάτων.

2.4 Ατμοσφαιρική Ρύπανση Και Ρυπαντές

Εκτός από τις διαδικασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης που συμβαίνουν στη φύση και δν μπορούμε να τις σταματήσουμε, κάποιοι άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν και καταστρέφουν τους δομικούς λίθους των μνημείων είναι οι ατμοσφαιρικοί ρύποι.

Ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια, που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της δομής, της σύστασης και των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς, στα οικοσυστήματα αλλά και στα αρχαία μνημεία.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρυπαντές που προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και κατ' επέκταση στα δομικά υλικά των αρχαίων μνημείων. Δίνονται επίσης τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους. Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι οι εξής :

- SO_2
- Οξείδια του αζώτου, NO_x
- CO_2
- PAN
- VOC
- H_2S
- Αιωρούμενα σωματίδια, PM_{10}
- H_2SO_4
- O_3
- HCl
- CFC
- Pb
- Br_2

2.4.1 Διοξείδιο του Θείου (SO_2)

Το διοξείδιο του θείου ανήκει στην οικογένεια των σουλφιδίων, αέρια με κύριο χαρακτηριστικό ότι είναι διαλυτά στο νερό. Το θείο είναι συστατικό όλων των ακατέργαστων ορυκτών και του αργού πετρελαίου. Κατά την επεξεργασία των παραπάνω παράγονται τα σουλφίδια. Έτσι εντοπίζονται κατά την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, κατά τη διαδικασία εξαγωγής άνθρακα από τα ορυκτά , κατά την εξαγωγή βενζίνης από το πετρέλαιο καθώς και κατά την καύση καυσίμων σε διάφορα μηχανοκίνητα. Στην ατμόσφαιρα

το διοξείδιο του θείου αντιδρά και σχηματίζει σουλφίδια και διάφορα παράγωγα επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία. Εξ'αιτίας της διαλυτότητας του στο νερό σε συνδυασμό με την υγρασία της ατμόσφαιρας παράγει τοξικά παράγωγα. Οι επιπτώσεις του διοξειδίου του θείου και γενικότερα των σουλφιδίων είναι παρόμοιες με τις επιπτώσεις των οξειδίων του αζώτου. Συνεισφέρουν στη δημιουργία τοξικής βροχής και αιωρούμενων σωματιδίων. Το διοξείδιο του θείου μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω του ανέμου και εναποτίθεται σε περιοχές μακριά από την εστία παραγωγής του (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.2 Οξείδια του Αζώτο (NO_x)

Με το γενικό όρο οξείδια του αζώτου ορίζονται γενικά οι ενώσεις αζώτου με οξυγόνο σε διάφορες αναλογίες. Οι κυριότερες και συνηθέστερες ενώσεις από αυτές είναι το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Τα περισσότερα από αυτά είναι άχρωμα και άοσμα. Ωστόσο το διοξείδιο του αζώτου σε συνδυασμό με τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης της ατμόσφαιρας διακρίνεται ως ένα κόκκινο-καφέ στρώμα πάνω από πολλές αστικές περιοχές. Παράγονται κατά την ανάφλεξη των καυσίμων, δηλαδή κατά την καύση τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια πηγές έκλυσης οξειδίων του αζώτου είναι κυρίως τα αυτοκίνητα, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και γενικότερα οι βιομηχανίες.

Ευθύνονται για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας και με έμμεσους τρόπους αφού όλα τα οξείδια του αζώτου είναι αέρια πολύ δραστικά και κάνουν εύκολα αντιδράσεις μέσα στην ατμόσφαιρα επηρεάζοντας τη χημεία της και κατά συνέπεια τη σύσταση της με τη δευτερογενή δημιουργία νέων ρύπων. Συνεισφέρουν έτσι στη δημιουργία του όζοντος, διαφόρων τοξικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα, στη δημιουργία τοξικής βροχής με όλες τις συνέπειες στον υδροφόρο ορίζοντα, στην αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας που μειώνουν την ορατότητα της. Τέλος, ευθύνονται ως μία από τις βασικές συνιστώσες της αλλοίωσης του κλίματος, του φαινομένου του θερμοκηπίου στον πλανήτη και της όξινης βροχής.

Κύριο χαρακτηριστικό των οξειδίων του αζώτου και των παραγώγων τους ρύπων είναι ότι μεταφέρονται ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις ακολουθώντας την πορεία των ανέμων που επικρατούν στην περιοχή. Γεγονός που κάνει τις δυσμενείς επιπτώσεις τους να εμφανίζονται σε ευρύτερες περιοχές από την εστία παραγωγής τους (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.3 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) δεν είναι τοξικό αέριο αλλά με την υπερβολική συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σε παγκόσμια κλίμακα οι εκπομπές CO_2 έχουν διπλασιασθεί και υπάρχει αλματώδης αύξηση λόγω της μεγάλης ζήτησης στην παραγωγή ενέργειας από αναπτυσσόμενες χώρες (Κίνα, Ινδία, κλπ). Πολυάριθμες έρευνες δείχνουν ότι τα αέρια του θερμοκηπίου παίζουν σημαντικό ρόλο στα οικοσυστήματα και στους κυριότερους κύκλους θρεπτικών υλικών και στοιχείων (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα από τα οξείδια του άνθρακα και παράγεται από τη μερική καύση του άνθρακα. Είναι αέριο άχρωμο και άοσμο. Είναι το κύριο συστατικό των εξατμίσεων των οχημάτων που κινούνται στους δρόμους τα οποία και αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής του (56%). Για αυτό το λόγο άλλωστε τα υψηλότερα επίπεδα του παρατηρούνται τις ώρες αιχμής του κυκλοφοριακού φόρτου. Άλλες πηγές παραγωγής CO είναι οι βιομηχανίες (μεταλλουργία, χημικές), οι πυρκαγιές των δασών, ο καπνός του τσιγάρου κλπ. Σε εσωτερικούς χώρους οι υπεύθυνες πηγές παραγωγής του είναι κάποια από τα θερμαντικά σώματα.

Τα επίπεδα του CO στην ατμόσφαιρα θεωρείται ότι επηρεάζονται από τη θερμοκρασία αφού οι υψηλότερες τιμές του παρατηρούνται συνήθως τους μήνες του χειμώνα. Αυτό εξηγείται από τη δημιουργία στρώματος θερμού αέρα κάτω από το οποίο παγιδεύονται οι ρύποι (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.5 Οργανικά Πτητικά Συστατικά (VOC :Volatile Organic Compounds)

Οι πτητικές οργανικές ουσίες (Volatile Organic Compounds, VOCs) χαρακτηρίζονται κυρίως οι πτητικές αρωματικές ενώσεις (όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, ξυλόλια κλπ) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές των VOCs είναι οι βιομηχανίες, τα καυσαέρια των οχημάτων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων, χρώματα και οικοδομικά υλικά. Οι VOCs μπορούν να παραμείνουν για 1-2 ημέρες στην ατμόσφαιρα διασπώμενες σε μεγάλη ποικιλία υδρογονανθράκων. Οι πτητικές οργανικές ουσίες παίζουν σημαντικό ρόλο σε φωτοχημικές αντιδράσεις και συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω της υψηλής τοξικής και καρκινογόνου δράσης (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.6 Χλωλοφθοράνθρακες (CFC)

Οι χλωροφθοράνθρακες με την απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον ανέρχονται με αέριες δίνες στην ατμόσφαιρα και στρατόσφαιρα όπου με την επίδραση της UV-B και UV-C απελευθερώνουν ελεύθερες ρίζες χλωριούχων ενώσεων, οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν νέες ελεύθερες ρίζες χλωρίου.

Οι επιπτώσεις της καταστροφής της στοιβάδας του όζοντος και της αύξησης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι εμφανείς τόσο στα φυσικά οικοσυστήματα, όσο και στους δομικούς λίθους (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.7 Όζον (O_3)

Με τον όρο όζον ορίζουμε το τριατομικό οξυγόνο, αέριο που κατά κύριο λόγο εκλύεται στην ατμόσφαιρα ως παράγωγο χημικών αντιδράσεων μέσα στην ίδια την ατμόσφαιρα και όχι ως παράγωγο διάφορων πηγών ρύπανσης όπως οι προαναφερθέντες ρύποι. Παράγεται με την αντίδραση οξειδίων του αζώτου με οργανικές ασταθείς ενώσεις σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και ηλιοφάνειας.

$$\text{Οργανικές Ενώσεις} + NO_x + \text{θερμότητα} + \text{ηλιοφάνεια} = O_3$$

Οι οργανικές ενώσεις παράγονται από τις ίδιες πηγές παραγωγής των οξειδίων του αζώτου. Έτσι ανιχνεύονται κυρίως στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων,των βιομηχανιών και της βενζίνης. Επειδή η χημική αντίδραση για την παραγωγή όζοντος προϋποθέτει υψηλή θερμοκρασία και ηλιοφάνεια, το όζον έχει έντονα το χαρακτήρα εποχιακού φαινομένου. Έτσι τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρούνται τα υψηλότερα επίπεδα του.

Το όζον και οι χημικές ενώσεις από τις οποίες προέρχεται μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με τον άνεμο επεκτείνοντας το πρόβλημα και σε άλλες περιοχές (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.8 Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος είναι μέταλλο που συναντάται τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στα προϊόντα ή τα κατάλοιπα της βιομηχανικής παραγωγής. Η κυριότερη πηγή παραγωγής μολύβδου τις προγενέστερες δεκαετίες ήταν τα διάφορα αυτοκινούμενα οχήματα. Με την εφαρμογή της χρήσης της αμόλυβδης βενζίνης, η έκλυση μολύβδου στο περιβάλλον από τα οχήματα είναι περιορισμένη ενώ κύρια πηγή παραγωγής μολύβδου είναι πλέον η βιομηχανία της μεταλλουργίας (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.4.9 Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)

Ο όρος αιωρούμενο σωματίδιο (particulate matter, PM), περιγράφει τα διάφορα σωματίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Ο όρος αυτός περιλαμβάνει σωματίδια : α) διαφορετικού διαμετρήματος ή χρώματος ώστε άλλα είναι ορατά με γυμνό μάτι ενώ άλλα ανιχνεύονται από ηλεκτρονικά μικροσκόπια, β) σωματίδια διαφορετικής σύστασης όπως σκόνη, βρωμιά, καπνό, σταγονίδια κλπ.

Εκλύονται στην ατμόσφαιρα είτε άμεσα είτε ως αποτέλεσμα χημικών διεργασιών μέσα σε αυτή. Άμεσα παράγονται από τα αυτοκίνητα, τα εργοστάσια, τα κτίρια υπό κατασκευή, την καύση του ξύλου κ.τ.λ., ενώ έμμεσα παράγονται μέσα στην ατμόσφαιρα υπό τις κατάλληλες συνθήκες από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων, των εργοστασίων κλπ. Οι εξατμίσεις αντιδρούν παρουσία της υγρασίας της ατμόσφαιρας, της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και χημικών ενώσεων που παίζουν το ρόλο διαλύτη, παράγοντας σωματίδια που αιωρούνται και παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Προϊόντα εξατμίσεων + υγρασία + αμμωνία + διαλύτες + ηλιοφάνεια = PM

Εκτός από τις δυσμενείς επιπτώσεις που έχουν στην υγεία και οι επιπτώσεις στο φυσικό και αστικό περιβάλλον είναι σημαντικές. Τα νερά γίνονται όξινα και γενικά διαταράσσουν την ισορροπία των ευαίσθητων ή μη οικοσυστημάτων. Τέλος, όσον αφορά το δικό μας θέμα, η καπνιά που θεωρείται ένα από τα PM ευθύνεται για την καταστροφή μνημείων και αρχαιοτήτων αφού καταστρέφει και λεκιάζει υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένα τα μνημεία (Δ. Μελάς, Α. Αλεξανδροπούλου, Β. Αμοροίδης, Μ. Κακαρίδου, Ν. Σουλακέλλης).

2.5 Φθορές Μαρμάρων – Ασβεστολίθων

Παρακάτω γίνεται μία περιγραφή των φθορών, μορφές και αίτια, που μπορεί να υποστούν αρχαία μνημεία φτιαγμένα από μάρμαρο ή ασβεστόλιθο (Παπασταματίου Κλεοπάτρα 2006-2007). Οι φθορές που παρατηρούνται σε τέτοια υλικά οφείλονται στην μεμονωμένη ή συνδυασμένη επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, χημανικών, φυσικοχημικών και βιολογικών παραγόντων σε συνδυασμό με την εσωτερική δομή των υλικών και τις ανθρώπινες επεμβάσεις. Οι φθορές διαχωρίζονται με βάση τη μορφολογία τους και διακρίνονται στις εξής :

1. «Ζαχαροειδής» ή περικρυσταλλική φθορά.

Εμφανίζεται σε περιοχές της επιφάνειας που είναι εκτεθιμένες στη βροχή. Οφείλεται στην όξινη προσβολή πετρωμάτων, όπως μάρμαρα και ασβεστόλιθοι, από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους (οξείδια του άνθρακα, του θείου, του αζώτου όπου με την παρουσία νερού της βροχής μετατρέπονται σε αραιά οξέα – όξινη βροχή). Η φθορά αυτή εκδηλώνεται με την προσβολή των κόκκων του πετρώματος, που οδηγεί στην απώλεια της συνοχής τους και τελικά στην τελική πτώσης τους.

2. Γυψοποίηση.

Η γυψοποίηση ή θείωση του μαρμάρου εκδηλώνεται σε περιοχές του πετρώματος που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής, κατά την οποία το ανθρακικό ασβέστιο μετατρέπεται σε γύψο που παραμένει στην επιφάνεια, και μέχρι ένα ορισμένο πάχος διατηρεί το ανάγλυφό της.

3. Επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων.

Σε περιοχές όπου παραμένουν στεγασμένες από το νερό της βροχής παρατηρούνται επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως αιθάλη, υδρογονάνθρακες, οξείδια μετάλλων όπου οφείλονται οι χρωματικές αλλοιώσεις της επιφάνειας του πετρώματος. Η επάλληλη εναπόθεση γύψου, επικαθίσεων και ανακρυσταλλωμένου ανθρακικού ασβεστίου σχηματίζει τις μαύρες κρούστες.

4. Θραύσεις.

Πολλά μέρη του πετρώματος είναι σπασμένα με αποτέλεσμα την αλλοίωση της μορφολογίας τους αλλά και της γεωμετρίας τους. Η διάδοση και ο προσανατολισμός των θραύσεων εμφανίζεται είτε με τη μορφή ρηγματώσεων ή με τη μορφή αποφλοιώσεων, που είναι η απόσχιση- απόσπαση μεγάλων τεμαχών από την επιφάνεια του πετρώματος. Οι περισσότερες ρωγμές δημιουργούνται από την οξείδωση και διόγκωση των σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων. Ρωγμές βέβαια δημιουργούνται και σε περιοχές ορυκτολογικής ετερογένειας του πετρώματος (με αργιλοπυριτικές προσμίξεις), όπως επίσης και από μηχανικά ή θερμικά αίτια (σεισμοί, πυρκαγιές κ.τ.λ.).

5. Αποσάθρωση και απολεπίσεις.

Αποσάθρωση και απολέπιση παρατηρείται σε περιοχές του πετρώματος με μειωμένη συνοχή, με αποτέλεσμα τη διείσδυση και συγκράτηση μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται σε συνδυασμό πολλών παραγόντων, όπως στη μικροδομή του πετρώματος, στη θερμική καταπόνηση, στην κυκλοφορία διαλυτών αλάτων κ.τ.λ.

6. Κυψελοειδής διάβρωση.

Η κυψεοειδής διάβρωση εμφανίζεται στις επιφάνειες του πετρώματος με τη μορφή οπών σποραδικά ή σε συστάδες. Οφείλεται στη δράση μικροοργανισμών, η

ανάπτυξη των οποίων ευνοείται από την παρουσία υγρασίας. Παρατηρείται κυρίως στις βόρειες όψεις των μνημείων και είναι εντονότερη στις ζώνες αργιλοπυριτικών φλεβών.

7. Αστοχία παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης.

Εκτός από την οξείδωση που μπορεί να υποστούν τα πετρώματα από την τοποθέτηση σιδηρών στοιχείων, προβλήματα μπορούν να δημιουργηθούν και από την τοποθέτηση κονιάματος που αποσκοπούν στη συγκόλληση θραυσμάτων και τις σφραγίσεις ρωγμών. Το κονίαμα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να έχει παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες με αυτές του πετρώματος.

8. Βιολογική φθορά.

Στις επιφάνειες των πετρωμάτων διαπιστώνεται η παρουσία ποικίλων μικροβιακών πληθυσμών, βακτηρίων, μυκήτων και λειχήνων. Η συμβολή του βιολογικού παράγοντα είναι σημαντική στη φυσικοχημική φθορά του πετρώματος. Η επιλιθική και ενδολιθική μικροχλωρίδα αλλοιώνει χρωματικά την επιφάνεια των μνημείων. Η έκκριση διαβρωτικών ενώσεων από ορισμένους μικροοργανισμούς οδηγεί στη διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου, ενώ επίσης ένα κομμάτι της μικροχλωρίδας ασκεί μικροπιέσεις με αποτέλεσμα τη φθορά της επιφάνειας.

3. Ενόργανες Μέθοδοι Ορυκτολογικής Ανάλυσης

3.1 Γενικά

Οι ενόργανες μέθοδοι ορυκτολογικής ανάλυσης δίνουν πληροφορίες τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές για τη δομή, τη σύσταση αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ορυκτών πρώτων υλών. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες, προσδιορίζονται με απλές ή πολύπλοκες συσκευές και ηλεκτρονικά όργανα. Οι συσκευές και η λειτουργία των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των ιδιοτήτων των ορυκτών στηρίζονται σε κάποιες βασικές αρχές της φυσικής ή της χημείας.

Οι περισσότερες μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν κάποια μορφή εισαγόμενης ενέργειας και εξαγώμενης ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να έχει τη μορφή φωτονίων, ηλεκτρονίων, ακτίνων-Χ, ενεργοποιημένων ιόντων, ορατού φωτός, υπεριώδους φωτός, υπέρυθρου φωτός, θερμότητας ή κινητικής ενέργειας.

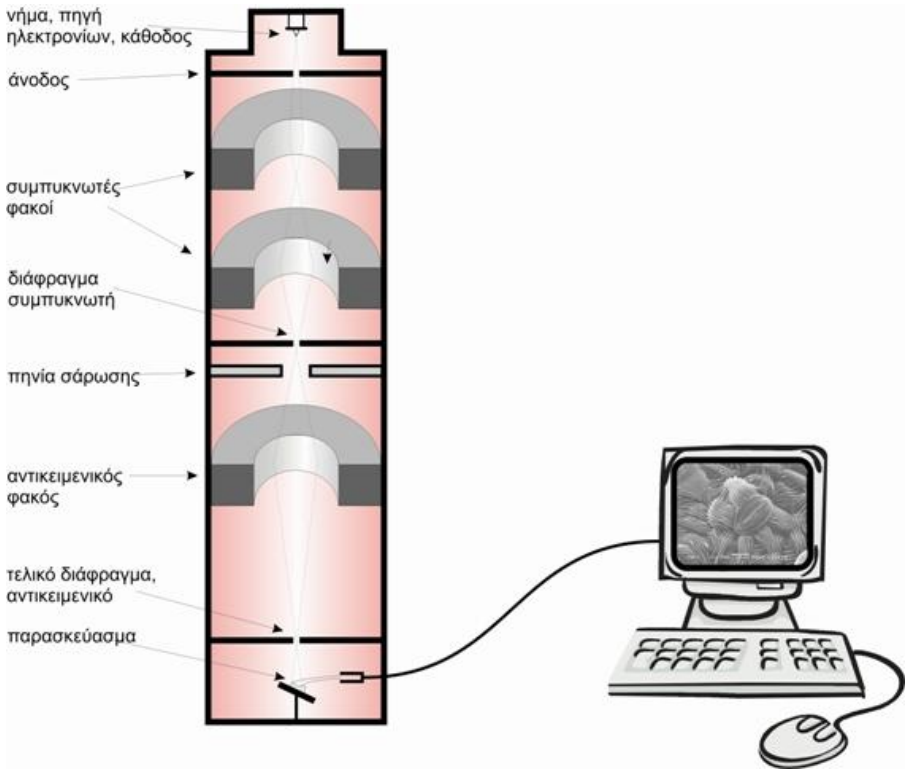
3.2 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία έγινε υπό την επίβλεψη υπεύθυνου προσωπικού, όπως ορίστηκε από την αρμόδια Εφορία Αρχαιοτήτων. Συνολικά συλλέχθηκαν 26 δείγματα λίθων. Τα δείγματα που πάρθηκαν ήταν ήδη αποκολλημένα θραύσματα πετρωμάτων και ανήκαν σε σημεία χαμηλότερης αισθητικής αξίας (τείχη, βράχος, έδαφος). Τα περισσότερα δείγματα βρέθηκαν στο έδαφος, σε λαξευμένες κοιλότητες ή σε αρμούς τοιχοποιίας.

Στην περίπτωση των επιφανειακών επικαθίσεων ή κρουστών, η λήψη έγινε με απόξεση υλικού από την επιφάνεια του πετρώματος ή με τη χρήση νυστεριού, όταν αυτό ήταν απαραίτητο (κρούστα καλά προσκολλημένη στο υπόστρωμα). Τα δείγματα που πάρθηκαν με αυτό τον τρόπο ήταν 4. Επίσης, συγκεντρώθηκε χαλαρό υλικό από κοιλότητες των λαξευμένων πετρωμάτων και από τα υπολλείματα αποσαθρωμένου υλικού αρχικά μορφοποιημένων ωμών πλίνθων με στόχο να προσδιοριστεί η ορυκτολογική τους σύσταση με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ αλλά και να γίνει παρατήρηση της μορφολογίας τους και ποιοτική ανάλυση με σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Συλλέχθηκαν 6 δείγματα, εκ των οποίων τα 4 προέρχονται από λαξευμένες κοιλότητες και αποτελούν ολικές αποθέσεις.

3.3 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM :Scanning Elecron Microscope) είναι ένα σύγχρονο όργανο που η λειτουργία του στηρίζεται σε μικροδέσμες ηλεκτρονίων. Η τεχνική της ανάλυσης με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή στηρίζεται στη μέτρηση της έντασης των χαρακτηριστικών ακτίνων-Χ που δημιουργούνται από το βομβαρδισμό του δείγματος με ηλεκτρόνια. Το δείγμα είναι συνήθως μία στιλβωμένη τομή πετρολογική ή μεταλλογραφική. Η σύσταση ενός κόκκου ορυκτού ή διαφοροποιήσεις εντός αυτού μπορούν να προσδιοριστούν με ανάλυση διαστήματος 2μm.



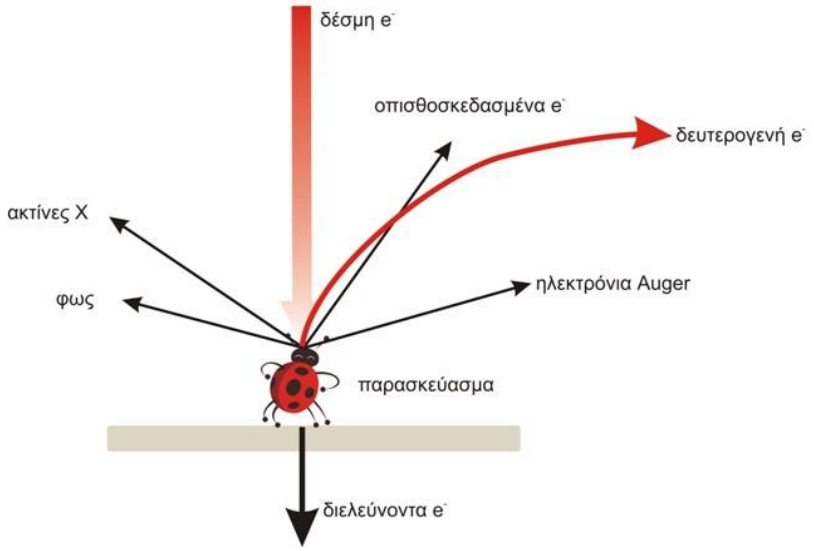
Εικ.3 Σχηματικό διάγραμμα των κύριων τμημάτων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, SEM.

Στον μικροαναλυτή δημιουργούνται (υπό κενό) ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας από ένα νήμα, συνήθως βολβραμίου (W). Τα ηλεκτρόνια εστιάζονται με τη χρήση μιας σειράς ηλεκτρομαγνητικών φακών, σε μία λεπτή δέσμη. Καθώς η δέσμη των ηλεκτρονίων πέφτει στο στόχο (δείγμα) παράγονται χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ και διάφοροι τύποι ηλεκτρονίων, που χρησιμοποιούνται για να αποκτήσουμε την εικόνα του ορυκτού και την ποσοτική χημική ανάλυση με την σύγκριση των σημάτων των ακτίνων-Χ με αυτά ενός πρώτυπου δείγματος, γνωστής χημικής σύστασης. Τα παρασκευάσματα των δειγμάτων και των πρωτύπων γνωστής σύστασης πρέπει να είναι πολύ καλά στιλβωμένα και καλυμμένα με λεπτό στρώμα άνθρακα (C ~20nμ) ώστε να γίνονται αγώγιμα.)

Η εκπομπή των ηλεκτρονίων γίνεται από το θερμενόμενο νήμα που βρίσκεται στον πυροβόλο ηλεκτρονίων μέσα στον κύλινδρο Wehnelt. Από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του νήματος και της ανόδου που βρίσκεται στη βάση της πυροβόλου ηλεκτρονίων (10-30 kV), προκαλείται επιτάχυνση των ηλεκτρονίων και διέλευσής τους από την οπή ανόδου. Η δέσμη των ηλεκτρονίων εισέρχεται στην κολώνα του ηλεκτρονικού μικροαναλυτή, η οποία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να εστιάζεται σε μία κηλίδα διαμέτρου 0.1-1 μm στην επιφάνεια του δείγματος. Η εστίαση επιτυγχάνεται με ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και σχισμές, ώστε να ελλατώνεται το μέγεθος του ειδώλου του νήματος. Ο συγκεντρωτικός φακός και η συνοδός του σχισμή χρησιμεύουν για τον έλεγχο της έντασης του ρεύματος της δέσμης. Υψηλότερη ένταση του ρεύματος της δέσμης αντιστοιχεί σε υψηλότερο αριθμό φωτονίων από το δείγμα και επομένως καλύτερα χημικά δεδομένα.

Ο αντικειμενικός φακός και η συνδεδεμένη με αυτόν σχισμή χρησιμεύουν για την εστίαση ή όχι της ηλεκτρονικής δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος. Όσο καλύτερη είναι η εστίαση της δέσμης, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση της εικόνας.

Όταν μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων χτυπήσει το δείγμα στην επιφάνεια, εισέρχεται στο δείγμα οπότε τα ηλεκτρόνια χάνουν την ενέργεια τους λόγω της αλληλεπίδρασης με τα ηλεκτρόνια των στοιβάδων των διάφορων ατόμων του δείγματος. Με τη διεργασία αυτή γίνεται διάχυση της δέσμης ηλεκτρονίων και σχηματίζεται ένας διεγερμένος όγκος στο δείγμα, το μέγεθος του οποίου αυξάνεται με την αύξηση του δυναμικού επιτάχυνσης στο πυροβόλο ηλεκτρονίων και την ελλάτωση του μέσου ατομικού αριθμού του δείγματος. Για παράδειγμα, ένα πυριτικό ορυκτό διεγερμένο στα 15kV, ο διεγερμένος όγκος έχει αχλαδοειδές σχήμα με διάμετρο 2μm και βάθος 3μm. Στο χώρο αυτό δημιουργούνται πολλά σήματα (δευτερογενή ηλεκτρόνια, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια Auger, καθοδοφωταύγεια, φθορισμός, συνεχές φάσμα) εκτός από τις χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ που προέρχονται από τον ιονισμό των εσωτερικών ηλεκτρονικών στοιβάδων (K, L, M) κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν του φθορισμού των ακτίνων-Χ και οι ποίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση.



Εικ.3.1 Διάφοροι τρόποι αλληλεπίδρασης παρασκευάσματος και δέσμης επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων.

Τα ηλεκτρόνια της δέσμης μπορούν να επιβραδύνουν καθώς ταξιδεύουν στα πεδία Coulomb γειτονικών ατόμων στο δείγμα. Αυτή η επιβράδυνση έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ακτίνων-Χ μεγάλου εύρους ενεργειών που ονομάζονται Bremsstrahlung (X-ray continum). Οι ακτίνες αυτές δημιουργούν ένα θόρυβο ο οποίος επηρεάζει το επίπεδο της ελάχιστης περιεκτικότητας του στοιχείου που προσδιορίζεται, δηλαδή το όριο ανιχνευσιμότητας. Είναι σημαντικό επίσης το ότι παρότι η δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να εστιαστεί σε διάμετρο 0.1μm ή μικρότερη, η διάχυση των ηλεκτρονίων εντός του δείγματος προκαλεί σήματα ακτίνων-Χ που φέρουν αναλυτικές πληροφορίες από όλο το διεγερμένο όγκο.

Οι ηλεκτρικοί μικροαναλυτές έχουν συνήθως δύο ή περισσότερα σπεκτρόμετρα ακτίνων-Χ διασποράς μήκους κύματος (WDS) που μπορούν να μετρήσουν εντάσεις ακτίνων-Χ σε προεπιλεγμένες γωνίες ανάκλασης και θορύβου, με χρήση και έλεγχο της κίνησής τους από υπολογιστή. Μετά από βαθμονόμηση και τις απαραίτητες διορθώσεις για την επίδραση του μέσου, τα αποτελέσματα παρέχουν ακριβείς προσδιορισμούς των κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων του δείγματος.

Όπως και στις άλλες μεθόδους ανάλυσης με ακτίνες-Χ, οι μετρήσεις έντασης των ακτίνων-Χ δεν συνδέονται απολύτως γραμμικά με τη συγκέντρωση των στοιχείων αλλά επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της μάζας του δείγματος (σύσταση-απορρόφηση). Υπάρχουν ακριβείς μαθηματικές εκφράσεις για τη διόρθωση αυτών των επιδράσεων. Οι πιο σημαντικές διορθώσεις ονομάζονται ZAF αφού λαμβάνονται υπόψιν γι'αυτές οι φυσικές επιδράσεις του ατομικού αριθμού (Z), της απορρόφησης των ακτίνων-Χ (X-ray absorption) και του δευτερογενούς φθορισμού (F).

Βασικές Άρχες Του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου

Η πρόσπτωση «σημειακής» δέσμης ηλεκτρονίων σε δείγμα επιφέρει εκπομπή δευτερευόντων ηλεκτρονίων (SE- secondary electrons), οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE- backscattered electrons), ακτίνων-Χ και ακτινοβολίας καθοδοφωταύγειας από διάμετρο περίπου 100 armstrong. Η δέσμη σαρώνει το δείγμα και ανιχνεύονται τα εκπεμπόμενα σήματα από τις σαρωνόμενες περιοχές. Αυτά εστιάζονται σε φθορίζουσα οθόνη και μετά σε φωτογραφικό φιλμ ή εκτυπωτή.

Προετοιμασία Του Δείγματος

Τα κυριότερα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για οποιαδήποτε εφαρμογή ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης είναι τα εξής :

1. Η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να είναι καθαρή. Για να παρατηρηθεί η εσωτερική δομή πρέπει να προηγηθεί κοπή, λείανση και στίλβωση. Σε μερικές περιπτώσεις το δείγμα προσβάλλεται χημικά ή ιοντικά.
2. Η αρχική μορφολογική δομή πρέπει να διατηρηθεί. Ευαίσθητα στο κενό δείγματα πρέπει να τυγχάνουν ιδιαίτερης μεταχείρησης(π.χ. να αφυδατώνονται, να σταθεροποιούνται μηχανικά, να ξηραίνονται ή να καταψύχωνται).
3. Το δείγμα δεν πρέπει να αποκτά ηλεκτροστατικό φορτίο. Η κατακράτηση του φορτίου αποφεύγεται επιμεταλλώνοντας το δείγμα, παρατηρώντας το με χαμηλή τάση επιτάχυνσης της δέσμης των ηλεκτρονίων ή κάτω από χαμηλή πίεση. Για την παρατήρηση λεπτομερειών της επιφάνειας του δείγματος η επιμετάλλωση του πρέπει να γίνει σε όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος. Υπάρχουν διάφορες συσκευές επιμετάλλωσης δειγμάτων. Για παρατήρηση της μορφολογίας είναι προτιμότερη η επιμετάλλωση με χρυσό, ενώ καλύτερα ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα σε λεπτές τομές πετρωμάτων ή μεταλλογραφικών παρασκευασμάτων λαμβάνονται επιμεταλλώνοντας με άνθρακα.

Μέρη Του SEM

Η λειτουργία των διάφορων μερών που διέρχονται σε διάφορες ακτινοβολίες στο SEM γίνεται σε υψηλό κενό. Αυτό γίνεται για να μην σκεδάζονται ή απορροφώνται τα πρωτογενή και τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, καθώς και οι άλλες ακτινοβολίες από τα μόρια του αέρα.

Τα κυριότερα μέρη ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης είναι τα παρακάτω :

1. **Πυροβόλο ηλεκτρονίων.**

   Εκεί δημιουργείται η δέσμη ηλεκτρονίων από ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου (κάθοδος), το οποίο βρίσκεται σε τάση επιτάχυνσης 30-60 kV με μεταλλική άνοδο. Το ρεύμα δέσμης (ορίζεται ως το ρεύμα-ένταση των ηλεκτρονίων που φτάνουν στο δείγμα) μπορεί να μεταβάλλεται από 1pA έως 1μA ανάλογα με το αν θα ανιχνευτούν τα δευτερογενή ή τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια ή οι ακτίνες-Χ.

2. **Φακοί Εστίασης Δέσμης.**

   Η δέσμη προσπίπτει εστιαζόμενη στο δείγμα, αφού περάσει από σύστημα συγκλινόντων και αντικειμενικών ηλεκτρομαγνητικών φακών. Οι συγκλίνοντες φακοί επίσης χρησιμοποιούνται στη ρύθμιση του ρεύματος της δέσμης.

3. **Τράπεζα Δείγματος.**

   Η τράπεζα που συγκρατεί το προς ανάλυση δείγμα, επιτρέπει περιστροφική του κίνηση, κλίση καθώς και κίνηση στις τρεις διευθύνσεις Χ, Ψ και Ζ. Μία εύκεντρη τράπεζα δεν χάνει την εστίαση της κατά την κλίση του δείγματος. Το ποσό των δευτερευόντων ηλεκτρονίων και αυτών της οπισθοσκεδάσεως είναι ανάλογο της κλίσης του δείγματος.

4. **Ανιχνευτές.**

   Όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων προσπίπτει σε ένα δείγμα, εκτός από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που δημιουργούνται και μας πληροφουρούν για την τοπογραφία του δείγματος, παρατηρούνται και άλλα σήματα που οφείλονται σε διαφυγή και άλλων ειδών ηλεκτρονίων ή ακτινοβολιών, όπως ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης, ακτίνες-Χ και καθοδοφωταύγειας. Αυτά τα σήματα δίνουν νέες πληροφορίες και χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης, που ουσιαστικά είναι τα πρωτογενή ηλεκτρόνια που ανακλάστηκαν, μας πληροφορούν κυρίως για τη σύσταση της επιφάνειας παρατηρήσεως, οι ακτίνες-Χ για τη

στοιχειακή (ποιοτική και ποσοτική) ανάλυση ενός δείγματος, η καθοδοφωταύγεια για τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του αναλυόμενου υλικού.

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι τα καταλληλότερα για παρατήρηση της εξωτερικής επιφάνειας ενός δείγματος επειδή η ενέργεια είναι πολύ χαμηλή και εκπέμπονται από ένα λεπτό στρώμα της επιφάνειας. Επίσης δίνουν ομοιόμορφη εικόνα χωρίς σκιάσεις. Η αντίθεση των λαμβανόμενων εικόνων από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια οφείλεται στην τοπογραφία-ανάγλυφο και προσανατολισμό του δείγματος, στο χημισμό της επιφάνειας του δείγματος και τέλος στις διαφορές του ηλεκτρικού δυναμικού που παρατηρούνται στην επιφάνεια του δείγματος.

Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης έχουν πολύ υψηλότερη ενέργεια από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και επομένως μεταφέρουν πληροφορίες από τα βαθύτερα στρώματα του δείγματος, ενώ δίνουν εικόνα με σκίαση. Η έντασή τους είναι μεγαλύτερη (και κατά συνέπεια η εικόνα που παράγουν είναι φωτεινότερη) καθώς αυξάνει ο μέσος όρος των ατομικών αριθμών των στοιχείων που συνιστούν την βομβαρδισμένη περιοχή του δείγματος. Για παράδειγμα, η πρόσπτωση της δέσμης σε άνθρακα επιφέρει ανάκλαση λιγότερη από 10% των πρωτογενών ηλεκτρονίων, ενώ κατά την πρόσπτωση σε ουράνιο εξέρχονται πάνω από το 50%.

Για κάθε είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το δείγμα πρέπει να υπάρχει ο κατάλληλος ανιχνευτής. Έτσι σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να προσαρμόσουμε ένα ή περισσότερους ανιχνευτές, όπως ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων, ανιχνευτή ηλεκτρονίων οπισθοσκέδασης, ανιχνευτή ακτίνων-Χ και ανιχνευτή καθοδοφωταύγειας.

Οι ανιχνευτές των ηλεκτρονίων οπισθοσκέδασης είναι ευρυγώνιοι για τη λήψη όσο γίνεται περισσότερων ηλεκτρονίων οπισθοσκέδασης, ενώ πριν από τον ανιχνευτή τα δευτερογενή ηλεκτρόνια απωθούνται με εφαρμογή αρνητικού δυναμικού (-100 έως -300 V). Καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται με τοποθέτηση δύο ανιχνευτών ή δύο τμημάτων του ίδιου ανιχνευτή εκατέρωθεν του δείγματος.

Η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση του φάσματος που δίνουν οι ανιχνευτές ακτίνων-Χ γίνεται και εδώ βαθμονομώντας το όργανο χρησιμοποιώντας στάνταρ δείγματα γνωστής χημικής σύστασης, ενώ πρέπει επίσης να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις για τα σφάλματα που υπεισέρχονται (νεκρού χρόνου, απορρόφησης matrix, κ.τ.λ.) με το πρόγραμμα ZAF.

5. Σύστημα Υπολογιστή Και Οργάνων Παρατηρήσεως.

Όλες οι λειτουργείες των διάφορων μερών του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων των ανιχνευτών γίνονται μέσω μονάδων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι πληροφορίες από τους ανιχνευτές μετατρέπονται εκεί σε ηλεκτρικά σήματα, ενισχύονται και τελικά τροφοδοτούν τις οθόνες των υπολογιστών ως εικόνες.

3.4 Περιθλασιμετρία Ακτίνων-Χ (XRD : X-Ray Diffraction)

Βασικές Αρχές

Η περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ είναι μέθοδος ανίχνευσης και ταυτοποίησης μιας δομής που παρουσιάζει περιοδικότητα (συνήθως κρυσταλλικής). Βασίζεται στο φαινόμενο περίθλασης των ακτίνων-Χ, μέσα από ένα δίκτυο επαναλαμβανόμενων δομικών μονάδων και μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τη δομή ενός κρυστάλλου ορυκτού ή για ανάλυση ορυκτών φάσεων ενός πετρώματος. Το δείγμα εισάγεται στο περιθλασιόμετρο κονιοποιημένο έτσι ώστε οι δομές να διατάσσονται με όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς. Έτσι θα υπάρχει πάντα τουλάχιστον μία δομή που θα είναι κατάλληλα προσανατολισμένη για να γίνει η περίθλαση των ακτίνων-Χ. Περίθλαση συμβαίνει μόνο όταν έχουμε μία σχεδόν μονοχρωματική δέσμη που κατευθύνεται και διέρχεται από ένα περιοδικά διατεταγμένο σύστημα. Η διακριτική ικανότητα του οργάνου είναι περίπου 3%.

Χαρακτηριστικά Των Ακτίνων-Χ

Όσον αφορά τη φύση των ακτίνων-Χ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος, λ, στο μέγεθος της στοιχειώδους κυψελίδας : $0.1A < \lambda < 100A$ (A: armstrong).

Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα και ένα γραμμικό, τα οποία επικαλύπτονται. Το γραμμικό φάσμα εξαρτάται από το υλικό της ανόδου, ενώ το συνεχές φάσμα προέρχεται από την εκπομπή φωτονίων κατά την επιβράδυνση των ηλεκτρονίων βλημάτων μετά την κρούση τους στα ηλεκτρόνια του μετάλλου της

ανόδου. Το συνεχές φάσμα αποτελεί το θόρυβο ο οποίος πρέπει να απομακρύνεται και αυτό γίνεται με ειδικά φίλτρα.

Το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων-Χ δίνεται από τη σχέση :

$$\lambda = c.h / e.V$$

Όπου :

λ= μήκος κύματος.

c= ταχύτητα του φωτός (3.10^{8}m/s).

h= σταθερά του Planck ($6.63.10^{-34}$J.s).

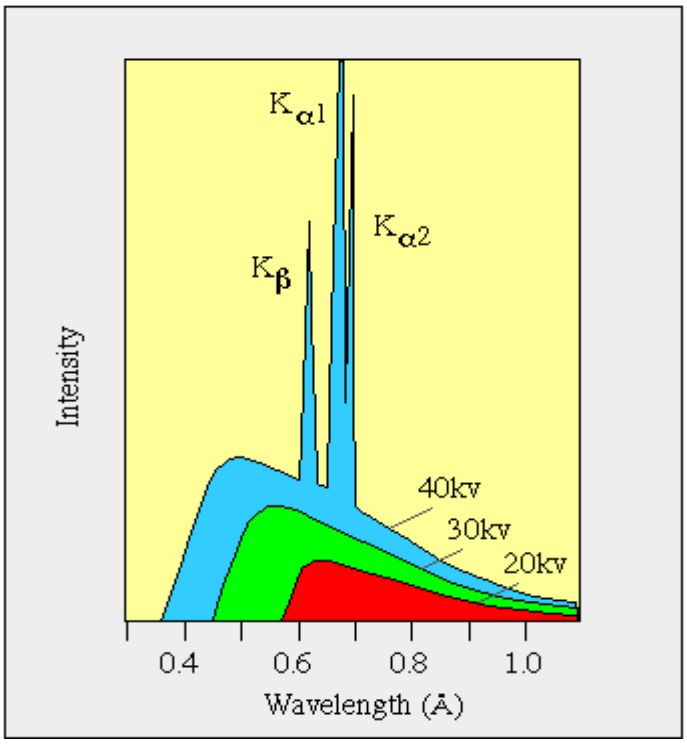
e= φορτίο ηλεκτρονίων ($1.6.10^{-19}$C).

V= τάση επιτάχυνσης.

Για την αποτελεσματική χρήση των ακτίνων-Χ απαιτείται αυτές να είναι μονοχρωματικές. Ο μονοχρωματισμός των ακτίνων-Χ πραγματοποιείται με ειδικά μεταλλικά φίλτρα, που εξαρτώνται κάθε φορά από τον μεταλλικό στόχο. Για παράδειγμα, όταν ο μεταλλικός στόχος είναι χαλκός (Cu), που είναι και ο πιο συνηθισμένος, τότε το μεταλλικό φίλτρο που χρησιμοποιείται είναι νικέλιο (Ni). Τα φίλτρα αυτά ονομάζονται μονοχρωματιστές. Οι μονοχρωματιστές επιτρέπουν τη διέλευση της ισχυρότερης ακτινοβολίας (Κα) και απορροφούν τις υπόλοιπες, καθώς και αυτές του συνεχούς φάσματος. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή έχουν τις κατάλληλες ενδοατομικές αποστάσεις.

Θεμελιώδης Εξίσωση Του Bragg

Οι ακτίνες-Χ παράγονται όταν μία ισχυρή δέσμη ηλεκτρονίων (μεγάλης ενέργειας) προσπίπτει σε υλικά. Τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων απορροφούν την ενέργεια, μεταφέρονται σε υψηλότερες στοιβάδες και τελικά μεταπιδούν στην αρχική τους στοιβάδα, εκπέμποντας ενέργεια. Αυτή η ενέργεια φαίνεται σαν ένα φάσμα συχνοτήτων . Κάποιες συχνότητες είναι αρκετά υψηλές, αυτές που ταυτίζονται με τις διάφορες μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων των ατόμων του συγκεκριμένου υλικού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ακτίνων-Χ.



Εικ.3.2 Διάγραμμα των εντάσεων των ενεργειών από τις αποδιεγέρσεις.

Οι ακτίνες-Χ κατευθύνονται με μορφή δέσμης πάχους μερικών χιλιοστών, ή πλέον μερικών μικρών για τα πιο σύγχρονα μηχανήματα (μέχρι και 10μm). Τα δείγματα μπορεί να είναι σε σκόνη ή και μονοκρύσταλλοι. Οι ακτίνες-Χ υπόκεινται περίθλαση, δηλαδή πολλαπλές ανακλάσεις μεταξύ των ατόμων του δείγματος. Κατά την περιστροφή του κρυστάλλου ως προς τη δέσμη των ακτίνων-Χ, μόνο σε ορισμένες γωνίες συμβαίνει οι ακτίνες-Χ να ανακλώνται από την επιφάνεια του δείγματος, επιφάνειες στις οποίες ισχύει ο νόμος του Bragg :

$n\lambda = 2d\eta\mu\theta$

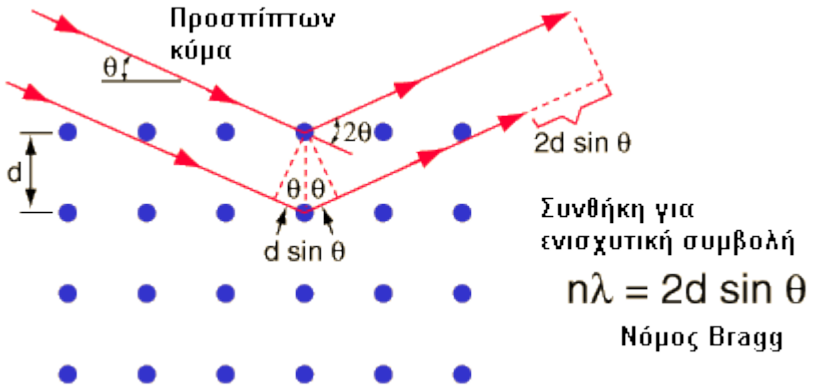
Όπου :

n= 1, 2, 3….., ακέραιος αριθμός.

λ= μήκος κύματος της δέσμης των ακτίνων-Χ, που είναι γνωστό και εξαρτάται από το στοιχείο της καθόδου (π.χ. Cr δίνει Κα στα 2.29092 nm, ο Cu δίνει την Κα στα 1.54178 nm κ.τ.λ.).

θ= γωνία πρόσπτωσης ή ανάκλασης της ακτίνας-Χ σε σχέση με τα κρυσταλλικά επίπεδα και ορίζεται ανάλογα με το ρυθμό περιστροφής του δείγματος.

d= αποστάσεις των διαφορετικών ατόμων στο πλέγμα του κρυστάλλου.

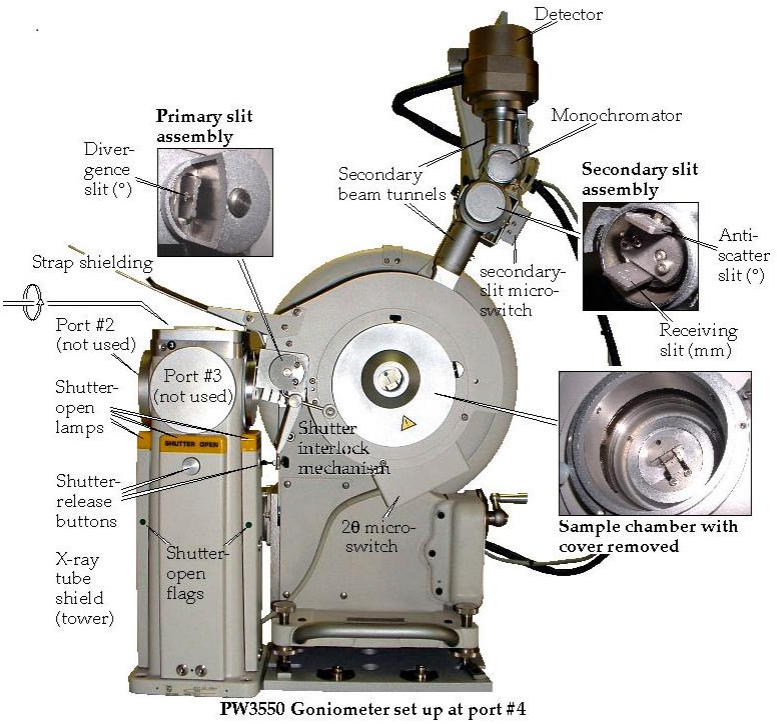


Εικ.3.3 Νόμος ή Εξίσωση του Bragg.

Περιθλασιόμετρο Ακτίνων-Χ

Τα κυριότερα μέρη ενός περιθλασιόμετρου ακτίνων-Χ είναι τα εξής :

1. Ανιχνευτής.
2. Πρωτογενές και δευτερογενές γωνιόμετρο.
3. Χώρος τοποθέτησης δείγματος.
4. Μονοχρωματιστής.
5. Καταγραφικό.

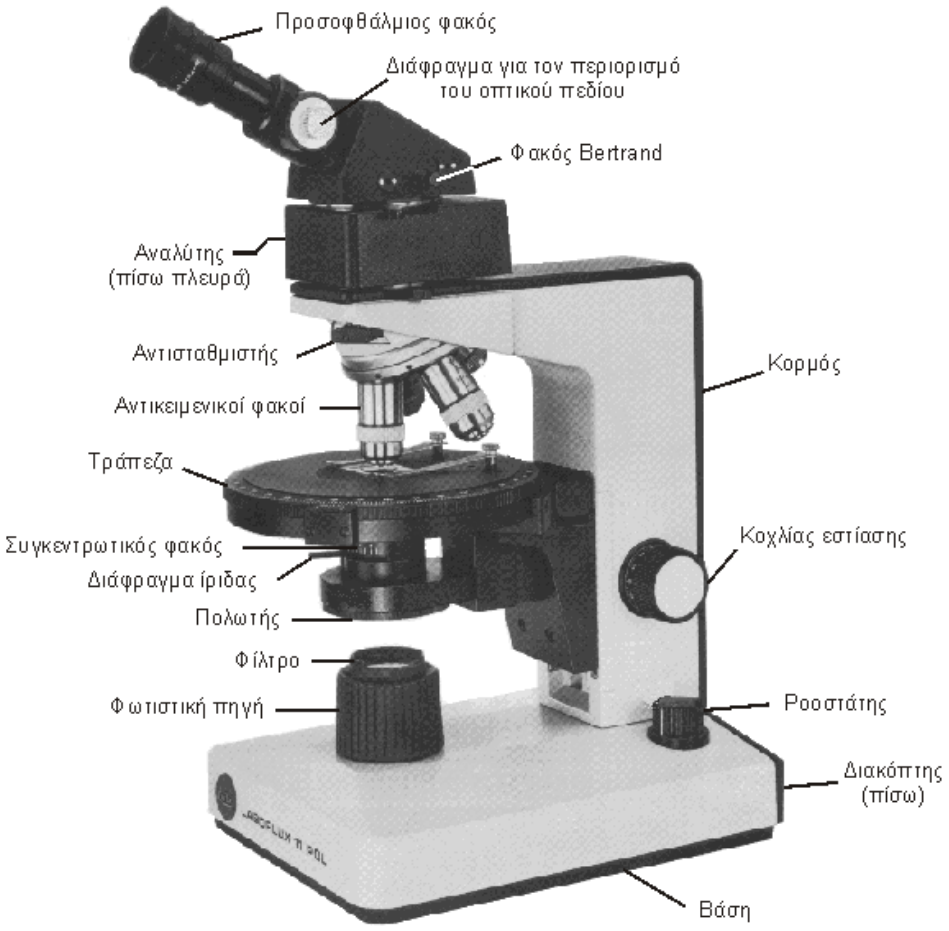


Εικ.3.4 Περιθλασιόμετρο ακτίνων-Χ.

Τελικά, τα αποτελέσματα είναι ένα διάγραμμα με οριζόντιο άξονα τη γωνία θ, ή καλύτερα τη γωνία 2θ αφού είναι το άθροισμα της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτίνας και κάθετο την ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν πολλαπλές κορυφές που αντιστοιχούν σε ανακλάσεις.

3.5 Οπτικό Μικροσκόπιο (Polarizing Microscope)

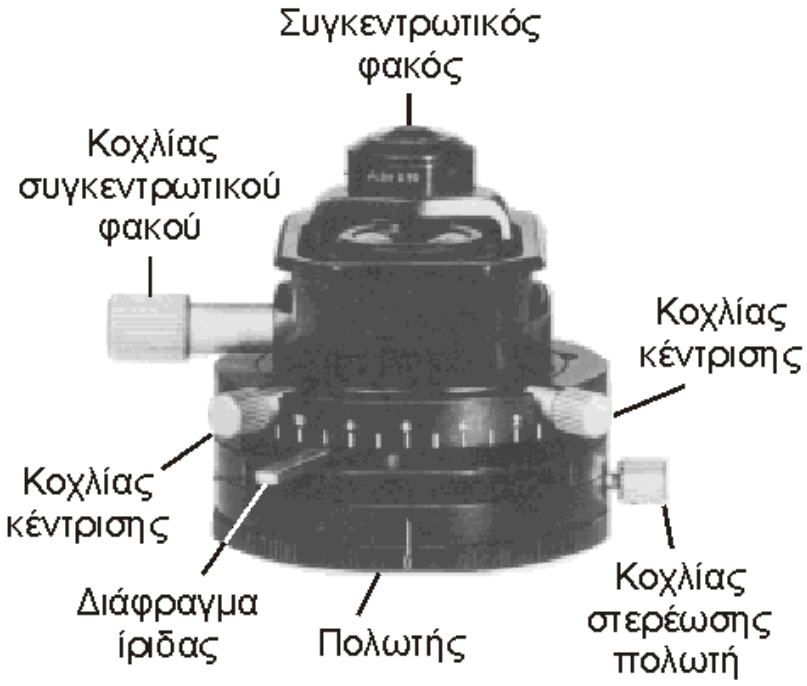
Το πολωτικό ή πετρογραφικό μικροσκόπιο διαφέρει από τα κοινά μικροσκόπια διότι έχει μία στρεφόμενη τράπεζα και δύο πολωτικά φίλτρα, τον πολωτή και τον αναλυτή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων πολωτικών ή πετρογραφικών μικροσκοπίων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το LABORLUX 11 POL της LEITZ (Εικ.3.5) (http://www.geo.auth.gr/212/0_properties/microscope.htm).



Εικ.3.5 Πολωτικό ή πετρογραφικό μικροσκόπιο LABORLUX 11 POL της LEITZ, στο οποίο αναγράφονται όλα τα μέρη του μικροσκοπίου.

Τα μέρη του μικροσκοπίου, από κάτω προς τα πάνω, είναι τα εξής :

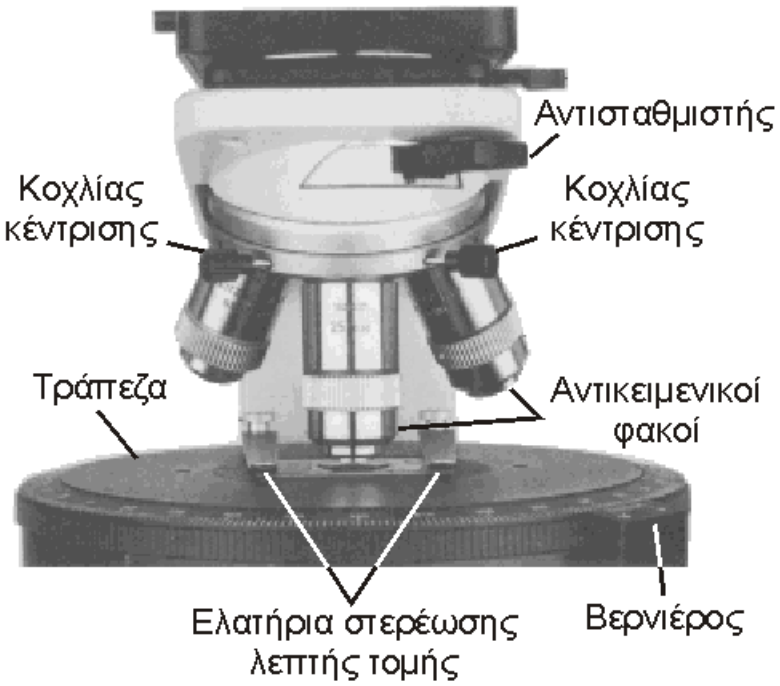
1. Φωτιστική πηγή (Εικ.3.5) : βρίσκεται στη βάση του μικροσκοπίου και αποτελείται από μία λάμπα αλογόνου λευκού φωτός και ένα σύστημα φακών και κατόπτρων, που κατευθύνουν το φως προς τα επάνω. Η ένταση του φωτός ρυθμίζεται με ένα ροοστάτη. Επάνω από τη φωτιστική πηγή υπάρχει θέση για κάποιο φίλτρο που βοηθά σε πιο ξεκούραστη παρατήρηση.
2. Πολωτής (Εικ.3.5, Εικ.3.5.1) : ο πολωτής είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω από τη φωτιστική πηγή. Αποτελείται από ένα πολωτικό φίλτρο που μετατρέπει το φυσικό φως σε ευθύγραμμα πολωμένο. Στο συγκεκριμένο μικροσκόπιο η διεύθυνση κράδανσης του πολωτή είναι Α- Δ. Ο πολωτής έχει τη δυνατότητα περιστροφής ώστε η διεύθυνση κράδανσης του πολωμένου φωτός να λαμβάνει διάφορες θέσεις.
3. Διάφραγμα ίριδας (Εικ.3.5, Εικ.3.5.1) : το διάφραγμα ίριδας ή απλώς διάφραγμα βρίσκεται πάνω από τον πολωτή και ρυθμίζει τη διάμετρο της φωτεινής δέσμης, που περνά από το μικροσκόπιο. Κλείνοντας το διάφραγμα μειώνεται η διάμετρο της φωτεινής δέσμης και τα όρια των ορυκτών διαγράφονται εντονότερα. Η δέσμη αποτελείται από σχεδόν παράλληλες φωτεινές ακτίνες και η παρατήρηση που γίνεται με τέτοιο φωτισμό ονομάζεται ορθοσκοπική παρατήρηση. Κατά την ορθοσκοπική παρατήρηση το διάφραγμα πρέπει να είναι ελαφρά κλειστό, ενώ αντίθετα κατά την κωνοσκοπική παρατήρηση πρέπει να είναι τελείως ανοιχτό.
4. Συγκεντρωτικός φακός (Εικ.3.5, Εικ.3.5.1) : ο συγκεντρωτικός ή συγκλίνων φακός είναι τοποθετημένος πάνω από το διάφραγμα και κάτω από την τράπεζα του μικροσκοπίου και περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα έτσι ώστε να παρεμβάλλεται κατά βούληση στην πορεία του φωτός. Δημιουργεί μία ισχυρώς συγκλίνουσα δέσμη φωτός και χρησιμοποιείται για την κωνοσκοπική παρατήρηση, κατά την οποία σχηματίζονται κωνοσκοπικές εικόνες που εξετάζονται με το μεγάλης μεγέθυνσης αντικειμενικό φακό και το φακό Bertrand.



Εικ.3.5.1 Κομμάτι του μικροσκοπίου που διακρίνονται ο πολωτής, το διάφραγμα και ο συγκεντρωτικός φακός.

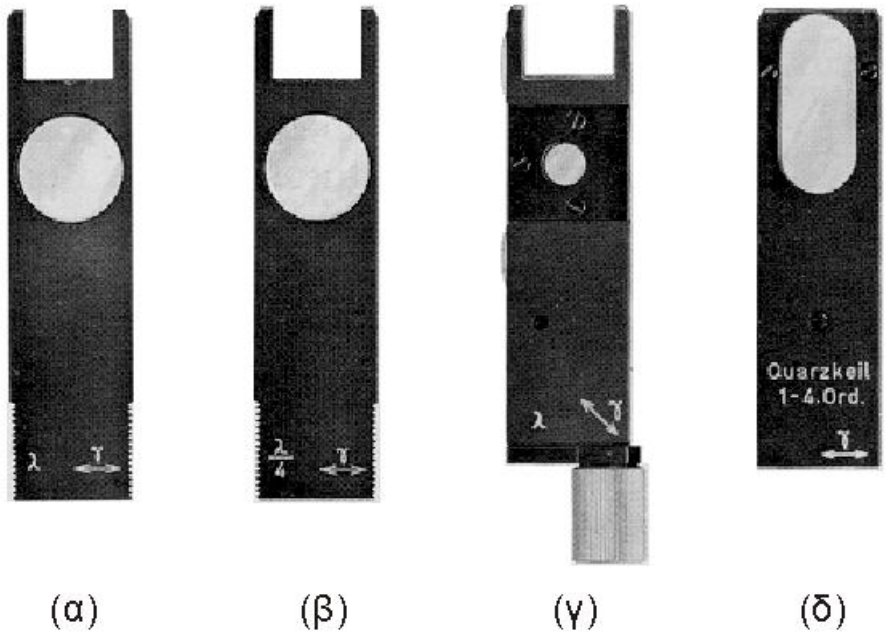
Ο πολωτής, το διάφραγμα και ο συγκεντρωτικός φακός αποτελούν συνήθως ένα ενιαίο σύστημα τοποθετημένο κάτω από την τράπεζα του μικροσκοπίου. Το σύστημα αυτό σε ορισμένα μικροσκόπια είναι εφοδιασμένο με έναν ανυψωτικό μηχανισμό που του επιτρέπει να ανεβοκατεβαίνει κατά βούληση.

5. Τράπεζα μικροσκοπίου (Εικ.3.5, Εικ.3.5.2) : η στρεφόμενη τράπεζα ή απλώς τράπεζα του πολωτικού μικροσκοπίου είναι κυκλική και τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφονται περί κατακόρυφο άξονα. Στην εξωτερική της πλευρά είναι βαθμολογημένη σε μοίρες και στο πλάι υπάρχει ένας βερνιέρος για την ακριβή μέτρηση διάφορων γωνιών. Η λεπτή τομή του πετρώματος τοποθετείται στο κέντρο της τράπεζας όπου υπάρχει μία οπή για να επιτρέπει τη διέλευση του φωτός.
6. Αντικειμενικοί φακοί (Εικ.3.5, Εικ.3.5.2) : οι αντικειμενικοί φακοί είναι μεγεθυντικοί φακοί προσαρμοσμένοι σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα.



Εικ.3.5.2 Κομμάτι του μικροσκοπίου που διακρίνονται η τράπεζα του μικροσκοπίου, οι αντικειμενικοί φακοί και ο αντισταθμιστής.

7. Αντισταθμιστής (Εικ.3.5, Εικ.3.5.2, Εικ.3.5.3) : τοποθετείται σε μία σχισμή υπό γωνία 45^{o}ως προς το σταυρόνημα ακριβώς πάνω από το περιστρεφόμενο σύστημα των αντικειμενικών φακών και κάτω από τον αναλυτή. Οι αντισταθμιστές είναι πλακίδια διπλοθλαστικών ορυκτών τοποθετημένα σε ένα μεταλλικό ή πλαστικό πλαίσιο, τα οποία περιέχουν ορισμένη διαφορά πορείας στο διερχόμενο φως. Στο πλαίσιο του αντισταθμιστή είναι χαραγμένη η διεύθυνση κράδανσης της αργής ακτίνας (μεγάλος δείκτης διάθλασης) του ορυκτού, η οποία συνήθως γίνεται κάθετα στη μεγάλη διάσταση του αντισταθμιστή.



Εικ.3.5.3 Διάφοροι τύποι αντισταθμιστών, α: αντισταθμιστής γύψου ή λ, β: αντισταθμιστής μοσχοβίτη ή λ/4, γ: αντισταθμιστής Berek, δ: σφήνα χαλαζία.

8. Αναλυτής (Εικ.3.5) : ο αναλυτής βρίσκεται πάνω από τους αντικειμενικούς φακούς και παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός κατά βούληση. Είναι όμοιος με τον πολωτή, έχει όμως διεύθυνση κράδανσης Β- Ν δηλαδή κάθετη σε αυτή του πολωτή. Ο πολωτής και ο αναλυτής αναφέρονται και ως Nicols, διότι στα πρώτα μικροσκόπια για την πόλωση του φωτός χρησιμοποιούνταν πρίσματα Nicols.

   Διασταυρωμένα Nicols (Nicols X) : όταν ο αναλυτής παρεμβάλλεται στη πορεία του φωτός, τότε ο πολωτής και ο αναλυτής είναι διασταυρωμένοι και η παρατήρηση γίνεται με πολωτή και αναλυτή ή με διασταυρωμένα Nicols. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τίποτα στην τράπεζα του μικροσκοπίου το πεδίο παρατήρησης φαίνεται σκοτεινό, διότι το πολωμένο φως που φτάνει στον αναλυτή έχει διεύθυνση κράδανσης κάθετη και επομένως δεν περνά.

   Παράλληλα Nicols (Nicols //) : όταν ο αναλυτής απομακρυνθεί από την πορεία του φωτός, τότε το πεδίο είναι φωτεινό. Ο πολωτής και ο αναλυτής είναι παράλληλοι και η παρατήρηση γίνεται μόνο με πολωτή ή με παράλληλα Nicols.

9. Φακός Bertrand (Εικ.3.5) : είναι μικρός φακός ακριβώς πάνω από τον αναλυτή και παρεμβάλλεται στη πορεία του φωτός κατά βούληση. Χρησιμεύει για την παρατήρηση των κωνοσκοπικών εικόνων.

10. Προσοφθάλμιος φακός (Εικ.3.5) : βρίσκεται στο πάνω μέρος του σωλήνα του μικροσκοπίου και μεγεθύνει το είδωλο που δημιουργείται από τους αντικειμενικούς φακούς. Η συνηθισμένη μεγέθυνση του προσοφθάλμιου φακού είναι 10x. Η ολική μεγέθυνση του μικροσκοπίου ισούται με το γινόμενο της μεγέθυνσης του αντικειμενικού επί τη μεγέθυνση του προσοφθάλμιου. Ο προσοφθάλμιος περιέχει το σταυρόνημα που αποτελείται από δύο κάθετα νήματα και εστιάζεται με την περιστροφή του ανώτερου τμήματος του προσοφθάλμιου.
11. Μηχανισμός εστίασης (Εικ.3.5) : η εστίαση πραγματοποιείται ανεβάζοντας ή κατεβάζοντας την τράπεζα με τη βοήθεια ενός ή δύο κοχλιών που βρίσκονται στον κορμό του μικροσκοπίου. Υπάρχει δυνατότητα για δύο εστιάσεις, μία κατά προσέγγιση με μεγάλες μετακινήσεις και μία λεπτομερή με πάρα πολύ μικρές μετακινήσεις.

4.Περιγραφή του Αρχαιολογικού Χώρου της Ελευσίνας

Σύμφωνα με την Καλλιόπη Παπαγγελή (2002) η περιήγηση του αρχαιολογικού χώρου αρχίζει από το ίδιο ακριβώς σημείο που ξεκινούσε το προσκύνημα του μύστη στην αρχαιότητα. Δηλαδή από την πλατεία που απέληγαν όλες οι οδοί πρόσβασης στο Ιερό. Κατά τη ρωμαϊκή περίοδο στο χώρο αυτό κατασκευάστηκε μία πλακόστρωτη αυλή και στο βόρειο-ανατολικό άκρο της πλατείας κατέληγε η Ιερά Οδός. Στο κέντρο της πλακόστρωτης αυλής σώζεται ένας ναός, ρωμαϊκών χρόνων και τα λείψανα δύο βωμών μπροστά από το ναό.

Στα βόρειο-δυτικά της κρηπίδας του ναού υπάρχει η πιο ιδιότυπη κατασκευή της αυλής, η «Εσχάρα» (υπόγειος ορθογώνιος βωμός). Τη νότια πλευρά της αυλής κλείνει το επιβλητικό κτίριο των Μεγάλων Προπυλαίων, που αποτελούσε την μνημειώδη είσοδο στο Ιερό. Τα Μεγάλα Προπύλαια αποτελούνται από δύο στοές, μία εξωτερική προς την πλευρά της αυλής και μία εσωτερική προς την πλευρά του Ιερού. Στα δυτικά των Μεγάλων Προπυλαίων, πάνω στην πλακόστρωση της αυλής, έχουν αναδιαταχθεί αρχιτεκτονικά μέλη από τη ανωδομή του κτιρίου και το αέτωμα της βόρειας όψης. Στα αριστερά των Προπυλαίων, δίπλα στη βόρειο-ανατολική γωνία τους και σε βαθύτερο επίπεδο κάτω από τη στάθμη της ρωμαϊκής αυλής υπάρχει το πηγάδι, το «Καλλίχορον Φρέαρ». Ανατολικά και δυτικά των Μεγάλων Προπυλαίων, μέσα στον περίβολο, εκτείνονται περιοχές με βοηθητικά κτίσματα, οικήματα ιερέων και κτίρια διοίκησης του Ιερού. Στα ανατολικά των Προπυλαίων συναντάμε επίσης και μία δεξαμενή ρωμαϊκών χρόνων και σιρούς που χρονολογούνται σε διαφορετικές περιόδους (αποθηκευτικοί χώροι σιτηρών).

Συνεχίζοντας, περνάμε στα Μικρά Προπύλαια. Το κτίριο αποτελείται από δύο προστώα, ένα εσωτερικό προς την πλευρά του Τελεστηρίου και ένα εξωτερικό προς τα βόρεια, τα οποία χωρίζονται με έναν εγκάρσιο τοίχο. Στα δεξιά των Μικρών Προπυλαίων υψώνεται ο βράχος της ακροπόλεως, που σε αυτό το σημείο σχηματίζει ένα σπήλαιο. Στο σπήλαιο χτίστηκε μεταγενέστερα και ένας ναός, το Πλουτώνειο. Μετά τα Μικρά Προπύλαια διασχίζουμε την πομπική οδό που συνέδεε τα Προπύλαια με το Τελεστήριο. Η οδός στρώθηκε με μαρμάρινες πλάκες που ελάχιστες σώζονται σήμερα. Διατηρείται όμως το υπόστρωμα που αποτελείται από ασβεστοκονίαμα και λίθους.

Διατρέχοντας όλο το μήκος της πομπικής οδού καταλήγουμε στο Τελεστήριο, όπου απέληξε η οδός. Τέλος, κάτω από το επίπεδο του Τελεστηρίου βρέθηκαν και αρχαιότερα οικοδομικά λείψανα παλαιότερων περιόδων (γεωμετρική περίοδο $8^{ο}$ αι. π.Χ.).

Δυτικά του Τελεστηρίου, κατά τη ρωμαϊκή εποχή, κατασκευάστηκε μία πλατεία και ένα τείχος (Διατείχισμα που χώριζε το Ιερό από την ακρόπολη) χτισμένο από τεφρούς ασβεστόλιθους. Στην νότια αυλή του Τελεστηρίου, ανατολικά του νότιου Πυλώνα, έχουμε το Βουλευτήριο και έτσι φεύγουμε από το τέμενος της Δήμητρας.

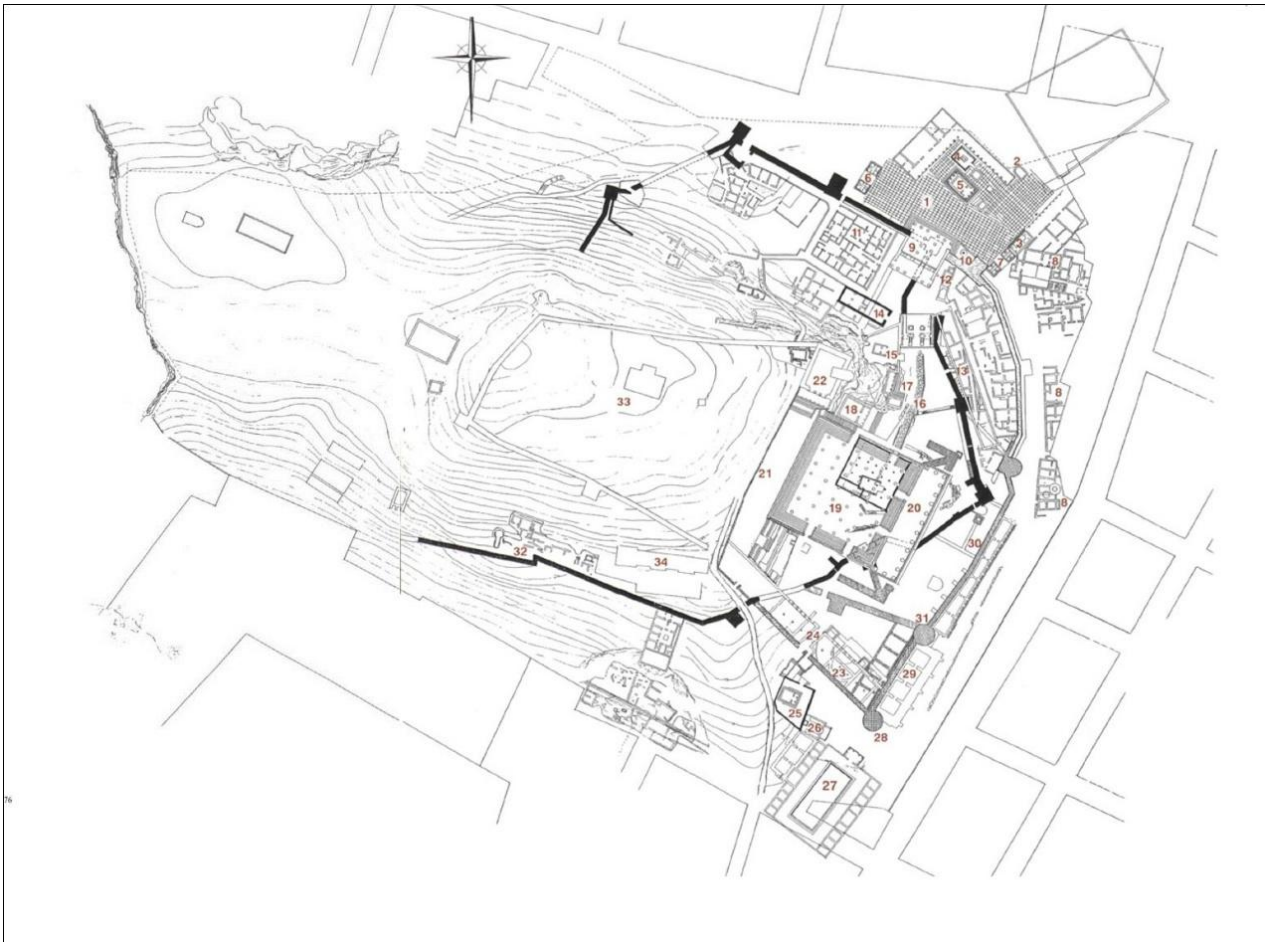
Το τείχος που περιέβαλλε το Ιερό απαρτίζεται από τεφροκύανους ελευσινιακούς ασβεστόλιθους, στους κατώτερους δόμους, ενώ τα ανώτερα μέρη αποτελούνται από κιτρινέρυθρους ασβεστόλιθους με επίπεδη όψη. Στα αριστερά (ανατολικά) της πομπικής οδού, στο εσωτερικό του Ιερού ο περίβολος απαρτίζεται από ελευσινιακούς λίθους και ωμές πλίθρες. Αντίθετα, ο κλασικός περίβολος αποτελείται από ελευσινιακούς ασβεστόλιθους στα κατώτερα τμήματα και πωροπλίνθους με τέλεια κατεργασμένη επίπεδη όψη στα ανώτερα τμήματα.

Τελικά, διανύοντας κατά μήκος την εξωτερική πλευρά των τειχών καταλήγουμε εκεί όπου ξεκινήσαμε, δηλαδή στην πλακόστρωτη ρωμαϊκή αυλή.

Παρακάτω παρατίθεται ένας χάρτης του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χωροταξική αρίθμηση.

ΤΟ ΙΕΡΟ ΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΟΡΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΕΥΣΙΝΑ

(Σχέδιο Ι. Τραυλού)



Υπόμνημα

1. Πλακόστρωτη ρωμαϊκή αυλή.
2. Αψιδωτή εξέδρα ή βάθρο.
3. Ρωμαϊκή κρήνη.
4. Εσχάρα.
5. Ναός Προπυλαίου Αρτέμιδος και Ποσειδώνα.
6. Δυτική θριαμβική αψίδα.
7. Ανατολική θριαμβική αψίδα.
8. Λουτρά και πανδοχεία.
9. Μεγάλα Προπύλαια.
10. Καλλίχορον φρέαρ.
11. Βοηθητική περιοχή με οικίες ιερέων και κτίρια διοικήσεως.
12. Υπόγεια ρωμαϊκή δεξαμενή.
13. Ρωμαϊκοί σιροί.
14. Πεισιστράτειος σιρός.
15. Πλουτώνειο.
16. Πομπική οδός.
17. Λαξευμένη στο βράχο εξέδρα.
18. Ναός Ρωμαίας αυτοκράτειρας («Ναός F»).
19. Τελεστήριο.
20. Φιλώνειος στοά.
21. Διατείχισμα.
22. Ναός Ρωμαίας αυτοκράτειρας.
23. Νότιος Πυλών.
24. Βόρειος Πυλών.
25. Ιερά Οικία.
26. Μιθραίον.
27. Ρωμαϊκό οικοδόμημα με περίστυλη αυλή (Γυμνάσιο ή Αγορά).
28. Περίβολος 4^{ου} αιώνα π.Χ. («Λυκούργειος»).
29. Κρήνες.
30. Δεξαμενές.
31. Δεξαμενές 5^{ου} αιώνα π.Χ. («Περίκλειος»).
32. Περίβολος 6^{ου} αιώνα π.Χ. («Πεισιστράτειος»).
33. Ακρόπολις.
34. Μουσείο.

5. Πετρογραφία Δομικών Λίθων

Για την πετρογραφική ανάλυση των δειγμάτων που πάρθηκαν από τον αρχαιολογικό χώρο έγινε μακροσκοπική και μικροσκοπική περιγραφή. Μακροσκοπικά περιγράφτηκαν οι πέντε κύριοι λιθότυποι αλλά και κάποιοι που κοσμούν τον αρχαιολογικό χώρο ως δευτερεύοντα υλικά δόμησης. Παρατηρήθηκαν κυρίως τα γενικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά, ενώ μέσω της μικροσκοπικής ανάλυσης εντοπίστηκαν τα κύρια πετρογενετικά ορυκτά που περιέχονται στους ασβεστόλιθους και στα μάρμαρα.

5.1 Μακροσκοπική Περιγραφή

Παρακάτω περιγράφονται μακροσκοπικά οι κύριοι λιθότυποι που παρατηρήθηκαν στον αρχαιολογικό χώρο αλλά και αυτοί που βρέθηκαν σε λίγα τμήματα του χώρου. Αυτοί είναι ο ακτίτης λίθος, ωολιθικός ασβεστόλιθος, Ελευσινιακός ασβεστόλιθος, ασβεστόλιθος, μάρμαρο Πεντέλης, μάρμαρο Υμηττού και τέλος δολομιτικό μάρμαρα. Επίσης οι δευτερεύοντες τύποι πετρωμάτων που βρέθηκαν είναι το δολομιτικό μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος, ο ανδεσίτης, τα κεραμικά και οι ωμοί πλίνθοι.

5.1.1 Ακτίτης Λίθος

Ο ακτίτης λίθος είναι ένας Πλειστοκαινικός ασβεστόλιθος. Πήρε το όνομά του από τα λατομεία που ήταν σε λειτουργία στην αρχαιότητα στην Πειραϊκή χερσόνησο, όπου οι αρχαίοι τα αποκαλούσαν «ακτίτης λίθος» δηλαδή λίθος εκ της ακτής. Χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό στα στο αρχαίο τείχος του Πειραιά, σε μνημεία στην Αττική όπως επίσης στην Αίγινα και αργότερα στην Καισαριανή. Ο ακτίτης λίθος χρησιμοποιήθηκε σε πολλά σημεία του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας και συγκεκριμένα σε τοίχους αντιστήριξης (Εικ.5.1), στη βάση του ναού της Αρτέμιδος και σε τοίχους οικημάτων.



Εικ.5.1 Κομμάτι ακτίτη λίθου που χρησιμοποιήθηκε στον αρχαιολογικό χώρο.

Όσον αφορά τα εξωτερικά του χαρακτηριστικά, ο ακτίτης λίθος είναι κατά κύριο λόγο ωχροκίτρινος αλλά σε κάποια τμήματα του αρχαιολογικού χώρου εντοπίζεται και με άλλες αποχρώσεις όπως πορτοκαλί (EL12), σκούρο πορτοκαλί (EL33), υπόλευκες (EL28) και τεφρές (EL11, EL12, EL23) λόγω προσμίξεων εγκλεισμάτων μέσα σε αυτό.

Γενικά είναι λεπτόκοκκο και εύθρυπτο πέτρωμα (Εικ.5.2) γι' αυτό χαράσσεται εύκολα με ατσάλινο μαχαίρι. Σε αντίθεση με αυτό, το δείγμα EL33 ήταν το μοναδικό που εμφάνιζε μεγαλύτερη σκληρότητα από τα υπόλοιπα.



Εικ.5.2 Ακτίτης λίθος.

Ο ακτίτης λίθος έχει γενικά μικρό πορώδες, με μικροπόρους και σε ένα μικρό ποσοστό μακροπόρους που συναντώνται συνήθως σε τμήματα του πετρώματος που είναι λεπτόκοκκα (EL23). Το δείγμα EL33 είναι το μοναδικό που εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό πόρων με διαφορετικά μεγέθη πόρων.

Τέλος, στο πέτρωμα αυτό παρατηρούνται επιφανειακά φθορές και επικαθίσεις με διάφορους χρωματισμούς που οφείλονται είτε σε βιολογική δραστηριότητα στα επιφανειακά τμήματα του πετρώματος ή από ανθρωπογενής δραστηριότητες στη γύρω περιοχή. Για παράδειγμα, στο δείγμα EL33 παρατηρείται μία σκληρή κρούστα γκρι χρώματος ενώ κάποιες περιοχές εμφανίζουν μαύρες και πράσινες κρούστες. Επίσης παρατηρούνται και μαλακές κρούστες και επικαθίσεις μαύρου και καστανού χρώματος (EL28, EL36, EL23).

5.1.2 Ωολιθικός Ασβεστόλιθος

Αυτό το είδος ασβεστόλιθου αναγνωρίστηκε από τους ωολιθικούς και μαργαριτικούς σχηματισμούς, που είναι ορατοί ακόμα και μακροσκοπικά και είναι το κύριο χαρακτηριστικό του. Οι ωόλιθοι είναι συγκεντρικές αποθέσεις ασβεστιτικού υλικού γύρω από ένα πυρήνα, που είναι συνήθως ένας κλαστικός κόκκος (π.χ. άστριος, απολίθωμα κ.α.). Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0.2 - 2mm. Οι μαργαρίτες είναι και αυτοί σφαιρόμορφοι σχηματισμοί που αποτελούνται από μικροκρυσταλλικό ασβεστιτικό υλικό και η διάμετρος τους είναι συνήθως μικρότερη από 1 mm.

Ο ωολιθικός ασβεστόλιθος χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό στην αρχαιότητα και στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας συναντάτε σε τείχη (Ρωμαϊκός Περίβολος), στο Τελεστήριο και στο Γυμνάσιο.

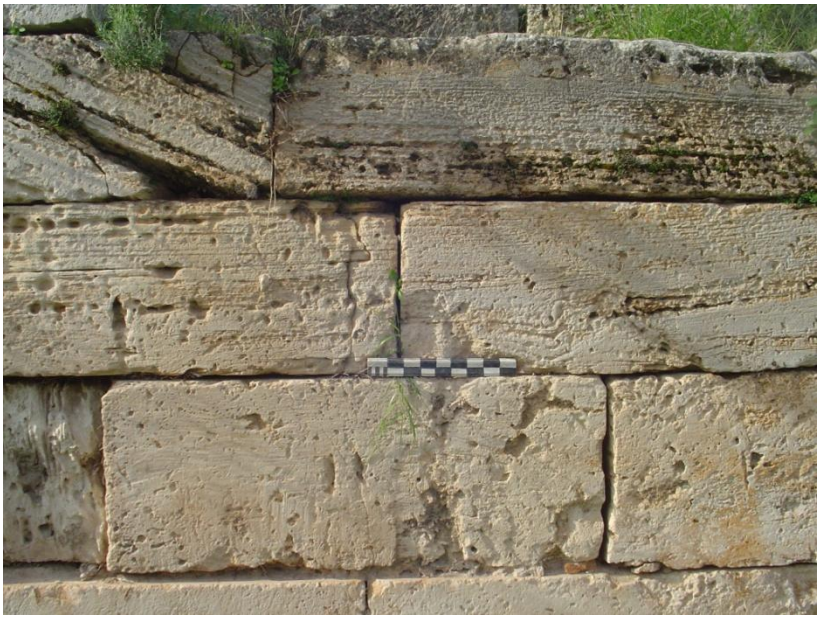
Το πέτρωμα αυτό εμφανίζεται με κίτρινο χρώμα και ερυθρωπές αποχρώσεις (EL21), ενώ έχουμε επίσης και αποχρώσεις του γκρίζου (EL22, EL13), λευκού (EL18, EL13) και τέλος ωχροκίτρινες με τεφρές κηλίδες (EL24). Τα δείγματα με γκρίζες και λευκές αποχρώσεις είναι κυρίως λεπτόκοκκα και με μικρό πορώδες (Εικ.5.3).



Εικ.5.3 Ωολιθικός ασβεστόλιθος.

Όσον αφορά τη σκληρότητα του ωολιθικού ασβεστόλιθου είναι πιο σκληρός από τον ακτίτη λίθο, άρα και λιγότερο εύθρυπτος, εκτός από το δείγμα EL24 που εμφανίζεται πιο μαλακό από τα υπόλοιπα δείγματα. Τέλος, η υφή του πετρώματος είναι τραχιά και κοκκώδη εκτός από το δείγμα EL24.

Το πορώδες του ωολιθικού ασβεστόλιθου μπορεί να διακριθεί σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος των πόρων. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από μικρού και μεγάλου μεγέθους σχήμα πόρων και είναι κατανεμημένοι σε όλη τη μάζα του πετρώματος (EL35A, EL21). Στην δεύτερη κατηγορία έχουμε πόρους οι οποίοι είναι μικρότεροι από την πρώτη αλλά είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στη μάζα του πετρώματος (EL13, EL15, EL18,EL22). Τέλος, στην τρίτη κατηγορία ανήκει μόνο το δείγμα EL24 που εμφανίζει μακροπόρους, πολύ πιο μεγάλους από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, ενώ το μικροπορώδες του θεωρείται ασήμαντο σε σχέση πάλι με τις προηγούμενες κατηγορίες.



Εικ.5.4 Ωολιθικός ασβεστόλιθος σε τοίχο αντιστήριξης του αρχαιολογικού χώρου.

Και σε αυτό το είδος πετρώματος συναντώνται επικαθίσεις και αποθέσεις στα επιφανειακά στρώματα του πετρώματος, με διάφορες αποχρώσεις. Παρατηρήθηκαν γκρίζες αποθέσεις που κάποιες φορές συνυπάρχουν με βιολογικές αποικίες και ριζίδια (EL21, EL35A, EL18). Επίσης παρατηρήθηκαν λευκές αποθέσεις (EL13) και σκληρές κρούστες με μαύρα και γκρι χρώματα (EL22, EL15). Τέλος, εντοπίζονται και τεφρόλευκες περιοχές στην εξωτερική επιφάνεια του πετρώματος στο δείγμα EL24.

5.1.3 Ελευσινιακός Ασβεστόλιθος

Ο Ελευσινιακός ασβεστόλιθος είναι ένας κυανότεφρος ρουδιστοφόρος ασβεστόλιθος ηλικίας Κρητιδικού. Στην αρχαιότητα αυτό το πέτρωμα εξορυσσόταν από λατομεία που βρίσκονται περίπου 200m βόρεια από τον αρχαιολογικό χώρο. Χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό σε βάσεις αγαλμάτων, κατασκευή κλιμάκων, πατωμάτων και τοίχων στην Αττική και σε άλλες περιοχές. Επίσης χρησιμοποιούνταν ως διακοσμητικό υλικό στην Ακρόπολη σε χρωματική αντίθεση με το λευκό μάρμαρο Πεντέλης (Προπύλαια, Ερέχθειο). Στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας εντοπίζεται σε τμήματα πολυγωνικών τοίχων, σε βάσεις αγαλμάτων και στο Τελεστήριο. Τέλος, ο Ελευσινιακός ασβεστόλιθος αποτελεί τη βάση πάνω στον οποίο είναι χτισμένο το Ιερό, το Καλλίχορον φρέαρ (Εικ.5.5) κ.α.



Εικ.5.5 Καλλίχορον φρέαρ.

Το χρώμα του Ελευσινιακού ασβεστόλιθου είναι κατά κύριο λόγο γκρίζο-τεφρό αλλά σε σημεία που παρατηρούνται ρηγματώσεις και πόροι ποικίλει. Για παράδειγμα, σε κάποια δείγματα χειρός παρατηρούνται καστανέρυθρες και υποκίτρινες αποχρώσεις (EL19), ενώ σε κάποια άλλα εντοπίζονται και ανοιχτόχρωμες περιοχές (EL51). Για παράδειγμα, στο δείγμα EL20 παρατηρούνται διάσπαρτες σκούρες κηλίδες και ρηγματώσεις που περιβάλλονται από καστανέρυθρη φλέβα όπου λεπτόκοκκο υλικό συνυπάρχει με λευκούς/ διαφανείς κρυστάλλους, που πιθανά να αντιπροσωπεύουν άλατα (και δείγμα EL19). Επίσης στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου παρατηρείται και ένα ρήγμα το οποίο είναι γεμισμένο με οξείδια και υδροξείδια Fe. Μέσα στη μάζα των οξειδίων και υδροξειδίων Fe εντοπίζονται και λευκές περιοχές αλάτων, με το φαινόμενο αυτό να γίνεται πιο έντονο στα τοιχώματα μεγάλων πόρων.

Τα δείγματα που πάρθηκαν για τον Ελευσινιακό ασβεστόλιθο είναι γενικά συμπαγή με μικρό πορώδες, εκτός από το δείγμα EL20 που παρατηρούνται ρηγματώσεις και φλέβες και τα δείγματα EL34 και EL19 που αποτελούνται από οξείδια και μεγάλους πόρους με αποτέλεσμα να είναι πιο εύθρυπτα από τα υπόλοιπα.

Οι επικαθίσεις σε αυτό το είδος πετρώματος έχουν χρώμα κυρίως μαύρο και πράσινο αλλά συναντώ και πορτοκαλί περιοχές. Το πάχος των επικαθίσεων διαφέρει από δείγμα σε δείγμα αλλά σε γενικές γραμμές είναι μικρό. Τέλος, στο δείγμα EL20 παρατηρείται μία λευκή λεπτόκοκκη στρώση, με πάχος να φτάνει και τα 2mm, με φαιές και πράσινες επικαθίσεις.



Εικ.5.6 Ρήγμα γεμισμένο με οξείδια και υδροξείδια Fe (κόκκινο χρώμα) και άλατα (άσπρο χρώμα).

5.1.4 Μάρμαρο Πεντέλης

Το Πεντελικό μάρμαρο ήταν γνωστό ήδη από την αρχαιότητα. Χρησιμοποιήθηκε από τους αρχαίους Έλληνες για την κατασκευή της Ακρόπολης και του Παρθενώνα όπως επίσης και για διακοσμητικό υλικό στην Ακρόπολη. Το μάρμαρο Πεντέλης είναι αυτό που κυριαρχεί στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας. Χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό σε δάπεδα και στην τοιχοποιία, μέρος της Ιεράς οδού είναι κατασκευασμένη από αυτό, ενώ το εντοπίζουμε επίσης στα Μικρά και στα Μεγάλα Προπύλαια, στο ναό της Αρτέμιδος, στη Φιλώνειο στοά και σε βάσεις αγαλμάτων και γλυπτά αντικείμενα.

Μακροσκοπικά, το μάρμαρο Πεντέλης έχει λευκό χρώμα και σε γενικές γραμμές δεν φαίνονται εγκλείσματα (EL4, EL50, EL53, EL54). Σε κάποια τμήματα όμως του πετρώματος παρατηρήθηκαν φλέβες μαρμαρυγιών και κυρίως μοσχοβίτη (Εικ.5.7). Στα σημεία αυτά παρατηρήθηκε εκλεκτική διάβρωση.

Όσον αφορά τις επικαθίσεις και τις κρούστες, στο Πεντελικό μάρμαρο εντοπίστηκαν σκληρές τσιμεντιτικές επικαθίσεις γκρίζου χρώματος με μέγιστο πάχος 0.5cm (EL50) και μαλακή πατίνα καστανού χρώματος(EL54). Τέλος, στο δείγμα EL53 εμφανίζει στρωμάτωση στην επιφάνεια του, με πράσινη βάση που σε κάποια σημεία έχει καλυφθεί με καστανόφαιη κρούστα και σε κάποια άλλα με καστανόμαυρη μαλακή πατίνα.



Εικ.5.7 Μάρμαρο Πεντέλης με εμφανή φλέβα μαρμαρυγία.

5.1.5 Μάρμαρο Υμηττού

Το μάρμαρο Υμηττού χρησιμοποιήθηκε και αυτό από την αρχαιότητα ως δομικό και διακοσμητικό υλικό σε πολλά μνημεία και κτίσματα της Αττικής. Στο χώρο της Ελευσίνας χρησιμοποιήθηκε κυρίως κατά τη Ρωμαϊκή εποχή και κοσμεί κυρίως κίονες και βάσεις κιόνων.

Μακροσκοπικά διακρίνεται από το μάρμαρο Πεντέλης λόγω διαφορετικών χρωμάτων. Το μάρμαρο Υμηττού είναι τεφρόλευκο με κάποιες καστανόχρωμες περιοχές, ενώ σε τμήματα αυτού έχω επικαθίσεις πατίνας καφέ χρώματος (Εικ.5.8).



Εικ.5.8 Μάρμαρο Υμηττού με επικάθιση καφέ πατίνας.

Εκτός από τους κύριους λιθότυπους που αναφέρθηκαν παραπάνω και οι οποίοι κοσμούν επί το πλείστον τον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας, παρατηρήθηκαν και κάποια τμήματα, το υλικό των οποίων δεν ανήκει σε κανέναν από τους παραπάνω τύπους πετρωμάτων. Αυτά είναι το δολομιτικό μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος, ο ανδεσίτης, οι ωμοί πλίνθοι και τα κεραμικά. Τα πετρώματα αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

5.1.6 Δολομιτικό Μάρμαρο

Το δολομιτικό μάρμαρο διαφέρει από τις άλλες δύο κατηγορίες μαρμάρων, διότι κύριο χαρακτηριστικό του είναι ο δολομίτης ως κυρίαρχο ανθρακικό ορυκτό αντί για τον ασβεστίτη. Επίσης μακροσκοπικά διακρίνεται από το χρώμα του που είναι υπόλευκο έως και ωχρό. Εμφανίζει κάποιες πορτοκαλί- καστανές κηλίδες και σε κάποια τμήματα του συναντώνται λευκές περιοχές. Τέλος, επιφανειακά παρατηρείται χονδρόκοκκη πηλιτική υφή (EL16).



Εικ.5.9 Δολομιτικό μάρμαρο.

5.1.7 Ασβεστόλιθος

Το δείγμα του ασβεστόλιθου δεν εντάσσεται πουθενά στις προηγούμενες κατηγορίες και εντοπίζεται στη βάση του ναού της Αρτέμιδος. Δεν υπάρχουν πολλά τμήματα αυτού στον αρχαιολογικό χώρο γι' αυτό θεωρείται ότι δεν χρησιμοποιήθηκε ευρέως ως δομικό υλικό στην κατασκευή του χώρου ή μπορεί και να βρέθηκε τυχαία μετά από ανασκαφές που γίνανε. Το χρώμα του είναι λευκό με καστανές και φαιές διασταυρούμενες φλέβες.

5.1.8 Κεραμικά

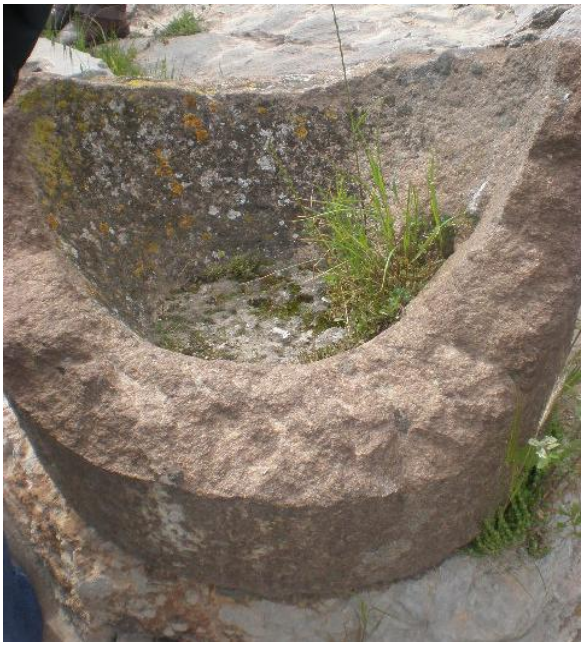
Τα κεραμικά (Εικ.5.10) χρησιμοποιήθηκαν στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας ως δομικό υλικό στην κατασκευή τοίχων, σε τεχνικές κατασκευές και τέλος σε αποχετευτικά δίκτυα.



Εικ.5.10 Κατασκευή χτισμένη από κεραμικά.

5.1.9 Ανδεσίτης

Ο ανδεσίτης είναι ένα ηφαιστειακό πέτρωμα λεπτοκοκκώδες με ολοκρυσταλλικό ή ημικρυσταλλικό ιστό. Και αυτός ο τύπος πετρώματος δεν συναντάται συχνά στον αρχαιολογικό χώρο. Χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή εργαλείων (γουδιά, άγκυρες, μυλόπετρες) και για την κατασκευή δομικών λίθων (Εικ.5.11). Πιθανή προέλευση του είναι από τη Μήλο.



Εικ.5.11 Δομικό υλικό από ανδεσίτη.

5.1.10 Ωμοί Πλίνθοι

Οι ωμοί πλίνθοι είναι χαλίκια, αργιλώδεις και σιδηρούχες ορυκτές πρώτες ύλες από τοπικές αποθέσεις.



Εικ.5.12 Ωμοί Πλίνθοι.

5.2Μικροσκοπική Περιγραφή

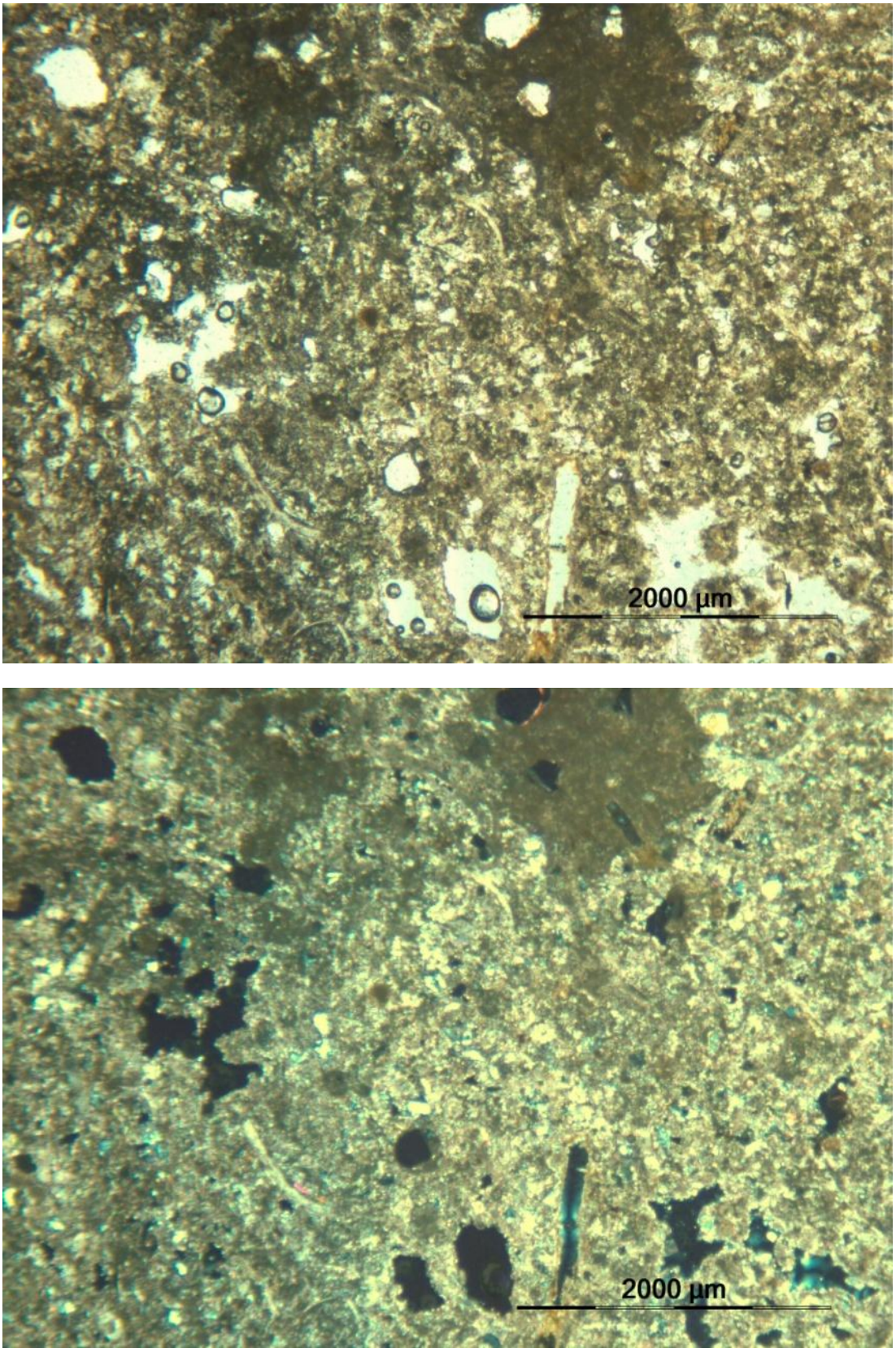
Παρακάτω γίνεται η μικροσκοπική περιγραφή των κύριων λιθοτύπων αλλά και του δολομιτικού μαρμάρου και του ασβεστόλιθου. Η περιγραφή γίνεται με τη βοήθεια πολωτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνονται από εικόνες του πολωτικού μικροσκοπίου και εικόνες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.

Η ταξινόμηση των λιθοτύπων έγινε με βάση τα κοινά χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στο πολωτικό μικροσκόπιο. Βάση αυτού διακρίθηκαν εφτά λιθότυποι με τα αντίστοιχα δείγματα για τον κάθε λιθότυπο να φαίνονται παρακάτω :

1. Ακτίτης λίθος : EL11, EL12, EL23, EL23B, EL28, EL33, EL36.
2. Ελευσιανιακός ασβεστόλιθος : EL19, EL20, EL34, EL51.
3. Ωολιθικός ασβεστόλιθος : EL13, EL15, EL18, EL21, EL22, EL24, EL35A.
4. Μάρμαρο Πεντέλης : EL4, EL50, EL53, EL54.
5. Μάρμαρο Υμηττού : EL17, EL52.
6. Δολομιτικό μάρμαρο : EL16.
7. Ασβεστόλιθος : EL3B.

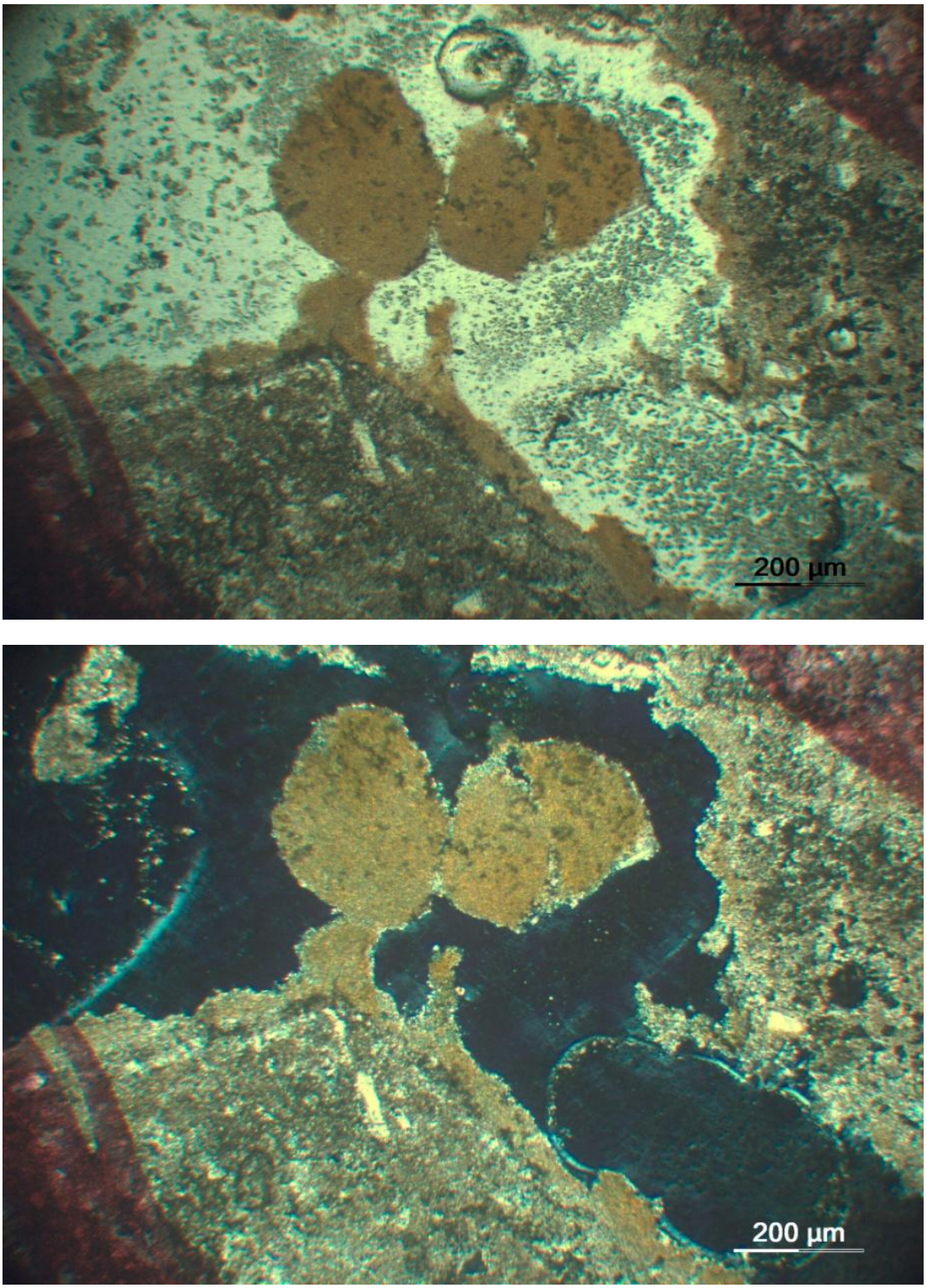
5.2.1 Ακτίτης Λίθος

Βάση παρατηρήσεων που έγιναν στο πολωτικό μικροσκόπιο βλέπουμε πως ο ακτίτης λίθος αποτελείται από γενικά υψηλά ποσοστά αργιλικού υλικού, 10- 30%, η μικριτική μάζα κυριαρχεί με ποσοστά 85- 95% ενώ το υπόλοιπο 5- 15% είναι σπαριτικό υλικό. Εκτός από την κύρια ανθρακική μάζα που κυριαρχεί στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, συναντώνται επίσης και κόκκοι άλλων ορυκτών όπως χαλαζία, μοσχοβίτη, βιοτίτη, χλωρίτη, απατίτη, πυρόξενοι και αλκαλικοί άστριοι. Παρατηρήθηκε επίσης πολυκρυσταλλικός κόκκος χαλαζία με εγκλείσματα μοσχοβίτη (EL23, EL12). Μεταλλικά ορυκτά και οξείδια Fe εμφανίζονται σε όλες σχεδόν τις τομές, ενώ έχω και την παρουσία απολιθωμάτων, σε μικρό ποσοστό, κάποια δε από αυτά αποτελούνταν από ασβεστιτικό υλικό (Εικ.5.13). Τέλος, οι πόροι του ακτίτη λίθου κυμαίνονται σε ποσοστά 10- 30%. Εμποτισμοί οξειδίων παρατηρήθηκαν στα περιθώρια των λεπτών τομών. Στο δείγμα EL12 εντοπίστηκαν θραύσματα από ψαμμίτη, ενώ στο δείγμα EL36 εντοπίστηκε ρουτίλιο. Και οι δύο λεπτές τομές έχουν ζιρκόνιο ως επουσιώδες ορυκτό.

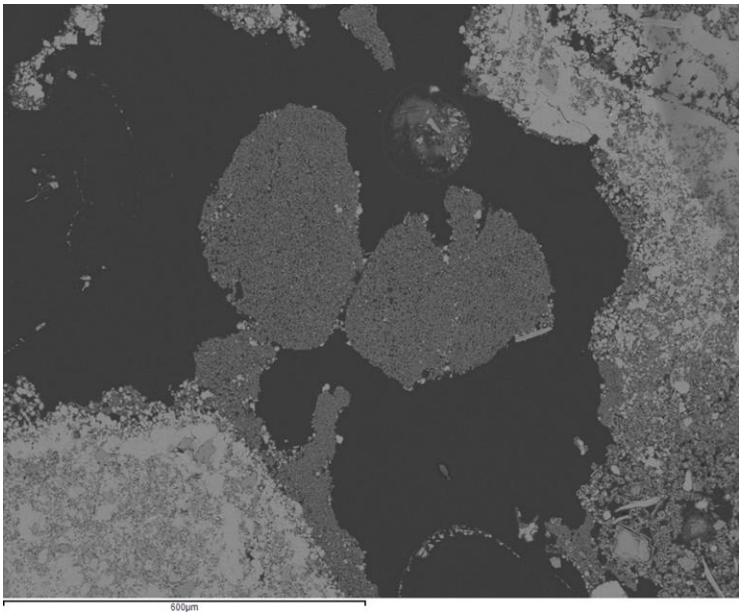


Εικ.5.13 Εικόνες ακτίτη λίθου από πολωτικό μικροσκόπιο. Πάνω: λεπτή τομή του δείγματος EL11 σε παράλληλα Nicols που φαίνονται οι πόροι (μαύρο χρώμα), το αργιλικό υλικό (καφέ αποχρώσεις) σπαριτικό υλικό και κρύσταλλος μοσχοβίτη. Κάτω: η ίδια λεπτή τομή σε κάθετα Nicols.

Τα αποτελέσματα από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης έδειξαν ότι τα δείγματα περιέχουν μεγάλο ποσοστό δολομίτη. Το φαινόμενο της δολομιτίωσης στους ασβεστόλιθους δείχνει ότι είχαμε αντικατάσταση του ασβεστίτη από δολομίτη, δηλαδή του Ca^{2+} από Mg^{2+}. Η δολομιτίωση δείχνει να είναι πιο έντονη στα τοιχώματα των πόρων, που σημαίνει ότι έγινε πολύ αργότερα από τη διαγένεση του ασβεστόλιθου και το δολομιτικό υλικό έχει καταστρέψει τις προϋπάρχουσες δομές κατά τη διέλευση υγρών μέσα στους πόρους του πετρώματος (Εικ.5.14, Εικ.5.15). Στο δείγμα EL33 βρέθηκε υψηλή ποσότητα Mg μέσα στη μάζα του υγιούς πετρώματος με αποτέλεσμα να προσδίδει μεγαλύτερη σκληρότητα στο πέτρωμα σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα του ίδιου πετρώματος.



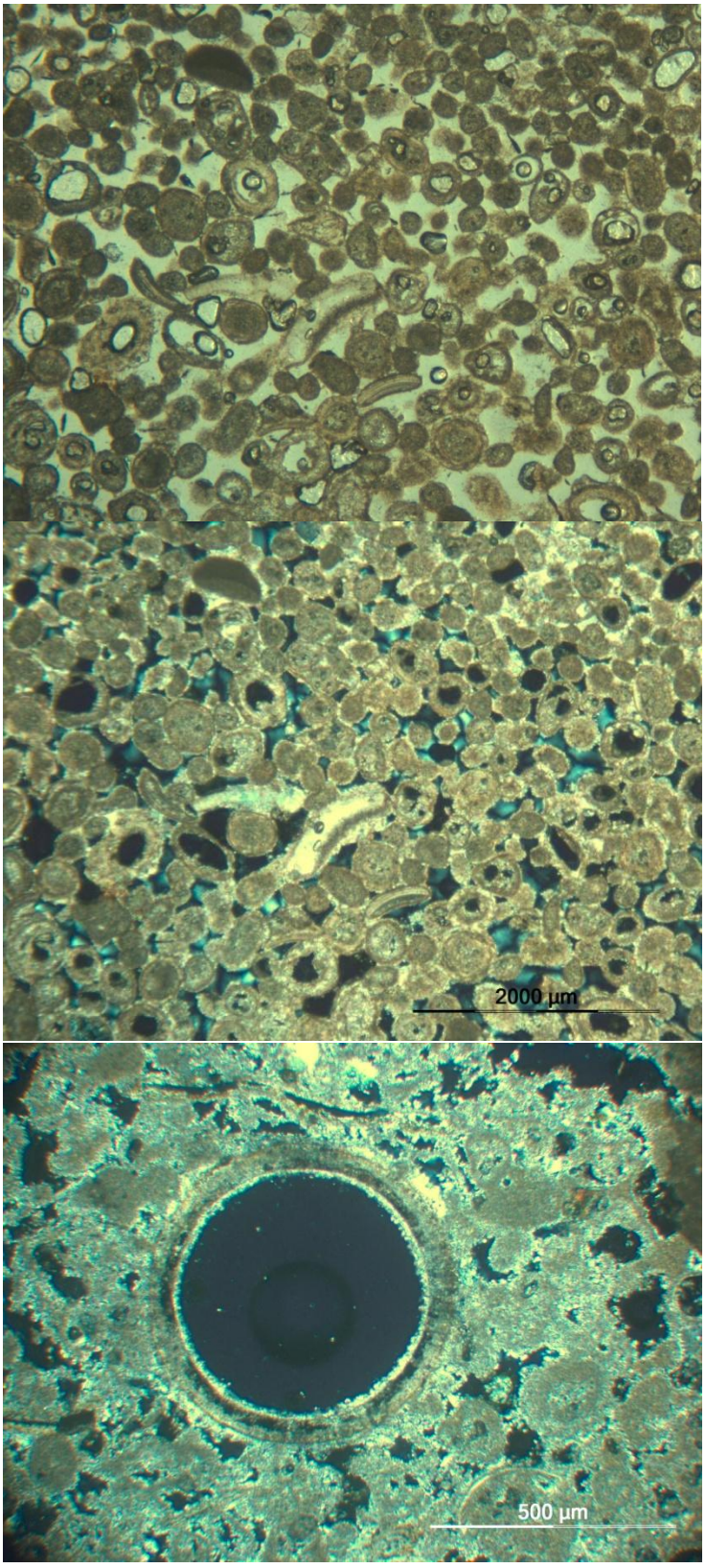
Εικ.514 Πάνω: λεπτή τομή του δείγματος EL12 σε παράλληλα Nicols που δείχνει τη δολομιτίωση που έχει συμβεί στους πόρους του πετρώματος. Το πορτοκαλί χρώμα είναι ο δολομίτης. Κάτω: η ίδια λεπτή τομή σε κάθετα Nicols.



Εικ.5.15 Εικόνα οπισκεδαζόμενων ηλεκτρονίων του δείγματος EL12: Με το μαύρο χρώμα φαίνονται οι πόροι και μέσα σε αυτούς με γκρι χρώμα ο δολομίτης. Στα τοιχώματα των πόρων γίνεται δολομιτίωση. Με ανοιχτό γκρι χρώμα απεικονίζεται ο ασβεστίτης.

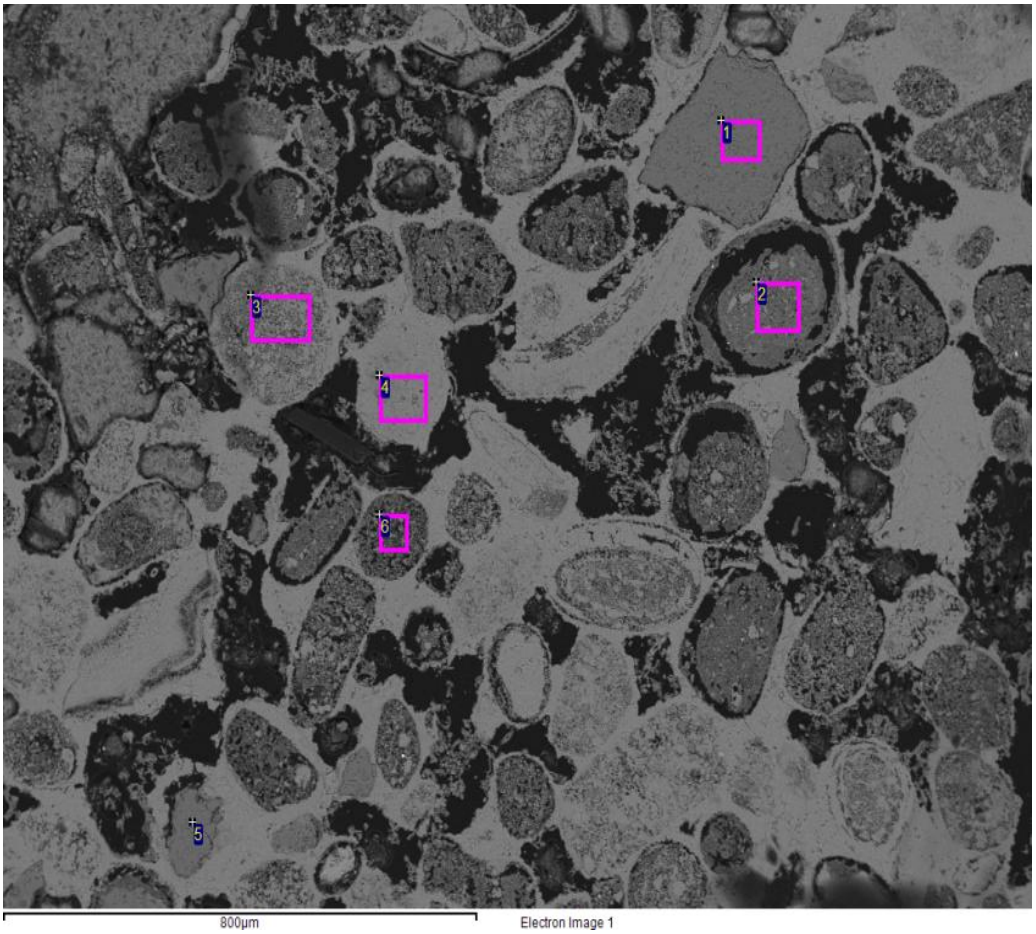
5.2.2 Ωολιθικός Ασβεστόλιθος

Ο ωολοθικός ασβεστόλιθος ταξινομήθηκε λόγω του μεγάλου ποσοστού των ωολίθων που παρατηρήθηκαν στις αντίστοιχες λεπτές τομές. Στο πολωτικό μικροσκόπιο βλέπουμε τους ωόλιθους, κάποιοι από τους οποίους αποτελούνται από μικριτικό ή σπαριτικό υλικό. Γενικά οι ωόλιθοι είναι συγκεντρικές αποθέσεις γύρω από ένα κλαστικό κόκκο όπως χαλαζία, κερατόλιθο, θραύσματα αργιλικού υλικού ή απολίθωμα. Στην περίπτωση μας όμως βλέπουμε επίσης ότι κάποιοι ωόλιθοι στη θέση του κλαστικού κόκκου έχουν πόρους (Εικ.5.16). Εκτός από τη ύπαρξη ωολίθων έχουμε και την παρουσία πελλοειδών (μαργαρίτες), με σφαιρικό ή ελλειψοειδές σχήμα, δεν έχουν συγκεντρικές δομές και αποτλούνται εξ' ολοκλήρου από μικριτικό ασβεστίτη και είναι τοπικά ανακρυσταλλωμένοι (σπαρίτης, EL21). Το συγκολλητικό υλικό των ωολίθων είναι σπαριτικό υλικό δεύτερης γενιάς.



Εικ.5.16 Εικόνες από λεπτή τομή του δείγματος EL18 (πρώτη και δεύτερη) και EL14 (τρίτη): στην πρώτη εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου στα παράλληλα Nicols φαίνεται ο ωολιθικός ασβεστόλιθος με μεγάλο ποσοστό ωολίθων, κάποιοι πόροι και σπαριτικό υλικό. Στη δεύτερη, η ίδια εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου στα κάθετα Nicols. Η τελευταία εικόνα, δείχνει συγκεντρική απόθεση ασβεστιτικού υλικού γύρω από έναν πόρο.

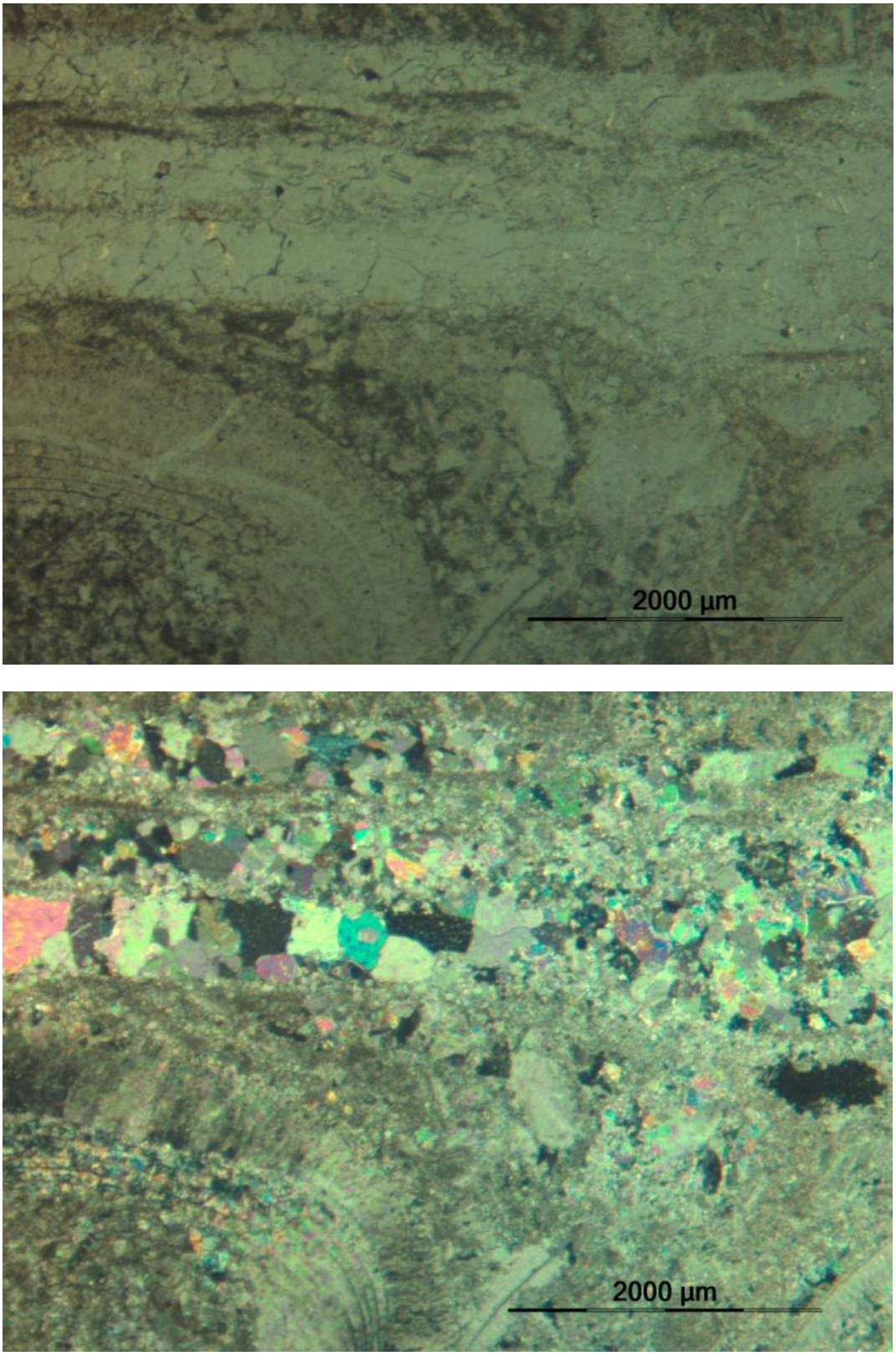
Γενικά, σε όλες τις λεπτές τομές του ωολιθικού ασβεστόλιθου επικρατεί το μικριτικό υλικό με ποσοστά 60- 90% ενώ το υπόλοιπο ανήκει στο σπαριτικό υλικό. Βρίσκω θραύσματα απολιθωμάτων καθώς επίσης και αργιλικό και οργανικό υλικό. Οξείδα και υδροξείδια Fe εντοπίζονται σε όλες τις λεπτές τομές. Το πορώδες αυτού του τύπου πετρώματος κυμαίνεται σε ποσοστά 25- 40%. Εντοπίστηκαν επίσης κομμάτια από λιθοκλάστες, πολυκρυσταλλικός ή μονοκρυσταλλικός χαλαζίας ενώ βρέθηκαν και κρύσταλλοι μοσχοβίτη, βιοτίτη, χλωρίτη, κεροστίλβης, αλκαλικών αστρίων και κερατόλιθου. Θραύσματα γνευσίου βρέθηκαν στη λεπτή τομή EL21, όπως επίσης και κρύσταλλοι πυρόξενου και χλωριτιωμένου πυρόξενου. Τέλος, στο δείγμα EL35A μέσα σε απολιθώματα εντοπίστηκαν βελλονοειδείς κρύσταλλοι ανθρακικής σύστασης. Οι κρύσταλλοι εκτιμήθηκαν ως αραγωνίτης με εμφάνιση ψευδοχρωϊκού κροσσού.



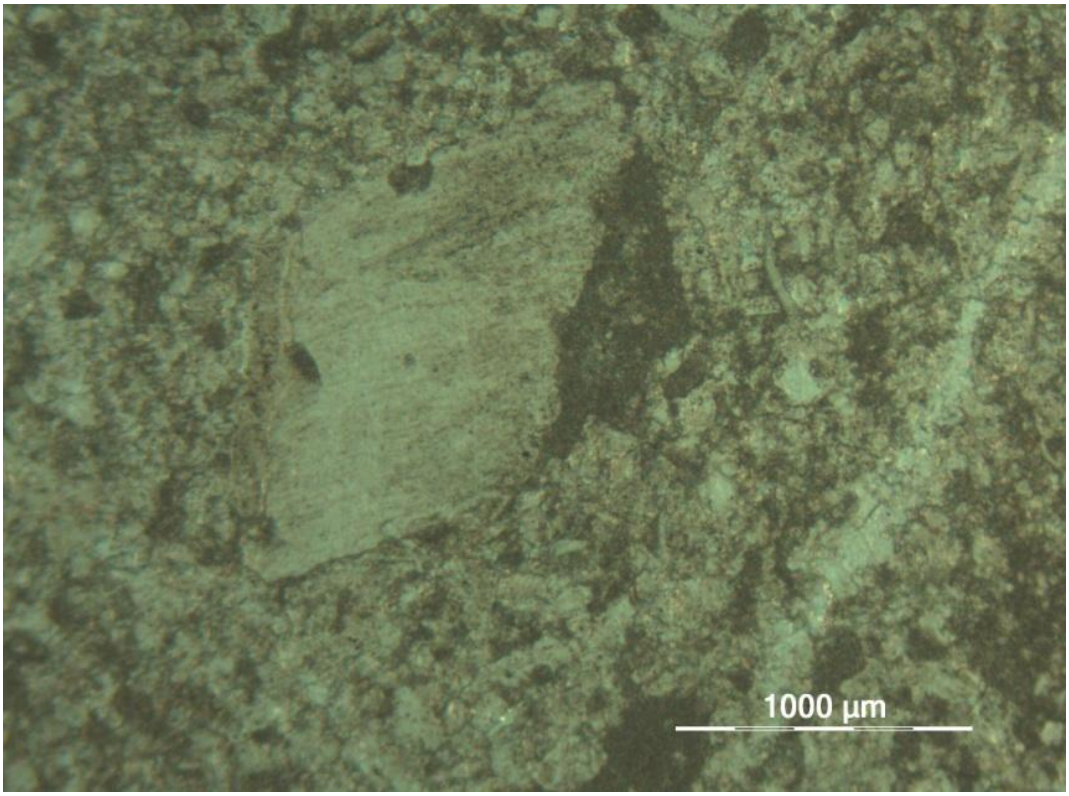
Εικ.5.17 Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης από το δείγμα ELL22: συνύπαρξη ωολίθων (συγκεντρικές δομές) και πελλοειδών (ελλειψοειδές σχήμα). Επίσης διακρίνονται απολιθώματα με σπαριτικό υλικό, κρύσταλλοι χαλαζία και μίγμα ασβεστίτη και αργιλικών ορυκτών που σχηματίζουν πελλοειδή.

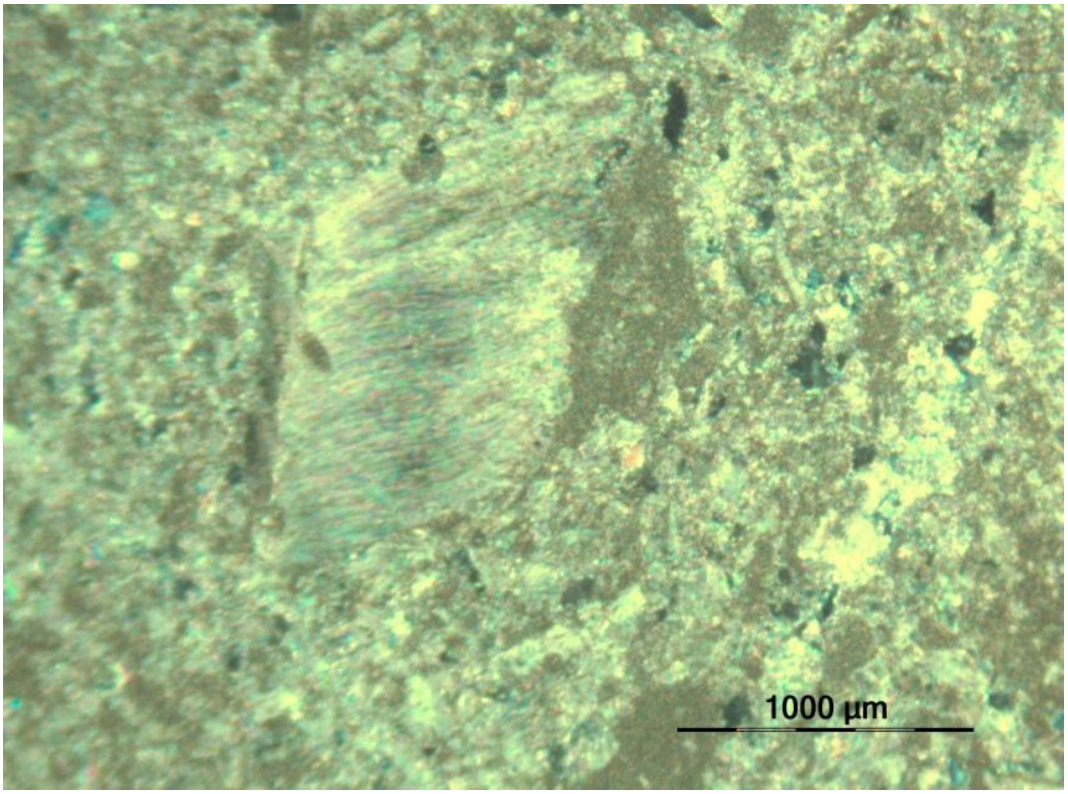
5.2.3 Ελευσινιακός Ασβεστόλιθος

Αυτός ο τύπος πετρώματος εμφανίζεται κυρίως στις γύρω περιοχές του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας και όχι στα οικοδομήματα. Με βάση τις παρατηρήσεις στο πολωτικό μικροσκόπιο, ο Ελευσινιακός ασβεστόλιθος είναι πέτρωμα που αποτελείται καθαρά από ασβεστιτικό υλικό. Οι λεπτές τομές δείχνουν ποσοστά σπαριτικής μάζας που κυμαίνονται 30- 45% ενώ η μικριτική μάζα καλύπτει το 45- 65% σε κάθε δείγμα. Εκτός από τη μικριτική και σπαριτική μάζα εμφανίζονται και αλλοτριόμορφοι και υπιδιόμορφοι κρύσταλλοι ασβεστίτη. Έχει μικρό πορώδες με ποσοστά να φτάνουν περίπου το 3%, όπως επίσης και μικρή ποσότητα αργιλικού υλικού. Σε όλα τα δείγματα βρέθηκαν απολιθώματα, σε κάποια με μεγαλύτερο ποσοστό (EL51, EL20) και σε κάποια άλλα με μικρότερο ποσοστό (EL34, EL19). Σε αντίθεση με τα παραπάνω έρχεται η τομή EL51 όπου το αργιλικό υλικό είναι σε μεγαλύτερες ποσότητες και αναμειγνύεται με το ασβεστιτικό υλικό. Οξείδια και υδροξείδια Fe εντοπίστηκαν σε όλα τα δείγματα και επικρατούσαν σε περιοχές φλεβών ή πόρων ή διάσπαρτα στη μάζα του πετρώματος. Ιδίως, στην λεπτή τομή EL34 βρέθηκαν οξείδια Fe στα περιθώρια της τομής με μεγάλο πάχος και μέσα να περικλείουν ιδιόμορφους και υπιδιόμορφους κρυστάλλους ασβεστίτη, που πιθανόν να μην προέρχονται από το ίδιο το πέτρωμα. Τέλος, μέσα στις λεπτές τομές συναντώνται επίσης κρύσταλλοι ορυκτών, όπως πλαγιόκλαστα, ζιρκόνια και μεταλλικά ορυκτά.

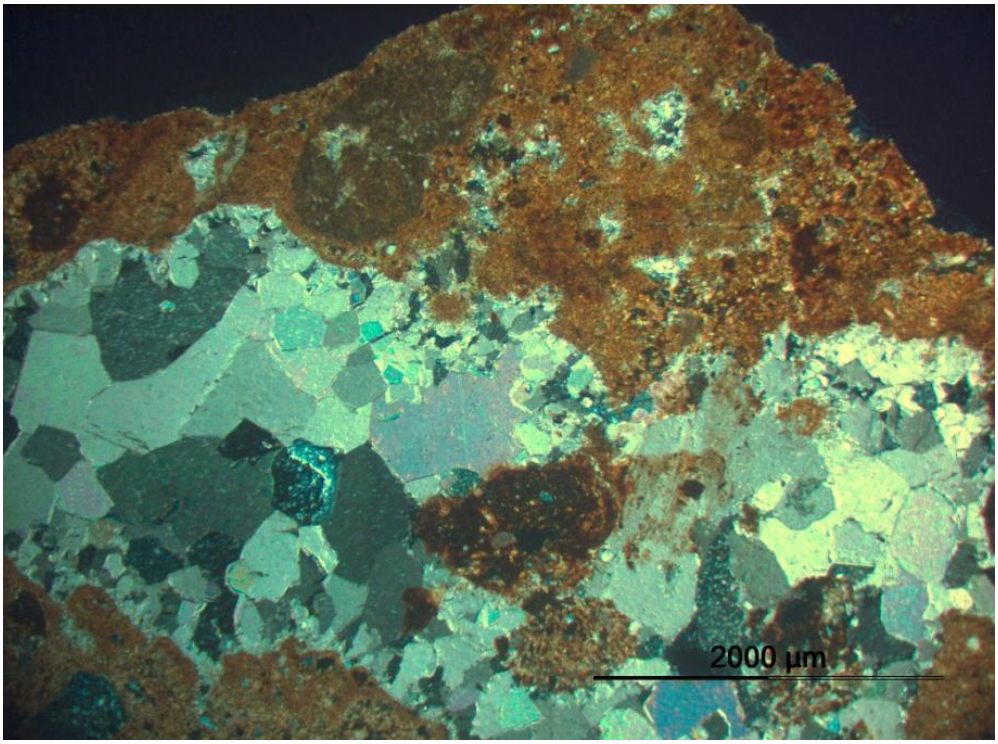


Εικ.5.18 Λεπτή τομή σε παράλληλα (πάνω) και σε κάθετα (κάτω) Nicols: EL20 με εμφάνιση σπαριτικού και μικριτικού υλικού μαζί με υπιδιόμορφους κρυστάλλους ασβεστίτη.





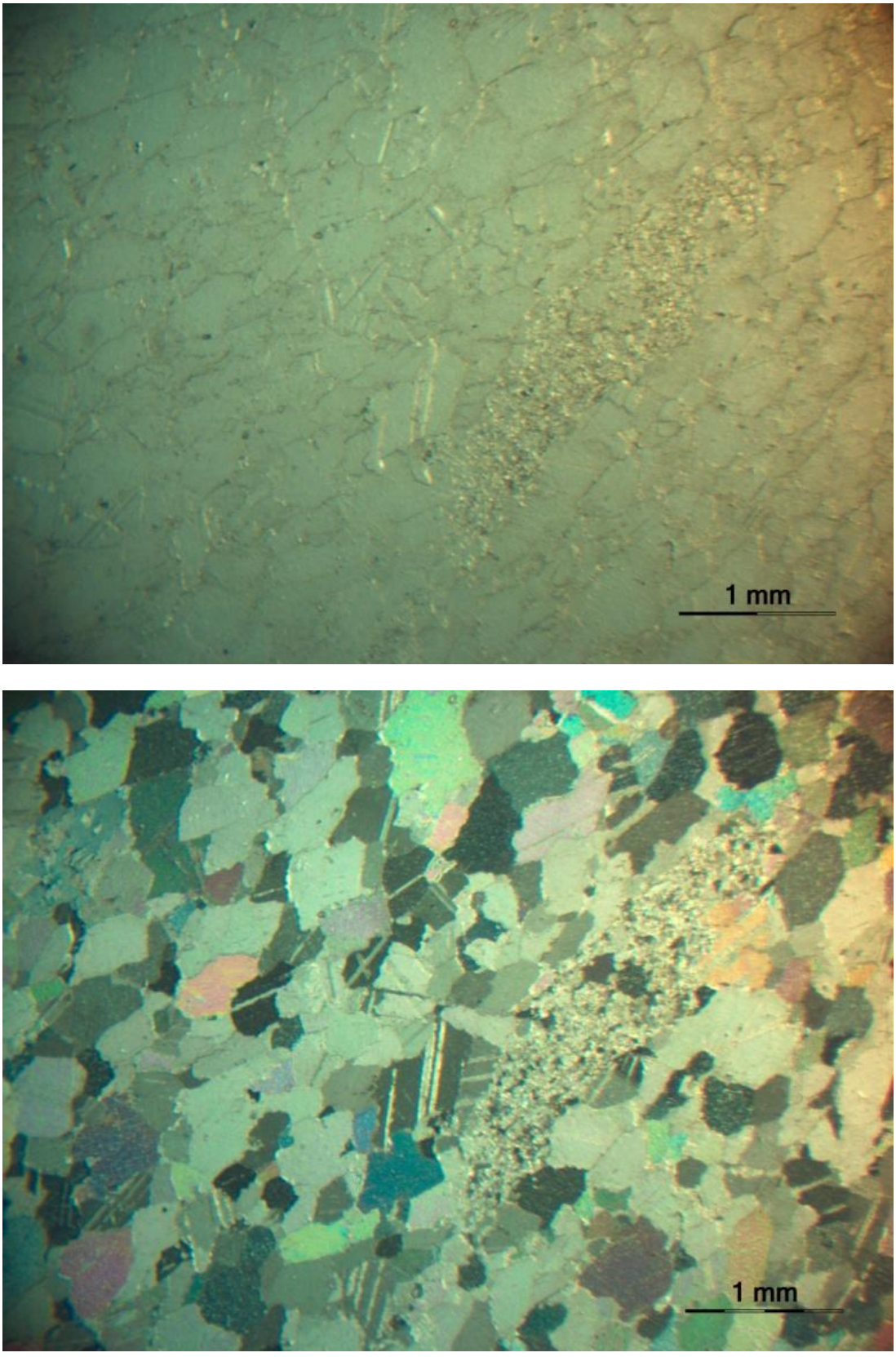
Εικ.5.19 Λεπτή τομή σε παράλληλα (πάνω) και κάθετα (κάτω) Nicols: *EL34 που απεικονίζει σπαριτικό και μικριτικό υλικό ως κύρια μάζα μαζί με αργιλικό υλικό (σκούρο καφέ) και στη μέση της τομής εμφανίζεται απολίθωμα με νηματοειδές ασβεστιτικό υλικό.*



Εικ.5.20 Λεπτή τομή σε κάθετα Nicols του δείγματος EL34 που απεικονίζει οξείδια Fe γύρω σε σπαριτική ασβεστιτική φλέβα και τα οποία εισχωρούν μέσα σε αυτή.

5.2.4 Μάρμαρο Πεντέλης

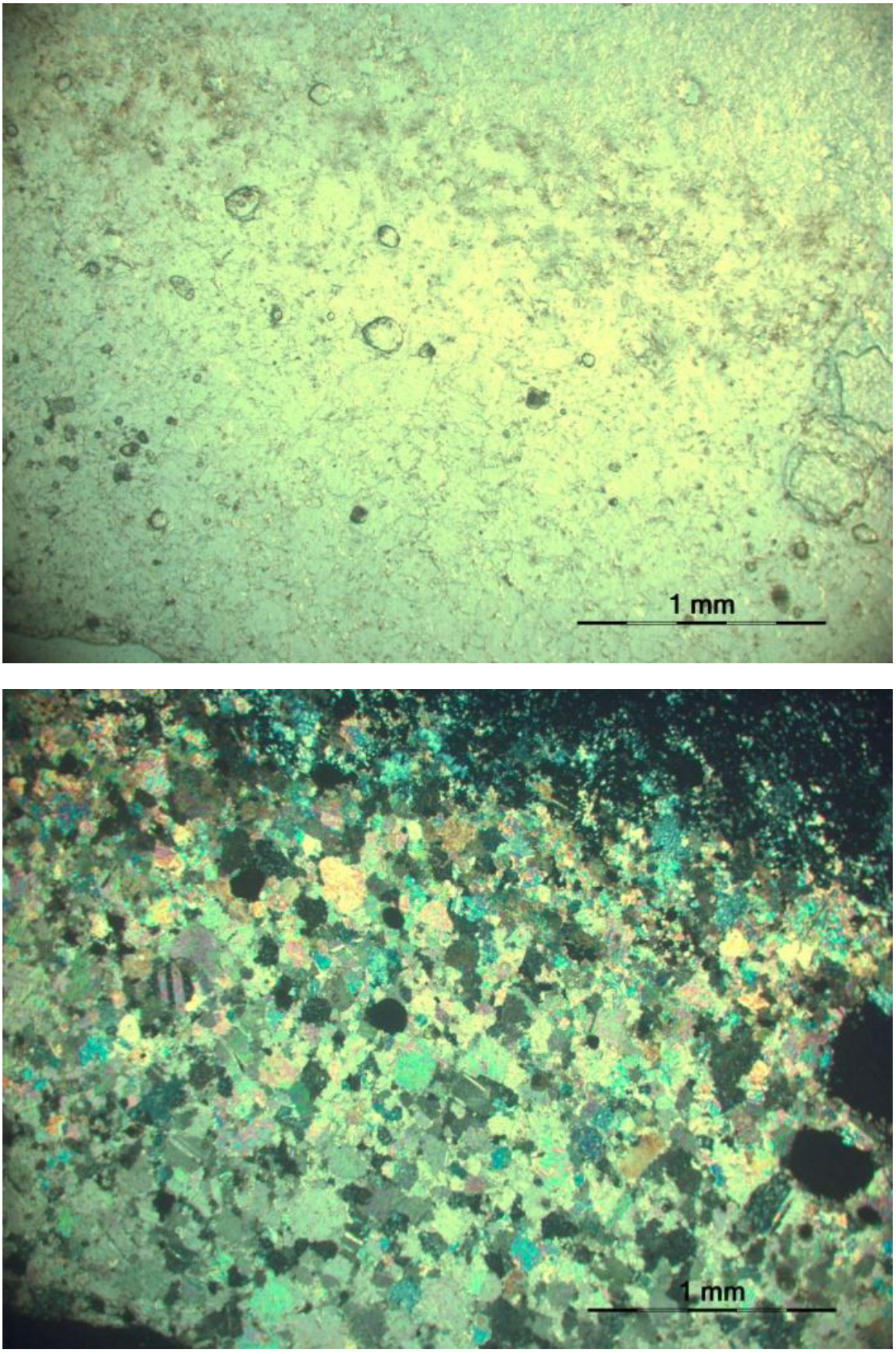
Με την μικροσκοπική παρατήρηση, το μάρμαρο Πεντέλης φάνηκε ότι είναι ένα πολύ καθαρό μάρμαρο χωρίς μεγάλα ποσοστά προσμίξεων και καλά σχηματισμένους κρυστάλλους. Αποτελείται από 100% ασβεστίτη με υπιδιόμορφους έως αλλοτριόμορφους κρυστάλλους και έχω μηδενικό πορώδες. Τέλος, στις λεπτές τομές EL4 και EL53 έχω την εμφάνιση φακών και φλεβών αντίστοιχα, με μικρότερους σε μέγεθος κρυστάλλους με προσανατολισμό (Εικ.5.21).



Εικ.5.21 Λεπτή τομή EL4 σε παράλληλα (πάνω) και κάθετα (κάτω) Nicols:φαίνονται οι καλά σχηματισμένοι υπιδιόμορφοι και αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι ασβεστίτη. Στην δεξιά μεριά της τομής φαίνεται ένας φακός από μικρότερου μεγέθους κρυστάλλους ασβεστίτη με προσανατολισμό.

5.2.5 Μάρμαρο Υμηττού

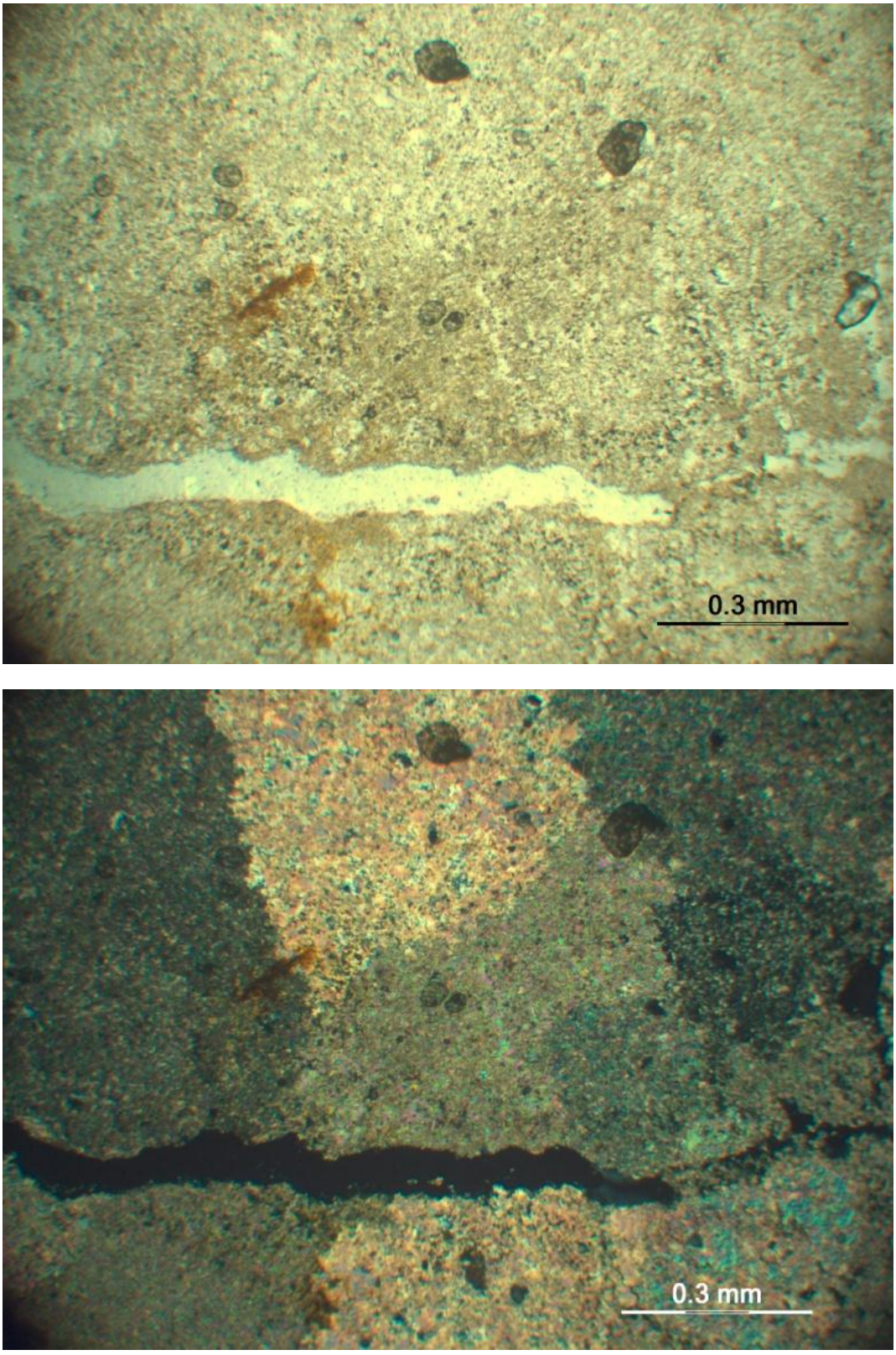
Το μάρμαρο Υμηττού είναι και αυτό μάρμαρο με μεγάλη καθαρότητα, με καλά σχηματισμένους κυρίως υπιδιόμορφους κρυστάλλους ασβεστίτη (Εικ.5.22). Έχω ένα πολύ μικρό ποσοστό πορώδους που δεν ξεπερνά το 5%, ενώ κάποιοι κρύσταλλοι παρουσιάζουν κάμψη των λαμελλών τους.



Εικ.5.22 Λεπτή τομή του δείγματος EL52 σε παράλληλα (πάνω) και κάθετα (κάτω) Nicols: είναι εμφανής οι υπιδιόμορφοι κρύσταλλοι του ασβεστίτη και κάποιους πόρους στο δεξί μέρος της τομής.

5.2.6 Δολομιτικό Μάρμαρο

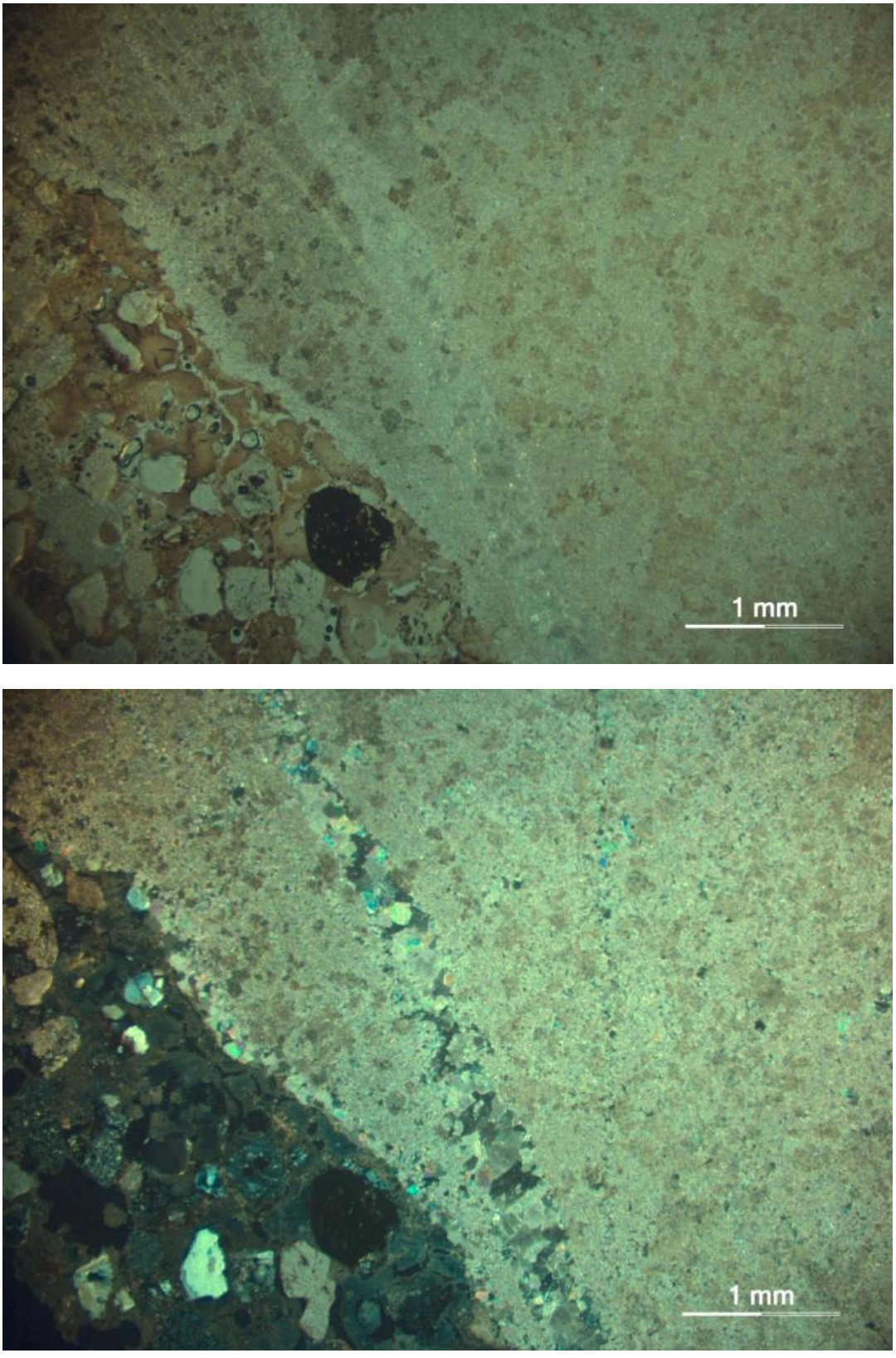
Στο δολομιτικό μάρμαρο χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση του δολομίτη αντί για τον ασβεστίτη. Οι κρύσταλλοι του δολομίτη είναι σπαριτικοί αλλά λόγω της δολομιτίωσης που συμβαίνει σε αυτούς, δηλαδή την αντικατάσταση του Ca^{2+} από Mg^{2+}, το εσωτερικό του κρυστάλλου διαφοροποιείται και μετατρέπεται σε μικριτικό υλικό (Εικ.5.23). Τέλος, έχουμε την παρουσία αργιλικού υλικού και κάποιο αξιόλογο ποσοστό πορώδους.



Εικ.5.23 Εικόνα λεπτής τομής του δείγματος EL16 σε παράλληλα (πάνω)και κάθετα (κάτω) Nicols: διακρίνονται οι κρύσταλλοι δολομίτη που υφίστανται το φαινόμενο της δολομιτίωσης, το αργιλικό υλικό και οι πόροι (μαύρο χρώμα).

5.2.7 Ασβεστόλιθος

Αυτή η κατηγορία δεν μπόρεσε να καταταγεί σε μία από τις παραπάνω γι' αυτό το λόγο θα γίνει ξεχωριστή αναφορά σε αυτό τον τύπου λιθοτύπου. Αυτό το είδος ασβεστόλιθου αποτελείται από μικριτικό υλικό κατά κύριο λόγο, ενώ μέσα σε αυτό εντοπίστηκαν 7 ασβεστιτικές φλέβες με καλά σχηματισμένους κρυστάλλους (Εικ.5.24). Περιέχει κρυστάλλους δολομίτη, που πιθανά να προέρχονται από τη δολομιτίωση του ασβεστίτη. Δεν εντοπίστηκαν απολιθώματα, ενώ έχω παρουσία αργιλικού υλικού και κρυστάλλους από χαλκηδόνιο. Μεταλλικά ορυκτά και οξείδια και υδροξείδια Fe εντοπίστηκαν σε διάφορα σημεία της λεπτής τομής. Τέλος, στα περιθώρια της τομής παρατηρήθηκε κονίαμα, δηλαδή μίγμα ασβεστιτικού- πυριτικού υλικού.



Εικ.5.24 Λεπτή τομή EL3B σε παράλληλα (πάνω) και κάθετα (κάτω) Nicols: φαίνεται το μικριτικό υλικού του δείγματος μαζί με μία ασβεστιτική φλέβα. Στην αριστερή μεριά της τομής παρατηρείται το κονίαμα.

6 Μικροανάλυση

6.1 Ανθρακικά Ορυκτά

Τα ανθρακικά ορυκτά είναι από τα κυριότερα σε πετρώματα όπως οι ασβεστόλιθοι και τα μάρμαρα με την κύρια ανθρακική ρίζα να είναι (CO_3^{-2}). Από τα δείγματα που συλλέχτηκαν, αναλύθηκαν 65 κρύσταλλοι ασβεστίτη από τον ωολιθικό ασβεστόλιθο (EL21, EL22), 15 από τον ελευσινιακό ασβεστόλιθο (EL19, EL20, EL34), 8 από τον ακτίτη λίθο (EL12, EL23, EL36), 2 από τα μάρμαρα Υμηττού (EL17) και Πεντέλης (EL50) και τέλος 1 από το δολομιτικό μάρμαρο (EL16).

Όσον αφορά τον ελευσινιακό ασβεστόλιθο, οι χημικές αναλύσεις δίνουν ποσοστά του MgO που κυμαίνονται από 0-0,62% και του Fe_2O_3 που κυμαίνονται από 0-0,20% (Εικ.6.1).

Όσον αφορά τον ακτίτη λίθο, τα ποσοστά του MgO και του Fe_2O_3 κυμαίνονται μεταξύ 0-0,85% και 0-0,89% αντίστοιχα.

Τα μάρμαρα Υμηττού περιέχουν ποσοστά MgO και Fe_2O_3 0,04-0,21% και 0 αντίστοιχα. Ο ωολιθικός ασβεστόλιθος βρέθηκε με περιεκτικότητες 0,07-0,81% MgO 0-0,38% Fe_2O_3.

Αντίθετα, τα μάρμαρα Πεντέλης έχουν ποσοστά MgO και Fe_2O_3 0,88-0,89% και 0,14-0,15% αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε επίσης η υψηλή περιεκτικότητα Mg στα μάρμαρα Υμηττού και στον ακτίτη λίθο.

Τέλος, αναλύθηκαν και 15 κρύσταλλοι δολομίτη από τους οποίους οι 13 ανήκουν σε δείγματα του ακτίτη λίθου (EL12, EL36), 1 σε ωολιθικό ασβεστόλιθο (EL22) και τέλος 1 σε δολομιτικό μάρμαρο (EL16). Στον ακτίτη λίθο τα ποσοστά του MgO και CaO κυμαίνονται 17,80-22,02% και 26,83-31,06% αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι κρύσταλλος δολομίτη σε δείγμα ωολιθικού ασβεστόλιθου περιέχει 23,31% MgO και 30,87% CaO, ενώ στο δολομιτικό μάρμαρο εμφανίζει ποσοστά ελαφρώς μικρότερα που κυμαίνονται σε 21,09% για το MgO και 30,49% για το CaO (Εικ. 6.1 – Εικ. 6.5).

Δείγμα	EL19	EL19	EL19	EL19	EL19	EL19	EL19	EL 20	EL 20	EL 20	EL 20	EL 20	EL 34	EL 34
Ορυκτό	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc
SiO_2	0,01	0,05	0,11	0,03	0,05	0,88	0,28	0,46	0,08	-	-	0,15	0,05	0,06
TiO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,06	-	-	-	-
Al_2O_3	-	0,20	0,06	-	-	0,60	-	0,28	0,01	0,04	-	-	0,06	0,02
Fe_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	0,17	-	0,13	0,05	-	0,20	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,04	-	0,07	-	0,01	0,02
MgO	0,15	0,62	0,04	0,36	0,15	0,17	0,21	0,01	-	0,26	0,19	0,06	-	0,10
CaO	54,61	53,49	55,02	53,83	53,30	52,33	54,84	51,95	52,67	52,34	51,97	52,35	53,39	54,02
Na_2O	0,16	-	0,06	0,05	0,06	-	0,09	-	0,17	0,08	0,03	-	0,13	-
K_2O	-	0,01	-	-	-	0,07	0,04	-	-	0,03	-	-	-	0,01
Σύνολο	54,93	54,37	55,29	54,27	53,56	54,05	55,46	53,00	53,01	52,94	52,31	52,56	53,84	54,23
Αριθμός ιόντων με βάση 3 άτομα O														
Si	0,001	0,003	0,006	0,002	0,003	0,045	0,014	0,024	0,004	-	-	0,008	0,003	0,003
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	0,002	0,002	-	-	-	-
Al	0,000	0,012	0,004	0,000	0,000	0,036	0,000	0,017	0,001	0,002	0,000	0,000	0,004	0,001
Fe(3)	-	-	-	-	-	-	-	0,007	-	0,005	0,002	-	0,008	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	0,006	0,002	-	0,003	-	-	0,001
Mg	0,011	0,047	0,003	0,028	0,012	0,013	0,016	0,001	-	0,020	0,015	0,005	-	0,008
Ca	2,980	2,929	2,978	2,967	2,980	2,842	2,950	2,909	2,977	2,958	2,977	2,979	2,971	2,983
Na	0,016	-	0,006	0,005	0,006	-	0,009	-	0,017	0,008	0,003	-	0,013	-
K	-	0,001	-	-	-	0,005	0,003	-	-	0,002	-	-	-	0,001
Σύνολο	3,007	2,992	2,996	3,001	3,000	2,940	2,992	2,964	3,003	2,999	3,001	2,992	2,998	2,997

Εικ. 6.1 Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις ανθρακικών ορυκτών από τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου.

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Δείγμα	EL 34	EL12	EL12	EL12	EL12	EL 23	EL 23	EL36	EL36	EL16	EL 17	EL 17	EL 50	EL 50
Ορυκτό	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc
SiO_2	0,11	0,02	0,15	0,03	0,01	0,67	0,21	-	0,04	-	0,02	0,12	0,01	-
TiO_2	-	0,10	-	0,10	0,05	-	0,06	-	-	0,45	-	0,21	-	-
Al_2O_3	0,04	-	-	0,03	0,30	-	0,02	0,01	-	0,03	0,09	0,25	0,15	0,07
Fe_2O_3	0,01	-	0,04	0,05	0,89	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,15
MnO	-	-	-	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-	0,24	-
MgO	0,18	0,45	0,66	0,29	0,46	-	0,85	0,12	0,67	0,11	0,04	0,21	0,89	0,88
CaO	52,23	51,71	52,45	51,16	51,26	53,41	55,63	53,23	52,87	54,12	51,86	52,37	52,68	54,12
Na_2O	0,26	0,07	-	-	-	-	0,03	0,05	-	-	0,01	-	-	-
K_2O	0,07	-	0,08	0,02	0,68	-	0,08	-	-	0,10	-	0,11	0,07	0,03
Σύνολο	52,90	52,35	53,38	52,01	53,65	54,08	56,88	53,41	53,58	54,81	52,02	53,27	54,18	55,25
Αριθμός ιόντων με βάση 3 άτομα O														
Si	0,006	0,001	0,008	0,002	0,001	0,034	0,010	-	0,002	-	0,001	0,006	0,001	-
Ti	-	0,004	-	0,004	0,002	-	0,002	-	-	0,017	-	0,008	-	-
Al	0,002	-	-	0,002	0,018	-	0,001	0,001	-	0,002	0,006	0,015	0,009	0,004
Fe(3)	-	-	0,002	0,002	0,035	-	-	-	-	-	-	-	0,005	0,006
Mn	-	-	-	0,015	-	-	-	-	-	-	-		0,010	0,000
Mg	0,014	0,036	0,051	0,023	0,036	0,000	0,062	0,009	0,052	0,008	0,003	0,016	0,068	0,066
Ca	2,954	2,951	2,928	2,944	2,857	2,931	2,908	2,987	2,944	2,951	2,986	2,928	2,896	2,918
Na	0,027	0,007	-	-	-	-	0,003	0,005	-	-	0,001	-	-	-
K	0,005	-	0,005	0,001	0,045	-	0,005	-	-	0,006	-	0,007	0,005	0,002
Σύνολο	3,008	2,999	2,994	2,993	2,993	2,966	2,991	3,002	2,998	2,985	2,997	2,981	2,995	2,996

Εικ. 6.2 συνέχεια. Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις ανθρακικών ορυκτών από *τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου.*

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Δείγμα	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21	EL 21
Ορυκτό	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc
SiO_2	0,05	0,02	0,08	1,66	-	0,06	0,15	-	0,18	0,38	0,33	0,61	0,48	-
TiO_2	0,16	0,02	-	0,10	-	-	0,14	-	-	-	-	-	-	-
Al_2O_3	0,04	0,13	-	0,73	-	0,07	0,00	-	-	0,23	0,38	0,32	0,11	-
Fe_2O_3	0,07	0,06	0,23	0,38	0,21	-	-	0,01	-	-	-	0,20	0,20	-
MnO	-	0,06	-	-	0,07	-	-	0,12	0,02	-	0,02	0,09	-	0,16
MgO	0,26	0,24	0,12	0,34	0,15	0,07	0,18	0,24	0,21	0,11	0,38	0,33	0,33	0,38
CaO	52,63	52,16	53,26	51,12	52,34	52,96	53,64	52,42	54,21	52,01	52,90	54,53	55,46	56,09
Na_2O	-	-	0,28	0,09	0,01	0,08	0,13	0,15	0,22	0,06	0,34	0,12	0,20	-
K_2O	-	-	0,01	0,07	0,07	0,08	0,03	-	0,15	0,09	0,07	0,15	0,08	0,07
Total	53,21	52,69	53,98	54,49	52,85	53,32	54,27	52,94	54,99	52,88	54,42	56,35	56,86	56,70
Αριθμός ιόντων με βάση 3 άτομα O														
Si	0,003	0,001	0,004	0,082	-	0,003	0,008	-	0,009	0,020	0,017	0,030	0,023	-
Ti	0,006	0,001	-	0,004	-	-	0,005	-	-	-	-	-	-	-
Al	0,002	0,008	-	0,043	0,000	0,004	-	-	-	0,014	0,023	0,018	0,006	-
Fe(3)	0,003	0,002	0,009	0,014	0,008	-	-	-	-	-	-	0,007	0,007	-
Mn	-	0,003	-	-	0,003	-	-	0,005	0,001	-	0,001	0,004	-	0,007
Mg	0,020	0,019	0,009	0,025	0,012	0,005	0,014	0,019	0,016	0,009	0,029	0,024	0,024	0,028
Ca	2,954	2,959	2,955	2,711	2,970	2,975	2,953	2,967	2,949	2,924	2,884	2,863	2,897	2,963
Na	-	-	0,028	0,009	0,001	0,008	0,013	0,015	0,022	0,006	0,034	0,011	0,019	-
K	-	-	0,001	0,004	0,005	0,005	0,002	-	0,010	0,006	0,005	0,009	0,005	0,004
Σύνολο	2,988	2,993	3,006	2,892	2,999	3,001	2,994	3,007	3,007	2,979	2,991	2,968	2,982	3,002

Εικ. 6.3 συνέχεια. Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις ανθρακικών ορυκτών από *τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου.*

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Δείγμα	EL 21	EL22	EL22	EL22	EL22	EL22	EL 22	EL 22	EL 22	EL 22	EL 22	EL22	EL 21	EL 12
Ορυκτό	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	Cc	D
SiO_2	0,18	-	-	0,12	-	-	0,09	0,09	0,25	0,09	0,09	0,06	0,48	0,12
TiO_2	0,01	-	-	-	-	0,32	0,04	0,06	-	0,05	-	-	-	-
Al_2O_3	0,12	0,06	0,23	-	-	0,22	0,06	0,11	0,23	0,67	0,13	0,15	0,11	0,76
Fe_2O_3	0,01	0,10	0,10	0,15	0,02	0,06	-	0,09	-	0,19	-	-	0,20	0,72
MnO	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	0,26	0,25	0,57	0,63	0,58	0,63	0,18	0,33	0,81	0,62	0,36	0,37	0,33	19,95
CaO	51,84	53,70	52,11	52,39	52,44	51,78	53,42	54,06	54,13	53,93	53,95	54,24	55,46	28,65
Na_2O	0,24	0,20	-	-	0,23	0,14	-	0,09	0,04	-	0,28	0,14	0,20	0,26
K_2O	0,04	0,03	-	-	0,04	-	0,02	0,05	0,01	-	0,07	0,02	0,08	0,06
Σύνολο	52,77	54,34	53,01	53,29	53,31	53,15	53,81	54,88	55,47	55,55	54,88	54,98	56,86	50,52
Αριθμός ιόντων με βάση 3 άτομα O														
Si	0,009	-	-	0,006	-	-	0,005	0,005	0,012	0,004	0,005	0,003	0,023	0,006
Ti	-	-	-	-	-	0,013	0,002	0,002	-	0,002	-	-	-	-
Al	0,007	0,004	0,014	-	-	0,014	0,004	0,007	0,014	0,039	0,008	0,009	0,006	0,043
Fe(3)	-	0,004	0,004	0,006	0,001	0,002	-	0,003	-	0,007	-	-	0,007	0,026
Mn	0,003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	0,020	0,019	0,045	0,049	0,045	0,049	0,014	0,025	0,060	0,046	0,027	0,028	0,024	1,413
Ca	2,923	2,959	2,928	2,930	2,941	2,895	2,967	2,940	2,892	2,872	2,936	2,945	2,897	1,459
Na	0,024	0,020	-	-	0,023	0,014	-	0,009	0,004	-	0,028	0,014	0,019	0,024
K	0,003	0,002	-	-	0,003	-	0,001	0,003	0,001	-	0,005	0,001	0,005	0,004
Ni	0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σύνολο	3,000	3,007	2,991	2,991	3,013	2,987	2,993	2,994	2,983	2,970	3,008	3,000	2,982	2,974

Εικ. 6.4 συνέχεια. Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις ανθρακικών ορυκτών από *τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου*.

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Δείγμα	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 12	EL 36	EL16	EL22
Ορυκτό	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
SiO_2	0,06	0,85	-	0,31	0,69	0,01	0,87	0,19	0,26	0,87	0,39	0,21	0,44	0,28
TiO_2	0,03	-	0,16	0,03	0,15	0,05	0,04	-	0,09	-	0,15	0,10	-	0,05
Al_2O_3	1,29	1,14	0,13	-	0,51	0,30	0,64	0,10	1,91	0,44	0,70	0,23	-	0,11
Fe_2O_3	0,94	2,98	0,15	0,19	1,30	0,72	0,90	-	2,37	0,03	0,61	-	0,49	-
MnO	-	-	0,17	0,11	-	0,11	0,03	-	-	0,08	0,22	0,09	-	-
MgO	20,24	20,70	19,90	20,15	19,88	17,80	19,68	22,02	18,36	19,08	18,52	19,77	21,09	23,31
CaO	28,36	26,83	29,72	29,54	27,68	31,06	29,35	28,89	28,65	30,91	29,63	30,67	30,49	30,87
Na_2O	0,17	0,57	-	0,14	0,12	0,14	0,25	0,32	0,14	0,42	0,39	0,29	0,26	-
K_2O	0,18	0,19	-	0,08	0,27	-	0,10	-	0,37	0,12	0,13	-	0,07	0,10
Σύνολο	51,27	53,26	50,23	50,55	50,60	50,19	51,86	51,52	52,15	51,95	50,74	51,36	52,84	54,72
Αριθμός ιόντων με βάση 3 άτομα O														
Si	0,003	0,038	-	0,015	0,033	-	0,040	0,009	0,012	0,040	0,019	0,010	0,020	0,012
Ti	0,001	-	0,006	0,001	0,005	0,002	0,001	-	0,003	-	0,005	0,004	-	0,002
Al	0,071	0,060	0,007	-	0,028	0,017	0,035	0,005	0,104	0,024	0,039	0,013	-	0,006
Fe(3)	0,033	0,100	0,005	0,007	0,046	0,026	0,031	-	0,082	0,001	0,022	-	0,017	-
Mn	-	-	0,007	0,004	-	0,005	0,001	-	-	0,003	0,009	0,004	-	-
Mg	1,407	1,374	1,429	1,434	1,399	1,295	1,353	1,523	1,260	1,320	1,316	1,389	1,433	1,517
Ca	1,417	1,280	1,534	1,511	1,400	1,624	1,450	1,436	1,414	1,536	1,513	1,548	1,489	1,444
Na	0,015	0,049	-	0,013	0,011	0,013	0,022	0,029	0,013	0,038	0,036	0,026	0,023	-
K	0,011	0,011	-	0,005	0,016	-	0,006	-	0,022	0,007	0,008	-	0,004	0,006
Σύνολο	2,957	2,912	2,988	2,990	2,938	2,982	2,940	3,003	2,909	2,970	2,967	2,993	2,985	2,986

Εικ. 6.5 συνέχεια. Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις ανθρακικών ορυκτών από *τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου.*

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

6.2 Μαρμαρυγίες

Ο γενικός τύπος των μαρμαρυγιών είναι :

$$IM_{2-3}T_4O_{10}A_2$$

Όπου : I καλύπτεται από K, Na, Ca, Cs, Rb, Ba

M καλύπτεται κυρίως από Li, Fe^{2+} ή Fe^{3+}, Mg, Mn^{2+} ή Mn^{3+}, Zn, Al, Cr, V, Ti

T καλύπτεται από Si, Al, Fe, Be, B

A καλύπτεται από OH, F, Cl, O, S

Οι μαρμαρυγίες είναι διοκταεδρικοί ή τριοκταεδρικοί. Για παράδειγμα, ο μασχοβίτης είναι διοκταεδρικός μαρμαρυγίας ενώ αντίθετα ο βιοτίτης ανήκει στους τριοκταεδρικούς μαρμαγυγίες.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τους μαρμαρυγίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.6) καθώς επίσης και η κατανομή των ιόντων στο πλέγμα. Ο υπολογισμός της στοιχειομετρίας τους έγινε με βάση 22 άτομα O και ο ολικός σίδηρος θεωρήθηκε τρισθενής.

Δείγμα	**EL12**	**EL12**	**EL12**	**EL12**	**EL12**	**EL12**	**EL12**	**EL16**	**EL17**	**EL17**	**EL34**
Ορυκτό	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**
SiO_2	52,64	50,01	51,81	51,78	51,4	50,68	49,95	51,65	51,68	49,9	49,53
TiO_2	0,05	0,5	0,73	0,43	0,34	0,14	0,08	0,36	0,25	0,29	0,58
Al_2O_3	28,35	28,16	28,65	30,41	27,15	30,68	32,83	25,95	26,68	30,45	29,64
Fe_2O_3	3,3	3,25	2,69	2,54	2,37	0,97	0,82	4,85	1,11	0,33	4,56
MnO	0,03	0,02	0,02	0,06	-	-	-	-	-	-	-
MgO	0,26	1,65	3,06	1,47	2,86	1,96	0,66	2,21	2,31	2,4	1,2
CaO	0,36	0,14	0,38	0,42	0,99	0,36	0,18	0,89	0,4	0,53	0,5
Na_2O	0,37	0,04	0,18	0,81	0,23	0,62	0,47	0,49	0,48	0,63	0,36
K_2O	10,65	10,24	10,3	10,31	10,46	10,56	10,64	10,32	10,32	10,45	9,95
Σύνολο	96,01	94,01	97,82	98,23	95,8	95,97	95,63	96,72	93,23	94,98	96,32
	Αριθμός ιόντων με βάση 22 άτομα O										
Si	6,928	6,732	6,7	6,666	6,804	6,655	6,564	6,825	6,972	6,619	6,545
Al IV	1,072	1,268	1,3	1,334	1,196	1,345	1,436	1,175	1,028	1,381	1,455
Z	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*
Al VI	3,326	3,2	3,066	3,28	3,039	3,402	3,649	2,866	3,214	3,379	3,16
Ti	0,005	0,051	0,071	0,042	0,034	0,014	0,008	0,036	0,025	0,029	0,058
Fe(3)	0,327	0,329	0,262	0,246	0,236	0,096	0,081	0,482	0,113	0,033	0,453
Mn	0,003	0,002	0,002	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,051	0,331	0,59	0,282	0,564	0,384	0,129	0,435	0,465	0,475	0,236
Y	*3,712*	*3,914*	*3,991*	*3,857*	*3,874*	*3,896*	*3,868*	*3,819*	*3,817*	*3,915*	*3,908*

Ca	0,051	0,020	0,053	0,058	0,140	0,051	0,025	0,126	0,058	0,075	0,071
Na	0,094	0,010	0,045	0,202	0,059	0,158	0,120	0,126	0,126	0,162	0,092
K	1,788	1,759	1,699	1,693	1,766	1,769	1,784	1,740	1,776	1,768	1,677
X	*1,933*	*1,789*	*1,797*	*1,953*	*1,966*	*1,977*	*1,929*	*1,991*	*1,959*	*2,006*	*1,840*
Mg/(Mg+Fe)	0,135	0,501	0,693	0,534	0,705	0,800	0,615	0,474	0,805	0,935	0,343

Δείγμα	**EL36**	**EL36**	**EL36**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL23**	**EL22**
Ορυκτό	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**	**MU**
SiO_2	51,03	51,25	50,29	51,16	51,45	50,76	52,56	49,85	49,51	50,84	49,67	49,85
TiO_2	0,42	0,29	0,16	0,05	0,50	0,45	0,18	0,27	0,35	0,27	0,59	0,12
Al_2O_3	31,98	31,72	29,15	31,02	30,64	32,18	28,92	31,39	34,16	33,89	31,85	33,70
Fe_2O_3	2,11	2,50	1,93	1,46	2,28	1,84	1,56	2,90	1,60	1,47	1,74	1,28
MnO	0,15	-	-	-	0,09	-	-	0,14	-	0,26	0,12	-
MgO	1,46	1,44	2,04	2,65	2,54	1,28	3,13	1,79	1,00	0,77	1,01	1,41
CaO	0,36	1,07	0,43	1,85	0,16	0,87	1,26	0,15	0,07	0,07	1,26	0,49
Na_2O	0,76	0,68	0,94	1,41	0,95	0,53	0,17	0,82	1,05	0,79	0,84	0,50
K_2O	10,07	9,61	9,96	7,77	10,30	9,99	10,09	9,80	10,08	10,63	9,86	10,70
Σύνολο	98,34	98,56	94,90	97,37	98,91	97,90	97,87	97,11	97,82	98,99	96,94	98,05
	Αριθμός ιόντων με βάση 22 άτομα O											
Si	6,548	6,558	6,693	6,577	6,584	6,535	6,766	6,494	6,379	6,478	6,483	6,419
Al IV	1,452	1,442	1,307	1,423	1,416	1,465	1,234	1,506	1,621	1,522	1,517	1,581
Z	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*
Al VI	3,384	3,342	3,266	3,276	3,205	3,417	3,154	3,314	3,566	3,568	3,382	3,534
Ti	0,041	0,028	0,016	0,005	0,048	0,044	0,017	0,026	0,034	0,026	0,058	0,012
Fe(3)	0,204	0,241	0,193	0,141	0,220	0,178	0,151	0,284	0,155	0,141	0,171	0,124
Mn	0,016	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,015	0,000	0,028	0,013	0,000
Mg	0,279	0,275	0,405	0,508	0,485	0,246	0,601	0,348	0,192	0,146	0,197	0,271
Y	*3,924*	*3,886*	*3,880*	*3,930*	*3,967*	*3,885*	*3,923*	*3,988*	*3,947*	*3,909*	*3,821*	*3,941*
Ca	0,04	0,14	0,06	0,25	0,02	0,12	0,17	0,02	0,01	0,01	0,17	0,06

	9	7	1	5	2	0	4	1	0	0	6	8
Na	0,189	0,169	0,243	0,351	0,236	0,132	0,042	0,207	0,262	0,195	0,213	0,125
K	1,648	1,569	1,691	1,274	1,682	1,641	1,657	1,629	1,657	1,728	1,642	1,758
X	*1,887*	*1,884*	*1,995*	*1,880*	*1,939*	*1,893*	*1,873*	*1,857*	*1,929*	*1,933*	*2,031*	*1,950*
Mg/(Mg+Fe)	0,578	0,533	0,677	0,782	0,688	0,580	0,799	0,550	0,553	0,509	0,535	0,686

Εικ.6.6 Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις μοσχοβίτη από τα δείγματα των μνημείων του αρχαιολογικού χώρου.

- *: κάτω από τα όρια ανιχνευσιμότητας.*

Αναλύθηκαν 23 κρύσταλλοι μαρμαρυγιών εκ των οποίων 18 ανήκαν σε ακτίτη λίθο (EL12, EL23, EL36), 2 σε μάρμαρο Υμηττού (EL17), 1 σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο (EL34), 1 σε ωολιθικό ασβεστόλιθο (EL22) και τέλος 1 σε δολομιτικό μάρμαρο (EL16). Παρατηρήθηκε ότι σε όλους τους κρυστάλλους μαρμαρυγιών ο άξονας Y προσεγγίζει το 4 και συμπερασματικά ανήκει σε μοσχοβίτες. Επίσης ο λόγος Si/Al^{iv} >3 πράγμα που υποδεικνύει την ύπαρξη φεγκιτικού μοσχοβίτη. Τέλος, υπολογίστηκαν τα ακραία μέλη παραγονίτης (pg), σελαδονίτης (ce) και μοσχοβίτης (mu) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις :

$$pg= 100*Na(Na+K)$$

$$ce= (Si-2)/6$$

$$mu= 100-ce-pg$$

Τα ποσοστά στο ακραίο μέλος του μοσχοβίτη κυμαίνονται από 77,637-98,646%, ενώ τα ποσοστά σε παραγονίτη και σελαδονίτη κυμαίνονται μεταξύ 0,565-13,653% και 0,829-0,730% αντίστοιχα.

6.3 Άστριοι

Οι άστριοι έχουν τον γενικό τύπο:

$$XZ_4O_8$$

Όπου: X καλύπτεται από K, Na, Ca, Ba, Fe, Mg

Z καλύπτεται από Si, Al

Οι άστριοι χωρίζονται σε καλιούχους αστρίους και πλαγιόκλαστα. Η στοιχειομετρική κατανομή υπολογίστηκε με βάση 8 άτομα O. Ο σίδηρος θεωρήθηκε όλος τρισθενής. Έγιναν 9 μικροαναλύσεις στους αστρίους, 7 σε δείγματα ακτίτη λίθου (EL12, EL23, EL36) και 2 σε δείγματα ωολιθικού ασβεστόλιθου (EL22), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.7).

Δείγμα	EL12	EL12	EL36	EL23	EL23	EL23	EL23	EL22	EL22
Ορυκτό	KF	KF	Alb	Alb	Alb	Alb	Alb	Alb	Alb
SiO_2	56,68	61,68	68,95	68,41	68,59	69,68	67,69	69,26	67,96
TiO_2	0,15	0,15	-	-	-	-	-	-	-
Al_2O_3	25,84	18,45	20,26	20,59	19,86	19,68	19,89	19,59	19,26
Fe_2O_3	2,39	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	1,89	0,28	0,54	0,28	0,29	0,17	0,26	0,21	0,32
Na_2O	0,28	0,31	11,55	11,51	11,68	11,9	11,52	11,85	11,52
K_2O	11,87	14,86	0,15	0,15		0,05	-	-	0,1
BaO	-	3,59	-	-	-	-	-	-	-
Σύνολο	99,73	99,32	101,45	100,94	100,42	101,48	99,36	100,91	99,16
	Αριθμός ιόντων με βάση 8 άτομα O								
Si	2,625	2,943	2,972	2,962	2,983	2,999	2,976	2,997	2,995
Al	0,375	0,057	0,028	0,038	0,017	0,001	0,024	0,003	0,005
Z	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*	*3,000*
Al	1,036	0,980	1,001	1,013	1,002	0,997	1,006	0,996	0,995
Fe(3)	0,083	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,038	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,094	0,014	0,025	0,013	0,014	0,008	0,012	0,010	0,015
Na	0,025	0,029	0,965	0,966	0,985	0,993	0,982	0,994	0,984
K	0,701	0,904	0,008	0,008	0,000	0,003	0,000	0,000	0,006
Ba	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X	*1,986*	*2,000*	*2,000*	*2,000*	*2,000*	*2,000*	*2,000*	*2,000*	*2,000*

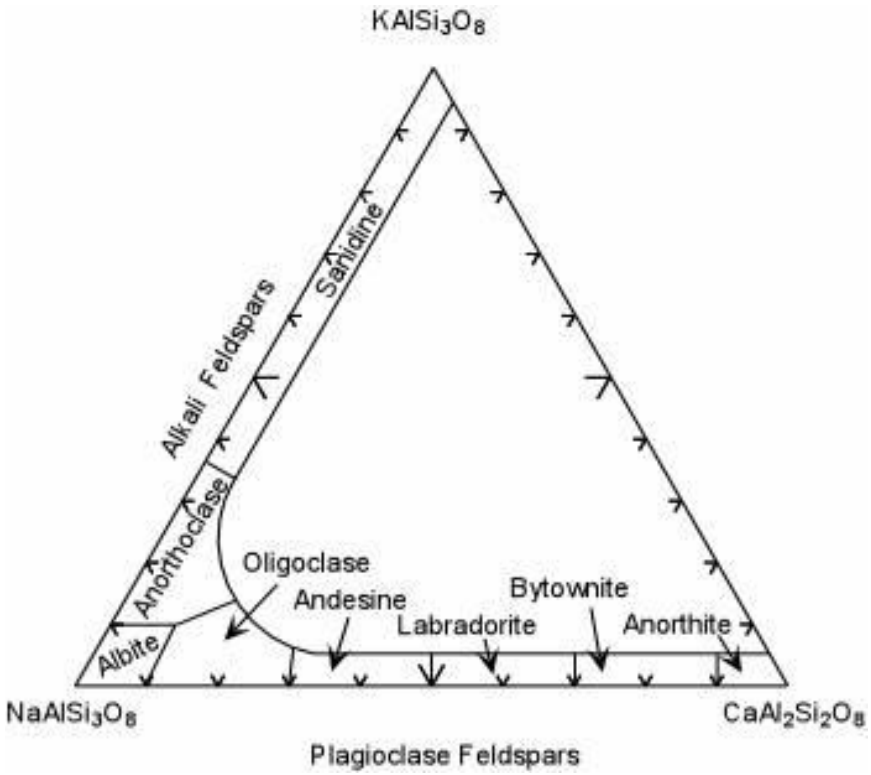
Or (K)	85,5	89,1	0,8	0,8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6
Ab (Na)	3,1	2,8	96,7	97,8	98,6	98,9	98,8	99,0	97,9
An (Ca+Mn+Mg)	11,4	1,4	2,5	1,3	1,4	0,8	1,2	1,0	1,5
Cn (Ba)	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Εικ. 6.7 Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις καλιούχων αστρίων και αλβίτη από τα δείγματα λίθων του χώρου μελέτης.

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Στο δείγμα EL12 του ακτίτη λίθου, οι άστριοι χαρακτηρίστηκαν ως καλιούχοι άστριοι με περιεκτικότητες 85,5% σε ορθόκλαστο, 11,4% σε ανορθίτη και 3,1% σε αλβίτη για τη μία ανάλυση, ενώ αντίθετα στην άλλη οι περιεκτικότητες ήταν 89,1% σε ορθόκλαστο, 2,8% σε αλβίτη, 1,4% σε ανορθίτη και 6,6% σε κελσιάνιο (Cn), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 6.8).

Στα υπόλοιπα δείγματα του ακτίτη λίθου και ωολιθικού ασβεστόλιθου οι άστριοι χαρακτηρίστηκαν ως αλβίτες με περιεκτικότητες 96,7% έως 99%.



Εικ.6.8 Διάγραμμα απεικόνισης της ονοματολογίας των αστρίων.

6.4 Πυρόξενοι

Ο γενικός τύπος των πυροξένων είναι :

$$XYZ_2O_6$$

Όπου : Χ καταλαμβάνουν τα στοιχεία Ca, Mg, Mn, Fe

Υ καταλαμβάνουν τα στοιχεία Fe, Mg, Mn, Al, Cr, Ti

Z καταλαμβάνουν τα στοιχεία Al, Cr.

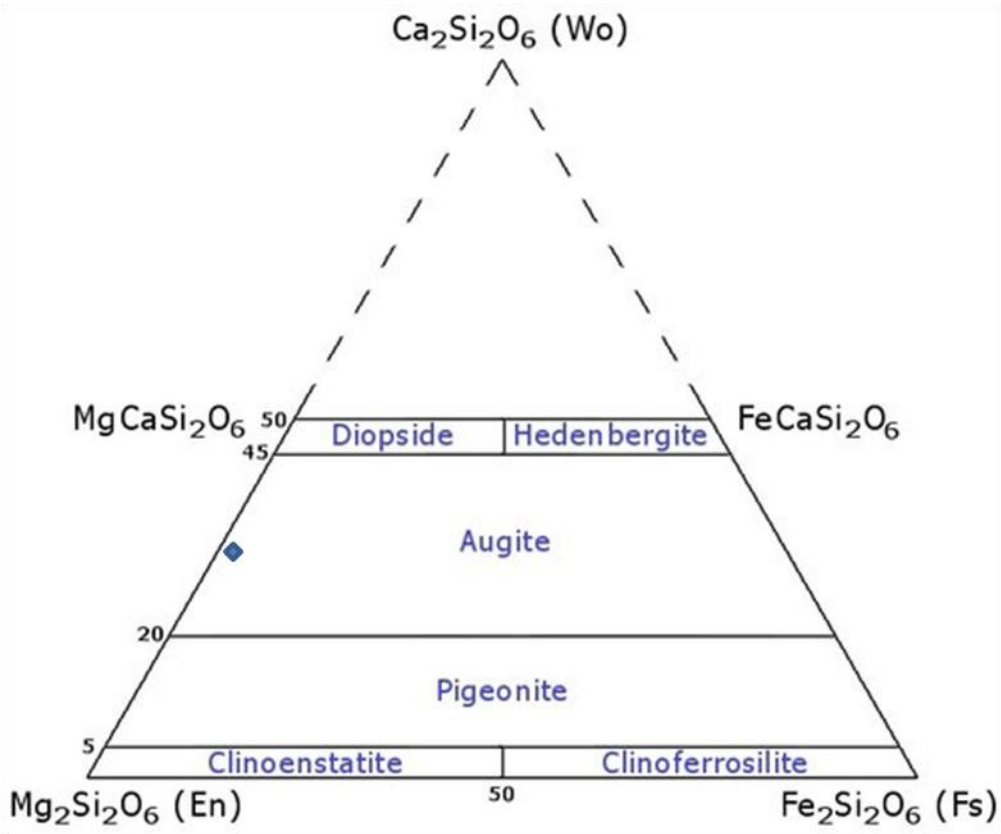
Δείγμα	EL12
Ορυκτό	**CPX**
SiO_2	55,79
TiO_2	0,12
Al_2O_3	0,21
FeO	2,90
MnO	0,01
MgO	23,92
CaO	15,86
Na_2O	0,06
K_2O	0,13
Total	99,00

Αριθμός κατιόντων με βάση 6 άτομα Ο	
Si	2,000
Al	0,000
Fe3	0,000
T	*2,000*
Al	0,009
Fe(3)	0,000
Ti	0,003
Cr	0,000
Ni	0,000
Mg	0,988
Fe2	0,000
Mn	0,000
M1	*1,000*
Mg	0,291
Fe(2)	0,087
Mn	0,000
Ca	0,609
Na	0,004
K	0,006
M2	*0,997*
En	64,7
Fs	4,4
Wo	30,8
100Mg/(Mg+Fe(2)+Fe(3)+Mn)	93,6

Εικ. 6.9 Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις από τα δείγματα λίθων του χώρου μελέτης.

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

Το τριγωνικό διάγραμμα των πυροξένων με ακραία μέλη των βολλαστονίτη, φερροσιλίτη και ενσταντίτη βοηθάει στην ταξινόμηση αυτής της ομάδας ορυκτών. Κρύσταλλος πυροξένου βρέθηκε σε δείγμα ακτίτη λίθου και τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στον παραπάνω πίνακα (Σχήμα 6.9) μαζί με την κατανομή των ιόντων στο πλέγμα. Ο υπολογισμός της στοιχειομετρίας έγινε με βάση 6 άτομα O, ενώ ο ολικός σίδηρος θεωρήθηκε δισθενής. Τα ακραία μέλη βρέθηκαν με ποσοστά 64,7% για τον ενσταντίτη, 30,8% για τον βολλαστονίτη και τέλος 4,4% για τον φερροσιλίτη. Από το τριγωνικό διάγραμμα των πυροξένων και την προβολή της σύστασης του στερεού διαλύματος προκύπτει ότι ο πυρόξενος του αναλύθηκε είναι αυγίτης (Σχήμα 6.10).



Εικ. 6.10 Τριγωνικό διάγραμμα ταξινόμησης και ονοματολογίας των πυροξένων και προβολή της σύστασης τους.

6.5 Χλωρίτες

Οι χλωρίτες ανήκουν στην ομάδα των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Είναι ένυδρα ορυκτά του Al, του Fe^{2+} ή του Mg. Ο γενικός τους τύπος είναι :

$$X_{12}Z_8O_{20}(OH)_{16}$$

Όπου : X καλύπτεται από τα στοιχεία Al, Fe, Li, Mg, Mn, Ni

Z καλύπτεται από τα στοιχεία Si, Al, Fe

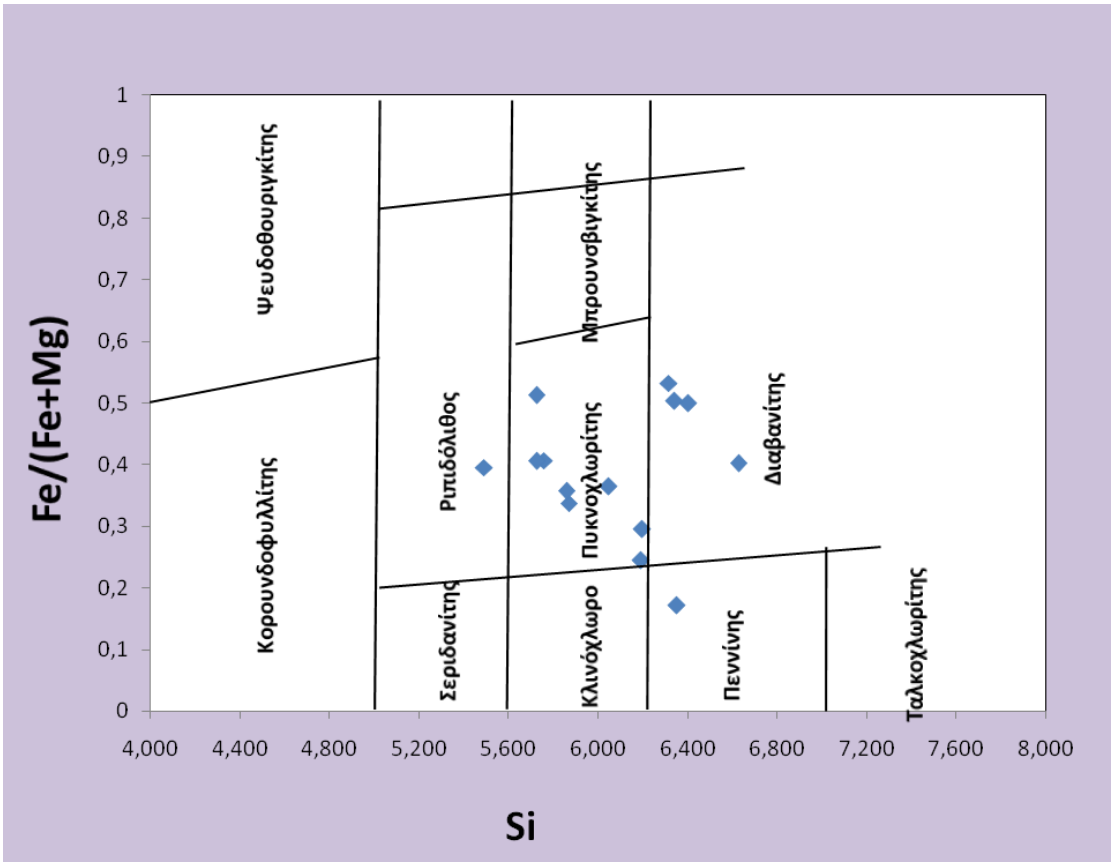
Η στοιχειομετρική κατανομή υπολογίστηκε με βάση 28 άτομα Ο. Ο σίδηρος θεωρήθηκε όλος δισθενής. Έγιναν 14 μικροαναλύσεις της ομάδας των χλωριτών σε δείγματα ακτίτη λίθου, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.11). Οι αναλύσεις προβλήθηκαν στο διάγραμμα ταξινόμησης και ονοματολογίας του Hey, το οποίο μας δείχνει ότι ο μεγαλύτερος αριθμός χλωριτών ανήκει στο πεδίο του πυκνοχλωρίτη, ενώ κάποιοι χλωρίτες προβάλλονται στο πεδίο του διαβανίτη. Τέλος, μία ανάλυση χλωρίτη προβάλλεται στα πεδία του ριπιδόλιθου και του πεννίτη (Σχήμα 6.12).

Δείγμα	EL12	EL12	EL12	EL12	EL12	EL12	EL12	EL12	EL36	EL36	EL36	EL36	EL23	EL23
Ορυκτό	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL	CHL
SiO_2	28,18	26,12	28,87	27,15	29,34	33,02	28,85	31,99	28,26	29,97	29,78	28,24	28,41	27,69
TiO_2	0,03	-	0,15	-	-	0,19	0,19	0,15	-	0,27	0,10	-	0,15	0,69
Al_2O_3	22,79	26,26	20,80	19,76	18,64	19,71	17,51	16,91	18,70	19,21	19,82	16,76	20,53	19,95
FeO	19,12	15,79	17,16	16,95	14,09	8,84	18,27	17,80	17,20	11,89	22,86	22,34	21,94	26,49
MnO	0,26	0,30	0,15	0,31	0,09	0,15	0,07	0,99	-	0,20	-	0,02	0,17	0,24
MgO	15,65	13,56	18,89	17,09	18,87	24,06	10,28	14,87	16,80	20,55	11,26	12,39	18,06	14,11
CaO	0,48	0,45	0,21	0,27	0,43	0,61	4,33	0,85	0,33	0,28	0,59	0,63	0,06	0,13
Na_2O	0,26	0,37	0,07	0,27	0,28	0,19	0,26	0,20	0,22	0,07	0,49	0,33	0,12	0,11
K_2O	0,03	-	0,06	0,05	0,31	0,19	2,53	3,19	0,23	0,13	0,38	0,65	-	0,09
Cr_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	-	0,93	-	-	-	-	-
Total	86,80	82,85	86,36	81,85	82,05	86,96	82,29	86,95	82,67	82,57	85,28	81,36	89,44	89,50
	Αριθμός ιόντων με βάση 28 άτομα Ο													
Si	5,759	5,492	5,870	5,860	6,198	6,354	6,406	6,629	6,048	6,193	6,317	6,341	5,726	5,727
Al	2,241	2,508	2,130	2,140	1,802	1,646	1,594	1,371	1,952	1,807	1,683	1,659	2,274	2,273
Z	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*	*8,000*
Al	3,248	3,998	2,854	2,886	2,838	2,823	2,988	2,758	2,765	2,871	3,272	2,777	2,602	2,590
Ti	0,005	0,000	0,023	0,000	0,000	0,027	0,032	0,023	0,000	0,042	0,016	0,000	0,023	0,107
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,157	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	4,768	4,250	5,726	5,499	5,942	6,902	3,403	4,593	5,360	6,330	3,561	4,148	5,426	4,350
Fe	3,267	2,776	2,919	3,060	2,489	1,423	3,392	3,084	3,079	2,054	4,055	4,196	3,698	4,582
Mn	0,045	0,053	0,026	0,057	0,016	0,024	0,013	0,174	0,000	0,035	0,000	0,004	0,029	0,042
Ca	0,105	0,101	0,046	0,062	0,097	0,126	1,030	0,189	0,076	0,062	0,134	0,152	0,013	0,029

Na	0,103	0,151	0,028	0,113	0,115	0,071	0,112	0,080	0,091	0,028	0,202	0,144	0,047	0,044
K	0,008	0,000	0,016	0,014	0,084	0,047	0,717	0,843	0,063	0,034	0,103	0,186	0,000	0,024
X	*11,548*	*11,330*	*11,636*	*11,691*	*11,581*	*11,443*	*11,686*	*11,745*	*11,592*	*11,457*	*11,342*	*11,606*	*11,837*	*11,768*

Εικ. 6.11 Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις χλωρίτη από τα δείγματα ακτίτη λίθου του χώρου μελέτης.

- *: κάτω από τα όρια ανιχνευσιμότητας.*



Εικ. 6.12 Προβολή των συστάσεων των χλωριτών ακτίτη λίθου στο διάγραμμα ταξινόμησης και ονοματολογίας του Hey.

6.6 Επίδοτο

Ο γενικός τύπος του επιδότου είναι :

$$X_4Y_6(Si,Al)_6O_{24}(OH)_2$$

Όπου : Χ καλύπτεται από Ca, Mg

Υ καλύπτεται από Fe^{3+}, Al, Ti, Cr

Τα δύο ακραία μέλη του επιδότου είναι το επίδοτο και ο κλινοζωϊσίτης. Ο κλινοζωϊσίτης περιέχει μόνο σίδηρο, ενώ το επίδοτο και αργίλιο. Αναλύθηκαν συνολικά 5 κρύσταλλοι επιδότου εκ των οποίων 3 ανήκαν σε δείγματα ακτίτη λίθου (EL12, EL23, EL36), 1 σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο (EL34) και τέλος 1 σε ωολιθικό ασβεστόλιθο (EL22). Τέλος, υπολογίστηκε η περιεκτικότητα στο πιστακιτικό μόριο για καθέναν από τους κρυστάλλους σύμφωνα με τον τύπο :

$$Ps\ (\text{πιστακιτικό μόριο}) = 100*Fe/(Fe+Al)$$

Από τα παραπάνω προέκυψαν οι τιμές 36,254% για τον ελευσινιακό ασβεστόλιθο, 25,693% για τον ωολιθικό ασβεστόλιθο, ενώ για τα δείγματα του ακτίτη λίθου τα ποσοστά είναι ως εξής 16,617%, 28,645% και 36,254% (Εικ. 6.13).

Δείγμα	EL34	EL12	EL36	EL23	EL22
Ορυκτό	EP	EP	EP	EP	EP
SiO_2	36,26	37,98	37,44	38,18	37,86
TiO_2	0,04	0,08	0,11	0,16	0,17
Al_2O_3	20,23	22,68	21,68	26,72	23,95
Fe_2O_3	18,02	14,26	15,24	8,34	12,97
MnO	0,02	-	-	0,12	-
MgO		0,05	0,13	0,03	0,27
CaO	22,31	23,09	22,95	23,50	23,52
Na2O	0,08	0,16	0,11	0,25	-
K2O	0,10	-	0,18	0,03	-
Σύνολο	97,06	98,30	97,84	97,33	98,74
Αριθμός ιόντων με βάση 8 άτομα O					
Si	5,935	6,039	6,016	6,009	5,969
Ti	0,005	0,010	0,013	0,019	0,020
Al	3,902	4,250	4,106	4,957	4,451
Fe	2,219	1,706	1,843	0,988	1,539
Mn	0,003	-	-	0,016	-
Mg	-	0,012	0,031	0,007	0,063
Ca	3,912	3,933	3,951	3,963	3,973
Na	0,025	0,049	0,034	0,076	-
K	0,021	-	0,037	0,006	-

Εικ. 6.13 Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις επιδότου από τα δείγματα λίθων του αρχαιολογικού χώρου.

- *: κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.*

7 Ακτινογραφική Μελέτη

Η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ εφαρμόστηκε σε 10 από τα δείγματα της μελέτης με σκοπό την εξακρίβωση των φάσεων που περιέχονται σε επιφανειακά σημεία των πετρωμάτων (4 δείγματα) και κάποιων χαλαρών αποθέσεων που εντοπίστηκαν σε λαξευμένες κοιλότητες των λίθων και έχουν προέλθει από ξηρή απόθεση ή από την συγκράτηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (4 δείγματα). Τέλος, η μέθοδος εφαρμόστηκε και για 2 δείγματα χαλαρού υλικού που προέρχονται από ωμές πλίνθους που έχουν χάσει την αρχική συνοχή τους. Οι πλίνθοι αποτελούνται από χαλίκια, αργιλώδεις και σιδηρούχες ορυκτές πρώτες ύλες από τοπικές αποθέσεις.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα ορυκτά που εντοπίστηκαν μέσω της ακτινογράφησης των δειγμάτων. Από τα αποτελέσματα της περιθλασιμετρίας βρέθηκε γύψος σε 3 δείγματα, 2 από τα οποία ανήκαν σε επιφάνειες μαρμάρου και ασβεστόλιθου προστατευμένες από την ελεύθερη ροή νερού και η γύψος αποτελεί κυρίαρχο ορυκτό, ενώ το τρίτο δείγμα ανήκει σε χαλαρό υλικό. Στα σημεία που δεν επηρεάζονται απευθείας από τη βροχή έχουμε το φαινόμενο εμφάνισης γύψου το οποίο επιβεβαιώνεται και με τα αποτελέσματα. Η γύψος που βρέθηκε στις χαλαρές αποθέσεις μπορεί να δικαιολογηθεί από τη μικρή συμμετοχή στο σύνολο των φάσεων.

Κατηγορίες δειγμάτων	ΔΕΙΓΜΑ / Ορυκτό	Γύψος	Ασβεστίτης	Χαλαζίας	Δολομίτης	Μοσχοβίτης	Ιλλίτης	Χλωρίτης	Μπιρνεσίτης	Καολινίτης	Αλίτης	Απατίτης
Επιφάνεια ασβεστιτικού πετρώματος	EL6	++++	+++	++		++						
Επιφάνεια ασβεστιτικού πετρώματος	EL14		++++	+++	++						+	
Ολικές αποθέσεις	EL26		++++	+++	+							+
Ωμές πλίνθοι	EL27		+++	++++			+	+				
Τσιμεντιτική κρούστα	EL29		++++	++								
Ολικές αποθέσεις	EL30		++++	++			+	+				
Ολικές αποθέσεις	EL31		++++	+++	++	++			+			
Ολικές αποθέσεις	EL35B		++++	+++		+				++		
Επιφάνεια ασβεστιτικού πετρώματος	EL37	++++	+++	++								
Χώμα	EL38	+	++++	++++		++		++				

Εικ. 7.1 Εμφάνιση ορυκτών στα ακτινοδιαγράμματα.

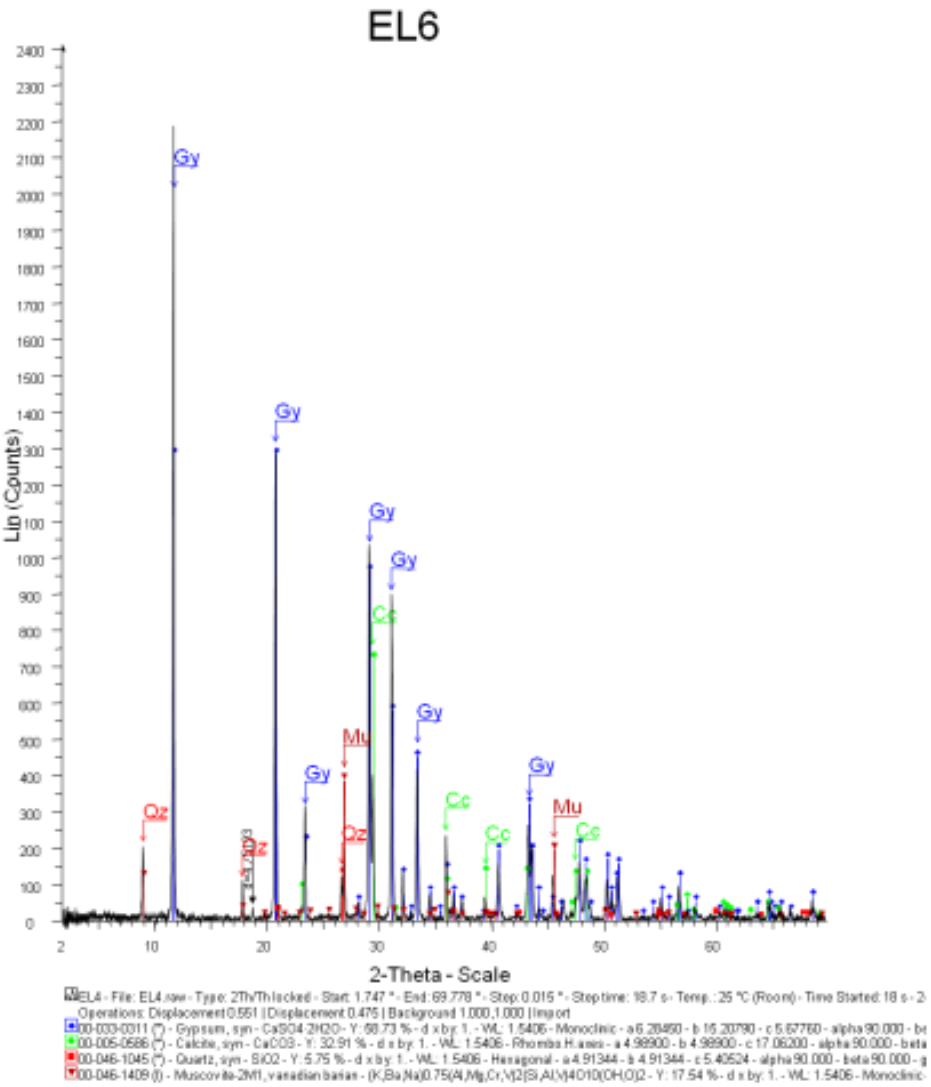
Όλα τα δείγματα (επιφανειακό υλικό, ολικές και χαλαρές αποθέσεις) περιείχαν ασβεστίτη και χαλαζία, ορυκτά τα οποία προέρχονται είτε από το υπόστρωμα είτε έχουν μεταφερθεί στο χώρο δειγματοληψίας. Σε επιφανειακή απόθεση μαρμάρου και σε 2 δείγματα ολικών αποθέσεων από λαξευμένες κοιλότητες μαρμάρου και ασβεστόλιθου βρέθηκε δολομίτης. Επίσης ανιχνεύτηκε μοσχοβίτης σε 2 δείγματα ολικών αποθέσεων, ένα δείγμα μαύρης κρούστας από μάρμαρο και σε ένα δείγμα χαλαρής απόθεσης. Βρέθηκαν μικροποσότητες ιλλίτη και χλωρίτης σε χαλαρές αποθέσεις (Σιρούς του Περικλή) και σε λάσπη από λαξευμένο μάρμαρο (ολικές αποθέσεις). Τέλος, ανιχνεύτηκαν μπιρνεσίτης, καολινίτης, αλίτης και απατίτης σε διαφορετικά δείγματα και σε πολύ μικρά ποσοστά. Ο μπιρνεσίτης είναι ένα ορυκτό που έχει βρεθεί σε δείγματα εδάφους της Πάτρας μετά από βροχή και αφού η ατμόσφαιρα έχει εμπλουτιστεί από σκόνη από τη Σαχάρα.

Συνολικά προκύπτει ότι τα δείγματα σκληρής μαύρης κρούστας που πάρθηκαν από επιφάνειες ασβεστιτικών πετρωμάτων προστατευμένες από την ελεύθερη ροή νερού της βροχής, αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από γύψο ενώ περιέχουν ασβεστίτη και χαλαζία. Το ένα από τα δύο δείγματα περιείχε και μοσχοβίτη, ορυκτό που συμμετέχει στην παραγένεση του λίθου (μάρμαρο Πεντέλης).

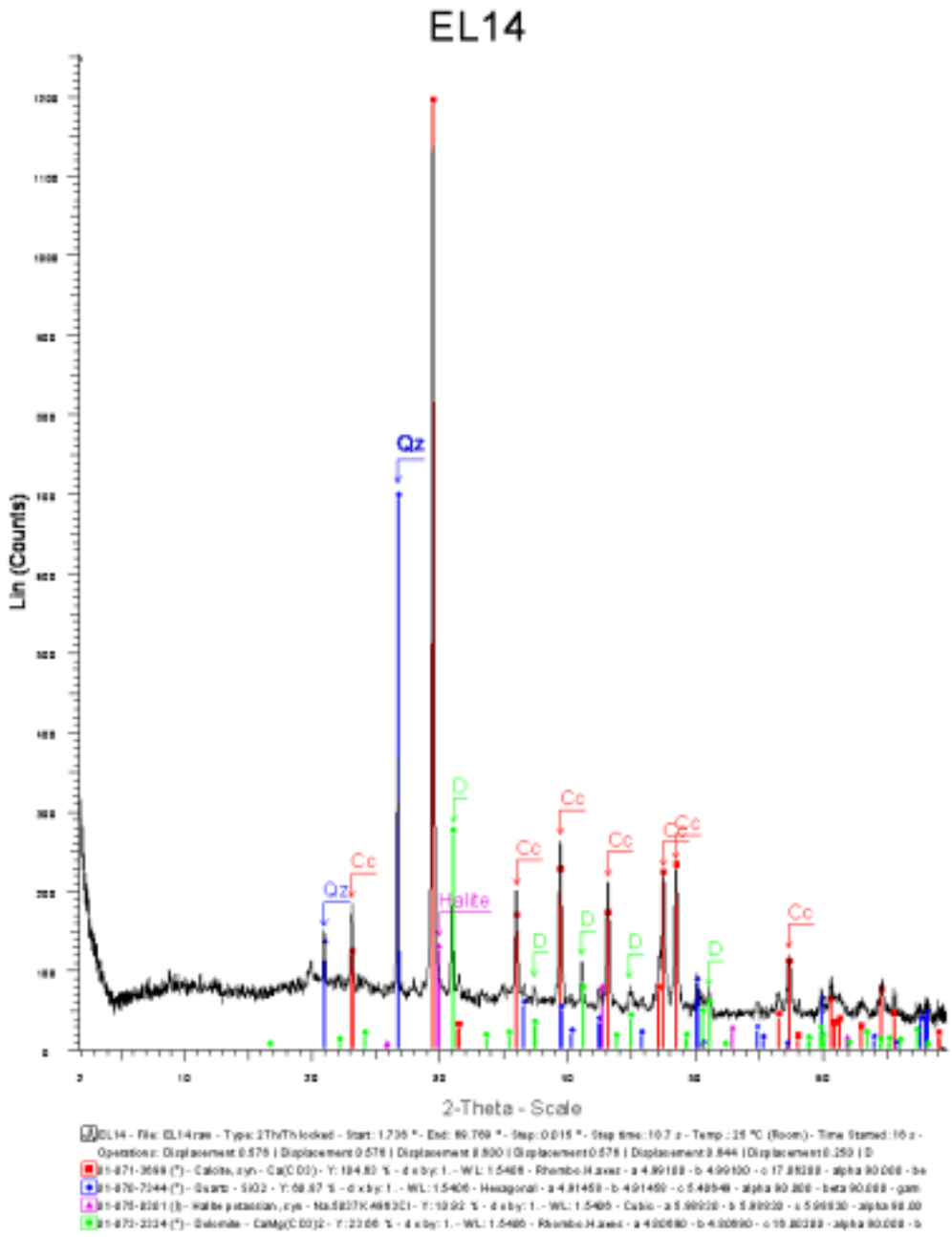
Άλλο επιφανειακό δείγμα πετρώματος πλήρων εκτεθειμένο στο νερό της βροχής (EL14) βρέθηκε να αποτελείται από ασβεστίτη, χαλαζία, δολομίτη και αλίτη με ποσότητες που μειώνονται σύμφωνα με τη σειρά που αναφέρονται. Ο δολομίτης είναι ορυκτό του λίθου ενώ ο αλίτης πιθανά προέρχεται από αλατονέφωση λόγω γειτνίασης του χώρου με τη θάλασσα. Μία άλλη κατηγορία ομοειδών δειγμάτων είναι αυτά που βρίσκονται σε κοιλότητες των πετρωμάτων που συγκρατούν το νερό και που αναφέρονται παραπάνω ως ολικές αποθέσεις. Οι κύριες ορυκτές φάσεις που βρέθηκαν σε αυτά είναι ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας, ενώ βρέθηκαν επίσης απατίτης, δολομίτης, χλωρίτης, ιλλίτης, μοσχοβίτης, καολινίτης, μπιρνεσίτης στο σύνολο των τριών δειγμάτων. Αναφέρονται επίσης τα δείγματα χώματος και οι ωμές πλίνθοι που υπάρχουν στο χώρο με την εξής σειρά εμφάνισης κύριων ορυκτών : χαλαζίας, ασβεστίτης, ενώ για το σύνολο των δύο δειγμάτων βρέθηκαν επίσης χλωρίτης, ιλλίτης, μοσχοβίτης και γύψος. Τέλος, η τσιμεντιτική κρούστα βρέθηκε να έχει πολύ «καθαρό» φάσμα, κυρίως με ασβεστίτη και λιγότερο με χαλαζία.

Συνεπώς, η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ επιφανειακών δειγμάτων επιβεβαιώνει τη γυψοποίηση που συμβαίνει τοπικά (όχι όμως περιορισμένα όσον αφορά στο μέγεθος της φθοράς στο χώρο συνολικά) σε περιοχές ασβεστιτικών πετρωμάτων προστατευμένες από την ελεύθερη ροή νερού, και επίσης αναδεικνύει τη διαφοροποίηση που υπάρχει σε δύο κατηγορίες δειγμάτων : τα δείγματα χώματος και ωμών πλίνθων και τα δείγματα ολικών αποθέσεων. Και οι δύο κατηγορίες αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη και χαλαζία, όμως στις ολικές αποθέσεις επικρατεί ο ασβεστίτης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην άλλη κατηγορία. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι οι ολικές αποθέσεις περιέχουν αυξημένες ποσότητες ασβεστίτη από το ίδιο πέτρωμα που τις φιλοξενεί, αφού βρίσκονται μέσα σε κοιλότητες και επιτρέπουν τη διάλυσή του εφόσον εγκλωβίζουν το νερό.

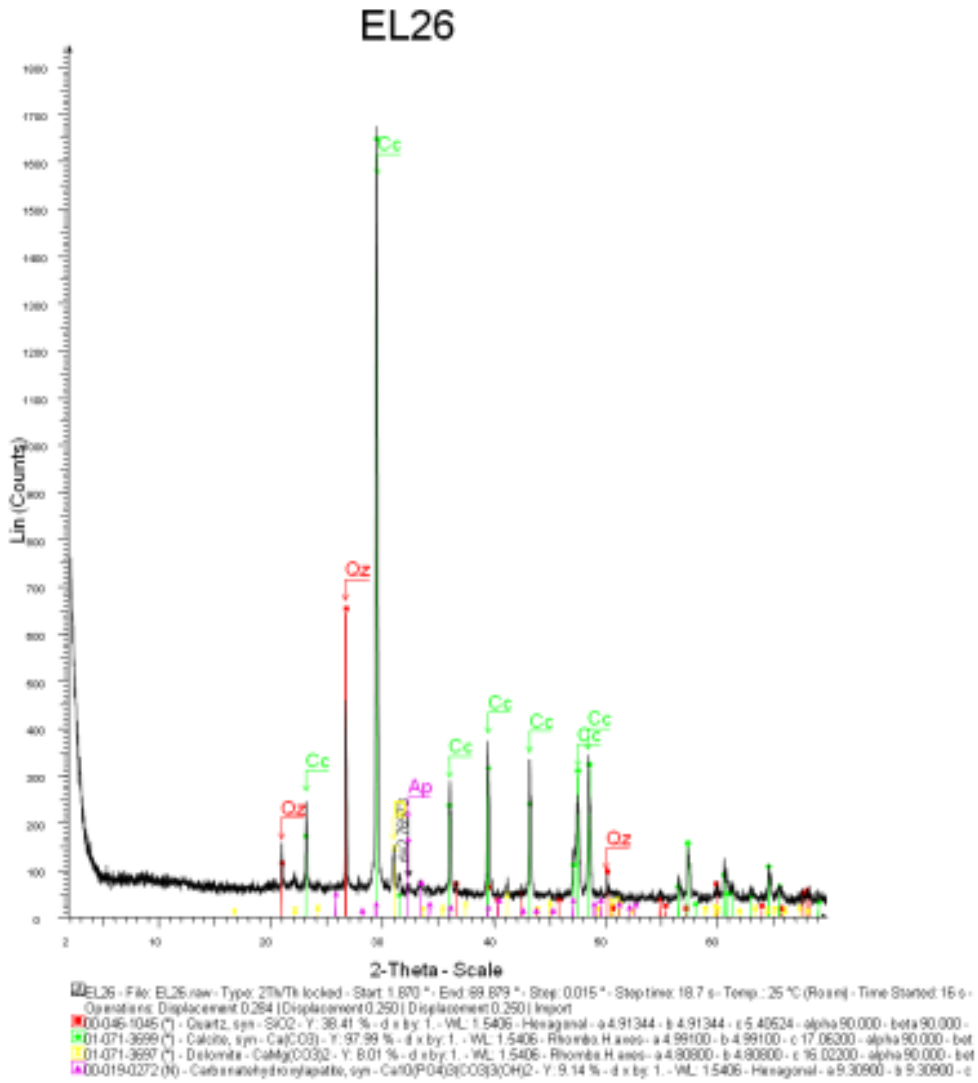
Τέλος, δίνονται τα περιθλασιογραφήματα που γίνανε στα δείγματα που αναλύθηκαν.



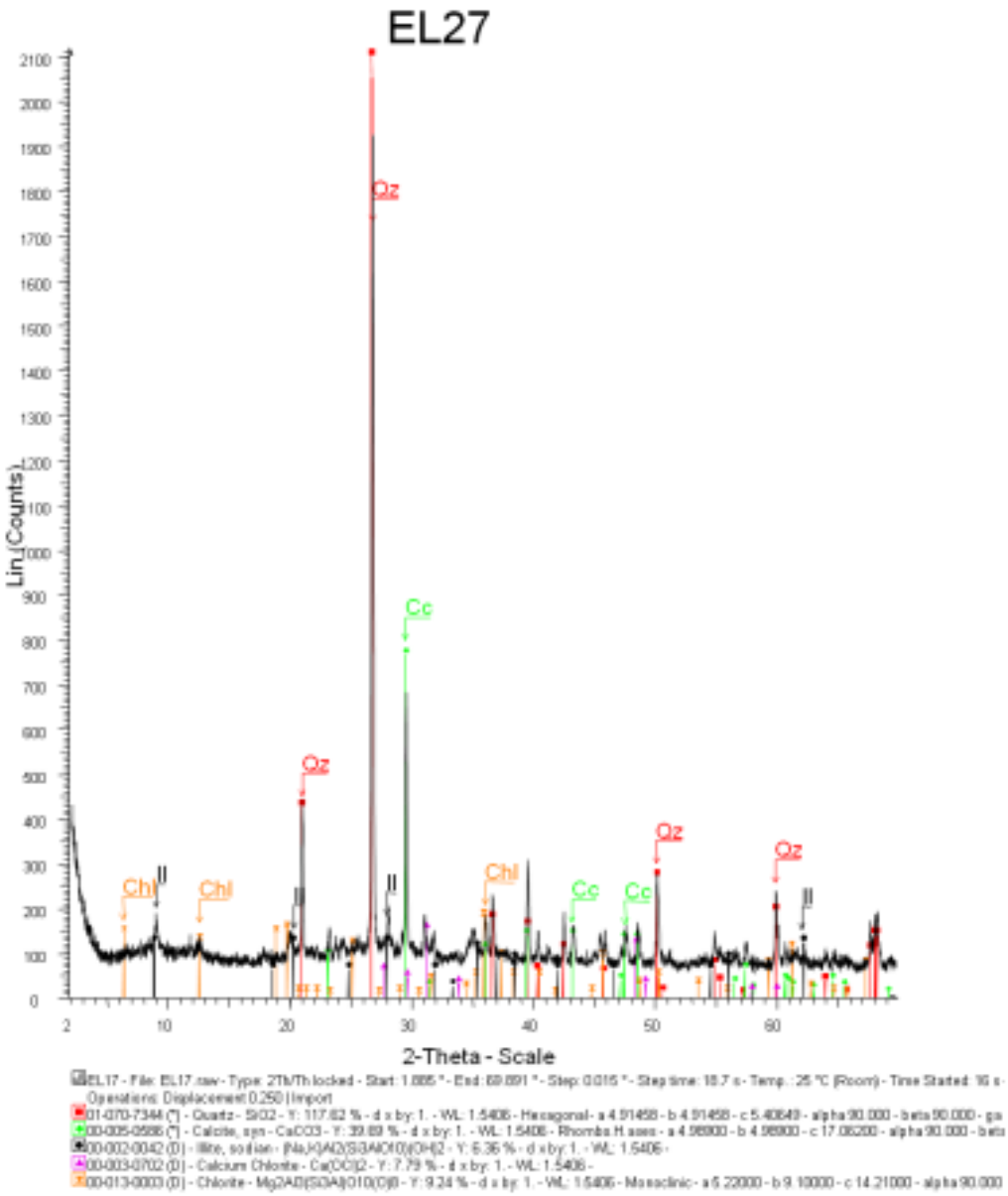
Εικ.7.2 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL6.



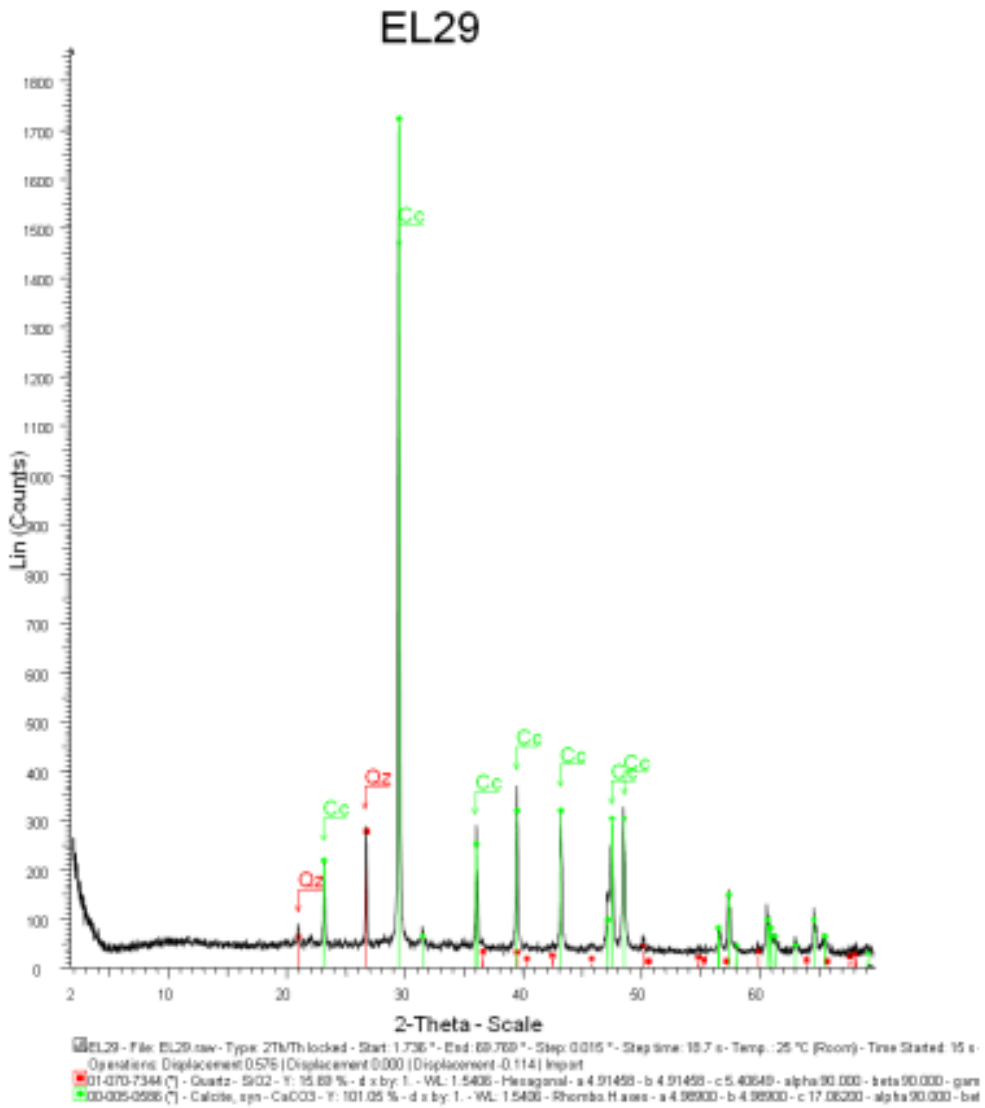
Εικ.7.3 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL14.



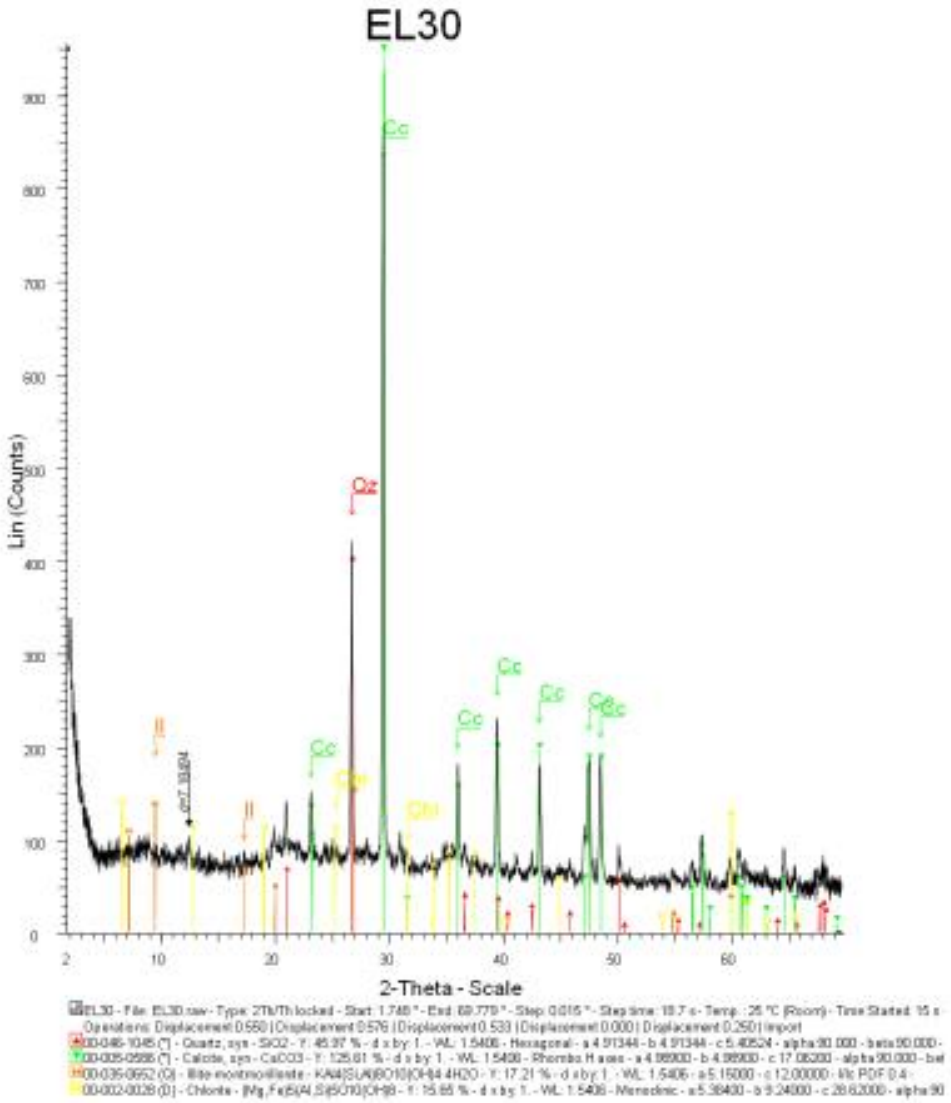
Εικ.7.4 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL26.



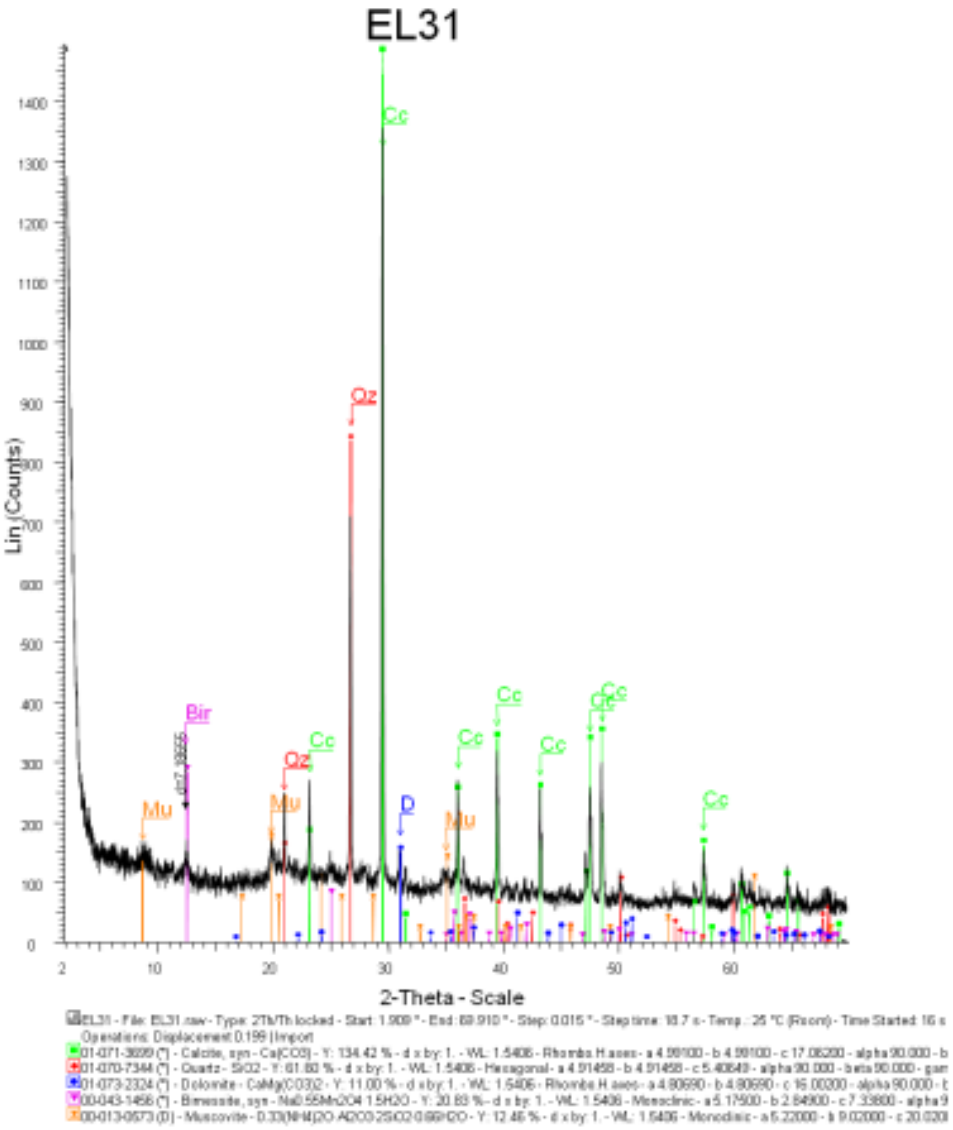
Εικ.7.5 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL27.



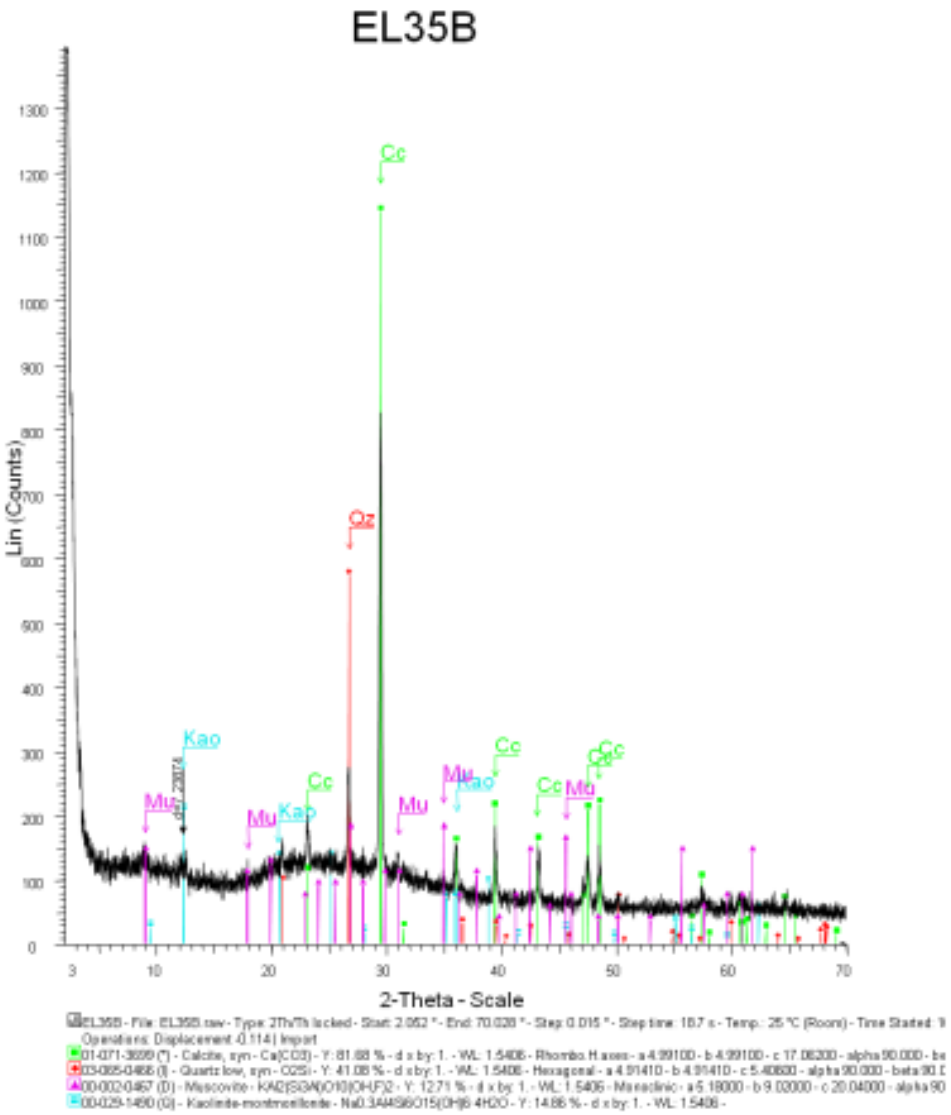
Εικ.7.6 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL29.



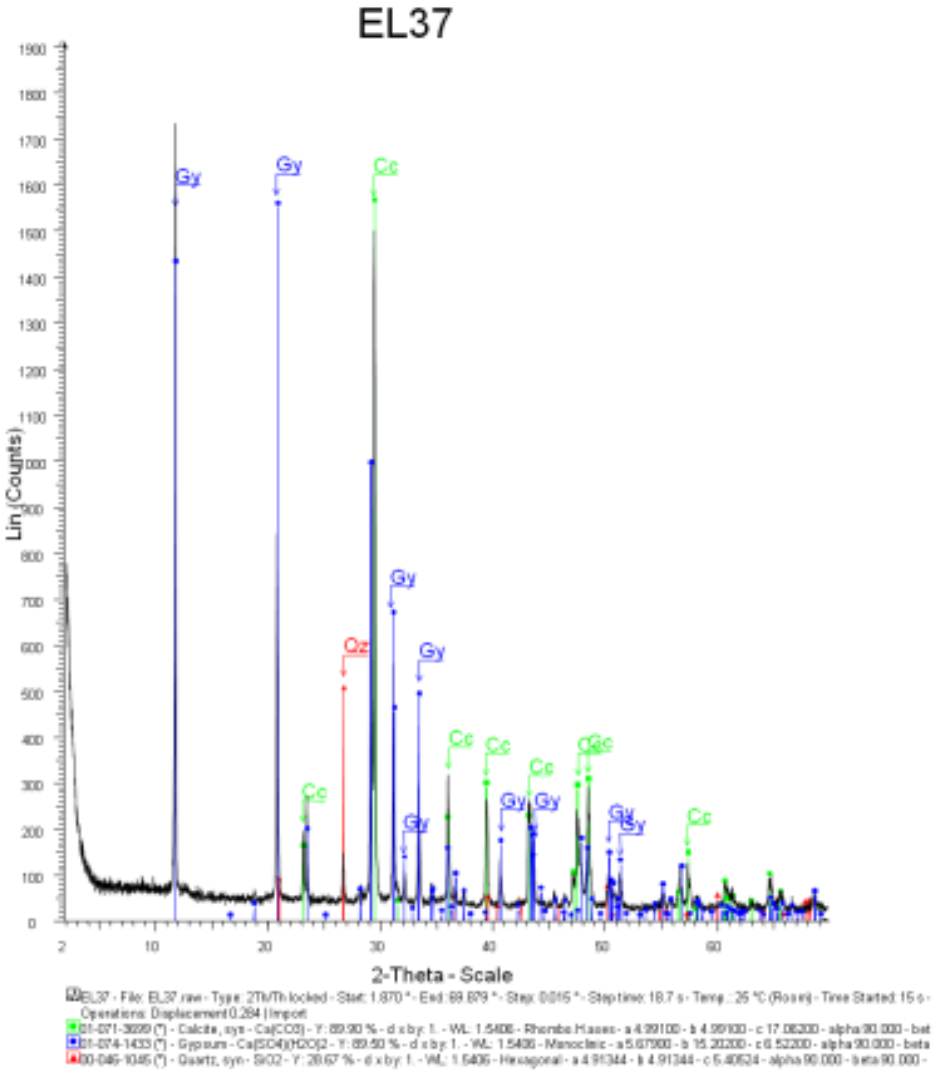
Εικ.7.7 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL30.



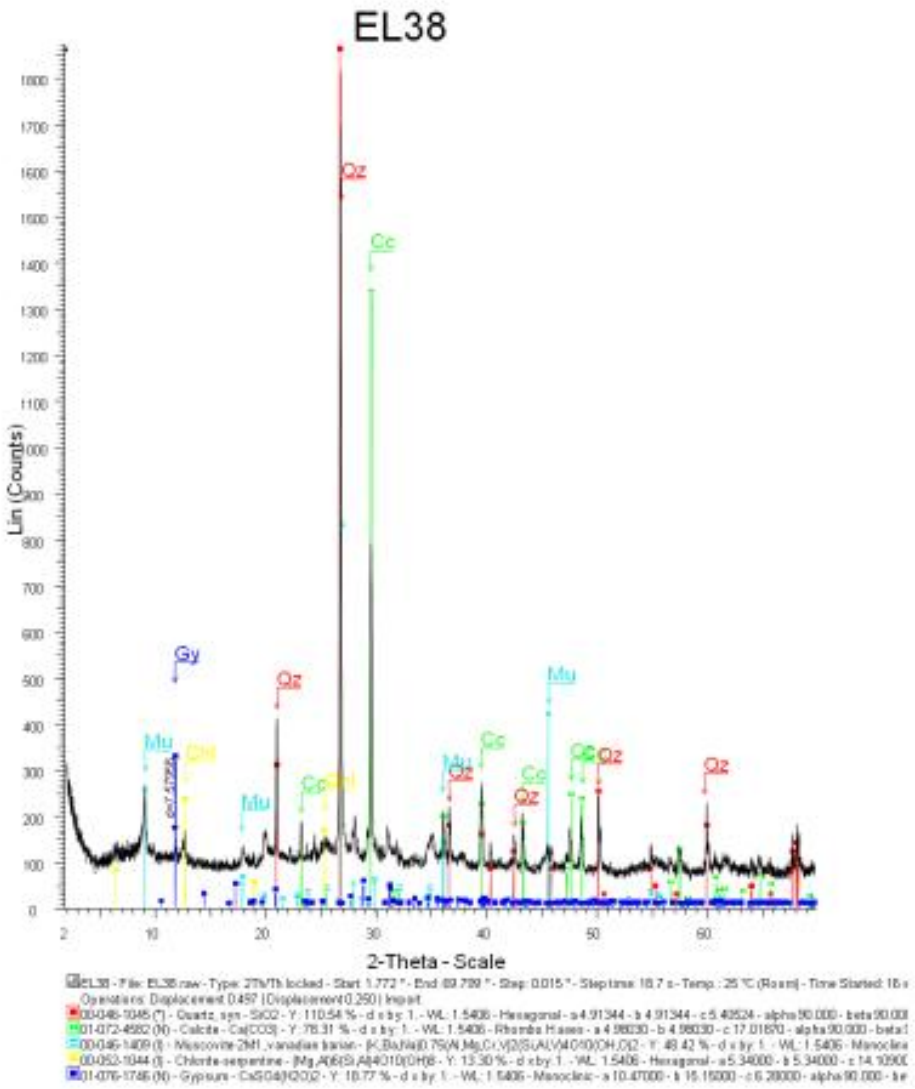
Εικ.7.8 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL31.



Εικ.7.9 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL3B.



Εικ.7.10 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL37.



Εικ.7.11 Περιθλασιόγραμμα του δείγματος EL38.

8 Περιγραφή των Φθορών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μακροσκοπική και μικροσκοπική περιγραφή των φθορών των μνημείων του αρχαιολογικού της Ελευσίνας, με σκοπό την αναγνώριση κάθε είδους φθοράς ώστε στη συνέχεια να αποδοθεί η καταλληλότερη επέμβαση.

Η αναγνώριση της φθοράς και κατά συνέπεια η σωστή ονομασία της συνδέεται απόλυτα με την διάγνωση των αιτιών φθοράς, με το είδος του λίθου, με την επεξεργασία του και τέλος με την ιστορία και τη διαδρομή του μνημείου. Παρακάτω δίνεται μία ορολογία, σύμφωνα με την Παπασταματίου Κλεοπάτρα (2002) των μακροσκοπικών φθορών που μπορούν να υποστούν τα μνημεία ώστε να μην υπάρχει σύγχυση μεταξύ των όρων που χρησιμοποιούνται για τις φθορές.

1. Αποφλοίωση: Πρόκειται για τμήμα της επιφάνειας του μνημείου που αποχωρίζεται από τον υπόλοιπο όγκο λόγο κάποιας ρωγμής ή ρωγμών. Η ρωγμή ή ρωγμές σχηματίζονται στο εσωτερικό με κατεύθυνση παράλληλη προς την επιφάνεια. Το αποφλοιωμένο τμήμα παρουσιάζει ετοιμορροπία και εσωτερικό κενό σε ηχοβολιστικό έλεγχο.
2. Απολέπιση: Πρόκειται για σχηματισμό απολεπισμάτων- λεπτών φλοιδών στην επιφάνεια του μνημείου. Οι φλοίδες αυτές έχουν μειωμένη συνοχή με την υπόλοιπη επιφάνεια (εμφανίζονται ανασηκωμένες) και μικρή μηχανική αντοχή, έτσι θρύβωνται εύκολα και καταρρέουν.
3. Επιφανειακή Ρηγμάτωση: Πρόκειται για διακοπή της συνέχειας του ιστού του λίθου κάθετα ή οριζόντια. Στο εσωτερικό έχει κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια του λίθου και συνήθως δεν εισχωρεί σε μεγάλο βάθος.
4. Θραύση- Ετοιμορροποία- Διάρρηξη: Πρόκειται για τη διακοπή του ιστού και τον διαχωρισμό- κατάτμηση σε θραύσματα μεγάλα ή μικρότερα. Πολλές φορές η κατάτμηση εισχωρεί σε βάθος και δημιουργεί εσωτερικά θραύσματα.
5. Μαύρη κρούστα ή Γυψοποιημένη επιφάνεια: Πρόκειται για φυσικοχημική μετατροπή του μαρμάρου σε γύψο και συμβαίνει σε ρυπασμένο περιβάλλον. Το μάρμαρο μετατρέπεται σε γύψο και κατά συνέπεια αποκτά άλλες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (διαφορετικό χρώμα, διαφορετική υδαταπορρόφηση, διαφορετικό πορώδες, διαφορετική διαλυτότητα, διαφορετική σκληρότητα, διαφορετική συνοχή κ.α.). η γυψοποιημένη επιφάνεια σχετίζεται πάντα με μαύρη κρούστα. Η μαύρη κρούστα μπορεί να έχει πολλές μορφές και διαφορετική υφή.
6. Ζαχαροποίηση ή Ζαχαροειδής φθορά: Πρόκεται για απώλεια συνοχής των επιφανειακών κρυστάλλων του μαρμάρου με συνέπεια τη συνεχή πτώση τους με μορφή ζάχαρης.
7. Αποσάθρωση: Πρόκειται για απώλεια συνοχής του μαρμάρου σε βάθος. Ο όρος αυτός συνδυάζει την περικρυσταλλική αποσάθρωση (ο ιστός του μαρμάρου έχει μετατραπεί σε σκόνη και προχωρά σε βάθος), το πλέγμα των μικρορωγμών και τις απολεπίσεις.
8. Κυψέλωση ή Κυψελοειδής φθορά: Ονομάζουμε την εμφάνιση μικρών οπών σποραδικά ή σε συστάδες και είναι αποτέλεσμα συνήθως βιολογικής δράσης

που δεν είναι πλέον ενεργή. Επίσης, ως κυψέλωση ονομάζουμε την ιδιόμορφη διάβρωση που παρουσιάζει ο λίθος λόγω δυνατών ανέμων, αιωρούμενων σωματιδίων και αλάτων. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται στην επιφάνεια του λίθου ασύμμετρες οπές και κοιλότητες που πολλές φορές οδηγούν σε σπηλαιώδεις καταστάσεις.

9. Εξαλλοίωση φλέβας: Ονομάζουμε την απομάκρυνση (συνήθως απόπλυση από το νερό) των συστατικών που συνιστούν τις φλέβες του λίθου, ο οποίος παρουσιάζει ετερογένεια. Στις περιοχές της εξαλλοίωσης δημιουργούνται ασυνέχειες με τη μορφή είτε κοιλοτήτων είτε ρωγμών είτε αποσάθρωσης.
10. Απομείωση: Πρόκειται για άμβλυνση των γλυπτών λεπτομερειών που προκαλείται συνήθως από όξινη προσβολή. Συνδυαστικά, στις περιοχές αυτές έχουμε και το φαινόμενο της ζαχαροποίησης.
11. Απόπλυση: Πρόκειται για περιοχές απόπλυσης που είναι εκτεθειμένες σε τρεχούμενο νερό όξινης βροχής. Οι περιοχές παρουσιάζουν απομείωση και λόγω της απομείωσης και τη διαφορετικότητα στο χρώμα, παρουσιάζονται δηλαδή ανοιχτόχρωμες, σε σχέση με τον υπόλοιπο όγκο του λίθου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, έχουμε και εδώ το φαινόμενο της ζαχαροποίησης.
12. Εσωτερικό κενό: Πρόκειται για την έναρξη αποφλοίωσης που δεν παρουσιάζει προς το παρόν εμφανή εξωτερικά σημάδια και γι' αυτό διαπιστώνεται μόνο με ηχοβολιστικό έλεγχο.
13. Απομείωση από φωτιά: Πρόκειται για μια ιδιαίτερη μορφή φθοράς που προκαλείται από φωτιά και έχει ως συνέπεια την απώλεια των λεπτομερειών του γλυπτού όγκου και τη δημιουργία άμορφης μάζας. Πιθανών, να συνοδεύεται και από ασβεστοποίηση του μαρμάρου.
14. Οριστική απώλεια: Ονομάζεται η απώλεια τμημάτων που δεν είναι δυνατόν να βρεθούν και να συγκολληθούν.
15. Βιοδιάβρωση: Πρόκειται για κάθε μορφή φθοράς (κυψέλωση, αποσάθρωση κ.α.) που μπορεί να παρουσιαστεί κάτω από μια επικάθιση- κρούστα βιολογικής προέλευσης και έχει προκληθεί από τη δράση των μικροοργανισμών, συνήθως από τη φυσικοχημική τους δράση ή τη μηχανική καταπόνηση που επιφέρουν στο λίθο.
16. Ανακρυστάλλωση: Πρόκειται για φυσικοχημική μετατροπή, δηλαδή τη διαλυτοποίηση και ανακρυστάλλωση του μαρμάρου σε άλλη κρυσταλλική μορφή (συνήθως σε αραγωνίτη). Παρουσιάζεται συνήθως μία σκληρή κρούστα δενδριτικής μορφής που δεν αφαιρείται. Όταν πρόκειται για ανακρυστάλλωση αλάτων πρέπει να διευκρινίζεται και τότε ονομάζεται κρούστα αλάτων. Το φαινόμενο δεν συνδυάζεται με φυσικοχημική μετατροπή του λίθου και η κρούστα που σχηματίζεται δεν δύνανται να αφαιρεθεί.
17. Ασβεστοποίηση: Πρόκειται σε φυσικοχημική μετατροπή του μαρμάρου. Συμβαίνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και με διάρκεια επί του μαρμάρου. Το μάρμαρο αλλάζει μορφή και υφή, «ασβεστοποιείται», χάνει δηλαδή τη διαύγεια και την κρυσταλλικότητα του.
18. Επικάθιση: Πρόκειται για κάθε στρώμα που επικάθεται και δύναται να αφαιρεθεί χωρίς να επιφέρει βλάβη στο λίθινο υπόστρωμα. Η επικάθιση

μπορεί να είναι είτε βιολογικής προέλευσης, είτε επικάθιση ιζήματος αιωρούμενων σωματιδίων κ.α.

8.1 Μακροσκοπική Περιγραφή Φθορών

Παρακάτω περιγράφονται τα είδη φθορών που αναγνωρίστηκαν στους λίθους του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας, με βάση τη μακροσκοπική παρατήρηση. Κατά κύριο λόγο, τα είδη των φθορών δεν είναι αποτέλεσμα ενός παράγοντα αλλά έχουν προκύψει από μια σειρά αιτιών.

Μία από τις μορφές διάβρωσης που παρατηρεί κανείς μπαίνοντας στον αρχαιολογικό χώρου είναι οι μαυρισμένες κοιλότητες που παρατηρούνται στο μαρμάρινο δάπεδο της αυλής και αποτελούν σκληρές κρούστες με μεγάλη συνοχή με το υπόστρωμα. Οι μαυρισμένες αυτές περιοχές παρατηρούνται και σε άλλες κοιλότητες όπως επίσης και σε λαξευμένα μάρμαρα και ασβεστόλιθους. Πρόκειται για τσιμεντιτικές επικαλύψεις που διαβρώνουν το πέτρωμα με τη δημιουργία κοιλοτήτων λόγω μηχανικής πίεσης, κατά τη σκλήρυνσή τους (Μπισμπίκου).

Ένα ακόμα φαινόμενο που παρατηρείται στους λίθους του χώρου μελέτης είναι οι χρωματικές αλλοιώσεις των ελεύθερων επιφανειών των λίθων, οι οποίες έρχονται σε επαφή με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και έχουν ως αποτέλεσμα αντιαισθητικές κηλίδες, την επικάθιση αιθάλης και αιωρούμενων σωματιδίων, φερτών υλικών, χώματος, το σχηματισμό κρουστών κ.τ.λ. Ανάλογα με την επικάθιση και το είδος του πετρώματος δημιουργούνται διαφορετικοί χρωματισμοί πάνω στις επιφάνειες.

Η βιοδιάβρωση αποτελεί συνδυασμό φυσικοχημικής ή μηχανικής δράσης μικροοργανισμών ή άλλων μορφών φθοράς που συμβαίνουν ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο του πετρώματος. Μικροοργανισμοί όπως βακτήρια, κυανοβακτήρια, φύκη, μύκητες, λειχήνες, βρύα κ.τ.λ. αποτελούν τις βιολογικές αποικίες που δημιουργούνται πάνω στις επιφάνειες των λίθων. Τέτοιες αποικίες παρατηρούνται σε επιφάνειες των λίθων του αρχαιολογικού χώρου, ενώ σε κάποια σημεία καλύπτουν μεγάλο εύρος της επιφάνειας με αποτέλεσμα να μην διακρίνεται ο λιθότυπος που τις φιλοξενεί. Συνεπώς, δημιουργούνται κηλίδες με διαφορετικές αποχρώσεις όπως φαιές, πράσινες, λευκές και καφέ και πορτοκαλί κηλίδες που σχετίζονται με βιολογικό υλικό. Μια άλλη περίπτωση είναι οι μικροοργανισμοί να εισχωρούν σε ρωγμές και ασυνέχειες του πετρώματος και στη συνέχεια αναπτύσσονται με τις κατάλληλες συνθήκες υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας (Εικ. 8.1). Η έκκριση οξέων ή άλλων ενώσεων που προκύπτουν από τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών μπορεί να ενισχύσουν τη ρηγμάτωση με χημικό ή και μηχανικό τρόπο. Εκτός από τις ρωγμές, μπορούν να δημιουργηθούν και οπές (Εικ. 8.2), αποφλοιώσεις, απολεπίσεις, ζαχαροποίηση, φθορές που παρατηρούνται αρκετά συχνά στους λίθους του αρχαιολογικού χώρου.

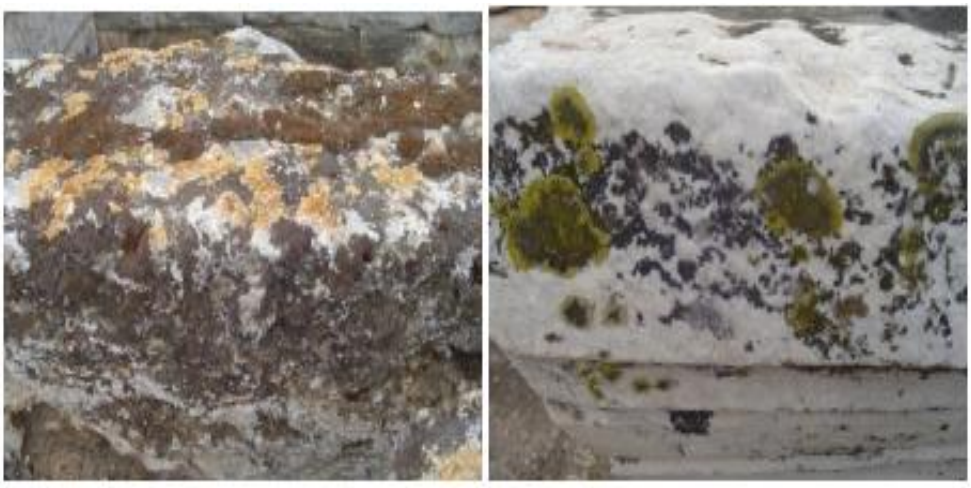


Εικ. 8.1 1: Μαυρισμένες κοιλότητες από σκληρή τσιμεντιτική κρούστα.

2: Ανάπτυξη μικροοργανισμών και δημιουργία μικροοπών.

3: Αποπλυμένες επιφάνειες λευκού χρώματος πάνω σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο.

4: Ανάπτυξη βιολογικού υλικού στους αρμούς μεταξύ μαρμάρινων πλακών της αυλής.



Εικ.8.2 Βιοδιάβρωση πάνω σε επιφάνειες μάρμαρου Πεντέλης με συνύπαρξη πιθανά βρυόφυλλων, φυκών και λειχήνων.

Όσον αφορά τα μάρμαρα Πεντέλης, η επιφανειακή βιοδιάβρωση έχει επηρεάσει τις περιοχές που είναι εκτεθειμένες για περισσότερες ώρες στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι υπόλοιπες έχουν μειωμένη έως μηδαμινή ανάπτυξη βιολογικής δραστηριότητας. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί ένδειξη της εξάρτησης της βιοδιάβρωσης ενός λίθου με τις συνθήκες υγρασίας και ακτινοβολίας που επικρατούν (Εικ. 8.3).



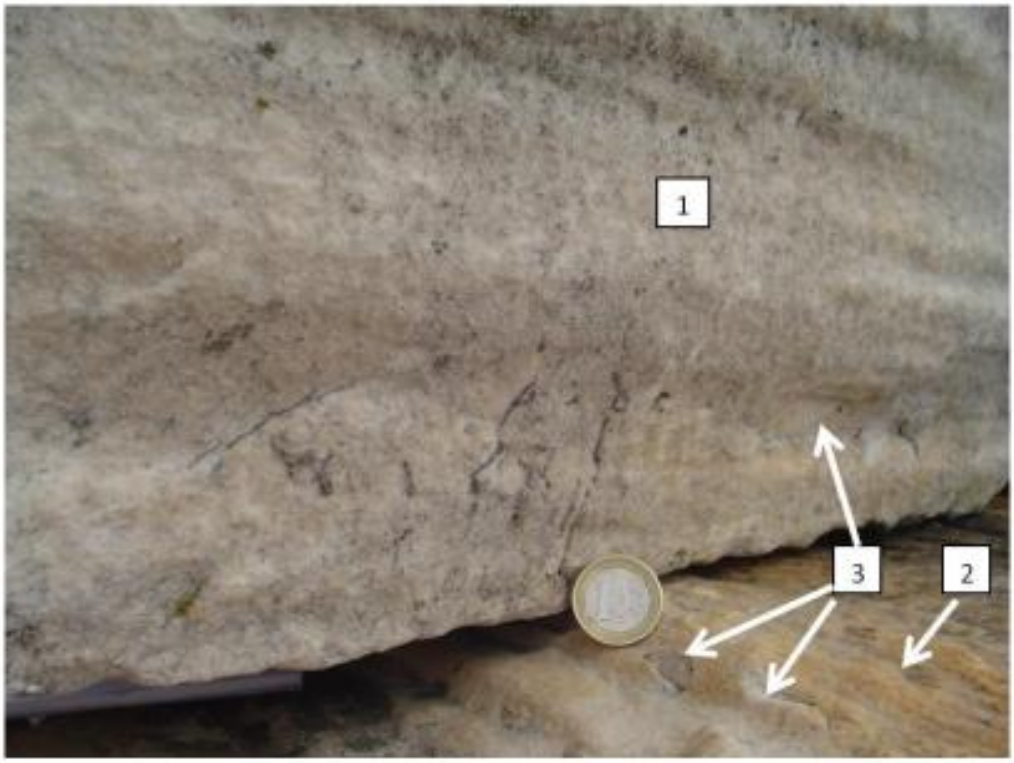
Εικ. 8.3 Απολέπιση, ζαχαροειδή φθορά και βιοδιάβρωση κίονα που αποτελείται από μάρμαρο Πεντέλης. Τα παραπάνω είδη φθορών παρατηρήθηκαν μόνο στην πλευρά του κίονα που επικρατούν χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας.

Επίσης, η ανάπτυξη φυτών μεταξύ των αρμών ή μέσα στους λίθους είναι ένα είδος βιοδιάβρωσης που επηρεάζει το πέτρωμα με μηχανικό και χημικό τρόπο.

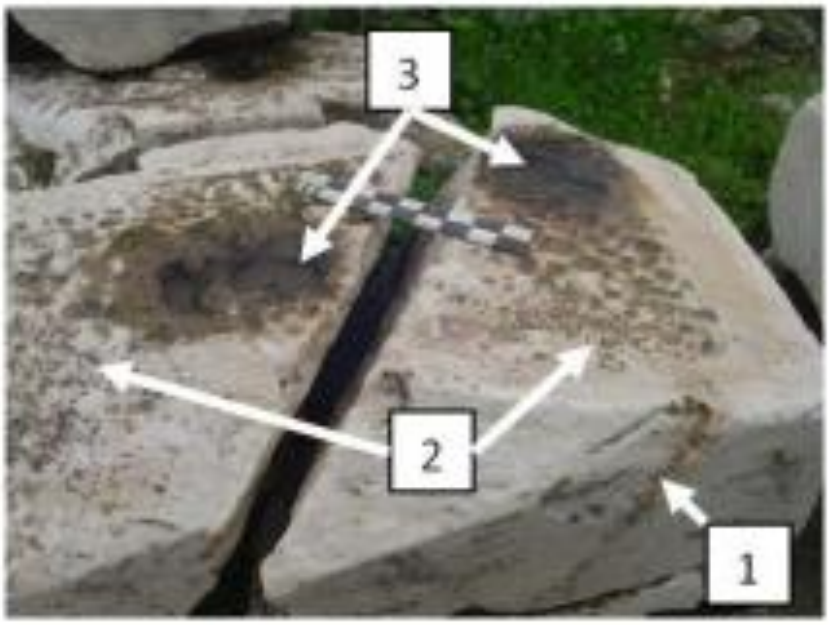
Μορφές φθοράς όπως η κυψέλωση, η απολέπιση, η αποφλοίωση και η ζαχαροποίηση εμφανίζονται στο χώρο ανεξαρτήτως βιολογικών παραγόντων. Για παράδειγμα, η κυψέλωση παρατηρήθηκε σε τείχη μέσα στο χώρο αλλά και σε αρχιτεκτονικά μέλη (Εικ. 8.4). Η ζαχαροποίηση συναντάται κυρίως σε μάρμαρα επιφανειακά ή υποεπιφανειακά σε συνδυασμό με απολεπίσεις και αποφλοιώσεις (Εικ. 8.5). Τέλος, ένα άλλο είδος διαφορικής διάβρωσης είναι η διάβρωση με βελονισμούς που οδηγεί σε απομείωση του αρχικού υλικού (Εικ. 8.6).



Εικ. 8.4 Πεντελικό μάρμαρο. α : κυψέλωση, απομείωση, μαύρη κρούστα και χρωματική αλλοίωση. β : βιοδιάβρωση, ανάπτυξη φυτών και κυψέλωση.



Εικ. 8.5 Συνδυασμός βιολογικής φθοράς (μέσα σε ρωγμές) και άλλων μορφών διάβρωσης σε Πεντελικό μάρμαρο. 1: ζαχαροειδής φθορά (διάβρωση ,ε βελονισμούς) και μαύρη επικάθιση (πιθανών αιθάλης) : τοπική δημιουργία προϊόντων διάβρωσης. 2 : εξωτερικά αλλοίωση χρώματος, πορτοκαλοκίτρινη πατίνα. 3 : αποφλοίωση του μαρμάρου.



Εικ. 8.6 Πεντελικό μάρμαρο.1. βιοδιάβρωση (ανάπτυξη πράσινων αποικιών οργανισμών) και αποφλοίωση. 2. Βιοδιάβρωση, διάβρωση με βελονισμούς. 3. Τσιμεντιτικές κρούστες.

Άλλα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στους λίθους του χώρου σχετίζονται με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον και την ατμοσφαιρική ρύπανση και χαρακτηρίζονται ως επικαθίσεις, αποθέσεις και κρούστες. Ο όρος επικαθίσεις χρησιμοποιείται σχεδόν ταυτόσημα με τον όρο αποθέσεις, σε αυτό το κείμενο. Οι κρούστες αφορούν σχηματισμούς οι οποίοι έχουν μεγάλη σκληρότητα και συνεκτικότητα και είναι καλά προσκολλημένοι στο υπόστρωμα ή αποτελούν λεπτές φλούδες κάποιου υλικού με εμφανή διαφοροποίηση από το λίθο πάνω στον οποίο έχουν σχηματιστεί. Οι κρούστες προέρχονται είτε από χημικές δράσεις που συμβαίνουν μεταξύ της ατμόσφαιρας και του λίθου είτε από την ιζηματοποίηση υλικών που επικάθονται σε διάφορες επιφάνειες. Από την άλλη μεριά, οι αποθέσεις είναι ένα εξωγενές υλικό στα αρχικά στάδια της ιζηματοποίησης το οποίο δεν έχει μετατραπεί ακόμα σε κρούστα. Είναι χώμα, φερτά υλικά, ρύποι που μπορούν να αφαιρεθούν από το υπόστρωμα χωρίς να προκαλέσουν κάποια βλάβη σε αυτό. Οι αποθέσεις μπορεί να είναι και βιολογικής προέλευσης.

Οι γυψοποιημένες επιφάνειες είναι ένα παράδειγμα κρούστας το οποίο υποδεικνύει ρυπασμένο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Πρόκειται για περιοχές που έχουν αρκετή υγρασία και όχι ροή νερού με αποτέλεσμα να μετατρέπεται ο ασβεστίτης σε γύψο κατά την αντίδραση με θειϊκό οξύ. Οι περιοχές αυτές τελικά αποκτούν ανώμαλη υφή, είναι σκληρές και έχουν σκούρο χρώμα λόγω των σωματιδίων που εγκλωβίζονται (ρύποι). Είναι αντιαισθητικά σημεία για τα μαρμάρινα μνημεία και είναι δύσκολο να αφαιρεθούν όταν το υπόστρωμα έχει γλυπτές λεπτομέρειες. Στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας παρατηρήθηκαν τέτοιες κρούστες στο Πεντελικό

μάρμαρο και στον in situ ελευσινιακό ασβεστόλιθο (Εικ. 8.7). τέτοιες κρούστες σχηματίζονται στα «κρυφά» σημεία του λίθου. Το φαινόμενο αυτό είναι αντιληπτό κυρίως στην περιοχή του Πλουτωνείου, μία σπηλιά στο φυσικό βράχο, όπου η κοίλη περιοχή προστατεύεται από τη ροή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αλλά εγκλωβίζει υγρασία και δημιουργούνται συνθήκες κατάλληλες για γυψοποίηση.



Εικ. 8.7 Μαύρη κρούστα- γυψοποιημένη επιφάνεια σε μαρμάρινες (Πεντέλης, α,β) και ασβεστολιθικές (ελευσινιακός γ) επιφάνειες. Όλα τα σημεία ανάπτυξης της κρούστας προστατεύονται από την απόπλυση με βρόχινο νερό.

Επίσης, οι φθορές που έχουν να κάνουν με εναλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας προκαλούν στα πετρώματα ρηγματώσεις ή και οριστική απώλεια στην περίπτωση που το υλικό είναι πολύ ευπαθές. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές και η ετερογένεια στη δομή και στη σύσταση του πετρώματος σε συνδυασμό με τη δράση του νερού ή και της υγρασίας έχει ως αποτέλεσμα τις παραπάνω φθορές. Στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας, τέτοιες φθορές συναντώνται σε υλικά όπως κονιάματα, ωμές πλίνθοι, και κροκαλοπαγή με χαλαρό συνδετικό υλικό(Εικ.8.8).

Σε βάσεις κιόνων Τελεστηρίου παρατηρήθηκε οριστική απώλεια υλικού η οποία όμως δεν έχει να κάνει με τη δομή και τη σύσταση καθώς είναι τοπικό φαινόμενο και η μακροσκοπική εξέταση δεν δείχνει γενίκευση του φαινομένου στη

μάζα του λίθου. Τα αίτια λοιπόν αυτού του είδους φθοράς έχουν να κάνουν με εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι μηχανικές τάσεις, και όχι με τον ίδιο το λίθο.



Εικ.8.8 α: τελευταίος δόμος τείχους, διάβρωση σύμφωνα με τη δομή του λίθου, αποσάθρωση κροκαλοπαγούς με απόπλυση των αργιλικών υλικών. β: διάβρωση λιθολογήματος αποτελούμενο από κεραμικά και τυχαία επιλογή λίθων, που συνδέονται με κονίαμα και χώμα στο κάτω μέρος(ετερογένεια υλικών δόμησης). γ: ωμές πλίνθοι που μετατράπηκαν σε άμορφη μάζα κατά τους κύκλους διαβροχής και ξήρανσή τους. δ: θραύση μέρους της βάσης και οριστική απώλεια υλικού (ωολιθικός ασβεστόλιθος, στο επάνω μέρος του κίονα είναι εμφανής η κυψελοειδής φθορά και οι μαύρες επικαθίσεις).

Άλλες μορφές διάβρωσης που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του λίθου, εμφανίζονται στους λίθους του Ιερού της Δήμητρας. Οι διαβρωσιγενείς αυτές μορφές οφείλονται σε :

1. Στην ορυκτολογική ετερογένεια που παρατηρείται στον όγκο τους(π.χ. απόπλυση φλέβας μοσχοβίτη σε μάρμαρο) (Εικ.8.9). Οι διαφορετικές φάσεις (μοσχοβίτη- ασβεστίτη) εμφανίζουν διαφορετικούς ρυθμούς αντίδρασης με το νερό διάλυσης με αποτέλεσμα την ανομοιομορφία της επιφάνειας με τη δημιουργία κοιλοτήτων καθώς ο μοσχοβίτης είναι πιο ευδιάλυτος. Το φαινόμενο συμβαίνει τοπικά και αυτό το είδος φθοράς ονομάζεται εκλεκτική διάβρωση.
2. Στην ιδιαίτερη σύσταση του λίθου, όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει στον ακτίτη λίθο, όπου λόγο της υψηλής συγκέντρωσης αργιλικών υλικών(μαργαϊκός ασβεστόλιθος) παρατηρούνται φαινόμενα διόγκωσης κατά την

απορρόφηση νερού και θρυμματισμού κατά την εξάτμισή του αλλά και από διάβρωση σύμφωνα με τη στρώση του πετρώματος (Εικ.8.10).



Εικ.8.9 Πεντελικό μάρμαρο. α: κοιλότητα λόγω απόπλυσης φλέβας. β: αποδιοργάνωση του μαρμάρου λόγω εκλεκτικής διάβρωσης φλέβας μαρμαρυγία με ταυτόχρονη αποφλοίωση. Συνυπάρχει και βιοδιάβρωση.



Εικ.8.10 Ακτίτης λίθος. α: διάβρωση σύμφωνα με τη σύσταση του λίθου. Απώλεια συνοχής και μάζας του αρχικού υλικού. β: Ρωμαϊκός Περίβολος: εκλεκτική διάβρωση σε οριζόντιες στρώσεις του μαργαϊκού στρώματος (βέλος). Ο ερυθρωπός λίθος είναι ωολιθικός ασβεστόλιθος και έχει υποστεί κυψέλωση.

Τέλος, αναφέρεται το ρήγμα που υπάρχει στο Τελεστήριο, όπου ο κενός χώρος που προκύπτει από τις τεκτονικές διεργασίες έχει πληρωθεί με φερτά αργιλοπυριτικά και άλλα συστατικά, τα οποία διαβρώνονται ταχύτερα από το πέτρωμα που τα φιλοξενεί (Εικ.8.11).



Εικ.8.11 Ρήγμα που έχει πληρωθεί με αργιλικό υλικό, οξείδια και υδροξείδια Fe.

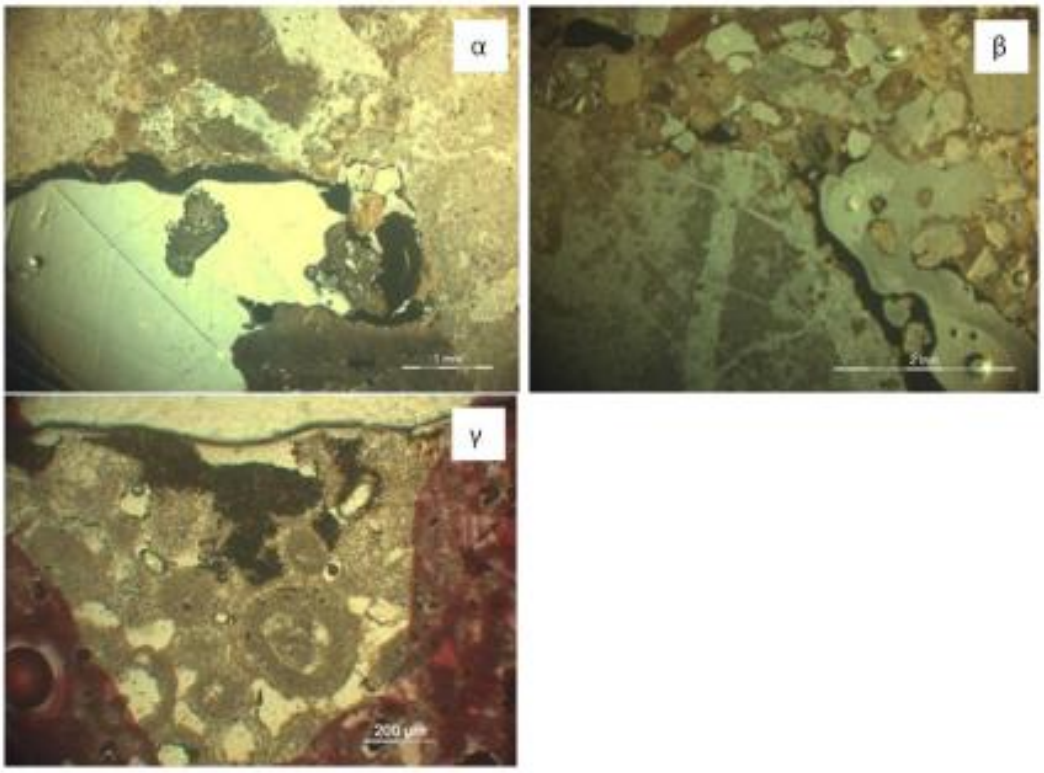
8.2 Μικροσκοπική Περιγραφή Φθορών

Εκτός από τη μακροσκοπική περιγραφή των φθορών, έγινε και μικροσκοπική περιγραφή των επιφανειακών φθορών με τη βοήθεια οπτικής μικροσκοπίας και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης στο σύνολο των δειγμάτων από τον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας. Τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας αποτελούνται από εικόνες οπίσθιας σκέδασης ηλεκτρονίων με μικροαναλύσεις κόκκων επιλεκτικά σε κάποια δείγματα καθώς και στοιχειακή χαρτογράφηση επιφανειών σε μέρος των δειγμάτων. Τα είδη της φθοράς ταξινομούνται σε ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως οι χρωματικές αλλοιώσεις, το πορώδες, η μορφολογία και η μικροδομή καθώς επίσης και η αλληλεπίδρασή τους με το υπόστρωμα. Τελικά, διακρίθηκαν 3 κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής :

1. Χρωματικές αλλοιώσεις βάση της σύστασης με ή χωρίς αλληλεπίδραση με το υπόστρωμα (π.χ. εισχώρηση σε πόρους, διάχυση, εμποτισμός).
2. Αλλοιώσεις βάση της μορφολογίας και της μικροδομής.
3. Διακριτά αντικείμενα ή σωματίδια που βρέθηκαν σε κρούστες και μπορεί να εξηγηθεί η προέλευσή τους.

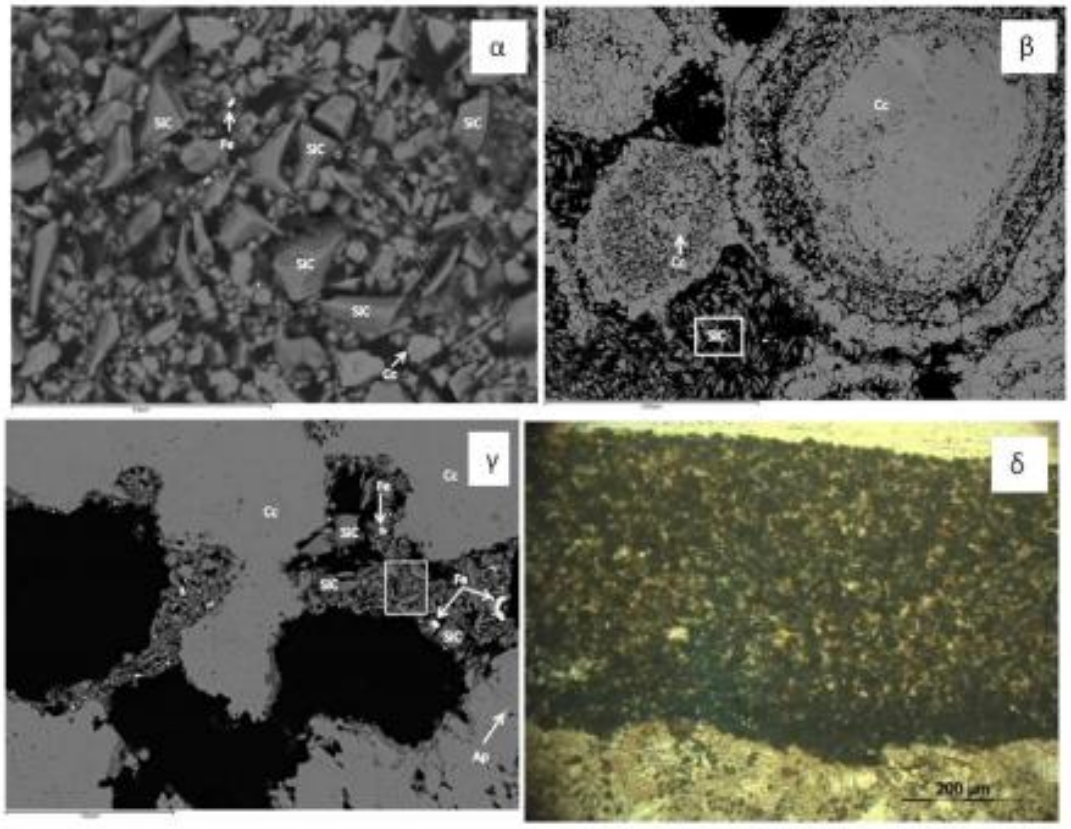
8.2.1 Χρωματικές Αλλοιώσεις

Μαύρες επικαθίσεις που παραμένουν επιφανειακά ή εισχωρούν στο πορώδες δίκτυο του λίθου, όμως δεν επηρεάζουν την μικροδομή του (EL3B, EL35A)(Εικ.8.12). Το υλικό της επικάθισης κάποιες φορές εγκλωβίζει θραύσματα ορυκτών (EL20,EL21,EL23). Οι επικαθίσεις αυτές δεν δείχνουν την ύπαρξη οργανικής ύλης, σύμφωνα με την ηλεκτρονική μικροσκοπία, κάτι που μπορεί να σημαίνει ότι πρόκειται για οργανικές ενώσεις (H/C). Το μαύρο χρώμα των κρουστών που βρέθηκε στο ωολιθικό ασβεστόλιθο αποδίδεται στην ύπαρξη οργανικού C και συνδέεται με τη αιθάλη που εκπέμπεται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων (Ausset et. al.). Αυτό το είδος φθοράς παρατηρήθηκε σε όλους τους λιθότυπους.



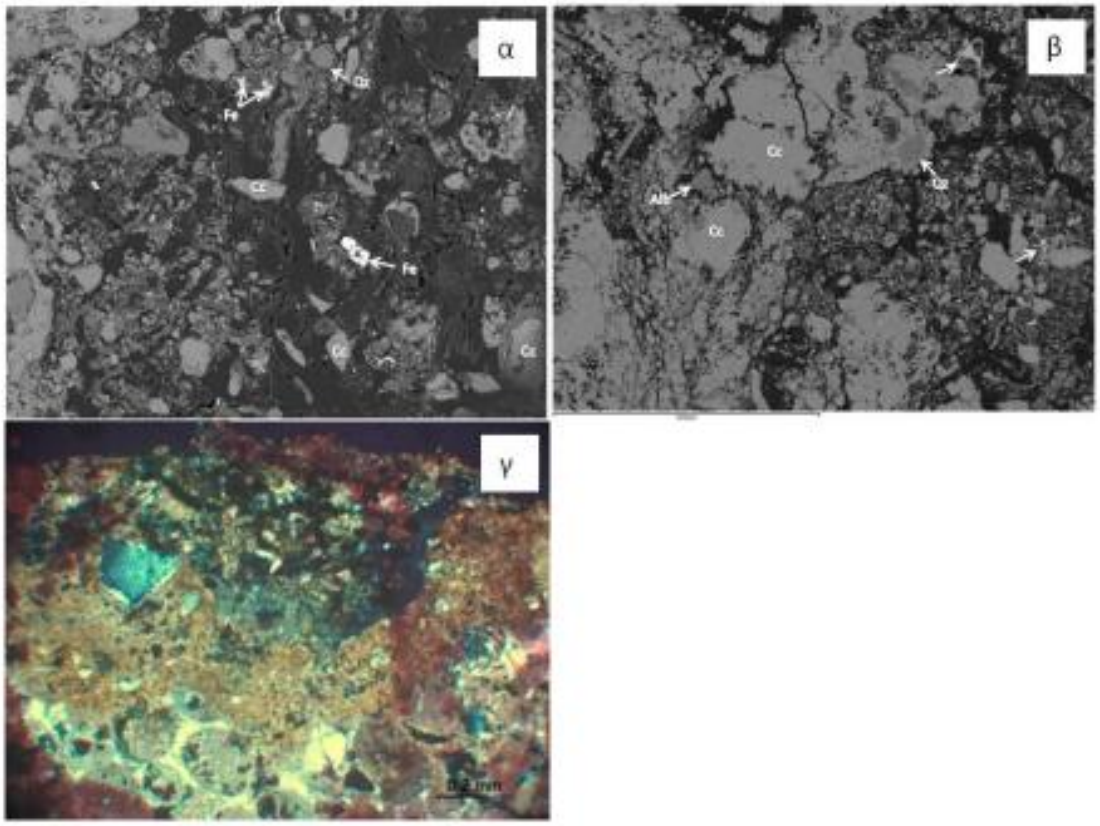
Εικ.8.12 Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols που δείχνουν οργανικό υλικό ως επιφανειακή επικάθιση (α,γ) ή μέσα στο πορώδες του λίθου (β). Δείγματα EL3B, EL21.

Ένα άλλο είδος φθοράς που έχει να κάνει με χρωματικές αλλοιώσεις, είναι οι αποθέσεις ανθρακοπυριτίου (SiC) και μετάλλων (EL20, EL21, EL23) (Εικ.8.13). Οι μικροαναλύσεις σημείων πάνω σε θραύσματα του συγκεκριμένου υλικού έδειξαν μόνο μία φασματική κορυφή, η οποία ανήκει στο πυρίτιο. Το πυρίτιο συνίσταται στη φύση σε ενώσεις και θεωρήθηκε ότι πρόκειται για ανθρακοπυρίτιο που συντίθεται στις υψικαμίνους κατά τις διεργασίες παραγωγής σιδήρου. Το ανθρακοπυρίτιο συναντάται και στη φύση, ως το ορυκτό μοϊσσανίτης, αλλά πολύ σπάνια. Δίπλα στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας, αναπτύσσεται βιομηχανική δραστηριότητα η οποία χρησιμοποιεί τις σκωρίες υψικαμίνων για την παραγωγή τσιμέντου. Αυτό ενισχύει το γεγονός ότι πρόκειται για ανθρακοπυρίτιο, αλλά δεν παύει να υπάρχει η πιθανότητα να πρόκειται για επιχωματώσεις 1000 στρεμμάτων ακτής με μεταλλουργικές σκωρίες και αδρανή υλικά. Τέλος, το κρυσταλλικό σχήμα των θραυσμάτων παραπέμπει σε υψηλές θερμοκρασίες και μικρούς χρόνους σχηματισμού. Το είδος φθοράς παρατηρήθηκε στον ακτίτη λίθο, στον ωολιθικό ασβεστόλιθο και στον ελευσινιακό ασβεστόλιθο.



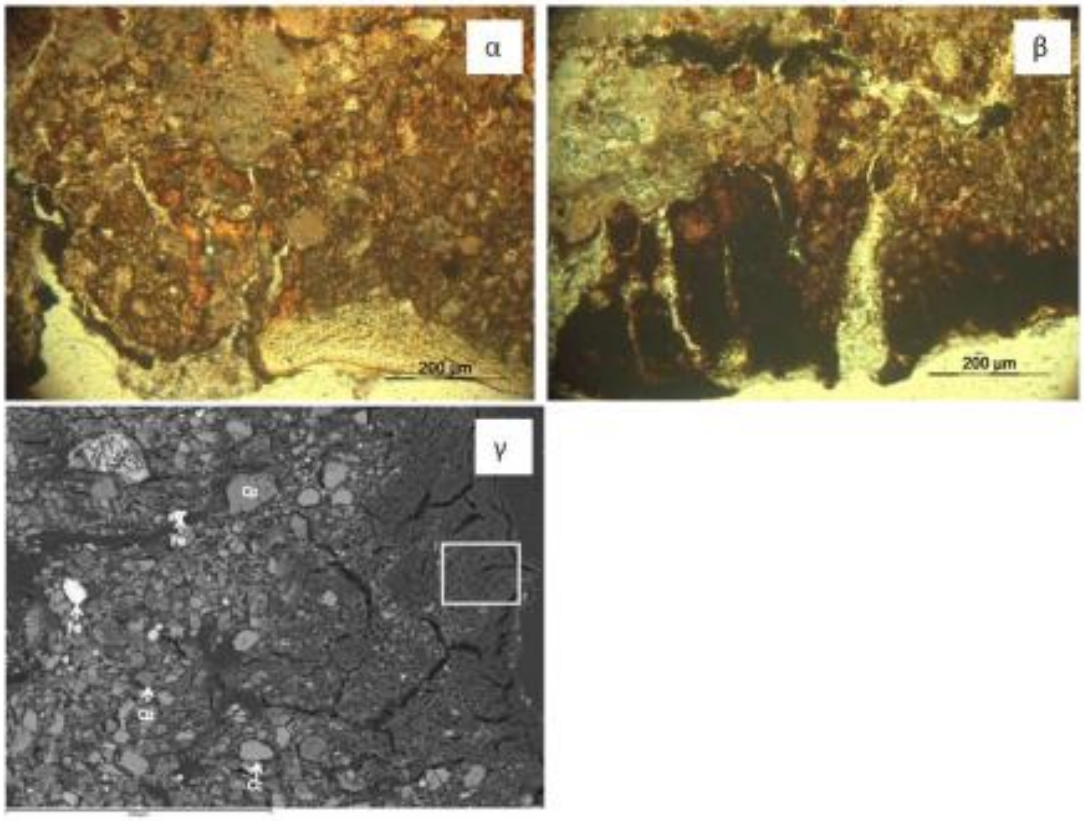
Εικ.8.13 α-γ: εικόνες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων SEM (δείγματα EL23, EL21, EL20) που δείχνουν θραύσματα ανθρακοπυριτίου και μεταλλικών ενώσεων πιθανά μέσα σε οργανικό υλικό στην επιφάνεια (α, β) και στο εσωτερικό (γ) ωολιθικού και ελευσινιακού ασβεστόλιθου. δ: εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols (δείγμα EL23) που απεικονίζει επικάθιση μεταλλικών ενώσεων και ανθρακοπυριτίου στην επιφάνεια ακτίτη λίθου.

Επικαθίσεις θραυσμάτων και οργανικού υλικού παρατηρούνται σε επιφάνειες με υψηλό πορώδες που οφείλεται στην παρουσία υψηλών ποσοτήτων οργανικής ύλης. Το μίγμα των θραυσμάτων και του οργανικού υλικού έχει κυρίως εξωγενής προέλευση και μπορεί να περιέχει μεταλλικά ορυκτά και βιομηχανικούς ρύπους, με σύσταση πλούσια σε Al, Ca, Si και λιγότερο σε Fe, Mn, Ti (Εικ.8.14). Σε περίπτωση ύπαρξης βιολογικής δραστηριότητας πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάπτυξη αποικιών ενδολιθικών μικροοργανισμών με μηχανική διατρητική ή χημική δράση που αλληλεπιδρούν με το ανθρακικό υπόστρωμα και αυξάνουν το πορώδες, ενώ ταυτόχρονα εμπλουτίζουν τη διαβρωμένη επιφάνεια με ορυκτή ύλη προερχόμενη από το πέτρωμα. Αυτό το είδος φθοράς παρατηρήθηκε στον ακτίτη λίθο και τον ωολιθικό ασβεστόλιθο.



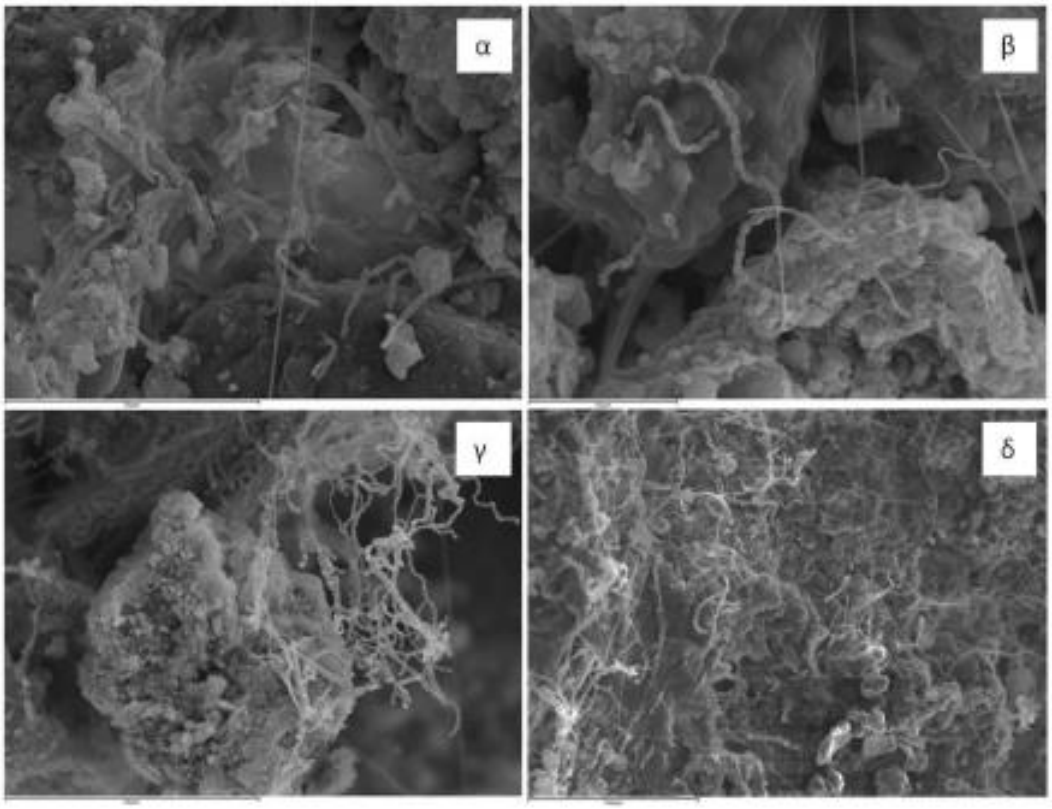
Εικ.8.14 α, β: Εικόνες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων SEM που απεικονίζουν μεταλλικές ενώσεις, θραύσματα ορυκτών, βιομηχανικούς ρύπους (βέλη χωρίς όνομα) που εσωκλείονται στις επιφανειακές αποθέσεις ωολιθικού ασβεστόλιθου και ακτίτη λίθου. Δείγματα EL22 και EL23 αντίστοιχα. γ: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου με κάθετα Nicols (δείγμα EL22) που δείχνει μίγμα θραυσμάτων ορυκτών και οργανικής ύλης (μαύρης κηλίδες) στην επιφάνεια ωολιθικού ασβεστόλιθου.

Στη συνέχεια, η βιολογική δραστηριότητα που παρατηρήθηκε έχει να κάνει στη μία περίπτωση με επιφανειακές περιοχές με αυξημένο πορώδες που εξωτερικά χαρακτηρίζεται από πλήθος μικροοπών (ανάπτυξη βιοαποικιών), ενώ προς το εσωτερικό του λίθου έχουμε την ανάπτυξη δικτύου ρηγματώσεων ως αποτέλεσμα του κατακερματισμού του μητρικού υλικού. Χαρακτηρίζονται από τη ύπαρξη πορτοκαλί χρωστικών (Εικ.8.15). Αυτό το είδος φθοράς συνυπάρχει με θραύσεις κάθετα στην επιφάνεια του πετρώματος ως αποτέλεσμα τάσεων που ασκούνται από την ξήρανση οργανικού υλικού κατά τις ξηρές περιόδους.



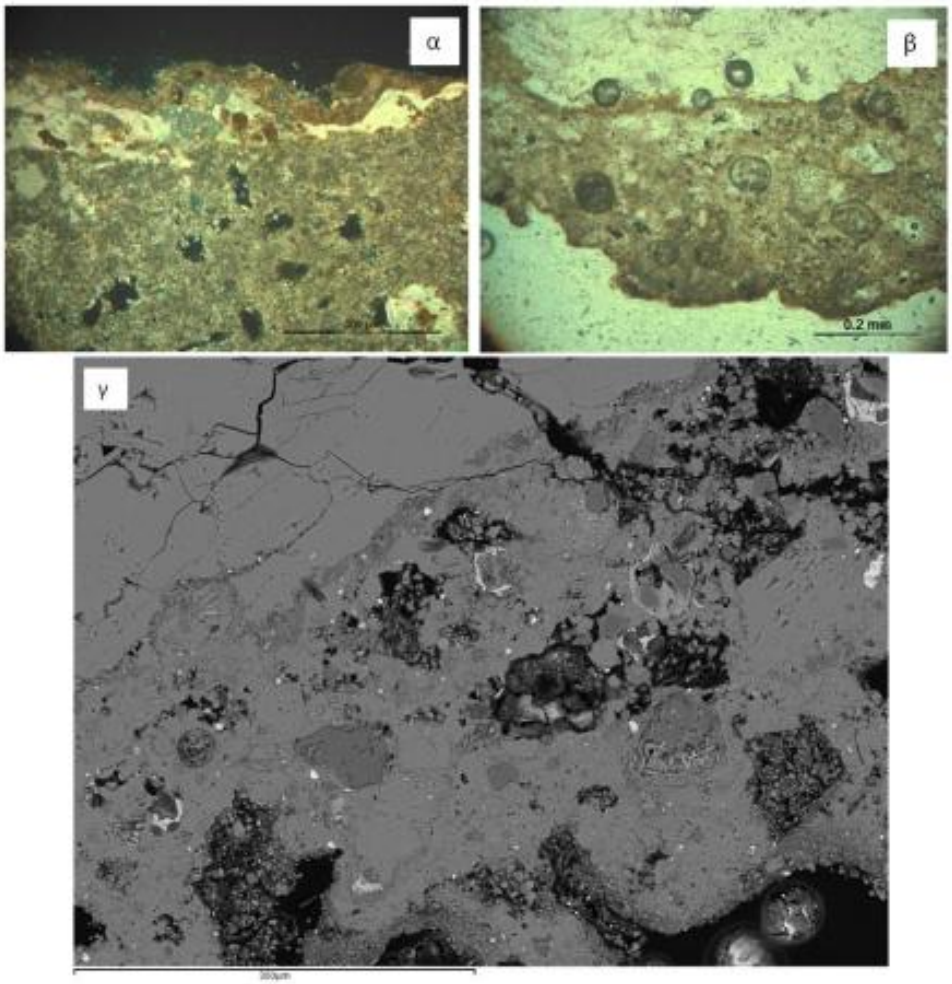
Εικ.8.15 α, β: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου με παράλληλα Nicols (δείγμα EL23) που απεικονίζουν τη βιοδιάβρωση του λίθου με κατακερματισμού αυτού και δημιουργία κάθετων ρωγμών στην επιφάνεια. γ: Εικόνα οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων SEM (δείγμα EL23) που απεικονίζει την επιφάνεια των α, β με μια ιδιαίτερη μορφολογία με λακκούβες (ορθογώνιο). Η έντονη διάβρωση που υφίσταται το πέτρωμα με το κατακερματισμό του ασβεστίτη και το αυξημένο πορώδες είναι εμφανής. Στη μάζα βρίσκονται θραύσματα χαλαζία, ασβεστίτη όπως και μεταλλικά στοιχεία Η ενώσεις τους (κυρίως Fe και μικροποσότητες Mn, Ti, Cr).

Η δεύτερη περίπτωση βιολογικής δραστηριότητας έχει να κάνει με αποικίες που φιλοξενούνται στα σκοτεινά σημεία της διεπιφάνειας σκληρής τσιμεντιτικής κρούστας και πετρώματος (ελευσινιακός ασβεστόλιθος). Οι εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων δείχνουν την ύπαρξη βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών που δημιουργούν νήματα, ίνες και αλυσίδες (Εικ.8.16). Τέλος, ινώδεις σχηματισμοί παρατηρήθηκαν και σε λίθο ο οποίος δεν μπόρεσε να αναγνωριστεί λόγω βιολογικών και άλλων αποθέσεων στην επιφάνειά του.

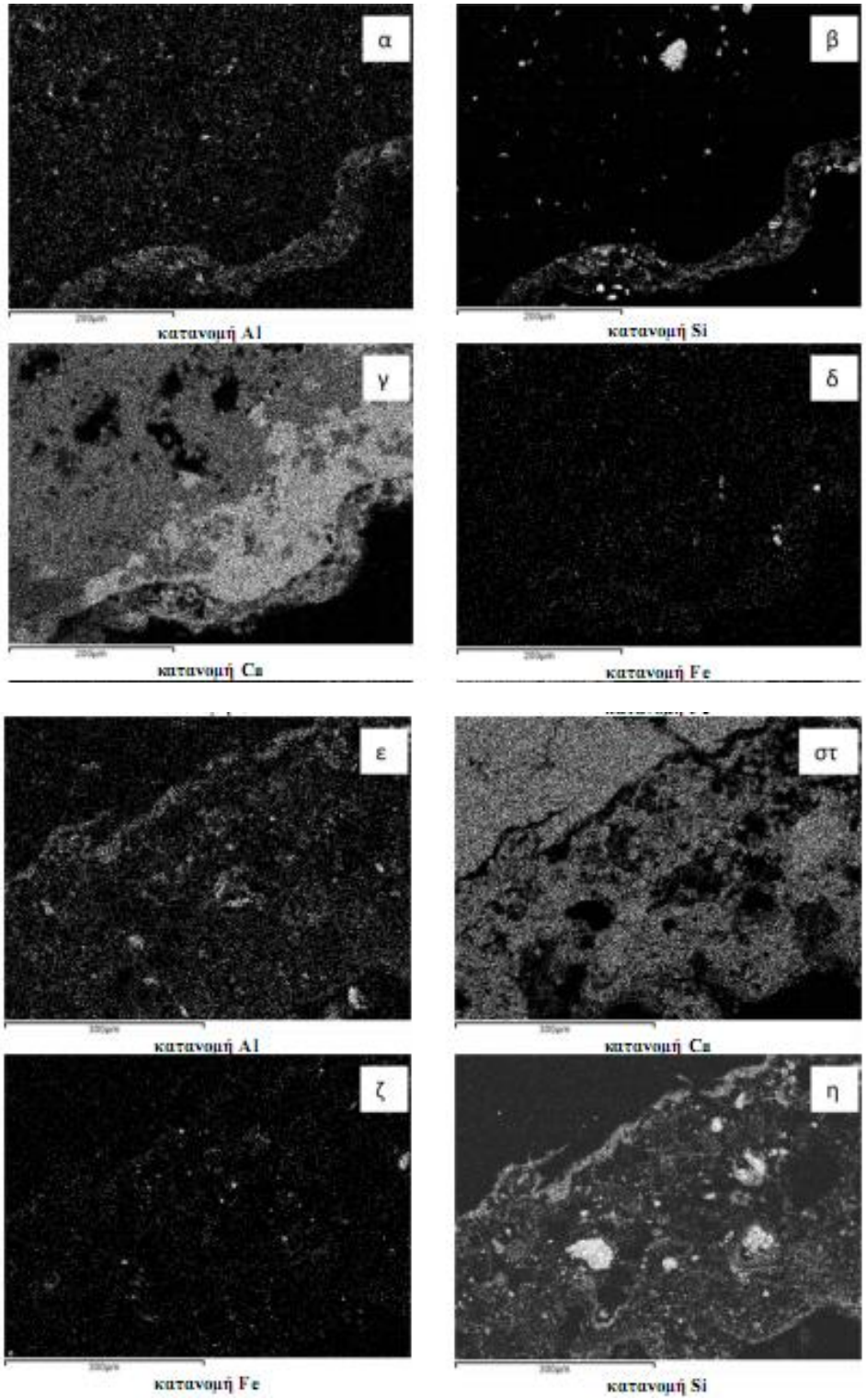


Εικ.8.16 α- δ: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM (δείγματα EL29, EL14) που δείχνουν βακτήρια σε αλυσίδες και νήματα φυκών σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο και ένα μη ταυτοποιημένο δείγμα λίθου.

Η καστανόχρωμη πατίνα διάφορων ορυκτών διεσπαρμένων στη βάση αργιλοπυριτικών ορυκτών είναι επίσης ένα είδος φθοράς. Πρόκειται για αποθέσεις από ενώσεις Fe και άλλων ορυκτών, όπως χαλαζίας, ασβεστίτης, αργιλικά ορυκτά κ.α. Το φαινόμενο αυτό δεν παρουσιάζει στρωμάτωση αλλά τα ορυκτά είναι διεσπαρμένα μέσα στην επικάθιση (Εικ.8.17, Εικ.8.18 α-δ). Μελετήθηκε ένα δείγμα μαρμάρου, που παρουσιάζει υψηλές ποσότητες ασβεστίτη, μεταλλικών ενώσεων και ρύπων μέσα στην επικάθιση που εμφανίζει στρωμάτωση. Η μικροανάλυση και τα αποτελέσματα της στοιχειακής χαρτογράφησης της επιφάνειας έδειξαν ότι αποτελείται από δύο στρώσεις, η εξωτερική η οποία είναι πλούσια σε Ca, Al, χαλαζία και μεταλλικές ενώσεις και η εσωτερική πιο λεπτή στρώση, που έρχεται σε επαφή με το υγιές πέτρωμα και αποτελείται κυρίως από αργιλοπυριτικά ορυκτά (Εικ.8.18, Εικ.8.19 ε- η).

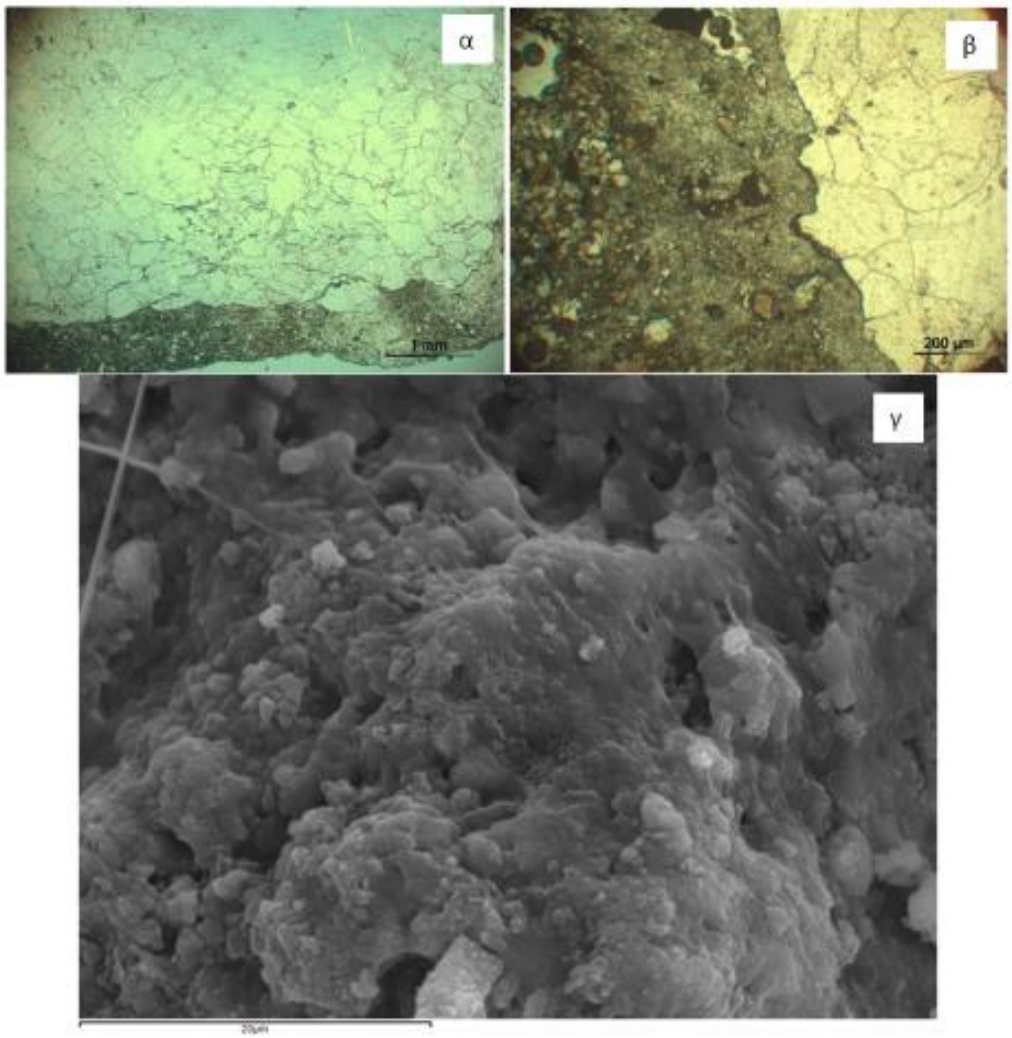


Εικ.8.18 α, β: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου σε κάθετα και παράλληλα Nicols αντίστοιχα (δείγματα EL33 και EL52 αντίστοιχα) που απεικονίζουν αποθέσεις ορυκτών διεσπαρμένα στην επικάθιση. γ: Εικόνα οπίσθιας σκέδασης ηλεκτρονίων SEM που δείχνει πατίνα αργιλοπυριτικών και άλλων ορυκτών με υψηλά ποσοστά ασβεστίτη και αδιαφανών ορυκτών (δείγμα EL52).

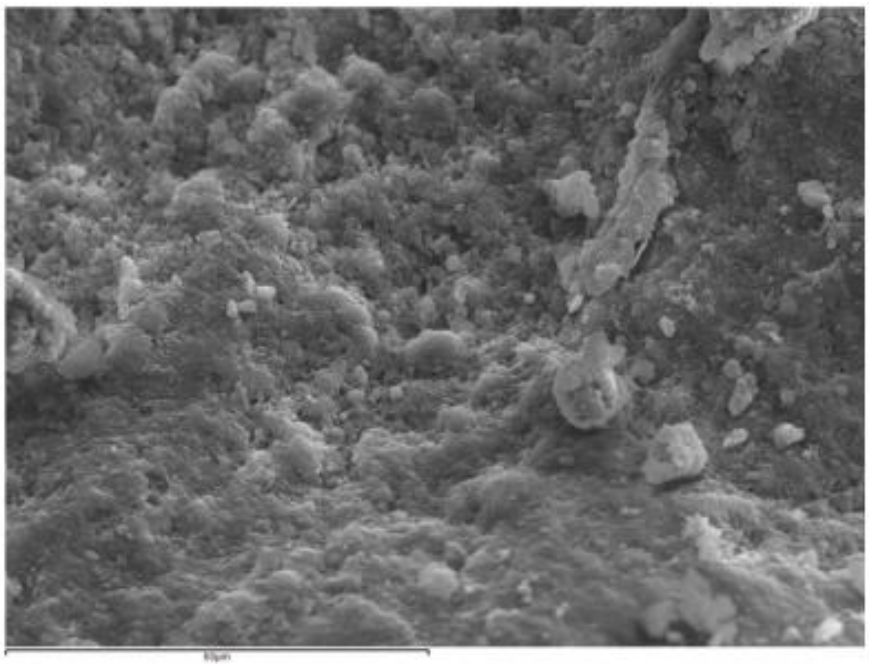


Εικ.8.19 α- δ: Ψηφιακή χαρτογράφηση στοιχείων στην επιφάνεια δείγματος ακτίτη λίθου (EL33). ε- η: Ψηφιακή χαρτογράφηση στοιχείων στην επιφάνεια δείγματος μαρμάρου (EL52).

Μία άλλη χρωματική αλλοίωση που παρατηρείται στη μικροσκοπική κλίμακα είναι η καστανόφαιη τσιμεντιτική κρούστα, μία λιθοποιημένη επικάθιση ρύπων που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου και είναι συχνό φαινόμενο στον αρχαιολογικό χώρο της Ελευσίνας. Η τσιμεντιτική αυτή κρούστα παρατηρήθηκε σε δείγμα μαρμάρου (Εικ.8.20 α, β) με πάχος που φτάνει και τα 5mm, ενώ εντοπίστηκαν μέσα σε αυτή και θραύσματα ορυκτών και πετρωμάτων. Παρόμοια φαινόμενα έχει και ο ελευσινιακός ασβεστόλιθος, τα οποία φάνηκαν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Εικ.8.20 γ, Εικ.21). Τέλος, βάσει μικροαναλύσεων τα ποσοστά Si είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά του Ca σε αντίθεση με το λίθινο υπόστρωμα.

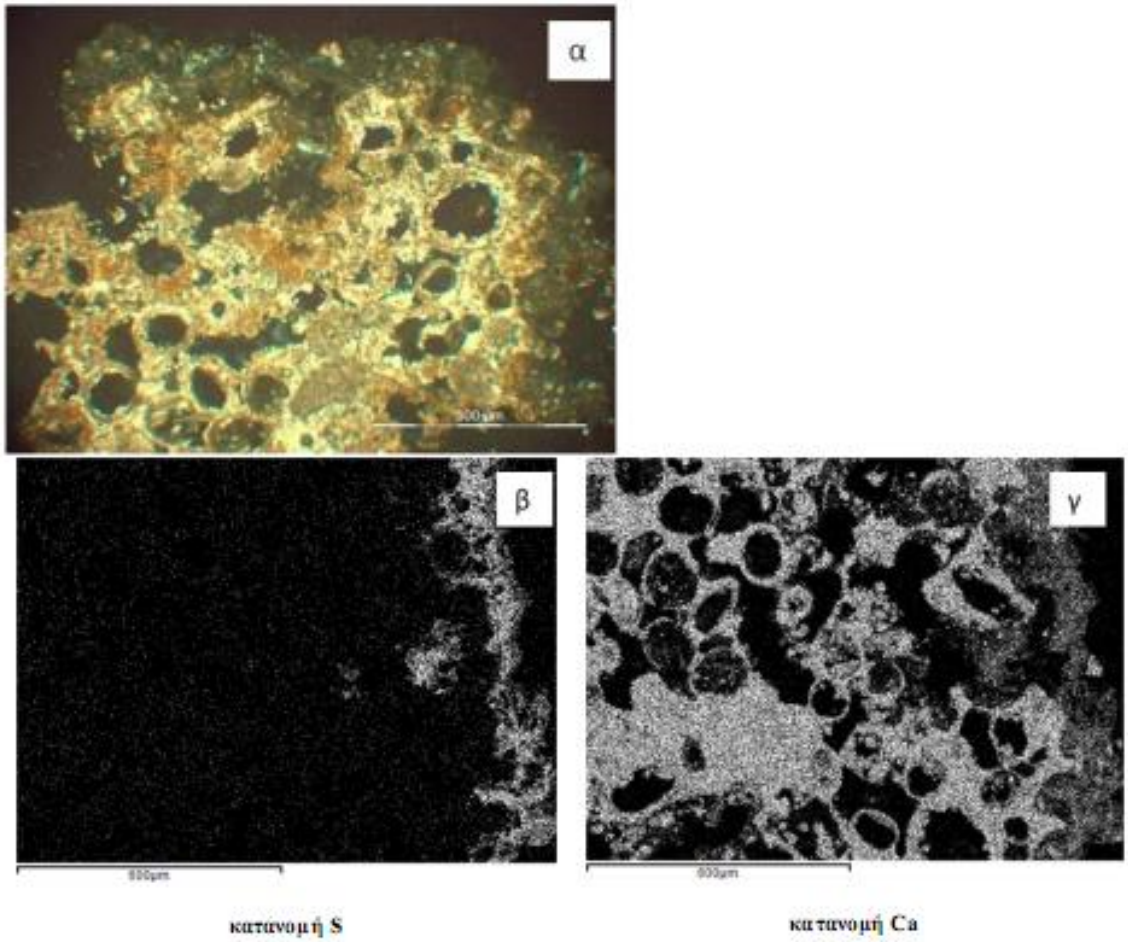


Εικ.8.20 α, β: εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols που απεικονίζει τσιμεντιτική κρούστα σε μάρμαρο Πεντέλης (δείγμα EL50). γ: εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που δείχνει τσιμεντιτική κρούστα σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο (δείγμα EL29).

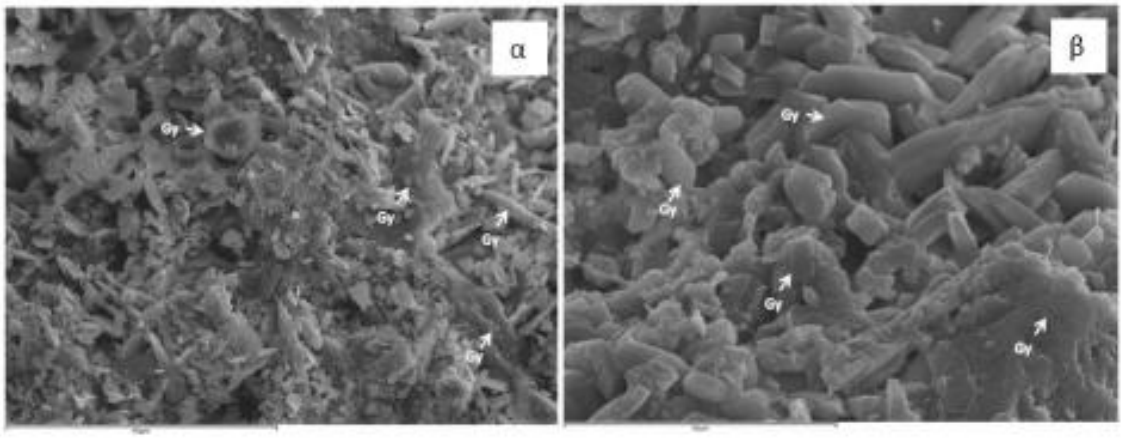


Εικ.8.21 Εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που απεικονίζει τσιμεντιτική κρούστα σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο (δείγμα EL29). Παρατηρείται το συμπαγές υλικό που αποτελεί την κρούστα και θραύσματα ορυκτών από το υποκείμενο πέτρωμα και παρακείμενες πηγές.

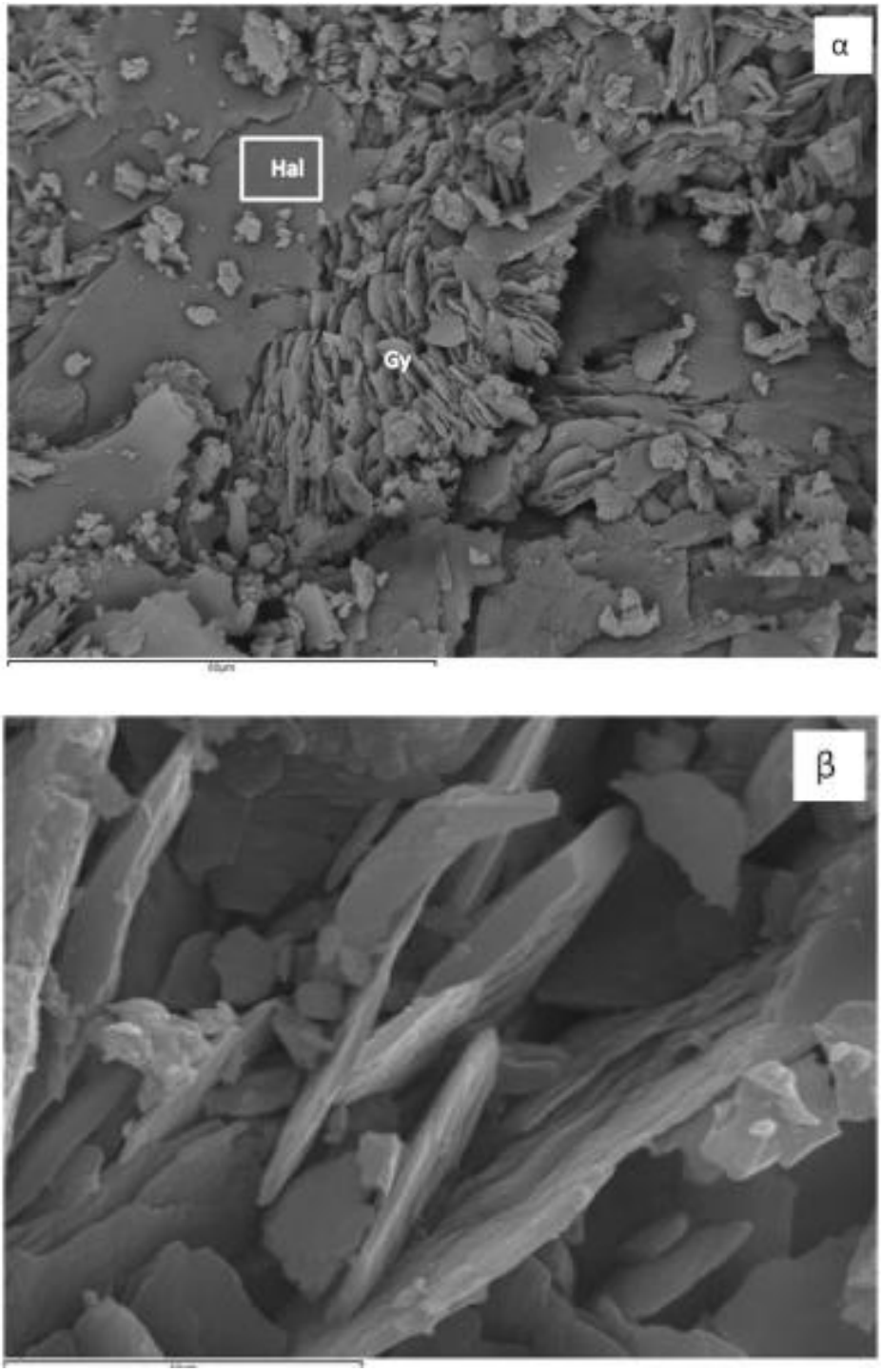
Ένα εξίσου συχνό είδος φθοράς που παρατηρείται στα μνημεία του αρχαιολογικού χώρου είναι οι γυψοποιημένες επιφάνειες. Η υγρή και ξηρή απόθεση του ατμοσφαιρικού S βοηθάει στον μετασχηματισμό του ασβεστίτη σε γύψο, ενώ το θειικό ασβέστιο προέρχεται από τα εναπομείναντα θραύσματα του πετρώματος ή από την ανακρυστάλλωση θειικού ασβεστίου που έχει διαλυθεί. Δείγματα ωολιθικού ασβεστόλιθου έχουν υποστεί γυψοποίηση σύμφωνα με τη στοιχειακή χαρτογράφηση που έγινε με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (δείγμα EL15, Εικ.8.22). Επίσης, σε επιφανειακό υλικό του μάρμαρου Πεντέλης παρατηρήθηκαν ιδιόμορφοι, υπιδιόμορφοι και αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι γύψου καθώς και δομές διάλυσης σύμφωνα με εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (Εικ.8.23, Εικ.8.24). Χαρακτηριστική είναι η ύπαρξη πεπλατυσμένων κρυστάλλων που έχουν αναπτυχθεί σε φύλλα αλλοϋσίτη δημιουργώντας σχηματισμούς που θυμίζουν τη μορφολογία «του ρόδου της ερήμου». Η παρουσία γύψου στα μνημεία επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της περιθλασιμετρίας ακτινών Χ σε δείγματα κρουστών από μάρμαρο Πεντέλης και ελευσινιακό ασβεστόλιθο, όπου η γύψος φαίνεται να αποτελεί την κύρια ορυκτολογική φάση.



Εικ.8.22 α: εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου σε κάθετα Nicols που δείχνει γυψοποιημένη επιφάνεια σε δείγμα ωολιθικού ασβεστόλιθου (EL15). β, γ: ψηφιακή χαρτογράφηση στοιχείων γυψοποιημένης επιφάνειας όπου είναι εμφανής η συνύπαρξη S και Ca (δείγμα EL15).

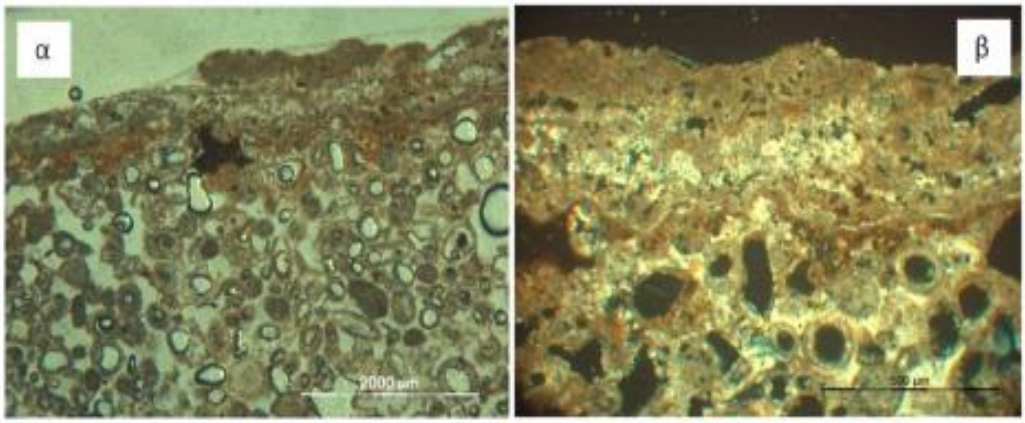


Εικ.8.23 α, β: εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που απεικονίζουν γυψοποιημένες επιφάνειες με διαφορετικές μορφολογίες, α: άτακτη ανάπτυξη κρυστάλλων, β: καλοσχηματισμένοι ή μη κρύσταλλοι και δομές διάλυσης (δείγμα EL6).



Εικ.8.24 α, β: εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που δείχνουν γυψοποιημένη επιφάνεια μαρμάρου (δείγμα EL6).

Τέλος, παρατηρούνται οι οξειδωμένες σιδηρούχες φάσεις τοπικά ή και σε στρώσεις (EL15, EL18, EL21, EL22, EL34). Δείγματα ωολιθικού ασβεστόλιθου (EL15, EL18) εμφανίζουν υψηλά ποσοστά οξειδίων Fe με αποτέλεσμα να εμφανίζουν εμφανή μέτωπα εμποτισμού ή στρώσεις, ασχέτως με τα οξείδια που βρίσκονται σε όλη τη μάζα (Εικ.8.25). Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στον ελευσινιακό ασβεστόλιθο, όπου εδώ τα οξείδια προέρχονται από το ρήγμα στο δυτικό τοίχο του Τελεστηρίου.

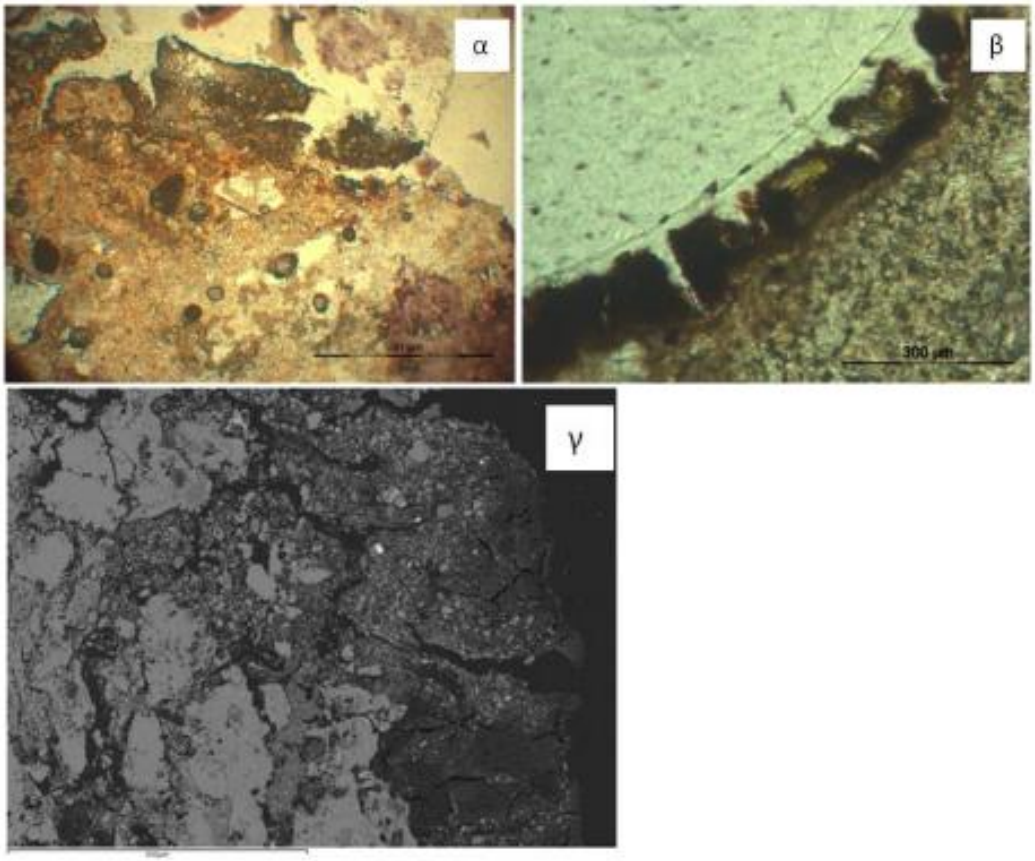


Εικ.8.25 α, β: εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα και κάθετα Nicols που δείχνου οξείδια Fe συγκεντρωμένα τοπικά ή σε στρώσεις στην επιφάνεια δείγματος ωολιθικού ασβεστόλιθου (EL18).

8.2.2 Αλλοιώσεις Μορφολογίας και Μικροδομής

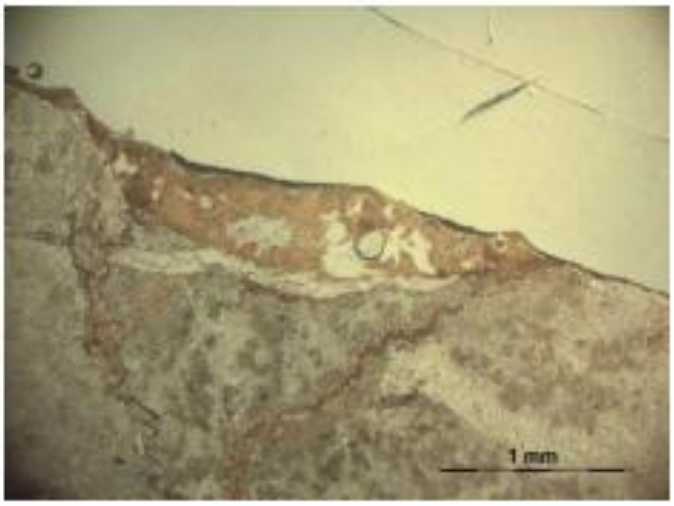
Όσον αφορά τη μορφολογία και τη μικροδομή, οι διάφορες επιφάνειες μπορούν να διακριθούν σε :

1. Επιφάνειες που διαμορφώνονται σε στρώσεις διαφορετικών συστάσεων (Εικ.8.18 α, δείγμα EL33 και Εικ.8.25, δείγμα EL18). Εδώ παρατηρούνται στρώσεις σπαριτικού ασβεστίτη και αργιλοπυριτικών ορυκτών, ενώ στο δείγμα EL18 παρατηρείται στρώση οξειδίων Fe.
2. Επιφάνειες που παρουσιάζουν μικροκαρστικά φαινόμενα, ρηγματώσεις ακανόνιστου σχήματος ή κάθετες στην επιφάνεια ρηγματώσεις και τελικά αποκόλληση θραυσμάτων (EL19, EL28). Αυτές οι δομές είναι αποτέλεσμα ξήρανσης εγκλωβισμένης οργανικής ύλης (Garcia- Valles et al.) λόγω ηλιακής ακτινοβολίας ή κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων του έτους. Σε κάποιες περιπτώσεις οι ρωγμές λόγω συστολής γεμίζουν με γύψο και αναπτύσσεται βιολογική δραστηριότητα (κυρίως νήματα που εισχωρούν σε βάθος) (Εικ.8.26, Εικ.8.16). Παρατηρήθηκε σε δείγματα ακτίτη λίθου και ωολιθικού ασβεστόλιθου (EL22, EL35A).



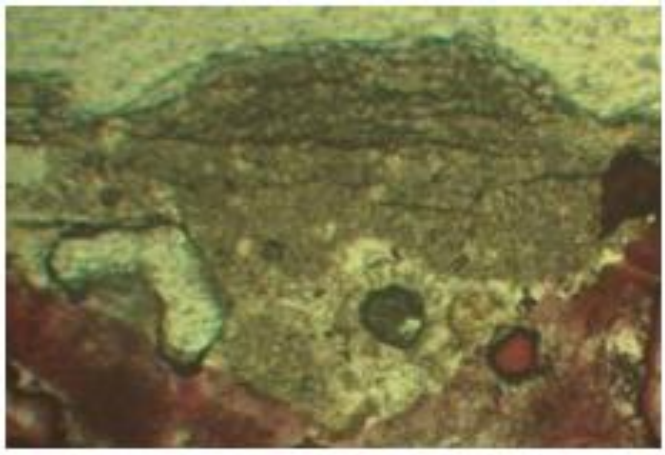
Εικ.8.26 α, β: εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols των δειγμάτων EL19 και EL28 αντίστοιχα. α: αποσάθρωση επιφανειακού υλικού με χρωματική αλλοίωση και δημιουργία μικροκαρστικών φαινομένων που οδηγούν σε αποκόλληση θραυσμάτων, β: σχισμές κάθετες στην επιφάνεια, γ: EL23.

3. Ρηγμάτωση λόγω μηχανικών δράσεων. Είναι συνδυασμός μηχανικών δράσεων που επιφέρουν ρωγμές στην επιφάνεια του λίθου και σχετίζονται με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής μεταβολής που εμφανίζουν διαφορετικά υλικά (στην περίπτωση αυτή κονίαμα και λίθινο υπόστρωμα) και με πιέσεις που ασκούν τα διαλύματα αλάτων που διέρχονται από αυτές τις ρωγμές (Εικ.8.27, δείγμα EL3B).



Εικ.8.27 Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols που απεικονίζει ρωγμές που μέσα από αυτές διέρχονται διάφορα άλατα και ασκούν πιέσεις στο πέτρωμα. Χαρακτηριστικό είναι το τρίγωνο που σχηματίζουν οι δύο ρωγμές οι οποίες ξεκινούν από τα σημεία που η μάζα του κονιάματος λεπταίνει.

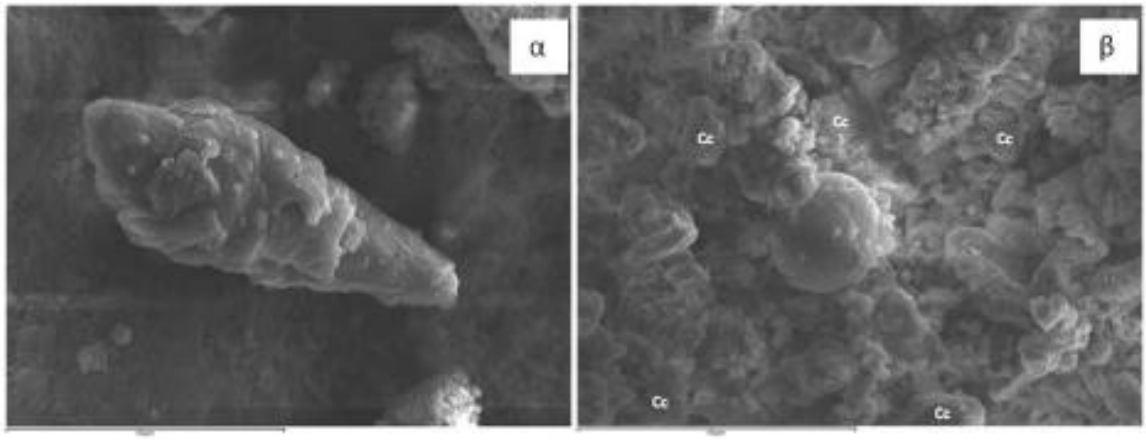
4. Σχηματισμός ρωγμών παράλληλα προς την επιφάνεια του λίθου (δείγμα EL21). Παρατηρήθηκε μόνο σε ένα δείγμα ωολιθικού ασβεστόλιθου χωρίς να συνυπάρχει επικάθιση ή ορυκτοχημική διαφοροποίηση από το πέτρωμα (Εικ.8.28). Μπορεί να οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα του λιθότυπου σε αργιλικά υλικά και να δημιουργήθηκε κατά την προετοιμασία των λεπτών τομών.



Εικ.8.28 Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου σε παράλληλα Nicols ου δείχνει παράλληλες ρηγματώσεις στην επιφάνεια ωολιθικού ασβεστόλιθου (δείγμα EL21).

8.2.3 Αντικείμενα

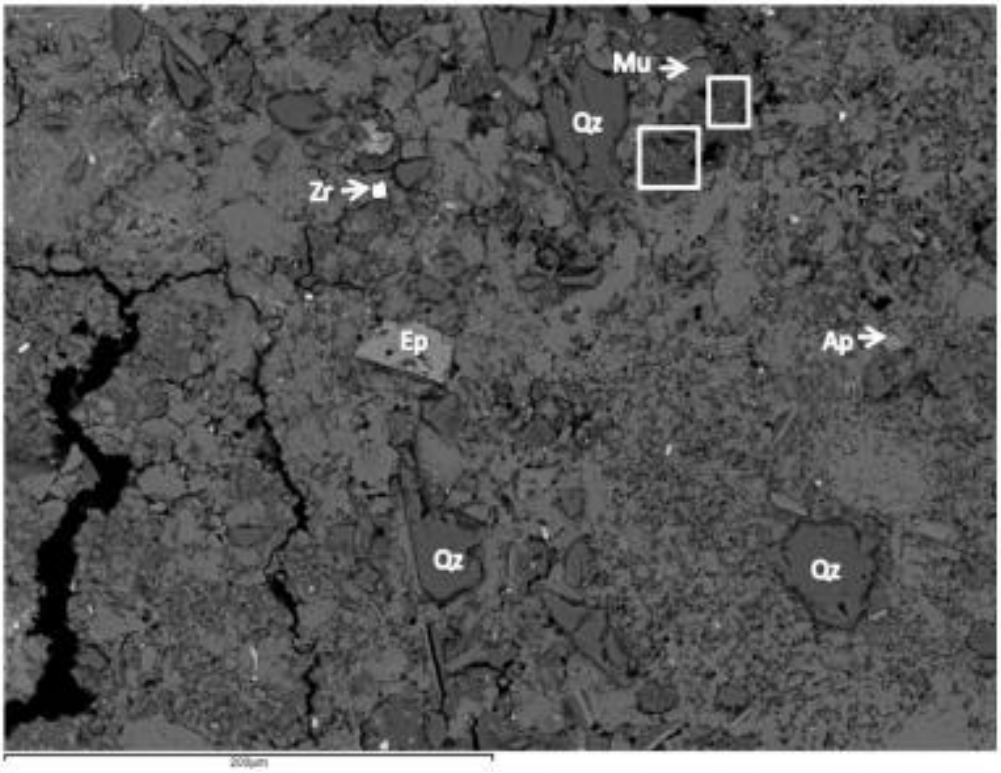
Σύμφωνα με την ηλεκτρονική μικροσκοπία, η ύπαρξη αντικειμένων από το θαλάσσιο περιβάλλον και την ατμόσφαιρα είναι εμφανής. Μέσα σε τσιμεντιτική κρούστα σε έγκοιλο ελευσινιακού ασβεστόλιθου βρέθηκε κέλυφος οστράκου, που περιβάλλεται από κρυστάλλους αλίτη και συλβίνη (Εικ.8.29 α), ενώ βρέθηκε και σφαιρικός κόκκος, συμπαγής και με λεία επιφάνεια (Εικ.8.29 β). Η σύστασή του είναι πυριτική και μπορεί να χαρακτηριστεί ως ατμοσφαιρικό σωματίδιο. Παρόμοιας μορφολογίας και σύστασης (Al, Si, S) σωματίδια έχουν βρεθεί σε ρύπους που προέρχονται από την καύση του άνθρακα.



Εικ.8.29 α: εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που απεικονίζει κέλυφος οστράκου μέσα σε τσιμεντιτική κρούστα σε ελευσινιακό ασβεστόλιθο. β: σφαιρικό σωματίδιο προερχόμενο από την καύση του άνθρακα μέσα στην ίδια κρούστα.

8.2.4 Ρήγμα

Το ρήγμα που υπάρχει στη δυτική πλευρά του Τελεστηρίου, πάνω στο βράχο, έχει λαξευτεί αρκετές φορές στις διάφορες φάσεις οικοδόμησης του Ιερού και αποτελεί και αυτό ένα είδος φθοράς. Το κενό που έχει σχηματιστεί εξαιτίας αυτού έχει γεμίσει με διάφορα φερτά υλικά, κυρίως αργιλοπυριτικά ορυκτά και μεταλλικά οξείδια. Στην εικόνα 8.30 φαίνεται το λεπτομερές υλικό και οι κόκκοι των διάφορων ορυκτών που γεμίζουν το ρήγμα και έρχονται σε επαφή με τον ασβεστόλιθο.



Εικ.8.30 Εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων SEM που δείχνει μεταλλικά και άλλα ορυκτά που γεμίζουν το ρήγμα που υπάρχει στον in situ *ασβεστόλιθο του αρχαιολογικού χώρου (δείγμα EL34).*

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της μικροσκοπικής μελέτης των επιφανειών συγκεντρώνονται σε ένα πίνακα (Εικ.8.31) που δείχνει τις φθορές που εντοπίζονται σε κάθε ένα λιθότυπο. Το είδος φθορά που επικρατεί στις επιφάνειες όλων των λιθότυπων είναι οι αποθέσεις οργανικής ύλης, στη συνέχεια συγκαταλέγονται οι φθορές που έχουν να κάνουν με γυψοποιημένες επιφάνειες, μικροκαρστικά φαινόμενα, ρύπους, ορυκτά αποτιθέμενα σε αργιλοπυριτική βάση στις επιφάνειες των λίθων και επικαθίσεις βαρέων μετάλλων και SiC από βιομηχανικές πηγές. Τέλος, ακολουθούν οι βιολογικές φθορές, οι ενώσεις τσιμέντου και οι οξειδωμένες σιδηρούχες φάσεις.

		Λιθότυπος					
		Ακτίτης λίθος (7 δείγματα)	Ωολιθικός ασβεστόλιθος (7 δείγματα)	Ελευσινιακός ασβεστόλιθος (4 δείγματα)	Μάρμαρο Πεντέλης (4 δείγματα)	Μάρμαρο Υμηττού (2 δείγματα)	Ασβεστόλιθος (1 δείγμα)
Είδος φθοράς	Οργανική ύλη	√	√	√	√	√	√
	SiC και μέταλλα	√	√	√			
	Μίγμα ορυκτών – οργανικής ύλης	√	√				
	Βιολογικά	√		√			
	Καστανή πάτινα	√	√		√		
	Ενώσεις τσιμέντου			√	√		
	Γύψος		√	√	√		
	Οξειδωμένες Fe ούχες φάσεις		√				
	Στρωμάτωση αποθέσεων	√	√				
	Μικροκαρστικά φαινόμενα	√	√	√			
	Ρωγμές παράλληλες στην επιφάνεια	√					

Εικ.8.31 Συνοπτικός πίνακας των ειδών φθοράς που συναντώνται σε κάθε λιθότυπο σύμφωνα με τη μικροσκοπική μελέτη.

Συμπεράσματα

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τις μορφές διάβρωσης των λίθινων μνημείων του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας μελετήθηκαν οι πιθανές αιτίες που τις προκαλούν. Έγινε μία μελέτη των δειγμάτων των λίθων και των επιφανειακών υλικών μακροσκοπικά, μικροσκοπικά όσο και με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ. Η περιγραφή των φθορών που εντοπίστηκαν στον αρχαιολογικό χώρο έγινε μακροσκοπικά και κατατέθηκαν τα αποτελέσματα της ορυκτοχημικής μελέτης των λίθων.

Η περιοχή της Ελευσίνας, τα τελευταία 130 χρόνια και πλέον, έχει μία έντονη βιομηχανική δραστηριότητα. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην ατμόσφαιρα της Ελευσίνας η οποία είναι έντονα ρυπασμένη από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως επίσης και στον κόλπο της Ελευσίνας που έχει ρυπανθεί και είναι ευτροφικός.

Πριν μελετηθεί πώς αυτές οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν στη φθορά των λίθινων μνημείων του αρχαιολογικού χώρου, έγινε περιγραφή των πέντε κύριων λιθότυπων. Αυτοί είναι ο ελευσινιακός ασβεστόλιθος που απαντά στην περιοχή, ο μαγαϊκός ασβεστόλιθος (ακτίτης λίθος), ο ωολιθικός ασβεστόλιθος και τέλος τα μάρμαρα Πεντέλης και Υμηττού. Αυτά είναι τα πετρώματα που έχουν χρησιοποιηθεί ως επί το πλείστον για την οικοδόμηση του χώρου. Συναντάται επίσης και ένα δολομιτικό μάρμαρο, σε ένα όμως μόνο δείγμα, οπότε δεν αποτελεί κριτήριο ότι χρησιμοποιήθηκε επανειλημμένα για την οικοδόμηση του ναού. Το ίδιο ισχύει για ένα ακόμη είδος ασβεστόλιθου που βρέθηκε στο χώρο. Τα δύο τελευταία δείγματα μπορεί να βρέθηκαν τυχαία στο χώρο ή μεταγενέστερα αλλά αυτό χρειάζεται περιτέρω έρευνα.

Όσον αφορά τη μικροσκοπική μελέτη, τα αποτελέσματα έδειξαν ένα μεγάλο ποσοστό σε αργιλικό υλικό στον ακτίτη λίθο και πορώδες μεταξύ 15% και 25%. Αυτές οι σχετικά υψηλές τιμές πορώδους δείχνουν ότι πρόκειται για μικροπορώδες. Αυτό βέβαια επηρεάζει και την υδατοπορροφητικότητα του λίθου. Από την ηλεκτρονική μικροσκοπία τα αποτελέσματα έδειξαν ένα μεγάλο ποσοστό σε δολομίτη. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα τοιχώματα των πόρων, όπου υπάρχει περίπτωση ο δολομίτης να εξαπλώνεται σε όλη τη μάζα του πετρώματος (EL33). Μακροσκοπικά αυτό το φαινόμενο αναγνωρίζεται με τη χρωματική διαφοροποίηση από τα υπόλοιπα δείγματα της κατηγορίας του και στην υψηλότερη σκληρότητά του. Από την άλλη, ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος υποφέρει από το φαινόμενο της θιξοτροπίας λόγω υψηλών ποσοστών αργιλικού υλικού. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις ο λίθος τείνει να χάσει μεγάλο μέορς της μάζας του αλλά και της συνοχής του.

Ο ωολιθικός ασβεστόλιθος είναι ένα πέτρωμα με τραχιά υφή και με το υψηλότερο πορώδες από όλους τους λίθους που ερευνήθηκαν, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 25% και 40%. Η σκληρότητα του ωολιθικού ασβεστόλιθου είναι μεγαλύτερη

από αυτή του ακτίτη λίθου και αυτό φαίνεται μακροσκοπικά από τους πόρους μεγαλύτερου μεγέθους που παρατηρούνται. Η συνεκτικότητα των κόκκων του πετρώματος, που οφείλεται στο σπαριτικό συνδετικό υλικό, του προσδίδει ιδιότητες που το καθιστούν λιγότερο ευάλωτο στις διαβρωσιγενείς διεργασίες. Η κυριότερη μορφή διάβρωσης είναι η διαφορική, όπως η κυψέλωση που δημιουργεί οπές στην επιφάνειά του και λιγότερο από φθορές που οδηγούν στην απομείωση της επιφάνειάς του.

Στο ιερό της Δήμητρας το κύριο πέτρωμα που συναντάται είναι ο γκρίζος ελευσινιακός ασβεστόλιθος. Είναι ένα πέτρωμα με υψηλή καθαρότητα και πορώδες που δεν ξεπερνά το 3%. Πρόκειται για σκληρό συνεκτικό λίθο που παρατηρούνται κυρίως φαινόμενα γυψοποίησης, τσιμεντιτικές κρούστες και λευκές οριζόντιες επιφάνειες που οφείλονται πιθανά σε απόπλυση από νερό.

Στη συνέχεια, τα μάρμαρα Υμηττού και Πεντέλης, με πολύ χαμηλές τιμές πορώδους, ξεχωρίζουν από το δολομιτικό μάρμαρο και δεν εμφανίζουν περιοχές δολομιτίωσης. Οι δύο κύριες κατηγορίες μαρμάρων εμφανίζουν επικαθίσεις ρύπων τσιμεντοβιομηχανίας, γυψοποίηση, κυψέλωση, βιοδιάβρωση και χρωματική αλλοίωση (κιτρινισμός του μάρμαρου Πεντέλης). Τέλος, αναφέρεται και η περίπτωση εκλεκτικής διάβρωσης στο πεντελικό μάρμαρο λόγω απόπλυσης φλέβας μοσχοβίτη, η οποία δημιουργεί κοιλότητες στην επιφάνεια του λίθου.

Όσον αφορά τη μικροσκοπική μελέτη και την περιθλασιμετρία ακτίνων Χ, η έρευνα έδειξε επιφανειακές αλλοιώσεις των λίθων, οι οποίες διακρίνονται για τη διαφοροποιημένη χημική τους σύσταση και τη μορφολογία και τη μικροδομή τους σε σχέση με το υπόστρωμα. Σε όλα τα είδη των λίθων παρατηρήθηκαν αποθέσεις οργανικού υλικού οι οποίες λερώνουν και χρωματίζουν τις επιφάνειες μαύρες. Η προέλευσή τους μπορεί να αποδοθεί σε σωματίδια αιθάλης που εκπέμπονται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης και γενικά σε Η/C εκπεμπόμενους από τη βιομηχανική δραστηριότητα στην περιοχή, μιας και η βιομηχανία συμβάλλει κατά 75,6% στην επιφόρτιση της ατμόσφαιρας με τέτοιους ρύπους.

Τέτοιες αποθέσιες εγκλωβίζουν και θραύσματα μετάλλων και SiC, τα οποία συντίθενται στις υψικαμίνους και περιέχονται στη σκωρία της μεταλλουργίας. Η γειτνίαση του αρχαιολογικού χώρου με τη τσιμεντοβιομηχανία, οι επιχωματώσεις των ακτών του κόλπου της Ελευσίνας με μεταλλουργικές σκωρίες, η χρήση της σκωρίας στην παρασκευή τσιμέντου και τέλος η μονάδα παραγωγής προϊόντων σιδήρου τα παρελθόντα έτη είναι πιθανές πηγές προέλευσης αυτού του υλικού.

Άλλη μορφή φθοράς που συναντάται σε ασβεστολιθικά πετρώματα και είναι αποτέλεσμα βιομηχανικής δραστηριότητας είναι η γυψοποίηση. Το φαινόμενο παρατηρείται τοπικά λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που χρειάζονται για τη δημιουργία του αλλά δεν είναι περιορισμένης έντασης και αυτό φαίνεται από τη παρουσία γύψου σε όλη σχεδόν την επιφάνεια της σπηλιάς του Πλουτωνίου.

Εκτός από τις γυψοποιημένες επιφάνειες και η παρουσία ενώσεων του τσιμέντου σε μεγάλο μέρος των οριζόντιων επιφανειών αλλοιώνουν την αισθητική του χώρου. Σε αυτή την περίπτωση τα αιωρούμενα σωματίδια, που έχουν προέλθει από τις εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου, επικάθονται και παραμένουν σε έγκοιλα των λίθων. Στη συνέχεια, η δράση του νερού τα σκληραίνει και τα συμπαγοποιεί δημιουργώντας τσιμεντιτικές κρούστες αρκετά μεγάλου πάχους.

Κάποιες από τις παραπάνω μορφές διάβρωσης συνυπάρχουν και με βιολογικές αποικίες ενδολιθικών ή μη οργανισμών, όπως είναι τα βακτήρια, οι μύκητες και οι λειχήνες που δημιουργούν χαρακτηριστικές διαμορφώσεις στις επιφάνειες των λίθων τις οποίες αποδιοργανώνουν κατακερματίζοντας το υπόστρωμα είτε τρυπώντας το προκειμένου να εισχωρίσουν σε βαθύτερα στρώματα που τους προσφέρουν τις κατάλληλες συνθήκες για να αναπτυχθούν. Ο μηχανισμός διείσδυσης των νημάτιων δεν είναι μόνο φυσικού χαρακτήρα αλλά και χημικού. Η φύση των ορυκτών και των άμορφων αποθέσεων που συνθέτουν τις βιολογικές πατίνες και η χημική τους σύνθεση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορυκτολογική φύση του υποστρώματος στο οποίο προσκολλώνται, αφού οι οργανισμοί αναζητούν στοιχεία όπως ασβέστιο, σίδηρο, πυρίτιο, αργίλιο και φώσφορο ως τροφή. Τα υψηλά επίπεδα ρύπανσης της ατμόσφαιρας σε συνδυασμό με την ύπαρξη βιολογικών αποικιών σε αρκετά έντονο βαθμό δεν είναι κάτι απροσδόκητο αφού κυανοβακτήρια και κάποια είδη λειχηνών είναι γνωστά για την ανθεκτικότητά τους σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, όπως επίσης και η δραστηριότητα των βακτηρίων μπορεί να μεταβολίσει ενώσεις αζώτου και θείου με οξειδοαναγωγικές δράσεις. Επιπλέον, η ικανότητα των βακτηρίων, λειχήνων και μυκήτων να συγκεντρώνονται οδηγεί σε καθίζηση ενώσεων του σιδήρου και του φωσφόρου, στοιχεία τα οποία ανιχνεύονται στην εργασία είτε διάσπαρτα σε μικρές συγκεντρώσεις στις επιφάνειες των λίθων είτε διαμορφώνοντας στρώσεις (οξείδια σιδήρου).

Εν κατακλείδι, η γνώση όλων των λιθοτύπων και των διαβρωσιγενών μορφών χρειάζεται για να αναζητηθούν οι κατάλληλες μέθοδοι αποκατάστασης των φθορών που έχουν υποστεί τα αρχαία μνημεία. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται μόνο ονομαστικά κάποιες μέθοδοι αποκατάστασης όπως οι μηχανικές μέθοδοι για σκληρές κρούστες και πάστες και βιοκτόνα για βιολογικές επικαθίσεις. Για μικρές ρωγμές (διάμετρο < 0.2mm) προτείνονται εργασίες στερέωσης και αδιαβροχοποίησης με οργανικά ή ανόργανα υλικά, ενώ για μεγαλύτερα ανοίγματα προτείνεται συμπλήρωση με κονίαμα. Τέλος, η αισθητική αποκατάσταση του χώρου περιλαμβάνει τη συγκόλληση τεμαχίων με παραπλήσιες ιδιότητες με αυτές του αυθεντικού και κατά περίπτωση χρησιμοποιείται και στήριξη με μεταλλικές ράβδους Ti.

Βιβλιογραφία

1. Τσιραμπίδης Α. « Ο Ορυκτός Πλούτος της Ελλάδος» Εκδοτικός Οίκος Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη 1998.
2. http://www.cyceon.gr/el/museum/content/412
3. Τσικούρας Β. «Επιπτώσεις του Περιβάλλοντος στους Δομικούς Λίθους των Σύγχρονων Κατασκευών και Αρχαίων Μνημείων». Πανεπιστήμιο Πάτρας. Τμήμα Γεωλογίας. Μάρτιος 2010.
4. «Άσκηση Υπαίθρου στον Αρχαιολογικό Χώρο της Ελευσίνας στα πλαίσια του μαθήματος Βιομηχανικά Ορυκτά». 2/4/2011. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
5. «Υλικά Δομής. Άσκηση Υπαίθρου στον Αρχαιολογικό Χώρο της Ελευσίνας στα πλαίσια του μαθήματος Βιομηχανικά Ορυκτά». 13/3/2010. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
6. Καταγάς Χ. «Μέθοδοι Ανάλυσης Ορυκτών και Πετρωμάτων». Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Γεωλογίας.
7. Κουκουβέλας Ι., Κοκκάλας Σ., Ξυπολιάς Π. «Γεωλογία Ελλάδος». Τμήμα Γεωλογίας. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα 2008.
8. Μαρίνος Π., Μαρίνος Β., Στούμπος Γ., Νόβακ Μ., Κορνάρης Κ., Μπενίση Μ. (2004) : Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, XXXVI, 1791.
9. Δ.Ι. Παπανικολάου, Σ.Γ. Λόζιος, Κ.Ι. Σούκης, Εμ.Ν. Σκούρτσος (2004) : Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, XXXVI, 1552.
10. Παπαδέας Δ.Γ. «Επεξηγηματική Μελέτη του Γεωλογικού Χάρτη της Αττικής». Ι.Γ.Μ.Ε. 2002.
11. W.S. MacKenzie, C. Guilford "Atlas of Rock Forming Minerals in Thin Section".
12. W.S. MacKenzie, C.H. Donaldson, C. Guilford "Atlas of Igneous Rocks and their Textures".
13. Peter A. Scholle, Dana S. Ulmer-Scholle "A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks : grains, textures, porosity, diagenesis". The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 2003.
14. Μπισμπίκου Α. «Μελέτη – αίτια και μηχανισμοί- της Φθοράς των Δομικών Λίθων του Αρχαιολογικού Χώρου της Ελευσίνας σε σχέση με την Ατμοσφαιρική Ρύπανση». Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα, 1997.
15. Παπασταματίου Κ. «Συντήρηση λίθου / Ορολογία φθορών – αντοιστίχιση επέμβασης- μέθοδοι επαρκούς τεκμηρίωσης». Εργασία στα πλαίσια εκπαιδευτικής άδειας 2006-2007.
16. http://www.ysma.gr/%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B5%CF%82
17. S.Siegesmund, T.Weiss, A.Vollbrecht "Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strageties and Case Studies". University of Gottingen, Germany.

18. Vasco Fassina, Monica Favaro, Andrea Naccari “Principal Decay Patterns on Venetian Monuments”. Geological Society, London, Special Publication.
19. Robert L. Folk “Petrology of Sendimentary Rocks”. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas 78703.
20. “Physico-mechanical and Microstructural Characteristics of Historic and Restoration Mortals Based on Gypsum : current knowledge and perspective”. Geological Society, London, Special Publication 2002 ; v.205 ; p.165-176.
21. R.A. Lefevre, P. Ausset “Atmospheric Pollution and Building Materials : stone and glass”.
22. J. Howe “Geology of building stones”. Dohead. 1910.
23. Υψηλάντη Ε. «Γυψοποίηση : ένας σημαντικός εχθρός του μαρμάρου». Ηίων 2007. Τεύχος 4.
24. http://www.star-athens.aueb..gr/jpan/diatrives/Tsigopoulou/chapter 5. pdf
25. Α. Κολλιός «Ατμοσφαιρικά Αιωρήματα και Έμμεσες Επιδράσεις». ΑΠΘ. Τμήμα Φυσικής. Σχολή Θετικών Επιστημών.
26. Oates J.A.H. “Lime and limestone- Chemistry and Technology”, Production and Uses. WILEY-VCH.
27. http://www.mindat.org/min-40333.html
28. Pohl, W., Schneider, J. “Impact of endolithic biofilms on carbonate rockssurfaces”. Geological Society, London, Special Publication 2002, v.205, p.177-194.