

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική διατριβή

**Διερεύνηση των αιτιών διάβρωσης
των δομικών λίθων
από τα ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού
στο Δίον**

Ελένη Παπανικολάου
Αρχαιολόγος
Συντηρήτρια έργων τέχνης

**Θεσσαλονίκη
2016**

Επιβλέπων:

Καθηγητής Β. Χρηστάρας

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:

Καθηγητής Χρηστάρας Β., Επιβλέπων

Καθηγήτρια Πινγκιάτογλου Σ., Μέλος

Καθηγητής Σπαθής Π., Μέλος

Εξεταστική επιτροπή:

1. Καθηγητής **Χρηστάρας Βασίλης**, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, Πρόεδρος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
2. Καθηγήτρια **Πινγκιάτογλου Σεμέλη**, Τμήμα Ιστορίας-Αρχαιολογίας, ΑΠΘ, Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
3. Καθηγητής **Σπαθής Παναγιώτης**, Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
4. Καθηγήτρια **Παπαγιάννη Ιωάννα**, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ
5. Καθηγητής **Μέντζος Αριστοτέλης**, Τμήμα Ιστορίας-Αρχαιολογίας ΑΠΘ
6. Αναπληρώτρια Καθηγήτρια **Παυλίδου Ελένη**, Τμήμα Φυσικής ΑΠΘ
7. Επίκουρος Καθηγητής **Μέλφος Βασίλης**, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Γεωλογικό Τμήμα της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της συγγραφέα (N. 5343/1932. 202 παρ. 2).

Στον γιο μου

Η πέτρα επιζεί.
Με τον αέρα ζει.
Την κοιτάζεις και ζει.
Μέσα κι έξω
απ' τον εαυτό της ζει
και δεν ξέρεις καθαρά
τι είναι απ' τα δυο.

«Η πέτρα»
Mark Strand

Πρόλογος

Ο συνδυασμός των προπτυχιακών σπουδών μου, στον τομέα της αρχαιολογίας με τις μεταπτυχιακές, στον τομέα της προστασίας και της συντήρησης των μνημείων του πολιτισμού οδήγησαν στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Η μελέτη για την προστασία των μνημείων ήταν η συνέχεια της ενασχόλησής μου, με παρόμοιο θέμα στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου, κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Η παρούσα διατριβή συνδυάζει το αντικείμενο του συντηρητή με εκείνο του αρχαιολόγου, με σκοπό την προστασία των υπό μελέτη μνημείων. Έχει επιτευχθεί η διεπιστημονικότητα του θέματος, η οποία αποτελεί πρόκληση για έναν ερευνητή. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραλειφθούν οι δυσκολίες, που προέκυψαν από ένα τέτοιο εγχείρημα και αφορούσαν γνωστικά κενά, που έπρεπε να καλυφθούν μέσα στο χρόνο εκπόνησης της εργασίας.

Ολοκληρώνοντας τη συγγραφή της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα και τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής της διατριβής μου για την εμπιστοσύνη, που μου έδειξαν, αναθέτοντάς μου τη συγκεκριμένη εργασία, την ουσιαστική τους επιστημονική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές τους, αλλά και τη γενικότερη συμβολή τους στην εκπόνηση της διατριβής.

Ιδιαίτερος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια αρχαιολογίας και υπεύθυνη της πανεπιστημιακής ανασκαφής στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου, κα. Σεμέλη Πινιάτογλου για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη, που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Δημήτρη Παντερμαλή, διευθυντή της πανεπιστημιακής ανασκαφής του Δίου για την έγκριση της πρότασης καθώς και την Εφορεία Αρχαιοτήτων Πιερίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον επίκουρο καθηγητή Γεωλογίας ΑΠΘ, κ. Βασίλη Μέλφο για την καθοδήγηση, την αμέριστη βοήθεια και τις υποδείξεις του σε όλη τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στη διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων στα τμήματα Γεωλογίας, Χημείας, Βιολογίας, Πολιτικών Μηχανικών, Φυσικής του ΑΠΘ: Δημήτρη Βογιατζή, Δρ. Γεωλογίας, Γιώργο Ζαφειρόπουλο, Βαγγέλη Παλάτο, μεταπτυχιακοί φοιτητές «Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας», Σταύρο Οικονομίδη, γεωλόγο, Αρίστη Ζαφειράκογλου, φοιτήτρια βιολογικού, Βάσω Παπακώστα, αρχαιολόγο και μεταπτυχιακή φοιτήτρια ΔΠΜΣ, Νικολίνα Παπαζάχου, μεταπτυχιακή φοιτήτρια «Χημείας περιβάλλοντος», Ειρήνη Γούναρη, μεταπτυχιακή φοιτήτρια «Χημικής ανάλυσης και ελέγχου ποιότητας», Δόμνα Μεραχτσάκη, μεταπτυχιακή φοιτήτρια «Χημικής τεχνολογίας», κα. Μαρία Στεφανίδου, Δρ. Γεωλογίας, επίκουρη καθηγήτρια τμήματος πολιτικών μηχανικών, Δρ. Λαμπρινή Παπαδοπούλου και στην κα. Ελένη Παυλίδου αναπληρώτρια καθηγήτρια, για τις σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές της για τη διεκπεραίωση της μελέτης. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν

και στα εργαστήρια της Ανώτατης Εκκλησιαστικής Ακαδημίας Θεσσαλονίκης και ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Γρηγόριο – Τηλέμαχο Σταμκόπουλο, αναπληρωτή καθηγητή Εφαρμογών Πληροφορικής, Πρόεδρο της Ανώτατης Εκκλησιαστικής Ακαδημίας Θεσσαλονίκης και τον Δρ. Ιωάννη Καραπαναγιώτη, αναπληρωτή καθηγητή Χημείας και Συντήρησης της ΑΕΑΘ.

Ευχαριστίες οφείλω, ακόμη στους γονείς μου και στο σύζυγό μου, Νίκο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
ABSTRACT	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΟΝ	15
2.1. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ	15
2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	16
2.3. ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΩΝ ΑΝΑΣΚΑΦΩΝ.....	17
2.4. ΤΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΧΑΙΑ ΙΕΡΑ	20
2.4.1. Το ιερό της Δήμητρας.....	20
2.4.2. Το ιερό του Ασκληπιού	22
2.5. ΛΑΤΡΕΙΑ ΔΗΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΑΣΚΛΗΠΙΟΥ	24
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ-ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑ	28
ΓΕΝΙΚΑ	28
3.1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΙΕΡΙΑΣ.....	28
3.1.1. Γενική γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	28
3.1.2. Παλαιογεωγραφία της περιοχής.....	30
3.1.3. Γεωλογική χρονολόγηση	30
3.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	33
3.2.1. Μορφολογία, υδρογραφία, κλίμα	34
3.2.2. Ο ποταμός Βαφύρας	34
3.3. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ-ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	35
3.3.1. Κλιματικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής.....	35
3.3.2. Κλιματικά στοιχεία νομού Πιερίας.....	35
3.3.3. Βαθμοήμερες θέρμανσης και ψύξης	37
3.3.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	39
4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ	40
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
4.2. Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	40
4.2.1. Μηχανισμοί διάβρωσης.....	41
4.2.1.1. Μηχανικές δράσεις	41
4.2.1.2. Χημικές δράσεις.....	42
4.2.1.3. Ηλεκτροχημικές δράσεις.....	43
4.2.1.4. Βιολογικές δράσεις	44
4.2.1.5. Φυσικοί παράγοντες.....	45
4.2.2. Είδη διάβρωσης	45
5. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ	47
5.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	47
5.2. ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	48
5.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ	50
6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΘΟΡΑΣ	52
6.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	52
6.1.1. Στερεοσκόπιο	52
6.1.2. Οπτική μικροσκοπία.....	53
6.1.3. Πολωτικό μικροσκόπιο.....	53
6.1.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) – Φασματοσκοπία διασπειρόμενης ενέργειας (EDS)	54
6.1.5. Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD).....	55
6.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ	57

6.2.1. Ισοτοπική μελέτη C και O	57
6.3. ΜΕΛΕΤΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	58
6.3.1. Περιεχόμενη υγρασία	58
6.3.2. Πορώδες.....	58
6.3.3. Ξηρό φαινόμενο βάρος - Φαινόμενο βάρος	59
6.3.4. Δοκιμή σημειακής φόρτισης	60
6.3.5. Υπέρηχοι - Ταχύτητα υπερήχων.....	62
6.3.6. Ποροσιμετρία υδραργύρου	64
6.4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ.....	64
6.4.1. Θερμομέτρηση <i>in situ</i> με θερμόμετρο ακτίνας <i>laser</i>	64
6.4.2. Άλλες μέθοδοι.....	65
6.4.3. Βρύα-Λειχήνες	66
Γενικά.....	66
6.4.3.1. Λειχήνες	66
6.4.3.2. Βρύα.....	67
6.4.4. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.....	68
6.5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	70
6.5.1. Μέτρηση της τριχοειδούς υδαταπορρόφησης του λίθου	70
6.5.2. Μέτρηση της διαπερατότητας του λίθου από τους υδρατμούς.....	70
6.5.3. Ρόφηση υγρασίας με πλήρη βύθιση.....	71
6.6. ΙΟΝΤΙΚΗ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	71
6.7. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	72
7. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	76
7.1. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	76
7.1.1. Επιλογή δειγμάτων	76
7.1.2. Σειρές δειγμάτων	77
7.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ-ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	83
7.2.1. Μεθοδολογία της εργαστηριακής έρευνας.....	83
7.2.2. Οργανολογία.....	85
7.2.3. Εκτέλεση πειραμάτων-Προετοιμασία δειγμάτων.....	86
7.2.3.1. Πολωτικό μικροσκόπιο	86
7.2.3.2. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης.....	87
7.2.3.3. Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ.....	87
7.2.3.4. Μέτρηση πορώδους	88
7.2.3.5. Δοκιμή σημειακής φόρτισης.....	88
7.2.3.6. Ταχύτητα υπερήχων.....	89
7.2.3.7. Ιοντική χρωματογραφία.....	89
7.2.3.8. Ξηρό φαινόμενο βάρος.....	90
7.2.3.9. Βρύα και λειχήνες	90
7.2.3.10. Επιστρώσεις προστατευτικών υλικών σε δείγματα.....	90
7.2.3.11. Τριχοειδής υδαταπορρόφηση-Πλήρης βύθιση-Διαπερατότητα υδρατμών.....	92
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	93
8.1. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ	93
8.1.1. Ορυκτολογικός και γεωχημικός χαρακτηρισμός.....	94
8.1.1.1. Αποτελέσματα.....	95
8.1.1.2. Συμπεράσματα.....	123
8.1.2. Προσδιορισμός προέλευσης μαρμάρων με ισοτοπικές αναλύσεις.....	124
8.1.2.1. Αποτελέσματα.....	124
8.1.2.2. Συμπεράσματα.....	125
8.1.3. Περιεχόμενη υγρασία	128
8.1.3.1. Αποτελέσματα.....	128
8.1.3.2. Συμπεράσματα.....	128
8.1.4. Ενεργό πορώδες, πυκνότητα, λόγος κενών	129

8.1.4.1. Αποτελέσματα.....	129
8.1.4.2. Συμπεράσματα.....	129
8.1.5. Ξηρό φαινόμενο βάρος.....	130
8.1.5.1. Αποτελέσματα.....	130
8.1.5.2. Συμπεράσματα.....	130
8.1.6. Δοκιμή σημειακής φόρτισης.....	131
8.1.6.1. Αποτελέσματα.....	131
8.1.6.2. Συμπεράσματα.....	132
8.1.7. Ταχύτητα υπερήχων.....	133
8.1.7.1. Αποτελέσματα.....	133
8.1.7.2. Συμπεράσματα.....	134
8.1.8. Ποροσιμετρία υδραργύρου.....	134
8.1.8.1. Αποτελέσματα.....	134
8.1.8.2. Συμπεράσματα.....	135
8.2. ΣΕΙΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ IN SITU.....	135
8.2.1. Θερμομέτρηση.....	135
8.2.1.1. Αποτελέσματα.....	136
8.2.1.2. Συμπεράσματα.....	140
8.2.2. Ταχύτητα υπερήχων.....	141
8.2.2.1. Αποτελέσματα.....	142
8.2.2.2. Συμπεράσματα.....	143
8.2.3. Βρύα και λειχήνες.....	144
8.2.3.1. Αποτελέσματα.....	144
8.2.3.2. Συμπεράσματα.....	146
8.2.4. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.....	147
8.2.4.1. Αποτελέσματα.....	147
8.2.4.2. Συμπεράσματα.....	148
8.3. ΣΕΙΡΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	148
8.3.1. Τριχοειδής υδατοαπορρόφηση των λίθων.....	148
8.3.1.1. Αποτελέσματα.....	148
8.3.1.2. Συμπεράσματα.....	149
8.3.2. Διαπερατότητα των λίθων από υδρατμούς.....	150
8.3.2.1. Αποτελέσματα.....	150
8.3.2.2. Συμπεράσματα.....	151
8.3.3. Πλήρης βύθιση λίθων σε νερό.....	151
8.3.3.1. Αποτελέσματα.....	151
8.3.3.2. Συμπεράσματα.....	153
8.4. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΔΑΤΩΝ.....	153
8.4.1. Ιοντική χρωματογραφία.....	153
8.4.1.1. Αποτελέσματα.....	154
8.4.1.2. Συμπεράσματα.....	154
8.5. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	155
8.5.1. Κοκκομετρική ανάλυση.....	155
8.5.1.1. Αποτελέσματα.....	155
8.5.1.2. Συμπεράσματα.....	157
9. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	158
9.1. ΣΕΙΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΙΕΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑΣ (DD1-9) ΚΑΙ ΙΕΡΟΥ ΑΣΚΛΗΠΙΟΥ (DA1-4).....	158
9.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ IN SITU.....	164
9.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	167
9.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΔΑΤΩΝ.....	169
9.5. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	169
10. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	171
11. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	173
12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	174

Περίληψη

Στη νότια Μακεδονία, στις ανατολικές παρυφές του Ολύμπου βρίσκεται το Δίον, η ιερή πόλη των αρχαίων Μακεδόνων. Ο οικισμός άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη του 6ου αι. π.Χ. και ως πόλη στη συνέχεια ευημερεί μέχρι και τον 4ο αι. μ. Χ. Έξω από τα τείχη της πόλης βρίσκεται πλήθος ιερών, ανάμεσά τους το ιερό της θεάς Δήμητρας, το αρχαιότερο στη Βόρεια Ελλάδα καθώς και το ιερό του θεού Ασκληπιού. Τα οικοδομήματα των δυο ιερών σώζονται σε χαμηλό ύψος, ως επί το πλείστον οι θεμέλιοι δομικοί λίθοι τους. Από το 1973, με την έναρξη της ανασκαφής τους, οι λίθοι είναι πλέον εκτεθειμένοι στους διαβρωτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες της περιοχής. Το γεγονός αυτό, προκάλεσε αλλαγές στα δομικά υλικά με την πάροδο του χρόνου. Σκοπός της εργασίας είναι ταυτοποιήσει τα είδη των πετρωμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο ιερά και στη συνέχεια να αναγνωρίσει και να καταγράψει τις μορφές διάβρωσης, που εμφανίστηκαν τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο εσωτερικό των οικοδομικών λίθων, ώστε να συμβάλει στην προστασία τους.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε πλήρης ορυκτολογική μελέτη των πετρωμάτων από τα θεμέλια των οικοδομημάτων των ιερών, με τη βοήθεια της οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Στη συνέχεια καταγράφηκαν τα είδη διάβρωσης, που παρατηρούνται στο σύνολο των πετρωμάτων με σημαντικότερα: ανάπτυξη πατίνας, κρούστες διαφόρων χρωματισμών, βιολογικές επικαθίσεις, γυψοποίηση στην επιφάνειά τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο δοκιμαστικές εφαρμογές επικαλυπτικών υλικών, με στόχο την επιλογή του υλικού, που θα επιφέρει τα μέγιστα επιθυμητά αποτελέσματα, όσον αφορά την προστασία των μνημείων.

Από την έρευνα προέκυψε ότι οι κυριότεροι παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών είναι η ύπαρξη νερού στην μάζα των υλικών, λόγω βροχής και τριχοειδούς αναρρίχησης, οι κυκλικές μεταβολές υγρών - ξηρών συνθηκών, που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής, η έντονη παρουσία επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, οι συχνές βροχοπτώσεις, η έντονη βλάστηση και οι μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στις διάφορες εποχές του χρόνου. Οι παράγοντες αυτοί, οδήγησαν σε αποσάθρωση, μερική διάλυση και ανακρυστάλλωση του ανθρακικού υλικού, απώλεια της δομικής συνοχής και της σταθερότητας της επιφάνειας των λίθων.

Η ταυτοποίηση των πετρωμάτων των δομικών υλικών, η εξέταση των παραγόντων διάβρωσης αλλά και ο προσδιορισμός των προϊόντων διάβρωσης αποτελούν την απαρχή για την οργάνωση του σχεδίου συντήρησης. Ευρύτερος στόχος είναι η επιλογή και στη συνέχεια η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων και υλικών για τον καθαρισμό, τη στερέωση και την προστασία των δομικών λίθων των ιερών της Δήμητρας και του Ασκληπιού στο Δίον.

Abstract

In southern Macedonia, on the eastern outskirts of Olympus lies Dion, the sacred city of the ancient Macedonians. The city began to develop from the late 6th century B.C. and prospers until the 4th century AD. The sanctuaries are located outside the city walls, including the Sanctuary of Demeter, the oldest in northern Greece and the sanctuary of Asclepius.

The buildings of two sanctuaries are preserved at low altitudes, mostly the structural foundation of stones. Since 1973, with the beginning of the excavation, started their exposure to environmental factors in the region. This has caused changes in building materials over time. The purpose of this study is to identify and record the forms of erosion that occurred both on the surface and inside the building stone and thus contribute to their protection.

Initially a complete mineralogical study of the rocks, found in both sanctuaries, was held using optical and electron microscopy. Then the types of corrosion kinds and products observed in the various rocks were recorded and significantly the development of patina, crusts of various colors, biological deposits, sulfation on their surface. Pilot projects were subsequently carried out with coating materials for the selection of the material that will produce the maximum desired results as regards to the protection of monuments.

From the combination of laboratory experiments and in situ IR thermometer measurements follow safe results concerning about the deterioration problems of the materials. The surface of the building materials are partially covered by the weathering products of the primary minerals such as secondary calcite and dolomite precipitated from water solutions, and recrystallized calcite and dolomite. Limited presence of crystallized salts on the surface or inside the pores of the materials is observed. Absence of significant amounts of various ions such as chlorides, nitrates or sulphates is observed in the rain and surface waters. The main weathering factor of the materials is the moisture penetration due to capillary action. In sunny conditions, moisture penetrates into the materials only by capillary absorption, while in wet conditions rain water and environmental humidity contribute also to the total moisture absorption. The existence of water in the bulk of the materials due to capillary penetration correlated with an intensive surface and underground water presence in the whole surrounding area lead to loss of the structural cohesion and the surface instability of the building materials.

The study and identification of rock building materials, corrosion factors and products, are the starting point for the organization of the maintenance plan including the selection and therefore the application of appropriate methods and materials for cleaning, fixing and protect the building materials of the sanctuaries of Demeter and Asclepius of Dion archaeological area.

This thesis entitled 'Investigation of corrosion factors of the building stones from the temples of Demeter and Asclepius in the Archaeological Site of Dion' prepared in Geology, Faculty of Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Greece but essentially spread in the following sections: History and Archaeology, Chemistry, Biology, Physics, Civil Engineering and Meteorology because of interdisciplinarity.

1. Εισαγωγή

Το θέμα της διδακτορικής διατριβής είναι η: «Διερεύνηση των αιτιών διάβρωσης των δομικών λίθων από τα ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού στο Δίον».

Η μελέτη θα εστιαστεί στα μνημεία του αρχαιολογικού χώρου του Δίου και ειδικότερα σε εκείνα των ιερών της Δήμητρας και του Ασκληπιού. Τα οικοδομήματα των δυο ιερών σώζονται σε χαμηλό ύψος, ως επί το πλείστον οι θεμέλιοι δομικοί λίθοι τους. Ως δομικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν: πωρόλιθοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι, κεραμικές πλίνθοι και μάρμαρα. Από την προκαταρκτική μακροσκοπική εξέταση, προέκυψε ότι εμφανίζουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και αποσάθρωσης (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 Φωτογραφίες από τα ιερά (από προσωπικό αρχείο συγγραφέως)

Οι κυριότεροι παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών είναι: η ύπαρξη νερού στη μάζα των υλικών λόγω βροχής και τριχοειδούς αναρρίχησης, οι κυκλικές μεταβολές υγρών - ξηρών συνθηκών, που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής, η έντονη παρουσία επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, οι συχνές βροχοπτώσεις, η έντονη βλάστηση και οι μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στις διάφορες εποχές του χρόνου. Οι παράγοντες αυτοί οδήγησαν σε αποσάθρωση, μερική διάλυση και ανακρυστάλλωση του ανθρακικού υλικού, απώλεια της δομικής συνοχής και της σταθερότητας της επιφάνειας των λίθων.

Σκοπός της διατριβής είναι η μελέτη των δομικών υλικών στα ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού και αναλυτικότερα η ταυτοποίηση των πετρωμάτων και ο προσδιορισμός των παραγόντων διάβρωσης των δομικών λίθων. Η μελέτη αυτή αποτελεί απαραίτητο τμήμα της συνολικής μελέτης συντήρησης των μνημείων και τα αποτελέσματά της θα συμβάλλουν

ουσιαστικά στην επεξεργασία, επιλογή και εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων, μεθόδων και υλικών για την διαφύλαξη των μνημείων από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, στους οποίους είναι εκτεθειμένα.

Τα οικοδομήματα των ιερών σώζονται σε χαμηλό ύψος, λίγο πάνω από τα θεμέλιά τους. Η λιθοδομή αποτελείται κυρίως από μικρούς αργούς λίθους και επιμέρους από λιθόπλινθους και κεραμικές πλίνθους (Εικόνα 1.2). Η ανασκαφή των εξεταζόμενων ιερών ξεκίνησε το 1973 και είχε αδιάλειπτη διάρκεια έως το 2005. Τμηματικά, τα σωζόμενα τμήματα εκτέθηκαν σε νέες περιβαλλοντικές συνθήκες διάβρωσης, ανάλογες με το μικροκλίμα της περιοχής. Αυτό είχε ως συνέπεια τη διάβρωση των υλικών. Οι διάφοροι παράγοντες οδήγησαν στην απώλεια της δομικής συνοχής και της επιφανειακής σταθερότητας των υλικών, την εμφάνιση φαινομένων αποσάθρωσης και τη δημιουργία προϊόντων διάβρωσης στις επιφάνειες των υλικών (κρούστες διαφόρων χρωματισμών, βιολογικές επικαθίσεις, γυψοποίηση).



*Εικόνα 1.2 Ιερό Δήμητρας και ιερό Ασκληπιού
(από φωτογραφικό αρχείο ανασκαφής Δίου)*

Ως γνωστόν, η ανασκαφική διαδικασία οδηγεί στην αποκάλυψη των αρχαιολογικών μνημείων με αποτέλεσμα να εκτίθενται σε νέες περιβαλλοντικές συνθήκες, που είναι λιγότερο ή περισσότερο διαβρωτικές. Το υλικό των θαμμένων μνημείων έρχεται σε ισορροπία με το χώμα και τις ιδιότητές του. Η νέα τάση επιβάλλει πριν την ανασκαφή, σωστή διαχείριση και σχεδιασμό των εργασιών, που επιβάλλονται με στόχο την περαιτέρω διαφύλαξη των μνημείων από τους διαβρωτικούς παράγοντες. Ειδάλλως, είναι προτιμητέο να παραμένουν θαμμένα κι εναρμονισμένα στο περιβάλλον, που τα φιλοξενεί εδώ και αιώνες. Ωστόσο, τι γίνεται με τα μνημεία που έχουν έρθει ήδη στο φως; Πρωταρχικός στόχος είναι η διαφύλαξή τους και αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τις διαδικασίες της συντήρησης. Η διαδικασία αυτή είναι σύνθετη και προϋποθέτει την ύπαρξη και τη συνεργασία πολλών ειδικοτήτων (αρχαιολόγων, συντηρητών, γεωλόγων, βιολόγων, χημικών), ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ένας αποτρεπτικός παράγοντας είναι το οικονομικό κόστος μιας τέτοιας εργασίας.

Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει διαδικασίες, που έχουν σκοπό τη διατήρηση του μνημείου, συνήθως χωρίς κάποια άμεση επέμβαση στο υλικό του. Δηλαδή:

- τον περιβαλλοντικό έλεγχο,
- τις συμβουλές για τη σωστή μεταχείριση αντικειμένων ή μνημείων,
- την ανάπτυξη μεθόδων συσκευασίας και μεταφοράς για τα κινητά αντικείμενα,
- την επιμέλεια της έκθεσης, τρόπους ανάρτησης κ.τ.λ.,
- τους τρόπους φύλαξης των κινητών μνημείων,
- τη σύνταξη πρωτοκόλλου για επείγουσες καταστάσεις όπως πλημμύρες, φωτιά κ.τ.λ.

Για την επίτευξη του στόχου είναι απαραίτητη η συμβολή των θετικών επιστημών μέσα από διάφορες μεθόδους όπως: μικροσκοπία, περίθλαση ακτίνων X (με την οποία γίνεται η ταυτοποίηση του υλικού), ανάλυση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, χρήση υπερήχων μέσα από μετρήσεις *in situ* αλλά και εργαστηριακές, κατόπιν δειγματοληψίας.

2. Ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία για το Δίον

2.1. Τοπογραφία

Στις ανατολικές υπώρειες του Ολύμπου, εκεί όπου η Θεσσαλία ενώνεται με τη Μακεδονία, βρίσκεται το Δίον, η αρχαία πόλη, που ήταν αφιερωμένη στον Ολύμπιο Δία, τον πατέρα των θεών (Εικόνα 2.1). Τραγουδώντας ο Ησίοδος γύρω στο 700 π.Χ. τον έρωτα του Δία για τη Θυία, την κόρη του προπάτορα των Ελλήνων, Δευκαλίωνα, αναφέρει ότι γέννησε δυο παιδιά, τον Μάγνητα και τον Μακεδόνα, που έζησαν στην Πιερία γύρω από τον Όλυμπο (Παντερμαλής, 1999, σ. 9).



Εικόνα 2.1. Χαλκογραφία A. Ortelius (1590), όπου απεικονίζονται τα Τέμπε και ο Όλυμπος

Η απόσταση της πόλης από τη θάλασσα στην ελληνιστική εποχή ήταν μόλις επτά στάδια¹, ενάμισι χιλιόμετρο περίπου, σήμερα όμως, λόγω των προσχώσεων, είναι αρκετά μεγαλύτερη. Την πόλη όριζε ανατολικά ο πλωτός ποταμός Βαφύρας² και δυτικά είχε τον έλεγχο της εισόδου από τη Θεσσαλία προς τη Μακεδονία. Οι πλημμύρες του ποταμού οδήγησαν στον 3ο αι. μ.Χ στη μετατόπιση προς τα δυτικά του ανατολικού τείχους της πόλης (Στεφανίδου-Τιβεριίου, 1998, σ.21).

¹ Στράβων Γεωγραφικά VII, C. Τη θέση της ακτής σε σχέση με την αρχαία πόλη κατά την αρχαιότητα μαρτυρούν και αρχαίες πηγές. Στο Στράβωνα (Στράβων Γεωγραφικά VII, C 330, απ. 17) διαβάζουμε χαρακτηριστικά : «Δίον ή πόλις ούκ έν τῷ αίγιαλῷ τοῦ Θερμαίου κόλπου έστιν έν ταῖς ὑπωρείαις τοῦ Όλύμπου, ἀλλ' ὅσον έπτά ἀπέχει σταδίους».

² Αθήναιος VII 326d.: «έν Δίω τῷ Πιερικῷ παρά χεῦμα Βαφύρα».

2.2. Ιστορικά στοιχεία

Στην αρχαιότητα το Δίον υπήρξε η ιερή πόλη των Μακεδόνων. Αυτό μαρτυρεί και το πλήθος των ιερών, που ανακαλύφθηκαν στον αρχαιολογικό χώρο. Ο οικισμός φαίνεται ότι άρχισε να αναπτύσσεται από τα τέλη του 6ου αι. π.Χ., δίπλα στα ήδη υπάρχοντα ιερά (Εικόνα 2.2) του Ολυμπίου Διός και της Δήμητρας.



Εικόνα 2.2. Αναπαράσταση των ιερών και της πόλης του Δίου (Εφορία Αρχαιοτήτων Πιερίας)

Για την ύπαρξη του Δίου τον 5ο αι. π.Χ. πρώτος μας πληροφορεί ο Θουκυδίδης³, αν και ελάχιστα είναι μέχρι στιγμής τα οικοδομικά λείψανα, που θα μπορούσαν να συσχετιστούν με την πόλη των κλασικών χρόνων (Παντερμαλής,1999,σ.61-62). Σύμφωνα με τους αρχαίους συγγραφείς ο βασιλιάς Αρχέλαος (τέλη 5ου αι. π. Χ.) οργάνωσε στο Δίον, προς τιμή του Ολυμπίου Διός και των Μουσών, αθλητικούς και θεατρικούς αγώνες, διάρκειας εννέα ημερών, τα «Όλύμπια τα ἐν Δίῳ»⁴.

Η πόλη φαίνεται ότι απέκτησε την πρώτη μνημειακή της μορφή τον 4ο αι. π. Χ. Ο βασιλιάς Φίλιππος Β΄ και ο γιος του Αλέξανδρος Γ΄, μετά τις νίκες τους θυσίαζαν στο Δίον προς τιμή του

³ Ο Θουκυδίδης (IV 78,6) αναφέρει για πρώτη φορά το όνομα της πόλης στην περιγραφή της πορείας του Σπαρτιάτη στρατηγού Βρασιδα από τη Θεσσαλία στη Μακεδονία ως τον πρώτο σταθμό μετά το πέρασμα των συνόρων το καλοκαίρι του 424 π. Χ. «οἱ δὲ Περραιβοὶ αὐτόν, ὑπήκοοι ὄντες Θεσσαλῶν, κατέστησαν ἐς Δίον τῆς Περδίκκου ἀρχῆς, ὃ ὑπὸ τῷ Ὀλύμπῳ Μακεδονίας πρὸς Θεσσαλοῦς πόλισμα κεῖται.»

⁴ Διόδωρος Σικελιώτης XVII.16.3-4 [3] διδάξας οὖν αὐτοὺς περὶ τοῦ συμφέροντος καὶ παρορμήσας διὰ τῶν λόγων πρὸς τοὺς ἀγῶνας θυσίας μεγαλοπρεπεῖς τοῖς θεοῖς συνετέλεσεν ἐν Δίῳ τῆς Μακεδονίας καὶ σκηνικοὺς ἀγῶνας Διὶ καὶ Μούσαις, οὓς Ἀρχέλαος ὁ προβασιλεύσας πρῶτος κατέδειξε. [4] τὴν δὲ πανήγυριν ἐφ' ἡμέρας ἐννέα συνετέλεσεν, ἐκάστη τῶν Μουσῶν ἐπώνυμον ἡμέραν ἀναδείξας. σκηνὴν δὲ κατασκευασάμενος ἑκατοντάκλινον τοὺς τε φίλους καὶ τοὺς ἡγεμόνας, ἔτι δὲ τοὺς ἀπὸ τῶν πόλεων πρέσβεις παρέλαβεν ἐπὶ τὴν εὐωχίαν. λαμπραῖς δὲ παρασκευαῖς χρῆσάμενος καὶ πολλοὺς μὲν ἐστιάσας, πάσῃ δὲ τῇ δυνάμει διαδοὺς ἱερεῖα καὶ τᾶλλα τὰ πρὸς τὴν εὐωχίαν ἀνήκοντα προσανέλαβε τὸ στρατόπεδον.» καὶ Ἀρριανὸς Ἀνάβασις I.11.1 «Ταῦτα δὲ διαπραξάμενος ἐπανῆλθεν εἰς Μακεδονίαν. καὶ τῷ τε Διὶ τῷ Ὀλύμπῳ τὴν θυσίαν τὴν ἀπ' Ἀρχελάου ἔτι καθεστῶσαν ἔθυσσε καὶ τὸν ἀγῶνα ἐν Αἰγαῖς διέθηκε τὰ Ὀλύμπια. οἱ δὲ καὶ ταῖς Μούσαις λέγουσιν ὅτι ἀγῶνα ἐποίησε.»

Δία και των Μουσών⁵. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Φιλίππου Ε΄, οι Αιτωλείς εισέβαλαν στην ιερή πόλη των Μακεδόνων και ο στρατηγός Σκόπας κατέστρεψε τα τείχη της πόλης, το γυμνάσιο και πολλές οικίες και έκαψε το ιερό του Ολυμπίου Διός⁶. Μετά την καταστροφή της από τον Σκόπα ανασυγκροτήθηκε και βρήκε την αρχική της αίγλη, αλλά το 169 π.Χ. καταλήφθηκε από τους Ρωμαίους, υπό τον ύπατο Μ. Φίλιππο. Ίσως, η πρώτη εγκατάσταση αποίκων (coloni) να συντελέστηκε το 43 π. Χ. και να οφείλεται σε ενέργειες του Βρούτου, είναι όμως βέβαιο, ότι η μαζική μεταφορά Ρωμαίων στην πόλη και η ίδρυση της ρωμαϊκής αποικίας (colonia) είναι έργο του Αυγούστου, αμέσως μετά τη νίκη του στη ναυμαχία του Ακτίου (31 π.Χ.)⁷. Μια νέα περίοδος ευημερίας και ανάπτυξης, η οποία αποτυπώνεται στα οικοδομήματα, ξεκίνησε την περίοδο εκείνη και κορυφώθηκε τον 2ο και στο πρώτο μισό του 3ου αι μ.Χ.

Κατά τα παλαιοχριστιανικά χρόνια η πόλη συρρικνώνεται και το κεντρικό της τμήμα καταλαμβάνει η επισκοπική βασιλική του τέλους του 4ου αι. μ.Χ., στη θέση της οποίας μετά από λίγες δεκαετίες οικοδομήθηκε μια νέα βασιλική, λίγο μεγαλύτερη (Παντερμαλής,1999,σ.252). Μετά την εισβολή των Οστρογότθων το Δίον δε θα μπορέσει να ανακάμψει. Οι πλημμύρες του ποταμού Βαφύρα και οι σεισμοί οδηγούν στην εγκατάλειψη της πόλης κατά τον 5ο αι. μ.Χ. Οι κάτοικοί της μετοίκησαν σε ασφαλέστερες περιοχές (Παντερμαλής,1999, σ.11).

2.3. Το χρονικό των ανασκαφών

Στις 21 Δεκεμβρίου του 1806 ο W.M. Leake, Άγγλος αξιωματικός και περιηγητής, ξεκινά από το Λιτόχωρο και φθάνει στο χωριό Μαλαθριά της Πιερίας, τσιφλίκι του Βελή πασά. Κοντά στις πηγές και τα νερά του ποταμού, ο Leake σημειώνει, ότι αναγνώρισε ένα στάδιο, ένα θέατρο και τα θεμέλια ενός μεγάλου κτιρίου, τα τείχη της πόλης και ένα τύμβο (Παντερμαλής,1986,σ.6-7). Στα μέσα του ίδιου αιώνα ο Γάλλος αρχαιολόγος L. Heuzey επισκέφτηκε δύο φορές το Δίον, το 1855 και το 1861, με σκοπό να δημοσιεύσει τα επιγραφικά μνημεία της αρχαίας πόλης (Heuzey, 1876, σ.267-272).

Η ανασκαφική έρευνα στο Δίον ξεκίνησε το 1928 από τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Γ. Σωτηριάδη, και σταμάτησε το 1931. Έπειτα από διακοπή 30 χρόνων, η έρευνα στο χώρο συνεχίστηκε από τον καθηγητή αρχαιολογίας του Α.Π.Θ., Γ. Μπακαλάκη. Η τρίτη ανασκαφική περίοδος εγκαινιάστηκε το 1973 από τον καθηγητή αρχαιολογίας Δ. Παντερμαλή και

⁵ Δίων Χρυσόστομος 1,313 και Διόδωρος Σικελιώτης XVI 16.3-4

⁶ Πολύβιος IV.62 «τότε δ' ούν από στρατείας ήκοντες εν Δίω τῆς Πιερίας ἔθνον ταις Μούσαις και τόν ἀγώνα τών Ὀλυμπίων ἐτίθεισαν...».

⁷ Πλίνιος IV,10 «...coloniae Bullidenses et Dienses...». 35 mox in ora Ichnae, fluvius Axios. ad hunc finem Dardani, Treres, Pieres Macedoniae accolunt. ab hoc amne Paeoniae gentes Paraxiaei, Eordenses, Almopi, Pelagones, Mygdones. montes Rhodope, Scopus, Orbelus. dein praeiacente gremio terrarum Arethusii, Antiochienses, Idomenenses, Doberi, Aestrienses, Allantenses, Audaristenses, Morylli, Garresci, Lyncestae, Othryonei et liberi Amantini atque Orestae, coloniae Bullidenses et Dienses, Xylopolitae, Scotusaei liberi, Heraclea Sintica, Tymphaei, Toronaei.

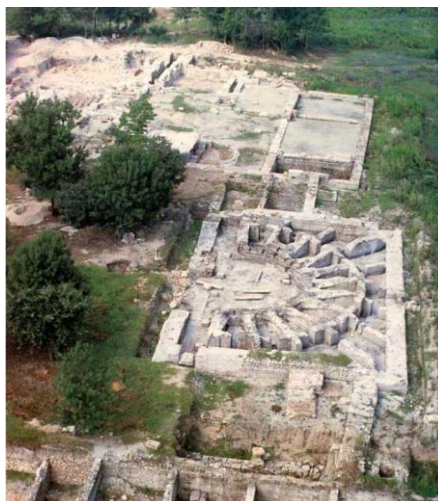
το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Οι ανασκαφές συνεχίζονται έως σήμερα (Παντερμαλής, 1999, σ.12-14).

Τα έως σήμερα ανασκαφικά ευρήματα φυσικό είναι να ανάγονται στην πλειονότητά τους στους ρωμαϊκούς και στους μεταγενέστερους βυζαντινούς χρόνους. Η συνεχής κατοίκηση του χώρου εξαφάνισε τα κατάλοιπα αρχαιότερων περιόδων, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις. Η σημερινή εικόνα του αρχαιολογικού χώρου ανταποκρίνεται κυρίως στη ρωμαϊκή περίοδο της πόλης.

Μέχρι σήμερα οι ανασκαφές έχουν αποκαλύψει το σύνολο του οχυρωματικού περιβόλου (Στεφανίδου-Τιβερίου, 1998, σ.21) της πόλης, επιβεβαιώνοντας την αρχική διαπίστωση του Heuzey (Heuzey, 1876, σ.267-272) για το τετράγωνο σχεδόν σχήμα του. Ανατολικά του ανατολικού συνόρου υπήρχε ο ποταμός και αξίζει να αναφέρουμε τα σημαντικά οικοδομικά λείψανα εντός και εκτός τειχών, δημόσια και ιδιωτικά. Χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα φροντισμένο ρυμοτομικό σύστημα με κάθετα τεμνόμενους κύριους και δευτερεύοντες δρόμους και με τις κύριες οδικές αρτηρίες (Εικόνα 2.3) να αντιστοιχούν στις πύλες του περιβόλου.



Εικόνα 2.3. Ο κεντρικός δρόμος της πόλης (από προσωπικό αρχείο συγγραφέως)



Εικόνα 2.4. Αεροφωτογραφία των μεγάλων θερμών από Ανατολικά (από περιοδικό Αρχαιολογία, τεύχος 33)

Ο οχυρωματικός περίβολος της πόλης περιελάμβανε συγκροτήματα θερμών (Εικόνα 2.4), κτίρια της αγοράς, βεσπασιανές, εργαστήρια, καταστήματα, αποθήκες και ιδιωτικές οικίες με πολύπλοκες κατόψεις. Όλα ήταν ενταγμένα αυστηρά στις οικοδομικές νησίδες, ενώ κοινό στοιχείο αποτελεί η άριστη κατασκευή και η πολυτέλεια στη διακόσμηση⁸. Έξω από το νότιο τείχος υπήρχαν τα ιερά, το ελληνιστικό (Εικόνα 2.5) και ρωμαϊκό θέατρο και το στάδιο, τα οποία καταλάμβαναν στο σύνολό τους χώρο, όσο περίπου και η πόλη (Καραδέδος, 1986,σ.325).



Εικόνα 2.5. Το ελληνιστικό θέατρο(από προσωπικό αρχείο συγγραφέως)

Νότια της πόλης βρίσκονται τα ιερά, με κυριότερο το τέμενος του Ολυμπίου Διός, το οποίο αποτέλεσε και την απαρχή για την ανάπτυξη και των υπολοίπων στον ευρύτερο χώρο. Το ιερό τέμενος του Διός, καθώς είναι το αρχαιότερο του Δίου, πρέπει να έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των ιερών σε αυτή την περιοχή. Η ύπαρξη των ιερών της Δήμητρας και του Ασκληπιού είναι αναμενόμενη, όπως και σε κάθε οικισμό, γιατί υπό την προστασία τους τίθεται η επιβίωση του οικισμού και των κατοίκων του. Ακολούθησαν χρονολογικά το ιερό της Ίσιδας (Εικόνα 2.6) και το ιερό του Διός Υψίστου (Εικόνα 2.7).

⁸ Λίβιος XLIV, 7, 8 18 Ο Τίτος Λίβιος μας πληροφορεί ότι ο ύπατος Μ. Φίλιππος όταν έφτασε εκεί με το στρατό του σεβάστηκε το ιερό του Διός και θαύμασε την οχύρωση, τα δημόσια κτίρια και τα πολυάριθμα αγάλματα, που κοσμούσαν την πόλη: «Simul enim cecit possession Dii, excitavit hostem...».



Εικόνα 2.6. Άποψη του ιερού της Ίσιδας



Εικόνα 2.7. Άποψη του ιερού Υψίστου Διός

2.4. Τα υπό μελέτη αρχαία ιερά

2.4.1. Το ιερό της Δήμητρας

Το ιερό της Δήμητρας βρίσκεται νότια της πόλης και έξω από τα τείχη, όπου και εκτείνονται και τα υπόλοιπα ιερά (Εικόνες 2.8-2.9). Στην περιοχή πραγματοποιήθηκε ανασκαφή για πρώτη φορά το 1930 (Σωτηριάδης, 1931, σ. 46). Ωστόσο, η συστηματική ανασκαφή ξεκίνησε το 1973 και συνεχίστηκε έως το 2003. Η έρευνα έφερε στο φως ποικίλα οικοδομήματα: ναούς, βωμούς, στοές, βοηθητικά κτίσματα (Εικόνα 2.8) καθώς και πλήθος κινητών ευρημάτων, κατά κύριο λόγο αφιερωμάτων. Τα ευρήματα χρονολογούνται από της αρχές του 5ου αι. π.Χ. ως τα τέλη του 4ου αι. μ.Χ. (Πινγκιάτογλου, 2015, σ.18). Αποτελεί το αρχαιότερο ιερό της θεάς Δήμητρας στη Βόρεια Ελλάδα.



Εικόνα 2.8 Αεροφωτογραφία του ιερού της Δήμητρας (περιοδικό Αρχαιολογία)



Εικόνα 2.9. Αποψη του ιερού της Δήμητρας (google earth)

Αποκαλύφθηκαν δύο πρώιμοι κλασικοί ναοί στον τύπο του μεγάρου, διθάλαμοι με προθάλαμο και σηκό, οι δύο ελληνιστικοί διάδοχοί τους ναοί (Παντερμαλής, 1977, σ.335), καθώς και οι ναοί των αυτοκρατορικών χρόνων μετατοπισμένοι προς τα βόρεια αλλά με τον ίδιο προσανατολισμό και την είσοδο στην ανατολή. Τα θεμέλια των ελληνιστικών ναών ήταν από λιθόπλινθους, πάνω στους οποίους πατούσε ο τοιχοβάτης με διπλή υποτομή και στη συνέχεια μια σειρά ορθοστατών (Παντερμαλής, 1986, σ.6-7). Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι ναοί αποτελούσαν τον πυρήνα του ιερού και πλαισιώνονταν από μονοθάλαμους λατρευτικούς «οίκους» των

ελληνιστικών χρόνων. Η κάτοψή τους είναι απλή: η θύρα βρίσκεται ανατολικά και στο κέντρο του χώρου υπήρχε η λίθινη ιερή τράπεζα και ακριβώς πίσω της, το βάθρο για την λατρευτική εικόνα. Ανατολικά των ναών συναντούμε τους κτιστούς βωμούς, οι οποίοι ποικίλουν ως προς το σχήμα και τη χρονολόγηση, αντίστοιχα με τους ναούς (Πινγιάτογλου, 2015, σ.21).



Εικόνα 2.10 Κεφαλή θεάς Δήμητρας (περιοδικό Αρχαιολογία)

Μέσα στην επίχωση του νότιου ελληνιστικού ναού βρέθηκε καλυμμένη με ιμάτιο κεφαλή μαρμάρινου αγάλματος μιας γυναικείας μορφής (Εικόνα 2.10). Τυπολογικά είναι φανερό ότι πρόκειται για κεφαλή της θεάς Δήμητρας, που χρονολογικά ανήκει στο τέλος του 4ου αι. π.Χ. (Παντερμαλής, 1999 και Πινγιάτογλου 2015, σ.51).

Πράγματι, άλλα ευρήματα, όπως κέρνοι (αγγεία τυπικά για τη λατρεία της θεάς), ένα πήλινο ομοίωμα χοιριδίου (χοιρίδια θυσίαζαν συνήθως στα Θεσμοφόρια, γιορτή προς τιμήν της Δήμητρας) και τέλος μια αποσπασματικά σωζόμενη μελαμβαφής κύλικα-σκύφος, με αναθηματική επιγραφή για τη Δήμητρα, χαραγμένη σε οριζόντια μελανή ταινία πάνω από τη βάση: Υ Χ Α Δ Η Μ Η Τ Ρ Ι (Πινγιάτογλου, 2015, σ.93), επιβεβαίωσαν την ταύτιση της λατρείας. Εντοπίστηκαν ωστόσο, και άλλα ευρήματα και επιγραφές, που πιστοποιούν τη συλλατρεία και άλλων θεοτήτων, όπως της Αφροδίτης, της Βαυβούς και της Κουροτρόφου.

Το ιερό τέμενος, καθώς είναι το αρχαιότερο του Δίου μαζί με του Ολυμπίου Διός, πρέπει να έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των ιερών σε αυτή την περιοχή.

2.4.2. Το ιερό του Ασκληπιού

Το ιερό του Ασκληπιού (Εικόνα 2.11) εντοπίστηκε νότια του ιερού της Δήμητρας και περιλάμβανε ένα ναό, μια πηγή και μια μακρά στοά, στην οποία ανήκαν μια βεσπασιανή και άλλοι βοηθητικοί χώροι (Πινγιάτογλου, 2008, σ.576). Ιδρύθηκε στα τέλη του 4ου ή τις αρχές του 3ου αι. π.Χ. και λειτούργησε με βεβαιότητα ως τον 3ο αι. μ.Χ. (Πινγιάτογλου, 2009, σ.285-286). Δυστυχώς όμως, η κατάσταση διατήρησης των οικοδομικών λειψάνων είναι πολύ αποσπασματική.



Εικόνα 2.11 Αεροφωτογραφία του ιερού του Ασκληπιού (φωτογραφικό αρχείο ανασκαφής Δίου)

Στα ελληνιστικά χρόνια κατασκευάστηκε ο ναός, από μεγάλους επεξεργασμένους λίθους, με προσανατολισμό Β-Ν (Εικόνα 2.12), ο οποίος αρχικά είχε τη μορφή ενός μονόχωρου ιερού οίκου διαστάσεων 10.60μ x 7.80μ (Παντερμαλής, 1999, σ.85). Σε μεταγενέστερη φάση με την παρεμβολή ενός τοίχου από μικρούς αργούς λίθους, διαιρέθηκε σε δύο ανισομεγέθεις χώρους, σε ένα βραχύ προθάλαμο στα βόρεια και ένα σχετικά ευρύχωρο κυρίως ναό. Στην ίδια χρονική περίοδο πρέπει να ανήκουν και τα ερείπια ενός κτηρίου, που εντοπίστηκαν στα ανατολικά και βόρεια του ναού, κάτω από το επίπεδο θεμελίωσης ενός κτηρίου των αυτοκρατορικών χρόνων (Πινγιάτογλου, 2008, σ.577). Πρόκειται για δύο τοίχους κατασκευασμένους από καλά αρμοσμένους αργούς λίθους με λάσπη. Ο ένας έχει κατεύθυνση Β-Ν και σώζεται σε συνολικό μήκος 17μ. ενώ το πλάτος του είναι 0.60μ.



Εικόνα 2.12. Αεροφωτογραφία του κυρίως ναού του Ασκληπιού



*Εικόνα 2.13. Ενεπίγραφος σπόνδυλος κίονα στο ιερό του Ασκληπιού
(προσωπικό αρχείο συγγραφέως)*

Από τον χώρο του ιερού προέρχεται και ένας σπόνδυλος κίονα (Εικόνα 2.13) σε δεύτερη χρήση, ο οποίος τοποθετήθηκε δίπλα στο δρόμο, που οδηγεί στο ιερό του Ολυμπίου Διός⁹. Φέρει αναθηματική επιγραφή, όπου διαβάζουμε: ΑΣΚΛΗΠΙΩ ΣΩΤΗΡΙ (Πινιάτογλου, 2005, σ. 430). Πιθανόν πρόκειται για τον σπόνδυλο ενός κίονα, που επαναχρησιμοποιήθηκε ως βάση αναθήματος, όπως προκύπτει από έναν ορθογώνιο λαξευμένο τόρμο, που διατηρείται στην άνω επιφάνειά του.

Το κατεξοχήν εύρημα, που συνέβαλε καθοριστικά στην ταύτιση των αρχιτεκτονικών καταλοίπων με το ιερό του Ασκληπιού, ήταν τα θραύσματα μιας βάσης από γκριζωπό μάρμαρο διακοσμημένης με κυμάτιο (αρ.κατ.14). Στην άνω επιφάνειά της φέρει τόρμο για την ένθεση αγάλματος, ενώ στο μέτωπό της σώζονται αποσπασματικά σε δύο στίχους τα γράμματα: ΑΣΚ/ΚΑΙ. Με βάση το σχήμα των γραμμάτων η επιγραφή χρονολογείται στο δεύτερο μισό του 4^{ου} αι.π.Χ. ή το αργότερο στις αρχές του 3^{ου} αι.π.Χ. και πολύ εύκολα μπορεί να συμπληρωθεί ως ΑΣΚ[ΛΗΠΙΩΙ] ΚΑΙ [ΥΓΕΙΑ], γεγονός που σε συνδυασμό με τα παραπάνω ευρήματα αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για την ταύτιση του χώρου με το ιερό του θεραπευτή θεού (Βουτυράς, 1993, σ. 254).

2.5. Λατρεία Δήμητρας και Ασκληπιού

Η λατρεία της Δήμητρας (Εικόνα 2.14) είναι αρχέγονη και η επιλογή του χώρου για την εγκατάσταση της θεότητας δεν ήταν τυχαία. Η παρουσία υπόγειων υδάτων, που αναβλύζουν άφθονα ιδιαίτερα στα νότια της πόλης και ο ποταμός Βαφύρας, που έρεε δίπλα της, συνιστούν την αφορμή για την ίδρυση της λατρείας θεοτήτων, που είχαν άμεση σχέση με το υγρό στοιχείο (Cole, 1988, σ. 164). Το νερό αποτελούσε βασικό συστατικό του περιεχομένου της λατρείας, όπως

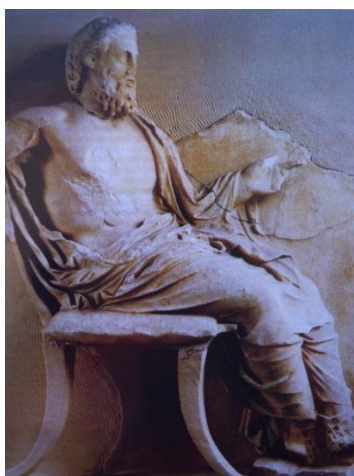
⁹ Η θέση του μνημείου στο χώρο είναι παραπλανητική καθώς δεν βρέθηκε στη συγκεκριμένη θέση, όπου στήθηκε αλλά στον ευρύτερο χώρο του ιερού. (αρ.κατ.14).

μαρτυρούν το πλήθος των ειδωλίων υδριαφόρων και οι μικρές αναθηματικές υδρίες (Πινγκιάτογλου, 2015,σ.91). Συνεπώς, η ύπαρξη των ιερών της Δήμητρας και του Ασκληπιού είναι αναμενόμενη στο χώρο.



Εικόνα 2.14. Η θεά Δήμητρα (Εσωτερικό κύλικας, γύρω στο 450 π.Χ., Βρυξέλλες, Bibliothèque Royale)

Η σύνδεση της λατρείας των δύο θεών σε άλλες περιοχές μαρτυρείται, τόσο από γραπτές μαρτυρίες όσο και από αρχαιολογικά δεδομένα (Πινγκιάτογλου, 2009,σ.290). Σύμφωνα με τις γραπτές μαρτυρίες ο Ασκληπιός (Εικόνα 2.15) φιλοξενήθηκε στο Ελευσίνιο των Αθηνών, όταν εισήχθη η λατρεία του, το 420 π.Χ. στο άστυ από το λιμάνι της Ζέας στον Πειραιά, κατά τη γιορτή των Μεγάλων Μυστηρίων (Clinton, 1994, σ. 17-34). Επίσης, το λεγόμενο ανάγλυφο των ιατρών από το αθηναϊκό Ασκληπιείο, στη νότια πλαγιά της Ακρόπολης συνδέει και εικονογραφικά τον θεραπευτή θεό με τις δύο ελευσινιακές θεές (Δήμητρα και Περσεφόνη). Από το Ασκληπιείο μπορεί να προέρχεται και θραύσμα αναγλύφου, που βρέθηκε στο διονυσιακό θέατρο και εικονίζει τις δύο θεές, καθώς και ένα άλλο ανάγλυφο στο Μουσείο της Ακρόπολης (αρ. 4726), που εικονίζει τον Ασκληπιό μαζί με τις ελευσινιακές θεότητες, ενώ είναι παρούσα και η Αθηνά (Lawton, 1999, σ.234). Τέλος, στην Επίδαυρο μέσα στο ιερό του Ασκληπιού μαρτυρείται επιγραφικά και λατρεία της Δήμητρας Καρποφόρου (Λαμπρινουδάκης et al., 2012).



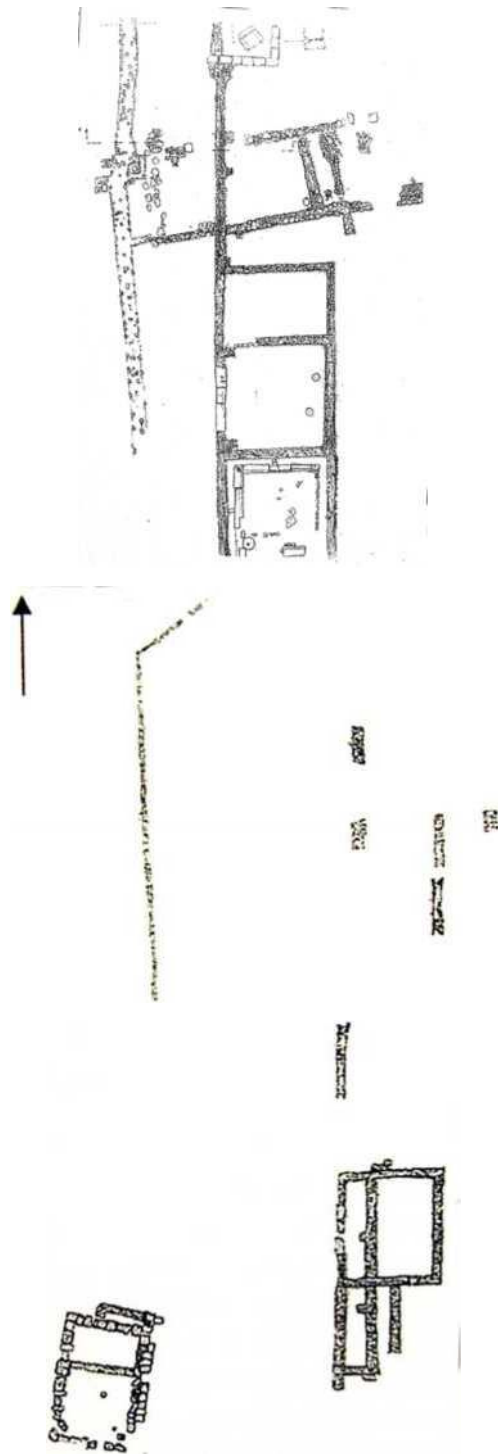
Εικόνα 2.15. Ο θεός Ασκληπιός (Ανάγλυφο από Επίδαυρο, γύρω στο 360 π.Χ., Αθήνα, Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο)

Το ιερό της Δήμητρας στο Δίον γειτνιάζει με το ιερό του Ασκληπιού (Εικόνα 2.16). Η σύνδεση αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία. Παρόμοιες περιπτώσεις, στις οποίες τα δύο ιερά βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, συναντούμε, όπως μας αναφέρει ο Πausanías, στην Αχαΐα¹⁰, στην Ακρόπολη του Φλιούντα¹¹ και στην Ακρόπολη των Μεγάρων¹². Στην περίπτωση του Δίου μάλιστα, όπως προκύπτει από τα ανασκαφικά δεδομένα, κάποια χρονική στιγμή το πρώτο ιερό εισχώρησε στις εκτάσεις του δεύτερου και χρησιμοποίησε τους χώρους του. Όσον αφορά στον βορειοελλαδικό χώρο, εκτός από το Δίον μαρτυρείται λατρεία τόσο της Δήμητρας, όσο και του Ασκληπιού στη Θεσσαλονίκη, τη Βέροια, τα Καλίνδοια, την Αμφίπολη, αλλά το γεγονός ότι τα ευρήματα, και κυρίως οι επιγραφές, δε βρέθηκαν *in situ* μας στερεί τη δυνατότητα να γνωρίζουμε τη χωροταξική σχέση των ιερών των δύο θεών στους παραπάνω τόπους (Πινγιάτογλου, 2005,σ.427).

¹⁰ Πausanías 2, 27, 9-12.

¹¹ Πausanías 2, 13, 5.

¹² Πausanías 1, 40, 6.



Εικόνα 2.16. Κάτοψη του ιερού του Ασκληπιού, όπου βόρεια εισχωρεί στο ιερό της Δήμητρας

3. Γεωλογία-Μετεωρολογία-Εδαφολογία

Γενικά

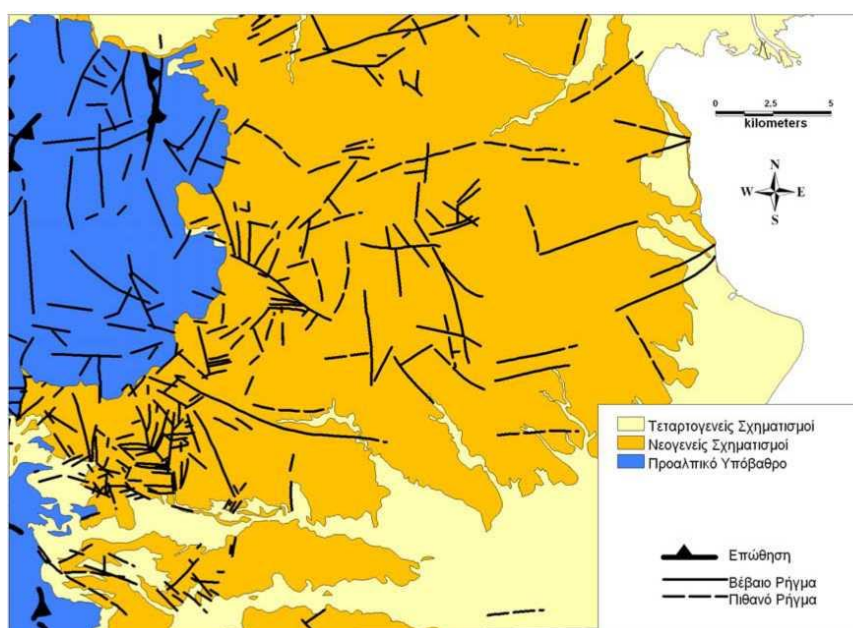
Η μελέτη ξεκίνησε διερευνώντας τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής, στην οποία ανήκει ο αρχαιολογικός χώρος, εφόσον τα μνημεία είναι εκτεθειμένα σε αυτές και επηρεάζονται άμεσα. Ειδικότερα, αναζητήθηκαν στοιχεία για τη γεωλογία, την υδρολογία τη μετεωρολογία και την εδαφολογία της Πιερίας.

3.1. Γεωλογία Πιερίας

3.1.1. Γενική γεωλογία της περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010) η ευρύτερη περιοχή, όπου ανήκει ο αρχαιολογικός χώρος του Δίου δομείται κυρίως από:

- τα προαλπικά πετρώματα, τα οποία αποτέθηκαν κατά το Μεσοζωικό και στη συνέχεια αναδύθηκαν με την αλπική ορογένεση κατά το Παλαιογενές
- τους Νεογενείς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτέθηκαν ως νεοτεκτονικό βύθισμα, στο Μειόκαινο και
- τα ιζήματα του Τεταρτογενούς (Εικόνα 3.1).

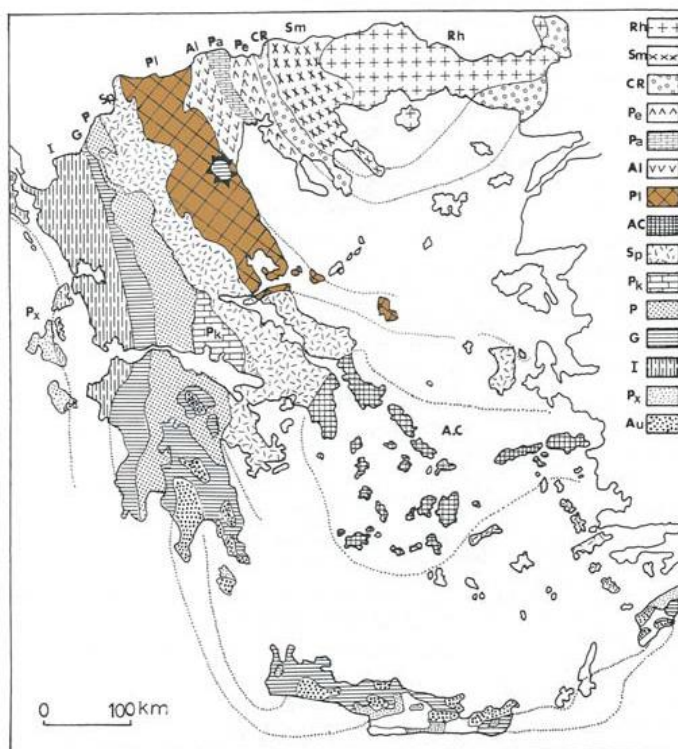


Εικόνα 3.1 Χάρτης με τη γενική γεωλογική δομή στην Πιερία (από Μουντράκη, 2010)

Η βασικότερη δομή των πετρωμάτων της περιοχής, είναι η επώθηση των οφιολίθων και των συνοδών ιζημάτων βαθιάς θάλασσας από τον χώρο της Αλμωπίας, πάνω στα μεταμορφωμένα πετρώματα του ηπειρωτικού περιθωρίου της Πελαγονικής. Ο τεκτονισμός αυτός, συνοδεύτηκε από πτύχωση των στρωμάτων, με πτυχές υποϊσοκλινείς με διεύθυνση ΒΒΔ – ΝΝΑ και απόκλιση προς τα Δυτικά. Η επώθηση λαμβάνει στην περιοχή τη μορφή ενός εκτεταμένου τεκτονικού

καλύμματος, ηλικίας Άνω Ιουρασικού – Κάτω Κρητιδικού, το οποίο απαντάται συχνά στη βιβλιογραφία, ως «Ηωελληνικό κάλυμμα» (Eohellenic nappe), διότι θεωρείται το πιο παλιό ελληνικό αλπικό κάλυμμα (Μουντράκης 2010).

Η Πελαγονική ζώνη έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ (Εικόνα 3.2) και αποτελούσε ένα ύβωμα μεταξύ του ωκεανού της Παλαιο-Τηθύος (ζώνη Αξιού για τον ελληνικό χώρο) και του ωκεανού της Νέο-Τηθύος (Υποπελαγονική-ζώνη Πίνδου). Ως προς την λιθολογία, από κάτω προς τα πάνω συναντάμε: μεταμορφωμένο υπόβαθρο, γνευσιωμένους γρανίτες Άνω Λιθανθρακοφόρου, Περμοτριάδικές μεταπλαστικές ακολουθίες, ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού-Ιουρασικού, οφιολίθους και ιζήματα.



Εικόνα 3.2 Γεωτεκτονική ζώνη Πελαγονικής (από geo.auth.gr)

Το βασικό χαρακτηριστικό της Πελαγονικής ζώνης είναι το λεγόμενο τεκτονικό παράθυρο του Ολύμπου. Τεκτονικό παράθυρο στη γεωλογία, ονομάζουμε τα πετρώματα μιας γεωλογικής ζώνης, τα οποία βρίσκονται κάτω από τα πετρώματα μιας άλλης γεωλογικής ζώνης, αλλά αναδύονται στην επιφάνεια μέσα από την υπερκείμενη ζώνη με τη βοήθεια μεγάλων ρηγμάτων ή λόγω της αποσάθρωσης. Ο Όλυμπος, ο οποίος αποτελεί μια συνεχή ανθρακική ιζηματογενή σειρά Τριαδικού-Ιουρασικού ξεπροβάλλει μέσα από την Πελαγονική ζώνη και φυσικά περιβάλλεται από τα πετρώματά της (Μουντράκης, 2010). Το τεκτονικό παράθυρο του Ολύμπου έγινε γνωστό με τις έρευνες του Godfriaux (1968) και επιβεβαίωσε την επώθηση των ελληνικών ζωνών από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η περιοχή των κορυφών του Ολύμπου

κατέχεται από μια ανθρακική ιζηματογενή σειρά ηλικίας Τριαδικού-Ηωκαίνου, η οποία περιβάλλεται τελείως από το κρυσταλλοσχιστώδες και τα Τριαδικά μάρμαρα της Πελαγονικής ζώνης.

Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Πελαγονικής περιλαμβάνει οφθαλμοειδείς γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και γνευσιωμένους γρανίτες. Πάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες βρίσκονται τα μάρμαρα του Τριαδικού-Ιουρασικού καλύμματος. Υπόβαθρο και κάλυμμα δημιουργούν μεταξύ τους συχνές τεκτονικές επαναλήψεις λόγω λεπιώσεων.

Η ανθρακική ιζηματογενής σειρά της περιοχής του Ολύμπου περιλαμβάνει αναλυτικά, σύμφωνα με τις έρευνες του Godfriaux (1968), τα εξής στρώματα από κάτω προς τα επάνω:

- Ασβεστόλιθοι και δολομίτες Άνω Τριαδικού
- Ασβεστόλιθοι και δολομίτες Ιουρασικού
- Ασβεστόλιθοι και δολομίτες Κρητιδικού-Κάτω Ηωκαίνου
- Φλύσχης σχιστοψαμμιτοκροκαλοπαγής ηλικίας Ηωκαίνου

3.1.2. Παλαιογεωγραφία της περιοχής

Η περιοχή μελέτης αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της ευρύτερης λεκάνης Αξιού-Θερμαϊκού, που σχηματίστηκε κατά το καθεστώς, που κυριάρχησε μετά το τέλος της ορογένεσης του Ηωκαίνου και οδήγησε στον σχηματισμό των επιμηκυσμένων λεκανών ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης του Βορείου Αιγαίου (Doutsos & Ferentinis 1984). Για το λόγο αυτό, θεωρείται αναγκαία μια περιορισμένη αναφορά στις συνθήκες σχηματισμού της ευρύτερης λεκάνης του Αξιού καθώς και μια προσπάθεια συσχέτισης των περιβαλλοντικών συνθηκών απόθεσης των ιζημάτων στα ανατολικά περιθώρια της λεκάνης (περιοχή Δυτικής Χαλκιδικής) με τα αντίστοιχα ιζήματα του δυτικού περιθωρίου της περιοχής Κατερίνης (Συρίδης 1990). Η παρουσία στον ευρύτερο χώρο του Βορείου Αιγαίου και άλλων λεκανών (λεκάνη Στρυμόνα-Ορφανού, λεκάνη Σερρών, λεκάνη Καβάλας-Πρίνου, λεκάνη Προ-Μυγδονίας), που σχηματίστηκαν την ίδια περίοδο καθιστά πλέον σκόπιμη μια προσπάθεια συσχέτισμού των ιζημάτων, που αποτέθηκαν στην εκάστοτε λεκάνη με τα ισόχρονα ιζήματα της περιοχής Κατερίνης.

3.1.3. Γεωλογική χρονολόγηση

Το Τεταρτογενές είναι η νεότερη χρονικά περίοδος της ιστορίας της Γης, που άρχισε πριν από 1,8-2 εκατομμύρια χρόνια και συνεχίζει μέχρι σήμερα (Παυλίδης, 2003) (Εικόνα 3.3). Χωρίζεται στο Πλειστόκαινο, που είναι το κυριότερο τμήμα του και στο Ολόκαινο, που είναι τα τελευταία 10 χιλιάδες χρόνια της ιστορίας της Γης. Το Τεταρτογενές παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα στην κλιματική του κατάσταση με τις διαδοχικές εναλλαγές θερμών και ψυχρών περιόδων (παγετώδεις και μεσοπαγετώδεις περίοδοι) (Παυλίδης 2003).

Γενικά, οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούν μια μεγάλη ποικιλία θαλάσσιων αλλά κυρίως χερσαίων αποθέσεων, κατά κανόνα χαλαρών. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο σαφώς καθορισμένο όριο μεταξύ του Πλειόκαινου και Πλειστόκαινου και για το λόγο αυτό, συχνά τα αντίστοιχα ιζήματα αναφέρονται αδιαίρετα σαν πλειοπλειστοκαινικά. Ένας χαρακτηριστικός και διαδομένος πλειοπλειστοκαινικός σχηματισμός είναι ο χερσαίος σχηματισμός του Βιλλαφράγκιου, ο οποίος αποτελείται γενικά από ποταμοχειμάρρια, ποτάμια και λιμνοδελταϊκά ιζήματα, όπως χαλαρά κροκαλοπαγή, άμμους, αργιλόμαργες κ.ά. Τυπικοί χερσαίοι τεταρτογενείς σχηματισμοί είναι οι παγετώδεις και μεσοπαγετώδεις αποθέσεις. Κυρίως κώνοι πλευρικών κορημάτων, λιθώνες, μοραίνες κ.ά. (Τρανός 1998).

Όπως είναι γενικά παραδεκτό, κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς σημειώθηκαν τέσσερις κύριες παγετώδεις περίοδοι, γνωστοί στον ευρωπαϊκό χώρο από την παλιότερη προς τη νεότερη με τις ονομασίες Γκίνζιο, Μινδέλιο, Ρίσσιο και Βούρμιο (Gunz, Mindel, Riss, Wurm). Ενδιάμεσα στις παγετώδεις περιόδους παρεμβάλλονται οι αντίστοιχες μεσοπαγετώδεις περίοδοι (Παυλίδης, 2003).



Εικόνα 3.3 Χάρτης με τις κυριότερες Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις του Ελληνικού χώρου (από Rondogianni 1984).

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούν μια μεγάλη ποικιλία θαλάσσιων και χερσαίων αποθέσεων συνήθως χαλαρών. Μεταξύ αυτών μεγάλη εξάπλωση έχουν τα ποταμοχειμάρρια ή δελταϊκά κροκαλοπαγή, άμμοι, χαλίκια, τυρφοχώματα, άργιλοι, τραβερτίνες, και κώνοι κορημάτων. Ιδιαίτερη σημασία από τις ηπειρωτικές τεταρτογενείς αποθέσεις, έχουν τα πλευρικά κορήματα των βουνών, τα οποία ανάλογα με το είδος των υλικών τους, το χρώμα τους, το βαθμό συνεκτικότητάς

τους μπορούν να προσδιορίσουν διάφορες κλιματικές εποχές του Τεταρτογενούς και κατά συνέπεια να βοηθήσουν στη στρωματογραφική διαίρεση. Επίσης, η υψομετρική τους θέση, το μέγεθος των υλικών και ο τρόπος απόθεσης τους βοηθούν στον προσδιορισμό νεοτεκτονικών κινήσεων (Τρανός 1998).

Ειδικότερα, αναζητώντας τον ορισμό των πλευρικών κορημάτων, θα λέγαμε ότι είναι: η συσσώρευση κλαστικού υλικού, που προέρχεται από τη φυσικοχημική διάσπαση των πετρωμάτων, τα οποία συγκροτούν τα ψηλότερα μέρη των κλιτύων των ορεινών όγκων. Σχηματίζονται πάνω στις πλαγιές (Εικόνα 3.4) και υφίστανται τη διαβρωτική ενέργεια των ατμοσφαιρικών παραγόντων. Τα μεμονωμένα θραύσματα των πετρωμάτων, που κατακρημνίζονται μόνο εξαιτίας της βαρύτητας είναι γωνιώδη, με μυτερές γωνίες, γιατί δεν έχουν υποστεί τη φθορά της κύλισης κατά τη μεταφορά τους. Τα πλευρικά κορήματα έχουν, ενίοτε, κατηφορική θέση, με κλίσεις αρκετά μεγάλες, που μπορεί να ξεπεράσουν τις 40-45°, ενώ συχνά παρουσιάζουν μια κατεύθυνση προς τα πάνω. Στις εκβολές των μικροχειμάρρων, που τυχόν υπάρχουν στις πλαγιές των βουνών, τα κλαστικά υλικά συσσωρεύονται σε μορφή κώνων (κώνοι απόθεσης), που συχνά ενώνονται προς τους πρόποδες του βουνού σχηματίζοντας μια λωρίδα, η οποία διακρίνεται καθαρά καθώς να περιζώνει περιμετρικά τις πετρώδεις πλευρές του. Για να σχηματιστούν οι αποθέσεις των πλευρικών κορημάτων, είναι απαραίτητο το πέτρωμα από το οποίο προέρχονται, να μην αλλοιώνεται πολύ χημικά, ενώ αντίθετα να αντιδρά ζωηρά στις φυσικές δράσεις και κυρίως στις απότομες θερμικές μεταβολές, που το καταθρυμματίζουν (ygeiaonline.gr).



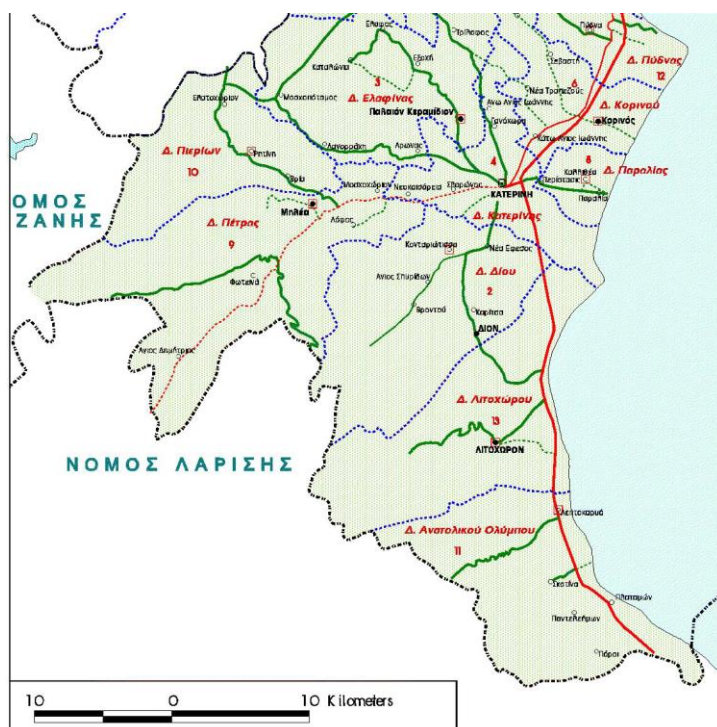
Εικόνα 3.4 Πλευρικά κορήματα στις ΒΑ πλαγιές του Ολύμπου

Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Κονταριώτισσα-Αιτόχωρο 1:50.000 (Λατσούδας κ.ά. 1985)

Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες ανήκουν στα πετρώματα, που σχηματίζουν τις πιο εκτεταμένες και πιο ισχυρές συγκεντρώσεις πλευρικών κορημάτων. Τα πλευρικά κορήματα μπορεί να είναι ασύνδετα ή συνδεδεμένα με περισσότερο ή λιγότερο συνδετικό υλικό. Κατά κανόνα, είναι συσσωρευμένα ακατάστατα, χωρίς φανερή στρώση. Όταν είναι ασύνδετα, παρουσιάζονται γενικά ασταθή, προπάντων στην περίπτωση, κατά την οποία στηρίζονται σε πλευρές ισχυρά ανορθωμένες ή λείες, και εν τέλει υποκείμενα στις χαρακτηριστικές κατολισθήσεις πλευρικών κορημάτων. Για τους λόγους αυτούς, οι περιοχές ασύνδετων πλευρικών κορημάτων είναι ακατάλληλες για τη χάραξη δρόμων και σιδηροδρομικών γραμμών και δεν αποτελούν καλό υπόβαθρο για την κατασκευή υδραυλικών καναλιών εκτροπής. Αντίθετα, η χαλαρότητά τους αποτελεί πλεονέκτημα για την παραγωγή δομικών υλικών, την ενίσχυση οδοστρωμάτων και σιδηροδρομικών τροχιών και για πετροκονιάματα (ygeiaonline.gr).

3.2. Υδρολογία-Υδρογεωλογία

Η Πιερία, μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο, με μεγάλες επιφάνειες με κλίση προς τη θάλασσα και βαθιές λεκάνες σε πυκνά διαστήματα, κατά την αρχαιότητα ήταν η νοτιότερη περιοχή της αρχαίας Μακεδονίας, που εκτεινόταν από τις εκβολές του Πηνειού, που αποτελούσε και το φυσικό της σύνορο με τη Θεσσαλική Περραιβία, έως τον Αλιάκμονα. Στα δυτικά οριζόταν από τον Όλυμπο και τα Πιέρια όρη, όπως και σήμερα, ενώ στα ανατολικά βρεχόταν από το Θερμαϊκό κόλπο (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5 Χάρτης του νομού Πιερίας

3.2.1. *Μορφολογία, υδρογραφία, κλίμα*

Το έδαφος του νομού Πιερίας έχει δύο σαφώς διακρινόμενα τμήματα: το ορεινό, στα νότια, στα δυτικά και στα βορειοδυτικά, και το πεδινό στα ανατολικά ως τη θάλασσα. Ολόκληρο το ανατολικό τμήμα του νομού το καταλαμβάνει η εύφορη πεδιάδα της Κατερίνης, στην οποία απολήγουν λιγότερο ή περισσότερο απότομα, όλα τα βουνά, που υψώνονται στην άλλη πλευρά. Το υδρογραφικό δίκτυο του νομού είναι πλουσιότατο, αποτελούμενο από πολλά αλλά μικρά, ποτάμια, ενίοτε και με τη μορφή χειμάρρων, που κατεβαίνουν από τα γύρω βουνά. Το κλίμα της πεδινής περιοχής του νομού, με την ευνοϊκή επίδραση της θάλασσας από ανατολικά και την προστασία του ορεινού τείχους από την άλλη πλευρά, είναι σχετικά ήπιο. Γίνεται φυσικά, δριμύ προς τις ορεινές περιοχές (diocles.civil.duth.gr).

3.2.2. *Ο ποταμός Βαφύρας*

Το Δίον είναι ένας μαγευτικός τόπος στην Πιερία, στο σημείο που σβήνουν οι ανατολικές υπώρειες του Ολύμπου και αναβλύζουν εκατοντάδες πηγές με κρυστάλλινο νερό. Λίγο πάνω από τον σημερινό οικισμό του Δίου βρίσκεται το ρέμα Ορλιά, τα νερά του οποίου χάνονται μέσα στη γη και ξαναεμφανίζονται, μέσα στον αρχαιολογικό χώρο. Από εκεί και μετά ο ποταμός λέγεται Βαφύρας (Εικόνα 3.6). Σύμφωνα με τους τοπικούς μύθους, στα νερά του Ορλιά έπλυναν τα χέρια τους από το αίμα οι Μαινάδες, που σκότωσαν τον Ορφέα. Για το λόγο αυτό, όταν ξαναεμφανίστηκε ο ποταμός ονομάστηκε Βαφύρας, επειδή βάρφτηκε κόκκινος. Ο Πausanias μάλιστα αναφέρει «*Το ρεύμα το ποταμού, αφού προχωρήσει μέχρι εβδομήντα πέντε στάδια, εξαφανίζεται μετά κάτω από τη γη. Έτσι, με μια διακοπή μήκους κάπου είκοσι δύο σταδίων, ανεβαίνει πάλι στην επιφάνεια το νερό, και τώρα το ποτάμι, αντί Ελικώνας, ονομάζεται Βαφύρας και κατεβαίνει στη θάλασσα ως πλωτός ποταμός. Οι κάτοικοι του Δίου λένε ότι στην αρχή το ποτάμι έτρεχε καθ' όλη τη διαδρομή του στην επιφάνεια της γης. Αλλά λένε ότι οι γυναίκες που σκότωσαν τον Ορφέα θέλησαν να πλύνουν στα νερά του τα χέρια τους από το αίμα, και γι' αυτό το ποτάμι βυθίστηκε στη γη, για να μην προσφέρει τα νερά του για καθαρμούς από φόνους*» (Pausanias 9.30.8).

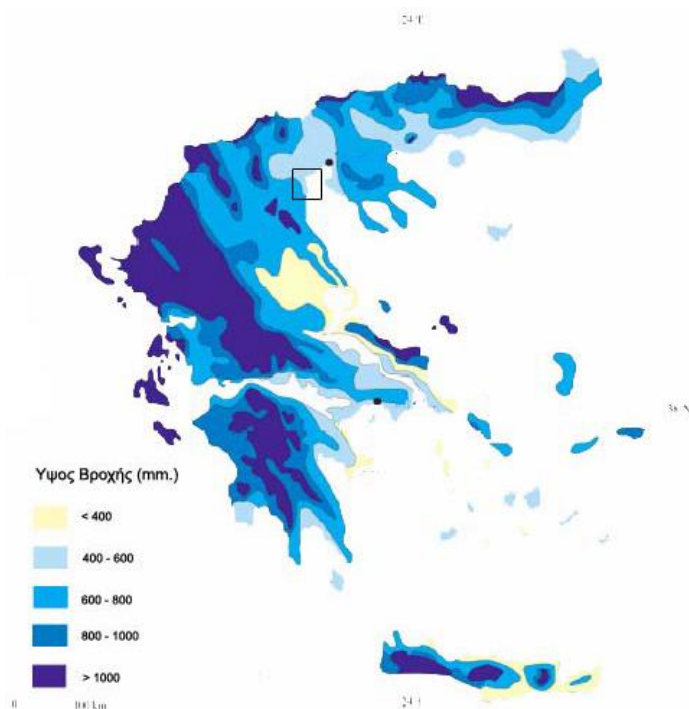


*Εικόνα 3.6 Ο ποταμός Βαφύρας
(από προσωπικό αρχείο συγγραφέως)*

3.3. Μετεωρολογικά-Κλιματικά στοιχεία

3.3.1. Κλιματικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής

Παρατηρούμε ότι η μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα (Ιανουάριος, 9,8 °C) είναι μεγαλύτερη των -3 και μικρότερη των 18 βαθμών Κελσίου, ενώ η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (Ιούλιος, 31,5 °C) είναι μεγαλύτερη των 22 βαθμών. Επιπλέον, το μέσο ύψος βροχής του ξηρότερου καλοκαιρινού μήνα (Αύγουστος, 23,6 mm) είναι μικρότερο των 40 mm (www.hnms.gr). Οι συνθήκες αυτές προσδιορίζουν τον κλιματικό τύπο που, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Korpen, είναι «Μεσογειακού τύπου», με θερμά και ξηρά καλοκαίρια.



Εικόνα 3.7 Χάρτης κατακρημνισμάτων της Ελλάδας (από Fouache, 1999)

3.3.2. Κλιματικά στοιχεία νομού Πιερίας

Ο νομός Πιερίας έχει γεωγραφικό πλάτος 39,58° - 40,33° και γεωγραφικό μήκος 22,05° - 22,28°. Τα κλιματικά στοιχεία, που παρατίθενται παρακάτω αποτελούν είτε δεδομένα, που προήλθαν από μετρήσεις στην πρωτεύουσα του νομού, Κατερίνη, είτε από δεδομένα, που αφορούν τη Θεσσαλονίκη.

Πίνακας 3.1. Θερμοκρασίες αέρα και ηλιοφάνεια (από Πιερική αναπτυξιακή α.ε Ο.Τ.Α)

Μήνας	Ώρες ηλιοφάνειας (h)	Μέση θερμοκρασία αέρα (°C)	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	Σχετική υγρασία %
Ιανουάριος	97,33	5	13	-4,8	85
Φεβρουάριος	105,29	6,4	16,4	-2	81
Μάρτιος	132,27	9,3	15,4	-4,3	78
Απρίλιος	166,5	14	23,3	1,2	72
Μάιος	214,38	19,3	31	9,8	66
Ιούνιος	259,33	23,7	33,6	13,3	53
Ιούλιος	285,1	25,8	35	14,5	57
Αύγουστος	265,52	25,3	34,6	12,5	61
Σεπτέμβριος	208,19	21,4	32,4	11,3	66
Οκτώβριος	142,7	15,8	24,4	3	78
Νοέμβριος	105,33	10,3	20,8	-0,2	77
Δεκέμβριος	95,34	6,4	20,2	-2,5	87

Πίνακας 3.2. Θερμοκρασίες εδάφους, ταχύτητα ανέμου και μέση νέφωση

(από Πιερική αναπτυξιακή α.ε Ο.Τ.Α)

Μήνας	Μέση νέφωση	Θερμοκρασία εδάφους σε βάθος 0,25μ. (°C)	Θερμοκρασία εδάφους σε βάθος 0,5μ. (°C)	Ταχύτητα ανέμου m/sec
Ιανουάριος	6,6	6,7	7,8	1,2
Φεβρουάριος	6,1	7	7,6	2
Μάρτιος	6,3	7,5	7,7	2,1
Απρίλιος	4,6	13,6	12,6	2,7
Μάιος	3,9	21,3	19,5	2,7
Ιούνιος	1,3	25,5	23,8	3,2
Ιούλιος	1,7	27,8	26,6	3,2
Αύγουστος	1,7	27,6	26,9	2,9

Σεπτέμβριος	3,7	22,5	22,8	3
Οκτώβριος	4,7	17,5	18,2	2,1
Νοέμβριος	4,1	13,2	14,1	2,1
Δεκέμβριος	5,1	9,7	10,9	1,6

3.3.3. Βαθμομέρες θέρμανσης και ψύξης

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι βαθμομέρες θέρμανσης και ψύξης για διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τους μήνες θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3 Βαθμομέρες θέρμανσης για διάφορες θερμοκρασίες βάσης

(από Πιερική αναπτυξιακή α.ε Ο.Τ.Α)

ΜΗΝΑΣ	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15
Ιανουάριος	130	144	158	172	186	200	215	230	245	260	276
Φεβρουάριος	106	117	128	140	152	165	177	190	203	216	230
Μάρτιος	57	66	75	85	95	107	118	131	143	156	170
Απρίλιος	5	7	9	12	16	21	26	32	39	46	55
Μάιος	0	1	1	1	2	3	4	6	8	10	13
Οκτώβριος	4	6	8	10	12	15	19	23	28	33	39
Νοέμβριος	37	44	51	58	67	76	86	97	108	120	133
Δεκέμβριος	117	130	143	157	171	186	201	216	231	246	261
SDDh(Tbal)	458	514	573	636	702	773	846	924	1005	1090	1177
ΜΗΝΑΣ	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.3	18.5	19	19.5	20
Ιανουάριος	291	306	322	337	353	368	377	384	399	414	430
Φεβρουάριος	243	257	271	284	298	312	321	326	340	354	368
Μάρτιος	184	198	212	226	241	256	265	271	286	301	316
Απρίλιος	64	74	84	95	106	118	125	130	143	156	169
Μάιος	16	20	25	30	36	43	47	50	58	67	76
Οκτώβριος	46	53	61	70	80	90	96	100	111	123	135

Νοέμβριος	146	159	173	186	201	215	224	229	244	259	274
Δεκέμβριος	276	292	307	323	338	354	363	369	385	400	416
SDDh(Tbal)	1269	1363	1460	1560	1664	1770	1836	1880	1993	2110	2229

Πίνακας 3.4. Βαθμοημέρες ψύξης για διάφορες θερμοκρασίες βάσης

(από Πιερική αναπτυξιακή α.ε Ο.Τ.Α)

ΜΗΝΑΣ	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24
Ιούνιος	114	103	93	83	74	65	57	50	43
Ιούλιος	186	172	158	145	132	120	108	98	87
Αύγουστος	174	160	147	134	121	110	99	88	79
Σεπτέμβριος	84	74	66	58	51	44	38	33	28
SDDc(Tbal)	558	510	464	420	378	339	303	269	237
ΜΗΝΑΣ	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28	28.5
Ιούνιος	37	32	27	23	19	15	12	9	7
Ιούλιος	78	69	60	53	46	39	33	24	19
Αύγουστος	70	61	54	47	40	34	29	19	15
Σεπτέμβριος	23	19	16	13	10	8	7	11	8
SDDc(Tbal)	208	181	157	135	115	97	81	62	51

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι συχνότητες εμφάνισης σε ώρες (h) διαστημάτων θερμοκρασίας 2,8°C για τους μήνες της θερινής περιόδου, που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του N_{max} .

Πίνακας 3.5 Συχνότητες εμφάνισης σε (h) διαστημάτων θερμοκρασίας 2,8C για τους μήνες της θερινής περιόδου (από Πειρική αναπτυξιακή α.ε Ο.Τ.Α)

Διάστημα Θερμοκρασιών	Σύνολο ωρών				
	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
2,8/5,6					
5,6/8,4	3				
8,4/11,2	18				1
11,2/14	89	4			13
14,0/16,8	146	32	3	3	57
16,8/19,6	181	117	38	40	165
19,6/22,4	141	173	129	158	177
22,4/25,2	104	161	176	174	145
25,2/28	48	128	164	156	106
28/30,8	12	71	133	123	39
30,8/33,6	2	30	75	76	14
33,6/36,4		4	22	12	2
36,4/39,2			4	2	1

3.3.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή είναι 459 mm, με το μέγιστο και το ελάχιστο μηνιαίο ύψος να είναι αντίστοιχα 248,4mm και 0mm. (Ε.Μ.Υ. Μετεωρολογικός Σταθμός Σκοτίνας, έτη 1999-2001). Η επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου είναι η ανατολική, ακολουθούμενη από νοτιοανατολική, δυτική με μικρή ένταση (Ε.Μ.Υ. έτη 1983-2001). Η μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι 22°C, με τη μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία να καταγράφεται κατά το μήνα Ιούλιο και να είναι της τάξης των 28°C (Ε.Μ.Υ. Έτη 1983-1993 και 1998-2003).

4. Μηχανισμοί διάβρωσης των δομικών υλικών των μνημείων

4.1. Εισαγωγή

Οι συνθήκες του περιβάλλοντος κατέχουν πρωταρχικό ρόλο στη διάβρωση κάθε υλικού. Τα μνημεία, εφόσον αποτελούνται από φθαρτά υλικά, είναι αναμενόμενο ότι θα υποστούν διάβρωση μέσα στο περιβάλλον, το οποίο βρίσκονται. Ωστόσο, χαρακτηριστικό είναι ότι σε περιπτώσεις κατάχωσης, παρατηρείται μια σχετικά καλή διατήρησή τους, η οποία σταματά με την ανασκαφή, εφόσον τα ευρήματα εκτίθενται πλέον σε νέους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στόχος λοιπόν, είναι η μελέτη των αιτιών, των μηχανισμών και των συνεπειών της διάβρωσης.

4.2. Η φθορά των υλικών

Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε τις έννοιες φθορά-διάβρωση για όλα τα υλικά, ορισμός, ο οποίος είναι αποδεκτός από μια σειρά διεθνών οργανισμών (International Corrosion Council, European Federation of Corrosion, RILEM, ICOMOS, UNESCO, IPAC, COIPM), και είναι ο εξής:

«Διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη και κατ' επέκταση βεβιασμένη, χημικής, ηλεκτροχημικής, φυσικής, μηχανικής, βιολογικής φύσης διεργασία αλλοίωσης της επιφάνειας (εξωτερικής και εσωτερικής) των υλικών που οδηγεί σε απώλεια υλικού» (Σκουλικίδης, 2000).

Τα φυσικά υλικά διαβρώνονται βραδύτερα από τα τεχνητά, λόγω των μικρότερων επεξεργασιών, στις οποίες υπόκεινται οι μητρικές πρώτες ύλες τους. Ωστόσο, όσον αφορά τα μάρμαρα και γενικά τα πετρώματα, η χρήση τους ως δομικά υλικά μας οδηγεί στη μελέτη της διάβρωσής τους, λόγω της επίδρασης των διαβρωτικών παραγόντων του περιβάλλοντος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να είναι έως και εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρόνια, σε περιπτώσεις που αυτά αφορούν υλικά μνημείων (Σκουλικίδης, 2000, Μανούδης, 2009).

Η διάβρωση και γενικότερα η φθορά του λίθου, όπως στα περισσότερα υλικά, οφείλεται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, και κυρίως σε αυτούς, που σχετίζονται με την παρουσία του νερού, όπως η σχετική υγρασία ή οι βροχοπτώσεις. Το νερό, μέσω διαφόρων μηχανισμών είναι υπεύθυνο για τις φθορές, που προκαλούνται στους λίθους, και κατ' επέκταση στα λίθινα μνημεία (Hall et al., 2002, Avdelidis et al., 2003, Webster et al., 2006).

Οι αέριοι ρύποι (SO_x, NO_x) της ατμόσφαιρας μεταφέρονται με το νερό, στην επιφάνεια των μνημείων, μέσω της επονομαζόμενης όξινης βροχής. Συνέπεια του φαινομένου είναι η χημική διάβρωση των λίθινων αντικειμένων με υγρή απόθεση σε αυτά των όξινων ρυπαντών (H₃O+HSO⁴⁻·H₃O+NO³⁻, H₃O+HCO³⁻). Η δέσμευση και η τελική τους απόθεση γίνεται μέσω της ομίχλης, της βροχής, του χιονιού και η επίδραση σε όλα τα ανόργανα και οργανικά υλικά είναι άμεση και ταχύτατη. Ταυτόχρονα, παρατηρείται το φαινόμενο της γυψοποίησης, δηλαδή της μετατροπής των ανθρακικών συστατικών της πέτρας σε γύψο, σε μέρη που δε διαβρέχονται από το νερό της βροχής

ή ανάμεσα σε δύο βροχοπτώσεις, λόγω της παρουσίας SO_x και υγρασίας (Σκουλικίδης, 2000, Μανούδης, 2009).

Παράλληλα, διαλυτά άλατα του εδάφους μεταφέρονται στους πόρους των λίθινων μνημείων με την τριχοειδή αναρρίχηση του νερού. Η τριχοειδής αναρρίχηση οφείλεται κυρίως σε πόρους επιμήκεις, κατακόρυφους, διαμπερείς και μικρής διαμέτρου και μέτρο της είναι το ύψος κατά την κατακόρυφο, όπου αναρριχάται τελικά το νερό.

Επιπλέον, οι αργιλοπυριτικές ενώσεις του λίθου είναι αντιστρεπτά πηκτές, δηλαδή οι κρύσταλλοί τους απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού. Όταν το νερό εξατμίζεται από το λίθο οι ενώσεις μετατρέπονται σε σκόνη, ενώ όταν η υγρασία αυξηθεί ή βρέξει, απορροφούν πάλι το νερό που έχασαν και διογκώνονται. Αυτή η συνεχής εναλλαγή του όγκου οδηγεί σε κόπωση του υλικού και τελικά σε ρηγμάτωση. Συμπερασματικά, λόγω της μεγάλης επίδρασης του νερού στις ιδιότητες των λίθων, με διάφορους μηχανισμούς, βασικός στόχος της προστασίας των υλικών πρέπει να είναι ο περιορισμός της επίδρασής του (Seinfeld, 1986, Σκουλικίδης, 2000, Brown, 2001, Μανούδης, 2009).

4.2.1. Μηχανισμοί διάβρωσης

Οι δράσεις, που οδηγούν στη διάβρωση των δομικών υλικών είναι φυσικές, μηχανικές, χημικές, ηλεκτροχημικές και βιολογικές. Οι δράσεις αυτές, δεν εμφανίζονται απαραίτητα όλες μαζί, καθώς μπορεί να επιδρά μία από αυτές ή κάποιες να έχουν μηδαμινές επιπτώσεις, ανάλογα με το υλικό και τις συνθήκες.

4.2.1.1. Μηχανικές δράσεις

α. Πήξη νερού. Τριχοειδής αναρρίχηση. Απορρόφηση.

Η πήξη του νερού αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μηχανικές δράσεις διάβρωσης των υλικών, κυρίως όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από το μηδέν. Το νερό που απορροφάται από τα υλικά, είτε με βροχή, είτε με τριχοειδή αναρρίχηση, σε χαμηλές θερμοκρασίες γίνεται πάγος και διογκώνεται έως 10%. Η διογκωση δημιουργεί πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η μηχανική αντοχή των υλικών, λόγω της συνεχούς πήξης-τήξης-πήξης. Τα υλικά ρηγματώνονται, ενώ παρατηρείται και απολέπιση της επιφάνειας.

Η ποσότητα του νερού, που απορροφάται εξαρτάται από το ολικό πορώδες, την κατανομή των πόρων και τη γεωμετρία τους. Το μέγεθος των αλλοιώσεων του υλικού εξαρτάται από τις παραπάνω ιδιότητες, με αποτέλεσμα για παράδειγμα, οι ψαμμίτες που έχουν μεγάλο πορώδες να απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού από τα λιγότερο πορώδη μάρμαρα (Powers, 1955, Winkler, 1968, Winkler, 1994, Κορωνάιος et al., 2006).

β. Άλατα και τριχοειδής αναρρίχηση.

Το νερό κατά την τριχοειδή αναρρίχηση του μεταφέρει ποσότητες αλάτων. Η παρουσία ισχυρών ηλεκτρολυτών δυσκολεύει τη διείσδυση του νερού στους πόρους, λόγω της αύξησης της επιφανειακής τάσης. Ωστόσο, τα άλατα εισέρχονται στο εσωτερικό των πόρων και δημιουργούν τάσεις στα τοιχώματά τους (Goudie et al., 1997).

γ. Ψηματοβολή

Τα αιωρούμενα σωματίδια του αέρα, διαμέτρου πάνω από 500 nm, συγκρούονται στις επιφάνειες των υλικών των μνημείων, όπως αγάλματα και γλυπτά. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η αλλοίωση των υλικών, λόγω της φυσικής αμμοβολής (Seinfeld, 1986).

4.2.1.2. Χημικές δράσεις

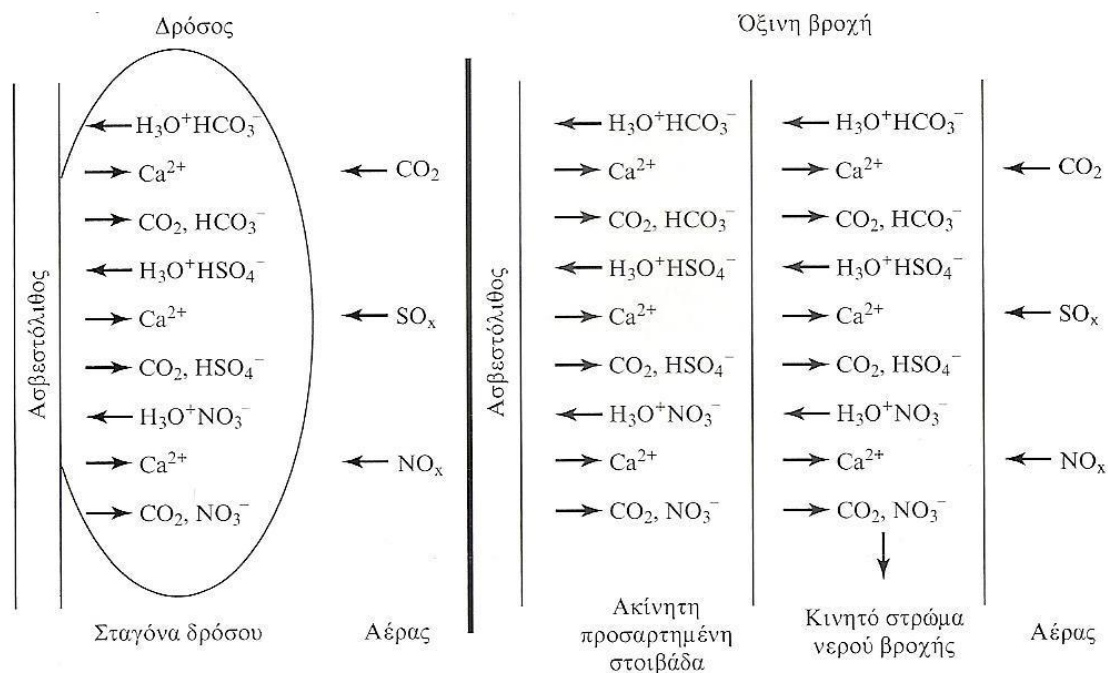
α. Οξίνη βροχή

Στο νερό της βροχής και στις σταγόνες δρόσου, η διάλυση των CO₂, NO_x, SO_x, που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα δημιουργεί οξέα. Το νιτρικό και το θειικό οξύ είναι ισχυρότερα από το ανθρακικό. Αυτό βέβαια εξαρτάται και από τη συγκέντρωση των αντίστοιχων ρύπων στον αέρα. Η ταχύτητα και το ποσοστό των δράσεων εξαρτώνται επίσης, από τη διαλυτότητα των προϊόντων. Η όξινη βροχή με τα οξέα, που έχουν σχηματιστεί στις σταγόνες της, προσβάλλει τα περισσότερα πετρώματα και συνεπώς και τα μάρμαρα. Με την όξινη βροχή εμφανίζονται στα μάρμαρα όλα τα είδη διάβρωσης, που αναλύονται παρακάτω (διάβρωση με βελονισμούς, ψαθυρή θραύση, σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση). Η επίδραση της όξινης βροχής σε κάθε υλικό είναι διαφορετική.



Εικόνα 4.1. Αριστερά: διάβρωση με βελονισμούς ≡ κυψελοειδής φθορά. Δεξιά: διάβρωση με βελονισμούς ≡ ζαχαροειδής φθορά (Σκουλικίδης, 2000)

Όταν η βροχή σταματήσει, παραμένει η ακίνητη προσαρτημένη στοιβάδα και αρχίζει η εξάτμιση του νερού της. Κατά την κρυστάλλωση των αλάτων αποβάλλεται πρώτα, και σε μεγαλύτερο ποσοστό, το ανθρακικό ασβέστιο (ανακρυστάλλωση), ενώ ταυτόχρονα αποβάλλεται γύψος, νιτρικό ασβέστιο και ένυδρο νιτρικό ασβέστιο (Σκουλικίδης, 2000, Σκουλικίδης, 2007).



Σχήμα 4.1. Σχηματική αναπαράσταση της όξινης προσβολής φυσικών υλικών. Στον αέρα υπάρχουν επίσης O_2 και N_2 που διαχέονται, αλλά εδώ το O_2 δε δρα άμεσα, όπως στα μέταλλα, αλλά έμμεσα: $SO_2 \rightarrow SO_3$ (Σκουλικίδης, 2000)

β. Αλκαλική προσβολή

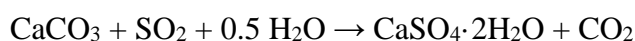
Το ποσοστό της αλκαλικής προσβολής εξαρτάται από την ένταση της βροχής και από τη συγκέντρωση σε αυτήν ατμοσφαιρικού CO_2 με τη μορφή HCO_3^- ή CO_3^{2-} . Σε pH έως 5 είναι μικρή η ταχύτητα διάλυσης, ενώ με αύξηση του pH αυξάνεται. Το pH της βροχής παίζει μικρό ρόλο σε σύγκριση με τις ξηρές και υγρές αποθέσεις, που περιέχουν συνήθως μεγάλες ποσότητες ρύπων και σωματιδίων (Camuffo, 1986).

γ. Προσβολή από Cl

Η παρουσία θαλάσσιου περιβάλλοντος οδηγεί σε παρουσία σταγονιδίων διαλύματος χλωριούχου νατρίου στον αέρα. Τα σταγονίδια ασκούν διαλυτική δράση στα υλικά των μνημείων (Σκουλικίδης, 2000).

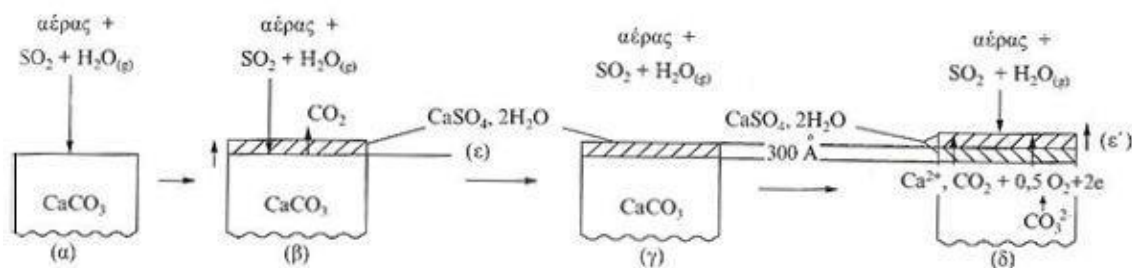
4.2.1.3. Ηλεκτροχημικές δράσεις

Η θείωση (γυψοποίηση) είναι η βασική ηλεκτροχημική δράση, που πραγματοποιείται στην επιφάνεια των μαρμάρων. Ουσιαστικά, ο ατμοσφαιρικός ρυπαντής SO_x με την υγρασία επιδρά σε ανθρακικά πετρώματα και σε μάρμαρα, σε μέρη που δεν βρέχονται άμεσα από το νερό της βροχής. Ειδικά, ο γύψος διαλύεται και αποπλένεται:



Τα ιόντα ασβεστίου διαχέονται μέσα από τα στρώματα του γύψου προς την ατμόσφαιρα, με παράλληλη μετανάστευση ηλεκτρονίων. Παρακάτω φαίνεται η χρονική εξέλιξη της θείωσης. Για

τα πρώτα 300Å, ο γύψος σχηματίζεται στη διεπιφάνεια γύψου-πέτρας, ενώ μετά τα 300Å, οπότε η επιφάνεια της πέτρας έχει τελείως καλυφθεί από γύψο, ο σχηματισμός γύψου συνεχίζεται από την επιφάνεια του παλιού γύψου προς το περιβάλλον.



Σχήμα 4.2. Σχηματική χρονική εξέλιξη θείωσης (Σκουλικίδης, 2000)

Η ταχύτητα διάλυσης ανθρακικού πετρώματος από την όξινη βροχή είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα μετατροπής του σε γύψο. Επομένως, η όξινη βροχή είναι πολύ πιο καταστρεπτική από τη γυψοποίηση, για το ίδιο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, η διάρκεια της όξινης προσβολής είναι μικρότερη και από τη διάρκεια της βροχής ή των επεισοδιακών περιπτώσεων δρόσου, ενώ η γυψοποίηση είναι συνεχής και πραγματοποιείται ακόμη και μέσα στο μουσείο, εφ' όσον στην ατμόσφαιρα υπάρχει SO_x , συνεπώς υπερισχύει ποσοτικά της διάλυσης (Moropoulou et al., 1998, Σκουλικίδης, 2000).



Εικόνα 4.2. Διατήρηση λεπτομερειών στο πίσω μέρος Καρυάτιδας, η οποία προστατεύεται από το νερό της βροχής. Οι λεπτομέρειες διατηρούνται πάνω στα στρώματα του γύψου (Σκουλικίδης, 2000).

4.2.1.4. Βιολογικές δράσεις

Πολλά αυτοτροφικά και ετεροτροφικά βακτήρια, φύκη και μύκητες διαβρώνουν τις επιφάνειες των δομικών υλικών. Ορισμένα δρουν απευθείας στα πετρώματα, ενώ άλλα χρησιμεύουν ως τροφή καταστρεπτικών μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί είναι ζωικοί ή φυτικοί και αποτίθενται στις επιφάνειες των μνημείων από τον αέρα, από τα φυτά, όπου οι σπόροι τους ρίζωσαν στις επιφάνειες ή από ζώα σε επιφάνειες κοντά στο έδαφος. Υπολογίζεται ότι 10^6

κύτταρα αποτίθενται από τον αέρα ανά m^2 και ημέρα. Ορισμένοι μικροοργανισμοί δεν βρίσκονται σε άμεση επαφή με τα πετρώματα, αλλά αναπτύσσονται σε ένα βιολογικό στρώμα άλλων «φωτοτροφικών» μικροοργανισμών.

Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορεί να χρωματίζουν τις επιφάνειες πράσινες ή μαύρες ή καστανέρυθρες και με την ανάπτυξή τους σε ρωγμές, οδηγούν σε αποφλοιώσεις και φλύκταινες.

Εκτός από αυτά τα είδη βακτηριδίων, υπάρχουν και τα «χημειολιθοτροφικά», τα οποία οδηγούν σε γυψοποίηση της επιφάνειας των μαρμάρων και με τη βροχή δρουν διαλυτικά στα πετρώματα αυτά. Τα «νιτροοξειδωτικά» βακτήρια οξειδώνουν την αμμωνία, που βρίσκεται πάνω στα πετρώματα και με τη βροχή διαλύουν τα ασβεστίτικα υλικά και τα μάρμαρα με τη μορφή βελονισμών (Scheerer et al., 2009, Revie, 2011).

4.2.1.5. Φυσικοί παράγοντες

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κλιματολογικοί παράγοντες, οι σεισμοί και οι φωτιές. Οι πιο σημαντικοί κλιματολογικοί παράγοντες είναι η βροχή, ο αέρας, η παγωνιά και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Οι κύκλοι ψύξης-απόψυξης, οι οποίοι οφείλονται στο βρόχινο νερό, οδηγούν στη φθορά του λίθου. Οι σεισμοί και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την γεωμετρία ενός μνημείου. Τέτοιου είδους αλλαγές μπορούν να διαταράξουν την ισορροπία του μνημείου, προκαλώντας ακόμη και την κατάρρευσή του (Winkler, 1973, Σκουλικίδης, 2000, Κορωναίος Γ. Αιμίλιος et al., 2006).

4.2.2. Είδη διάβρωσης

Με βάση τα αποτελέσματα της διάβρωσης μπορούν να διακριθούν οι παρακάτω κατηγορίες:

1. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση. Η διάβρωση κατά την οποία στην επιφάνεια του υλικού δημιουργείται ένα ομοιόμορφο στρώμα προϊόντος διάβρωσης ή όταν πραγματοποιείται μια περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας.
2. Διάβρωση με βελονισμούς. Αφορά την περίπτωση εκλεκτικού τοπικού σχηματισμού προϊόντος διάβρωσης - ακόμη και όταν το υλικό είναι καλυμμένο με τα προϊόντα της διάβρωσης ή με προστατευτικά υλικά – ή για εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας (βελονισμοί).
3. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση, που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση. Αυτό το είδος διάβρωσης είναι το πιο επιβλαβές από την άποψη του αποτελέσματος, οδηγώντας σε εξαιρετικά μεγάλες καταστροφές. Όταν από διάβρωση με βελονισμούς ή μηχανικές

κακώσεις δημιουργηθεί εσοχή στην επιφάνεια τμήματος του υλικού, τότε μπορεί να λάβει χώρα ψαθυρή θραύση ολόκληρου του τμήματος.

4. Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση. Δημιουργούνται εσοχές, σπήλαια ή κρατήρες από τοπική εξάχνωση υλικού, εξαιτίας της δημιουργίας υποπίεσης. Εμφανίζεται στην περίπτωση ροής ρευστών σε σωλήνες, έντονης βροχής, ποτάμιου ρεύματος σε επαφή με το υλικό κλπ.
5. Είναι βασικό να σημειωθεί ότι πρακτικά δεν υπάρχει υλικό που να μη διαβρώνεται. Για το λόγο αυτό, δεν εξαρτάται μόνο από το περιβάλλον, όπου είναι εκτεθειμένο αν θα διαβρωθεί ή όχι. Η διάβρωση πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε περιβάλλον, ακόμη και χωρίς άμεση επαφή των υλικών με τα συστατικά του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Το περιβάλλον επηρεάζει ποσοτικά το φαινόμενο, δηλαδή την ταχύτητα του και το είδος των προϊόντων διάβρωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει ότι το νερό συμμετέχει στους περισσότερους μηχανισμούς φθοράς, τόσο των σύγχρονων δομικών υλικών, όσο και των υλικών των μνημείων πολιτισμού. Επομένως, βασικός στόχος της προστασίας των υλικών πρέπει να είναι ο περιορισμός της επίδρασης του νερού (Σκουλικίδης, 2000).

5. Συντήρηση

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, η ανάγκη συντήρησης αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διατήρησης της πλούσιας πολιτισμικής κληρονομιάς της. Με τη συντήρηση διατηρούνται τα υλικά κατάλοιπα, είτε επιβραδύνοντας τις διαδικασίες φθοράς τους, είτε αποκαθιστώντας τη μορφή τους, ώστε να γίνουν κατανοητά από το κοινό.

Τα βασικά δεδομένα, που αφορούν στη συντήρηση και την τεκμηρίωσή της καλύπτουν ένα ευρύ γνωστικό πεδίο, που περιλαμβάνει πληροφορίες για την υλική, αισθητική, ιστορική υπόσταση της πολιτισμικής κληρονομιάς και τις διαδικασίες κατασκευής, φθοράς, αλλοίωσης, διατήρησης, εξέτασης, ανάλυσης και τεκμηρίωσής της (Χατζηδάκη, 2005).

5.1. Αντικείμενο της συντήρησης

Αντικείμενο της συντήρησης μπορεί να είναι κάθε κινητό ή ακίνητο αντικείμενο, το οποίο θεωρεί μια οργανωμένη κοινωνία ότι οφείλει να διατηρηθεί ως πολιτιστικό αγαθό με ιστορική, καλλιτεχνική, αισθητική ή θρησκευτική αξία. Για παράδειγμα, αντικείμενα της συντήρησης μπορεί να είναι προϊόντα της ανθρώπινης δραστηριότητας (τέχνηρα), όπως εργαλεία, έργα τέχνης, όπλα, επεξεργασμένα δείγματα φυσικής ιστορίας, αρχαιολογικές θέσεις αλλά και φυσικά κατάλοιπα (οικοδομημένα), όπως μη επεξεργασμένα αντικείμενα συλλογών φυσικής ιστορίας και πετρώματα.

Η ταξινόμηση τους μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια, όπως το υλικό κατασκευής τους, τη χημική σύστασή τους, τη χρήση τους, τη χρονολογική ταξινόμησή τους, την προέλευσή τους, το γενικότερο σύνολο ή τη συλλογή που ανήκουν, τον τρόπο που βρέθηκαν, όπως ανασκαφικά υλικά, το αν είναι κινητά ή ακίνητα. Τα ζωγραφικά έργα τέχνης ταξινομούνται συνήθως με κριτήριο την τεχνική κατασκευής τους, το συνδυαστικό υλικό τους ή το υποστήριγμά τους (Χατζηδάκη, 2005).

Η φθορά του υλικού ξεκινά από τη στιγμή της δημιουργίας του έργου τέχνης ή του μνημείου και εξελίσσεται προοδευτικά για όσο διάστημα είναι εκτεθειμένο σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το πρόβλημα της συντήρησης δεν είναι απλό, γιατί πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη αισθητικούς, ιστορικούς, επιστημονικούς και τεχνικούς παράγοντες. Ο σκοπός των επεμβάσεων συντήρησης είναι καταρχήν, η κατανόηση των μηχανισμών φθοράς του υλικού και η προσπάθεια επιβράδυνσης της φθοράς, με τελικό σκοπό την παράταση του χρόνου ζωής των μνημείων.

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

- Σεβασμός στο πρωτότυπο,
- Αντιστρεψιμότητα προτεινόμενων επεμβάσεων,
- Συμβατότητα προτεινόμενων και υφιστάμενων υλικών,

- Διαχρονικότητα νέων επεμβάσεων,
- Οικονομικό κόστος επέμβασης και συντήρησης,
- Χρόνος αποπεράτωσης,
- Κοινωνικό και ψυχολογικό κόστος των ενοίκων και του κοινωνικού συνόλου,
- Επαρκής και ευσταθής υποστήλωση κατά την διάρκεια των εργασιών επέμβασης.

5.2. Υλικά συντήρησης

Συνήθης εργασία κατά την αποκατάσταση μιας λιθοδομής είναι η αφαίρεση των σαθρών κονιαμάτων και η εφαρμογή νέων. Οι δυσκολίες, που αντιμετωπίζει κανείς στην εκτίμηση της ποιότητας των παλιών κονιαμάτων είναι ποικίλες και διαφορετικές σε κάθε περίπτωση. Μετά τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των παλιών κονιαμάτων, αναζητούνται οι ιδιότητες των κονιαμάτων αποκατάστασης (Price et al., 1996, Price et al., 2011).

Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος αποκατάστασης πρέπει να έχουν (Rossi-Doria, 1986, Θεοδωρίδης, 2006):

- Εύκολη εργασιμότητα,
- Σύντομη και αξιόπιστη πήξη τόσο σε υγρό όσο και σε ξηρό περιβάλλον,
- Χαμηλή ξήρανση κατά την διάρκεια της πήξης,
- Μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά και πορώδες παρόμοια των αντίστοιχων των στοιχείων της τοιχοποιίας,
- Μειωμένη περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα.

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδοσιακά υλικά, που προτείνονται να χρησιμοποιούνται για τις αποκαταστάσεις των μνημείων και ιστορικών κτιρίων (Price et al., 1996, Θεοδωρίδης, 2006, Price et al., 2011).

α. Πηλός

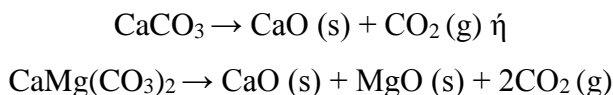
Όλοι οι πηλοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δόμηση, αρκεί να μην περιέχουν οργανικές προσμίξεις. Ο πηλός δόμησης πρέπει να έχει σχετικά υψηλή αντοχή σε θλίψη και κάμψη, χαμηλό ποσοστό συστολής ξήρανσης κατά την διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης και σχετικά ικανοποιητική ταχύτητα σκλήρυνσης. Η κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγεθος των τεμαχιδίων του πηλού, επηρεάζει άμεσα τις φυσικομηχανικές ιδιότητες και την υδραυλικότητα των κονιαμάτων (Moropoulou et al., 1997).

Όσον αφορά τα επιχρίσματα με βάση τον πηλό, θα πρέπει να έχουν σχετικά υψηλή ταχύτητα σκλήρυνσης, ικανοποιητική υδατοστεγανότητα, χαμηλό ποσοστό μικρορηγματώσεων κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης και ιδιαίτερη καλή συνάφεια με το υπόστρωμα (Παπαγιάννη et al., 2000).

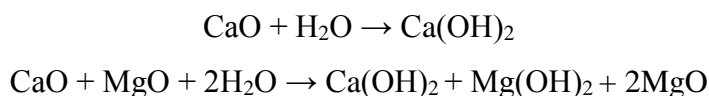
β. Άσβεστος και ασβεστοκονιάματα

Τα περισσότερα ιστορικά κτίρια περιέχουν ασβεστοκονιάματα. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν μικρό ποσοστό κατακράτησης νερού, είτε σε ελεύθερη μορφή είτε στη δομή τους και μεγάλο ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα. Ο λόγος της περιεκτικότητας σε διοξείδιο του άνθρακα και δομικά δεσμευμένου νερού είναι συνήθως πάνω από 10 (Moropoulou et al., 2005).

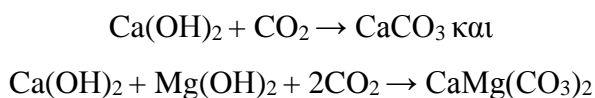
Με φρύξη σε θερμοκρασία <math><900^{\circ}\text{C}</math> ασβεστολιθικών μαργών, ασβεστόλιθων και δολομιτών παρασκευάζεται η φυσική υδραυλική άσβεστος σύμφωνα με τις παρακάτω χημικές εξισώσεις (Gourdin et al., 1975):



Ακολουθεί η αποπύρωση του CaO ή CaMg(CO₃)₂:



Στη συνέχεια δημιουργείται το κονίαμα με σκλήρυνση της ένυδρης ασβέστου σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Το κονίαμα αυτό έχει πολύ καλές αντοχές, είναι αδιάλυτο σε νερό, το οποίο δεν περιέχει υδατοδιαλυτά άλατα, ενώ έχει και πολύ καλή ικανότητα διαπνοής (Wendehorst, 1981):



Εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα η διαδικασία σκλήρυνσης (ενανθράκωσης) είναι σχετικά αργή σε συνήθεις συνθήκες (Moropoulou et al., 2005). Η μαγνησιακή ένυδρη άσβεστος προσδίδει στο κονίαμα τα χαρακτηριστικά της πλαστικότητας και της συνοχής καθώς και της ανθεκτικότητας στη ρηγμάτωση, σε μεγαλύτερο βαθμό από την συνήθη άσβεστο, λόγω της ινώδους δομής των κρυστάλλων του ένυδρου μαγνησίου.

γ. Ποζολανικά πρόσθετα

Η προσθήκη ποζολανικού υλικού, όπως θηραϊκή ή σκυδραϊκή γη και γενικά υλικών ηφαιστειογενούς προέλευσης, στα κονιάματα αποκατάστασης βελτιώνει τις ιδιότητές τους και επηρεάζει την τελική θλιπτική αντοχή, λόγω της υδραυλικότητας των ποζολανών. Η αύξηση της περιεχόμενης ποζολάνης αυξάνει αναλογικά την τελική θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του υλικού. Επιπλέον, αυξάνεται και η αντίσταση στην αποσάθρωση του κονιάματος.

Οι φυσικοί ζεόλιθοι, που είναι ορυκτά που προέρχονται από υδροθερμικές μεταβολές σε ηφαιστειακά πετρώματα, ανήκουν στην κατηγορία των ποζολανικών πρόσθετων. Διακρίνονται για την σταθερότητα και την αδιαλυτότητά τους.

δ. Καολίνης - Μετακαολίνης

Ο καολίνης είναι άργιλος, που σχηματίζεται από υδροθερμικές κυρίως, μεταβολές σε αστριούχα πετρώματα (γρανίτες, τραχείτες κ.α) και περιέχει, λόγω του σχηματισμού του, τις λιγότερες προσμίξεις από όλες τις αργίλους. Η ανάμιξη του καολίνη με άσβεστο και νερό δημιουργεί νέα σύνθετα ένυδρα άλατα. Ο μετακαολίνης προέρχεται από θερμική επεξεργασία καολίνη και παρουσιάζει έντονες ποζολανικές ιδιότητες ενώ με ανάμιξη σε κονιάματα δίνει μεγάλες φυσικομηχανικές αντοχές, μεγάλη ανθεκτικότητα και επιτρέπει την σκλήρυνση του κονιάματος εντός του νερού (Chiaverini, 2004, Θεοδωρίδης, 2006).

5.3. Τεχνικές επεμβάσεων

Οι διάφορες τεχνικές επεμβάσεων, ανάλογα με το ποσοστό ενσωμάτωσής τους στο κτίριο και την ευκολία ή δυσκολία αφαίρεσής τους από αυτό (βαθμός αντιστρεψιμότητας), μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τις ήπιες και τις δραστικές. Ήπιες επεμβάσεις χαρακτηρίζονται εκείνες, που δεν ενσωματώνονται σε μεγάλο ποσοστό στο υπόστρωμα και μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν. Δραστικές, χαρακτηρίζονται οι επεμβάσεις με υψηλό ποσοστό ενσωμάτωσης στο υπόστρωμα ενώ η αφαίρεσή τους είναι δύσκολη έως και αδύνατη (Price et al., 1996, Θεοδωρίδης, 2006, Price et al., 2011):

α. Βαθύ αρμολόγημα

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε λιθοδομές μικρού πάχους (< 0.004 m) ή πλινθοδομές, που παρουσιάζουν ρηγματώσεις μέχρι 0,1 m. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τον βαθμό αποκατάστασης του υπάρχοντος κονιάματος χαμηλής αντοχής και από το νέο κονίαμα υψηλής αντοχής. Γενικά, έχουμε τοπική αύξηση της αντοχής του τοίχου.

β. Ενέσεις σε ρωγμές

Όταν το εύρος των ρωγμών της τοιχοποιίας δεν υπερβαίνει τα 0,01 m, ή και σε τοιχοποιίες μεγαλύτερου πάχους, εφαρμόζεται η μέθοδος των ενέσεων. Η τεχνική αυτή οδηγεί σε αποκατάσταση της αρχικής αντοχής της τοιχοποιίας. Ωστόσο, το υψηλό κόστος του εξοπλισμού αποτελεί βασικό μειονέκτημα της μεθόδου.

Σε περιπτώσεις, όπου επιδιώκεται με το ένεμα, που εισάγεται στη μάζα της τοιχοποιίας, η πλήρωση όχι μόνο των ενδεχόμενων ρωγμών αλλά και όλων των κενών στο εσωτερικό της, τότε πρόκειται για την τεχνική της ομογενοποίησης της μάζας. Η τεχνική αυτή, είναι ιδιαίτερα αποδοτική στην περίπτωση αργολιδομών με μεγάλο ποσοστό κονιάματος χαμηλής ποιότητας καθώς και στην περίπτωση τρίστρωτων τοιχοποιιών.

γ. Συρραφή μεγάλων ρωγμών

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μεγάλων ρωγμών καθώς και σε ρωγμές μεγάλου εύρους ή μήκους, που εκτείνονται οριζόντια, κατακόρυφα ή διαγώνια στην επιφάνεια του τοίχου. Με την τεχνική αυτή αυξάνεται η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας, ενώ προκαλείται γενικά αλλοίωση της εξωτερικής όψης του τοίχου.

δ. Συρραφή αποκολλημένων τοίχων

Σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει ρωγμή αποκόλλησης ή μερική κατάρρευση στη θέση ένωσης γωνιακών ή εσωτερικών τοίχων, εφαρμόζεται η μέθοδος της συρραφής. Με την συγκεκριμένη τεχνική ανακτάται και εν μέρει αυξάνεται τοπικά, η αντοχή του τοίχου στην ανακατασκευαζόμενη περιοχή.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κατά την διάρκεια της αποκατάστασης των μνημείων εμφανίζεται η ανάγκη, είτε να επαναληφθούν οι παλιές κατασκευαστικές μέθοδοι, είτε να συμπληρωθεί το υφιστάμενο «παραδοσιακό» υλικό. Τα παραδοσιακά υλικά, την εποχή που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν κοινά και βρίσκονταν με σχετική ευκολία γιατί προέρχονταν από τις κοντινές προς το μνημείο περιοχές ή λατομεία. Σήμερα, όπου η παραγωγή των παραπάνω υλικών έχει σταματήσει, η σύγχρονη τεχνολογία έχει ενεργοποιηθεί για να καλύψει το παραπάνω κενό της αγοράς.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο όρος «συμβατότητα» δεν έχει πλήρως αποσαφηνιστεί. Υπάρχει η ανάγκη να προσδιοριστεί ακριβώς σε ό,τι αφορά τα ιστορικά κτίρια. Είναι απλά αποδεκτό ότι συμβατότητα δεν σημαίνει απαραίτητα, υλικά με τα ίδια χημικά συστατικά αλλά με παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Έως τώρα ο προσδιορισμός της συμβατότητας των υλικών στηριζόταν σε πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες εργαστηρίου, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές (Moropoulou et al., 2005, Θεοδωρίδης, 2006).

6. Μεθοδολογία χαρακτηρισμού των υλικών και της κατάστασης φθοράς

Γενικά

Η μεθοδολογία της διαγνωστικής μελέτης αποτελείται από τις επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις της κατάστασης των υλικών και τις μη καταστρεπτικές μετρήσεις για την περιγραφή της φθοράς, την ταυτοποίηση των δομικών υλικών και την έρευνα προέλευσής τους αλλά και από τη μελέτη της φθοράς στο εργαστήριο. Με τις μελέτες, αυτές, προκύπτει η επίδραση των παραγόντων της φθοράς του μνημείου και συνεπώς πραγματοποιείται η εκτίμηση των αιτιών και των μηχανισμών των φαινομένων της φθοράς.

Απαραίτητο στοιχείο, πριν πραγματοποιηθεί η συντήρηση, είναι η ταυτοποίηση των δομικών υλικών ενός μνημείου καθώς και η διάγνωση της φθοράς του. Με τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας και των μη καταστρεπτικών μεθόδων, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις επί τόπου. Ωστόσο, για την καλύτερη εκτίμηση και συσχέτιση των επί τόπου αποτελεσμάτων, όπου είναι δυνατό, λαμβάνονται δείγματα, για την επιπλέον εξέταση στο εργαστήριο.

Ο χαρακτηρισμός και η διάγνωση της φθοράς των υλικών των μνημείων, γίνεται με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών, καθώς και αναλυτικών τεχνικών στο εργαστήριο μετά από τη λήψη δειγμάτων (1992, Brundle et al., 1992, Moropoulou et al., 1997, Saiz-Jimenez, 2004).

6.1. Μέθοδοι ορυκτολογικού και χημικού χαρακτηρισμού των δειγμάτων

6.1.1. Στερεοσκόπιο

Το οπτικό στερεοσκόπιο χρησιμοποιείται για μεγέθυνση της εξωτερικής μορφολογίας ενός πετρώματος. Δημιουργείται μια ψευδαίσθηση του βάθους σε μια εικόνα, καθώς στηρίζονται στο ότι η τρισδιάστατη φυσική όραση πραγματοποιείται, διότι κάθε μάτι βλέπει το ίδιο αντικείμενο από σχετικά μικρή, αλλά διαφορετική οπτική γωνία. Έτσι, ο εγκέφαλος παραλαμβάνει δύο ελαφρά διαφοροποιημένες εικόνες του ίδιου αντικειμένου. Η διαφοροποίηση αυτή λέγεται παράλλαξη.

Τα στερεοσκόπια έχουν είτε αντικειμενικούς φακούς σταθερής εστιακής απόστασης (μεγέθυνσης) είτε μεταβαλλόμενης (zoom). Συνήθως, τα όργανα αυτά μπορούν να μεγεθυνθούν μέχρι περίπου 80x, διότι μεγαλύτερες μεγεθύνσεις έχουν πολύ μικρό βάθος εστίασης και επομένως, δεν μπορούν πλέον να θεωρηθούν στερεοσκοπικές. Το αντικείμενο, χωρίς να υποστεί κάποια προετοιμασία, μπορεί να παρατηρηθεί, με την προϋπόθεση να μπορεί να τοποθετηθεί στο οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου (Patzelt et al., 1985, Pluta, 1990, Bracegirdle, 1995).



Εικόνα 6.1. Ζεύγος στερεοσκοπικών φωτογραφιών (Αραβαντινός, 2014)

6.1.2. Οπτική μικροσκοπία

Ως οπτικά ή φωτονικά αναφέρονται τα μικροσκόπια εκείνα, που χρησιμοποιούν σαν ακτινοβολία το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που είναι ορατό, δηλαδή από 380 - 760 nm. Ανάλογα με τη διάταξη των φακών και τον τρόπο παρατήρησης, τα οπτικά μικροσκόπια διακρίνονται σε μικροσκόπια φωτεινού πεδίου, σκοτεινού πεδίου, αντίθεσης φάσεως, κλπ.

Η μεγέθυνση ενός οπτικού μικροσκοπίου δίνεται από το τύπο $M=m_1*m_2$, όπου m_1 και m_2 είναι οι εγκάρσιες μεγεθύνσεις των δυο φακών, δηλαδή του προσοφθάλμιου και του αντικειμενικού. Με την οπτική μικροσκοπία μπορεί να εκτιμηθεί η ορυκτολογική σύσταση και ο ιστός ενός πετρώματος. Για καλύτερη μικροσκοπική παρατήρηση ενός πετρώματος χρησιμοποιούνται κυρίως πολωτικά μικροσκόπια (Patzelt et al., 1985, Delly, 1992, Ζερβός, 2004).

6.1.3. Πολωτικό μικροσκόπιο

Το πολωτικό μικροσκόπιο είναι ένα απλό μικροσκόπιο, στο οποίο το παρασκεύασμα φωτίζεται με πολωμένο φως. Το αποτέλεσμα είναι να μπορούμε να παρατηρήσουμε παρασκευάσματα, που έχουν διαφορετική διαπερατότητα στο πολωμένο φως, λόγω φαινομένων οπτικής ανισοτροπίας. Τα μικροσκόπια αυτά είναι χρήσιμα κυρίως, για την παρατήρηση τροφίμων, ορυκτών και γενικά παρασκευασμάτων, που μας ενδιαφέρει η κρυσταλλική τους δομή. Χαρακτηριστικό των μικροσκοπίων αυτών είναι η κυκλική τράπεζα, που μπορεί να περιστραφεί κατά 360°, ενώ οι φακοί τους έχουν χαραγμένη τη λέξη POL (Brundle et al., 1992, Carlton, 2011). Κατά τη μελέτη ενός πετρώματος με τη χρήση του πολωτικού μικροσκοπίου πρέπει να καθοριστούν και περιγραφούν τρία στοιχεία:

- Τα ιστολογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος
- Το είδος των διαφόρων ορυκτών συστατικών
- Η ποσοτική συμμετοχή των διαφόρων ορυκτών συστατικών.

Στον προσδιορισμό της ποσοτικής συμμετοχής, εκτός από ειδικές περιπτώσεις, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, γίνεται χρήση και ειδικών εικόνων. Σε ό,τι αφορά τα ορυκτά κατά την εξέταση στο μικροσκόπιο, μπορούν να προσδιοριστούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά γνωρίσματα (Χατζηδάκη, 2005):

- i. Χρώμα: Το χρώμα της τομής των κρυστάλλων των ορυκτών.
- ii. Πλεοχρωϊσμός: Η ένταση και η ποικιλία των χρωμάτων.
- iii. Δείκτης διάθλασης (δ): Γίνεται εκτίμησή του χρησιμοποιώντας το ανάγλυφο των κρυστάλλων ενός ορυκτού σε σχέση με άλλα γειτονικά ορυκτά ή το βάλαμο του Καναδά ($\delta=1,54$).
- iv. Κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά: Το περίγραμμα και η συμμετρία των ιδιόμορφων ή υπιδιόμορφων κρυστάλλων των ορυκτών. Τα χωρίς σχήμα ορυκτά χαρακτηρίζονται ως αλλοτριόμορφα.
- v. Σχισμός: Προσδιορίζονται το είδος του σχισμού, ο βαθμός τελειότητας και ο προσανατολισμός σε σχέση με κρυσταλλογραφικά στοιχεία.
- vi. Αλλοιώσεις και εγκλείσματα: Προσδιορίζονται το είδος, η έκταση και ο τυχόν κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός των αλλοιώσεων καθώς και η φύση, το μέγεθος, η διάταξη και η πυκνότητα των εγκλεισμάτων.
- vii. Διπλοθλαστικότητα: Η έντασή της προσδιορίζεται με βάση τα χρώματα πόλωσης και τη χρήση της κλίμακας Michel-Levy.
- viii. Κατάσβεση: Ομοιογενής ή κυματοειδής. Κατασβεστική γωνία (μέγιστη γωνία μεταξύ μιας οπτικής κατεύθυνσης και μιας κρυσταλλογραφικής κατεύθυνσης).
- ix. Ζωνώδης δομή: Η τυχόν ζώνωση, που παρουσιάζουν μερικά ορυκτά.
- x. Διδυμία απλή ή πολλαπλή ή πολλαπλή πολυσύνθετη.
- xi. Χρώματα πόλωσης, κανονικά ή ανώμαλα.
- xii. Επιμήκυνση: Διέλευση φωτός με το μεγαλύτερο ή μικρότερο δείκτη διάθλασης.

6.1.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) – Φασματοσκοπία διασπειρόμενης ενέργειας (EDS)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscopy) με δυνατότητα ονομαστικής μεγέθυνσης από 10 μέχρι 300.000 φορές, χρησιμοποιείται για τη μορφολογική παρατήρηση γεωλογικών, μεταλλουργικών, πολυμερών και λοιπών δειγμάτων καθώς και για λήψη εικόνων μεγάλης ευκρίνειας δευτερογενών (Secondary Electron Images) και οπισθοσκεδαζόμενων (Backscattered Electron Images) ηλεκτρονίων (Μανούδης, 2009).

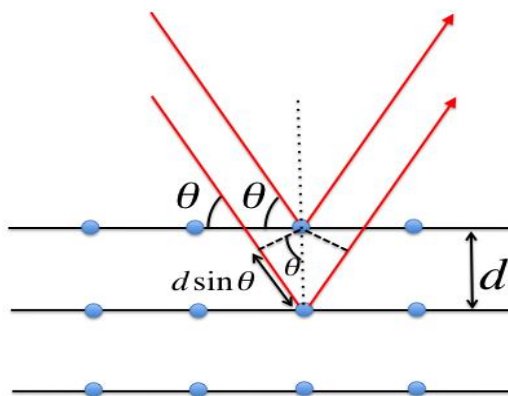
Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών. Η ικανότητα των οπτικών μικροσκοπίων

περιορίζεται λόγω της φύσης του φωτός σε επίπεδα μεγεθύνσεων έως 1000x και σε διακριτική ικανότητα έως 0.2 μm . Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο, που λειτουργεί, όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο, μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιαστούν, όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή, προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων, που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Συνεπώς, το SEM δίνει πληροφορίες, που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Η ενέργεια της ακτινοβολίας X είναι χαρακτηριστική της ατομικής δομής του κάθε στοιχείου. Επομένως, η συλλογή της με ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X, που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, επιτρέπει τη στοιχειακή ανάλυση του δείγματος. Η τεχνική αυτή ονομάζεται φασματοσκοπία ακτίνων X διασπειρόμενης ενέργειας (Energy Dispersive Spectroscopy). Το όριο της χημικής ανάλυσης με SEM-EDS είναι $\sim 0.01\%$ για στοιχεία με $Z > 11$ (Na).

Συμπερασματικά θα λέγαμε, ότι το SEM χρησιμοποιείται για την εξέταση της μικροδομής στερεών δειγμάτων και για λήψη εικόνων με υψηλό βαθμό διείσδυσης (Κουή et al., Skoog et al., 1992).

6.1.5. Περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)

Με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων X πραγματοποιείται ποιοτικός και ημιποσοτικός προσδιορισμός των ορυκτών συστατικών ενός πετρώματος. Η ακτινογραφική ανάλυση είναι η βασικότερη και ακριβέστερη μέθοδος για την αναγνώριση και το χαρακτηρισμό των ορυκτών συστατικών ενός πετρώματος. Ο διαχωρισμός των ορυκτών γίνεται με βάση τις ανακλάσεις σε κάθε διάγραμμα περίθλασης, διευκολύνοντας έτσι την ποιοτική και ημιποσοτική ανάλυση.



Σχέδιο 6.1. Περιθλαση ακτίνων X (Μεραχτσάκη, 2013)

Η ένταση μιας χαρακτηριστικής ανάκλασης ενός ορυκτού σε γωνία 2θ , δίνει τον ημιποσοτικό προσδιορισμό του, καθώς είναι ανάλογη της αφθονίας του στο πέτρωμα. Επιπλέον, είναι ανάλογη του μεγέθους των κόκκων και του βαθμού της κρυσταλλικής τελειότητάς τους. Λεπτομερείς κόκκοι δίνουν ασθενέστερες ανακλάσεις, που δεν μπορούν να εκτιμηθούν ακριβώς, όταν υπάρχουν ισχυρότερες ανακλάσεις από πιο αδρομερείς κόκκους του ίδιου ορυκτού (Brundle et al., 1992).

Το πάχος των κρυσταλλιτών καθορίζει το πλάτος των κορυφών στο φάσμα της περίθλασης των ακτίνων X. Συγκεκριμένα, οι μικρότεροι κρύσταλλοι παράγουν πλατύτερες κορυφές. Το μέγεθος των κρυσταλλιτών μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης Sherrer (Moballeggh et al., 2007, Μανούδης, 2009):

$$t = \frac{K \cdot \lambda}{B \cdot \cos\theta_B}$$

όπου:

t = το πάχος του κρυσταλλίτη

K = σταθερά η οποία εξαρτάται από σχήμα του κρυσταλλίτη (0.89)

λ = το μήκος κύματος των ακτίνων X (1.541 nm)

B = FWHM (το μέγιστο πλάτος της κορυφής στο μισό του ύψους της)

θ_B = Γωνία Bragg.

Η εφαρμογή της εξίσωσης Sherrer είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό του μεγέθους των κρυστάλλων μίας ένωσης με μέγεθος <1000 Å.

Για να πάρουμε αξιόπιστο διάγραμμα περίθλασης ενός δείγματος, θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους όπως:

- i. Να είναι αντιπροσωπευτικό του όλου πετρώματος.
- ii. Ο χρόνος κονιοποίησης του δείγματος να είναι ανάλογος της σκληρότητάς του. Η έντονη και μακροχρόνια κονιοποίηση πρέπει να αποφεύγεται, γιατί καταστρέφει και/ή διαστρέφει το κρυσταλλικό πλέγμα, οπότε αλλοιώνεται η ποιότητα των κορυφών περίθλασης. Είναι απαραίτητο όμως, να πετύχουμε καλή ομογενοποίηση του δείγματος.
- iii. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι, τόσο πιο λείες και ομαλές είναι οι κορυφές περίθλασης.

Η ακρίβεια των ακτινογραφικών προσδιορισμών εξαρτάται από την επιτυχία παρασκευής του παρασκευάσματος, από την ευαισθησία του περιθλασίμετρου, αλλά και από υποκειμενικά κριτήρια (Ζερβός, 2004).



Εικόνα 6.2. Γουδί από αχάτη για κονιοποίηση

6.2. Προσδιορισμός προέλευσης μαρμάρων

6.2.1. Ισοτοπική μελέτη C και O

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πηγής προέλευσης της πρώτης ύλης αντικειμένων από μάρμαρο μέσα από τις αναλύσεις σταθερών ισοτόπων άνθρακα (C) και οξυγόνου (O). Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται ο λόγος του C_{13} σε σχέση με τον C_{12} , που αποτελεί το πιο συνηθισμένο ισότοπο του στοιχείου αυτού. Αντίστοιχα, και για το οξυγόνο προσδιορίζεται ο λόγος του O_{18} σε σχέση με το πιο συνηθισμένο ισότοπο O_{16} . Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι δυο αυτοί λόγοι παραμένουν σταθεροί για μια περιοχή και δε διαφοροποιούνται σημαντικά σε μια εμφάνιση μαρμάρου.

Επιπλέον, από συστηματικές μελέτες, που έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές τα τελευταία τριάντα χρόνια, προκύπτει ότι η σχέση των δυο παραπάνω λόγων μπορεί να αποτελέσει ένα διαγνωστικό στοιχείο για τα συγκεκριμένα αρχαία λατομεία μαρμάρου. Τα πλεονεκτήματα της γεωχημικής αυτής μεθόδου είναι: α) η πολύ μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, β) οι σημαντικές διαφορές, που προκύπτουν από τη σχέση των λόγων των ισοτόπων του C και του O από μάρμαρα διαφορετικών περιοχών και γ) η μικρή ποσότητα που απαιτείται (έως 20 mg), ώστε να μην προκαλούνται καταστροφές στο αρχαιολογικό εύρημα.

Οι ισοτοπικές τιμές οξυγόνου και άνθρακα των περισσότερων λατομείων των κλασικών χρόνων είναι σχετικά ομογενείς και μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως γεωχημικοί δείκτες προέλευσης. Σημαντικό πλεονέκτημα της ισοτοπικής ανάλυσης αποτελεί η χρήση πολύ μικρής ποσότητας υλικού για ανάλυση (περίπου 20 mg), που εύκολα λαμβάνεται κατά τις μελέτες προσδιορισμού της προέλευσης μαρμάρινων καλλιτεχνημάτων, χωρίς να προκαλείται ορατή καταστροφή τους.

Η ισοτοπική σύσταση οξυγόνου και άνθρακα των πιο γνωστών ελληνικών λευκών μαρμάρων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της προέλευσης τους. Οι τιμές ισοτόπων οξυγόνου και άνθρακα βρίσκονται μέσα στις περιοχές τιμών, που ο Herz έχει καθιερώσει με την τράπεζα δεδομένων του. Τιμές ισοτόπων οξυγόνου και άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα

για τον προσδιορισμό της προέλευσης μαρμάρινων αγαλμάτων, συσχετίζοντας αυτές με τις ισοτοπικές συστάσεις μαρμάρων αρχαίων και σύγχρονων λατομείων.

Η ισοτοπική ανάλυση περιλαμβάνει τη μέτρηση των σχέσεων $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ και $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ μετά από χημική κατεργασία του κονιοποιημένου ανθρακικού υλικού, που έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση οξυγόνου και άνθρακα ως CO_2 από κάθε δείγμα. Οι παράγοντες, που επηρεάζουν την ισοτοπική σύσταση του οξυγόνου και του άνθρακα σε ένα πέτρωμα είναι κυρίως η θερμοκρασία, η χημική του σύσταση και η ισοτοπική σύσταση του νερού. Διαφορές τιμών $\delta^{18}\text{O}$ μεγαλύτερες από -6 ‰ έχουν προσδιοριστεί σε ανθρακικά πετρώματα, που σχηματίζονται σε θερμοκρασία περίπου 0°C στον πυθμένα των ωκεανών ή σε θερμοκρασία περίπου 30°C κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Μεγάλες ισοτοπικές διαφορές τιμών σε ανθρακικά πετρώματα οφείλονται κυρίως: α) Στην ανταλλαγή ισοτόπων μεταξύ των ανθρακικών και πυριτικών ορυκτών μέσα σε αυτά τα πετρώματα ή στην επαφή με τα γειτονικά τους, β) σε απότομη μεταμορφική βαθμίδα και γ) σε αποσάθρωση. Με αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης του ασβεστόλιθου σε μάρμαρο, οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ μειώνονται και η μείωση εξαρτάται από το ύψος της θερμοκρασίας (Craig et al., 1972, Manfra et al., 1975, Germann et al., 1980, Herz, 1987, Melfos, 2004, Melfos et al., 2010).

6.3. Μελέτη φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των λίθων

6.3.1. Περιεχόμενη υγρασία

Η περιεχόμενη υγρασία εκφράζεται με έναν δείκτη, ο οποίος αντιπροσωπεύει την μάζα του νερού, που περιέχεται στο πέτρωμα, δηλαδή στα κενά του και εκφράζεται ως η εκατοστιαία αναλογία της μάζας του δείγματος σε ξηρή κατάσταση. Η περιεχόμενη υγρασία W_c υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$W_c (\%) = \frac{\text{μάζα νερού } (M_w)}{\text{μάζα στερεών } (M_s)} \cdot 100$$

Σε περίπτωση που το πέτρωμα βρίσκεται στη φυσική του κατάσταση, χρησιμοποιούμε τον όρο φυσική υγρασία. Εάν το βραχώδες υλικό δεν είναι κορεσμένο, τότε υπολογίζουμε τον βαθμό κορεσμού, δηλαδή τον λόγο του όγκου του περιεχόμενου νερού προς τον όγκο των πόρων του.

Η αύξηση της υγρασίας προκαλεί την μείωση της μηχανικής αντοχής του πετρώματος. Σε γενικές γραμμές, τα κρυσταλλικά υλικά έχουν πολύ χαμηλές τιμές υγρασίας, δηλαδή μέχρι 1%, ενώ τα αργιλικά μπορεί να έχουν μέχρι και 30% (Σαμπατακάκης, Χρηστάρας, 2003, Χρηστάρας, 2005, Κορωνάιος et al., 2006, Γιαννοπούλου, 2011).

6.3.2. Πορώδες

Πορώδες ονομάζεται ο λόγος του όγκου των κενών V_v ενός δείγματος, δια του συνολικού του όγκου V_t :

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100$$

Το πορώδες διακρίνεται σε ολικό πορώδες και ανοικτό ή ενεργό πορώδες. Το πρώτο αναφέρεται στο σύνολο των πόρων, ενώ το δεύτερο αναφέρεται μόνο στους πόρους, που επιτρέπουν την ροή νερού. Ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών συστατικών ενός πετρώματος ονομάζεται λόγος κενών (e).

Κατά την πειραματική διαδικασία, τα δείγματα/δοκίμια τοποθετούνται ξεχωριστά το καθένα σε ατομικές κάψουλες πορσελάνης και κατόπιν σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας για 24 ώρες με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας. Στη συνέχεια κάθε δείγμα ζυγίζεται. Κατόπιν τοποθετούνται εκ νέου σε ατομικές κάψουλες πορσελάνης και προτίθεται απιονισμένο νερό. Τα δείγματα μένουν στο νερό για 24 ώρες. Έπειτα, απομακρύνονται από το νερό και ζυγίζονται εκ νέου. Η διαφορά των δύο τιμών βάρους οφείλεται στην απορρόφηση νερού από το πέτρωμα και με βάση αυτές τις τιμές προκύπτει το πορώδες (Παπαδόπουλος et al., Σαμπατακάκης, Manger, 1963, Τσότσος, 1991, Γραμματικόπουλος et al., 1998, Χρηστάρας, 2003).

6.3.3. Ξηρό φαινόμενο βάρος - Φαινόμενο βάρος

Η *πυκνότητα* (ρ) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής μάζας προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος και εκφράζεται σε gr/cm^3 .

$$\rho = \frac{W}{V}$$

όπου W το συνολικό βάρος του δείγματος, όπου συμπεριλαμβάνονται και οι πόροι με το περιεχόμενό τους (αέρας + νερό) και V ο συνολικός όγκος του δείγματος. Το *φαινόμενο βάρος* (γ_b) εκφράζεται σε kN/m^3 και ισχύει:

$$\gamma_b = \rho \cdot g$$

Επειδή έχει πρακτικά παρόμοια σημασία με την πυκνότητα, στην εργασία αυτή θα θεωρήσουμε τις δύο έννοιες ταυτόσημες.

Το *ξηρό φαινόμενο βάρος* (γ_d) ορίζεται ως ο λόγος του βάρους των στερεών προς τον ολικό όγκο του δοκιμίου, μετά από ξήρανση 24 ωρών στους 110°C , και εκφράζεται σε kN/m^3 :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

Κατά την πειραματική διαδικασία τα στεγνά δείγματα ζυγίζονται ξεχωριστά το καθένα σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας. Στη συνέχεια, το κάθε δείγμα τοποθετείται σε ογκομετρικό δοχείο με ποσότητα απιονισμένου νερού (25 ή 50 ή 100 ml), ανάλογα με το μέγεθός του. Κατόπιν συμπληρώνεται απιονισμένο νερό με τη χρήση σιφωνίου, έως ότου καλυφθεί η επάνω επιφάνεια.

Ωστόσο, σε περίπτωση που έχει προσδιοριστεί η φυσική υγρασία, υπολογίζεται και το ξηρό φαινόμενο βάρος ως εξής:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W_c}$$

Το ειδικό βάρος (γ_s) ενός πετρώματος είναι ο λόγος του βάρους ορισμένου όγκου στερεών, προς το βάρος ίσου όγκου απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4°C.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

Με δεδομένο ότι το ειδικό βάρος του νερού, σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας ισούται με 1, το ειδικό βάρος ενός πετρώματος ισούται αριθμητικά με το λόγο του βάρους των στερεών προς τον αντίστοιχο όγκο τους (Σαμπατακάκης, Τσότσος, 1991, Γραμματικόπουλος et al., 1998, Χρηστάρας, 2003, Χρηστάρας, 2005).

6.3.4. Δοκιμή σημειακής φόρτισης

Η δοκιμή σημειακής φόρτισης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμίων από πετρώματα, τόσο στο ύπαιθρο, όσο και στο εργαστήριο. Από τη δοκιμή λαμβάνεται ο Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση $I_{s(50)}$, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων, από πλευράς αντοχής αλλά και για την έμμεση εκτίμηση, χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής, σε διαφόρων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος μπορεί επίσης, να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του (Broch et al., 1972).

Η δοκιμή σημειακής φορτίσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κυλινδρικά δοκίμια αξονικά ή αντιδιαμετρικά, καθώς και σε ορθογωνικά ή ακανόνιστης μορφής δοκίμια.

Με τη φόρτιση του δοκιμίου μεταξύ των ακμών φόρτισης, το δοκίμιο θραύεται σε εφελκυσμό κατ' αναλογία με τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης. Το φορτίο επομένως, στο οποίο θραύεται το δοκίμιο συναρτάται άμεσα με την αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό και έμμεσα με την αντοχή του σε θλίψη. Ο μη διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση (Uncorrected Point Load Strength Index) I_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

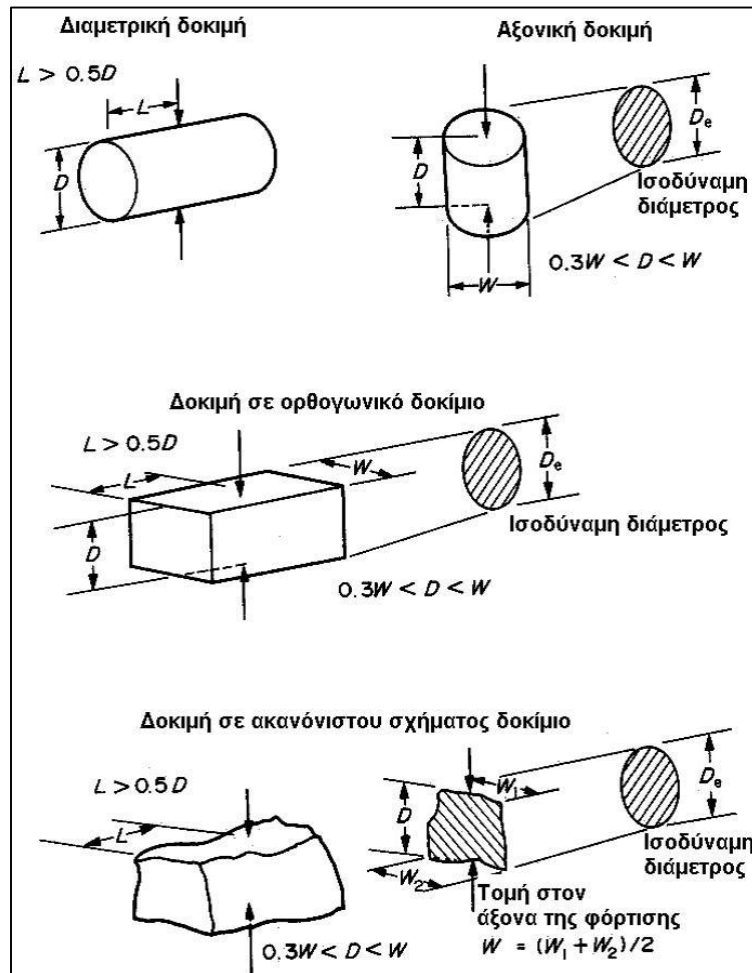
όπου:

P το φορτίο τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου

D_e η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$D_e^2 = D^2$ για την περίπτωση διαμετρικής δοκιμής

= $4A/\pi$ για την περίπτωση αξονικής δοκιμής και δοκιμής ορθογωνικού ή ακανόνιστου δοκιμίου, όπου $A = W \times D$ η επιφάνεια του επιπέδου, που διέρχεται από τα σημεία φόρτισης (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1. Εναλλακτικοί τρόποι φόρτισης ανάλογα με το σχήμα του δοκιμίου και απαιτούμενες διαστάσεις των δοκιμίων (ISRM, 1985)

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δοκιμών σε διάφορες διαμέτρους απαιτείται διόρθωση του υπολογιζόμενου δείκτη I_s , ο οποίος είναι συνάρτηση της ισοδύναμης διαμέτρου D_e του δοκιμίου. Ο διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση $I_{s(50)}$ (size-corrected Point Load Strength Index) ορίζεται ως η τιμή του I_s , όταν πραγματοποιείται διαμετρική δοκιμή με $D = 50$ mm. Η διόρθωση μεγέθους μπορεί να γίνει με τη σχέση:

$$I_s = F \cdot I_s$$

όπου F ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους (Size Correction Factor, F), ο οποίος λαμβάνεται από τη σχέση:

$$F = (D_e/50)^{0.45}$$

Σύμφωνα με τις οδηγίες της I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics), η παραπάνω διόρθωση μεγέθους είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τη ύπαρξη ανισοτροπίας στο πέτρωμα και από τη διεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τα επίπεδα αδυναμίας του πετρώματος (Τσότσος, 1991, Γραμματικόπουλος et al., 1998, Κούκης et al., 2002, Σοφιανός et al., 2008). Ο Πίνακας 6.1 δίνει τον χαρακτηρισμό της αντοχής του πετρώματος με βάση την τιμή του δείκτη.

Πίνακας 6.1. Ταξινόμηση πετρώματος με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ σε MPa (Bieniawski, 1975, Σοφιανός et al., 2008)

Περιγραφή	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνίσταται η δοκιμή (<1)

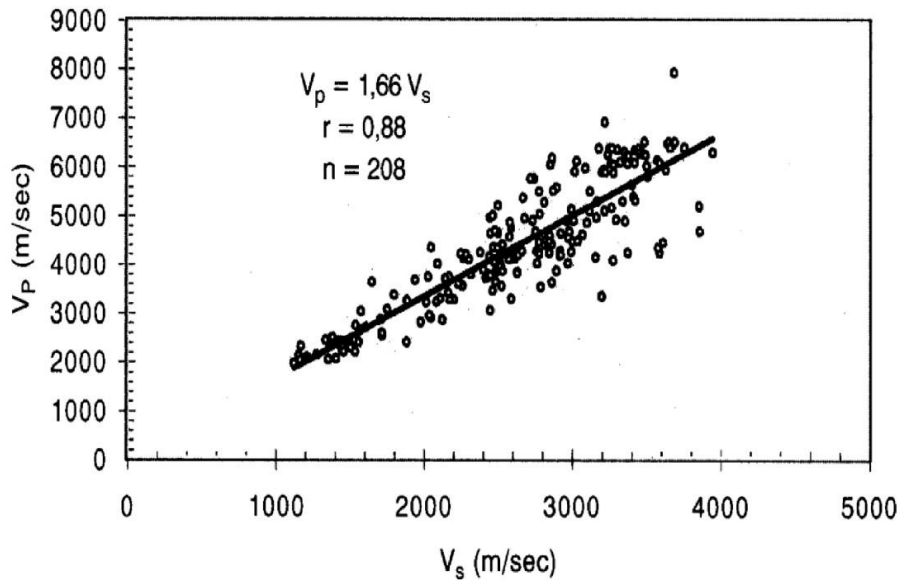
Η I.S.R.M. (1985) δίνει οδηγίες για την εκτέλεση τεσσάρων τύπων δοκιμής: (α) Διαμετρική δοκιμή, (β) Αξονική δοκιμή, (γ) Δοκιμή ορθογωνικού δοκιμίου και (δ) Δοκιμή ακανόνιστου δοκιμίου.

6.3.5. Υπερήχοι - Ταχύτητα υπερήχων

Η ένταση των ηχητικών κυμάτων, όταν αυτά διέρχονται διαμέσου ενός υλικού, μειώνεται, διότι μέρος της ενέργειάς τους μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας. Έτσι, κύμα με ένταση J_0 , που διέρχεται μέσα από υλικό πάχους l , εξέρχεται με μειωμένη ένταση J , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu l}$$

Αυτό σημαίνει πως η ένταση του κύματος ελαττώνεται εκθετικά με το πάχος του υλικού. Ο συντελεστής μ ονομάζεται "συντελεστής εξασθένησης" και εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος και το είδος του υλικού. Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων, που διέρχονται από το ακέραιο πέτρωμα εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος, την πυκνότητα και το πορώδες του. Γενικά, η ταχύτητα επηρεάζεται από τις οποιεσδήποτε μικρορωγμές και ασυνέχειες, που πιθανόν υπάρχουν στο υλικό (Κούκης et al., 2002, Χρηστάρας, 2003, Χρηστάρας, 2005, Σοφιανός et al., 2008).



Σχήμα 6.2. Σχέση μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης των επιμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για διάφορα πετρώματα του Ελλαδικού χώρου (Κούκης *et al.*, 2002)

Για να μετρήσουμε την ταχύτητα των κυμάτων αυτών, πραγματοποιούμε μια απλή μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία τοποθετούμε στο ένα άκρο του πυρήνα του πετρώματος ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, που δημιουργεί τα ηχητικά κύματα, τα οποία τα λαμβάνουμε στο άλλο άκρο με δέκτη. Έτσι, μετράμε άμεσα το χρόνο διαδρομής των διαμηκών (P) και διατμητικών (S) κυμάτων, που διατρέχουν το βραχύδες δοκίμιο. Στη συνέχεια, με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων V_s και V_p μπορούμε να υπολογίσουμε τα δυναμικά μέτρα διάτμησης (G) και ελαστικότητας (E) καθώς επίσης και τον λόγο Poisson (ν), σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E = \frac{\rho V_p^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

Όπου: ρ : πυκνότητα του υλικού

V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων

V_s : ταχύτητα διατμητικών κυμάτων

G : δυναμικό μέτρο διάτμησης

ν : λόγος Poisson

E : δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Η ταχύτητα V_p συνδέεται με την V_s με τη σχέση $V_p \approx 1,7 * V_s$, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, στο οποίο παρουσιάζεται η σχέση των δύο ταχυτήτων για διάφορα πετρώματα του Ελλαδικού χώρου (Σοφριανός et al., 2008).

6.3.6. Ποροσιμετρία υδραργύρου

Η τεχνική ποροσιμετρίας υδραργύρου είναι μια τεχνική, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πορώδους, του μεγέθους και της κατανομής των πόρων. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μικρά, καθαρά και στεγνά δείγματα ακαθόριστου σχήματος, γεγονός που αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου. Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό κλωβό, όπου μπορεί να εισαχθεί υδράργυρος με ελεγχόμενη ποσότητα και πίεση. Ο υδράργυρος εισάγεται στο δείγμα και πραγματοποιούνται οι αυξητικές καταγραφές του όγκου υδραργύρου, που εισάγεται. Η τυπική είσοδος στο δείγμα μπορεί να φτάσει στα 60.000 psi.

Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει την απευθείας μέτρηση του πορώδους, το οποίο στην υπό χαμηλή πίεση, εισαγωγή υδραργύρου θεωρείται ίσο με το μηδέν. Η διαφορά του όγκου πριν και μετά την εισαγωγή του υδραργύρου αποτελεί την τιμή του πορώδους στο δείγμα. Στη μέγιστη πίεση θεωρείται ότι ο υδράργυρος έχει εισαχθεί μέσα σε όλα τα διάκενα του δείγματος. Ο συνολικός όγκος του υδραργύρου θεωρείται ότι είναι ο συνολικός όγκος των πόρων στη συγκεκριμένη πίεση.

Με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου προκύπτει ο ποσοτικός προσδιορισμός του πορώδους καθώς και το μέγεθος των πόρων (Giesche, 2006, Κατσιώτη et al., 2008).

6.4. Μέθοδοι μελέτης της φθοράς των λίθων

6.4.1. Θερμομέτρηση *in situ* με θερμόμετρο ακτίνας laser

Η υπέρυθη θερμογραφία είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος εξέτασης των υλικών, κατά την οποία καταγράφεται και μετριέται η θερμική ακτινοβολία, που εκπέμπεται από ένα υλικό έμψυχο ή άψυχο στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος. Η πιο βασική αρχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι γνωστή ως νόμος του Kirchoff, όπου κατά τη θερμική ισορροπία, η ισχύς της ακτινοβολίας εντός υλικού πρέπει να είναι ίση με την ισχύ της απορροφητικής του ικανότητας.

Η θερμομέτρηση των επιφανειών των λίθων *in situ*, δίνει πληροφορίες για την κατάσταση διαβροχής των λίθων. Το νερό αποτελεί σημαντικό διαβρωτικό παράγοντα, συνεπώς είναι αναγκαίος ο εντοπισμός του με τη βοήθεια της θερμομέτρησης. Με τη μέθοδο αυτή καθορίζεται το ύψος, στο οποίο έχει ανυψωθεί το νερό μέσω των τριχοειδών φαινομένων και γίνεται αποτίμηση της κατανομής της υγρασίας. Η θερμομέτρηση πραγματοποιείται με ένα θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας, ώστε να καταγραφούν καλύτερα μικρές διαφορές θερμοκρασίας στον ίδιο λίθο. Στην

προσπάθεια μια ολοκληρωμένης μελέτης πραγματοποιούνται μετρήσεις σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες, καλοκαίρι και χειμώνα.

6.4.2. Άλλες μέθοδοι

Στις μεθόδους μελέτης της φθοράς των λίθων συγκαταλέγονται και κάποιες μέθοδοι, οι οποίες προαναφέρθηκαν, όπως το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και η μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων.

Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρατηρούνται αλλαγές στην επιφάνεια του δείγματος σε σχέση με ένα αντίστοιχο μη διαβρωμένο δείγμα. Ο σχηματισμός ενώσεων, λόγω διάβρωσης των λίθων μπορούν να εντοπιστούν με τη στοιχειακή ανάλυση της μεθόδου EDS διασπειρόμενης ενέργειας. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να γίνει μια αρχική μελέτη της έκτασης της φθοράς. (Κεφ.6.1.3. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) - Φασματοσκοπία διασπειρόμενης ενέργειας (EDS))

Πίνακας 6.1. Ταχύτητες διαδόσεως P-κυμάτων, για διάφορους τύπους πετρωμάτων με ύπαρξη ασυνεχειών και χωρίς ασυνέχειες (Σοφριανός et al., 2008).

Τύπος πετρώματος	Θλιπτικό κύμα (P)	
	Έντονα ρωγματωμένο	Έντονα ρωγματωμένο
Ασβεστόλιθος	2000	5900
Μεταμορφωμένα πετρώματα	2100	3500
Βασάλτης	2300	4500
Γρανίτης	2400	5000
Άμμος	500	2000
Άργιλος	400	1700

Οι δείκτες, που προκύπτουν από τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων, βοηθούν στην εκτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης και του βάθους των επιφανειακών ρωγμών. Οι ασυνέχειες των λίθων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, η ταχύτητα του διαμήκους κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη στο άθικτο πέτρωμα απ' ότι στο ρωγματωμένο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, η διαφορά αυτή στην ταχύτητα, είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών, απ' ότι μεταξύ των διαφορετικών τύπων πετρωμάτων (βλ. 6.3.5 Υπέρηχοι - Ταχύτητα υπερήχων).

6.4.3. Βρύα-Λειχήνες

Γενικά

Τα βρύα και οι λειχήνες αποτελούν ένα σημαντικό διαβρωτικό παράγοντα για τα μνημεία του Ελλαδικού χώρου. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αρχίζει με την καταγραφή των διαφόρων ειδών λειχήνων με διαφορετικές κλιματολογικές και περιβαλλοντολογικές ιδιαιτερότητες. Εφόσον προσδιορισθεί το είδος που εποικεί την επιφάνεια ενός μνημείου, έχει συντελεσθεί το πρώτο και αποφασιστικότερο βήμα στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Κατόπιν είναι εύκολο να διερευνηθούν οι ανατομικές ιδιότητες (δομή και ιδιαιτερότητες του θαλλού, τρόπος σύνδεσης με το υπόστρωμα κλπ.) και οι φυσιολογικές ιδιότητες τους (ρυθμός ανάπτυξης, διάρκεια ζωής, θρεπτικές προτιμήσεις κλπ.) (Savvidis et al., 2006, Σαββίδης, 2013).

6.4.3.1. Λειχήνες

Οι λειχήνες είναι σύνθετοι φυτικοί οργανισμοί και αποτελούνται από φύκη και μύκητες. Πρόκειται δηλαδή για οργανισμούς, που προκύπτουν από τη συμβίωση ενός μύκητα με ένα φύκος. Είναι οργανισμοί που δύναται να προκαλέσουν αλλοιώσεις σε ένα ευρύ φάσμα δομικών υλικών στα οποία εποικούν. Αυτό αποδεικνύεται με τη λήψη κατάλληλου δείγματος λειχήνα - υποστρώματος και με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και χημικών μεθόδων. Η επίδραση ενός λειχήνα στο πέτρωμα, στην προκειμένη περίπτωση, εξαρτάται από τη χημική σύσταση του υποστρώματος και τις συνθήκες, στις οποίες αυτό εκτίθεται.

Πολλά είδη λειχήνων δημιουργούν πρόβλημα στο πέτρωμα εξαιτίας της κατακράτησης υγρασίας, για τις ανάγκες του οργανισμού, κάτι το οποίο προκαλεί φθορά με την πάροδο του χρόνου. Το πρόβλημα μεγεθύνεται σε συνθήκες παγετού. Ακόμη, η διείδυση των μυκηλιακών υφών στο πέτρωμα προκαλεί διάβρωση και χαλάρωση σύνδεσης, δηλαδή τον διαχωρισμό μεριδίων του υποστρώματος. Επίσης, προκαλούν βλάβες στη συνεκτικότητα του λιθώδους ιστού και βιοδιάβρωση (Savvidis et al., 2006, Σαββίδης, 2013).

α. Μηχανικές επιδράσεις

Η διείδυση των υφών του λειχήνα μέσα στο υπόστρωμα προκαλεί διάβρωση και χαλάρωση της σύνδεση των μεριδίων του υποστρώματος. Οι φλοιώδεις και οι λεπιώδεις λειχήνες έχουν τη δυνατότητα να προσλαμβάνουν ταχύτατα μεγάλη ποσότητα νερού (σε σχέση με τη συνολική τους βιομάζα) και να το κατακρατούν για αρκετό χρονικό διάστημα.

Η πρόληψη και η αποβολή νερού από το θαλλό προκαλεί δυνάμεις, λόγω της αυξομείωσης του θαλλού σε χρόνο δευτερολέπτων. Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται αναγκαστικά επί του υποστρώματος, με συνέπεια να προκαλούνται και μηχανικές αλλοιώσεις πέρα από τις χημικές. Η όλη διαδικασία καθίσταται ιδιαίτερα επιβαρυντική για το υπόστρωμα και κυρίως όταν επικρατούν

συνθήκες παγετού. Οι επιδράσεις εμφανίζονται με την αισθητή διάβρωση του υποστρώματος και τη μείωση της συνεκτικότητας των συστατικών του, γεγονός που οδηγεί σε μια συνεχή σμίκρυνση της επιφάνειας του μνημείου.

β. Χημικές επιδράσεις

Οι λειχήνες μπορούν να διαβρώσουν τα πετρώματα με βιοχημικό τρόπο και συγκεκριμένα με τις ακόλουθες διαδικασίες:

1. Παραγωγή οξαλικού οξέως. Πολλοί λειχήνες περιέχουν οξαλικό ασβέστιο, το οποίο προκαλεί εκτεταμένα διαβρωτικά φαινόμενα σε ένα ευρύ φάσμα πετρωμάτων. Το οξαλικό οξύ εκκρίνεται από τα κύτταρα του μύκητα (του μυκοβιότη) ως παραπροϊόν του μεταβολισμού του, είναι ιδιαίτερα ευδιάλυτο στο νερό και δημιουργεί χημικές ενώσεις (πολύ σταθερές) στο χώρο ανάμεσα στο θαλλό και το υπόστρωμα.
2. Βιοχημικές ενώσεις όπως: λειχηνικά οξέα και άλλα οργανικά οξέα, τα οποία ως παραπροϊόντα του μεταβολισμού των λειχήνων, μπορούν να αλλοιώσουν την επιφάνεια των μαρμάρων.
3. Παράγεται διοξείδιο του άνθρακα κατά την αναπνοή των λειχήνων. Με την παρουσία του νερού διαλύεται ένα μέρος του διοξειδίου, οπότε το ανθρακικό οξύ που προκύπτει δημιουργεί κοιλότητες ή μικρά κανάλια, τα οποία καθιστούν ευκολότερη τη διείσδυση των υφών του λειχήνα μέσα στο υπόστρωμα. Η χημική δράση του διοξειδίου του άνθρακα θεωρείται περιορισμένη σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

γ. χρωματικές αλλοιώσεις

Επειδή ο θαλλός του λειχήνα περιέχει οργανικές χρωστικές προκαλεί με το χρόνο και χρωματικές αλλοιώσεις της επιφάνειας του υποστρώματος. Οι χρωστικές απορροφούνται από το υπόστρωμα και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

6.4.3.2. Βρύα

Τα βρύα είναι φυτά σχετικά μικρών διαστάσεων με ανώτερο βαθμό οργάνωσης από τους λειχήνες. Ωστόσο, δε διαθέτουν γνήσιο ριζικό σύστημα, γνήσιο βλαστό, ή γνήσια φύλλα. Απαντώνται σε υγρό έδαφος, υγρούς βράχους, δέντρα, εντός υδάτων, σημεία με χαμηλό φωτισμό και στις όχθες από τα ρυάκια. Έχουν την ικανότητα να προσκολλούνται σε σκληρά υποστρώματα, πχ. τσιμέντο. Τα βρύα είναι παθητικοί συσσωρευτές ραδιενεργών ισότοπων και βαρέων μετάλλων (ατμοσφαιρική ρύπανση) και οι ποσότητες που συσσωρεύουν είναι πολλαπλάσιες από τα ανώτερα φυτά. Τα βρύα συγκρατούν την ατμοσφαιρική σκόνη και δημιουργούν ένα υπόστρωμα ικανό να υποδεχτεί και αλλα φυτά. Εδώ υπάγονται αυτότροφα φυτά, σχετικά μικρών διαστάσεων. Οι

οργανισμοί αυτοί ανέρχονται περίπου στους 26.000. Γενικά μπορεί να τα συναντήσει κανείς, όπου υπάρχει αρκετή υγρασία, η οποία είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη τους (Savvidis et al., 2006, Σαββίδης, 2013).

6.4.4. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας αποτελεί έναν ευρύ επιστημονικό κλάδο, που αφορά τη μετατροπή μιας εικόνας σε ψηφιακή μορφή και στη συνέχεια στην επεξεργασία της. Με την επεξεργασία πραγματοποιείται ποσοτικοποίηση αντιπροσωπευτικών τύπων φθοράς στις επιφάνειες των φωτογραφιών. Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στο διαφορετικό ποσοστό ανάκλασης και απορρόφησης του ορατού φάσματος (φωτός) από την εξεταζόμενη επιφάνεια ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Οι διάφοροι τύποι φθοράς απεικονίζονται στην τελική μορφή της εικόνας με διαφορετικά χρώματα (ψευδοχρώματα), τα οποία προκύπτουν από την κατηγοριοποίηση των περιοχών του γκριζου της ασπρόμαυρης ψηφιακής πλέον εικόνας (διαχωρισμός αντικειμένου-segmentation), βάσει κριτηρίων, όπως η μικροδομή και η μορφολογία των αποδιδόμενων τύπων φθοράς.

Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φθοράς σε επιφάνειες υλικών. Οι πληροφορίες των ορίων είναι πολύ σημαντικές, για την αναγνώριση περιοχών του υλικού, που έχουν υποστεί διάβρωση. Οι περιοχές αυτές, εμφανίζονται με διαφορετικό χρώμα και φωτεινότητα. Τέτοιες ασυνέχειες στην επιφάνεια ανιχνεύονται με τη χρήση παραγώγων, πρώτου και δευτέρου βαθμού. Οι παράγωγοι πρώτου βαθμού χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση γρήγορων αλλαγών της φωτεινότητας, ενώ οι δευτέρου βαθμού υπολογίζονται κυρίως με τη χρήση του τελεστή Laplace $\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$, ως συμπλήρωμα της πρώτης παραγώγου, για την ανίχνευση του μεγίστου της φωτεινότητας και την εύρεση της κατεύθυνσής της και της μετάβασης του χρώματος.

Αν θεωρήσουμε $I(x, y)$ τη φωτεινότητα για μια εικόνα, η κλίση της είναι το διάνυσμα $\vec{\nabla} I(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \vec{j}$ όπου \vec{i} και \vec{j} είναι οι μονάδες στις κατευθύνσεις x και y . Μια κατάλληλη μέθοδος για τον καθορισμό της μετάβασης της φωτεινότητας, είναι το μέτρο του

διανύσματος στον Ευκλείδειο χώρο: $\nabla I(x, y) = \|\vec{\nabla} I(x, y)\| = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2}$. Η κλίση στο σημείο,

αυτό, είναι μέγιστη αν κινηθούμε κατά τη διεύθυνση του επιπέδου που προσδιορίζει η γωνία $\alpha(x, y) = \tan^{-1} \frac{\partial I(x, y) / \partial x}{\partial I(x, y) / \partial y}$. Για τη λήψη των παραγώγων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Sobel edge. Αυτή η

τεχνική είναι πολύ εύκολη και γρήγορη, χρησιμοποιώντας 3x3 εικονοστοιχεία εκατέρωθεν του βασικού. Τα G_x και G_y είναι κλίσεις της φωτεινότητας στην ψηφιακή εικόνα προς τις κατευθύνσεις

x και y , αντίστοιχα. Τότε η ένταση του σημείου ή πίξελ, $p_s = (x_1(s), x_2(s))$, όπου $s=1, 2, 3, \dots, n$ ο αριθμός των εικονοστοιχείων σε ορθογώνια εικόνα $n \times n$, προσεγγίζεται από την πολυωνυμική εξίσωση της έντασης της εικόνας ενός ομογενούς μπλοκ εικονοστοιχείων γύρω από την ορθογώνια περιοχή U . Ένα τέτοιο πολυώνυμο δίνεται από τον τύπο $I_{obs}(p_s) = I(p_s) + \varepsilon_s$, όπου $I_{obs}(p_s)$ είναι η ένταση σε κάθε εικονοστοιχείο της περιοχής και ε το σφάλμα της παρατήρησης με $E[\varepsilon_s] = 0$. Έστω x το κέντρο της παρατήρησης και U_x η γειτονιά του x όπου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση. Έπειτα, η εκτίμηση της λειτουργίας λαμβάνεται από τη μέση τιμή $I_{est}(x) = \frac{\sum_{s \in U_x} I_{obs}(x_s)}{N_x}$, όπου N_x είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων. Η εκτίμηση ελέγχεται από μια συνάρτηση w . Χρησιμοποιώντας τη σειρά Taylor έχουμε:

$$I(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_2 + dx_1x_2 + b_2x_1^2 + c_2x_2^2 +$$

και μελετώντας τη γραμμική προσέγγιση έχουμε:

$$I(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_2$$

και ελαχιστοποιώντας το σφάλμα

$$E(a,b,c) = \frac{\sum_x w_x^2 (a + bx_1 + cx_2 - I_{obs}(x_s))^2}{N_x}$$

Από την προηγούμενη εξίσωση και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συμβολισμός του x, y , αλλάξαν σε x_1, x_2 αντίστοιχα, η κλίση της φωτεινότητας δίνεται από:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \frac{\partial I}{\partial x_1} = b \quad \text{και} \quad \frac{\partial I}{\partial y} = \frac{\partial I}{\partial x_2} = c.$$

Η τεχνική Sobel χρησιμοποιεί μια μάσκα 3x3 με τιμές ως εξής:

$$W = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 1/\sqrt{2} \\ 1 & w & 1 \\ 1/\sqrt{2} & 1 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}.$$

Οι αντίστοιχες μάσκες για τον υπολογισμό των a, b, c είναι:

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & w^2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω αλγόριθμους βρίσκουμε τις αντίστοιχες κλίσεις και λαμβάνουμε μια BW εικόνα για κάθε εικόνα. Η ανάλυση των επιφανειών των υλικών που καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης, παρουσιάζουν στενή σχέση με τις αλλοιωμένες περιοχές της τεχνικής ανίχνευσης ακμών (Ascaso et al., 1994, Sharifi et al., 2002, Gonzalez et al., 2009, Levkine, June 2012).

6.5. Μέθοδοι αξιολόγησης της προστατευτικής ικανότητας των επιστρωμάτων

6.5.1. Μέτρηση της τριχοειδούς υδαταπορρόφησης του λίθου

Με τη μέθοδο αυτή, αξιολογείται η δυνατότητα διείσδυσης του νερού στο εσωτερικό των υλικών. Οι μετρήσεις της τριχοειδούς απορρόφησης γίνονται ως εξής: τα δοκίμια αφού ζυγιστούν, τοποθετούνται με την επικαλυμμένη πλευρά πάνω σε διηθητικά χαρτιά (1cm χαρτιού Whatman, No 4) μερικώς εμβαπτισμένα σε απιονισμένο νερό (Σχέδιο 6.1). Μετά από 1h το δείγμα απομακρύνεται από το διηθητικό χαρτί και ζυγίζεται εκ νέου, προκειμένου να υπολογιστεί το βάρος του νερού, που απορροφήθηκε λόγω των τριχοειδών δυνάμεων (Peruzzi et al., 2003, Poli et al., 2004, Tsakalof et al., 2007, Μανούδης, 2009).



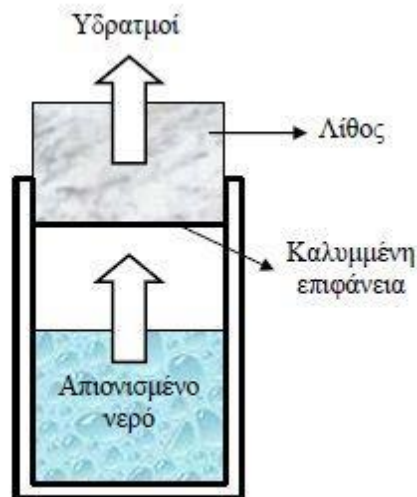
Σχέδιο 6.1. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης τριχοειδούς υδαταπορρόφησης του λίθου (Μανούδης, 2009)

6.5.2. Μέτρηση της διαπερατότητας του λίθου από τους υδρατμούς

Με τη μέτρηση της διαπερατότητας σε υδρατμούς, εξετάζεται η ικανότητα του πετρώματος να «αναπνέει», που σημαίνει να μην εγκλωβίζει στο εσωτερικό του νερό, το οποίο οδηγεί σε φθορά. Έτσι, τα δοκίμια τοποθετούνται στην κορυφή ενός κυλινδρικού δοχείου PVC το οποίο είναι γεμάτο μέχρι τη μέση με απιονισμένο νερό (Σχέδιο 6.2). Στη συνέχεια τα δοχεία σφραγίζονται, προκειμένου οι ατμοί να διέρχονται μόνο μέσα από τον λίθο και τοποθετούνται σε θάλαμο υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία και σχετική υγρασία (Tsakalof et al., 2007).

Τα δοχεία ζυγίζονται κάθε 24 h. Η ροή του ατμού θεωρείται ως σταθερή, όταν η ημερήσια διαφορά μεταξύ δύο διαφορετικών ζυγίσεων ΔM_{i-1} και ΔM_i ήταν μικρότερη από 5%:

$$\frac{\Delta M_i - \Delta M_{i-1}}{\Delta M_i} \times 100 < 5\%$$



Σχέδιο 6.2. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης της διαπερατότητας του λίθου από τους υδρατμούς (Μανούδης, 2009)

6.5.3. Ρόφηση υγρασίας με πλήρη βύθιση

Η μέτρηση της ρόφησης νερού είναι ένα χρήσιμο εργαστηριακό πείραμα, με το οποίο χαρακτηρίζονται τα πορώδη υλικά. Με τη μέτρηση αυτή αξιολογείται ο βαθμός διάβρωσης των υλικών και καταγράφονται τα αποτελέσματα των μεθόδων συντήρησης. Κατά την πειραματική διαδικασία, το υλικό βυθίζεται πλήρως σε απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου. Η ποσότητα νερού που απορροφάται εκφράζεται σε εκατοστιαία διαφορά από το ξηρό υλικό.

Τα δείγματα ξηραίνονται σε φούρνο στους 60°C για 24h. Έπειτα, τοποθετούνται σε ξηραντήρα, μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Ζυγίζονται και τοποθετούνται σε δοχεία, τα οποία στη συνέχεια γεμίζουν με απιονισμένο νερό. Κάθε 24h τα δοκίμια απομακρύνονται από το νερό και ζυγίζονται. Με βάση τους υπολογισμούς διαφοράς βάρους, προκύπτει η χωρητικότητα απορρόφησης νερού για κάθε υλικό (Teutonico, 1988, Price et al., 2011).

6.6. Ιοντική Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης

Η χρωματογραφία ανταλλαγής ιόντων είναι ένα είδος χρωματογραφίας στήλης, όπου ως υλικό πλήρωσης, χρησιμοποιούνται ιονανταλλακτικές ρητίνες. Διαφέρει όμως, από την κλασική χρωματογραφία στήλης στον τρόπο εισαγωγής του δείγματος στη στήλη, στο υλικό που χρησιμοποιείται και στο σύστημα ανίχνευσης.

Η κατακράτηση και ο διαχωρισμός των ιόντων με τη μέθοδο της ιονανταλλαγής στηρίζεται στην αλληλεπίδραση των ιόντων του δείγματος με την κινητή και τη στατική φάση. Τα ιόντα κατακρατούνται λόγω ιονανταλλαγής πάνω σε αντίθετα φορτισμένες ομάδες της στατικής φάσης. Η κινητή φάση πρέπει επίσης να περιέχει ιόντα, έτσι ώστε τα ιόντα του δείγματος να μη συζευγνύονται μόνο με τη στατική φάση, αλλά να ελευθερώνονται και πάλι εξαιτίας του ανταγωνισμού με τα ιόντα της κινητής φάσης.

Ο προσδιορισμός των ιοντικών ενώσεων σε ένα διάλυμα είναι ένα κλασικό αναλυτικό πρόβλημα, και έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές. Παρόλο που για τα κατιόντα υπάρχουν πολλές αποδοτικές τεχνικές ανάλυσης (π.χ. AAS, AES, ICP) η ανάλυση των ανιόντων έπασχε από αδυναμία μεγάλης ευαισθησίας. Εν συγκρίσει με τις συμβατικές υγρές χημικές τεχνικές (π.χ. φωτομετρία, χρωματομετρία, θολερομετρία) που απαιτούν χρόνο, κόπο και είναι επιρρεπείς σε σφάλματα, η ιοντική χρωματογραφία προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ταχύτητα
- Ευαισθησία
- Εκλεκτικότητα
- Ταυτόχρονη ανάλυση

Ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μια ανάλυση με IC είναι κάτω από 15 min για τα περισσότερα ιόντα, γεγονός πολύ σημαντικό, αφού σήμερα υπάρχει ενδιαφέρον για υψηλής ποιότητας προϊόντα με χαμηλό κόστος και για περιβαλλοντική προστασία.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ταυτοποίησης ιόντων της τάξης των ppb χωρίς προσυγκέντρωση των δειγμάτων. Το όριο ανίχνευσης ενός δείγματος με απευθείας έγχυση μπορεί να φτάσει και τα 10 ppb (απόλυτη ποσότητα της τάξεως των νανογραμμαρίων). Η εκλεκτικότητα εξάλλου εξασφαλίζεται από την επιλογή του κατάλληλου συστήματος διαχωρισμού και ανίχνευσης. Όμως, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ιοντικής χρωματογραφίας έναντι των άλλων μεθόδων ανάλυσης, είναι η δυνατότητα ταυτόχρονου προσδιορισμού διαφορετικών συστατικών στο ίδιο δείγμα. Έτσι, σε μικρό χρονικό διάστημα κανείς μπορεί να αποκτήσει το προφίλ των ανιόντων και κατιόντων. Τέλος, η σταθερότητα της στατικής φάσης είναι ένα μοναδικό πλεονέκτημα της μεθόδου, που οφείλεται στη φύση των υλικών που την απαρτίζουν (Meurant, 1990, Μουρατίδου, 2000, Fritz et al., 2009).

6.7. Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση θεωρείται διεθνώς η καταλληλότερη εργαστηριακή δοκιμή για την μηχανική κατάταξη των εδαφών. Η καταλληλότητα ή μη των εδαφών για θεμελιώσεις, έργα οδοποιίας και λοιπά συγκοινωνιακά έργα (σιδηροδρομικά δίκτυα, αεροδρόμια), κατασκευή φραγμάτων και αναχωμάτων, επιχωμάτων, προσχώσεων κλπ., εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή, τον προσδιορισμό της σχετικής συμμετοχής κάθε κλάσματος στο δείγμα.

Οι πληροφορίες που παίρνουμε από την κοκκομετρική ανάλυση μπορούν να μας διευκολύνουν, στο να προβλέψουμε τη συμπεριφορά εδαφών, όσον αφορά την αντοχή και την παραμόρφωση, την κίνηση του υπόγειου νερού (διήθηση) καθώς και την απόκριση σε παγετό. Η σωστή ταξινόμηση των εδαφών, μας βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων υλικών για φίλτρα προστασίας και συγκράτησης γύρω από τεχνητές και φυσικές αποστραγγίσεις.

Στην πραγματικότητα, δεν είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε το κάθε διαφορετικό κοκκομετρικό μέγεθος αλλά το εύρος των διαφόρων μεγεθών, που συμμετέχουν στο δείγμα. Αυτό ολοκληρώνεται με το να πάρουμε την ποσότητα του υλικού, που διέρχεται μέσα από ένα κόσκινο συγκεκριμένου ανοίγματος και συγκρατείται στο αμέσως μικρότερου ανοίγματος κόσκινο της σειράς. Στη συνέχεια συσχετίζουμε την ποσότητα αυτή με το συνολικό δείγμα (Γραμματικόπουλος et al., 1998).



Εικόνα 6.3. Διάταξη κοκκομετρικής δοκιμής (Σακελλαρίου et al., 2003)

Τα κόσκινα είναι κατασκευασμένα από πεπλεγμένο σύρμα, τετραγωνικών ανοιγμάτων των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από 101.6 mm, το οποίο κατακρατεί τα πλέον χονδρόκοκκα υλικά έως και 0.075 mm (τυποποιημένο φίλτρο Νο200), το οποίο είναι το φίλτρο με τις μικρότερες διαστάσεις και διαχωρίζει τα ιλυώδη- αργιλώδη υλικά από τα αμμώδη - χαλικιώδη και έχει ουσιαστική σημασία στην ταξινόμηση του εδάφους.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής δοκιμής παρουσιάζονται με την μορφή καμπύλης. Για να έχουμε καλύτερη εποπτεία της κατανομής και τη δυνατότητα σύγκρισης των διαφόρων εδαφών, χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, καθώς η λεπτόκοκκη μάζα έχει κλάσματα της τάξης των 2.00 mm (και μεγαλύτερα) έως και 0.075 mm (No200) και έτσι απαιτείται μεγάλη κλίμακα για να αποδοθούν όλα τα μεγέθη με την ίδια ακρίβεια. Η συνήθης πρακτική είναι η απεικόνιση του διερχόμενου ποσοστού στον κατακόρυφο άξονα και της διαμέτρου στον οριζόντιο. Επιπλέον, τα μεγέθη των κόκκων αυξάνονται από αριστερά προς τα δεξιά (Σακελλαρίου et al., 2003).

Η κοκκομετρική καμπύλη αποτελεί ολοκληρωμένη σχηματική αναπαράσταση της κοκκομετρίας του εδάφους. Σε μια προσπάθεια απλοποίησης των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους έχουν προταθεί δείκτες οι οποίοι εκφράζουν μεγέθη ή αναλογίες, που προκύπτουν από την

κοκκομετρική καμπύλη. Ο σπουδαιότερος από αυτούς είναι ο συντελεστής ομοιομορφίας ή συντελεστής του Hazen:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Όπου d_{60} και d_{10} το άνοιγμα της οπής του κόσκινου, από όπου διέρχεται ποσοστό 60% και 10% του υλικού αντίστοιχα. Ο συντελεστής ομοιομορφίας δίνει τη δυνατότητα διάκρισης των εδαφικών υλικών σε ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης κοκκομετρίας με βάση κάποιο αριθμητικό κριτήριο. Συνήθως χαρακτηρίζονται ως υλικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας εκείνα για τα οποία ο συντελεστής του Hazen είναι μικρότερος του 5 και εξαιρετικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας εκείνα τα οποία ο συντελεστής ομοιομορφίας παίρνει τιμές μικρότερες του 3. Αντίθετα, καλά διαβαθμισμένα εδάφη είναι εκείνα για τα οποία ο συντελεστής U είναι μεγαλύτερος του 15 (Γραμματικόπουλος et al., 1998).

Ο συντελεστής καμπυλότητας είναι ένα μέτρο του σχήματος, της καμπύλης ανάμεσα στα χαρακτηριστικά μεγέθη d_{60} , d_{30} και d_{10} και δίνεται από τον τύπο:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{(d_{10}d_{60})}$$

Τιμές του συντελεστή διαφορετικές του 1, υποδηλώνουν ότι λείπουν κάποια μεγέθη κόκκων ανάμεσα σε αυτά τα όρια (Σακελλαρίου et al., 2003). Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδαφών της ASTM, τα παρακάτω κόσκινα χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τα εδαφικά υλικά σε κατηγορίες:

Πίνακας 6.2. Κατηγορίες εδαφικών υλικών-χαρακτηριστικά κόσκινα (Σακελλαρίου et al., 2003)

Λίθοι (πέτρες)	Το κόσκινο των 75 mm , διαχωρίζει το εδαφικό υλικό από τις λίθους	-	-
Χαλίκια	Τα χαλίκια είναι η διαβάθμιση μεταξύ του κόσκινου των 75 mm και του κόσκινου No4 (4.75 mm) .	Χονδρόκοκα χαλίκια	Τα χονδρόκοκα χαλίκια, συγκρατούνται μεταξύ των κόσκινων 75 mm και 19 mm .
		Λεπτόκοκα χαλίκια	Τα λεπτόκοκα χαλίκια συγκρατούνται μεταξύ των κόσκινων 19 mm και No4 (4.75 mm) .
Άμμος	Η άμμος συγκρατείται μεταξύ των κόσκινων No4 (4.75 mm) και No200 (0.075 mm) .	Χονδρόκοκη άμμος	Η χονδρόκοκη άμμος συγκρατείται μεταξύ των κόσκινων No4 (4.75 mm) και No10 (2 mm) .

		Μεσόκκοκη άμμος	Η μεσόκκοκη άμμος συγκρατείται μεταξύ των κόσκινων <i>No10 (2 mm)</i> και <i>No40 (0.425 mm)</i> .
		Λεπτόκκοκη άμμος	Η λεπτόκκοκη άμμος συγκρατείται μεταξύ των κόσκινων <i>No40 (0.425 mm)</i> και <i>No200 (0.075 mm)</i> .
Ιλύς - Άργιλος	Η ιλύς και η άργιλος είναι το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο <i>No200 (0.075 mm)</i>	Ιλύς (0.075 -0.005 mm)	Απαιτείται υδραυλική κοκκομετρική δοκιμή με χρήση αραιόμετρου.
		Άργιλος (έως 0.005 mm)	

7. Δειγματοληψία-Περιγραφή μεθόδων-Εκτέλεση πειραμάτων

7.1. Δειγματοληψία

7.1.1. Επιλογή δειγμάτων

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, κρίθηκε απαραίτητη η δειγματοληψία πετρωμάτων από τους δομικούς λίθους των υπό εξέταση οικοδομημάτων των ιερών. Η επιλογή των δειγμάτων έγινε ύστερα από μακροσκοπική μελέτη και με γνώμονα τα διάφορα είδη και τη διάβρωση των υλικών. Συλλέχθηκαν δείγματα μικρών διαστάσεων, με βάρος μεταξύ 10 και 200 gr, από επιφάνειες ήδη αποσαθρωμένες (Εικ. 7.1). Τα δείγματα, που ελήφθησαν ήταν κυρίως αποκολλημένα θραύσματα πετρωμάτων και ανήκαν σε σημεία χαμηλότερης αισθητικής αξίας και όχι σε λαξευμένα στοιχεία του οικοδομήματος ή αρχιτεκτονικά μέλη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δείγματα ήταν ήδη αποκομμένα γεγονός, που διευκόλυνε την επιλογή. Έγινε προσπάθεια να καλυφθούν όλα τα είδη των πρώτων υλών, που υπάρχουν ως δομικά υλικά στα δύο ιερά.



Εικόνα 7.1. Τμήμα της ελληνιστικής στοάς στο ιερό του Ασκληπιού, από όπου συλλέχθηκαν τα δείγματα

Συνολικά συλλέχθηκαν δεκατρία (13) δείγματα, εννέα (9) από το ιερό της Δήμητρας και τέσσερα (4) από το ιερό του Ασκληπιού με βάση τα μακροσκοπικά τους χαρακτηριστικά. Στα δείγματα αυτά, εφαρμόστηκαν καταστρεπτικές ή μη καταστρεπτικές εργαστηριακές μέθοδοι, από τις οποίες προκύπτει η ορυκτολογική τους σύσταση, οι φυσικομηχανικές τους ιδιότητες, η διάβρωση, την οποία έχουν υποστεί, καθώς και η προέλευσή τους.

Προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα προστασίας κάποιων επιστρωμάτων σε διαβρωμένους λίθους των αρχαίων ιερών, έγινε επιπλέον δειγματοληψία από τον αρχαιολογικό χώρο. Με τις ίδιες διαδικασίες επιλέχθηκαν λίθοι των ίδιων διαστάσεων. Οι λίθοι αυτοί, δεν καλύπτουν όλα τα είδη πρώτων υλών των ιερών, αλλά μόνο τις τρεις κυριότερες κατηγορίες. Ωστόσο, οι κατηγορίες των πρώτων υλών αποτελούν και τα κυρίαρχα δομικά υλικά της εποχής.

Πέρα από τις εργαστηριακές μεθόδους εξέτασης, εφαρμόστηκαν και κάποιες in situ μέθοδοι -μη καταστρεπτικές- για τη μελέτη ολόκληρων των λίθων, που αποτελούν δομικά στοιχεία των ιερών. Συνεπώς, οι λίθοι των οικοδομημάτων των δύο ιερών λειτούργησαν ως in situ δείγματα.



Εικόνα 7.2. Δειγματολήπτης βρόχινων υδάτων

Επιπλέον, συλλέχθηκαν δώδεκα (12) δείγματα βρόχινων υδάτων σε μηνιαία βάση (Δεκέμβριος 2010-Νοέμβριος 2011) με τη χρήση δειγματολήπτη (Εικόνα 7.2), που τοποθετήθηκε στον αρχαιολογικό χώρο. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε περισυλλογή τριών δειγμάτων από τα επιφανειακά ύδατα, που διέρχονται από τον αρχαιολογικό χώρο, για να μελετηθεί η επίδρασή τους στους λίθους των μνημείων.

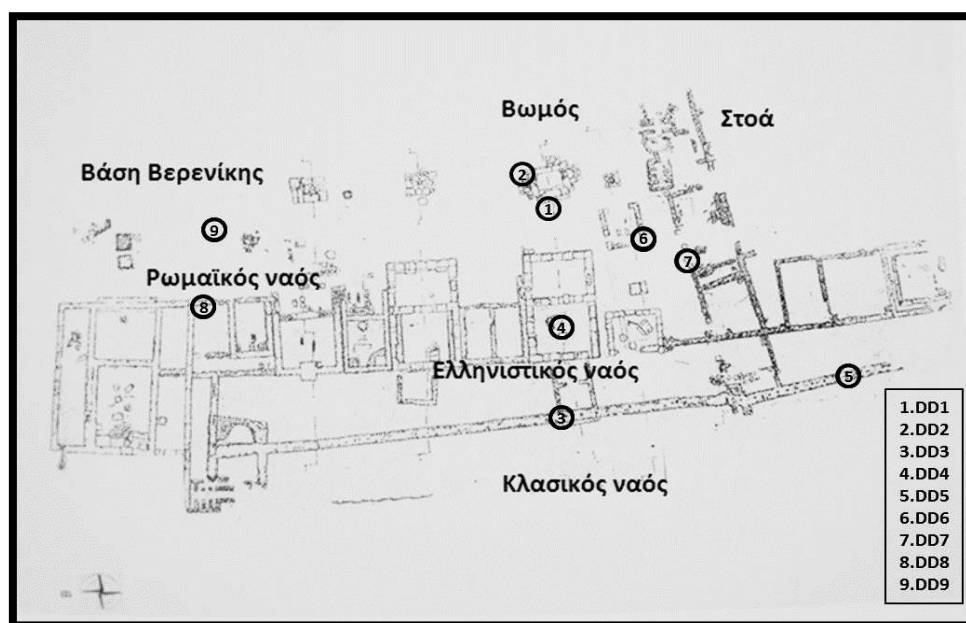
Τέλος, έγινε δειγματοληψία εδάφους από τα δύο ιερά, ώστε να πραγματοποιηθούν αναλύσεις, για μια πιο σφαιρική θεώρηση του χώρου.

7.1.2. Σειρές δειγμάτων

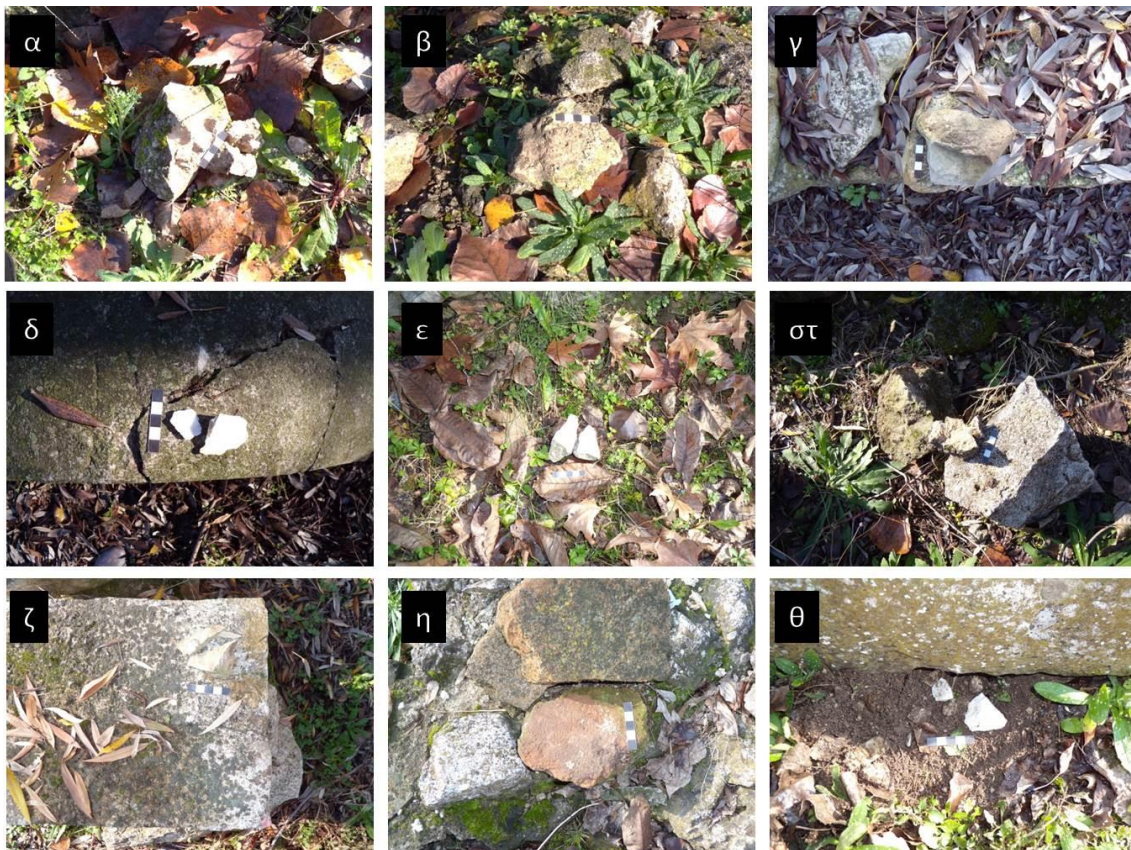
Στα αρχικά δεκατρία (13) δείγματα δόθηκαν συμβατικά ονόματα με λατινικούς χαρακτήρες, DD (Dion Demeter) για το ιερό της Δήμητρας και DA (Dion Asklepios) για το ιερό του Ασκληπιού, τα οποία συνέβαλαν στην ευκολότερη ονοματοδοσία κατά τη διάρκεια της μελέτης (Πίνακας 7.1 και 7.2). Τα δείγματα προέρχονται από διάφορα σημεία του χώρου των ιερών, και αποτελούν διαφορετικά υλικά, ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη έρευνα. Παρακάτω, δίνεται η κάτοψη του αρχαιολογικού χώρου, όπου σημειώνονται οι θέσεις δειγματοληψίας (Σχέδιο 7.1 και 7.2).

Πίνακας 7.1. Κωδικοποίηση και συνοπτική περιγραφή των δειγμάτων από το ιερό της Δήμητρας

Όνομα δείγματος	Προέλευση	Χρονολόγηση μνημείου	Είδος λίθου
DD1	ΒΔ γωνία του μεγάλου βωμού	4 ^{ος} -3 ^{ος} αι. π.Χ.	Ασβεστόλιθος
DD2	Μεγάλες ψηφίδες, ΒΑ γωνία του μεγάλου βωμού	4 ^{ος} -3 ^{ος} αι. π.Χ.	Κροκαλοπαγές
DD3	Β τοίχος κλασικού ναού	ύστερη αρχαϊκή-πρώιμη κλασική περίοδος	Ασβεστόλιθος
DD4	Τμήμα από σπόνδυλο κίονα σε δεύτερη χρήση στο σηκό του Ν ελληνιστικού ναού	τέλη 4 ^{ου} αι. π.Χ.	Μάρμαρο
DD5	Λατύπη στη Δ πλευρά του περιβόλου	1 ^{ος} αι. π.Χ.-1 ^{ος} αι. μ.Χ.	Μάρμαρο
DD6	Δ τοίχος ΝΑ οίκου	3 ^{ος} αι. π.Χ.	Πωρόλιθος
DD7	Βάση στηρίγματος ελληνιστικής στοάς	4 ^{ος} -3 ^{ος} αι. π.Χ.	Ψαμμίτης
DD8	Α τοίχος ρωμαϊκού ναού	1 ^{ος} αι. π.Χ.-1 ^{ος} αι. μ.Χ	Κεραμική Πλίνθος
DD9	Βάση αναθήματος με επιγραφή Βερενίκης	3 ^{ος} αι. π.Χ.	Μάρμαρο



Σχέδιο 7.1. Κάτοψη του ιερού της Δήμητρας και οι θέσεις δειγματοληψίας

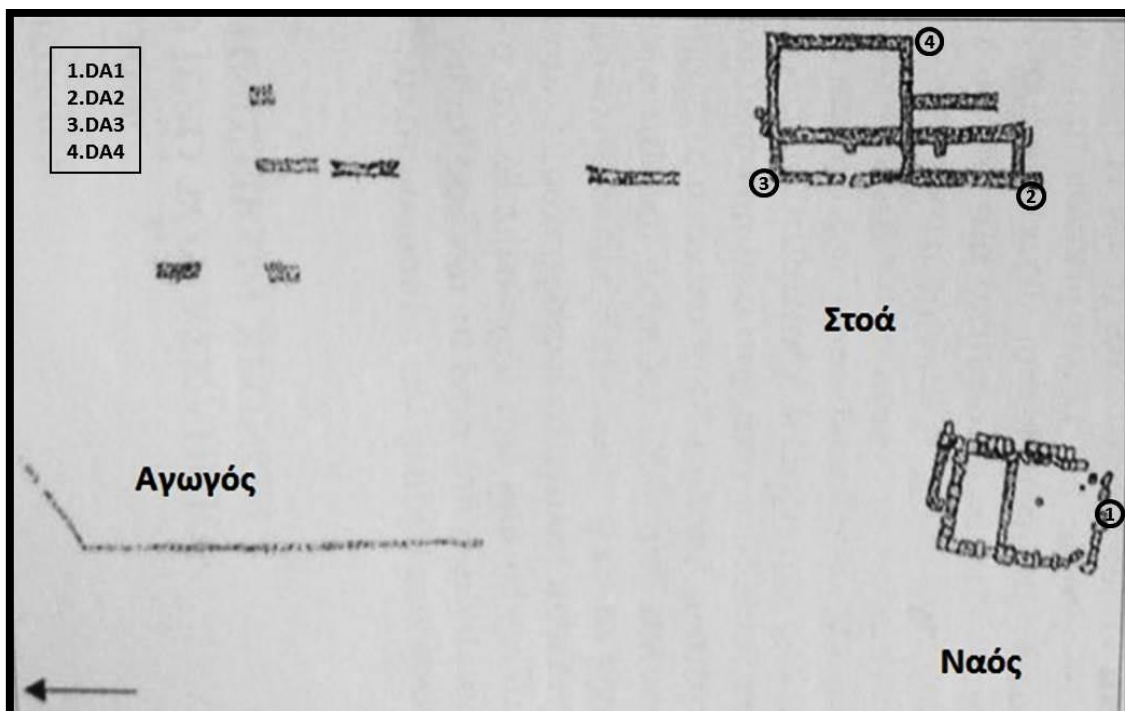


Εικόνα 7.3. Ακριβή σημεία, από τα οποία συλλέχθηκαν τα δείγματα:
 α.DD1, β.DD2, γ.DD3, δ.DD4, ε.DD5, στ.DD6, ζ.DD7, η.DD8, θ.DD9

Λόγω του μικρότερου αριθμού οικοδομημάτων, στο ιερό του Ασκληπιού έγινε μια πιο περιορισμένη επιλογή δειγμάτων, διατηρώντας το χαρακτηριστικό της δειγματοληψίας, ώστε να ληφθούν δείγματα διαφορετικών υλικών.

Πίνακας 7.2. Κωδικοποίηση και συνοπτική περιγραφή των δειγμάτων από το ιερό του Ασκληπιού

Όνομα δείγματος	Προέλευση	Χρονολόγηση μνημείου	Είδος λίθου
DA1	Ν πλευρά σηκού του ναού του Ασκληπιού	τέλη 4 ^{ου} - αρχές 3 ^{ου} αι. π.Χ	Κροκαλοπαγές
DA2	Δ πλευρά ελληνοιστικής στοάς	1 ^{ος} αι. π.Χ-1 ^{ος} αι. μ.Χ	Ασβεστόλιθος
DA3	ΒΔ γωνία ελληνοιστικής στοάς	1 ^{ος} αι. π.Χ-1 ^{ος} αι. μ.Χ	Κεραμική Πλίνθος
DA4	ΝΑ γωνία ελληνοιστικής στοάς	1 ^{ος} αι. π.Χ-1 ^{ος} αι. μ.Χ	Ψαμμίτης



Σχέδιο 7.2. Κάτοψη του ιερού του Ασκληπιού και οι θέσεις δειγματοληψίας



Εικόνα 7.4. Ακριβή σημεία από τα οποία συλλέχθηκαν τα δείγματα:

. α. DA1, β. DA2, γ. DA3, δ. DA4

Η ανάγκη συντήρησης των ήδη διαβρωμένων λίθων, οδηγεί σε μελέτη νέων υλικών προστασίας. Για τη μελέτη προστασίας των λίθων στη διάβρωση, εφαρμόστηκαν προηγμένα σύνθετα πολυμερικά επιστρώματα σε ήδη διαβρωμένους λίθους. Τα πολυμερικά επιστρώματα προσφέρουν αδιαβροχοποίηση, λόγω των υδρόφοβων επιφανειών που δημιουργούν. Για αύξηση της υδροφοβικότητας, σε κάποια επιστρώματα προστέθηκαν νανοσωματίδια οξειδίου τιτανίας.

Για την εφαρμογή των επιστρωμάτων, επιλέχθηκαν επιπλέον δείγματα από την περιοχή των δύο ιερών. Τα δείγματα περιορίστηκαν κυρίως σε ασβεστόλιθους (DC), ψαμίτες (DS) και κροκαλοπαγή (DCO) πετρώματα. Χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικά επιστρώματα, τα Rhodorsil-70, Rhodorsil-90, nanoTiO₂ σε Rhodorsil-70 και nanoTiO₂ σε Rhodorsil-90, τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια. Στα δείγματα έγιναν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης, πλήρους βύθισης και διαπερατότητας υδρατμών. Για τους παραπάνω λόγους, κρίθηκε απαραίτητη η επεξεργασία με πολυμερικά επιστρώματα σε 40 δείγματα. Στον Πίνακα 7.3, φαίνεται η κωδικοποίηση των δειγμάτων με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν.

Πίνακας 7.3. Κωδικοποίηση και συνοπτική περιγραφή των δειγμάτων που επιστρώθηκαν από τα δύο ιερά.

α. Για μετρήσεις τριχοειδούς αναρρίχησης, β. Για μετρήσεις πλήρους βύθισης, γ. Για μετρήσεις διαπερατότητας υδρατμών

α.	Επίστρωμα	Ασβεστόλιθος	Ψαμίτης	Κροκαλοπαγές
	-	DC1	DS1	DCO1
	Rhodorsil-70	DC2	DS2	DCO2
	nanoTiO ₂ Rhodorsil-70	DC3	DS3	DCO4
	Rhodorsil-90	DC4	DS4	DCO3
	nanoTiO ₂ Rhodorsil-90	DC5	DS5	DCO5
β.	Επίστρωμα	Ασβεστόλιθος	Ψαμίτης	Κροκαλοπαγές
	-	DC6	DS6	DCO6
	Rhodorsil-70	DC7	DS7	DCO7
	nanoTiO ₂ Rhodorsil-70	DC8	DS8	DCO8
	Rhodorsil-90	DC9	DS9	DCO9
	nanoTiO ₂ Rhodorsil-90	DC10	DS10	DCO10
γ.	Επίστρωμα	Ασβεστόλιθος	Ψαμίτης	
	-	DC11	DS11	
	Rhodorsil-70	DC12	DS12	
	nanoTiO ₂ Rhodorsil-70	DC13	DS13	
	Rhodorsil-90	DC14	DS14	

Παρατηρείται ότι για τις μετρήσεις διαπερατότητας υδρατμών δεν χρησιμοποιήθηκαν δείγματα του κροκαλοπαγούς. Η ποσότητα δειγμάτων κροκαλοπαγούς, που συλλέχθηκε κατά τη δειγματοληψία, δεν επαρκούσε και για το λόγο αυτό δεν έγιναν μετρήσεις διαπερατότητας υδρατμών σε τέτοιου είδους δείγματα.

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι, που πραγματοποιήθηκαν *in situ*, εφαρμόστηκαν κυρίως στις εξωτερικές επιφάνειες του ναού του Ασκληπιού και του μεγάλου βωμού της Δήμητρας.

Τα βρόχινα ύδατα συλλέχθηκαν σε δειγματολήπτη σε μηνιαία βάση για ένα χρόνο, ώστε στη συνέχεια να γίνει ανάλυση σε ιόντα, τα οποία παρασύρονται με τη βροχή και οδηγούν σε διάβρωση των λίθων, όπως τα νιτρικά, τα χλωριούχα και τα θειικά ιόντα. Έτσι προκύπτουν 12 δείγματα, ένα για κάθε μήνα (έτος 2011), τα οποία ονομάστηκαν με βάση τους μήνες. Τα επιφανειακά ύδατα είναι 3, ένα από το ρέμα δυτικά του ιερού του Ασκληπιού, ένα από το ρέμα ανάμεσα στα δύο ιερά και ένα από τον ποταμό Βαφύρα, με ονομασίες Α, Β, Γ, αντίστοιχα. Τα επιφανειακά ύδατα συλλέχθηκαν μια φορά, τον μήνα Νοέμβριο του 2011, για μια ενδεικτική τιμή.

Πίνακας 7.4. Ονομασίες δειγμάτων των βρόχινων υδάτων

Μήνας συλλογής	Ονομασία δείγματος
Δεκέμβριος 2010	Δεκέμβριος
Ιανουάριος 2011	Ιανουάριος
Φεβρουάριος 2011	Φεβρουάριος
Μάρτιος 2011	Μάρτιος
Απρίλιος 2011	Απρίλιος
Μάιος 2011	Μάιος
Ιούνιος 2011	Ιούνιος
Ιούλιος 2011	Ιούλιος
Αύγουστος 2011	Αύγουστος
Σεπτέμβριος 2011	Σεπτέμβριος
Οκτώβριος 2011	Οκτώβριος
Νοέμβριος 2011	Νοέμβριος

Τέλος, από το έδαφος κοντά στα ιερά και με προσεκτικό τρόπο, αφαιρέθηκε ποσότητα χώματος, ώστε να γίνει κοκκομετρική ανάλυση για την ταξινόμηση των εδαφικών υλικών της περιοχής μελέτης. Οι ποσότητες που ελήφθησαν, ώστε να γίνει επιλογή στο εργαστήριο, ήταν

περίπου 2,5 kg, και για τα 2 δείγματα, ένα από τη ΒΔ γωνία του ιερού του Ασκληπιού και ένα από τη ΒΔ γωνία του μεγάλου βωμού της Δήμητρας.

Καταλήγοντας, κατά τη διαδικασία του εντοπισμού βρύων και λειχίνων πάνω στην επιφάνεια των μνημείων, ελήφθησαν φωτογραφίες από διαφορετικά σημεία σε όλη την έκταση των δύο ιερών.

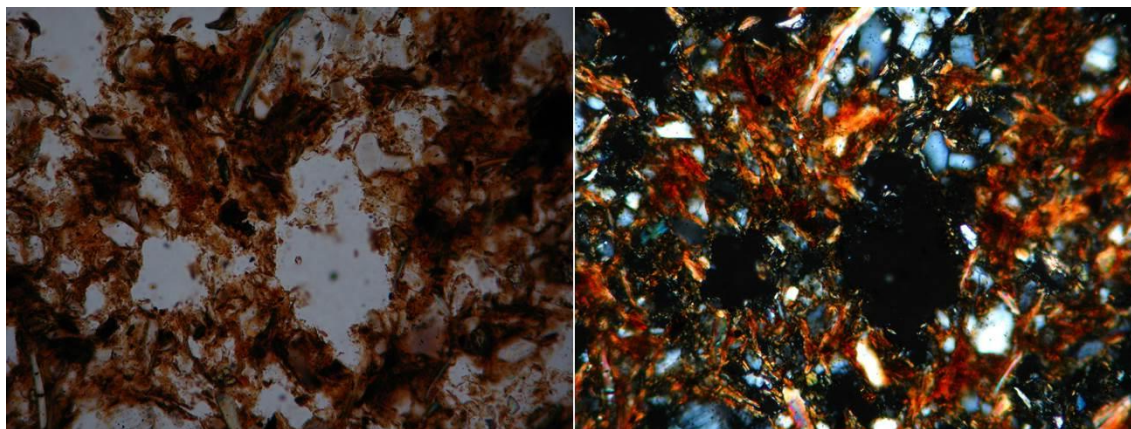
7.2. Περιγραφή μεθοδολογίας-Οργανολογία-Εκτέλεση πειραμάτων

7.2.1. Μεθοδολογία της εργαστηριακής έρευνας

Τα δείγματα, αρχικά, φωτογραφήθηκαν ώστε να γίνει η τεκμηρίωση, η καταγραφή τους και η μακροσκοπική παρατήρηση τους. Στη συνέχεια, για καλύτερη απεικόνιση του ιστού του πετρώματος των λίθων, αφού τα δείγματα κόπηκαν με τροχό, πραγματοποιήθηκε σάρωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Με τη χρήση του στερεομικροσκοπίου με ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή, ελήφθησαν εικόνες από την επιφάνεια των δειγμάτων με μεγάλη μεγέθυνση, για μια πιο λεπτομερή οπτική απεικόνιση.

Η εξέταση των λεπτών τομών των πετρωμάτων έγινε με τη χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχόμενου φωτός, το οποίο αποτελεί σημαντική πηγή πληροφοριών για τον ιστό και τη σύσταση των πετρωμάτων. Το πολωτικό μικροσκόπιο, σε συνδυασμό με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και τη φασματοσκοπία διασπειρόμενης ενέργειας (EDS), δίνει πληροφορίες σχετικά με τη χωρική κατανομή των διαφόρων συστατικών του λίθου, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται ποιοτική χημική ανάλυση των ορυκτών, που περιέχονται σε αυτό. Με τις μεθόδους αυτές, γίνεται μια ολοκληρωμένη μελέτη της δομής των πετρωμάτων, της μορφής και της δομής των επιφανειακών στρώσεων, του είδους και του μεγέθους των πληρωτικών υλικών καθώς και των γενικών ιστολογικών χαρακτηριστικών του λίθου.

Επίσης, με το πολωτικό μικροσκόπιο είναι εφικτό να γίνει λεπτομερής περιγραφή των πόρων και των διαφόρων ορυκτών συστατικών.



Εικόνα 7.5. Λήψη με πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός $\times 20$ ενός δείγματος πλίνθου, αριστερά: παράλληλα Nicols ($//N$), δεξιά: διασταυρωμένα Nicols ($+N$)

Προκειμένου να μελετηθεί σε βάθος η ορυκτολογική σύσταση των λίθων, και κυρίως για να γίνει διάκριση μεταξύ δολομίτη, ασβεστίτη και αραγωνίτη στα πετρώματα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD) σε κονιοποιημένα δείγματα.

Οι αναλύσεις των σταθερών ισοτόπων άνθρακα και οξυγόνου αποτελούν τη βασική μέθοδο εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με την πηγή προέλευσης των μαρμάρων. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μικρή ποσότητα δείγματος, ώστε να μην προκαλούνται μεγάλες απώλειες του αρχαιολογικού δείγματος, ενώ παρέχει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία. Οι μετρήσεις ισοτόπων στην παρούσα μελέτη, αφορούν μόνο τα 2 δείγματα, που χαρακτηρίστηκαν ως μάρμαρα.

Όσον αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά των λίθων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα δείγματα, από τις οποίες προέκυψε το ολικό φαινόμενο βάρος, το ειδικό βάρος στερεών, το ενεργό πορώδες, το ολικό πορώδες, η υδατοαπορροφητικότητα, η διαπερατότητα σε υδρατμούς και η φυσική υγρασία. Παράλληλα, κάποια δείγματα τοποθετήθηκαν σε θάλαμο γήρανσης για τρεις μήνες, κυρίως για οπτική παρατήρηση.

Επίσης, έγινε δοκιμή σημειακής φόρτισης, ώστε να προκύψουν κάποια συμπεράσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων και τη σύγκρισή τους με ενδεικτικές τιμές μη διαβρωμένων αντίστοιχων πετρωμάτων.

Στο πλαίσιο της μελέτης διάβρωσης των λίθων έγιναν μετρήσεις ταχύτητας διάδοσης υπερήχων, τόσο στα δείγματα, που μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όσο και στους λίθους, που βρίσκονται στο χώρο της ανασκαφής. Παράλληλα, στους λίθους των ιερών έγιναν *in situ* μετρήσεις θερμοκρασίας, ώστε να μελετηθεί η παρουσία υγρασίας σε αυτά, και να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες και το βαθμό διάβρωσης τους. Οι λίθοι αυτοί φωτογραφήθηκαν, ώστε να μελετηθεί μακροσκοπικά, η τυχόν παρουσία βρύων και λειχήνων στην επιφάνειά τους καθώς και για να γίνει ταυτοποίηση αυτών.

Στα δείγματα που επιστρώθηκαν με πολυμερικά υλικά, έγιναν μετρήσεις τριχοειδούς υδαταπορρόφησης, διαπερατότητας σε υδρατμούς, καθώς και εξετάστηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) με φασματοσκοπία διασπειρόμενης ενέργειας (EDS), ώστε να συγκριθούν με τα μη επιστρωμένα δείγματα και να προκύψουν συμπεράσματα για την προστατευτική ικανότητα των επιστρωμάτων.

Τα ύδατα που συλλέχθηκαν, τόσο τα επιφανειακά όσο και τα βρόχινα, αναλύθηκαν με τη μέθοδο της ιοντικής χρωματογραφίας. Η ανάλυση αφορούσε κυρίως, χλωριούχα, νιτρικά και θειικά ιόντα, καθώς αυτά αποτελούν τους βασικούς παράγοντες διάβρωσης για τους λίθους.

Τέλος, έγινε κοκκομετρική ανάλυση στο χρώμα του αρχαιολογικού χώρου, ώστε να εξεταστεί η επίδραση του στους λίθους των ιερών.

7.2.2. Οργανολογία

Οι φωτογραφίες των δειγμάτων του ιερού του Ασκληπιού και του ιερού της Δήμητρας στην αρχαία πόλη του Δίου, ελήφθησαν σε μακροσκοπική κλίμακα με μια φωτογραφική μηχανή Nikon Coolpix S710. Το στερεομικροσκόπιο ήταν τύπου Zeiss με ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή Canon Powershot A620.

Ο πετρογραφικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων έγινε στον Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Η μικροσκοπική μελέτη των λεπτών τομών των δειγμάτων έγινε με τη χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχόμενου φωτός τύπου Leitz Laborlux 11 POL S. Η δυνατότητα μεγεθύνσεων κυμαίνεται στο φάσμα 5x έως 20x και η ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή Canon Powershot A640.

Η μελέτη των ορυκτών σε λεπτές τομές και η ποσοτική ανάλυση τους έγιναν με ένα JEOL JSM-840 ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), εξοπλισμένο με φασματόμετρο διασπειρόμενης ενέργειας (EDS), μοντέλο Link, AN 10/55S, στη Σχολή Θετικών Επιστημών, Α.Π.Θ.

Η ακτινογραφική εξέταση των κονιορτοποιημένων δειγμάτων έγινε με περιθλασίμετρο ακτίνων X (XRD) τύπου Philips με ακτινοβολία CuK α με φίλτρο Ni, ταχύτητα ανίχνευσης (scanning speed) 1°/min, εύρος 3-63° και ρυθμό μετρήσεων (count rate) 10³/sec, στον τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ.

Η ισοτοπική μελέτη C και O πραγματοποιήθηκε σε δείγματα μαρμάρου στα εργαστήρια σταθερών ισοτόπων του Γεωλογικού Τμήματος του Royal Holloway Πανεπιστημίου του Λονδίνου.

Το πορώδες και κατανομή των πόρων των δειγμάτων μετρήθηκαν με ποροσίμετρο υδραργύρου, Quantachrome Macro, του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ.. Η δοκιμή σημειακής φόρτισης έγινε με όργανο της εταιρείας Wykeham Farrance. UK, στο Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Για τη μελέτη του βαθμού διάβρωσης των λίθων με μέτρηση ταχύτητας διάδοσης υπερήχων, χρησιμοποιήθηκε μία φορητή συσκευή μέτρησης υπερήχων PUNDIT Surfer Ultrasonic Detector UK1401 (Εικ. 7.6), με συχνότητα πηγής 54 KHz. Οι μετρήσεις στους λίθους του αρχαιολογικού χώρου έγιναν με την έμμεση μέθοδο, δηλαδή την τοποθέτηση των ακροδεκτών στην ίδια επιφάνεια του κάθε λίθου, ενώ στα δείγματα του εργαστηρίου έγιναν κατά μήκος του άξονα των δειγμάτων (στις απέναντι πλευρές).

Η μέθοδος της ποροσιμετρίας υδραργύρου πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο δομικών υλικών, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής σχολής, Α.Π.Θ.



Εικόνα 7.6. Φορητή συσκευή μέτρησης υπερήχων

Η μέτρηση της θερμοκρασίας *in situ*, πραγματοποιήθηκε με φορητή συσκευή θερμομέτρησης ακτίνας laser, Center 358, Infrared thermometer, εύρους: -18°C - 315°C .

Τα δείγματα υδάτων αναλύθηκαν με ιοντικό χρωματογράφο Shimadzu, με αντλία LC-10ADnr, φούρνο CTO-10Avr και αγωγιμόμετρο CDD-6A, στο Εργαστήριο Ελέγχου Ρύπανσης Περιβάλλοντος, του Τμήματος Χημείας του Α.Π.Θ..

Η κοκκομετρική μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. καθώς και χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένα κόσκινα No200 έως No4.

Τέλος, οι φωτογραφίες των διαβρωμένων επιφανειών των λίθων από τα ιερά, επεξεργάστηκαν ψηφιακά με την τεχνική ανίχνευσης ακμών Sobel στα εργαστήρια της Ανώτατης Εκκλησιαστικής Ακαδημίας Θεσσαλονίκης.

7.2.3. Εκτέλεση πειραμάτων-Προετοιμασία δειγμάτων

7.2.3.1. Πολωτικό μικροσκόπιο

Η κατασκευή λεπτών τομών από δείγματα λίθων, που μελετήθηκαν με το πολωτικό μικροσκόπιο (Εικ.7.7), έγινε στον Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την κοπή των δειγμάτων. Στη συνέχεια το κάθε δείγμα λειαίνεται και θερμαίνεται, ώστε να αποβάλλει την υγρασία που έχει απορροφήσει. Έπειτα, κόβεται και επικολλάται σε αντικειμενοφόρο πλάκα με τη χρήση κόλλας. Η δυνατότητα των μεγεθύνσεων κυμαίνεται από 5x έως 20x.

Η προετοιμασία για τη δημιουργία λεπτής τομής είναι η εξής: αρχικά, κόβεται η τομή του δείγματος πάχους 3-4 mm και επιφάνειας περίπου 8 cm^2 με διαμαντοτροχό. Έπειτα, δίνεται ορθογώνιο σχήμα στην τομή με διαστάσεις περίπου 4x2 cm με ειδικό κόφτη χεριού. Η μια επιφάνεια λειαίνεται με σκόνη λείανσης No 180-220 και επικολλάται σε αντικειμενοφόρο πλάκα με ειδική συγκολλητική ουσία. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται λείανση της ελεύθερης επιφάνειας, στην αρχή μηχανικά και στο τέλος με το χέρι. Το ιδανικό πάχος του παρασκευάσματος για

μικροσκοπική εξέταση είναι περίπου 0,02-0,03 mm. Τέλος, η επιφάνεια του παρασκευάσματος καλύπτεται με γυάλινη καλυπτρίδα, που επικολλάται, με βάλσαμο του Καναδά (Αγόρος, 2012).



Εικόνα 7.7. Οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο και λεπτές τομές δειγμάτων σε αντικειμενοφόρους πλάκες

7.2.3.2. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης

Για την παρατήρηση και μικροανάλυση με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, τμήμα των δειγμάτων καλύφθηκε με άνθρακα προκειμένου να καταστούν αγωγίμα. Στη συνέχεια τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κυλινδρικό χαλύβδινο δειγματοφορέα για να τοποθετηθούν στο όργανο.

7.2.3.3. Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ

Για την ακτινογραφική εξέταση το παρασκεύασμα πρέπει να έχει τη μορφή επίπεδου στρώματος σκόνης μικρού πάχους. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικά πλακίδια αλουμινίου ή πλαστικού (plexiglass) (Εικ. 7.8), στην υποδοχή των οποίων τοποθετήθηκε ποσότητα σκόνης του πετρώματος προς ανάλυση. Σε ειδική θήκη αλουμινίου τοποθετήθηκε ορισμένη ποσότητα από το κονιοποιημένο και ομογενοποιημένο υλικού.



Εικόνα 7.8. Πλαστικό πλακίδιο με κονιορτοποιημένο δείγμα για τη μελέτη με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ

Στη συνέχεια το πιέζουμε ελαφρά με αντικειμενοφόρο πλάκα. Έτσι, έχουμε ένα τυχαία προσανατολισμένο παρασκεύασμα συνολικού δείγματος, έτοιμο για σάρωση στο περιθλασίμετρο.

Ο σημαντικότερος παράγοντας, που επηρεάζει τις πλεγματικές διαστάσεις ενός ορυκτού είναι η σταθερότητα της χημικής του σύστασης. Για το λόγο αυτό απαιτείται ιδανική κονιοποίηση

(περιορισμός στο ελάχιστο της καταστροφής ή διαστροφής των κρυσταλλικών πλεγμάτων) και καλή ομογενοποίηση, για να είναι ολοκληρωτική η αφαίρεση των ανεπιθύμητων υλικών με τις χημικές κατεργασίες που εκτελούνται. Η κονιοποίηση γίνεται συνήθως σε γουδί από αχάτη, που είναι μικροκρυσταλλικός χαλαζίας (SiO_2).

7.2.3.4. Μέτρηση πορώδους

Τα δείγματα/δοκίμια τοποθετήθηκαν ξεχωριστά το καθένα σε ατομικές κάψουλες πορσελάνης και κατόπιν στο φούρνο σταθερής θερμοκρασίας ($T= 105^\circ \text{C}$) για 24 ώρες με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας. Στη συνέχεια τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τον φούρνο. Κάθε δείγμα ζυγίστηκε σε ζυγαριά ακριβείας 3 δεκαδικών ψηφίων. Παράλληλα, έγινε καταγραφή του βάρους κάθε δείγματος. Έπειτα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν εκ νέου σε ατομικές κάψουλες πορσελάνης και προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι που να σκεπάζεται το δείγμα και παρέμειναν στο νερό για 24 ώρες. Κατόπιν απομακρύνθηκαν από το νερό, και αφαιρέθηκε η περίσσεια του νερού με απορροφητικό χαρτί. Στη συνέχεια, τα δείγματα ζυγίστηκαν εκ νέου.

Οι επιφάνειες των δειγμάτων δεν ήταν απολύτως καθαρές και λείες, αφού παρατηρήθηκαν βιολογικές επικαθίσεις (βρύα, λειχήνες), με αποτέλεσμα ένα ποσοστό υγρασίας να απορροφάται από τους μικροοργανισμούς.

7.2.3.5. Δοκιμή σημειακής φόρτισης

Η μέθοδος δεν απαιτεί κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη, δοκίμια που για διάφορους λόγους δεν μπορούσαν να μορφοποιηθούν κατάλληλα.



Εικόνα 7.9. Μέτρηση σημειακής φόρτισης σε δείγμα

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κάθε δείγμα με τη χρήση παχύμετρου (x,y,z). Παράλληλα, έγινε καταγραφή των μετρήσεων. Στη συνέχεια κάθε δείγμα τοποθετήθηκε στη συσκευή σημειακής φόρτισης (Εικ. 7.9) και καταμετρήθηκε η πίεση, που ασκήθηκε μέχρι να σπάσει.

7.2.3.6. Ταχύτητα υπερήχων

Οι δοκιμές γίνονται με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, ανάλογα με την περίπτωση:

1. Ο άμεσος τρόπος αναφέρεται στην τοποθέτηση των transducers στις απέναντι, παράλληλες, βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου, όπου και εφαρμόστηκε στα δείγματα του εργαστηρίου. Κατά την πειραματική διαδικασία τα δείγματα/δοκίμια τοποθετούνται ξεχωριστά το καθένα σε ατομικές κάψουλες πορσελάνης και κατόπιν στο φούρνο σταθερής θερμοκρασίας ($T=105^{\circ}\text{C}$) για 24 ώρες με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας. Στη συνέχεια απομακρύνονται από τον φούρνο. Ενεργοποιείται το μηχάνημα υπερήχων, το σταντάρισμα του οργάνου έγινε στα 26 μs . Επιλέγονται 2 πλευρές από κάθε δείγμα, όσο το δυνατόν παράλληλες και καθαρές, όπου εφαρμόζεται συγκολλητικό υλικό (blue tak) και γίνονται οι μετρήσεις σε όλα τα δείγματα.
2. Ο έμμεσος τρόπος, ο οποίος αφορά κυρίως, τις επί τόπου μετρήσεις βραχυδών επιφανειών, αναφέρεται στην τοποθέτηση των transducers επί της ίδιας επιφάνειας. Οι τιμές που λαμβάνονται με τον τρόπο αυτό είναι κατά 5% υποβαθμισμένες έναντι της άμεσης μεθόδου. Η μέθοδος εφαρμόστηκε in situ σε δείγματα του αρχαιολογικού χώρου.

7.2.3.7. Ιοντική χρωματογραφία

Στις 28 Νοεμβρίου 2010 τοποθετήθηκε στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου ο δειγματολήπτης υγρής/ξηρής απόθεσης και συγκεκριμένα ανάμεσα στα ιερά του Ασκληπιού και της Δήμητρας, σε θέση μη ορατή από τους επισκέπτες και για χρονικό διάστημα ενός έτους. Έκτοτε κάθε τέλος του μήνα πραγματοποιούνταν περισυλλογή του δείγματος σε φιάλη αντίστοιχη του μεγέθους του δείγματος και κατόπιν σε μικρό πλαστικό φιαλίδιο χωρητικότητας 20-25 ml. Επίσης, πραγματοποιούνταν μέτρηση του pH του δείγματος με πεχάμετρο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε δείγμα διήθηση με γυάλινη σύριγγα Millipore της Millex σε φίλτρα 0,45 μm PVDF (Εικ. 7.10). Τέλος, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δειγμάτων με ιοντικό χρωμογράφο

Ο χρωματογράφος συνδέεται με υπολογιστή, όπου και επεξεργάζονται τα χρωματογραφήματα με το λογισμικό Clarity.



Εικόνα 7.10. Έγχυση δείγματος στον ιοντικό χρωματογράφο

7.2.3.8. Ξηρό φαινόμενο βάρους

Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 110°C για 24h, ώστε να αποβάλλουν την υγρασία. Τα στεγνά δείγματα ζυγίστηκαν ξεχωριστά το καθένα σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας 3 δεκαδικών ψηφίων. Παράλληλα γινόταν καταγραφή των τιμών του βάρους τους. Στη συνέχεια, κάθε δείγμα τοποθετούνταν σε ογκομετρικό δοχείο με ποσότητα απιονισμένου νερού (25 ή 50 ή 100 ml) ανάλογα με το μέγεθός του. Κατόπιν, συμπληρώνονταν απιονισμένο νερό με τη χρήση σιφωνίου, έως ότου καλυφθεί η επάνω επιφάνεια. Τέλος, γινόταν καταγραφή του επιπλέον όγκου νερού.

7.2.3.9. Βρύα και λειχήνες

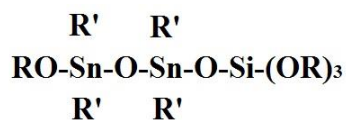
Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία και φωτογράφιση των ειδών, που εντοπίστηκαν τόσο στα ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού, όσο και σε ολόκληρο τον αρχαιολογικό χώρο. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο τμήμα Βιολογίας ΑΠΘ, στον τομέα Βοτανικής, όπου και πραγματοποιήθηκε ταυτοποίηση των ειδών.

7.2.3.10. Επιστρώσεις προστατευτικών υλικών σε δείγματα

α. Rhodorsil RC-70, Rhodorsil RC-90

Τα πολυμερή, που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ήταν: α. Rhodorsil RC-70 (κατάστημα IN SITU, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα), ένα διάλυμα πυριτικού αιθυλεστέρα, σε white spirit (χημικός διαλύτης), με ουδέτερο καταλύτη και β. Rhodorsil RC-90 (κατάστημα IN SITU, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα), ένα διάλυμα πυριτικού αιθυλεστέρα και μεθυλ-φαινυλικής ρητίνης σε white spirit και τολουόλιο, με ουδέτερο καταλύτη.

Ο καταλύτης, όπως αναφέρει η εταιρεία Rhode-Poulenc (Rhodia) είναι αιθυλ-σιλάνιο με κασσίτερο ή ένα οργανο-σιλάνιο με δυο άτομα κασσιτέρου, της γενικής μορφής (Wheeler et al., 2005):



Πίνακας 7.5. Χαρακτηριστικά των προστατευτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις επιστρώσεις
(*In situ*, Copyright 2003)

	Rhodorsil RC-70	Rhodorsil RC-90
Εμφάνιση	Διαφανές υγρό	Διαφανές υγρό
Ειδικό βάρος	0,89 gr/cm ³ (25°C)	0,915 gr/cm ³ (25°C)
Περιεκτικότητα πυριτίου	70%	70%
Σημείο ανάφλεξης	36°C	20°C
White spirit	30%	24%
Τολουόλιο	-	6%
Διάλυση	αλειφατικοί αρωματικοί, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, κετόνες, αλκοόλες	αλειφατικοί αρωματικοί, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, κετόνες, αλκοόλες

Τα διαλύματα αυτά εφαρμόστηκαν στα υποστρώματα ως έχουν, χωρίς κάποια επιπλέον επεξεργασία. Η εφαρμογή έγινε με τριχοειδή απορρόφηση, οπότε τα δοκίμια βυθίστηκαν στα διαλύματα σε 0.5 cm βάθος. Η κάθε πλευρά παρέμεινε βυθισμένη στο διάλυμα για 30 min. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αφέθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος για να εξατμιστεί ο διαλύτης. Η εξαύτμιση ελέγχθηκε με ζύγιση και ολοκληρώθηκε, όταν τα δείγματα είχαν σταθερό βάρος. Τα δοκίμια ζυγίστηκαν ξανά, για να υπολογιστεί η ποσότητα του πολυμερούς, που απορρόφησε το καθένα.



Εικόνα 7.11. Προετοιμασία δειγμάτων για επίστρωση με πολυμερικά επιστρώματα

β. Rhodorsil RC-70 με νανο-TiO₂, Rhodorsil RC-90 με νανο-TiO₂

Τα δύο αυτά επιστρώματα προκύπτουν από τα εμπορικά προαναφερθέντα πολυμερικά διαλύματα, Rhodorsil RC-70 και Rhodorsil RC-90, με προσθήκη νανο-σωματιδίων οξειδίου του τιτανίου (TiO₂) διαμέτρου 24 nm. Τα νανο-σωματίδια TiO₂ παραχωρήθηκαν από το Εργαστήριο Φυσικοχημείας του τμήματος Χημείας, Α.Π.Θ., και είναι εμπορικό προϊόν με την ονομασία Degussa AEROXIDE TiO₂ P-25 (Evonik Industries). Το προϊόν αυτό αποτελείται από ~70% ανατάσιο και ~30% ρουτίλιο (Ohtani et al., 2010).

Πίνακας 7.6. Χαρακτηριστικά TiO₂ P-25 (Evonik-Industries, 2012)

Εμπορικό όνομα	AEROXIDE® TiO ₂ P 25
Εμφάνιση	Σκόνη
Χρώμα	Λευκό
pH	3.5-4.5 (40g/l) (20°C)
Σημείο τήξης	ca.1850 °C
Πυκνότητα	ca.4.1 g/cm ³
Διαλυτότητα σε νερό	Μη διαλυτό

Παρασκευάστηκαν διαλύματα 1% TiO₂ και για τα δύο πολυμερικά επιστρώματα. Η παρασκευή έγινε με μηχανική ανάδευση των Rhodorsil RC-70, Rhodorsil RC-90 με τα νανο-σωματίδια. Η ανάδευση έγινε αρχικά για 30 min και στην συνέχεια έγινε επίστρωση με πινέλο στα υποστρώματα (3 φορές), με παράλληλη ανάδευση των διαλυμάτων.

Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο φούρνο για 18 ώρες, στους 40°C, ώστε να απομακρυνθεί πλήρως ο διαλύτης και έπειτα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα. Η εξάτμιση ελέγχθηκε με ζύγιση και ολοκληρώθηκε, όταν τα δείγματα είχαν σταθερό βάρος. Τα δοκίμια ζυγίστηκαν ξανά για να υπολογιστεί η ποσότητα του πολυμερούς, που απορρόφησε το καθένα.

7.2.3.11. Τριχοειδής υδαταπορρόφηση-Πλήρης βύθιση-Διαπερατότητα υδρατμών

Οι μετρήσεις της τριχοειδούς απορρόφησης έγιναν ως εξής: Τα δοκίμια αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν με την επικαλυμμένη πλευρά επάνω σε διηθητικά χαρτιά (1cm χαρτιού Whatman, No 4) μερικώς εμβαπτισμένα σε απιονισμένο νερό. Μετά από 24h το δείγμα απομακρυνόταν από το διηθητικό χαρτί και ζυγίζόταν ξανά, προκειμένου να υπολογιστεί το βάρος του νερού, που απορροφήθηκε λόγω τριχοειδών δυνάμεων (Poli et al., 2004, Tsakalof et al., 2007).



Εικόνα 7.12. Δείγματα πλήρως βυθισμένα σε απιονισμένο νερό για τις μετρήσεις υδαταπορρόφησης

Τα δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις πλήρους βύθισης, επιστρώθηκαν προσεκτικά από όλες τις πλευρές. Κατά την πλήρη βύθιση τα δείγματα βυθίστηκαν πλήρως σε απιονισμένο νερό και κάθε 24 h γινόταν ζύγιση μέχρι να σταθεροποιηθεί το βάρος τους.

Στις μετρήσεις της διαπερατότητας σε υδρατμούς τα δοκίμια τοποθετούνταν στην κορυφή ενός κυλινδρικού δοχείου PVC, το οποίο ήταν γεμάτο μέχρι τη μέση με απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια τα δοχεία σφραγίζονταν, προκειμένου οι ατμοί να διέρχονται μόνο μέσα από την πέτρα και αφέθηκαν στο περιβάλλον (Tsakalof et al., 2007). Τα δοχεία ζυγίζονταν κάθε 24 h.

8. Αποτελέσματα μετρήσεων-Επεξεργασία αποτελεσμάτων

8.1. Δείγματα δομικών λίθων

Αρχικά, στους παρακάτω πίνακες, γίνεται μια γενική περιγραφή των δειγμάτων. Διακρίνεται η κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων στην κατηγορία, των οποίων ανήκει κάθε δείγμα και η ονομασία τους (Πίν. 8.1.1). Η σειρά δειγμάτων, που περιγράφεται είναι η DD (Dion Demeter) και DA (Dion Asklepios). Στον πίνακα 8.1.2 παρουσιάζεται η ορυκτολογική τους σύσταση, όπως προκύπτει από τη μελέτη σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Πίνακας 8.1.1. Είδη λίθων των δειγμάτων

Ονομασία δείγματος	Είδος λίθου
DD1	Ασβεστόλιθος
DD2	Κροκαλοπαγές
DD3	Ασβεστόλιθος
DD4	Μάρμαρο
DD5	Μάρμαρο
DD6	Πωρόλιθος
DD7	Ψαμμίτης
DD8	Πλίνθος

DD9	Μάρμαρο
DA1	Κροκαλοπαγές
DA2	Ασβεστόλιθος
DA3	Πλίνθος
DA4	Ψαμμίτης

8.1.1. Ορυκτολογικός και γεωχημικός χαρακτηρισμός

Η πετρογραφική εξέταση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με μακροσκοπική παρατήρηση και μικροσκοπική μελέτη. Έγινε περιγραφή των λιθοτύπων, που ανήκουν τα δείγματα και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παρατήρηση των δειγμάτων με οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο, καθώς και με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Με βάση τη μελέτη αυτή, διαπιστώθηκαν τα κύρια ορυκτά των πετρωμάτων (ασβεστίτης, δολομίτης, αραγωνίτης, χαλαζίας, λευκός μαρμαρυγίας, κ.α.), τα δευτερογενή ορυκτά, που έχουν εντοπιστεί στις επιφάνειες των δομικών λίθων (καολινίτης, ιλλίτης, ρουτήλιο, αιματίτης, κ.α.) καθώς και τα δευτερογενή ορυκτά, που προέρχονται από την αλλοίωση, λόγω φθοράς των πετρωμάτων (Πίνακας. 8.1.3).

Πίνακας 8.1.2. Πρωτογενής και δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων των δύο ιερών, όπως προκύπτει από τη μελέτη σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Πρωτογενή ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά (Ιζηματογενή προϊόντα)	Δευτερογενή ορυκτά (προϊόντα φθοράς)
Ασβεστίτης: CaCO_3	Καολινίτης: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Γύψος: $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$
Αραγωνίτης: CaCO_3	Ιλλίτης:	Δευτερεύοντα ανθρακικά
Δολομίτης: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$	(ασβεστίτης-δολομίτης)
Χαλαζίας: SiO_2	$[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$	που καθιζάνουν από υδατικά
Λευκός μαρμαρυγίας και	Οξειδία-Mn	διαλύματα.
σερικήτης: $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	Ρουτήλιο: TiO_2	Επανακρυσταλλωμένος
Αλβίτης: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Αιματίτης: Fe_2O_3	ασβεστίτης και δολομίτης.
Αμφίβολος:	Φθοριοαπατίτης: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	
$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Χρωμίτης: FeCr_2O_4	
Επίδοτο: $\text{Ca}_2(\text{FeAl})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	Οργανική ύλη	
Κ-άστριος: KAlSi_3O_8		

Πίνακας 8.1.3. Ορυκτολογική ανάλυση των διαβρωμένων επιφανειών των δοκιμίων από τα ιερά του Ασκληπιού και της Δήμητρας

Δείγμα	Τύπος πετρώματος	Ασβεστίτης	Δολομίτης	Χαλαζίας	Λευκός μαρμαρυγίας	Αραγωνίτης	Αλβίτης	Οξείδια Fe
DD1	Ασβεστόλιθος	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DD2	Κροκαλοπαγές	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	Ίχνη	-	-	-
DD3	Ασβεστόλιθος	Δευτερεύον	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	Δευτερεύον	-	Ίχνη
DD4	Μάρμαρο	Ίχνη	Κύριο	-	Ίχνη	-	Ίχνη	-
DD5	Μάρμαρο	Κύριο	-	Ίχνη	-	-	-	-
DD6	Πωρόλιθος	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	Ίχνη	Ίχνη
DD7	Ψαμμίτης	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DD8	Πλίνθος	Ασβεστίτης, χαλαζίας, λευκός μαρμαρυγίας, αμφίβολος, επίδοτο, άστριος						
DD9	Μάρμαρο	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DA1	Κροκαλοπαγές	Κύριο	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	Ίχνη
DA2	Ασβεστόλιθος	-	Κύριο	-	-	-	Ίχνη	Ίχνη
DA3	Πλίνθος	Ασβεστίτης, χαλαζίας, λευκός μαρμαρυγίας, επίδοτο						
DA4	Ψαμμίτης	Δευτερεύον	Κύριο	-	-	-	-	Ίχνη

8.1.1.1. Αποτελέσματα

8.1.1.1.1. Δείγμα DA1

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

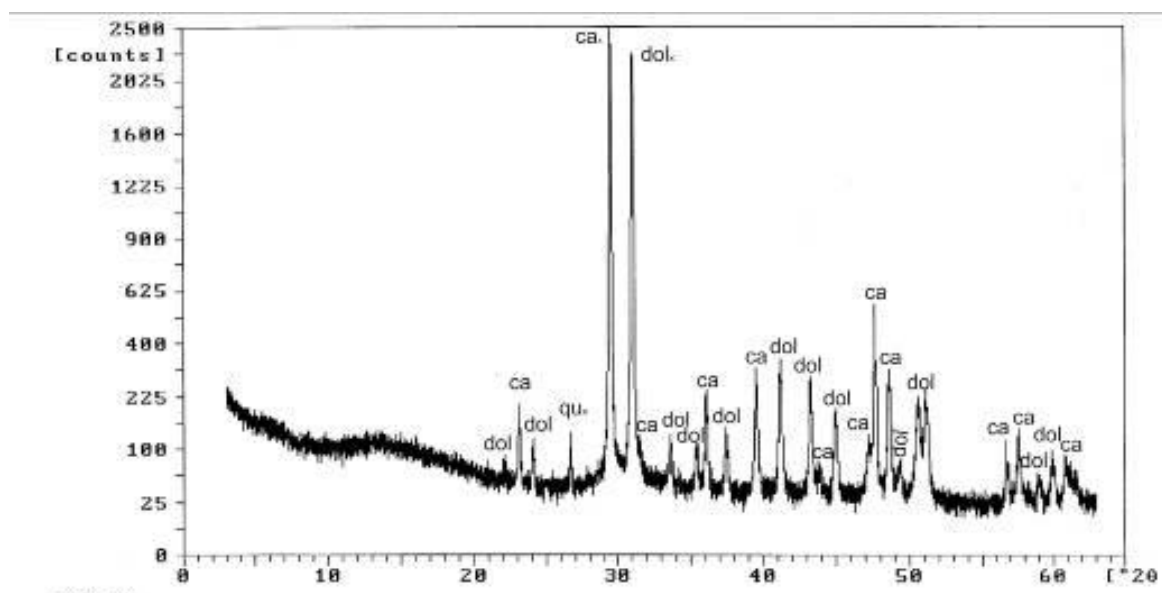
Το πέτρωμα είναι ασβεστίτικο κροκαλοπαγές και αποτελείται από κροκάλες ασβεστόλιθου, το υλικό πλήρωσης και το συνδετικό υλικό (Εικ. 8.1.1). Οι περισσότερες κροκάλες φθάνουν σε μέγεθος τα 2 cm. Στο μικροσκόπιο οι κροκάλες παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη πυκνότητα και είναι αποστρογγυλεμένες. Αποτελούνται κυρίως, από ασβεστίτη και δολομίτη (Πίνακας 8.1.4) και το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 25 έως 100 μm. Σε ίχνη εμφανίζονται χαλαζίας και λευκός μαρμαρυγίας.

Πίνακας 8.1.4. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DAI, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

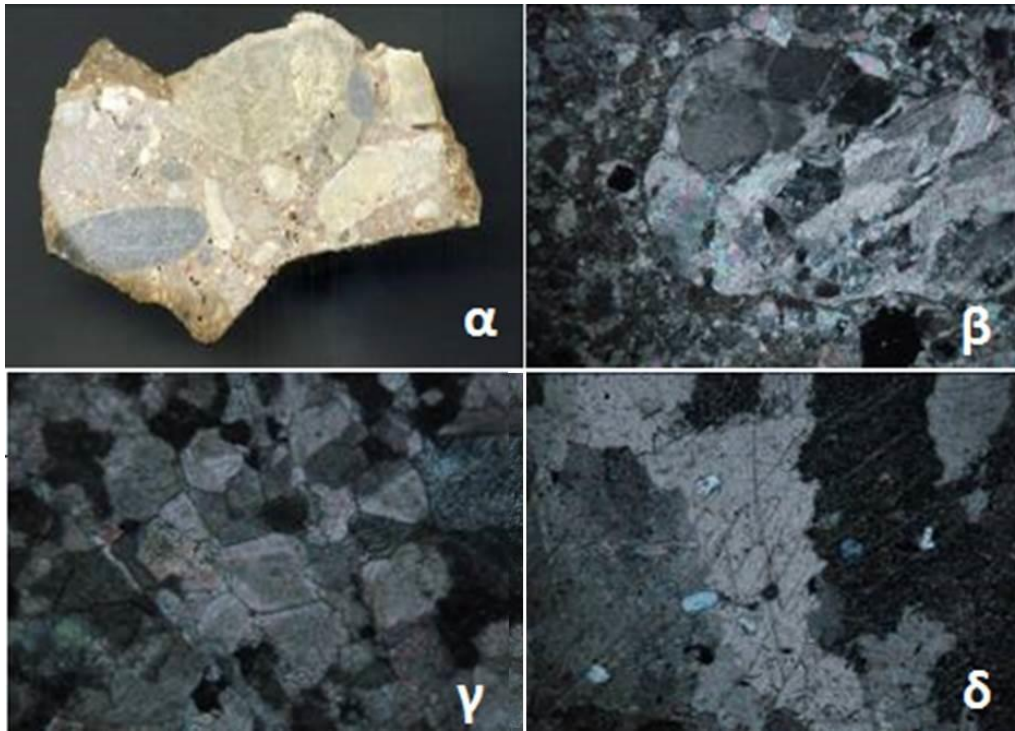
Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη
Κροκαλοπαγές	Ασβεστίτης	Δολομίτης	Χαλαζίας Λευκός μαρμαρυγίας	Ναι

Σπανιότερα παρατηρήθηκαν κόκκοι έως 1,5 mm (Εικ. 8.1.1.β). Οι κόκκοι ασβεστίτη και δολομίτη στις κροκάλες είναι σχετικά γωνιώδεις και παρουσιάζουν τριπλά σημεία επαφής 120°, που δείχνει έντονη ανακρυστάλλωση (Εικ. 8.1.1.γ). Ο ιστός είναι ομοβλαστικός έως ελάχιστα ετεροβλαστικός και εντοπίζονται επιμηκυσμένοι κόκκοι ασβεστίτη και δολομίτη. Σε ίχνη εντοπίζονται κόκκοι χαλαζία και φυλλάρια λευκού μαρμαρυγία μέσα στις κροκάλες (Εικ. 8.1.1.δ).

Το υλικό πλήρωσης και το συνδετικό υλικό αποτελούνται από μικροκρυσταλλικό ασβεστίτη και δολομίτη, με μέγεθος κόκκων κάτω από 10 μm. Σημαντικό μέρος της συνδετικής ύλης αποτελεί η απροσδιόριστη οργανική ύλη, ενώ σε μικρότερο βαθμό τα Fe-οξειδία. Μέσα στο υλικό πλήρωσης εντοπίζονται και απολιθώματα ή θραύσματα αυτών, που φτάνουν σε μήκος το 1 mm.



Σχήμα 8.1.1. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DAI. ca: ασβεστίτης, dol: δολομίτης qu: χαλαζίας

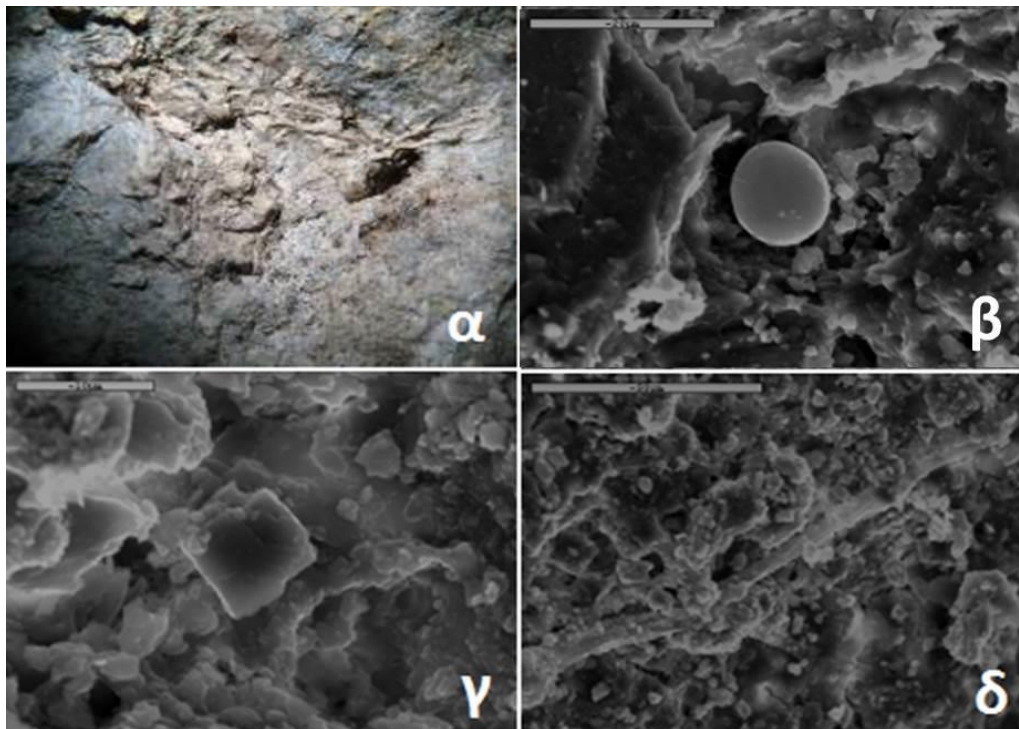


Εικόνα 8.1.1. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA1 α. Τομή του δείγματος β. Κροκάλα με αδροκρυσταλλικό ασβεστίτη μέσα σε υλικό πλήρωσης γ. Αδρόκκοκος ασβεστίτης μέσα σε κροκάλα τριπλά σημεία επαφής 120° δ. Κόκκοι χαλαζία

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος DA1 (Εικ. 8.1.2.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά ασβεστίτης, δολομίτης και χαλαζίας, καθώς και τα προϊόντα διάβρωσης των ορυκτών αυτών. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκε γύψος, η οποία έχει προέλθει από την αλλοίωση του ασβεστίτη, λόγω της επίδρασής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Εικ. 8.1.2.γ). Όπως είναι γνωστό, το διοξείδιο του θείου αντιδρά με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας και παράγεται θειικό οξύ, το οποίο αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο του ασβεστόλιθου και το διαλύει, ειδικά όταν το πέτρωμα είναι εκτεθειμένο στο νερό της βροχής (γυψοποίηση). Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις λόγω της δράσης των επιφανειακών υδάτων και των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ο ασβεστίτης ανακρυσταλλώνεται και σχηματίζεται δευτερογενής ασβεστίτης.

Στην επιφάνεια διάβρωσης παρατηρήθηκαν επίσης οξείδια Fe και ιλλίτης, η παρουσία των οποίων οφείλεται στην κάλυψή τους από ιζήματα και έδαφος (Εικ. 8.1.2.δ). Τέλος, εντοπίστηκαν και μικροοργανισμοί και άλλα οργανικά συστατικά, που αναπτύχθηκαν στην επιφάνεια των δομικών υλικών, κυρίως μετά την ανασκαφή και αποκάλυψη του ναού (Εικ. 8.1.2.β).



Εικόνα 8.1.2. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA1 α. Εξωτερική επιφάνεια δείγματος στο στερεομικροσκόπιο β. Μικροοργανισμός γ. Γύψος δ. Ορυκτό στο κέντρο της φωτογραφίας ιλλίτης, ασβεστίτης, Οξειδία Fe

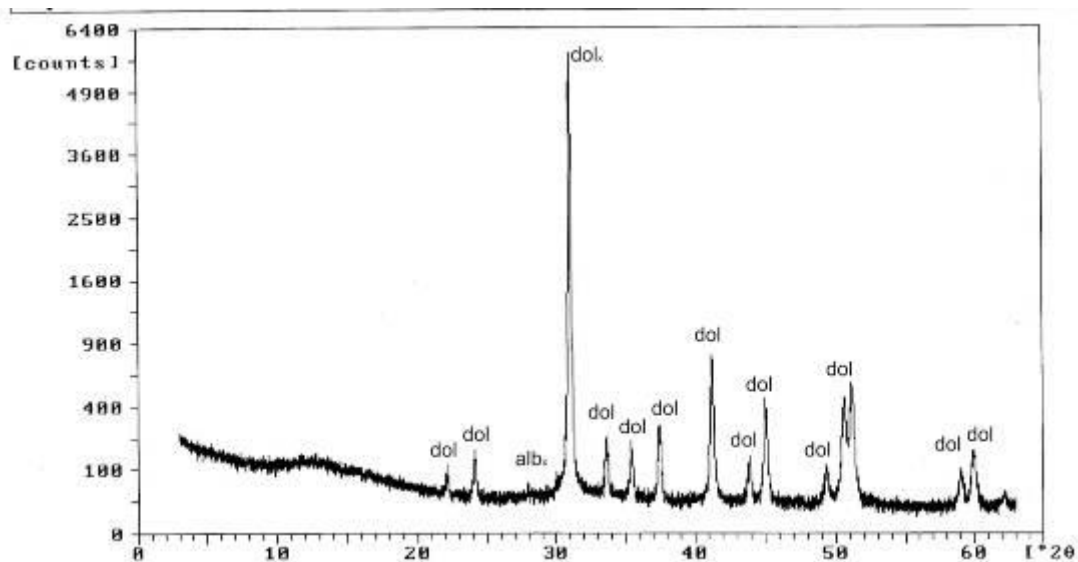
8.1.1.1.2. Δείγμα DA2

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

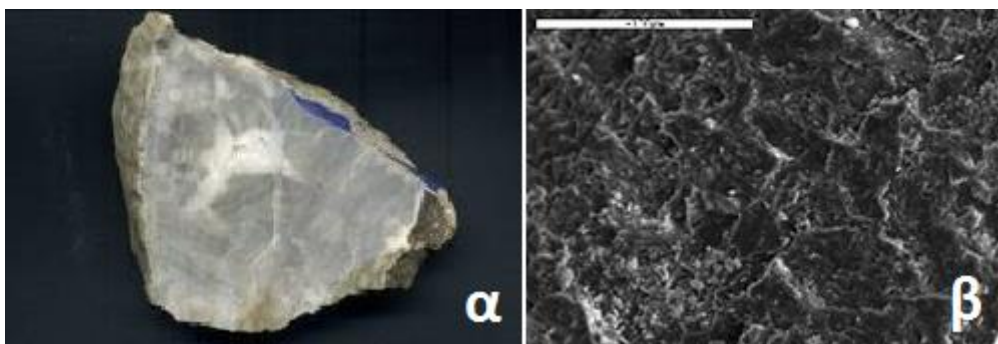
Το πέτρωμα του δείγματος είναι ασβεστόλιθος (Εικ. 8.1.3). Η ορυκτολογική του σύσταση αποτελείται κυρίως από δολομίτη (Σχ. 8.12) και σε ίχνη αλβίτη (Πίν. 8.1.5). Ο δολομίτης είναι μικροκρυσταλλικός με μέγεθος κόκκων που φθάνει τα 10 μm. Το μεγαλύτερο μέρος του πετρώματος (πάνω από 70%) αποτελείται από οργανική ύλη. Κατά θέσεις διακρίνονται συσσωματώματα δολομίτη, τα οποία οφείλονται πιθανώς σε ανακρυσταλλωμένα απολιθώματα, που συχνά έχουν μέγεθος έως 500 mm. Σε αυτή την περίπτωση το μέγεθος των κόκκων του δολομίτη φθάνει τα 0,5 mm, οι οποίοι εμφανίζουν χαρακτηριστική πολυδυμία. Επίσης, οι κρύσταλλοι δολομίτη σχηματίζουν τριπλά σημεία επαφής 120° και τα όρια των κόκκων είναι ευθεία (straight) έως κυρτά (curved).

Πίνακας 8.1.5. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA2, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Ασβεστόλιθος	Δολομίτης	-	Αλβίτης	-



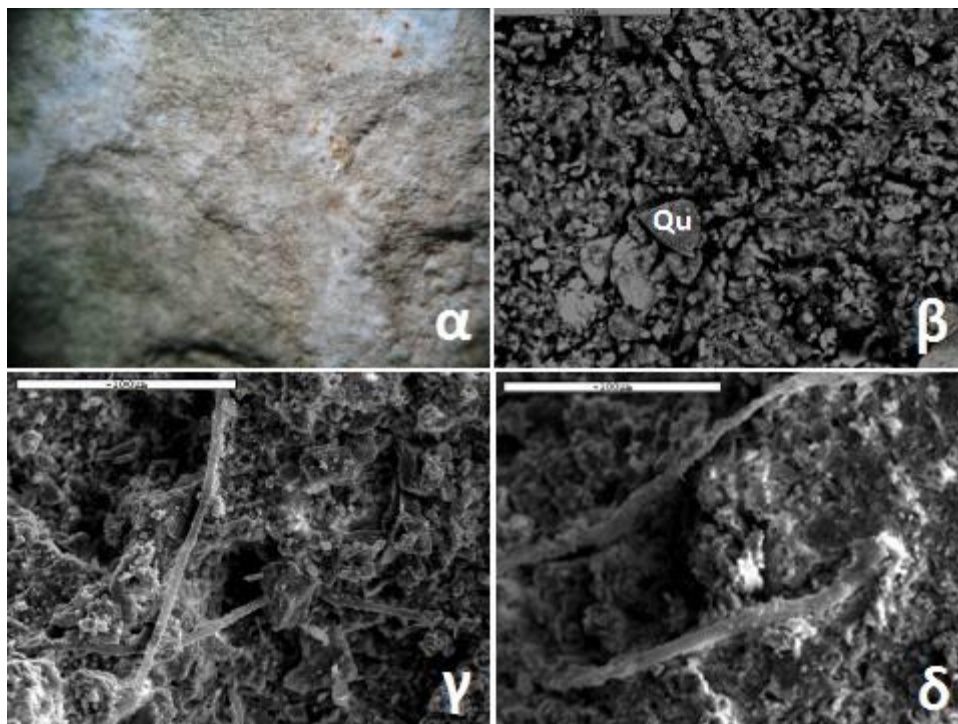
Σχήμα 8.1.2. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DA2. dol: δολομίτης alb: αλβίτης



Εικόνα 8.1.3. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA2 α. Τομή του δείγματος β. Δολομίτης. SEM-BSC

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.4.α) παρατηρήθηκε δολομίτης, που αποτελεί το κύριο ορυκτό του ασβεστόλιθου καθώς και τα προϊόντα αλλοίωσης ή απόθεσης στην επιφάνεια του δείγματος. Αναλυτικότερα εντοπίστηκαν χαλαζίας (Εικ. 8.1.4.γ), ιλλίτης, αιματίτης καθώς και οξειδία του Fe (Εικ. 8.1.4.δ, ε, στ). Τα ορυκτά αυτά οφείλονται στα ιζήματα που κάλυψαν το μνημείο. Σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζονται περιασβεστωμένα ριζίδια (Εικ. 8.1.4.δ, στ) με χαρακτηριστική επιμηκυσμένη κυλινδρική μορφή και με ορυκτολογική σύσταση δολομίτη. Τέλος, εντοπίστηκε ένα ορυκτό του Ti και του Fe, πιθανώς ψευδορουτήλιο, η παρουσία του οποίου πιθανώς να οφείλεται στην κάλυψη από ιζήματα, κάτι που σίγουρα χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.



Εικόνα 8.1.4. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση στην επιφάνεια του δείγματος DA2 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: Qu: χαλαζία, Ti_Fe: πιθανώς ψευδορουτήλιο, ht: αιματίτης, dol: δολομίτης γ. δ. Δευτερογενής επιμηκυσμένος δολομίτης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δείγματος από τη δράση του νερού, SEM

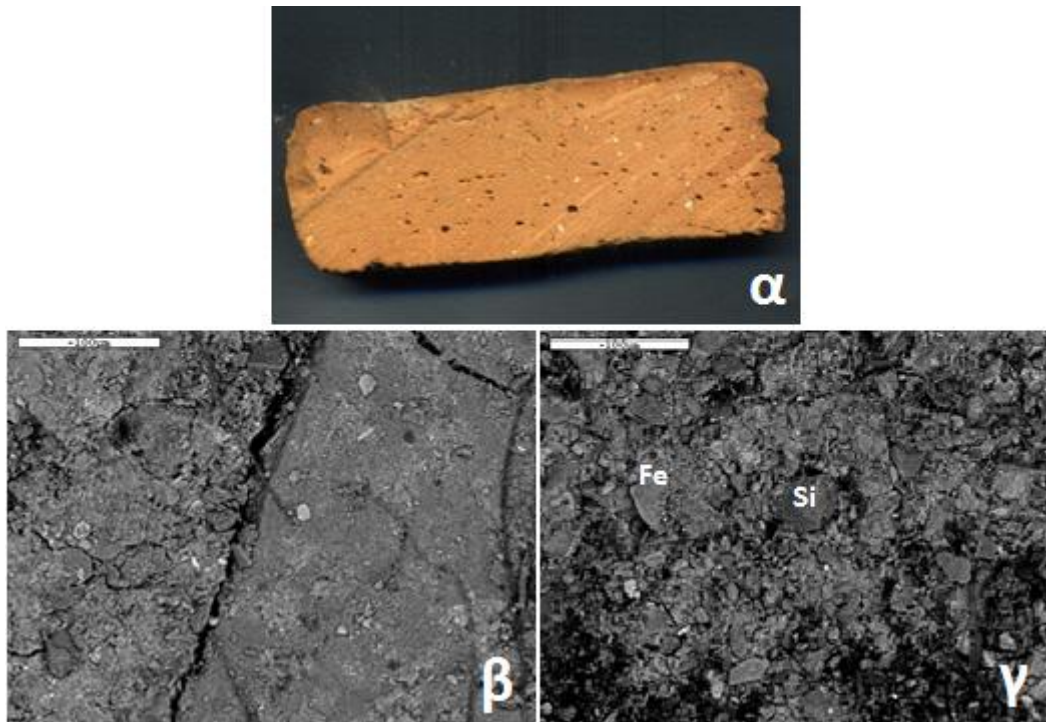
8.1.1.1.3. Δείγμα DA3

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Πρόκειται για κεραμική πλίνθο (Εικ.8.1.5.α), η οποία αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους διαφόρων ορυκτών (Πίνακας 8.1.6). Οι κόκκοι αυτοί αποτελούνται κυρίως από χαλαζία (Εικ. 8.1.5.β), λευκό μαρμαρυγία, μικροκλίνη, επίδοτο και πλαγιόκλαστο (Εικ. 8.1.5.γ).

Πίνακας 8.1.6. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA3, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

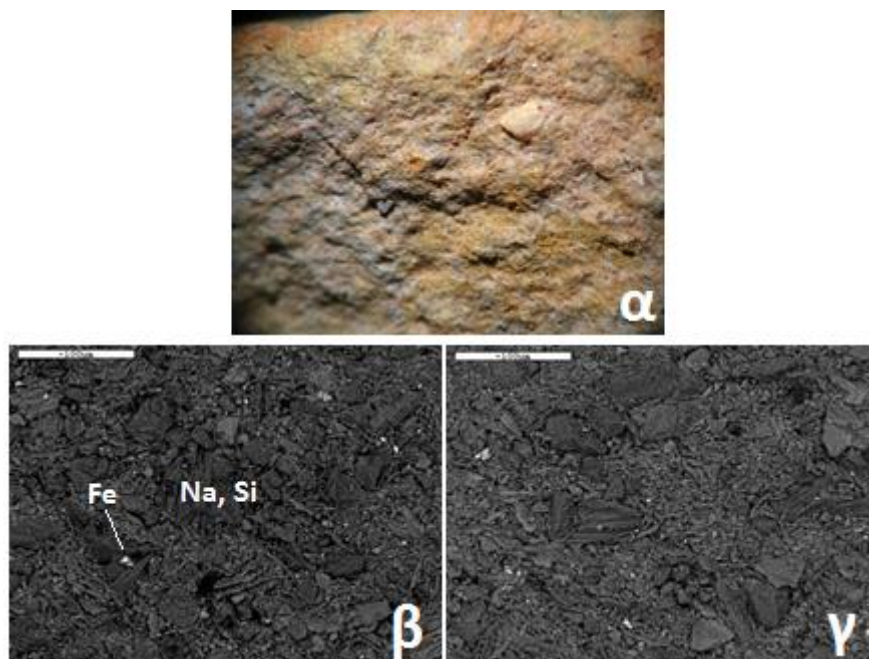
Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Πλίνθος	Ασβεσίτης	Χαλαζίας, Λευκός μαρμαρυγίας	Μικροκλίνης Επίδοτο Πλαγιόκλαστο	-



Εικόνα 8.1.5. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA3 α. Μικροσκοπική τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: *Qu*: Χαλαζίας, *Si*: Πυρίτιο, Μέταλλα: *Al, Si, Ca, Fe*
 γ. *Fe*: Σίδηρος, *Si*: Πυρίτιο

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά (ασβεστίτης) καθώς και τα προϊόντα διάβρωσης των ορυκτών αυτών (χαλαζίας, λευκός μαρμαρυγίας) (Πίνακας 8.1.6).



Εικόνα 8.1.6. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA3 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Μέταλλα που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: *Fe*:σίδηρος, *Na*: Νάτριο, *Si*: πυρίτιο γ. Ομοίως: *Na*: Νάτριο, *Si*: Πυρίτιο

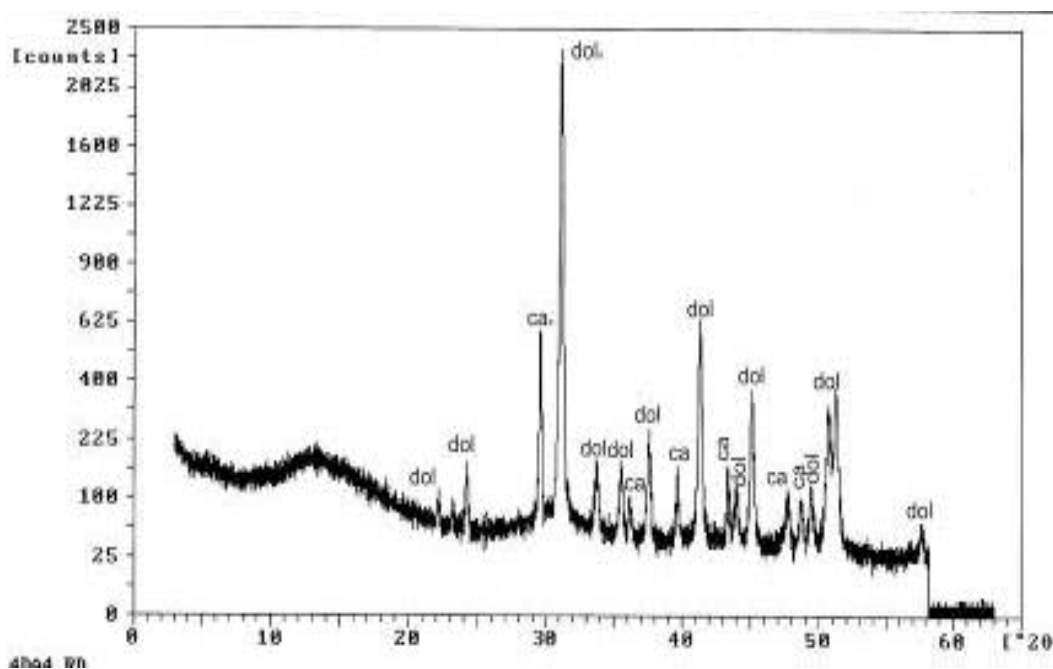
8.1.1.1.4. Δείγμα DA4

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

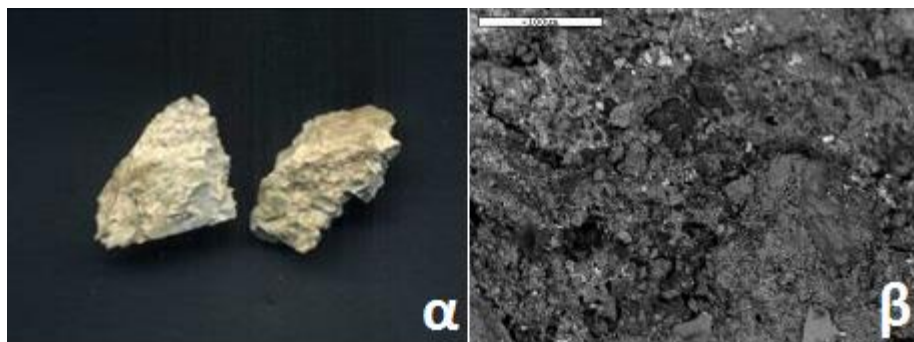
Πρόκειται για ασβεστιτικό ψαμμίτη (Εικ. 8.1.7.α), που αποτελείται κυρίως από κλαστικούς γωνιώδεις κόκκους μικροκοκκώδους δολομίτη κυρίως, και σε μικρότερο ποσοστό από ασβεστίτη (Πίνακας 8.1.7). Οι κλαστικοί κόκκοι φθάνουν σε μέγεθος έως 5 mm (Εικ. 8.1.7.β, γ), ενώ σε λίγες περιπτώσεις εντοπίζεται ανακρυσταλλωμένος δολομίτης και ασβεστίτης με μέγεθος κόκκων, που φτάνει τα 500 μm. Οι κόκκοι αυτοί, εμφανίζουν χαρακτηριστική πολυδυμία. Στο υλικό πλήρωσης και στο συνδετικό υλικό, εκτός από μικροκρυσταλλικό δολομίτη και ασβεστίτη συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό οργανική ύλη (Εικ. 8.1.7.δ).

Πίνακας 8.1.7. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA4, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη
Ψαμμίτης	Δολομίτης	Ασβεστίτης	-	Ναι



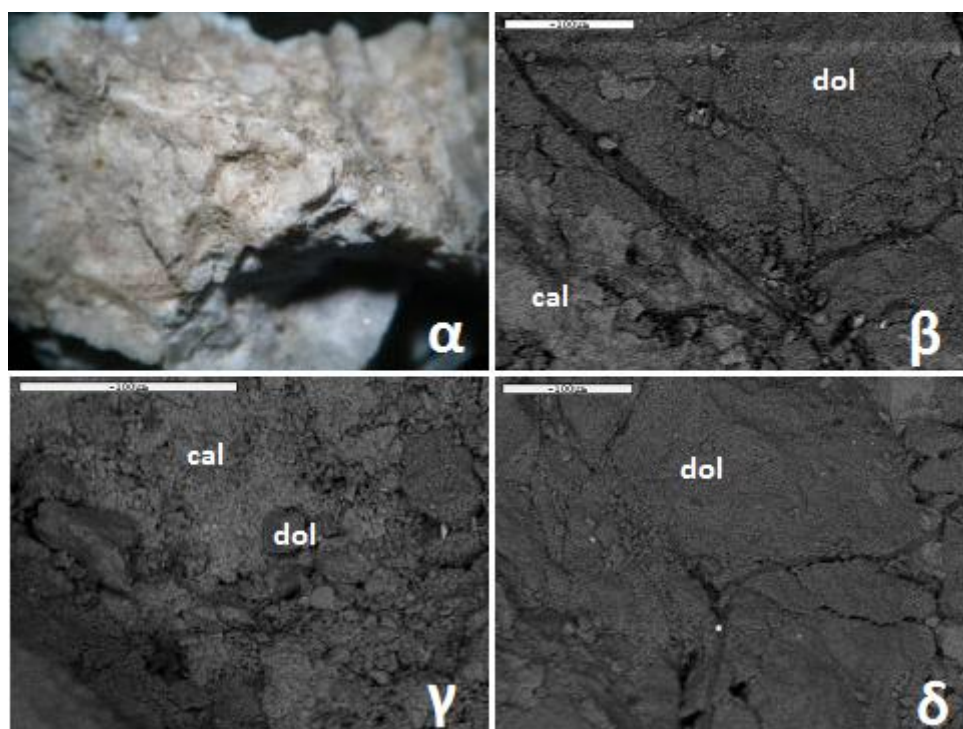
Σχήμα 8.1.3. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DA4. dol: δολομίτης cal: ασβεστίτης



Εικόνα 8.1.7. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA4 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: cal: Ασβεστίτης, dol: Δολομίτης, Al, Si, Ca: Καλιούχος άστριος

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.8) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά, δηλαδή δολομίτης και ασβεστίτης, καθώς και καολίνης, ιλλίτης και οξειδία του Fe, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν το αρχαίο μνημείο.



Εικόνα 8.1.8. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DA4 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος dol: Δολομίτης, cal: ασβεστίτης, γ. Ομοίως: dol: Δολομίτης, cal: ασβεστίτης, δ. Ομοίως: dol: Δολομίτης

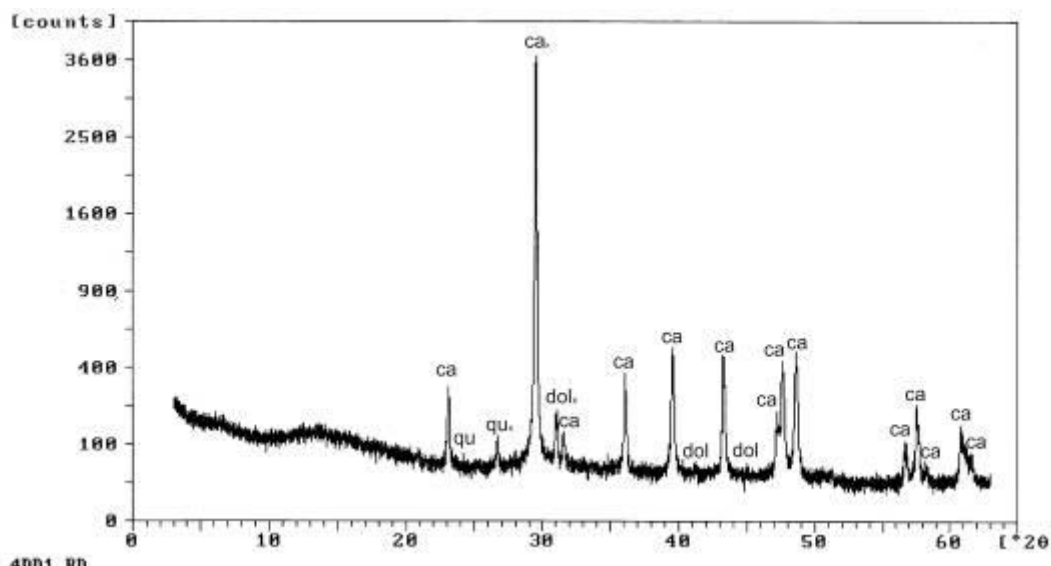
8.1.1.1.5. Δείγμα DD1

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

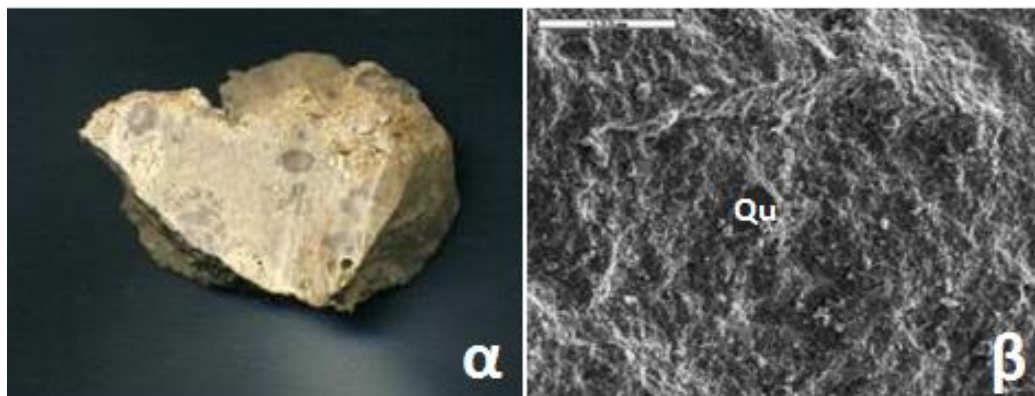
Το δείγμα είναι ασβεστόλιθος (Εικ. 8.1.9.α). Η ορυκτολογική του σύσταση αποτελείται κυρίως από ασβεσίτη (Πίνακας 8.1.8), ενώ σε μικρό ποσοστό συμμετέχουν δολομίτης και χαλαζίας. Ο ασβεσίτης είναι μικροκρυσταλλικός με μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται από 10 έως 20 μm και σπανίως φθάνει έως 100 μm. Το μεγαλύτερο μέρος του πετρώματος (πάνω από 70%) αποτελείται από οργανική ύλη (Εικ. 8.1.9.β). Κατά θέσεις διακρίνονται συσσωματώματα ασβεσίτη, μεγέθους που φθάνουν έως 1,5 cm, τα οποία οφείλονται σε ανακρυσταλλωμένα απολιθώματα (Εικ. 8.1.9.γ). Σε αυτή την περίπτωση, το μέγεθος των κόκκων του ασβεσίτη φθάνει τα 0,5 mm. Τα απολιθώματα είναι κυρίως γαστερόποδα και ελασματοβράγχια καθώς και θραύσματα αυτών (Εικ. 8.1.9.δ).

Πίνακας 8.1.8. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD1, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

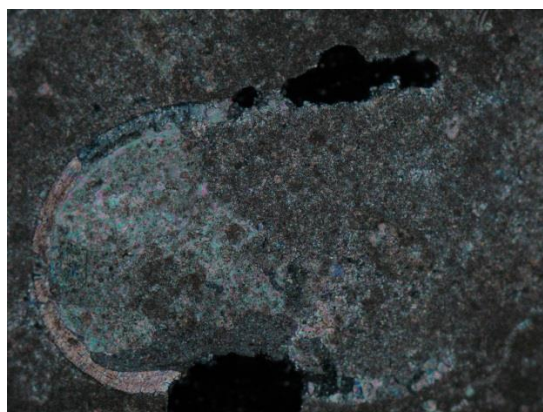
Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Ασβεστόλιθος	Ασβεσίτης	-	Δολομίτης Χαλαζίας	Ναι



Σχήμα 8.1.4. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD1 ca: ασβεσίτης, dol: δολομίτης qu: χαλαζίας



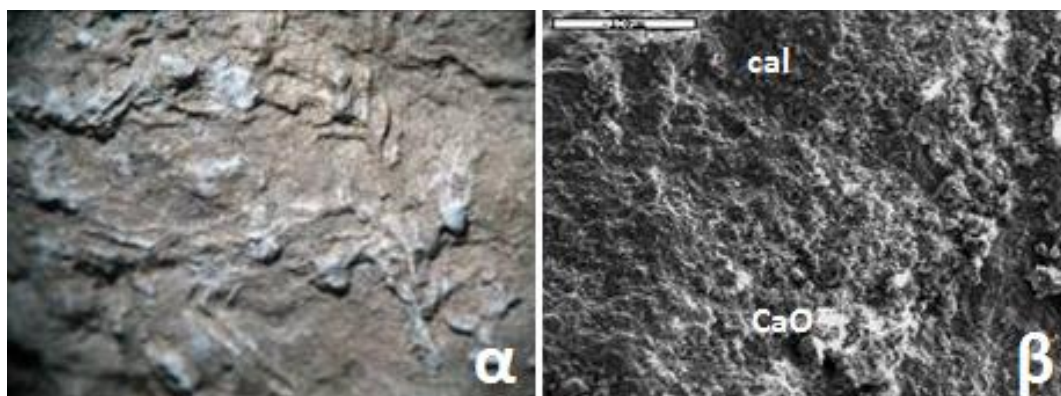
Εικόνα 8.1.9. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD1α. Τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: Qu: χαλαζίας



Εικόνα 8.1.10. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Απολίθωμα ελασματοβραγχίου σε τομή

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά, δηλαδή ασβεστίτης, δολομίτης και χαλαζίας, καθώς και οργανική ύλη. Στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν καολίνη και οξείδια του Fe, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν τον μεγάλο βωμό του ιερού. (Εικ. 8.1.11.α-δ).



Εικόνα 8.1.11. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD1α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: CaO: Οξείδιο ασβεστίου, cal: Ασβεστίτης

8.1.1.1.6. Δείγμα DD2

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

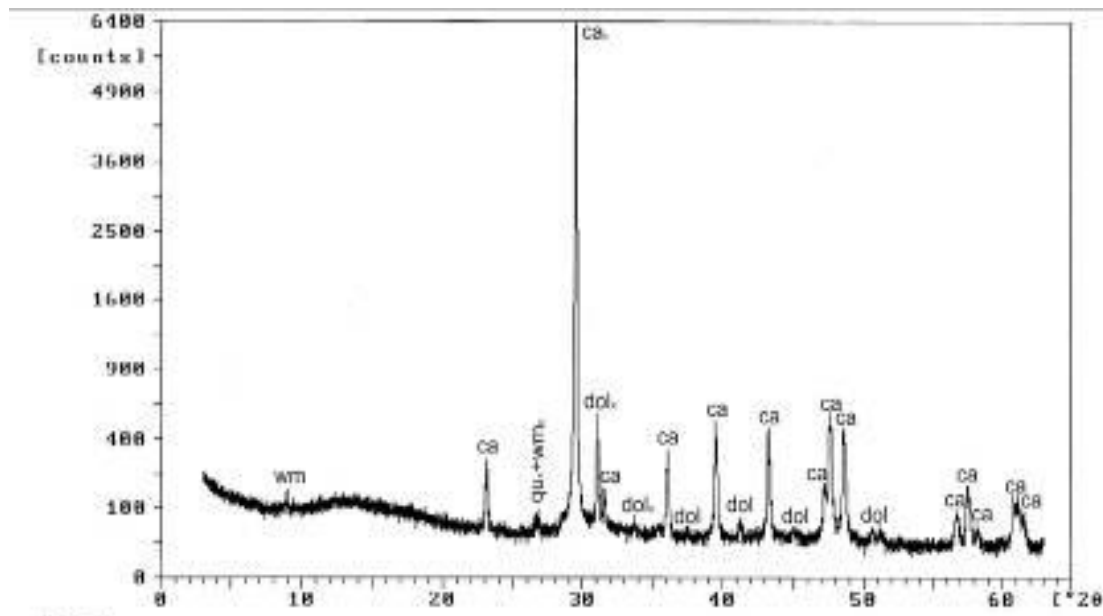
Πρόκειται για ασβεστιτικό κροκαλοπαγές πέτρωμα (Εικ. 8.1.12.α), που αποτελείται από κροκάλες ασβεστόλιθου, από υλικό πλήρωσης και από συνδετικό υλικό (Πίνακας 8.1.9). Πολύ σπάνια υπάρχουν κροκάλες από μεταμορφωμένα πετρώματα π.χ. γνεύσιος με διάσπαρτα μεταλλικά ορυκτά (σουλφίδια) το μέγεθος των οποίων φτάνει το 1 mm. Η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος (κροκάλες και υλικό πλήρωσης) αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και δευτερευόντως από δολομίτη, ενώ σε ίχνη εμφανίζονται χαλαζίας και λευκός μαρμαρυγίας.

Πίνακας 8.1.9. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD2, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Απολιθώματα
Κροκαλοπαγές	Ασβεστίτης	Δολομίτης	Χαλαζίας, Λευκός μαρμαρυγίας	Ναι

Οι περισσότερες κροκάλες φθάνουν σε μέγεθος το 1 cm και σπανιότερα τα 5 cm. Στο μικροσκόπιο οι κροκάλες παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη πυκνότητα και είναι αποστρογγυλεμένες. Αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη και λίγο δολομίτη και το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 100-500 μm. Σπανιότερα, παρατηρήθηκαν κόκκοι έως 1 mm. Οι κόκκοι ασβεστίτη στις κροκάλες είναι σχετικά γωνιώδεις και παρουσιάζουν τριπλά σημεία επαφής 120°, που δείχνει έντονη ανακρυστάλλωση. Ο ιστός είναι ομοβλαστικός έως ελάχιστα ετεροβλαστικός και εντοπίζονται επιμηκυσμένοι κόκκοι ασβεστίτη.

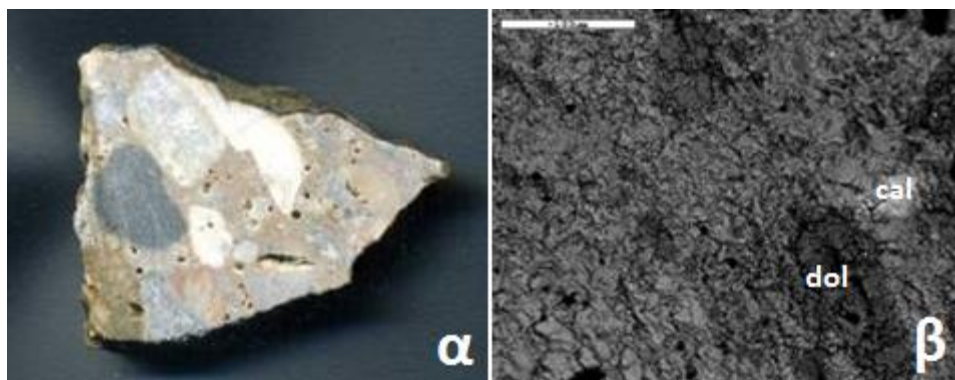
Το υλικό πλήρωσης και το συνδετικό υλικό αποτελούνται από μικροκρυσταλλικό ασβεστίτη με μέγεθος κόκκων κάτω από 5 μm. Μέσα στο υλικό πλήρωσης εντοπίζονται και απολιθώματα ή θραύσματα αυτών.



Σχήμα 8.1.5. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD2 ca: ασβεστίτης dol: δολομίτης qm: χαλαζίας

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

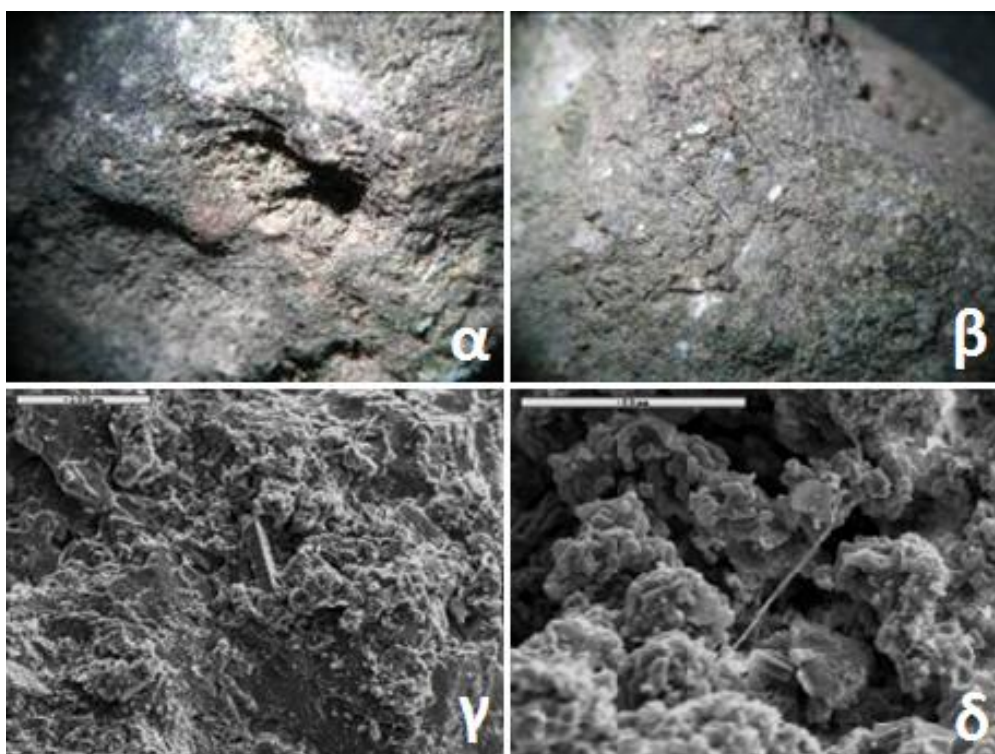
Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.13.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά ασβεστίτης, δολομίτης και χαλαζίας (Εικ. 8.1.13.β), καθώς και τα προϊόντα διάβρωσης των ορυκτών αυτών. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκε γύψος, η οποία έχει προέλθει από την αλλοίωση του ασβεστίτη λόγω της επαφής του με την ατμόσφαιρα (Εικ. 8.1.13.γ). Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις λόγω της δράσης των επιφανειακών υδάτων και των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ο ασβεστίτης ανακρυσταλλώνεται και σχηματίζεται δευτερογενής ασβεστίτης.



Εικόνα 8.1.12. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD2 α. Τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: dol: Δολομίτης, cal: Ασβεστίτης

Στην επιφάνεια διάβρωσης παρατηρήθηκαν επίσης, καολινίτης και ιλλίτης, η παρουσία των οποίων οφείλεται στην κάλυψή τους από ιζήματα και έδαφος. Σε μία περίπτωση εντοπίστηκε ένα ορυκτό του Cr και του Fe, πιθανώς χρωμίτης, η παρουσία του οποίου μάλλον οφείλεται στην κάλυψη από τα ιζήματα, κάτι που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, εντοπίστηκαν και μικροοργανισμοί και άλλα οργανικά συστατικά, που αναπτύχθηκαν στην επιφάνεια των δομικών υλικών, κυρίως μετά την ανασκαφή και αποκάλυψη του μεγάλου βωμού του ιερού.



Εικόνα 8.1.13. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD2 α, β. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο γ, δ. Οργανικές ίνες

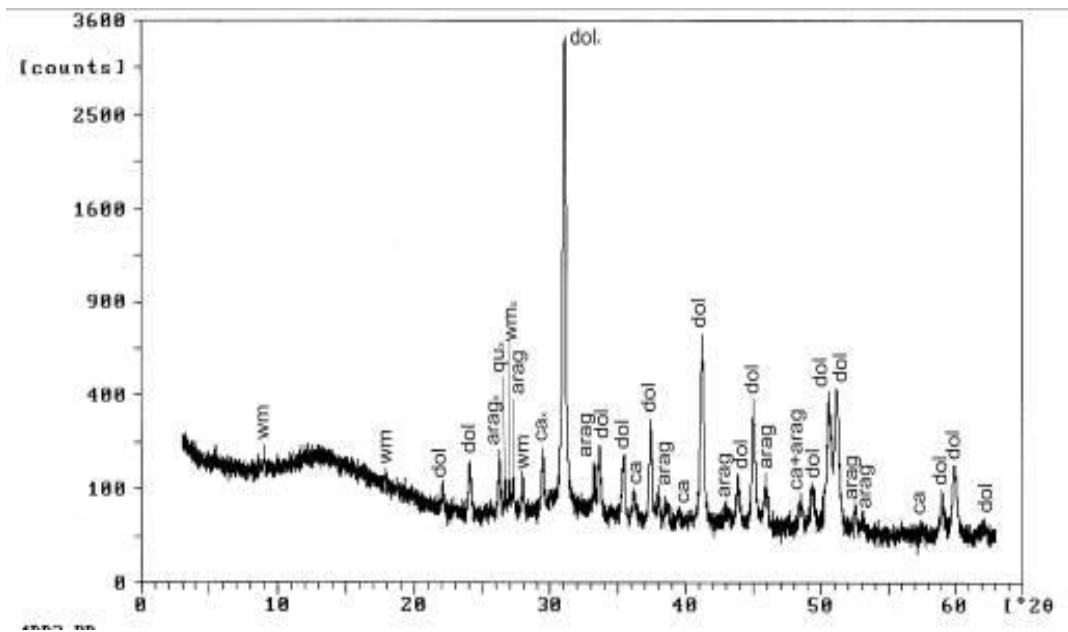
8.1.1.1.7. Δείγμα DD3

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

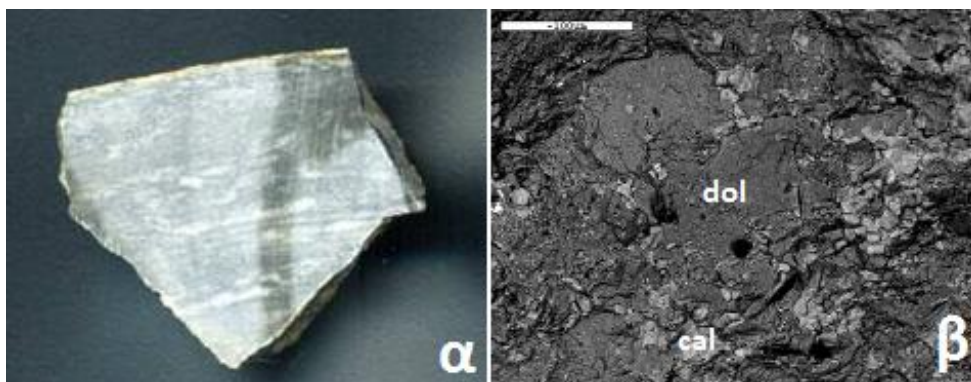
Το δείγμα είναι ασβεστόλιθος (Εικ. 8.1.14.α), πρόκειται για ένα ιζηματογενές πέτρωμα με χαρακτηριστική στρώση, που αποτελείται από οργανική ύλη σε ποσοστό πάνω από 80% (Εικ. 8.1.14.β). Το κύριο ορυκτό του πετρώματος είναι ο δολομίτης (Εικ. 8.1.14.δ), ενώ σε μικρότερο ποσοστό συμμετέχουν ο ασβεστίτης και ο αραγωνίτης. Σε ίχνη εντοπίζονται επίσης, λευκός μαρμαρυγίας και χαλαζίας.

Πίνακας 8.1.10. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD3, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Ασβεστόλιθος	Δολομίτης	Ασβεστίτης, Αραγωνίτης	Λευκός μαρμαρυγίας, Χαλαζίας	-

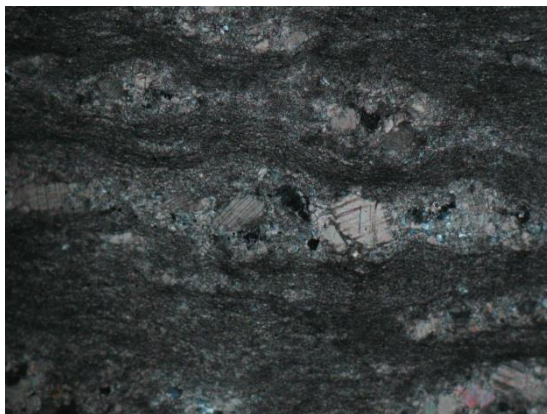


Σχήμα 8.1.6. Διάγραμμα ακτίνων-Χ από το δείγμα DD3 dol: δολομίτης ca: ασβεστίτης, arag: αραγωνίτης, wm:λευκός μαρμαρυγίας



Εικόνα 8.1.14. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD3 α. Τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: dol: Δολομίτης, cal: Ασβεστίτης

Πολύ χαρακτηριστικά διακρίνονται στρώματα και φακοί από ανακρυσταλλωμένο δολομίτη και ασβεστίτη, λόγω της διαγένεσης, με πάχος που φθάνει το 1 mm. Μέσα στους φακούς σε μικρό ποσοστό συμμετέχουν κόκκοι χαλαζία, λευκός μαρμαρυγίας και μεταλλικά ορυκτά (σουλφίδια). Ο δολομίτης και ο ασβεστίτης είναι αδροκρυσταλλικοί με μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται από 200 μm έως 1 mm. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν πολυδυμίες και έχουν ετεροβλαστικό ιστό. Ο λευκός μαρμαρυγίας φτάνει σε μέγεθος τα 150 μm και ο χαλαζίας τα 200 μm.



Εικόνα 8.1.15. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Ανακρυσταλλωμένος δολομίτης, παράλληλα με τη στρωμάτωση του ασβεστόλιθου

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.16.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά ασβεστίτης, δολομίτης, αραγωνίτης και λευκός μαρμαρυγίας καθώς και τα προϊόντα διάβρωσης των ορυκτών αυτών. Στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν μοσχοβίτης, αλβίτης, ρουτίλιο και οξείδια του Fe (Εικ. 8.1.16.β), η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν το νότιο κλασικό ναό του ιερού.



Εικόνα 8.1.16. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD3 α, β. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο

8.1.1.1.8. Δείγμα DD4

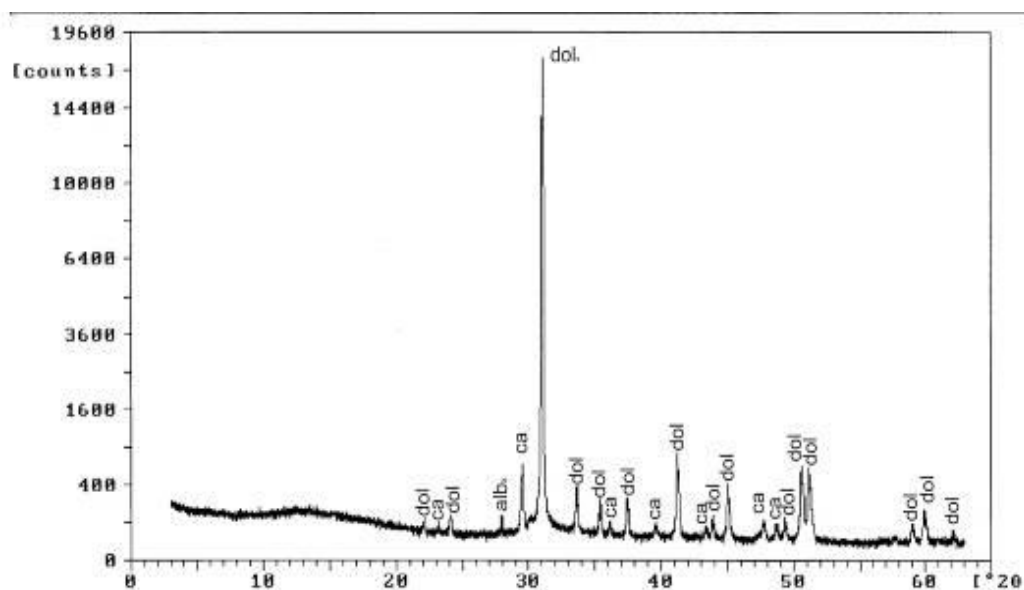
α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Το δείγμα είναι λευκό μάρμαρο (Εικ. 8.1.17.α). Πρόκειται για ένα αδρόκοκκο λευκό μάρμαρο. Η ορυκτολογική του σύσταση αποτελείται κυρίως από δολομίτη, ενώ σε ίχνη συμμετέχουν ο ασβεστίτης, ο αλβίτης και ο λευκός μαρμαρυγίας (Πίνακας 8.1.11). Ο ιστός του πετρώματος είναι κυρίως ετεροβλαστικός έως ελάχιστα ομοβλαστικός, δηλαδή τα ορυκτά έχουν δύο ή περισσότερα διαφορετικά μεγέθη, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να έχουν και περίπου παρόμοιο μέγεθος. Το σχήμα των ορίων των κόκκων είναι «συρραφής» (sutured) με εγκοιλώσεις (embayed), και σπάνια κυρτό (curved) (Εικ. 8.1.17.β-δ).

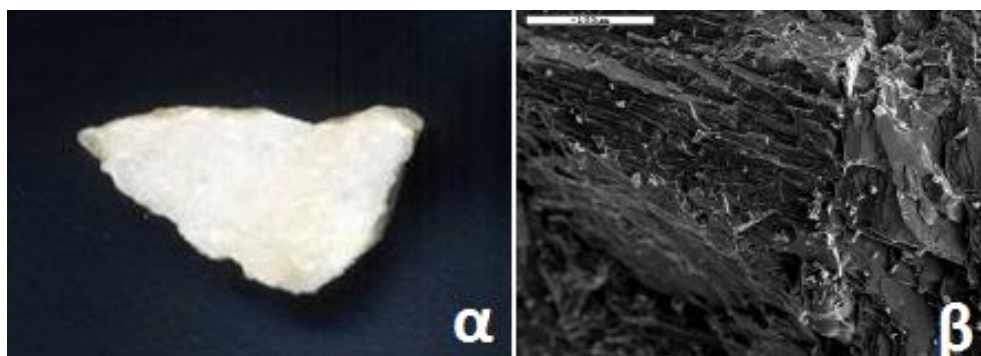
Πίνακας 8.1.11. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD4, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD)

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Λευκό μάρμαρο	Δολομίτης		Ασβεσίτης, Αλβίτης, Λευκός μαρμαρυγίας	-

Το μάρμαρο αποτελείται από κρυστάλλους δολομίτη με ανώμαλο σχήμα και αλλοτριόμορφο ιστό και παρουσιάζουν μία ασθενή επιμήκυνση. Παρατηρήθηκαν κρύσταλλοι δολομίτη με μεγάλο μέγεθος (0,5-1,5 mm), που συμφύονται με δολομίτες μικρότερου μεγέθους (50-500 μm). Συχνά, οι αδρόκοκκοι δολομίτες (> 0.5 mm) παρουσιάζουν πολυδυμίες σε αντίθεση με τους μικρότερους κόκκους, στους οποίους δεν εντοπίζεται πολυδυμία. Στα ενδιάμεσα κενά των κρυστάλλων δολομίτη αναπτύσσονται πολύ σπάνια αλβίτης και φυλλάρια λευκού μαρμαρυγία.



Σχήμα 8.1.7. Διάγραμμα ακτίνων-Χ από το δείγμα DD4 dol: δολομίτης ca: ασβεσίτης, alb: αλβίτης



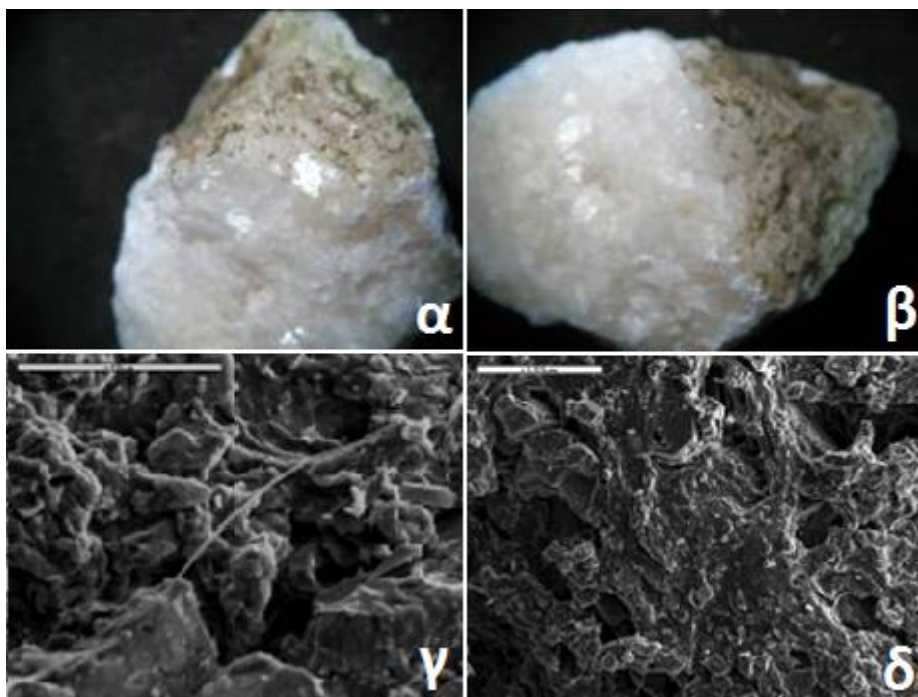
Εικόνες 8.1.17. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD4 α. Τομή του δείγματος β. Μικροσκοπική λήψη της επιφάνειας του δείγματος

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.19.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά, δηλαδή ασβεστίτης, δολομίτης ενώ στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν καολίνης και οξείδια Fe, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν τον σπόνδυλο του κίονα.



Εικόνα 8.1.18. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Αλλοτριόμορφος ιστός και με ασθενή επιμήκυνση



Εικόνα 8.1.19. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD4 α, β. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο γ. Οργανικά στοιχεία δ. dol: Δολομίτης

8.1.1.9. Δείγμα DD5

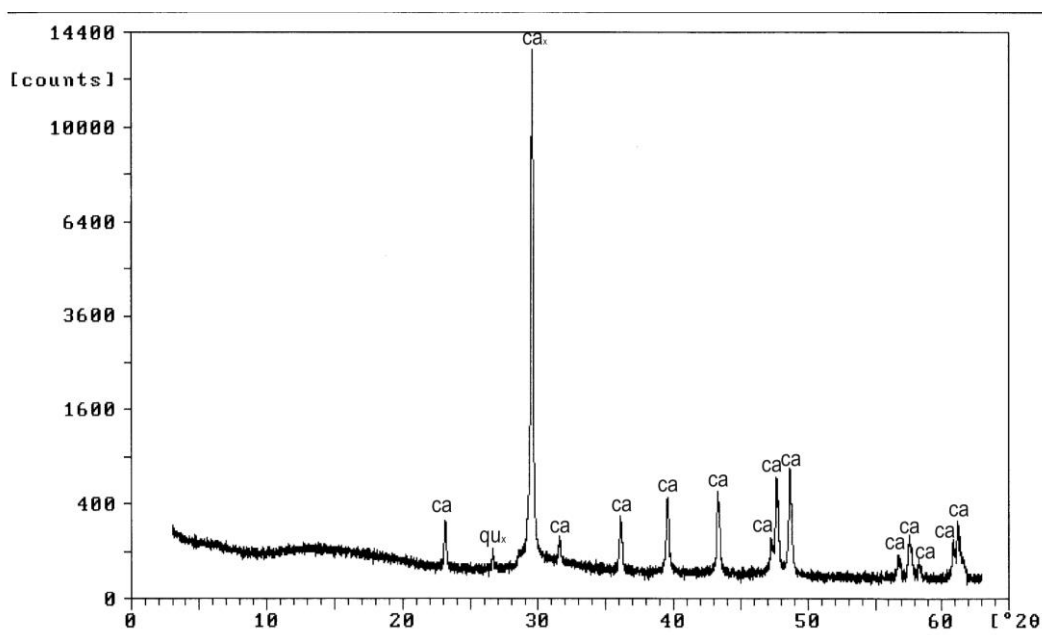
α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Πρόκειται για μάρμαρο, που είναι αδρόκοκκο (Εικ. 8.1.20.α). Η ορυκτολογική του σύσταση αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη, ενώ σε ίχνη εμφανίζεται χαλαζίας (Πίνακας 8.1.12). Ο ιστός του πετρώματος είναι ετεροβλαστικός, δηλαδή τα ορυκτά έχουν δύο διαφορετικά μεγέθη. Το σχήμα

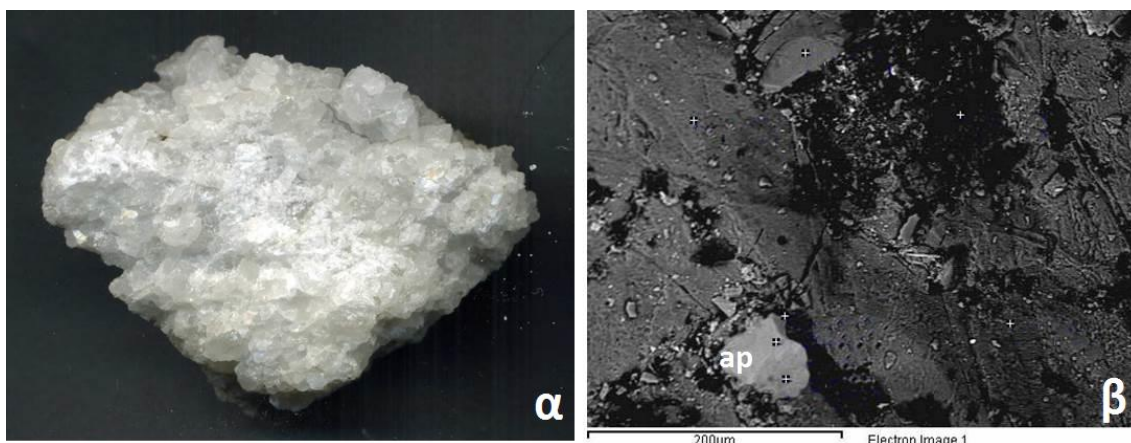
ορίων των κόκκων είναι ευθύ (straight) έως κυρτό (curved) με όρια «συρραφής» (sutured), συχνά με εγκολπώσεις (embayed). Το μέγιστο μέγεθος των κόκκων του ασβεστίτη είναι 3 mm.

Πίνακας 8.1.12. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD5, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Μάρμαρο	Ασβεστίτης	Απατίτης	Χαλαζίας	-

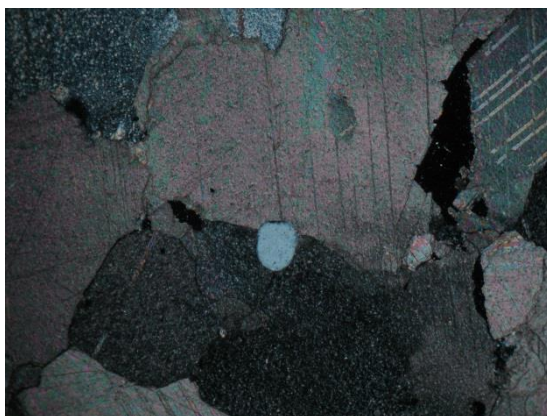


Σχήμα 8.1.8. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD5 ca: ασβεστίτης, qu: χαλαζίας



Εικόνα 8.1.20. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD5 α. Τομή του δείγματος β. ap: απατίτης

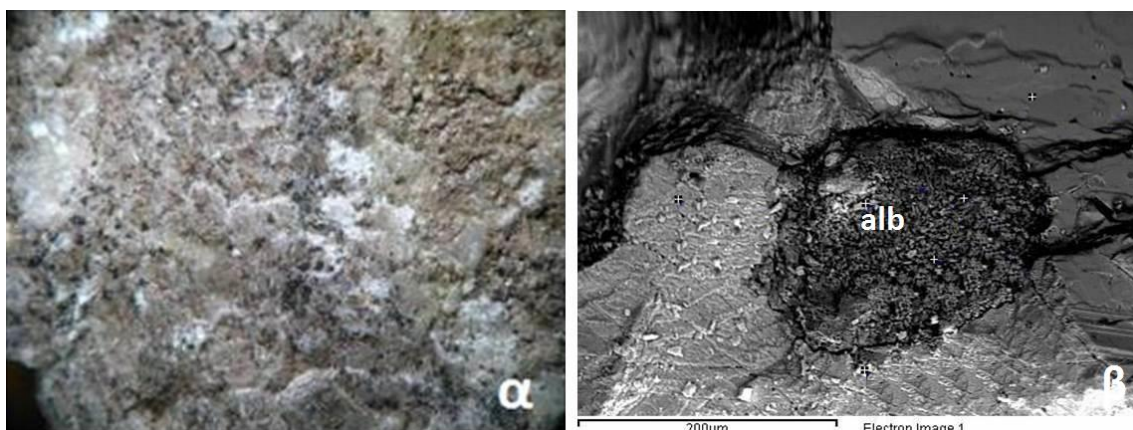
Το μάρμαρο αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη με ανώμαλο σχήμα και αλλοτριόμορφο ιστό. Παρατηρήθηκαν κρύσταλλοι ασβεστίτη με μεγάλο μέγεθος (0.5-3 mm), που συμφύονται με ασβεστίτες μικρότερου μεγέθους (100-500 μm). Οι ασβεστίτες παρουσιάζουν συχνά πολυδυμίες. Στα ενδιάμεσα κενά των κρυστάλλων ασβεστίτη αναπτύσσονται αποστρογγυλεμένοι κόκκοι χαλαζία με μέγεθος περίπου 50-150 μm. Συχνό είναι το φαινόμενο των τριπλών σημείων επαφής των κρυστάλλων ασβεστίτη σε γωνίες 120°, που δείχνει έντονη ανακρυστάλλωση (Εικ. 8.1.20.β).



Εικόνα 8.1.21. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Χαλαζίας με κόκκους ασβεστίτη

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.22.α) παρατηρήθηκε το πρωτογενές ορυκτό, δηλαδή ασβεστίτης. Στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν καολίνη, ιλλίτης και αλβίτης, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν το μνημείο. Επίσης, ανιχνεύτηκε παρουσία φθοριοαπατίτη, που πιθανόν να σχετίζεται με υπολείμματα οστών.



Εικόνα 8.1.22. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD5 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. alb: αλβίτης

8.1.1.10. Δείγμα DD6

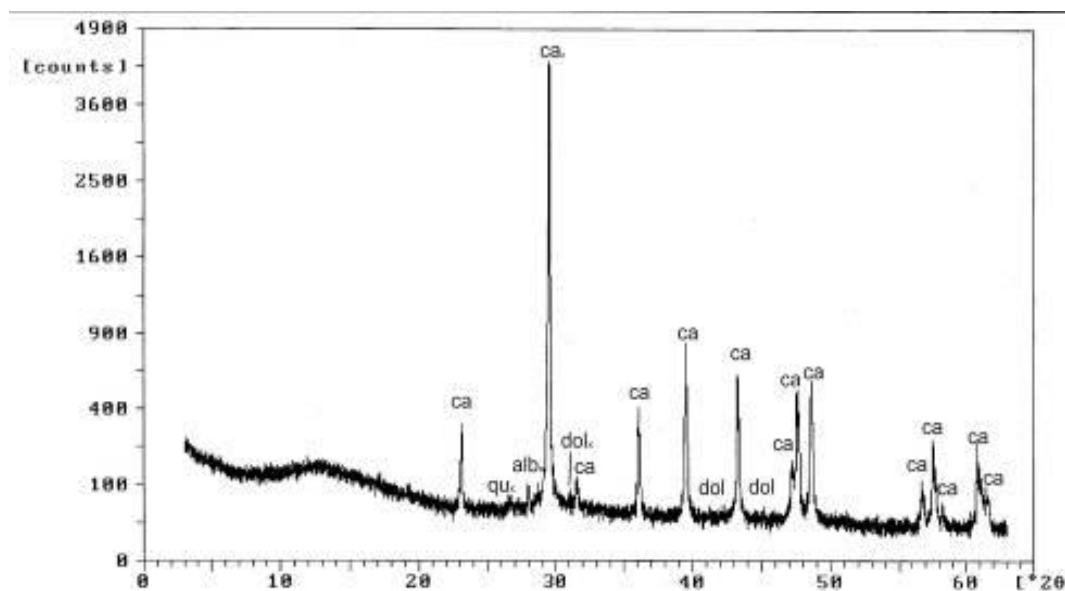
α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Πρόκειται για πωρόλιθο (Εικ. 8.1.23.α), η ορυκτολογική σύσταση του οποίου αποτελείται από μικροκρυσταλλικό ασβεστίτη, που συνυπάρχει μαζί με οργανική ύλη, η οποία καταλαμβάνει πάνω από το 60%, ενώ εντοπίζονται και θραύσματα απολιθωμάτων (Πίνακας 8.1.13).

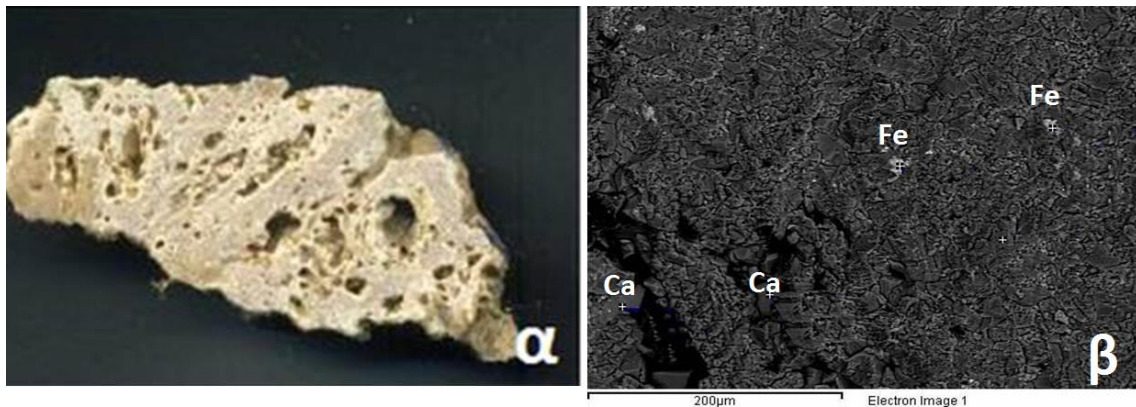
Το μέγεθος των κόκκων ασβεστίτη φθάνει τα 100 μm. Χαρακτηριστικό του πετρώματος είναι οι οπές, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από λίγα μm έως και 5 mm. Περιμετρικά οι οπές αυτές πληρώνονται από αδροκρυσταλλικό ασβεστίτη με μέγεθος κόκκων από 100-500 μm. Σε πολλές περιπτώσεις, οι οπές έχουν πληρωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό από ασβεστίτη, με αποτέλεσμα να έχουν κλείσει. Σε ίχνη εντοπίζονται επίσης, δολομίτης, αλβίτης και χαλαζίας.

Πίνακας 8.1.13. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD6, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

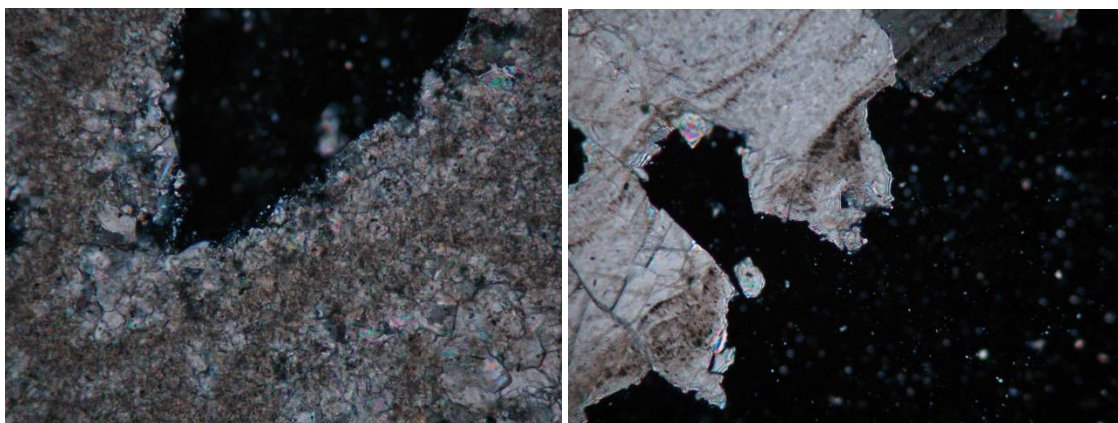
Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη
Πωρόλιθος	Ασβεστίτης	-	Δολομίτης, Αλβίτης, Χαλαζίας	Ναι



Σχήμα 8.1.9. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD6. ca: ασβεστίτης, dol: δολομίτης, qu: χαλαζίας, alb: αλβίτης



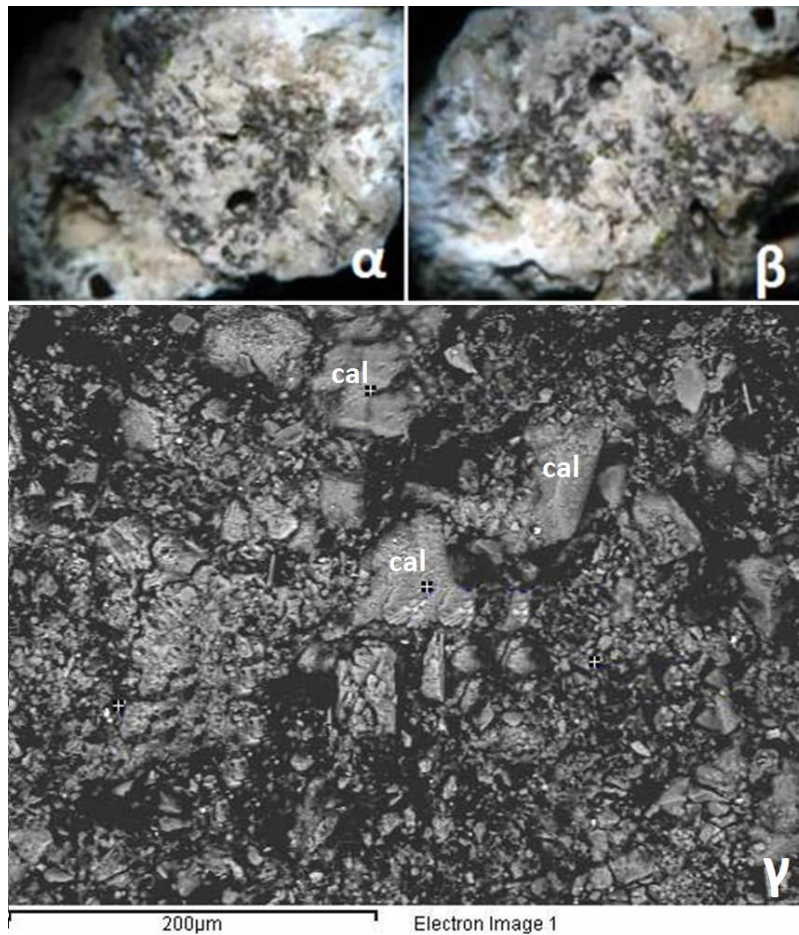
Εικόνα 8.1.23. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD6 α. Τομή του δείγματος β. Μέταλλα που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: Fe: Σίδηρος, Ca: Ασβέστιο



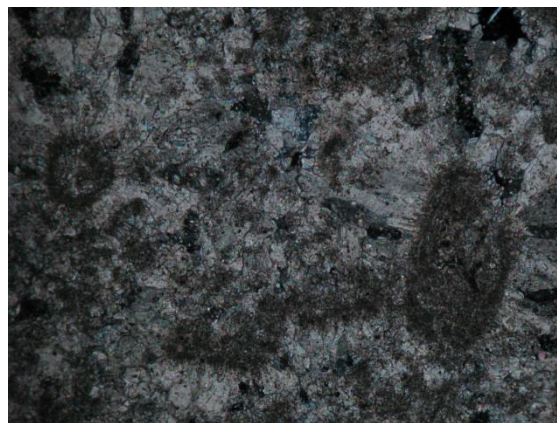
Εικόνα 8.1.24. Ανακρυστάλλωση μέσα στους πόρους του ασβεστίτη

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.25.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά, δηλαδή ασβεστίτης, δολομίτης και χαλαζίας καθώς και οργανική ύλη. Στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν καολίνης και οξειδία του Fe, ιλλίτης και ρουτίλιο, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν τον λεγόμενο περίβολο του ιερού.



Εικόνα 8.1.25. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD6 α, β. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο γ. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: cal: ασβεστίτης



Εικόνα 8.1.26. Μικροκρυσταλλικός ασβεστίτης με απολιθώματα

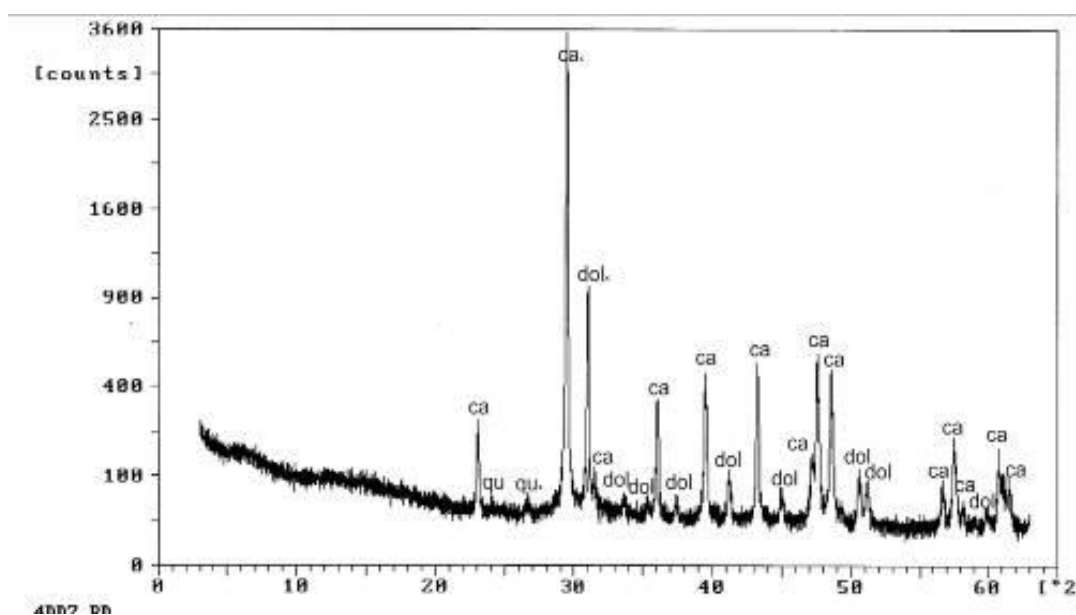
8.1.1.1.11. Δείγμα DD7

α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Το δείγμα είναι ασβεστιτικός ψαμμίτης (Εικ. 8.1.27.α), που αποτελείται ορυκτολογικά από ασβεστίτη και σε μικρότερο βαθμό από δολομίτη. Σε ίχνη υπάρχουν χαλαζίας, μεταλλικά ορυκτά (πιθανώς σουλφίδια) και Fe-οξειδία (Πίνακας 8.1.14).

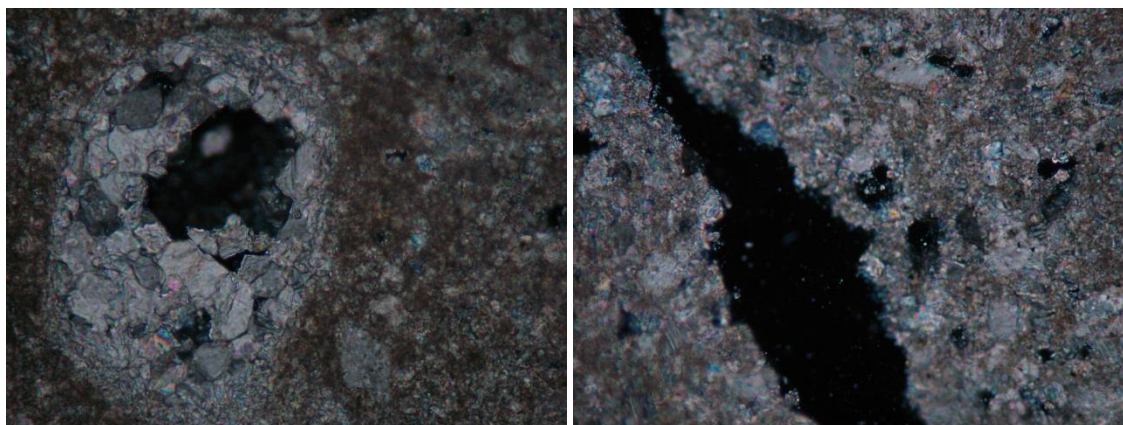
Πίνακας 8.1.14. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD7, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη
Ψαμμίτης	Ασβεσίτης	Δολομίτης	Χαλαζίας, Μεταλλικά ορυκτά (κυρσουλφίδια), Fe-οξείδια	Ναι

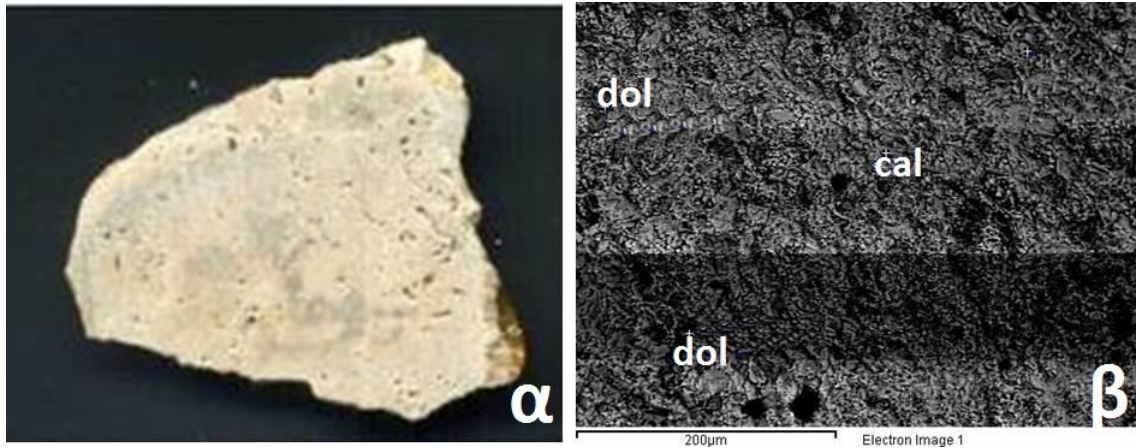


Σχήμα 8.1.10. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD7 ca: ασβεσίτης, dol: δολομίτης, qu: χαλαζίας

Οι κόκκοι του ασβεσίτη και του δολομίτη είναι γωνιώδεις και το μέγεθός τους φτάνει τα 200 μm. Το συνδετικό υλικό αποτελείται από ασβεσίτη και δευτερευόντως από δολομίτη καθώς και από οργανική ύλη, ενώ διάσπαρτα μεταλλικά ορυκτά, που το μέγεθός τους ανέρχεται στα 100 μm, βρίσκονται μέσα στο συνδετικό υλικό (Εικ. 8.1.28.β).



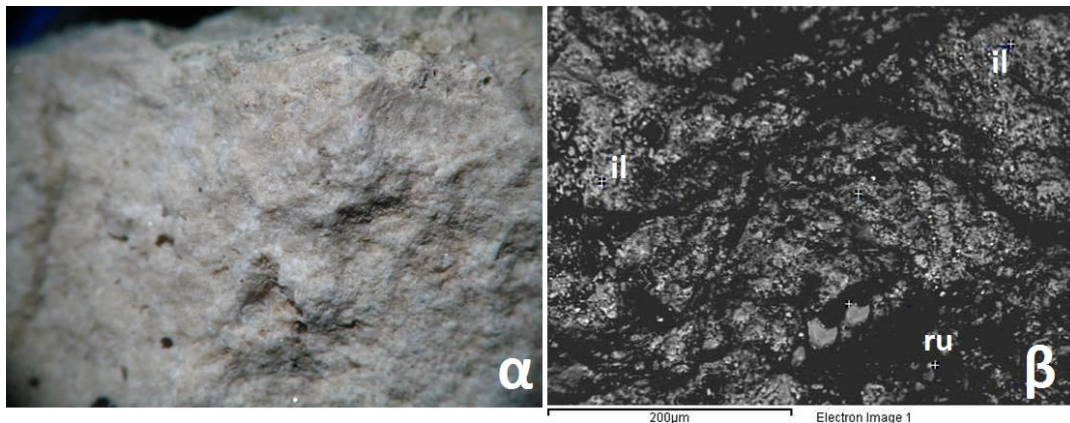
Εικόνα 8.1.27. Ανακρυστάλλωση μέσα στους πόρους του ασβεστιτικού ψαμμίτη



Εικόνα 8.1.28. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD7 α. Τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: dol: δολομίτης cal: ασβεστίτης

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.29.α) παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά, δηλαδή ασβεστίτης και δολομίτης καθώς και χαλαζίας. Επίσης, ανιχνεύθηκαν καολίνη, ιλλίτης και ρουτίλιο, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν την ελληνοιστική στοά του ιερού. Τέλος, εντοπίστηκε γύψος, η οποία προήλθε από την αλλοίωση του ασβεστίτη λόγω της επαφής του με την ατμόσφαιρα.



Εικόνα 8.1.29. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD7 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: ru: ρουτίλιο il: ιλλίτης

8.1.1.12. Δείγμα DD8

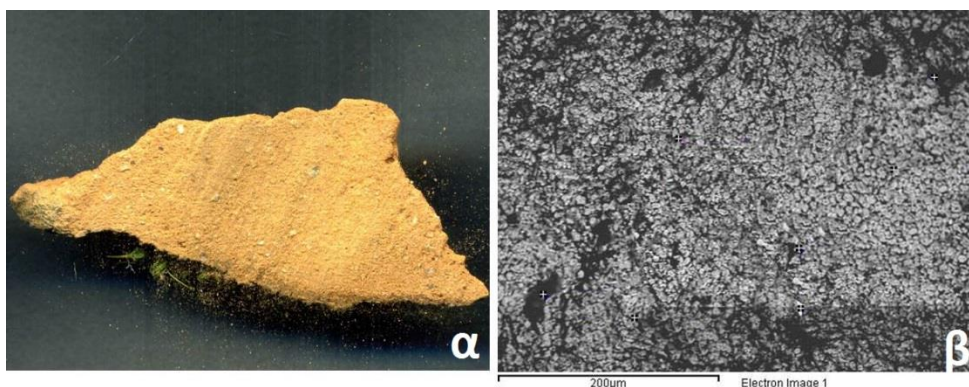
α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Πρόκειται για κεραμική πλίνθο (Εικ.8.1.30.α), που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους διαφόρων ορυκτών με μέγεθος που φθάνει έως 1 mm, και που είναι διάσπαρτοι μέσα στην ψημένη άργιλο. Οι κόκκοι αυτοί αποτελούνται κυρίως από χαλαζία σε κόκκους ή συσσωματώματα. Άλλα

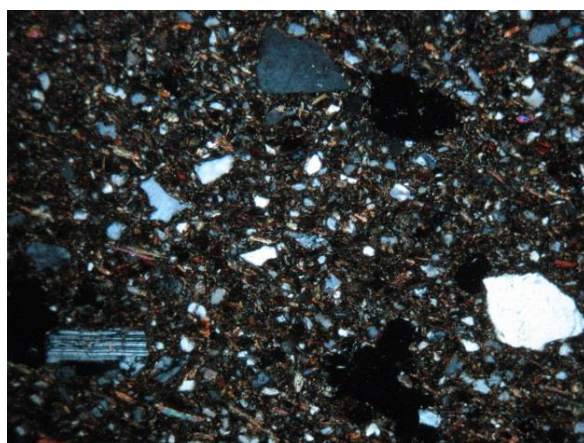
ορυκτά, που διακρίνονται είναι ασβεστίτης, λευκός μαρμαρυγίας, αμφίβολος, επίδοτο, πλαγιόκλαστα και καλιούχος άστριος (Πίνακας 8.1.15).

Πίνακας 8.1.15. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD8, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Πλίνθος	Χαλαζιάς	-	Ασβεστίτης, Λευκός μαρμαρυγίας, Αμφίβολος, Επίδοτο, Πλαγιόκλαστα,	-



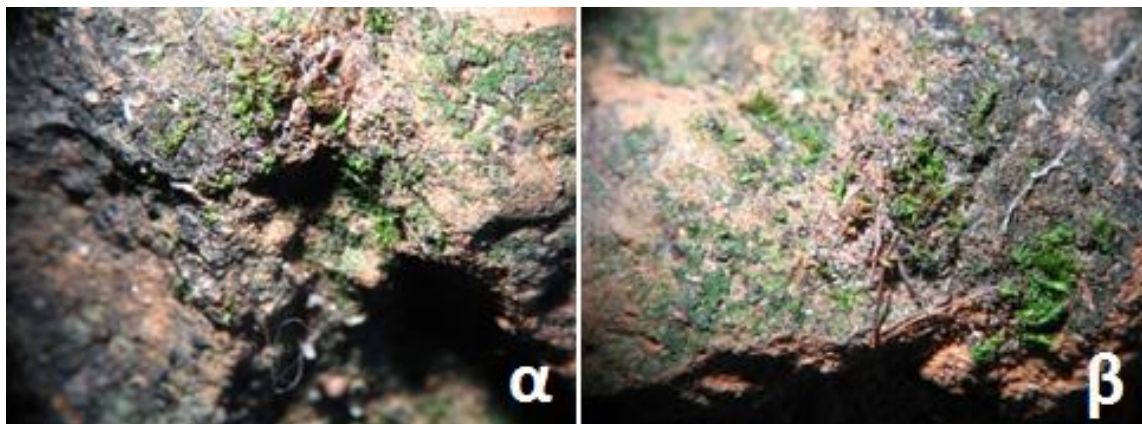
Εικόνα 8.1.30. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD8 α. Τομή του δείγματος β. Μικροσκοπική φωτογραφία της επιφάνειας



Εικόνα 8.1.31. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Κόκκοι χαλαζία, λευκού μαρμαρυγία και πλαγιόκλαστου

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος παρατηρήθηκαν τα πρωτογενή ορυκτά καθώς και τα προϊόντα διάβρωσης των ορυκτών αυτών. Επιπλέον, εντοπίστηκαν κάποια ορυκτά σε ίχνη.



Εικόνα 8.1.32. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD8 α, β. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο

8.1.1.1.13. Δείγμα DD9

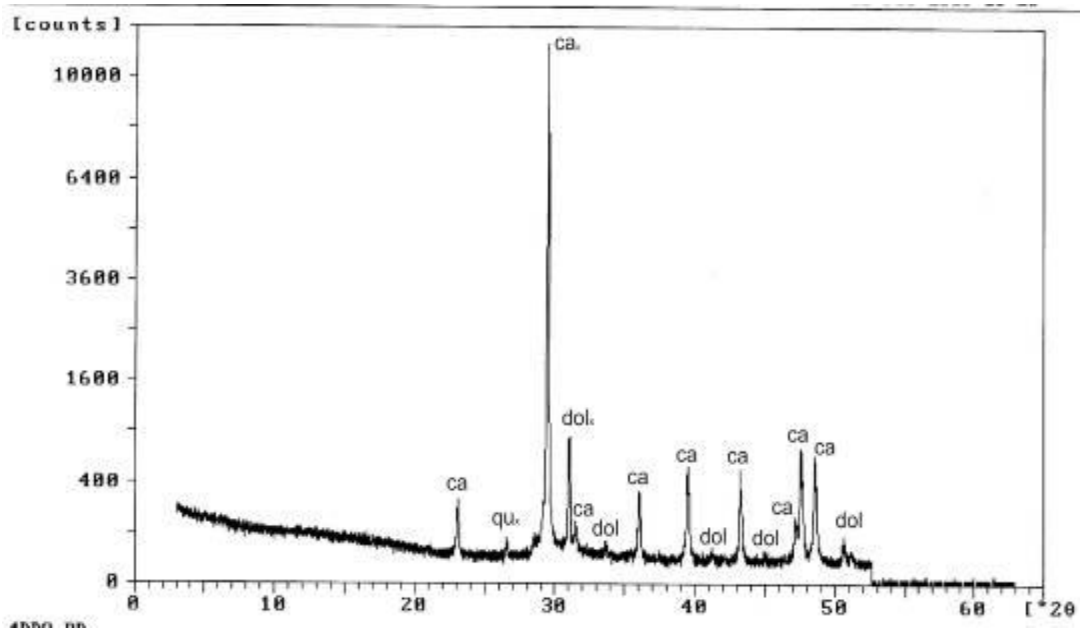
α. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση

Πρόκειται για μάρμαρο (Εικ. 8.1.33.α), το οποίο έχει ορυκτολογική σύσταση, που αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη (Πίνακας 8.1.16) και σε μικρότερο βαθμό από δολομίτη. Ο ιστός του πετρώματος είναι ετεροβλαστικός, δηλαδή τα ορυκτά έχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικά μεγέθη. Το σχήμα ορίων των κόκκων είναι «συρραφής» (sutured) έως οδοντωτό (dentate) και συχνά με εγκολλώσεις (embayed). Τις περισσότερες φορές στους μικρότερους κόκκους τα όρια είναι κυρτά (curved)(Εικ. 8.1.33.β).

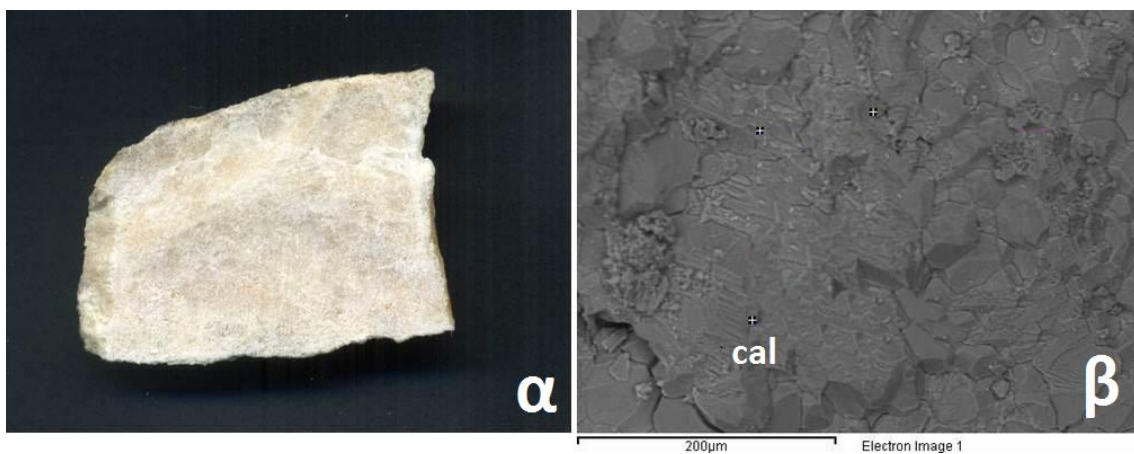
Πίνακας 8.1.16. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD9, όπως προκύπτει από τη μελέτη με οπτικό μικροσκόπιο και περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD).

Τύπος Πετρώματος	Κύρια ορυκτά	Δευτερογενή ορυκτά	Ορυκτά σε ίχνη	Οργανική ύλη-απολιθώματα
Μάρμαρο	Ασβεστίτης	Δολομίτης	-	-

Το μάρμαρο αποτελείται από κρυστάλλους με ανώμαλο σχήμα. Παρατηρήθηκαν κρύσταλλοι με μεγάλο μέγεθος (1-3 mm), που συμφύονται με κόκκους μικρότερου μεγέθους (100 μm - 1 mm). Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 500 μm, ενώ το μέγιστο μέγεθός τους (MGS) είναι 3 mm. Οι μεγάλοι κρύσταλλοι παρουσιάζουν έντονη επιμήκυνση και συχνά πολυδυμίες. Συχνό είναι το φαινόμενο των τριπλών σημείων επαφής των κρυστάλλων σε γωνίες 120°, που δείχνει έντονη ανακρυστάλλωση, ιδιαίτερα στους μικρότερους κρυστάλλους.



Σχήμα 8.1.11. Διάγραμμα ακτίνων-X από το δείγμα DD9 ca: ασβεστίτης, dol: δολομίτης, qu: χαλαζίας



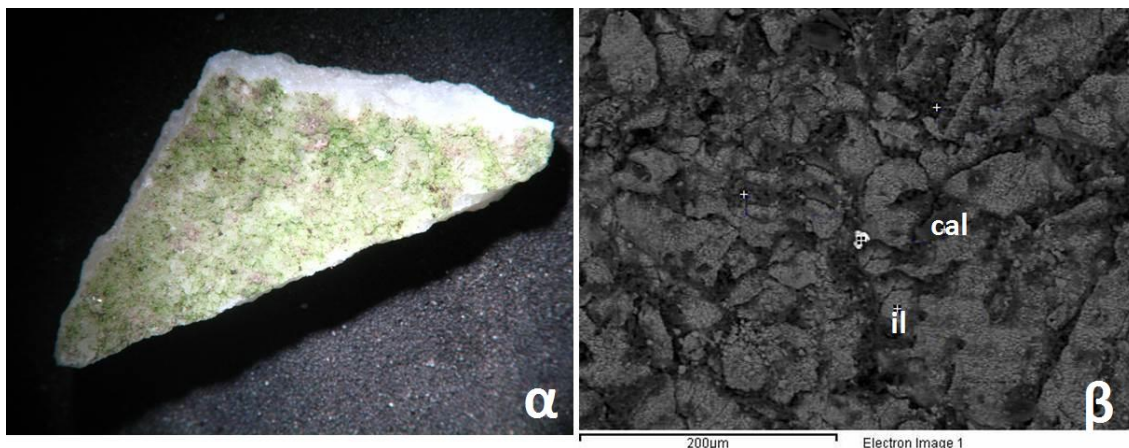
Εικόνα 8.1.33. Πρωτογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD9 α. Τομή του δείγματος β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: cal: ασβεστίτης



Εικόνα 8.1.34. Φωτομικρογραφία πολωτικού μικροσκοπίου (+N), Ετεροβλαστικός ιστός

β. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση

Στη διαβρωμένη επιφάνεια του δείγματος (Εικ. 8.1.35.α) παρατηρήθηκε το πρωτογενές ορυκτό, δηλαδή ασβεστίτης. Στα δευτερογενή ορυκτά ανιχνεύθηκαν καολίνη, ιλλίτης, αλβίτης και οξειδία Fe, η παρουσία των οποίων οφείλεται στα ιζήματα, που κάλυψαν τη βάση του αγάλματος της Βερενίκης.



Εικόνα 8.1.35. Δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD9 α. Εξωτερική πλευρά, φωτογραφία σε στερεομικροσκόπιο β. Ορυκτά που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δείγματος: il: ιλλίτης, cal: ασβεστίτης

8.1.1.2. Συμπεράσματα

Τα είδη λίθων, που χρησιμοποιήθηκαν ως δομικά υλικά στα υπό μελέτη ιερά του Δίου ήταν κυρίως ασβεστόλιθοι, τραβερτίνες, παρόλιθοι, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, ενώ σπάνια χρησιμοποιήθηκαν μάρμαρα και κεραμικές πλίνθοι. Τα ακατέργαστα υλικά, εκτός των μαρμάρων και των πλίνθων, έχουν τοπική προέλευση, από την ευρύτερη περιοχή του Δίου στις πλαγιές του Ολύμπου. Τα μάρμαρα βρίσκονται σε δεύτερη χρήση, καθώς προέρχονται από παλιότερες εφαρμογές ή αρχιτεκτονικά τμήματα.

Οι ασβεστόλιθοι και οι παρόλιθοι αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη ή δολομίτη. Τα κροκαλοπαγή περιέχουν κυρίως ασβεστόλιθο και αποτελούνται από ασβεστίτη. Τα μάρμαρα αποτελούνται κυρίως, από λευκό χονδρόκοκκο ασβεστίτη ή χονδρόκοκκο δολομίτη. Οι ψαμμίτες περιέχουν ασβεστίτη και δολομίτη, ενώ οι κεραμικές πλίνθοι αποτελούνται από γωνιώδεις κόκκους διαφόρων ορυκτών, διεσπαρμένους στη μάζα της αργίλου.

Τα υλικά παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και αλλοίωσης, που προκαλούνται κυρίως από το περιβάλλον, τη βροχή και την παρουσία ρύπων σε αυτή, την τριχοειδή διείσδυση του νερού από το έδαφος, καθώς και την έντονη παρουσία υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή. Επιπλέον, η χλωρίδα που αναπτύσσεται και οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές κατά τη διάρκεια της ημέρας, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες διάβρωσης.

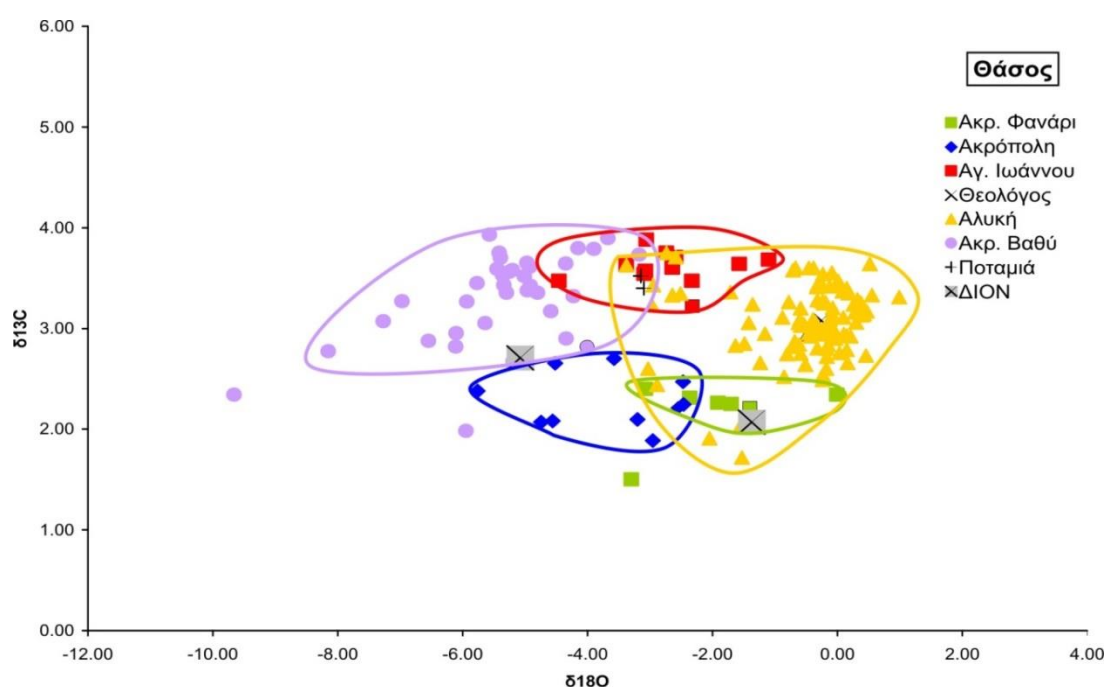
Οι επιφάνειες των υλικών είναι μερικώς καλυμμένες με προϊόντα διάβρωσης των βασικών ορυκτών, όπως δευτερεύοντα ανθρακικά άλατα, ανακρυσταλλωμένοι δολομίτες και ασβεστίτες, και

σε μερικές περιπτώσεις γύψος, που κατακάθονται από τα υδατικά διαλύματα. Η παρουσία κρούστας διαφόρων οργανικών και ανόργανων ενώσεων, όπως ο ιλλίτης, ο καολινίτης, ο σερικήτης, το ρουτίλιο, ο χρωμίτης, τα οξειδία σιδήρου, και τα θραύσματα απολιθωμάτων σχετίζονται με διάφορα ιζήματα, που καλύπτουν τα πρωτογενή υλικά.

8.1.2. Προσδιορισμός προέλευσης μαρμάρων με ισοτοπικές αναλύσεις

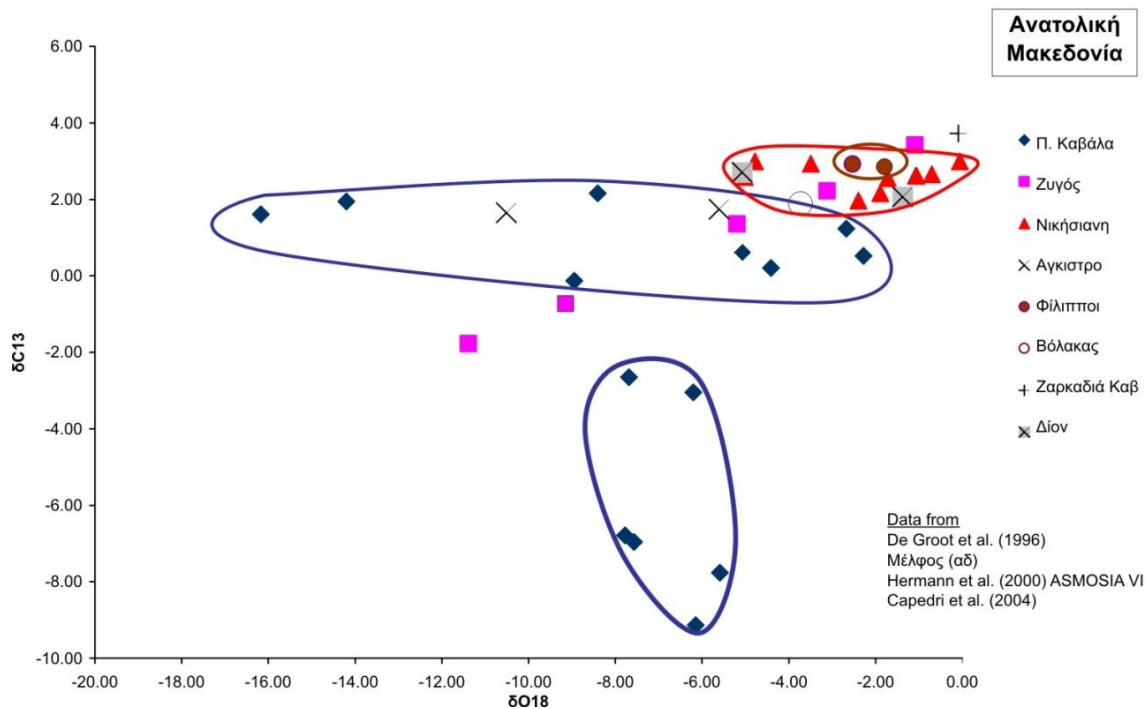
8.1.2.1. Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5 και DD9), για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ορυκτολογική και ισοτοπική τους σύσταση, με σκοπό τον προσδιορισμό της πηγής προέλευσης της πρώτης ύλης τους.



Σχήμα 8.1.12. Διάγραμμα $\delta^{18}O$ και $\delta^{13}C$ των μαρμάρων από τα αρχαία λατομεία της Θάσου, όπου φαίνονται τα δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5, DD9) από το ιερό της Δήμητρας στο Δίον (X) να προβάλλονται στο Ακρωτήριο Βαθύ και στην Αλυκή

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε μια μεγάλη βάση δεδομένων με ορυκτολογικά, πετρογραφικά και ισοτοπικά δεδομένα μαρμάρων από διάφορα αρχαία λατομεία στην ευρύτερη περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, που έχουν δημοσιευθεί μέχρι σήμερα (Craig et al., 1972, Manfra et al., 1975, Germann et al., 1980, Herz, 1987, Melfos, 2004), αλλά και από αδημοσίευτα στοιχεία (Μέλφος, 2015). Ειδικά για τα ισότοπα C-O χρησιμοποιήθηκαν 70 διαφορετικά λατομικά κέντρα από την Ελλάδα, τη Μ. Ασία, την Ιταλία, με συνολικά περισσότερες από 1500 ισοτοπικές αναλύσεις.



Σχήμα 8.1.13. Διάγραμμα $\delta^{18}O$ και $\delta^{13}C$ των μαρμάρων από τα αρχαία λατομεία της Ανατολικής Μακεδονίας όπου φαίνονται τα δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5, DD9) από το ιερό της Δήμητρας στο Δίον (X)

8.1.2.2. Συμπεράσματα

8.1.2.2.1. Δείγμα DD4

Το δείγμα είναι τμήμα από σπόνδυλο κίονα και εντοπίστηκε στο σηκό του νότιου ελληνιστικού ναού, του ιερού της Δήμητρας. Όπως προαναφέρθηκε, είναι λευκό μάρμαρο, που αποτελείται κυρίως από δολομίτη.

Η ανάλυση των ισοτόπων C (2.71‰) και O (-5.08‰) του δείγματος προβάλλεται μέσα στο πεδίο των μαρμάρων από την Θάσο (Ακρωτήριο Βαθύ), τη Νικήσιανη Καβάλας, τον Τρανόβαλο Κοζάνης, την Πεντέλη και τη Νάξο.

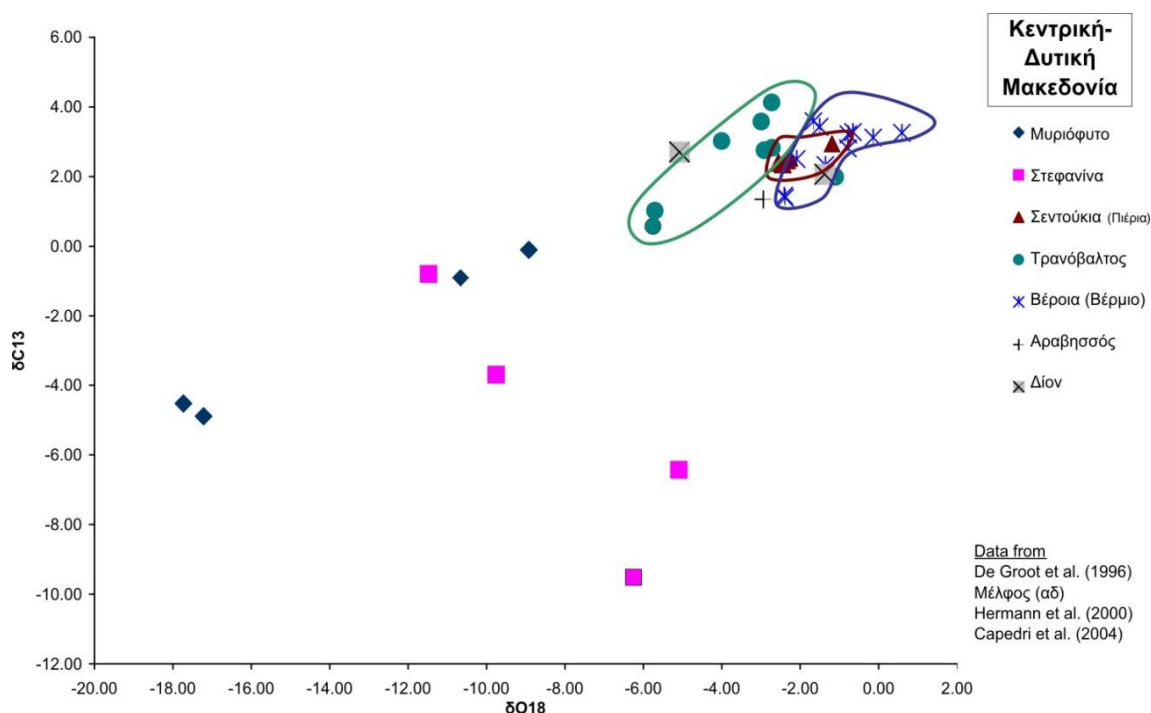
Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και συγκρίνοντας την ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD4 με την ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων από τη Θάσο (Ακρωτήριο Βαθύ), τη Νικήσιανη Καβάλας, τον Τρανόβαλο Κοζάνης, την Πεντέλη και τη Νάξο προκύπτει ότι το μάρμαρο για την κατασκευή του σπόνδυλου προέρχεται από τα λατομεία του Ακρωτηρίου Βαθύ στη ΒΑ Θάσο, αφού τα μάρμαρα είναι δολομιτικά. Οι υπόλοιπες θέσεις αποκλείονται, διότι τα μάρμαρα εκεί είναι ασβεστιτικά.

8.1.2.2.2. Δείγμα DD9

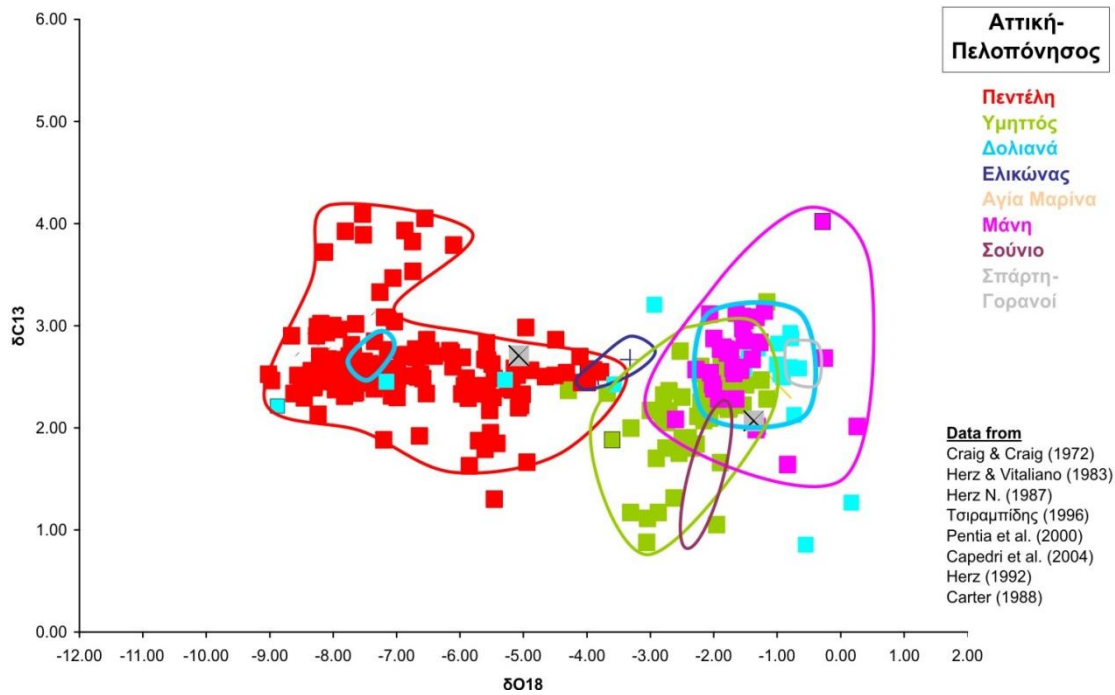
Το δείγμα προέρχεται από τη βάση της Βερενίκης, που εντοπίστηκε στο ιερό της Δήμητρας. Με βάση τον ορυκτολογικό χαρακτηρισμό είναι μάρμαρο, που αποτελείται κυρίως από ασβεσίτη και σε μικρότερο βαθμό από δολομίτη.

Η ανάλυση των ισοτόπων C (2.07‰) και O (-1.37‰) του δείγματος προβάλλεται μέσα στο πεδίο των μαρμάρων από τη Θάσο (Αλυκή), τη Νικήσιανη Καβάλας, το Βέρμιο Ημαθίας, τα Δολιανά, τη Μάνη (Πελοπόννησος), την Πεντέλη και την Πάρο.

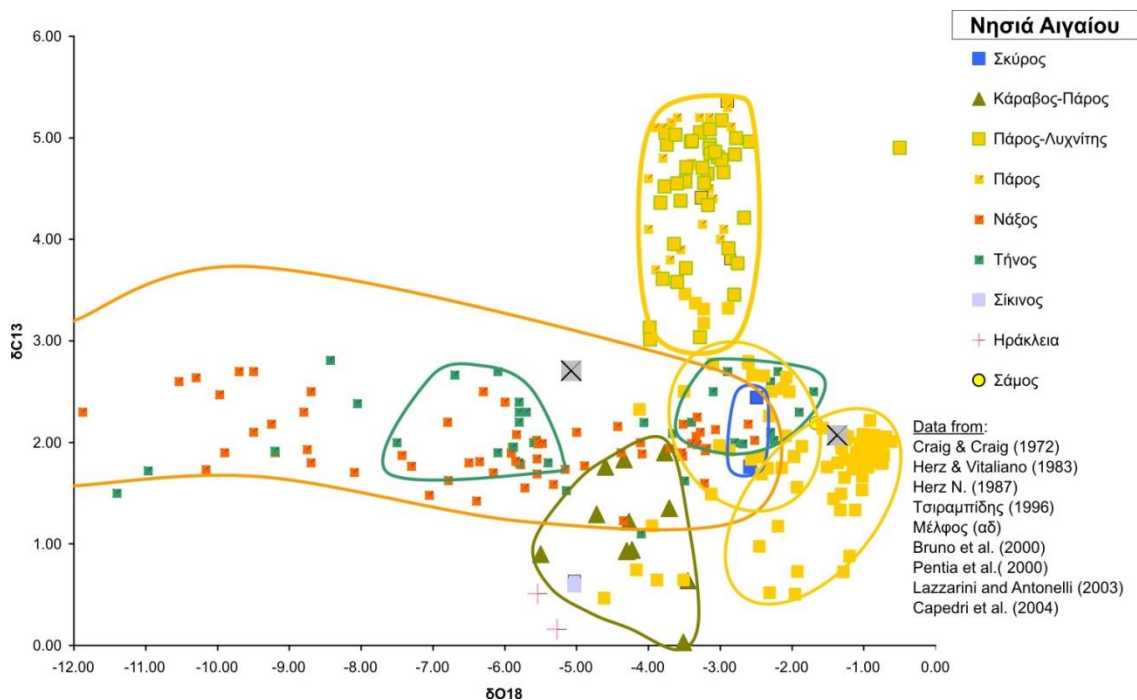
Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και συγκρίνοντας την ορυκτολογική σύσταση του δείγματος DD9 με την ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων από τις παραπάνω θέσεις, προκύπτει ότι το μάρμαρο για την κατασκευή του σπόνδυλου προέρχεται από τα λατομεία της Αλυκής στη ΝΑ Θάσο, αφού τα μάρμαρα είναι ασβεστιτικά με λίγο δολομίτη. Οι υπόλοιπες θέσεις αποκλείονται, διότι τα μάρμαρα στη Νικήσιανη είναι δολομιτικά, ενώ τα μάρμαρα στο Βέρμιο, τα Δολιανά, τη Μάνη, την Πεντέλη και την Πάρο διαφοροποιούνται από το δείγμα DD9, λόγω των πετρογραφικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 8.1.14. Διάγραμμα $\delta^{18}O$ και $\delta^{13}C$ των μαρμάρων από τα αρχαία λατομεία της Κεντρικής και Δυτικής Μακεδονίας, όπου φαίνονται τα δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5, DD9) από το ιερό της Δήμητρας στο Δίον (X)



Σχήμα 8.1.15. Διάγραμμα $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^{13}\text{C}$ των μαρμάρων από τα αρχαία λατομεία της Αττικής και της Πελοποννήσου, όπου φαίνονται τα δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5, DD9) από το ιερό της Δήμητρας στο Δίον (X)



Σχήμα 8.1.16. Διάγραμμα $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^{13}\text{C}$ των μαρμάρων από τα αρχαία λατομεία των νήσων του Αιγαίου όπου φαίνονται τα δείγματα μαρμάρου (DD4, DD5, DD9) από το ιερό της Δήμητρας στο Δίον (X)

8.1.3. Περιεχόμενη υγρασία

8.1.3.1. Αποτελέσματα

Η περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων εκφράζεται ως εκατοστιαία αναλογία της μάζας του δείγματος σε ξηρή κατάσταση. Τα δείγματα ζυγίστηκαν πριν και μετά την ξήρασή τους. Τα αποτελέσματα, που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 8.1.17.

Πίνακας 8.1.17. Περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων

Δείγμα	Είδος λίθου	Περιεχόμενη υγρασία %
DA1	Κροκαλοπαγές	1,61
DA2	Ασβεστόλιθος	0,32
DA3	Πλίνθος	16,09
DA4	Ψαμμίτης	2,53
DD1	Ασβεστόλιθος	2,21
DD2	Κροκαλοπαγές	2,85
DD3	Ασβεστόλιθος	0,37
DD4	Μάρμαρο	0,56
DD5	Μάρμαρο	0,47
DD6	Πωρόλιθος	3,16
DD7	Ψαμμίτης	6,31
DD8	Πλίνθος	20,72
DD9	Μάρμαρο	0,49

8.1.3.2. Συμπεράσματα

Όπως είναι αναμενόμενο παρατηρείται αυξημένη υγρασία στις δύο κεραμικές πλίνθους. Τα αργιλικά υλικά, όπως οι πλίνθοι στην περίπτωση μας, μπορεί να έχουν μέχρι και 30% περιεχόμενη υγρασία, λόγω της ιδιότητας τους να απορροφούν εύκολα νερό και να διογκώνονται. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η συνεκτικότητα τους, παρατηρούνται φαινόμενα θιξοτροπίας, λόγω της διόγκωσής τους, και αναπτύσσονται μηχανικές τάσεις. Όλα αυτά οδηγούν και σε μεγαλύτερο βαθμό διάβρωσης των υλικών αυτών (Σαμπατακάκης, Κορωνάιος Γ. Αιμίλιος et al., 2006).

Τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν τη μικρότερη ποσότητα περιεχόμενης υγρασίας (0,50-0,60% και 0,30-0,40% αντίστοιχα), λόγω του χαμηλού πορώδους, που παρουσιάζουν (βλ. Κεφ.8.1.4), και λόγω της απουσίας αργιλικών ορυκτών στη μάζα τους.

Τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες και οι πωρόλιθοι έχουν μεγαλύτερες τιμές περιεχόμενης υγρασίας (1,60-2,85%, 2,50% και 3,16% αντίστοιχα) από τα μάρμαρα (0,50-0,60%), λόγω του μεγαλύτερου πορώδους τους και λόγω της παρουσίας λευκού μαρμαρυγία σε αυτά. Λίγο μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει ο ψαμμίτης του δείγματος DD7, ο οποίος στη δευτερογενή

ορυκτολογική σύστασή του, περιέχει καολινίτη και ιλλίτη, τα οποία είναι φυλλοπυριτικά ορυκτά της αργίλου και παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα προσρόφησης νερού.

8.1.4. Ενεργό πορώδες, πυκνότητα, λόγος κενών

8.1.4.1. Αποτελέσματα

Σκοπός της πειραματικής μέτρησης είναι ο προσδιορισμός του ενεργού πορώδους (η), της πυκνότητας (ρ) ή αλλιώς φαινόμενο βάρος και του λόγου κενών (e) για τα δείγματα των δύο ιερών του Δίου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 8.1.18.

Πίνακας 8.1.18. Τιμές ενεργού πορώδους, πυκνότητας και λόγου κενών των δειγμάτων

Δείγμα	Είδος λίθου	Ενεργό πορώδες (%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Λόγος κενών
DA1	Κροκαλοπαγές	0,22	2,63	0,002
DA2	Ασβεστόλιθος	0,89	2,72	0,01
DA3	Πλίνθος	27,73	1,71	0,38
DA4	Ψαμμίτης	4,68	1,84	0,05
DD1	Ασβεστόλιθος	5,60	2,54	0,06
DD2	Κροκαλοπαγές	7,12	2,49	0,08
DD3	Ασβεστόλιθος	1,07	2,90	0,01
DD4	Μάρμαρο	0,90	1,60	0,01
DD5	Μάρμαρο	1,73	2,81	0,02
DD6	Πωρόλιθος	7,31	2,30	0,08
DD7	Ψαμμίτης	25,51	4,03	0,34
DD8	Πλίνθος	39,70	1,91	0,66
DD9	Μάρμαρο	1,11	2,26	0,01

8.1.4.2. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνονται οι τιμές της περιεχόμενης υγρασίας. Οι πλίνθοι είναι υλικά με μεγάλο πορώδες (27-40%), λόγω της παρουσίας αργίλου. Οι τιμές πορώδους και περιεχόμενης υγρασίας για τους δύο ασβεστόλιθους (DA2, DD3), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι συμπαγείς και όχι πορώδεις (τιμές πορώδους 0,90% και 1,07% αντίστοιχα). Ωστόσο, ο ασβεστόλιθος DD1 είναι πορώδης με τιμή ενεργού πορώδους 5,60%. Όπως είναι αναμενόμενο, τα μάρμαρα έχουν μικρό πορώδες (0,90-1,70%) σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, γιατί είναι χονδρόκοκκα.

Παρατηρείται, ότι τα δύο δείγματα ψαμμίτη έχουν αρκετή διαφορά στις τιμές πορώδους τους. Ο ψαμμίτης DA4 παρουσιάζει ανακρυσταλλωμένους κόκκους δολομίτη και ασβεστίτη με μέγεθος έως και 500μm. Αντιθέτως, οι κόκκοι στον ψαμμίτη DD7 έχουν μέγεθος έως 200μm.

Επιπλέον, ο ψαμμίτης DD7, παρουσιάζει έντονο σχηματισμό γύψου στην επιφάνεια του. Για τους λόγους αυτούς, το δείγμα DD7 είναι ένας πορώδης ψαμμίτης με ενεργό πορώδες 25,5% και το δείγμα DA4, ένας συμπαγής ψαμμίτης με ενεργό πορώδες 4,68% (Manger, 1963, Γραμματικόπουλος et al., 1998).

8.1.5. Ξηρό φαινόμενο βάρος

8.1.5.1. Αποτελέσματα

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε (βλ. Κεφ. 7.2.3.8), έγιναν μετρήσεις βάρους και όγκου των δειγμάτων, από τις οποίες προκύπτει το φαινόμενο βάρος (γ_b), το ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_d) και το ειδικό βάρος των στερεών (γ_s) των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 8.1.19.

Πίνακας 8.1.19. Τιμές φαινομένου βάρους, ξηρού φαινομένου βάρους και ειδικού βάρους των στερεών των δειγμάτων

Δείγμα	Είδος λίθου	Φαινόμενο βάρος (kN/m ³)	Ξηρό φαινόμενο βάρος (gr/cm ³)	Ειδικό βάρος στερεών
DA1	Κροκαλοπαγές	25,79	1,01	2,64
DA2	Ασβεστόλιθος	26,69	2,05	2,73
DA3	Πλίνθος	16,85	0,10	1,72
DA4	Ψαμμίτης	18,05	0,52	1,84
DD1	Ασβεστόλιθος	24,98	0,79	2,55
DD2	Κροκαλοπαγές	24,42	0,65	2,50
DD3	Ασβεστόλιθος	28,49	2,12	2,91
DD4	Μάρμαρο	15,75	1,03	1,61
DD5	Μάρμαρο	27,56	1,90	2,82
DD6	Πωρόλιθος	22,59	0,55	2,31
DD7	Ψαμμίτης	39,56	0,55	4,04
DD8	Πλίνθος	18,81	0,09	1,92
DD9	Μάρμαρο	22,19	1,52	2,27

8.1.5.2. Συμπεράσματα

Το ξηρό φαινόμενο βάρος είναι αντιστρόφως ανάλογο του πορώδους. Υλικά με μεγάλο πορώδες έχουν μικρό ξηρό φαινόμενο βάρος. Ο συνολικός όγκος των λίθων αποτελείται, εκτός από το μέρος της στερεής ορυκτής ύλης από πόρους γεμάτους είτε με νερό, είτε με αέρα καθώς και

οργανική ύλη. Το ξηρό φαινόμενο βάρος δείχνει την πραγματική ποσότητα στερεού, που απαρτίζει έναν λίθο και ταυτόχρονα αποτελεί ένδειξη της συμπίεσης, την οποία έχει δεχτεί ένας λίθος.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, οι ασβεστόλιθοι με το χαμηλό πορώδες (0,90% και 1,07%), έχουν μεγάλο ξηρό βάρος (2,05 και 2,12 gr/cm³). Αντιθέτως, οι πλίνθοι έχουν χαμηλό ξηρό φαινόμενο βάρος (0,10 και 0,09 gr/cm³). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στα υπόλοιπα δείγματα. Τα μάρμαρα με μικρό πορώδες (0,90-1,70%), εμφανίζουν αυξημένη τιμή ξηρού φαινόμενου βάρους (1,00-1,90 gr/cm³).

Το φαινόμενο βάρος περιλαμβάνει το συνολικό βάρος του λίθου προς το συνολικό όγκο, με αποτέλεσμα οι τιμές των κροκαλοπαγών δειγμάτων να είναι αντίστοιχες με αυτές των ασβεστόλιθων (Γραμματικόπουλος et al., 1998, Χρηστάρας, 2003, Χρηστάρας, 2005).

8.1.6. Δοκιμή σημειακής φόρτισης

8.1.6.1. Αποτελέσματα

Με βάση τη δοκιμή αντοχής σε σημειακή φόρτιση, υπολογίζονται ο μη διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση I_s και ο διορθωμένος Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση $I_{s(50)}$, από τους οποίους προκύπτει ο χαρακτηρισμός αντοχής των δειγμάτων. Στον Πίνακα 8.1.20 φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 8.1.20. Τιμές δεικτών αντοχής σε σημειακή φόρτιση των δειγμάτων

Δείγμα	Είδος λίθου	Φορτίο P (kN)	Ισοδύναμη διάμετρος D_e^2 (m ²)	Μη διορθωμένος δείκτης I_s (MPa)	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)
DA1	Κροκαλοπαγές	8	0,0030	2,71	2,81
DA2	Ασβεστόλιθος	20,8	0,0035	6,01	6,46
DA3	Πλίνθος	3,9	0,0018	2,17	2,02
DA4	Ψαμμίτης	3,3	0,0006	5,83	4,18
DD1	Ασβεστόλιθος	2,5	0,0013	1,87	1,62
DD2	Κροκαλοπαγές	7,9	0,0046	1,73	1,98
DD3	Ασβεστόλιθος	29,3	0,0050	5,84	6,83
DD4	Μάρμαρο	4	0,0002	16,62	9,82
DD5	Μάρμαρο	5,3	0,0002	21,51	12,47
DD6	Πωρόλιθος	2,7	0,0022	1,23	1,19
DD7	Ψαμμίτης	5,1	0,0015	3,34	2,99
DD8	Πλίνθος	3,9	0,0058	0,67	0,81
DD9	Μάρμαρο	3,8	0,0074	0,51	0,66

Πολλές μελέτες έχουν καταλήξει σε συσχέτιση του δείκτη σημειακής φόρτισης και της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (UCS), ανάλογα με το πέτρωμα και την προέλευσή του. Έτσι, παρακάτω υπολογίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με βάση την σχέση (D'Andrea et al., 1965, Χρηστάρας, 2003):

$$UCS = 15.296 * I_s + 16.375$$

8.1.6.2. Συμπεράσματα

Η International Society of Rock Mechanics (I.S.R.M.) έχει δημιουργήσει ένα κατάλογο χαρακτηρισμού των πετρωμάτων, ανάλογα με το συντελεστή σημειακής φόρτισης και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Όπως είναι αναμενόμενο, τα μάρμαρα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή. Το μάρμαρο DD5 εμφανίζει αυξημένη αντοχή. Αντιθέτως, το δείγμα DD9 παρουσιάζει πολύ χαμηλή τιμή του δείκτη I_s , γεγονός που ίσως να οφείλεται στην έντονη διάβρωση του συγκεκριμένου δείγματος. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι οι ασβεστόλιθοι, παρόλη την επιφανειακή διάβρωση που έχουν υποστεί, έχουν υψηλή αντοχή. Οι πωρόλιθοι, οι πλίνθοι, οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή παρουσιάζουν μέση αντοχή, με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης. Ωστόσο, οι ψαμμίτες, λόγω της ασβεστιτικής τους σύστασης εμφανίζουν ελαφρώς πιο αυξημένη αντοχή, σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Πίνακας 8.1.21. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DA1	Κροκαλοπαγές	2,81	59
DA2	Ασβεστόλιθος	6,46	115
DA3	Πλίνθος	2,02	47
DA4	Ψαμμίτης	4,18	80
DD1	Ασβεστόλιθος	1,62	41
DD2	Κροκαλοπαγές	1,98	47
DD3	Ασβεστόλιθος	6,83	121
DD4	Μάρμαρο	9,82	167
DD5	Μάρμαρο	12,47	207
DD6	Πωρόλιθος	1,19	35
DD7	Ψαμμίτης	2,99	62
DD8	Πλίνθος	0,81	29
DD9	Μάρμαρο	0,66	26

Με βάση τον παρακάτω Πίνακα 8.1.22, τα δείγματα χαρακτηρίζονται για την αντοχή τους στη μονοαξονική θλίψη. Τα μάρμαρα, εκτός από το δείγμα DD9 (26 MPa), είναι πολύ σκληρά πετρώματα, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (167 και 207 MPa). Το ίδιο ισχύει και για τους ασβεστόλιθους (115 και 121 MPa), εκτός του δείγματος DD1 (41 MPa), ο οποίος λόγω του αυξημένου πορώδους του, έχει και μικρότερη σκληρότητα. Σκληρά πετρώματα χαρακτηρίζονται οι ψαμμίτες (80 και 62 MPa) και τα κροκαλοπαγή (59 και 47 MPa), ενώ οι πλίνθοι είναι πολύ ασθενή υλικά (29 και 47 MPa). Οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές αντοχής, σε σχέση με τα μη διαβρωμένα αντίστοιχα πετρώματα (Κούκης et al., 2002, Χρηστάρας, 2005).

Πίνακας 8.1.22. Χαρακτηρισμός του πετρώματος ανάλογα με την αντοχή του σε MPa (Χρηστάρας, 2003)

Αντοχή (MPa)	Χαρακτηρισμός
1,5-15	Μαλακό
15-50	Μέτρια σκληρό
50-120	Σκληρό
120-230	Πολύ σκληρό
>230	Εξαιρετικά σκληρό

8.1.7. Ταχύτητα υπερήχων

8.1.7.1. Αποτελέσματα

Στόχος της μέτρησης της ταχύτητας των διαμήκων (V_p) και διατμητικών (V_s) κυμάτων, είναι ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου διάτμησης (G) και ελαστικότητας (E). Με βάση τους υπολογισμούς προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 8.1.23. Ταχύτητες διάδοσης διαμηκών (V_p) και διατμητικών κυμάτων (V_s), δυναμικό μέτρο διάτμησης (E), μέτρο ελαστικότητας (G)

Δείγμα	Είδος λίθου	Πυκνότητα (gr/cm^3)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E (GPa)	G (GPa)
DA1	Κροκαλοπαγές	2,63	1083	758	7,5	1,1
DA2	Ασβεστόλιθος	2,72	1834	1101	22,3	3,3
DA3	Πλίνθος	1,71	848	651	3,0	0,4
DA4	Ψαμμίτης	1,84	676	573	2,0	0,3
DD1	Ασβεστόλιθος	2,54	1477	938	13,5	2,0
DD2	Κροκαλοπαγές	2,49	1587	988	15,3	2,3
DD3	Ασβεστόλιθος	2,90	1806	1088	23,0	3,4
DD4	Μάρμαρο	1,60	1070	752	4,5	0,7
DD5	Μάρμαρο	2,81	1073	754	7,9	1,2
DD6	Πωρόλιθος	2,30	1254	836	8,8	1,3

DD7	Ψαμμίτης	4,03	633	553	3,9	0,6
DD8	Πλίνθος	1,91	1155	791	6,2	0,9
DD9	Μάρμαρο	2,26	1085	759	6,5	1,0

8.1.7.2. Συμπεράσματα

Οι ταχύτητες διάδοσης διαμηκών κυμάτων σε πορώδεις λίθους επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το πορώδες τους και την περιεχόμενη υγρασία τους. Οι τιμές αυτές στα μάρμαρα είναι σημαντικά μειωμένες, σε σχέση με υγιή μάρμαρα, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μάρμαρα έχουν αποσαθρωθεί σημαντικά στο εσωτερικό τους. Αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας τους είναι αισθητά μειωμένο, σε σχέση με τα μη διαβρωμένα μάρμαρα (30-70 GPa) (Σοφιανός et al., 2008).

Οι ψαμμίτες, λόγω της παρουσίας αργιλοπυριτικών ορυκτών στη μάζα τους, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από τις τιμές των υγιών ψαμμιτών, ενδεχομένως λόγω της διάβρωσης της εσωτερικής μάζας των λίθων αυτών και των ρωγμών, που μπορεί να φέρουν. Οι ψαμμίτες, λόγω του πορώδους τους, απορροφούν περισσότερο νερό, με αποτέλεσμα να είναι έντονη η διάβρωση στο εσωτερικό τους.

Οι υγιείς ασβεστόλιθοι εμφανίζουν μεγάλες τιμές ταχύτητας διάδοσης V_p , έως και 6.000 m/s. Στον παραπάνω πίνακα, φαίνεται ότι οι τιμές αυτές είναι κατά πολύ μικρότερες (1834, 1477 και 1806 m/s), γεγονός που οφείλεται στην έντονη ρηγμάτωση και διάβρωση, που έχουν υποστεί (Χρηστάρας, 2003, Σοφιανός et al., 2008).

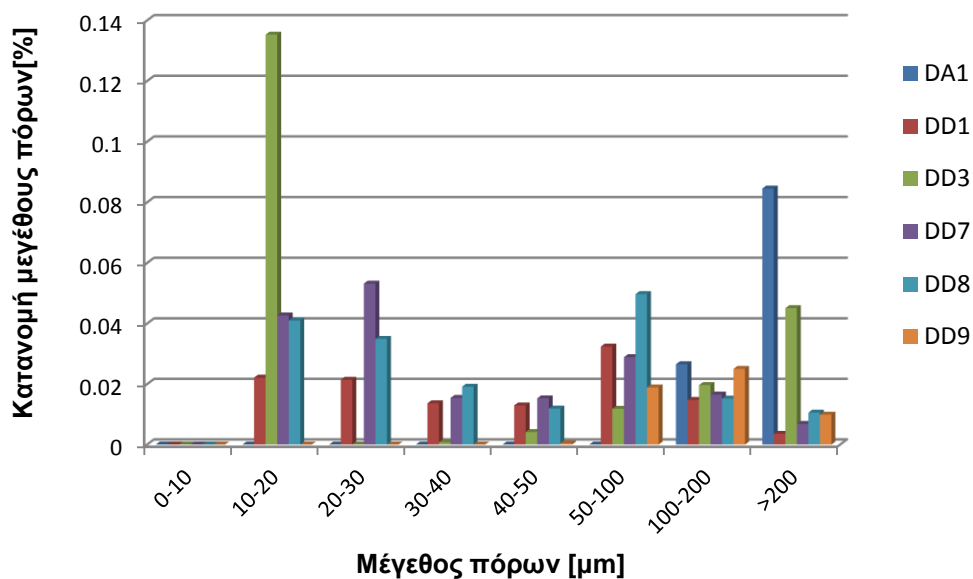
8.1.8. Ποροσιμετρία υδραργύρου

8.1.8.1. Αποτελέσματα

Η μέτρηση του πορώδους με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου εφαρμόστηκε σε 6 αντιπροσωπευτικά δείγματα, ένα κροκαλοπαγές, δύο ασβεστόλιθους, έναν ψαμμίτη, μια πλίνθο και ένα μάρμαρο (Πίν. 8.1.24). Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων ποροσιμετρίας για τα συγκεκριμένα δείγματα, προκύπτουν οι τιμές του πορώδους. Επιπλέον, η κατανομή μεγέθους των πόρων για τα δείγματα δίνεται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 8.1.17.

Πίνακας 8.1.24. Τιμές πορώδους

Δείγμα	Είδος λίθου	Πορώδες (%)
DA1	Κροκαλοπαγές	1,02
DD1	Ασβεστόλιθος	2,25
DD3	Ασβεστόλιθος	1,63
DD7	Ψαμμίτης	2,94
DD8	Πλίνθος	2,56
DD9	Μάρμαρο	1,88



Σχήμα 8.1.17. Κατανομή μεγέθους πόρων

8.1.8.2. Συμπεράσματα

Το κροκαλοπαγές εμφανίζει εύρος πόρων από 100 µm έως 200 µm, κυρίως γιατί αποτελείται από μεγάλες κροκάλες, μεγέθους έως 2 cm, και μεγάλους κόκκους δολομίτη και ασβεστίτη. Ο ασβεστόλιθος του δείγματος DD1 έχει μεγάλη διακύμανση στο μέγεθος των πόρων από 10 µm έως 200 µm, ενώ ο ασβεστόλιθος του δείγματος DD3 αποτελείται κυρίως από πόρους μικρής διαμέτρου (10-20µm) και μεγάλης διαμέτρου (>200 µm). Ο ψαμμίτης και η πλίνθος εμφανίζουν παρόμοια κατανομή πόρων, σε ένα εύρος από 10 µm έως 200 µm. Τέλος, το μάρμαρο, με χαμηλό πορώδες, έχει κυρίως πόρους με μεγάλη διάμετρο (200 µm) (Siegesmund et al., 2014).

8.2. Σειρά δειγμάτων in situ

8.2.1. Θερμομέτρηση

Με τη χρήση της θερμομέτρησης ανιχνεύεται η παρουσία υγρασίας στους λίθους. Η θερμομέτρηση με IR θερμόμετρο γίνεται για εντοπισμό της κίνησης του νερού στα πορώδη υλικά και ανιχνεύει την επίδρασή του με την καταγραφή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας.

Η θερμομέτρηση, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε στις εξωτερικές επιφάνειες των λίθων των δύο ιερών. Πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά, μετρήσεις στη βόρεια, τη νότια, την ανατολική και τη δυτική πλευρά του ναού του Ασκληπιού και του μεγάλου βωμού του ιερού της Δήμητρας. Οι θερμοκρασίες καταγράφηκαν σε δυο διαφορετικές περιόδους με διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Η πρώτη καταγραφή πραγματοποιήθηκε αρχές Σεπτεμβρίου του 2011 (φθινόπωρο), με θερμοκρασία περιβάλλοντος 28°C και ηλιοφάνεια, και η δεύτερη, το μήνα Νοέμβριο 2011 (χειμώνας), με θερμοκρασία περιβάλλοντος 9°C και συννεφιά.

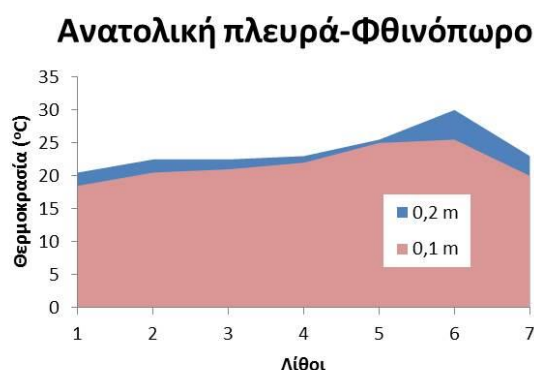
Επιπλέον, οι μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν σε δυο διαφορετικά ύψη από το έδαφος και η καταγραφή γινόταν κατά μήκος των λίθων. Παρακάτω, δίνονται τα αποτελέσματα.

8.2.1.1. Αποτελέσματα

8.2.1.1.1. Ναός του Ασκληπιού

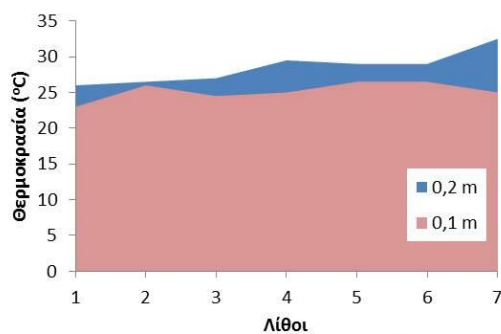
Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το φθινόπωρο και στη συνέχεια για το χειμώνα. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι θερμομετρήσεις της ανατολικής και της βόρειας πλευράς του ναού του Ασκληπιού. Όπως φαίνεται στις εικόνες (Εικ. 8.2.1-8.2.4), σε κάθε λίθο έγιναν μετρήσεις σε δύο διαφορετικά ύψη από το έδαφος. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε αντιστοιχία με τις εικόνες, δηλαδή ο λίθος 1 του διαγράμματος, αντιστοιχεί στον πρώτο λίθο από αριστερά της εικόνας, ο λίθος 2 στο δεύτερο λίθο της εικόνας, κ.ο.κ. Για την απλοποίηση των διαγραμμάτων κάποιοι λίθοι παραλείπονται.

Παρατηρούνται μικρές θερμοκρασιακές διαφορές στις καθ' ύψος μετρήσεις, οι οποίες οφείλονται στην έκθεση κάθε λίθου στον ήλιο και στην υγρασία του εδάφους. Επιπλέον, παρατηρούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες στην ανατολική πλευρά του ναού του Ασκληπιού, απ' ότι στη βόρεια, τόσο το φθινόπωρο (Εικ. 8.2.1, 8.2.2), όσο και τον χειμώνα (Εικ. 8.2.3, 8.2.4).



Σχήμα 8.2.1. Διάγραμμα θερμοκρασιών της ανατολικής πλευράς του Ναού του Ασκληπιού, Σεπτέμβριος 2011
Εικόνα 8.2.1. Φωτογραφία της ανατολική πλευράς του ναού του Ασκληπιού κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Σεπτέμβρης 2011

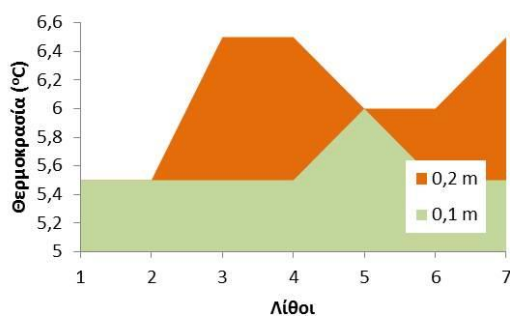
Βόρεια πλευρά-Φθινόπωρο



Σχήμα 8.2.2. Διάγραμμα θερμοκρασιών της βόρειας πλευράς του Ναού του Ασκληπιού, Σεπτέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.2. Φωτογραφία της βόρειας πλευράς του ναού του Ασκληπιού κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Σεπτέμβριος 2011

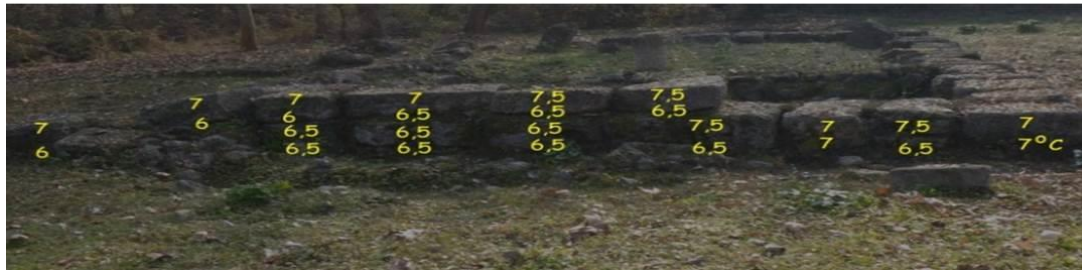
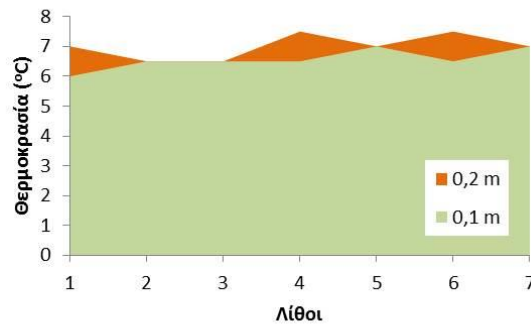
Ανατολική πλευρά-Χειμώνας



Σχήμα 8.2.3. Διάγραμμα θερμοκρασιών της ανατολικής πλευράς του Ναού του Ασκληπιού, Νοέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.3. Φωτογραφία της ανατολικής πλευράς του ναού του Ασκληπιού κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Νοέμβριος 2011

Βόρεια πλευρά-Χειμώνας



Σχήμα 8.2.4. Διάγραμμα θερμοκρασιών της βόρειας πλευράς του Ναού του Ασκληπιού, Νοέμβριος 2011

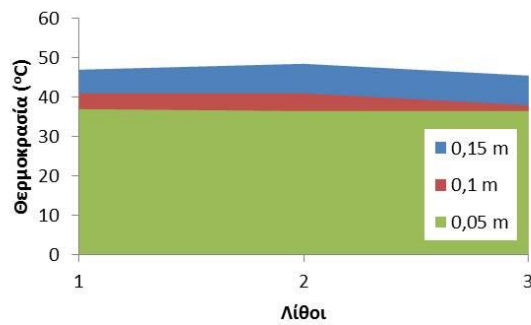
Εικόνα 8.2.4. Φωτογραφία της βόρειας πλευράς του ναού του Ασκληπιού κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Νοέμβριος 2011

8.2.1.1.2. Ιερό Δήμητρας

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το φθινόπωρο και στη συνέχεια για το χειμώνα. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι θερμομετρήσεις της δυτικής και της νότιας πλευράς του μεγάλου βωμού στο ιερό της Δήμητρας. Όπως φαίνεται στις εικόνες (Εικ. 8.2.5-8.2.8), σε κάθε λίθο έγιναν μετρήσεις σε τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε αντιστοιχία με τις εικόνες, δηλαδή ο λίθος 1 του διαγράμματος αντιστοιχεί στον πρώτο λίθο από αριστερά της εικόνας, ο λίθος 2 στο δεύτερο λίθο της εικόνας, κ.ο.κ. Για απλοποίηση των διαγραμμάτων κάποιοι λίθοι παραλείπονται.

Όπως και στο ναό του Ασκληπιού, έτσι και στον μεγάλο βωμό της Δήμητρας, μικρές θερμοκρασιακές διαφορές παρατηρούνται στις καθ' ύψος μετρήσεις, οι οποίες οφείλονται επίσης, στην έκθεση κάθε λίθου στον ήλιο και στην υγρασία του εδάφους. Στο ιερό της Δήμητρας οι τιμές της δυτικής και της νότιας πλευράς δεν παρουσιάζουν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, τόσο το φθινόπωρο (Εικ. 8.2.5, 8.2.6), όσο και τον χειμώνα (Εικ. 8.2.7, 8.2.8).

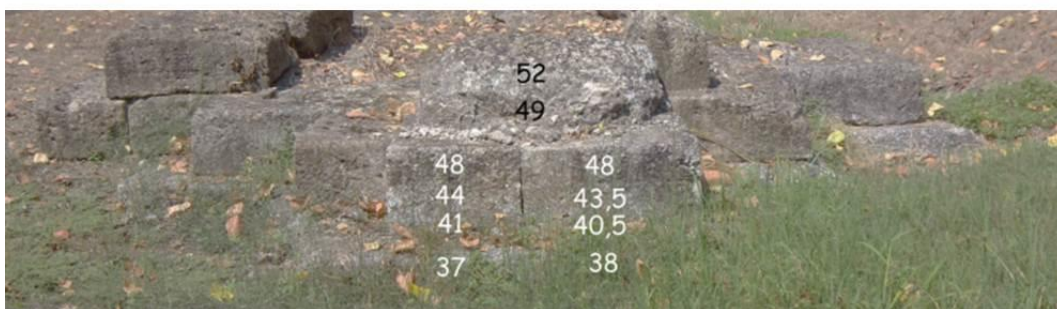
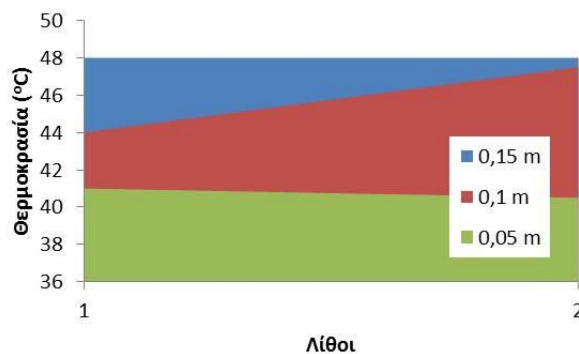
Δυτική πλευρά-Φθινόπωρο



Σχήμα 8.2.5. Διάγραμμα θερμοκρασιών της δυτικής πλευράς του Ιερού της Δήμητρας, Σεπτέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.5. Φωτογραφία της δυτικής πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Σεπτέμβριος 2011

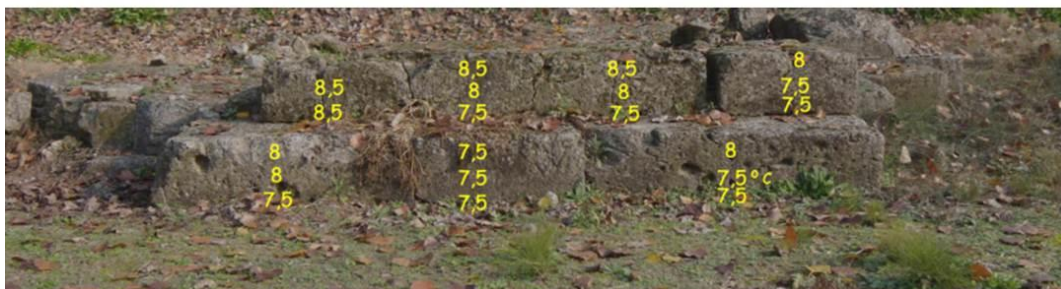
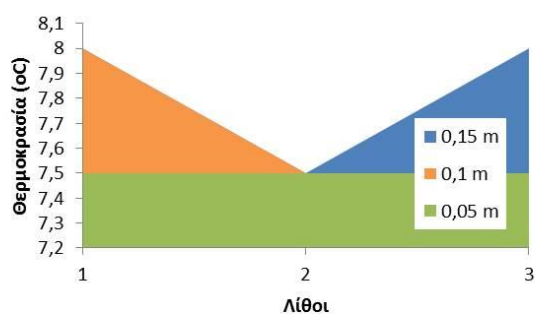
Νότια πλευρά-Φθινόπωρο



Σχήμα 8.2.6. Διάγραμμα θερμοκρασιών της νότιας πλευράς του Ιερού της Δήμητρας, Σεπτέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.6. Φωτογραφία της νότιας πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Σεπτέμβριος 2011

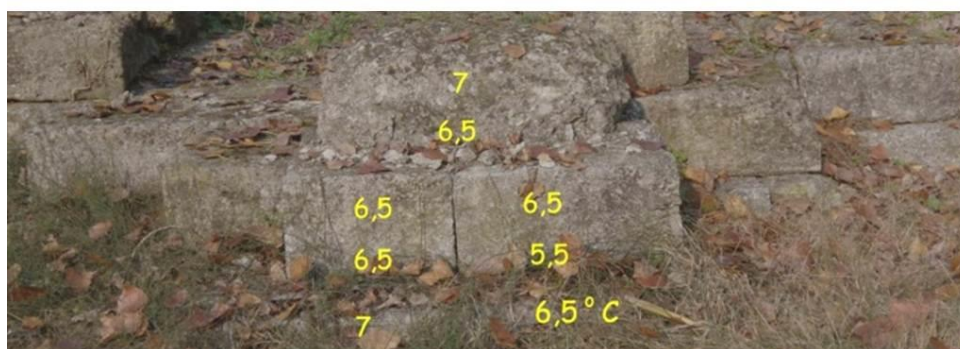
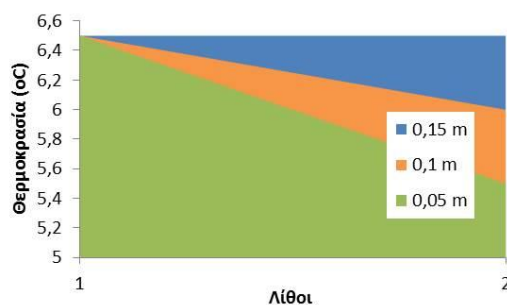
Δυτική πλευρά-Χειμώνας



Σχήμα 8.2.7. Διάγραμμα θερμοκρασιών της δυτικής πλευράς του Ιερού της Δήμητρας, Νοέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.7. Φωτογραφία της δυτικής πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Νοέμβριος 2011

Νότια πλευρά-Χειμώνας



Σχήμα 8.2.8. Διάγραμμα θερμοκρασιών της νότιας πλευράς του Ιερού της Δήμητρας, Νοέμβριος 2011

Εικόνα 8.2.8. Φωτογραφία της νότιας πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας κατά τη θερμομέτρηση των λίθων, Νοέμβριος 2011

8.2.1.2. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα, είναι εμφανές σε όλες τις περιπτώσεις, πως στα χαμηλότερα σημεία των λίθων (πιο κοντά στο έδαφος), η θερμοκρασία είναι πάντα χαμηλότερη. Η παρουσία

υγρασίας στους λίθους στα σημεία αυτά, λόγω τριχοειδούς υδαταπορρόφησης προκαλεί διάβρωση και καταστρέφει τη συνοχή των δομικών λίθων. Σε αυτές τις περιπτώσεις η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα είναι ιδιότητες, που επηρεάζονται. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία στις υγρές περιοχές μένει χαμηλή, καθότι απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για να αυξηθεί η θερμοκρασία σε αυτές παρά στις στεγνές περιοχές.

Οι θερμοκρασιακές διαφορές εξαρτώνται επίσης, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιοφάνεια ή σκιά), από το είδος του λίθου και τον προσανατολισμό των θεμελίων. Όπως είναι αναμενόμενο, οι θερμοκρασίες είναι αυξημένες σε όλα τα θεμέλια κατά τον Σεπτέμβριο, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 28°C, και μειωμένη κατά το Νοέμβριο, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 9°C.

Με βάση τις συνολικές μετρήσεις, για όλες τις πλευρές των θεμελίων, παρατηρήθηκε ότι οι ανατολικές πλευρές παρουσιάζουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ενδεχομένως, αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι ανατολικά του Δίου, βρίσκεται η θάλασσα, από την οποία έρχεται η θαλάσσια αύρα και μειώνει τη θερμοκρασία.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασιακή διαφορά του κάθε τοίχου. Παρατηρείται ότι κατά τις ηλιόλουστες συνθήκες, η διαφορά θερμοκρασίας του χαμηλότερου και του υψηλότερου σημείου είναι μεγάλη, αφού η υγρασία διεισδύει μόνο μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης, ενώ υπό ψυχρές συνθήκες η διαφορά είναι μικρή, λόγω της απορρόφησης της υγρασίας ολόκληρου του λίθου από το περιβάλλον.

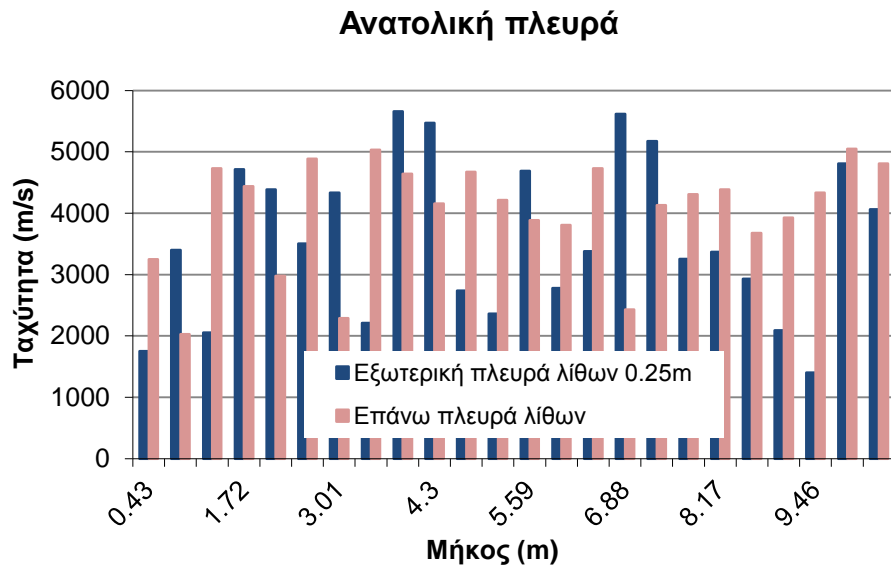
8.2.2. Ταχύτητα υπερήχων

Η μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων πραγματοποιήθηκε στις εξωτερικές επιφάνειες των λίθων των δύο ιερών, σε ύψος 0,25m από το έδαφος. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις ταχύτητας στις επάνω πλευρές των λίθων. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη βόρεια, τη νότια, την ανατολική και τη δυτική πλευρά του ναού του Ασκληπιού και του μεγάλου βωμού του ιερού της Δήμητρας.

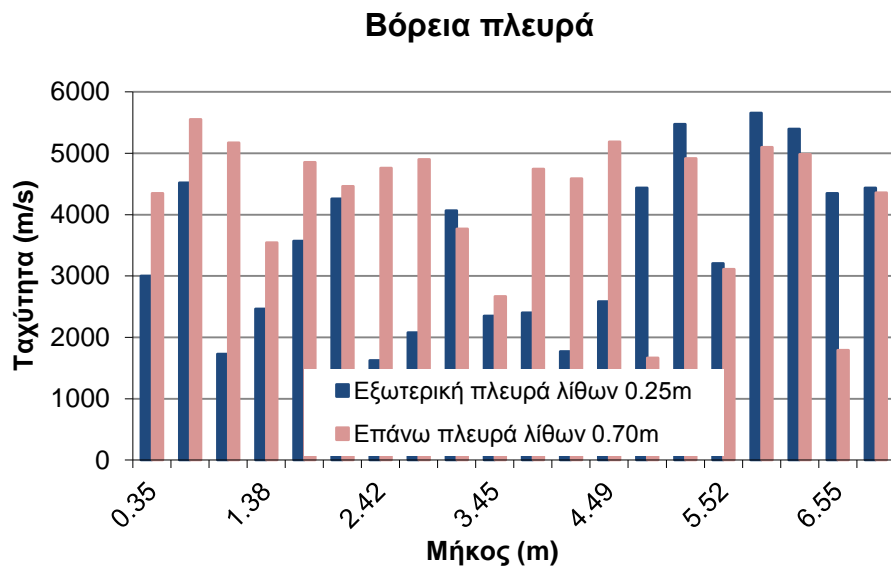
Τα αποτελέσματα δίνονται σε συνάρτηση με το μήκος του κάθε τοίχου. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται ανά πλευρά, και δίνουν τις ταχύτητες υπερήχων για την εξωτερική και την επάνω επιφάνεια των λίθων.

8.2.2.1. Αποτελέσματα

8.2.2.1.1. Ναός Ασκληπιού

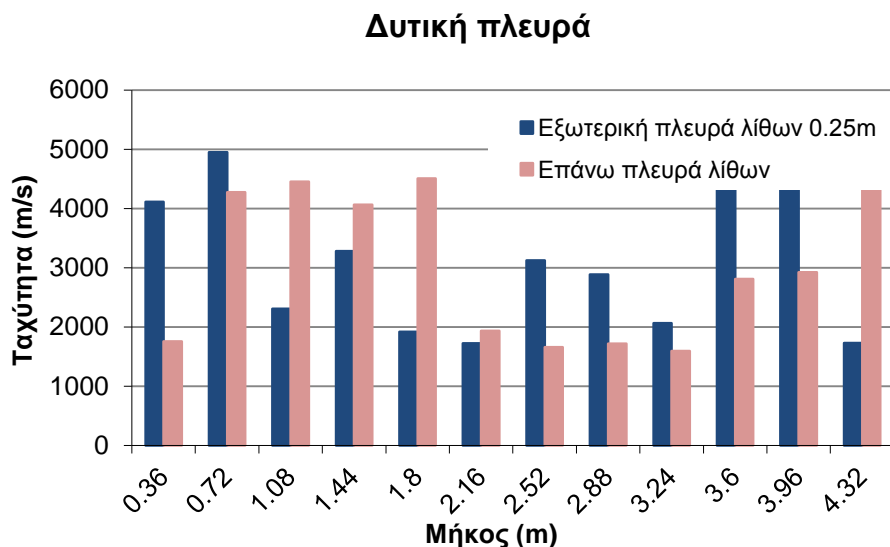


Σχήμα 8.2.9. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων ανατολικής πλευράς του ναού του Ασκληπιού

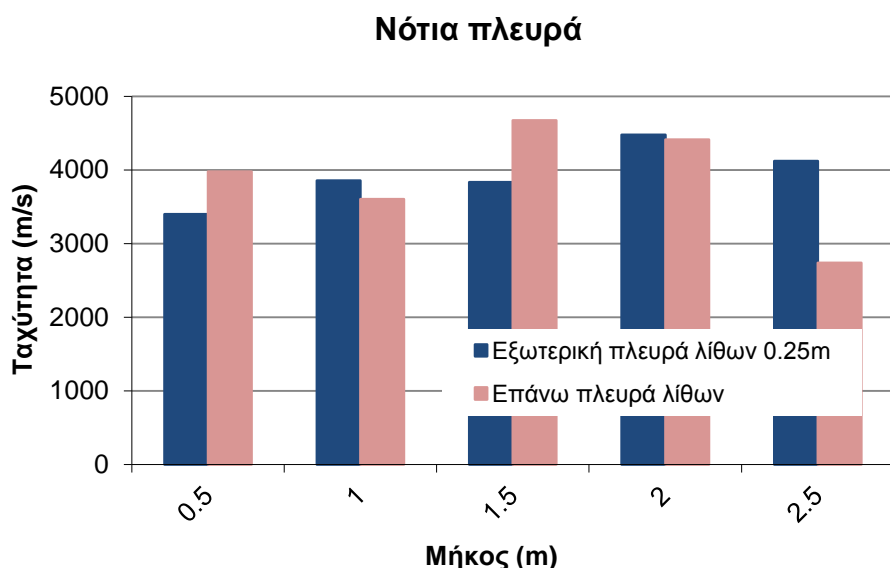


Σχήμα 8.2.10. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων βόρειας πλευράς του ναού του Ασκληπιού

8.2.2.1.2. Ιερό Δήμητρας



Σχήμα 8.2.11. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων δυτικής πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας



Σχήμα 8.2.12. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων νότιας πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας

8.2.2.2. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων και την εξέταση της πιθανής επίδρασης του προσανατολισμού στη διάβρωση των υλικών προκύπτουν βασικά συμπεράσματα. Οι τιμές της ταχύτητας υπερήχων δεν εξαρτώνται από την απόσταση από το έδαφος και τον προσανατολισμό, όπως παρατηρήθηκε με τις θερμομετρήσεις, αλλά από το υλικό των λίθων. Για το λόγο αυτό, παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές και διακυμάνσεις της ταχύτητας υπερήχων, κατά μήκος των τοίχων. Τα δομικά υλικά του τοίχου στο ναό του Ασκληπιού, είναι κυρίως κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθοι, τα οποία είναι σχετικά πορώδη υλικά με ανώμαλη και μη σταθερή δομή.

Η παρατήρηση, αυτή επιβεβαιώθηκε από τις μετρήσεις της ταχύτητας υπερήχων στη βάση του αγάλματος της Βερενίκης, που βρίσκεται στο χώρο του ιερού της Δήμητρας. Η μαρμαρίνη βάση είχε σταθερές τιμές ταχύτητας υπερήχων, λόγω της σταθερής δομής του υλικού.

8.2.3. Βρύα και λειχήνες

8.2.3.1. Αποτελέσματα

Στον πίνακα 8.2.1, σημειώνονται τα βρυόφυτα, που εντοπίστηκαν στο χώρο ανασκαφής του Δίου. Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες με βρυόφυτα από το χώρο (Εικ. 8.2.9, 8.2.10).

Πίνακας 8.2.1. Είδη βρυόφυτων που εντοπίστηκαν στα ιερά του Ασκληπιού και της Δήμητρας του Δίου

Είδη βρυόφυτων Δίου	
<i>Aloina aloides</i>	<i>Lunularia cruciata</i>
<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Pleurochaeta squarrosa</i>
<i>Cratoneuron filicinum</i>	<i>Rhynchostegium megapolitanum</i>
<i>Didymodon luridus</i>	<i>Scorpiurum circinatum</i>
<i>Didymodon vinealis</i>	<i>Syntrichia Montana</i>
<i>Fissidens bryoides</i>	<i>Tortula intermedia</i>
<i>Grimmia pulvinata</i>	<i>Tortula muralis</i>
<i>Kindbergia praelonga</i>	



Εικόνα 8.2.9. Βρυόφυτο *Tortula muralis*, Δίου

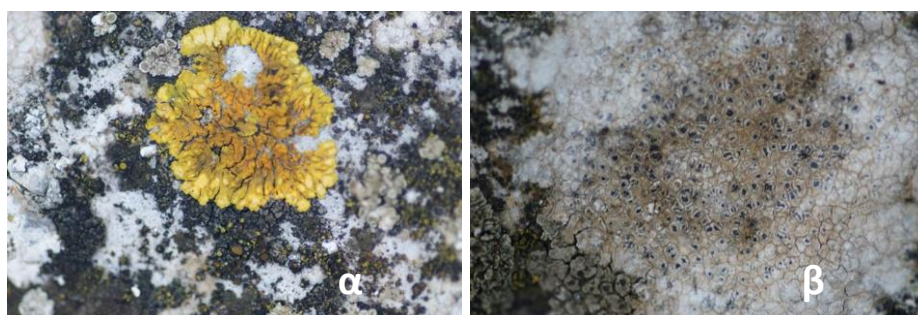


Εικόνα 8.2.10. Βρυόφυτο *Grimmia pulvinata*, Δίου

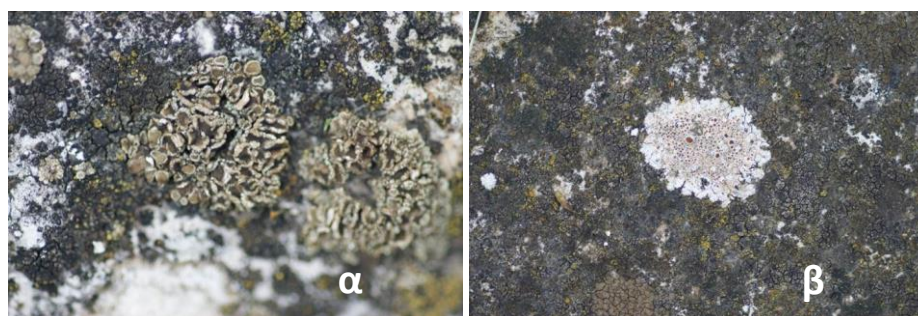
Στον πίνακα 8.2.2, σημειώνονται οι λειχήνες, που εντοπίστηκαν στο χώρο ανασκαφής του Δίου, και χωρίζονται σε εκείνους, που καταγράφηκαν στο ιερό του Ασκληπιού και στο ιερό της Δήμητρας. Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες με λειχήνες από το χώρο του Δίου (Εικ. 8.2.11-8.2.13).

Πίνακας 8.2.2. Είδη λειχήνων στα δύο ιερά

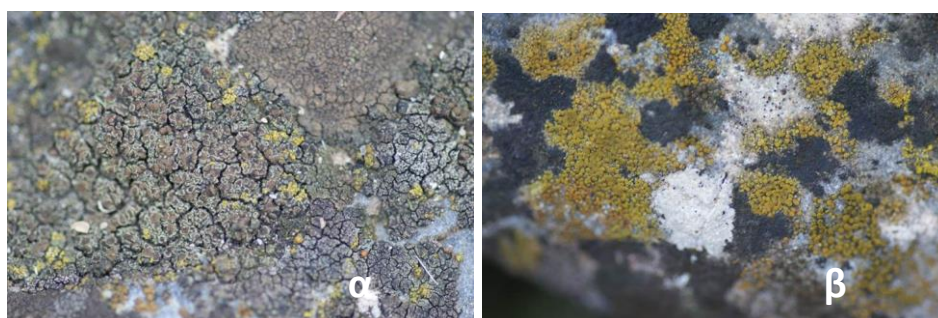
Ιερό Δήμητρας	Ιερό Ασκληπιού
<i>Caloplaca Flavovirescens</i>	<i>Caloplaca erythrocarpa</i>
<i>Candelariela aurella</i>	<i>Lecanora muralis</i>
<i>Collema tenax</i>	<i>Rhinodina sp.</i>
<i>Lecanora albescens</i>	<i>Verrucaria sp.</i>
<i>Lecanora muralis</i>	<i>Xanthoria saxicola</i>
<i>Lecanora sp.</i>	
<i>Rhinodina calcarea</i>	
<i>Verrucaria sp.</i>	



Εικόνα 8.2.11. α. Λειχήνας *Xanthoria saxicola*, β. Λειχήνας *Rhinodina calcarea*



Εικόνα 8.2.12. α. Λειχήνας *Lecanora muralis*, β. Λειχήνας *Caloplaca erythrocarpa*



Εικόνα 8.2.13. α. Λειχήνας *Caloplaca Flavovirescens*, β. Λειχήνας *Candelariela aurella*

8.2.3.2. Συμπεράσματα

Η έντονη παρουσία και ανάπτυξη βρύων και λειχήνων στην επιφάνεια των λίθων είναι αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών, κλιματικών και μετεωρολογικών συνθηκών. Κάποια είδη, όπως *Lunularia cruciata*, *Rhynchostegium megalopolitanum*, *Kindbergia praelonga*, *Scorpiurum circinatum*, απαιτούν την παρουσία μεγάλου ποσοστού υγρασίας για την ανάπτυξή τους ενώ άλλα, όπως *Tortula*, *Syntrichia*, *Grimmia*, είναι ανθεκτικά σε συχνές ξηρές συνθήκες και αναπτύσσονται σε προσήλιες επιφάνειες. Το είδος *Lunularia cruciata* ανήκει στην κατηγορία των ηπατικών βρυόφυτων, που απαιτούν πολύ υψηλά ποσοστά υγρασίας, ενώ όλα τα υπόλοιπα ανήκουν στην κατηγορία των φυλλόβρυων. Το *Scorpiurum circinatum* είναι δείκτης υψηλών επιπέδων υγρασίας και συνήθως εντοπίζεται σε σκιερές λίθινες επιφάνειες, σε σημεία κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Η ανάπτυξη ορισμένων βρυόφυτων, προς το εσωτερικό του λίθου, μέσω των ρωγμών, οδηγεί σε φθορά του υλικού. Η διείδυση των λειχήνων στο υπόστρωμα και η ταχεία απορρόφηση και εκρόφιση νερού από αυτούς, προκαλούν μηχανική καταπόνηση, με συνέπεια τη μείωση της συνοχής του υλικού. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται αλλαγή στο χρώμα του λίθου, λόγω προσρόφησης των χρωστικών των λειχήνων.

Η παρουσία βρύων και λειχήνων, οφείλεται στην έντονη παρουσία του νερού στο περιβάλλον του Δίου, όπου οι συνθήκες χαρακτηρίζονται από έντονη υγρασία λόγω του κλίματος, που καθορίζεται από την παρουσία του Ολύμπου, αλλά και από την παρουσία των δυο ρεμάτων ανάμεσα στα ιερά καθώς του ποταμού Βαφύρα, ο οποίος ρέει πολύ κοντά στα δύο ιερά. Έτσι, οι δομικοί λίθοι λόγω της τριχοειδούς υδατοαπορρόφησης, έχουν εμποτιστεί με υγρασία, που ευνοεί την ανάπτυξη πολλών βρύων και λειχήνων.

8.2.4. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

8.2.4.1. Αποτελέσματα



Εικόνα 8.2.14. Χαρακτηριστικές εικόνες της επιφάνειας των δομικών λίθων, α. γενική εικόνα τμήματος του νοτιοανατολικού Οίκου, α'. λεπτομέρεια εικόνας τμήματος του νοτιοανατολικού Οίκου, β. γενική εικόνα δομικού λίθου ελληνοιστικής στοάς, β'. λεπτομέρεια εικόνας δομικού λίθου ελληνοιστικής στοάς, γ. γενική εικόνα βορειοανατολικής πλευράς του ναού του Ασκληπιού, γ'. λεπτομέρεια εικόνας βορειοανατολικής πλευράς του ναού του Ασκληπιού, δ. γενική εικόνα βόρειας πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας, δ'. λεπτομέρεια εικόνας βόρειας πλευράς του μεγάλου βωμού της Δήμητρας



Εικόνα 8.2.15. Χαρακτηριστικές εικόνες των επιφανειών των δομικών λίθων μετά την εφαρμογή του τελεστή Sobel (Sobel edge detector). Τα μαύρα σημεία είναι επικαλυμμένα με προϊόντα διάβρωσης.

8.2.4.2. Συμπεράσματα

Με βάση τις παραπάνω ψηφιακά επεξεργασμένες φωτογραφίες, με την εφαρμογή του τελεστή Sobel, είναι εμφανές ότι οι επιφάνειες των λίθων καλύπτονται εν μέρει από προϊόντα διάβρωσης. Με βάση τις αναλύσεις, που προηγήθηκαν, τα περισσότερα είναι προϊόντα διάβρωσης των πρωτογενών ορυκτών (ασβεστίτης-δολομίτης), όπως δευτερογενή ανθρακικά άλατα, ανακρυσταλλωμένοι ασβεστίτες ή δολομίτες και σε ορισμένες περιπτώσεις γύψος. Παρατηρείται, ότι ο κάθε λίθος εμφανίζει διαφορετική ταξινόμηση και ποσότητα διαβρωτικών προϊόντων, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό είδος λίθων και τη διαφορετική έκθεσή του στο περιβάλλον (προσήλια ή σκιερή τοποθεσία, παρουσία νερού).

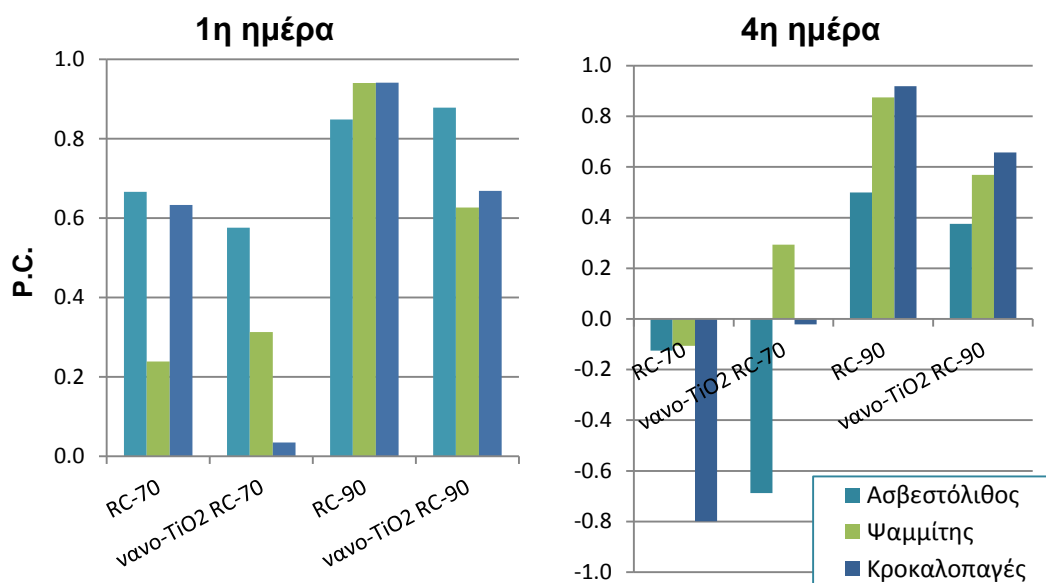
8.3. Σειρά επιστρωμένων δειγμάτων

8.3.1. Τριχοειδής υδατοαπορρόφηση των λίθων

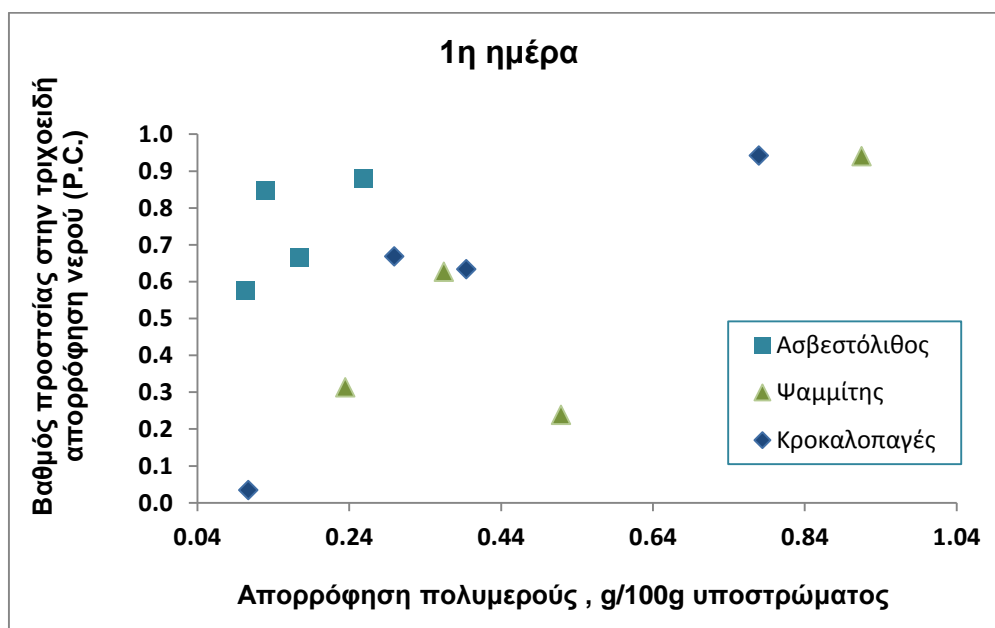
8.3.1.1. Αποτελέσματα

Στα σχήματα 8.3.1 και 8.3.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα, που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων τριχοειδούς υδατοαπορρόφησης σε τρία χαρακτηριστικά δείγματα λίθων από το χώρο του Δίου. Το κάθε δείγμα έχει επιστρωθεί με 4 διαφορετικά πολυμερικά υλικά (ασβεστόλιθος, ψαμμίτης, κροκαλοπαγές) όπως έχει αναφερθεί (βλ. Κεφ. 7.2.3.10).

Στα πρώτα διαγράμματα εμφανίζεται ο βαθμός προστασίας των επιστρωμάτων στην τριχοειδή αναρρίχηση, ενώ στο διάγραμμα του σχήματος 8.3.2 παρουσιάζεται ο βαθμός προστασίας ως συνάρτηση της ποσότητας πολυμερούς, που απορροφήθηκε από το κάθε υπόστρωμα.



Σχήμα 8.3.1. Βαθμός προστασίας στην τριχοειδή απορρόφηση (P.C.) για τα τρία υποστρώματα, την πρώτη και την τέταρτη ημέρα



Σχήμα 8.3.2. Βαθμός προστασίας στην τριχοειδή απορρόφηση (P.C.) ως συνάρτηση της απορρόφησης πολυμερούς από τα υποστρώματα

8.3.1.2. Συμπεράσματα

Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 8.3.1, παρατηρείται ότι από την πρώτη ημέρα, έως την τέταρτη, το επίστρωμα Rhodorsil RC-90 διατήρησε την αυξημένη προστασία του και στα τρία είδη δειγμάτων. Παρόμοια λειτούργησε και το σύνθετο του με nano-TiO₂, με ελαφρώς χαμηλότερες

τιμές. Αντιθέτως, τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-70, ενώ πρόσφεραν κάποια προστασία, έστω και χαμηλή αρχικά, την τέταρτη ημέρα παρουσίασαν αρνητική επίδραση, δηλαδή απορρόφησαν περισσότερο νερό από τα μη επιστρωμένα δείγματα.

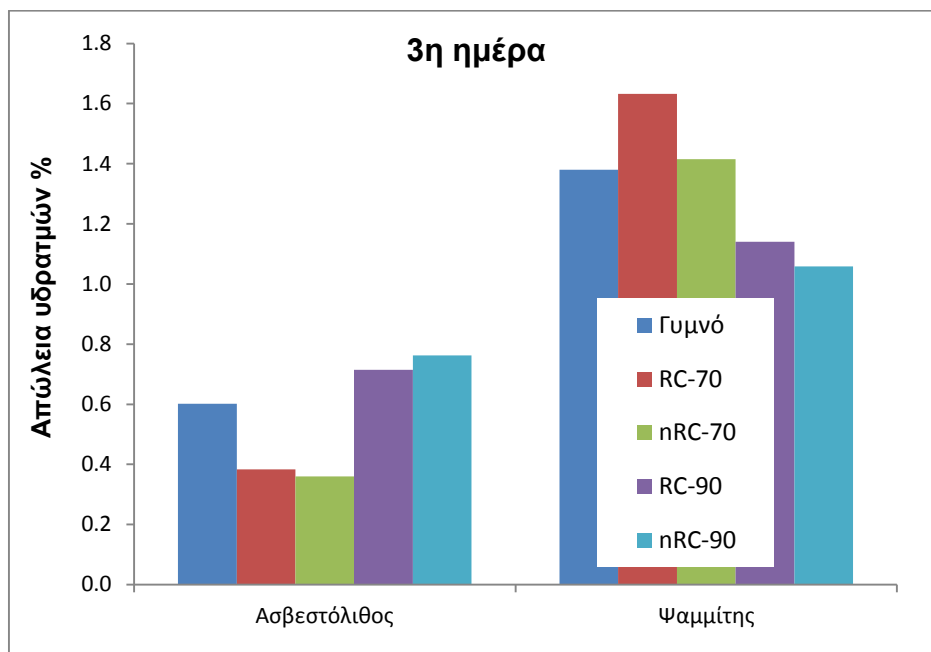
Επίσης, παρατηρείται ότι ο ασβεστόλιθος έχει απορροφήσει τη μικρότερη ποσότητα πολυμερούς, σε σχέση με τους άλλους δύο δομικούς λίθους. Δεν εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις στο βαθμό προστασίας, στην τριχοειδή απορρόφηση, σε σχέση με την απορροφημένη ποσότητα πολυμερούς. Τις μεγαλύτερες διαφορές στη σχέση απορρόφησης πολυμερούς και βαθμού προστασίας, τις παρουσιάζει το κροκαλοπαγές. Παρατηρείται αύξηση του βαθμού προστασίας με αύξηση της απορροφημένης ποσότητας πολυμερούς. Ο ψαμμίτης, ωστόσο, χαρακτηρίζεται από αυξημένες τιμές απορρόφησης πολυμερούς, γεγονός που ίσως οφείλεται στο αυξημένο πορώδες του.

Παρατηρώντας και τα δύο διαγράμματα των σχημάτων 8.3.1 και 8.3.2, προκύπτει ότι τα επιστρώματα Rhodorsil RC-90 και νανο- TiO₂ Rhodorsil RC-90 προσέφεραν καλύτερη προστασία, καθώς και ότι απορροφήθηκαν σε μεγαλύτερες ποσότητες σε σχέση με τα Rhodorsil RC-70 και νανο- TiO₂ Rhodorsil RC-70. Ενδεχομένως, αυτό να οφείλεται στην παρουσία μεθυλ-φαινυλικής ρητίνης στην σύσταση του πολυμερούς. Λόγω των ρητινών, που υπάρχουν μέσα στο διάλυμα, αποφεύγεται ο άμεσος σχηματισμός μεγάλων πυριτικών αλυσίδων, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται περισσότερη απορρόφηση πολυμερούς στο εσωτερικό του υλικού των δομικών λίθων, το οποίο στη συνέχεια πολυμερίζεται. Συνεπώς, υπάρχει περισσότερο υλικό, που προστατεύει το υπόστρωμα από την τριχοειδή απορρόφηση.

8.3.2. Διαπερατότητα των λίθων από υδρατμούς

8.3.2.1. Αποτελέσματα

Στο σχήμα 8.3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διαπερατότητας των λίθων από υδρατμούς. Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα αφορά τις τιμές απώλειας υδρατμών (%), μέσα από τους πόρους των δειγμάτων ασβεστόλιθου και ψαμμίτη, κατά την τρίτη ημέρα των μετρήσεων.



Σχήμα 8.3.3. Απώλεια υδρατμών (%) ανά επίστρωση σε ασβεστόλιθο και σε ψαμμίτη

8.3.2.2. Συμπεράσματα

Η μείωση της διαπερατότητας των λίθων σε υδρατμούς μπορεί να οδηγήσει σε συμπύκνωση του νερού κάτω από το πολυμερικό επίστρωμα, προκαλώντας ακόμα και αποκόλληση του πολυμερικού επιστρώματος από το λίθο. Η μείωση της διαπερατότητας σε υδρατμούς στην περίπτωση προστατευμένων με επιστρώματα λίθων, είναι αναπόφευκτη, λόγω των υδροφοβικών ιδιοτήτων των πολυμερικών υλικών. Βασική επιδίωξη είναι, η κατά το δυνατόν μικρότερη μείωση της αρχικής διαπερατότητας του λίθου, ώστε το υλικό να μη χάνει την ικανότητά του να «αναπνέει». Στην περίπτωση, που μειώνεται πολύ η διαπερατότητα του λίθου σε υδρατμούς, εγκλωβίζεται υγρασία στο εσωτερικό του λίθου, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη και πιο έντονη διάβρωση.

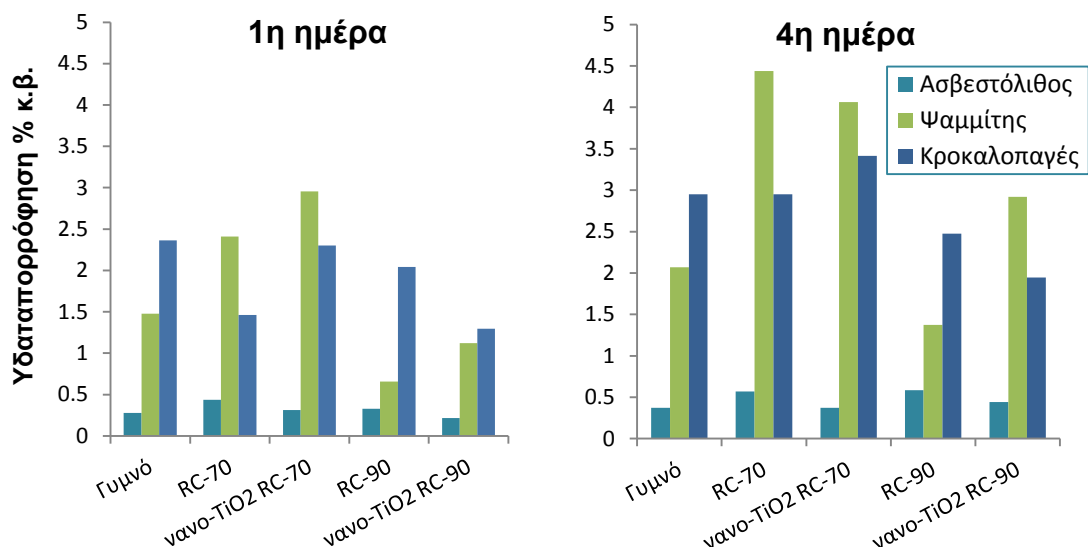
Ο ψαμμίτης σε όλες τις περιπτώσεις, παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε υδρατμούς σε σχέση με τον ασβεστόλιθο. Παράλληλα, τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-70 δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στον ψαμμίτη. Τα Rhodorsil RC-90 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90 επιτρέπουν λιγότερη ροή υδρατμών. Αντιθέτως, στον ασβεστόλιθο, τα Rhodorsil RC-90 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90 επιστρώματα αφήνουν το λίθο να αναπνεύσει καλύτερα, σε σχέση με τα Rhodorsil RC-70 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-70.

8.3.3. Πλήρης βύθιση λίθων σε νερό

8.3.3.1. Αποτελέσματα

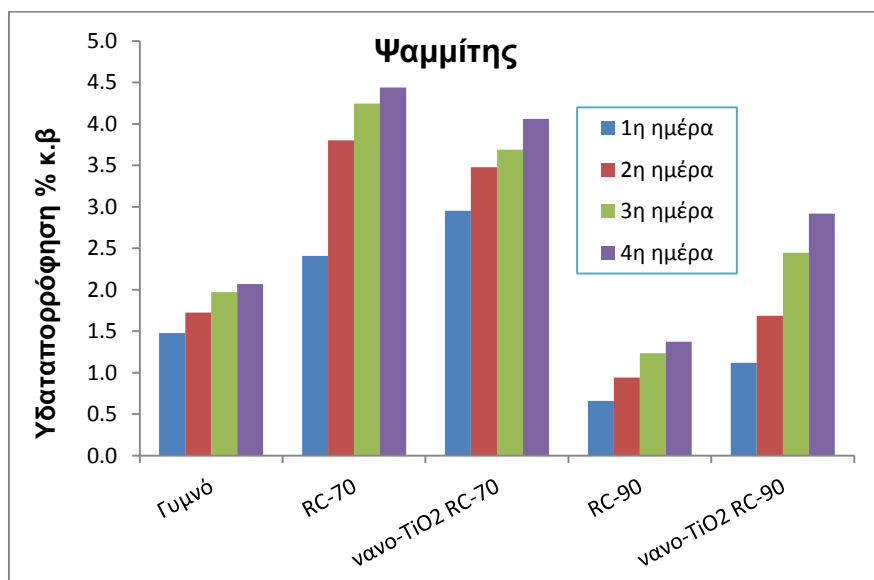
Στο σχήμα 8.3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πλήρους βύθισης (βλ. Κεφ. 7.2.3.11) ως απορρόφηση νερού % κατά βάρος για ασβεστόλιθο, ψαμμίτη και κροκαλοπαγές,

κατά την πρώτη και την τέταρτη ημέρα μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι τιμές ανά πολυμερικό επίστρωμα για κάθε λίθο, ενώ ο όρος «γυμνό» αφορά τον κάθε μη επιστρωμένο δομικό λίθο, ώστε να γίνει σύγκριση με τους επιστρωμένους λίθους.



Σχήμα 8.3.4. Υδαταπορρόφηση (%) κατά την πλήρη βύθιση των λίθων σε νερό

Στο σχήμα 8.3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πλήρους βύθισης, ως απορρόφηση νερού % κατά βάρος για τον ψαμμίτη, ανά υλικό επιστρώματος και ανά ημέρα μετρήσεων.



Σχήμα 8.3.5. Υδαταπορρόφηση (%) κατά την πλήρη βύθιση των δειγμάτων ψαμμίτη σε νερό

8.3.3.2. Συμπεράσματα

Μεγαλύτερη υδαταπορρόφηση παρουσιάζουν ο ψαμμίτης και το κροκαλοπαγές σε όλες τις περιπτώσεις επιστρωμάτων, λόγω της αυξημένης τάσης τους να απορροφούν νερό (βλ. Κεφ. 8.1.3). Ο ασβεστόλιθος προστατεύεται καλύτερα από τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 και Rhodorsil RC-90 με νανο-TiO₂, αφού απορροφά μικρότερη ποσότητα νερού στην περίπτωση που είναι επιστρωμένος με νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-70 (Σχ. 8.3.4). Ωστόσο, οι διαφορές των τιμών υδαταπορρόφησης ασβεστόλιθου επιστρωμένου με Rhodorsil RC-70 και Rhodorsil RC-90 και ασβεστόλιθου επιστρωμένου με νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-70 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90 είναι μικρές. Για παράδειγμα, ο ασβεστόλιθος επιστρωμένος με Rhodorsil RC-90 εμφανίζει υδαταπορρόφηση 0,329 % κ.β. την πρώτη ημέρα μετρήσεων. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του επιστρώματος νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90 για την ίδια ημέρα μετρήσεων ο ασβεστόλιθος έχει υδαταπορρόφηση 0,215 % κ.β. Αυτό, έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της προστασίας στην τριχοειδή υδαταπορρόφηση (βλ. Κεφ. 8.3.1), όπου τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70, παρουσίαζαν μικρή, έως καθόλου, προστασία για τον ασβεστόλιθο.

Ο ψαμμίτης προστατεύεται καλύτερα από τα επιστρώματα Rhodorsil RC-90 και νανο-TiO₂ Rhodorsil RC-90, όπως και το κροκαλοπαγές. Τα επιστρώματα, αυτά, παρουσίασαν καλύτερη προστασία και στην περίπτωση της τριχοειδούς απορρόφησης.

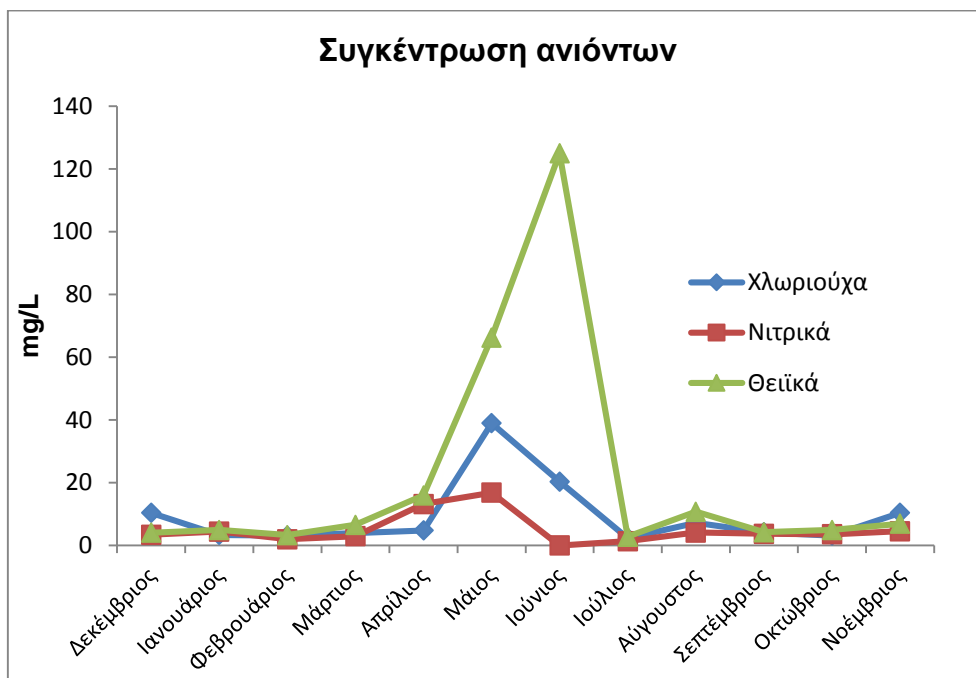
8.4. Δείγματα υδάτων

Κατά τη διάρκεια ενός έτους (Δεκέμβριος 2010-Νοέμβριος 2011), πραγματοποιήθηκε συλλογή βρόχινων υδάτων με τη χρήση δειγματολήπτη υγρής-ξηρής απόθεσης, στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου ο οποίος τοποθετήθηκε ανάμεσα στα δύο ιερά του Ασκληπιού και της Δήμητρας. Η συλλογή των υδάτων γινόταν κάθε τέλος του μήνα (βλ. Κεφ. 7.1.2). Επιπλέον, έγινε δειγματοληψία από τρία σημεία των επιφανειακών υδάτων, στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου το Νοέμβριο του 2011. Τα σημεία δειγματοληψίας ήταν το μικρό ρέμα δυτικά του ιερού του Ασκληπιού, το ρέμα ανάμεσα στα δύο ιερά και ο ποταμός Βαφύρας.

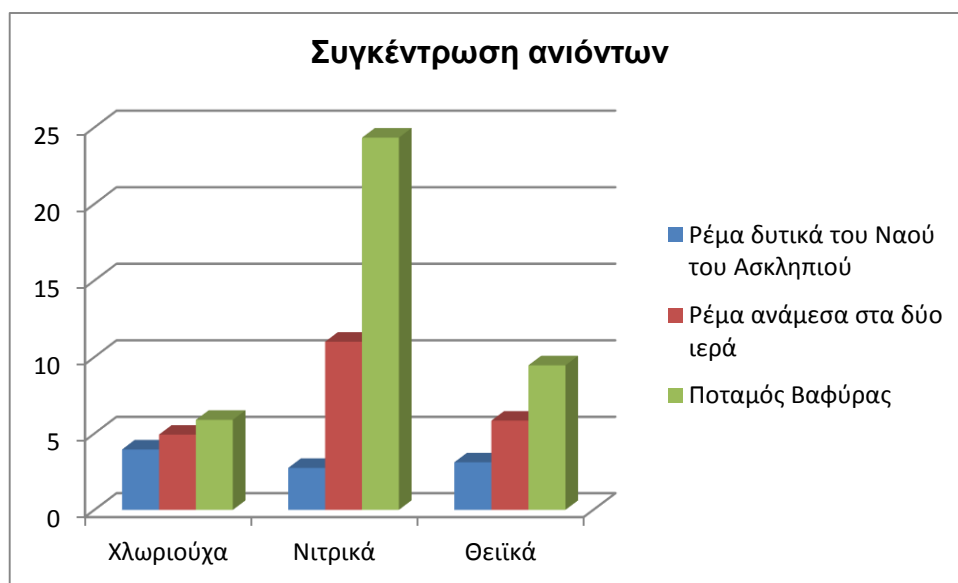
8.4.1. Ιοντική χρωματογραφία

Στα βρόχινα καθώς και στα επιφανειακά ύδατα, που συλλέχθηκαν έγινε μέτρηση ιοντικής χρωματογραφίας, ώστε να γίνει ανάλυση της περιεκτικότητάς τους σε χλωριούχα, νιτρικά και θειικά ανιόντα.

8.4.1.1. Αποτελέσματα



Σχήμα 8.4.1. Συγκέντρωση των ανιόντων στα βρόχινα ύδατα κατά τη διάρκεια ενός έτους (Δεκέμβριος 2010-Νοέμβριος 2011)



Σχήμα 8.4.2. Συγκέντρωση των ανιόντων για επιφανειακά ύδατα

8.4.1.2. Συμπεράσματα

Τα δείγματα των βρόχινων υδάτων παρουσίασαν ουδέτερο pH με εύρος 6,5-7,5. Με εξαίρεση τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, όπου τα δείγματα παρουσίασαν πολύ μεγάλη συγκέντρωση θειικών ανιόντων, τους υπόλοιπους μήνες οι τιμές θειικών ανιόντων κυμάνθηκαν μεταξύ 4,1 και 16 mg/L. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με το εύρος συγκεντρώσεων των βρόχινων υδάτων της περιοχής (2,5-30 mg/L). Οι αυξημένες τιμές θειικών ανιόντων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες,

ίσως οφείλεται στη μεταφορά τους με τη θαλάσσια αύρα, φαινόμενο που εντείνεται το καλοκαίρι. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ήταν αυξημένες, κυρίως τον Απρίλιο και το Μάιο, αλλά τους περισσότερους μήνες η τιμή δεν ξεπέρασε τα 4,4 mg/L. Καταλήγοντας, τα χλωριούχα παρουσίασαν αυξημένες συγκεντρώσεις (2,4-39 mg/L), με υψηλότερες τιμές τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, γεγονός, που υποδηλώνει πιθανή μεταφορά ιόντων με τη θαλάσσια αύρα.

Στα δείγματα επιφανειακών υδάτων από το μικρό ρέμα δυτικά του ναού του Ασκληπιού, το ρέμα ανάμεσα στα δύο ιερά και τον ποταμό Βαφύρα, οι συγκεντρώσεις των ιόντων ακολουθούσαν την ίδια αύξουσα σειρά νιτρικά > θειικά > χλωριούχα. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν στον ποταμό Βαφύρα. Σε όλα τα δείγματα, οι τιμές των ιόντων κυμαίνονταν στο εύρος των τιμών των επιφανειακών υδάτων της Μακεδονίας.

8.5. Δείγματα εδάφους

8.5.1. Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε σε δείγματα εδάφους, που συλλέχθηκαν από το ιερό του Ασκληπιού και το ιερό της Δήμητρας. Χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένα κόσκινα Νο200 έως Νο4.

8.5.1.1. Αποτελέσματα

Οι τιμές του διερχόμενου ποσοστού του εδάφους, από κάθε κόσκινο, που καταγράφηκαν με την κοκκομετρική ανάλυση φαίνονται στον πίνακα 8.5.1 για το έδαφος από το ιερό του Ασκληπιού, και στον πίνακα 8.5.2 για το έδαφος του ιερού της Δήμητρας.

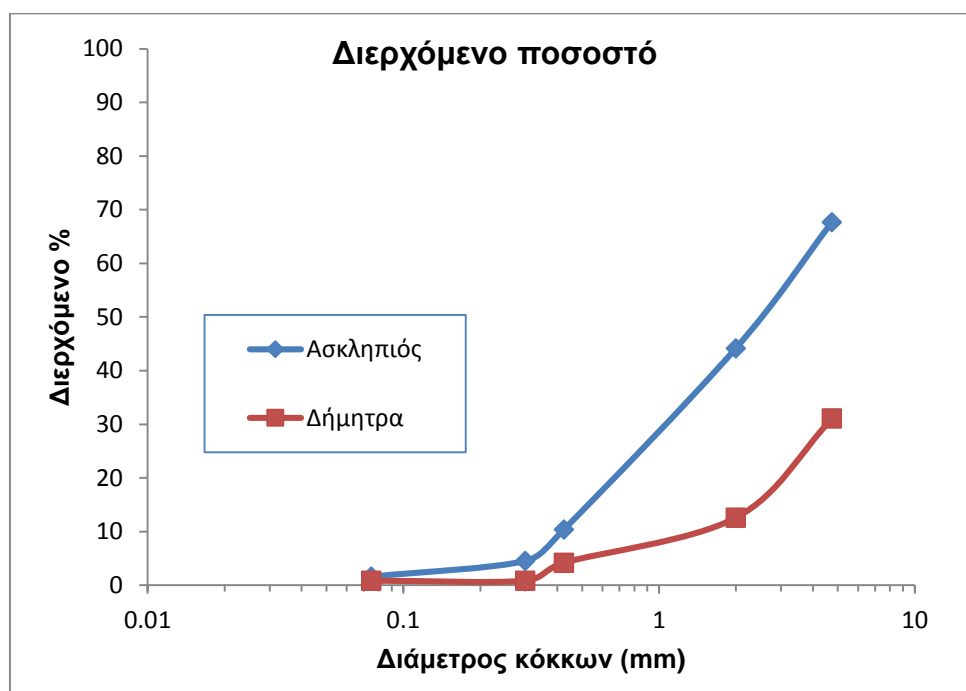
Πίνακας 8.5.1. Κοκκομετρική ανάλυση εδάφους στο ιερό του Ασκληπιού

Τυπική ακολουθία	Διάμετρος κόσκινου (mm)	Ασκληπιός		
		Συγκρατούμενο (gr)	Συγκρατούμενο (%)	Διερχόμενο (%)
4	4,75	220	32,31	67,69
10	2	160	23,49	44,20
40	0,425	230	33,77	10,43
50	0,3	40	5,87	4,55
200	0,075	20	2,94	1,62
Συνολική ποσότητα		670		

Πίνακας 8.5.2. Κοκκομετρική ανάλυση εδάφους στο ιερό της Δήμητρας

Τυπική ακολουθία	Διάμετρος κόσκινου (mm)	Δήμητρα		
		Συγκρατούμενο (gr)	Συγκρατούμενο (%)	Διερχόμενο (%)
4	4,75	67,69	68,91	31,09
10	2	44,20	18,49	12,61
40	0,425	10,43	8,40	4,20
50	0,3	4,55	3,36	0,84
200	0,075	1,62	0,00	0,84
Συνολική ποσότητα		590		

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής δοκιμής παρουσιάζονται κυρίως με τη μορφή καμπύλης, και έτσι προκύπτουν οι καμπύλες του σχήματος 8.5.1.



Σχήμα 8.5.1. Κοκκομετρική καμπύλη για τα δύο δείγματα εδάφους από το ιερό του Ασκληπιού και το ιερό της Δήμητρας

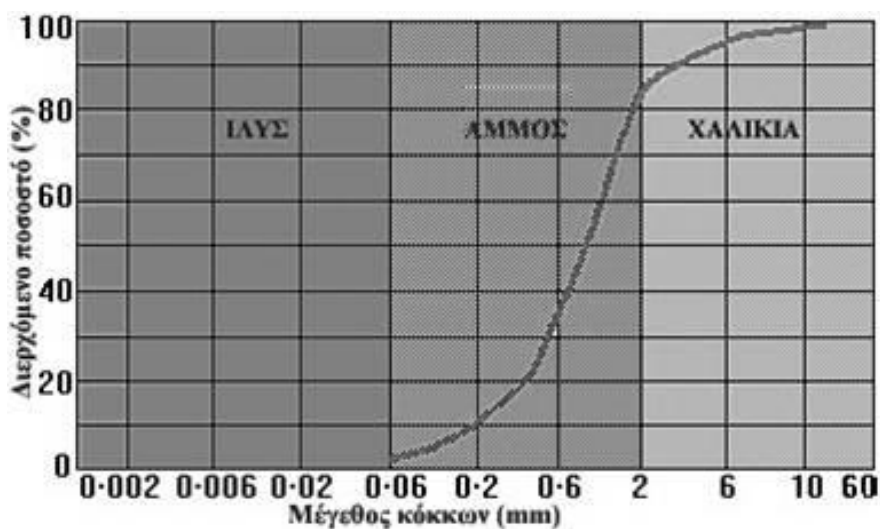
Ο συντελεστής ομοιομορφίας βοηθάει στη διάκριση των εδαφών σε ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη κοκκομετρία (βλ. Κεφ. 6.7). Ο συντελεστής καμπυλότητας είναι μέτρο καμπυλότητας στην καμπύλη μεταξύ των σημείων d_{60} και d_{10} (Πίν. 8.5.3).

Πίνακας 8.5.3. Συντελεστές ομοιομορφίας και καμπυλότητας εδάφους του ιερού του Ασκληπιού και του ιερού τη Δήμητρας

	Ασκληπιός	Δήμητρα
Συντελεστής ομοιομορφίας	15,8	3,1
Συντελεστής καμπυλότητας	2,8	1,8

8.5.1.2. Συμπεράσματα

Το δείγμα εδάφους από το ιερό του Ασκληπιού παρουσιάζει καμπύλη ομαλής κλίσης, γεγονός, που δείχνει ευρεία σειρά μεγέθους κόκκων και το έδαφος χαρακτηρίζεται ως καλά διαβαθμισμένο. Το δείγμα του ιερού της Δήμητρας, παρουσιάζει τμήματα διαφορετικής καμπυλότητας, οπότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μίγμα ομοιόμορφων υλικών. Και στις δύο περιπτώσεις, τα δείγματα αποτελούνται από άμμο και χαλίκια, με βάση την κοκκομετρική καμπύλη του σχήματος 8.5.2.



Σχήμα 8.5.2. Κοκκομετρική καμπύλη εδαφικών υλικών (Σακελλαρίου *et al.*, 2003, Καμάρης, 2007)

9. Επεξήγηση αποτελεσμάτων

9.1. Σειρά δειγμάτων ιερού Δήμητρας (DD1-9) και ιερού Ασκληπιού (DA1-4)

Τα είδη λίθων, που χρησιμοποιήθηκαν ως δομικά υλικά στα δύο ιερά του Δίου, ήταν κυρίως ασβεστόλιθοι, τραβερτίνες, πωρόλιθοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μάρμαρα καθώς και κεραμικές πλίνθοι. Τα ακατέργαστα υλικά, εκτός των μαρμάρων και των πλίνθων, έχουν τοπική προέλευση, κυρίως από την ευρύτερη περιοχή του Δίου στις πλαγιές του Ολύμπου. Τα μάρμαρα εντοπίζονται σε μικρότερο βαθμό και οι πλίνθοι της ανωδομής δεν διασώθηκαν παρά μόνο ορισμένες σειρές, που χρονολογούνται στη ρωμαϊκή εποχή.

Αναλυτικά για κάθε είδος παρατηρούμε ότι: οι ασβεστόλιθοι και οι πωρόλιθοι αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη ή δολομίτη, τα κροκαλοπαγή περιέχουν κυρίως ασβεστόλιθο και αποτελούνται από ασβεστίτη, τα μάρμαρα αποτελούνται κυρίως από λευκό χονδρόκοκκο ασβεστίτη ή χονδρόκοκκο δολομίτη, οι ψαμμίτες περιέχουν ασβεστίτη και δολομίτη, ενώ οι κεραμικές πλίνθοι αποτελούνται από γωνιώδεις κόκκους διαφόρων ορυκτών, διεσπαρμένους στη μάζα της αργίλου.

Τα υλικά παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και αλλοίωσης, που προκαλούνται κυρίως από το περιβάλλον, τη βροχή και την παρουσία ρύπων σε αυτή, την τριχοειδή διείσδυση του νερού από το έδαφος, καθώς και την έντονη παρουσία υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή. Επιπλέον, η χλωρίδα που αναπτύσσεται και οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές κατά τη διάρκεια της ημέρας, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες διάβρωσης.

Πίνακας 9.1.1. Είδη λίθων των δειγμάτων

Ονομασία δείγματος	Είδος λίθου
DD1	Ασβεστόλιθος
DD2	Κροκαλοπαγές
DD3	Ασβεστόλιθος
DD4	Μάρμαρο
DD5	Μάρμαρο
DD6	Πωρόλιθος
DD7	Ψαμμίτης
DD8	Πλίνθος
DD9	Μάρμαρο
DA1	Κροκαλοπαγές
DA2	Ασβεστόλιθος
DA3	Πλίνθος
DA4	Ψαμμίτης

Οι επιφάνειες των υλικών είναι μερικώς καλυμμένες με προϊόντα διάβρωσης των βασικών ορυκτών, όπως δευτερεύοντα ανθρακικά άλατα, ανακρυσταλλωμένους δολομίτες και ασβεστίτες και σε μερικές περιπτώσεις γύψο, που κατακάθεται από τα υδατικά διαλύματα. Η παρουσία κρούστας διαφόρων οργανικών και ανόργανων ενώσεων όπως, ο ιλλίτης, ο καολινίτης, ο σερικίτης, το ρουτίλιο, ο χρωμίτης, τα οξείδια σιδήρου και τα θραύσματα απολιθωμάτων σχετίζονται με διάφορα ιζήματα, που καλύπτουν τα πρωτογενή υλικά.

Πίνακας 9.1.2. Πρωτογενής και δευτερογενής ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων όπως προκύπτει από τη μελέτη σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Δείγμα	Τύπος πετρώματος	Ασβεστίτη ς	Δολομίτης	Χαλαζίας	Λευκή μαρμαρυγία	Αραγωνίτης	Αλβίτης	Οξείδια Fe
DD1	Ασβεστόλιθος	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DD2	Κροκαλοπαγές	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	Ίχνη	-	-	-
DD3	Ασβεστόλιθος	Δευτερεύον	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	Δευτερεύον	-	Ίχνη
DD4	Μάρμαρο	Ίχνη	Κύριο	-	Ίχνη	-	Ίχνη	-
DD5	Μάρμαρο	Κύριο	-	Ίχνη	-	-	-	-
DD6	Πωρόλιθος	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	Ίχνη	Ίχνη
DD7	Ψαμμίτης	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DD8	Πλίνθος	Calcite, quartz, white mica, amphibole, epidote, K-feldspar, plagioclase						
DD9	Μάρμαρο	Κύριο	Δευτερεύον	Ίχνη	-	-	-	Ίχνη
DA1	Κροκαλοπαγές	Κύριο	Κύριο	Ίχνη	Ίχνη	-	-	Ίχνη
DA2	Ασβεστόλιθος	-	Κύριο	-	-	-	Ίχνη	Ίχνη
DA3	Πλίνθος	Calcite, quartz, white mica, microcline, epidote, plagioclase						
DA4	Ψαμμίτης	Δευτερεύον	Κύριο	-	-	-	-	Ίχνη

Η ανάλυση ισοτόπων C και O για το δείγμα DD4 οδηγεί σε ξεκάθαρη προέλευση του από τα λατομεία του Ακρωτηρίου Βαθύ στη ΒΑ Θάσο, αφού τα μάρμαρα εκεί είναι δολομιτικά. Οι υπόλοιπες θέσεις αποκλείονται, διότι τα μάρμαρα είναι ασβεστιτικά.

Επιπλέον, το δείγμα DD9 προέρχεται από τα λατομεία της Αλυκής, στη ΝΑ Θάσο αφού τα μάρμαρα είναι ασβεστιτικά με λίγο δολομίτη. Οι υπόλοιπες θέσεις αποκλείονται, διότι τα μάρμαρα

στη Νικήσιανη είναι δολομιτικά, ενώ τα μάρμαρα στο Βέρμιο, τα Δολιανά, τη Μάνη, την Πεντέλη και την Πάρο διαφοροποιούνται από το δείγμα DD9 λόγω των πετρογραφικών χαρακτηριστικών.

Ασβεστόλιθοι

Οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν τη μικρότερη ποσότητα περιεχόμενης υγρασίας, λόγω του χαμηλού πορώδους, που παρουσιάζουν (βλ.8.1.4), και λόγω της απουσίας αργλικών ορυκτών στη μάζα τους. Οι τιμές πορώδους και περιεχόμενης υγρασίας για τους δύο ασβεστόλιθους (DA2, DD3) οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι είναι συμπαγείς και όχι πορώδεις. Ωστόσο, ο ασβεστόλιθος DD1 είναι πορώδης. Οι ασβεστόλιθοι με το χαμηλό πορώδες έχουν μεγάλο ξηρό βάρος.

Η International Society of Rock Mechanics (I.S.R.M.) έχει δημιουργήσει ένα κατάλογο χαρακτηρισμού των πετρωμάτων, ανάλογα με το συντελεστή σημειακής φόρτισης και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι οι ασβεστόλιθοι, παρόλη την επιφανειακή διάβρωση που έχουν υποστεί, έχουν υψηλή αντοχή.

Πίνακας 9.1.3. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DA2	Ασβεστόλιθος	6,46	115
DD1	Ασβεστόλιθος	1,62	41
DD3	Ασβεστόλιθος	6,83	121

Οι ασβεστόλιθοι, εκτός του δείγματος DD1, το οποίο λόγω του αυξημένου πορώδους του έχει και μικρότερη σκληρότητα, εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

Οι υγιείς ασβεστόλιθοι εμφανίζουν μεγάλες τιμές ταχύτητας διάδοσης, έως και 6.000 m/s. Ωστόσο, φαίνεται ότι οι τιμές αυτές είναι κατά πολύ μικρότερες, γεγονός που οφείλεται στην έντονη ρηγμάτωση και διάβρωση που έχουν υποστεί.

Ο ασβεστόλιθος DD1 έχει μεγάλη διακύμανση στο μέγεθος των πόρων από 10 μm έως 200 μm , ενώ ο ασβεστόλιθος DD3 αποτελείται κυρίως από πόρους μικρής διαμέτρου (10-20 μm) και μεγάλης διαμέτρου (>200 μm).

Κροκαλοπαγή

Τα κροκαλοπαγή έχουν μεγαλύτερες τιμές περιεχόμενης υγρασίας από τα μάρμαρα, λόγω του μεγαλύτερου πορώδους τους και λόγω της παρουσίας σε αυτά λευκού μαρμαρυγία. Παρατηρείται, ότι οι τιμές πορώδους του κάθε δείγματος είναι ανάλογες με τις τιμές της

περιεχόμενης υγρασίας, όπως και είναι αναμενόμενο. Οπότε το κροκαλοπαγές με μεγαλύτερη περιεχόμενη υγρασία έχει και μεγαλύτερο πορώδες.

Το φαινόμενο βάρος περιλαμβάνει το συνολικό βάρος του λίθου προς το συνολικό όγκο, με αποτέλεσμα οι τιμές των κροκαλοπαγών δειγμάτων να είναι αντίστοιχες με αυτές των ασβεστόλιθων, δηλαδή να εμφανίζονται αυξημένες.

Επιπλέον, τα κροκαλοπαγή παρουσιάζουν μέση αντοχή, με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται σκληρά πετρώματα. Ωστόσο, εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές αντοχής, σε σχέση με τα μη διαβρωμένα αντίστοιχα πετρώματα.

Πίνακας 9.1.4. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DA1	Κροκαλοπαγές	2,81	59
DD2	Κροκαλοπαγές	1,98	47

Το κροκαλοπαγές εμφανίζει εύρος πόρων από 100 μm έως 200 μm , κυρίως γιατί αποτελείται από μεγάλες κροκάλες μεγέθους έως 2 cm και μεγάλους κόκκους δολομίτη και ασβεστίτη.

Μάρμαρα

Τα μάρμαρα παρουσιάζουν τη μικρότερη ποσότητα περιεχόμενης υγρασίας, λόγω του χαμηλού πορώδους που παρουσιάζουν (βλ.8.1.4) και λόγω της απουσίας αργιλικών ορυκτών στη μάζα τους. Όπως είναι αναμενόμενο, τα μάρμαρα έχουν μικρό πορώδες, σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά.

Το ξηρό φαινόμενο βάρος είναι αντιστρόφως ανάλογο του πορώδους. Υλικά με μεγάλο πορώδες, έχουν μικρό ξηρό φαινόμενο βάρος. Τα μάρμαρα εμφανίζουν μέτριες τιμές ξηρού φαινομένου βάρους.

Όπως είναι αναμενόμενο, τα μάρμαρα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή. Το μάρμαρο DD5 περιέχει κρυστάλλους χαλαζία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντοχή του. Αντιθέτως, το δείγμα DD9 παρουσιάζει πολύ χαμηλή τιμή του δείκτη, γεγονός που ίσως να οφείλεται στην έντονη διάβρωση του συγκεκριμένου δείγματος.

Πίνακας 9.1.5. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DD4	Μάρμαρο	9,82	167
DD5	Μάρμαρο	12,47	207
DD9	Μάρμαρο	0,66	26

Τα μάρμαρα, εκτός το δείγματος DD9, είναι πολύ σκληρά πετρώματα γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των μαρμάρων είναι σημαντικά μειωμένες, σε σχέση με υγιή μάρμαρα, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μάρμαρα έχουν αποσαθρωθεί σημαντικά στο εσωτερικό τους. Αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας τους είναι αισθητά μειωμένο σε σχέση με τα μη διαβρωμένα μάρμαρα (30-70 GPa).

Τα μάρμαρα με χαμηλό πορώδες έχουν κυρίως πόρους με μεγάλη διάμετρο (200 μm).

Ψαμμίτες

Οι ψαμμίτες έχουν μεγαλύτερες τιμές περιεχόμενης υγρασίας από τα μάρμαρα, λόγω του μεγαλύτερου πορώδους τους και λόγω της παρουσίας σε αυτά λευκού μαρμαρυγία. Λίγο μεγαλύτερη τιμή, παρουσιάζει το δείγμα DD7, το οποίο στη δευτερογενή ορυκτολογική σύστασή του, περιέχει καολινίτη και ιλλίτη, τα οποία είναι φυλλοπυριτικά ορυκτά της αργίλου.

Παρατηρείται, ότι τα δύο δείγματα ψαμμίτη έχουν αρκετή διαφορά στις τιμές του πορώδους τους. Ο ψαμμίτης DA4 παρουσιάζει ανακρυσταλλωμένους κόκκους δολομίτη και ασβεστίτη με μέγεθος έως και 500 μm . Αντιθέτως, οι κόκκοι στον ψαμμίτη DD7 έχουν μέγεθος έως 200 μm . Επιπλέον, ο ψαμμίτης DD7 παρουσιάζει έντονο σχηματισμό γύψου στην επιφάνεια του. Για τους λόγους αυτούς, το δείγμα DD7 είναι ένας πορώδης ψαμμίτης και το δείγμα DA4, ένας συμπαγής ψαμμίτης. Ωστόσο, οι ψαμμίτες έχουν χαμηλό ξηρό φαινόμενο βάρος ενώ παρουσιάζουν διαφορές στο ειδικό βάρος στερεών.

Επιπλέον, οι πορώλιθοι, οι πλίνθοι, οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή παρουσιάζουν μέση αντοχή, με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης. Ωστόσο, οι ψαμμίτες, λόγω της ασβεστιτικής τους σύστασης εμφανίζουν ελαφρώς πιο αυξημένη αντοχή, σε σχέση με τα υπόλοιπα. Οι ψαμμίτες χαρακτηρίζονται σκληρά πετρώματα αν και εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές αντοχής σε σχέση με τα μη διαβρωμένα αντίστοιχα πετρώματα.

Πίνακας 9.1.6. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DA4	Ψαμμίτης	4,18	80
DD7	Ψαμμίτης	2,99	62

Οι ψαμμίτες, λόγω της παρουσίας αργιλοπυριτικών ορυκτών στη μάζα τους, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές στις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων. Οι τιμές, αυτές, είναι χαμηλότερες από τις τιμές των υγιών ψαμμιτών, ενδεχομένως λόγω της διάβρωσης της εσωτερικής μάζας των λίθων αυτών και των ρωγμών, που μπορεί να φέρουν. Οι ψαμμίτες, λόγω του πορώδους τους, απορροφούν περισσότερο νερό, με αποτέλεσμα να είναι έντονη η διάβρωση στο εσωτερικό τους. Οι ψαμμίτες εμφανίζουν κατανομή πόρων σε ένα εύρος από 10 μm έως 200 μm .

Πλίνθοι

Αυξημένη υγρασία παρατηρείται στις δύο κεραμικές πλίνθους. Τα αργιλικά υλικά, όπως οι πλίνθοι στην περίπτωση μας, μπορεί να έχουν μέχρι και 30% περιεχόμενη υγρασία, λόγω της ιδιότητας τους να απορροφούν εύκολα νερό και να διογκώνονται. Φυσικά, με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η συνεκτικότητα τους, παρατηρούνται φαινόμενα θιξοτροπίας, λόγω της διόγκωσής τους, και αναπτύσσονται μηχανικές τάσεις. Όλα αυτά οδηγούν και σε μεγαλύτερο βαθμό διάβρωσης των υλικών αυτών. Οι πλίνθοι είναι υλικά με μεγάλο πορώδες, λόγω της παρουσίας αργίλου σ' αυτές, γι αυτό και έχουν χαμηλό ξηρό φαινόμενο βάρος.

Επιπλέον, οι πλίνθοι παρουσιάζουν μέση αντοχή, με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης και γι' αυτό είναι πολύ ασθενή υλικά.

Πίνακας 9.1.7. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DA3	Πλίνθος	2,02	47
DD8	Πλίνθος	0,81	29

Οι πλίνθοι εμφανίζουν κατανομή πόρων σε ένα εύρος από 10 μm έως 200 μm .

Πωρόλιθος

Ο πορόλιθος εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές περιεχόμενης υγρασίας από τα μάρμαρα, λόγω του μεγαλύτερου πορώδους του. Το ξηρό φαινόμενο βάρος στην περίπτωση του πορόλιθου είναι χαμηλό, όπως και στους ψαμμίτες.

Επιπλέον, οι πορόλιθοι παρουσιάζουν μέση αντοχή, με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης, οπότε και χαρακτηρίζονται ως μέτρια σκληρά πετρώματα.

Πίνακας 9.1.8. Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) σε MPa

Δείγμα	Είδος λίθου	Διορθωμένος δείκτης $I_{s(50)}$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
DD6	Πωρόλιθος	1,19	35

9.2. Μετρήσεις in situ

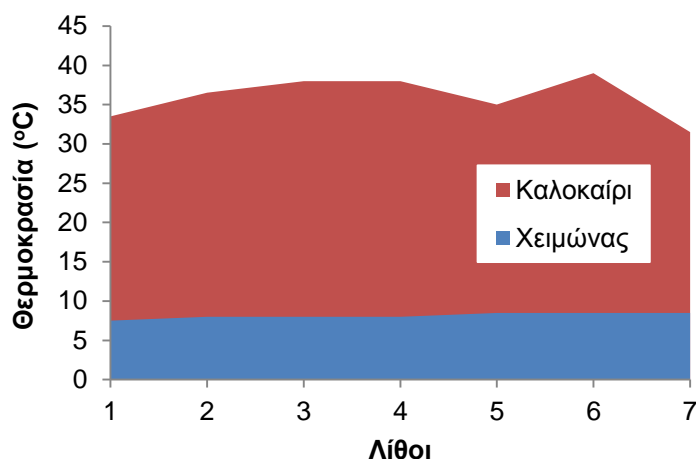
Στους θεμέλιους λίθους έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας υπερήχων για μελέτη της φθοράς των λίθων αλλά και ανίχνευση των βρύων και των λειχήνων, που έχουν αναπτυχθεί στους λίθους και τέλος πραγματοποιήθηκε ψηφιακή επεξεργασία εικόνων για ανάλυση της φθοράς.

Θερμομέτρηση

Όπως έχει αναφερθεί, με τη χρήση της θερμομέτρησης ανιχνεύεται η παρουσία υγρασίας στους λίθους. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, είναι χαρακτηριστικό πως στα χαμηλότερα σημεία των λίθων (πιο κοντά στο έδαφος), η θερμοκρασία είναι πάντα χαμηλότερη. Η τριχοειδής απορρόφηση του νερού στους πόρους του υλικού οδηγεί σε διάβρωση του λίθου, με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται οι ιδιότητες του. Παράλληλα, η θερμοκρασία στις υγρές περιοχές μένει χαμηλή, καθότι απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για να αυξηθεί η θερμοκρασία σε αυτές, απ' ό,τι στις στεγνές περιοχές.

Οι διαφορές στη θερμοκρασία επηρεάζονται επίσης, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιοφάνεια ή σκιά), από το είδος του υλικού και τον προσανατολισμό του τοίχου. Όπως είναι αναμενόμενο, οι θερμοκρασίες είναι αυξημένες σε όλους τους τοίχους κατά τους θερινούς μήνες, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 28°C, και μειωμένη κατά τους χειμερινούς, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 9°C.

Δυτική πλευρά



Σχήμα 9.2.1. Διάγραμμα σύγκρισης θερμοκρασιών χειμώνας-καλοκαίρι, δυτική πλευρά, ναός Ασκληπιού

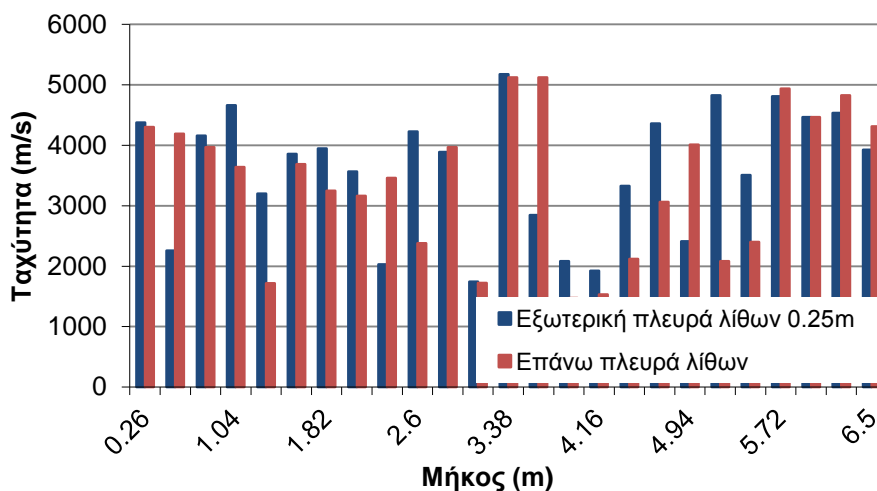
Με βάση τις συνολικές μετρήσεις, για όλες τις πλευρές των ιερών, παρατηρήθηκε ότι οι ανατολικές πλευρές παρουσίαζαν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ενδεχομένως, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανατολικά του Δίου βρίσκεται η θάλασσα, από την οποία έρχεται η θαλάσσια αύρα και κυρίως τις βραδινές ώρες μειώνει τη θερμοκρασία.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασιακή διαφορά του κάθε τοίχου. Παρατηρείται ότι κατά τις ηλιόλουστες συνθήκες, η διαφορά θερμοκρασίας του χαμηλότερου και του υψηλότερου σημείου είναι μεγάλη αφού η υγρασία διεισδύει μόνο μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης, ενώ κατά τις υγρές συνθήκες η διαφορά είναι μικρή, λόγω της απορρόφησης υγρασίας ολόκληρου του λίθου από το περιβάλλον.

Ταχύτητα υπερήχων

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ταχυτήτων των υπερήχων, οι τιμές τους δεν εξαρτώνται από την απόσταση από το έδαφος και τον προσανατολισμό, όπως παρατηρήθηκε με τις θερμομετρήσεις. Μεγάλες διαφορές και διακυμάνσεις της ταχύτητας υπερήχων παρατηρήθηκαν κατά μήκος των τοίχων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φύση των υλικών των τοίχων. Τα υλικά του τοίχου του ιερού του Ασκληπιού είναι κροκαλοπαγές και ασβεστόλιθος, τα οποία είναι σχετικά πορώδη υλικά με ανώμαλη και μη σταθερή δομή. Η παρατήρηση αυτή, επιβεβαιώθηκε από τις μετρήσεις της ταχύτητας υπερήχων στη βάση του αγάλματος της Βερενίκης, που βρίσκεται στο χώρο του ιερού της Δήμητρας. Η βάση, που είναι φτιαγμένη από μάρμαρο είχε σταθερές τιμές ταχύτητας υπερήχων, λόγω της σταθερής δομής του μαρμάρου.

Ναός Ασκληπιού-Νότια πλευρά



Σχήμα 9.2.2. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων νότιας πλευράς ναού Ασκληπιού

Επιπλέον, οι λίθοι των ιερών, έχουν υποστεί μεγάλη διάβρωση με το πέρασμα των χρόνων, με αποτέλεσμα να έχει σχηματιστεί γύψος και πολλές ρωγμές στη δομή τους, γεγονός που οδηγεί σε διακυμάνσεις των τιμών της ταχύτητας υπερήχων ακόμη και στον ίδιο λίθο.

Βρύα και λειχήνες

Παρατηρήθηκε έντονη παρουσία βρύων και λειχήνων στα δύο ιερά. Τα βρύα εμφανίζουν μεγαλύτερη συχνότητα, με τα περισσότερα από αυτά που εντοπίστηκαν να αναπτύσσονται σε έντονες συνθήκες υγρασίας. Η παρουσία τους οφείλεται στην έντονη παρουσία του υγρού στοιχείου στο περιβάλλον του Δίου, όπως τα δύο ρυάκια ανάμεσα στα ιερά, ο ποταμός Βαφύρας οι συχνές βροχοπτώσεις αλλά και τα υπόγεια ύδατα.



Εικόνα 9.2.1. Βρύοφυτο στην περιοχή της ανασκαφής

Η ανάπτυξη ορισμένων βρύοφυτων, προς το εσωτερικό του λίθου, μέσω των ρωγμών, οδηγεί σε φθορά του υλικού. Η διείσδυση των λειχήνων στο υπόστρωμα και η ταχεία απορρόφηση και εκρόφηση νερού από αυτούς προκαλούν μηχανική καταπόνηση, με συνέπεια τη μείωση της

συνοχής του υλικού. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται αλλαγή στο χρώμα του λίθου, λόγω προσρόφησης των χρωστικών των λειχήνων.

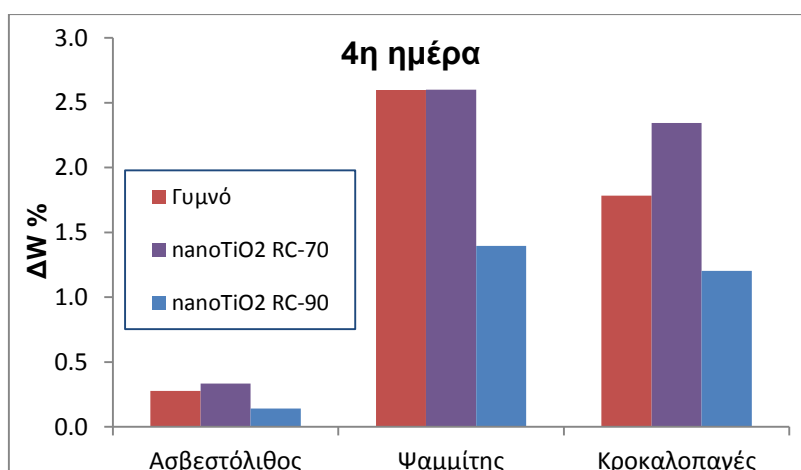
Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Με βάση τις ψηφιακά επεξεργασμένες φωτογραφίες, που φαίνονται στο κεφάλαιο 8.2.4, με την εφαρμογή του τελεστή Sobel, προκύπτει ότι οι επιφάνειες των λίθων καλύπτονται εν μέρει από προϊόντα διάβρωσης. Με βάση τις αναλύσεις που προηγήθηκαν, τα περισσότερα είναι προϊόντα διάβρωσης των πρωτογενών ορυκτών (ασβεστίτης-δολομίτης), όπως δευτερογενή ανθρακικά άλατα, ανακρυσταλλωμένοι ασβεστίτες ή δολομίτες και σε ορισμένες περιπτώσεις γύψος. Παρατηρείται, ότι ο κάθε λίθος εμφανίζει διαφορετική ταξινόμηση και ποσότητα διαβρωτικών προϊόντων, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό είδος λίθων και τη διαφορετική έκθεση του στο περιβάλλον (προσήλια ή σκιερή τοποθεσία, παρουσία νερού).

9.3. Μετρήσεις επιστρωμένων δειγμάτων

Τριχοειδής υδατοαπορρόφηση

Με βάση τις μετρήσεις τριχοειδούς υδατοαπορρόφησης προκύπτει, ότι από την πρώτη ημέρα, έως την τέταρτη ημέρα, το επίστρωμα Rhodorsil RC-90 διατήρησε την αυξημένη προστασία του και στα τρία είδη δειγμάτων. Παρόμοια λειτούργησε και το σύνθετο του με νανο- TiO_2 , με ελαφρώς χαμηλότερες τιμές. Αντιθέτως, τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 ενώ πρόσφεραν κάποια προστασία, έστω και χαμηλή αρχικά, με το πέρασμα των ημερών, παρουσίασαν αρνητική προστασία, δηλαδή απορρόφησαν περισσότερο νερό από τα μη επιστρωμένα δείγματα.



Σχήμα 9.3.1. Τριχοειδής απορρόφηση νερού σε λίθους την τέταρτη ημέρα

Ο ασβεστόλιθος απορροφά τη μικρότερη ποσότητα πολυμερούς, σε σχέση με τα άλλα δύο υποστρώματα. Δεν εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις στο βαθμό προστασίας, στην τριχοειδή απορρόφηση σε σχέση με την απορροφημένη ποσότητα πολυμερούς. Τις μεγαλύτερες διαφορές στη σχέση απορρόφησης πολυμερούς και βαθμού προστασίας τις παρουσιάζει το κροκαλοπαγές. Παρατηρείται αύξηση του βαθμού προστασίας με αύξηση της απορροφημένης ποσότητας

πολυμερούς. Ο ψαμμίτης ωστόσο, χαρακτηρίζεται από αυξημένες τιμές απορρόφησης πολυμερούς, γεγονός που ίσως οφείλεται στο αυξημένο πορώδες του.

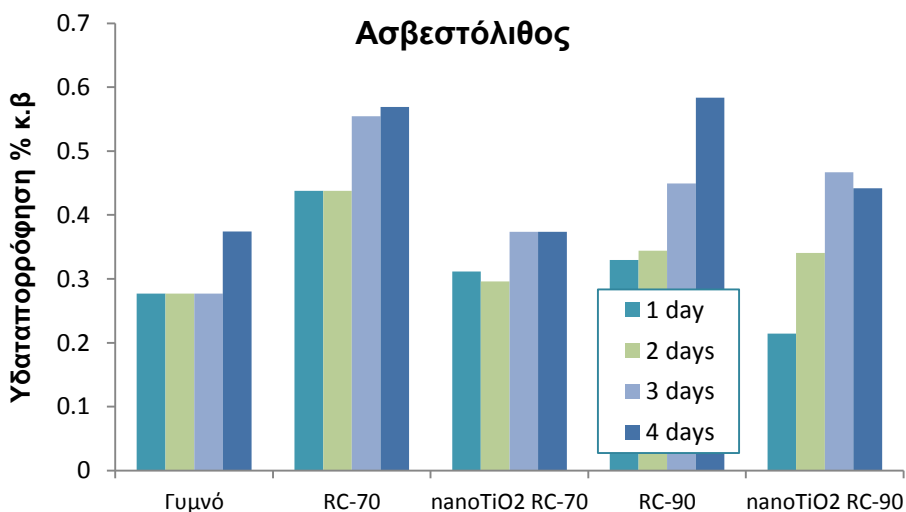
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα επιστρώματα Rhodorsil RC-90 προσέφεραν καλύτερη προστασία και απορροφήθηκαν σε μεγαλύτερες ποσότητες από τα Rhodorsil RC-70. Ενδεχομένως, αυτό οφείλεται στην παρουσία μεθυλ-φαινυλικς ρητίνης στη σύσταση του Rhodorsil RC-90. Λόγω των ρητινών, που υπάρχουν μέσα στο διάλυμα, αποφεύγεται ο άμεσος σχηματισμός μεγάλων πυριτικών αλυσίδων, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται περισσότερη απορρόφηση πολυμερούς στο εσωτερικό του λίθου, το οποίο στη συνέχεια πολυμερίζεται. Συνεπώς, υπάρχει περισσότερο υλικό, που προστατεύει το υπόστρωμα από την τριχοειδή απορρόφηση.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η προστατευτική ικανότητα των επιστρωμάτων εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος, όπως το πορώδες, η χημική του σύσταση και η επιφανειακή τραχύτητα. Επομένως για κάθε υπόστρωμα το ιδανικό πολυμερές είναι διαφορετικό.

Διαπερατότητα των λίθων από υδρατμούς

Ο ψαμμίτης σε όλες τις περιπτώσεις, παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε υδρατμούς από τον ασβεστόλιθο. Παράλληλα, τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στον ψαμμίτη. Τα Rhodorsil RC-90 επιτρέπουν λιγότερη ροή υδρατμών. Αντιθέτως, στον ασβεστόλιθο, τα Rhodorsil RC-90 επιστρώματα αφήνουν το λίθο να αναπνεύσει καλύτερα, σε σχέση με τα Rhodorsil RC-70. Και στις μετρήσεις διαπερατότητας προκύπτει, ότι κάθε υπόστρωμα λειτουργεί διαφορετικά με κάθε επίστρωμα.

Πλήρης βύθιση



Σχήμα 9.3.2. Υδαταπορρόφηση (%) κατά την πλήρη βύθιση των δειγμάτων ασβεστόλιθου σε νερό

Μεγαλύτερη υδαταπορρόφηση παρουσιάζουν ο ψαμμίτης και το κροκαλοπαγές σε όλες τις περιπτώσεις επιστρωμάτων, λόγω της αυξημένης τάσης τους να απορροφούν νερό (βλ. 8.1.3). Ο ασβεστόλιθος φαίνεται να προστατεύεται καλύτερα από τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70 και Rhodorsil RC-90 με πρόσθετη νανο-TiO₂. Ωστόσο, οι διαφορές είναι μικρές. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της προστασίας στην τριχοειδή υδατοαπορρόφηση, όπου τα επιστρώματα Rhodorsil RC-70, παρουσίαζαν μικρή έως καθόλου προστασία για τον ασβεστόλιθο. Ο ψαμμίτης προστατεύεται καλύτερα από τα Rhodorsil RC-90 επιστρώματα, όπως και το κροκαλοπαγές. Τα επιστρώματα, αυτά παρουσίασαν καλύτερη προστασία και στην περίπτωση της τριχοειδούς απορρόφησης.

9.4. Μετρήσεις υδάτων

Ιοντική χρωματογραφία

Τα δείγματα των βρόχινων υδάτων παρουσίασαν ουδέτερο pH με εύρος 6,5-7,5. Οι τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 4,1 και 16 mg/L. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με το εύρος συγκεντρώσεων των βρόχινων υδάτων της περιοχής (2,5-30 mg/L). Εξαιρέση αποτελούν οι μήνες Μάιος και Ιούνιος, που παρουσίασαν πολύ μεγάλη συγκέντρωση θειϊκών ανιόντων. Οι αυξημένες τιμές, ίσως οφείλονται στη μεταφορά θειϊκών ιόντων με τη θαλάσσια αύρα, φαινόμενο που εντείνεται το καλοκαίρι. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ήταν αυξημένες, κυρίως τον Απρίλιο και το Μάιο, αλλά τους περισσότερους μήνες η τιμή δεν ξεπέρασε τα 4,4 mg/L. Καταλήγοντας, τα χλωριούχα παρουσίασαν αυξημένες συγκεντρώσεις (2,4-39 mg/L), με υψηλότερες τιμές, επίσης τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή μεταφορά ιόντων με τη θαλάσσια αύρα.

Σε όλα τα επιφανειακά ύδατα, οι συγκεντρώσεις των ιόντων ακολουθούσαν την ίδια αύξουσα σειρά νιτρικά > θειϊκά > χλωριούχα. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν στον ποταμό Βαφύρα. Σε όλα τα δείγματα, οι τιμές των ιόντων κυμαίνονταν στο εύρος των τιμών των επιφανειακών υδάτων της Μακεδονίας.

9.5. Δείγματα εδάφους

Κοκκομετρική ανάλυση

Το δείγμα από το ιερό του Ασκληπιού παρουσιάζει καμπύλη ομαλής κλίσης, γεγονός που δείχνει ευρεία σειρά μεγέθους κόκκων και το έδαφος χαρακτηρίζεται ως καλά διαβαθμισμένο. Το δείγμα του ιερού της Δήμητρας παρουσιάζει τμήματα διαφορετικής καμπυλότητας, οπότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μείγμα ομοιόμορφων υλικών. Και στις δύο περιπτώσεις, τα δείγματα αποτελούνται από άμμο και χαλίκια.

Με βάση την κοκκομετρική ανάλυση προκύπτει ότι τα εδάφη στην περιοχή της ανασκαφής, μπορούν να συγκρατήσουν ποσότητες υγρασίας και με τον τρόπο αυτό να οδηγήσουν σε συνεχή τριχοειδή αναρρίχηση του νερού από τους λίθους.

10. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα της μελέτης

Τα κύρια δομικά υλικά των κατασκευών στα ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού του αρχαιολογικού χώρου στο Δίον είναι: ασβεστόλιθος, πωρόλιθος, κροκαλοπαγές, μάρμαρο, ψαμμίτης, κεραμική πλίνθος. Η προέλευση αυτών των πρώτων υλών, εκτός από το μάρμαρο και τις πλίνθους, είναι από τοπικές πηγές, κυρίως από την ευρύτερη περιοχή του Δίου στις πλαγιές του Ολύμπου. Ο ασβεστόλιθος και ο πωρόλιθος αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη ή δολομίτη. Το κροκαλοπαγές αποτελείται από ασβεστόλιθο, ο οποίος αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη. Το μάρμαρο αποτελείται από λευκό χονδρόκοκκο δολομίτη ή χονδρόκοκκο ασβεστίτη. Ο ψαμμίτης αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και δολομίτη. Οι κεραμικές πλίνθοι αποτελούνται από γωνιώδεις κόκκους διαφόρων ορυκτών, διεσπαρμένους στη μάζα της αργίλου.

Τα υλικά παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και φθοράς που προκαλούνται κυρίως από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον, το νερό της βροχής και την παρουσία σε αυτό διαφόρων ειδών ρύπων, την τριχοειδή διείσδυση του νερού στο μεγαλύτερο μέρος των υλικών, λόγω της επιφανειακής και υπόγειας παρουσίας υδάτων, τη βλάστηση, τις μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών δείχνουν ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις τιμές του ανοικτού πορώδους και στην τριχοειδή αναρρίχηση μεταξύ των διαφόρων δομικών υλικών. Έχει αποδειχτεί ότι μία σημαντική ποσότητα νερού μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης παραμένει στο υλικό μετά την εκρόφιση στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες του αρχαιολογικού χώρου, παρατηρείται μόνιμη παρουσία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε όλες τις περιόδους του έτους και υψηλές τιμές θερμοκρασίας στις ξηρές περιόδους του καλοκαιριού, οδηγώντας σε επαναλαμβανόμενους κύκλους υγρασίας-ξηρασίας για τα υλικά. Από αυτά τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις, σε συσχετισμό με τα κύρια προϊόντα διάβρωσης που παρατηρήθηκαν, δευτερογενής και ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης και δολομίτης, προκύπτει ότι το κύριο πρόβλημα φθοράς των υλικών είναι η παρουσία υγρασίας, που οφείλεται στην τριχοειδή δράση. Οι κύκλοι υγρασίας-ξηρασίας οδηγούν σε μερική διάλυση - ανακρυστάλλωση του ανθρακικού υλικού και στην απώλεια δομικής συνοχής και σταθερότητας του λίθου.

Οι καταγεγραμμένες τιμές στην ταχύτητα των υπερήχων αποδεικνύουν την έντονα αποσπασμένη κατάσταση των υλικών, καθώς και την πιθανή ύπαρξη ρωγμών στο εσωτερικό των λίθων.

Η παρουσία υγρασίας (χαμηλότερες θερμοκρασίες) που προκύπτει ως αποτέλεσμα της τριχοειδούς κίνησης του νερού προκαλεί την υποβάθμιση του δομικού υλικού. Σε τέτοιες περιπτώσεις μεταβάλλονται οι οπτικές ιδιότητες, η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα καθώς η ενέργεια, που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας μιας

υγρής περιοχής θα είναι πολύ μεγαλύτερη από μια περιοχή που δεν επηρεάζεται από το νερό. Σε όλες τις περιπτώσεις των επιτόπου μετρήσεων με θερμομέτρο, οι θερμοκρασίες που καταγράφονται στις πλευρικές επιφάνειες των τοιχωμάτων αυξάνονται σύμφωνα με την απόσταση από το έδαφος. Οι διαφορές θερμοκρασίας εξαρτώνται κυρίως από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιόλουστες ή υγρές), από το είδος του υλικού και τον προσανατολισμό του τοίχου. Σε ηλιόλουστες συνθήκες η υγρασία διεισδύει στα υλικά μόνο με τριχοειδή αναρρίχηση, ενώ σε υγρές συνθήκες το νερό της βροχής και η περιβαλλοντική υγρασία συμβάλλουν επίσης, στη συνολική απορρόφηση υγρασίας.

Η συνεχής παρουσία και ανάπτυξη των διαφόρων λειχήνων και βρυόφυτων στην επιφάνεια των υλικών είναι επίσης, αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών συνθηκών. Εξειδικευμένα είδη όπως: *Lunularia cruciata*, *Rhynchostegium megapolitanum*, *Kindbergia praelonga*, *Scorpiurum circinatum* απαιτούν υψηλή υγρασία για την ανάπτυξή τους, ενώ τα *Forum*, *Syntrichia*, *Grimmia* απαιτούν ξηρές συνθήκες, που αναπτύσσονται σε ηλιόλουστες επιφάνειες. Η εσωτερική ανάπτυξη των ριζών των βρυόφυτων μέσα στις ρωγμές οδηγεί σε φυσική βλάβη της τοιχοποιίας, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποδόμηση. Η διείσδυση των λειχήνων στο υπόστρωμα και η ταχεία απορρόφηση και εκρόφιση του νερού προκαλούν μηχανική καταπόνηση, με συνέπεια τη μείωση της συνοχής του υλικού. Αυτές οι διεργασίες αναμφίβολα οδηγούν σε μηχανική βλάβη της λιθοδομής. Σε συνδυασμό με την χημική ανάλυση των υποστρωμάτων και τα προϊόντα μεταβολισμού του λειχήνα είναι σαφές ότι όλη αυτή η βιογεωφυσική διαδικασία έχει μεγάλη σημασία. Η χρωματική αλλοίωση του υλικού επιτυγχάνεται μέσω της προσρόφησης των χρωστικών, που περιέχονται στους λειχήνες.

Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης της βροχής και των επιφανειακών υδάτων είναι προφανές ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα ιόντα, όπως τα χλωριούχα, τα νιτρικά ή τα θειικά άλατα (εκτός από τα δείγματα βρόχινου νερού δύο μηνών). Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με την προαναφερθείσα απουσία κρυσταλλικών αλάτων στην επιφάνεια ή εντός των πόρων των υλικών (παρατηρήθηκε μόνο γύψος σε περιορισμένο βαθμό).

Συμπερασματικά, η ευρύτερη περιοχή του Δίου χαρακτηρίζεται από έντονες συνθήκες υγρασίας, οι οποίες αποτελούν σημαντικό παράγοντα διάβρωσης και αλλοίωσης των λίθων. Τα υλικά είναι ήδη καταπονημένα με έντονη ανάπτυξη βρύων και λειχήνων στις επιφάνειες τους, γεγονός που συντηρεί την επίδραση νερού στους λίθους. Η ποικιλία ειδών στους λίθους στα διάφορα σημεία του αρχαιολογικού χώρου, οδηγεί στην ανάγκη για προσεκτική επιλογή του τρόπου συντήρησης και προστασίας. Κάθε υλικό λειτουργεί διαφορετικά απέναντι στις περιβαλλοντικές συνθήκες, οπότε απαιτεί και διαφορετική μεταχείριση.

Τα πολυμερικά επιστρώματα, που χρησιμοποιήθηκαν δείχνουν τις διαφορετικές αποκρίσεις σε κάθε υλικό. Σημαντικό είναι τα προστατευτικά υλικά να ακολουθούν τους κανόνες συντήρησης των αρχαιολογικών μνημείων και να μην τα αλλοιώνουν.

11. Παράρτημα

Τα αποτελέσματα της διατριβής ανακοινώθηκαν σε διεθνή συνέδρια και δημοσιεύτηκαν σε επιστημονικά περιοδικά:

- E. Papanikolaou, P. Spathis, B. Christaras, B. Melfos, S. Pingiatoglou: **Preliminary Observations on the Building Materials and the Deterioration Problems of the Monuments of Demeter and Asklepios Sanctuaries in the Archaeological Site of Dion.** 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Patras, Greece, 31 May-2 June 2010.
- Papanikolaou E., Spathis P., Melfos V., Christaras B., Pavlidou E.: **“Characterization and Properties of the Building Materials for the Determination of Weathering of Sanctuaries in the Archaeological Site of Dion, Greece”**, Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, SWBSS 2011, Limassol, Cyprus, 19-22 October 2011.
- Papanikolaou E., Spathis P., Christaras B., Melfos V., Katsiotis N.: **“Application of Infrared Thermometry and Ultrasonic Velocity for the Investigation of the Building Materials of Historic Monuments of Dion, Greece”**, SPIE Smart Structures/NDE Symposium, San Diego, California, USA, 11-15 March, 2012, "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration V" Conference (SSN08), "Cultural Heritage and Non Destructive Testing" Session.
- Papanikolaou E., Spathis P., Samara C., Melfos V., Christaras B., Sawidis T., **Effect of environmental factors to the deterioration of stones monuments in the Archaeological Site of Dion.** “Protection and Restoration of the Environment XI” conference. Thessaloniki, Greece, 3-6 July 2012.
- P. Spathis, G. Stamkopoulos, E. Papanikolaou, V. Melfos, B. Christaras : **Surface decay study by Digital Image Processing of the building materials of the monuments of the Archaeological Site of Dion, Greece**, 9th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, 3-5 June 2014, Ankara, Turkey.
- Spathis P. Papanikolaou E., Melfos V., Samara C., Christaras B., Katsiotis N.: **Characterization and Weathering of the Building Materials of Sanctuaries in the Archaeological Site of Dion, Greece**, Trends Journal of Sciences Research (2015) 2(3):95-103.

12. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Ascaso, C., J. Wierzchos, "Structural Aspects of the Lichen-Rock Interface Using Back-scattered Electron Imaging." *Botanica Acta* 107(4): 251-256, (1994)

Avdelidis, N. P., A. Moropoulou, P. Theoulakis, "Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging." *Infrared Physics & Technology* 44(3): 183-190, (2003)

Bieniawski, Z. T., "The point-load test in geotechnical practice." *Engineering Geology* 9(1): 1-11, (1975)

Bracegirdle, B., *Scientific PhotoMACROgraphy*, RMS Handbook, Oxford, (1995)

Broch, E., J. A. Franklin, "The point-load strength test." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 9(6): 669-676, (1972)

Brown, G. E., "How Minerals React with Water." *Science* 294(5540): 67-69, (2001)

Brundle, C. R., C. A. Evans, S. Wilson, *Encyclopedia of Materials Characterization: Surfaces, Interfaces, Thin Films*, Butterworth-Heinemann, (1992)

Camuffo, D., *Deterioration Processes of Historical Monuments*, Studies in Environmental Science, T. Schneider, Elsevier, Volume 30: 189-221, (1986)

Carlton, R., *Polarized Light Microscopy, Pharmaceutical Microscopy*, Springer New York: 7-64, (2011)

Chiaverini, J. (2004), Metakaolin – lime mortar: a replica of Genoese ‘porcellana’ as a mortar for restoration, Proceedings of the 2nd Swiss Geoscience Meeting, Lausanne.

Clinton, K. (1994), The Epidauria and the Arrival of Asclepius in Athens, Ancient Greek Cult Practice from the Epigraphical Evidence, Second International Seminar on Ancient Greek Cult Stockholm

Cole, S., "The uses of water in Greek sanctuaries, Early Greek Practice." (1988)

Craig, H., V. Craig, "Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis." *Science* 176(4033): 401-403, (1972)

Craig, H., V. Craig, "Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis." *Science* 176(4033): 401-403, (1972)

D'Andrea, D. V., D. E. Fogelson, R. L. Fischer, Prediction of compressive strength from other rock properties, [Washington, D.C.], U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, (1965)

Delly, J. G., 2.1 - Light Microscopy, *Encyclopedia of Materials Characterization*, C.R. Brundle, C.A. Evans, S. Wilson, Boston, Butterworth-Heinemann: 60-69, (1992)

DOUTSOS, TH. & FERENTINOS, G., (1984). Post-Apline crustal deformation of North Aegean Region (Greece). *Geol. Balcanica*, 14 (6): 37-46.

- Evonik-Industries (2012). "Products, AEROXIDE® TiO₂ P 25." Safety data sheets. from <https://www.aerosil.com/product/aerosil/en/pages/default.aspx>.
- Fritz, J. S., D. T. Gjerde, Ion Chromatography, Wiley, (2009)
- Germann, K., G. Holzmann, F. J. Winkler, "DETERMINATION OF MARBLE PROVENANCE: LIMITS OF ISOTOPIC ANALYSIS." *Archaeometry* 22(1): 99-106, (1980)
- Germann, K., G. Holzmann, F. J. Winkler, "DETERMINATION OF MARBLE PROVENANCE: LIMITS OF ISOTOPIC ANALYSIS." *Archaeometry* 22(1): 99-106, (1980)
- Giesche, H., "Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview." *Particle & Particle Systems Characterization* 23(1): 9-19, (2006)
- Godfriaux, I., 1968, Étude géologique de la région de l'Olympe (Grèce), *Ann. Géol. Pays Helléniques*, Lille
- Gonzalez, R., R. Woods, S. Eddins, Digital Image Processing using Matlab, Gatesmark Publishing, (2009)
- Goudie, A. S., H. A. Viles, Salt Weathering Hazards, Wiley, (1997)
- Gourdin, W. H., W. D. Kingery, "The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster." *Journal of Field Archaeology* 2(1-2): 133-150, (1975)
- Hall, C., W. D. Hoff, Water Transport in Brick, Stone and Concrete, Taylor & Francis, (2002)
- Herz, N., "CARBON AND OXYGEN ISOTOPIC RATIOS: A DATA BASE FOR CLASSICAL GREEK AND ROMAN MARBLE." *Archaeometry* 29(1): 35-43, (1987)
- Herz, N., "CARBON AND OXYGEN ISOTOPIC RATIOS: A DATA BASE FOR CLASSICAL GREEK AND ROMAN MARBLE." *Archaeometry* 29(1): 35-43, (1987)
- Heuzey, L., Mission archéologique de Macédoine, Firmin-Didot, (1876)
- In situ, M. a. A. S. (Copyright 2003). "RHODORSIL RC 90 RHODORSIL RC 70." from <http://www.insituconservation.com/>
- ISRM, "Suggested Method for Determining Point Load Strength." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr* Vol. 22: pp. 51-60, (1985)
- Lawton, C. (1999), Votive reliefs and popular religion in the Athenian Agora: the case of Asklepios and Hygieia, XVth International Congress of Classical Archaeology, Amsterdam
- Levkine, G., "Prewitt, Sobel and Scharr gradient 5x5 convolution matrices." *Image Processing Articles* Second draft, (June 2012)
- Manfra, L., U. Masi, B. Turi, "CARBON AND OXYGEN ISOTOPE RATIOS OF MARBLES FROM SOME ANCIENT QUARRIES OF WESTERN ANATOLIA AND THEIR ARCHAEOLOGICAL SIGNIFICANCE." *Archaeometry* 17(2): 215-219, (1975)

- Manfra, L., U. Masi, B. Turi, "CARBON AND OXYGEN ISOTOPE RATIOS OF MARBLES FROM SOME ANCIENT QUARRIES OF WESTERN ANATOLIA AND THEIR ARCHAEOLOGICAL SIGNIFICANCE." *Archaeometry* 17(2): 215-219, (1975)
- Manger, G. E., Porosity and bulk density of sedimentary rocks, *Bulletin*, (1963)
- MATERIALS CHARACTERIZATION SERIES, *Encyclopedia of Materials Characterization*, C.R. Brundle, C.A. Evans, S. Wilson, Boston, Butterworth-Heinemann: ii, (1992)
- Melfos, V., "Mineralogical and stable isotopic study of ancient white marble quarries in Larissa, Thessaly, Greece." *Bull Geol Soc Greece*: 1164-1172, (2004)
- Melfos, V., "Mineralogical and stable isotopic study of ancient white marble quarries in Larissa, Thessaly, Greece." *Bull Geol Soc Greece*: 1164-1172, (2004)
- Melfos, V., P. Voudouris, L. Papadopoulou, S. Sdrolia, B. Helly, " Mineralogical, petrographic and stable isotopic study of ancient white marble quarries in Thessaly, Greece - II. Chasanbali, Tempi, Atrax, Tisaion mountain." *Bull Geol Soc Greece* (XLIII/2): 845-855, (2010)
- Meurant, G., *Ion Chromatography*, Elsevier Science, (1990)
- Moballeggh, A., H. R. Shahverdi, R. Aghababazadeh, A. R. Mirhabibi, "ZnO nanoparticles obtained by mechanochemical technique and the optical properties." *Surface Science* 601(13): 2850-2854, (2007)
- Moropoulou, A., M. Kouli, C. Kourteli, D. Papasotiriou, P. Theoulakis, T. Tsiourva, N. Achilleopoulos, C. Karakantas, A. Romanos, K. Tokatlidou, T. Koliadis, N. Zarifis, R. Van Grieken, F. Delalieux, B. Silva, E. Molina, M. A. Vicente, S. Vicente, F. Macri, F. Zezza (1997), *Techniques and methodology for the preservation and environmental management of historic complexes - The case of the Medieval City of Rhodes*, 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes, Technical Chamber of Greece.
- Moropoulou, A., K. Bisbikou, K. Torfs, R. Van Grieken, F. Zezza, F. Macri, "Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere." *Atmospheric Environment* 32(6): 967-982, (1998)
- Moropoulou, A., A. Bakolas, S. Anagnostopoulou, "Composite materials in ancient structures." *Cement and Concrete Composites* 27(2): 295-300, (2005)
- Moropoulou, A., A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, "Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries." *Cement and Concrete Composites* 27(2): 289-294, (2005)
- Moropoulou, A., P. Maravelaki – Kalaitzaki, M. B. Borboudakis, A. , P. Michailidis, M. Chronopoulos, *Historic mortars technologies in Crete and guidelines for compatible restoration mortars, Compatible materials for the protection of European cultural heritage*, Athens, Technical Chamber of Greece, vol. 55, : pp. 55-72, (1997)
- Muthmann, F., *Mutter und Quelle - Studien zur Quellverehrung im Altertum und im Mittelalter*, Zabern, Mainz, (1975)

- Ohtani, B., O. O. Prieto-Mahaney, D. Li, R. Abe, "What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 216(2–3): 179-182, (2010)
- Patzelt, W. J., E. Leitz, *Polarized Light Microscopy: Principles, Instruments, Applications*, Ernst Leitz Wetzlar, (1985)
- Peruzzi, R., T. Poli, L. Toniolo, "The experimental test for the evaluation of protective treatments: a critical survey of the "capillary absorption index"." *Journal of Cultural Heritage* 4(3): 251-254, (2003)
- Pluta, M., "R.M.S. Microscopy Handbook No. 15: R.M.S. Dictionary of Light Microscopy. By S. Bradbury, P. J. Evennett, H. Haselmann and H. Piller." *Journal of Microscopy* 157(2): 255-256, (1990)
- Poli, T., L. Toniolo, O. Chiantore, "The protection of different Italian marbles with two partially flourinated acrylic copolymers." *Applied Physics A* 79(2): 347-351, (2004)
- Poli, T., L. Toniolo, O. Chiantore, "The protection of different Italian marbles with two partially flourinated acrylic copolymers." *Applied Physics A* 79(2): 347-351, (2004)
- Powers, T. C., "BASIC CONSIDERATIONS PERTAINING TO FREEZING- AND-THAWING TESTS." *ASTM Proceedings*, (1955)
- Price, C. A., E. Doehne, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Getty Conservation Institute, (2011)
- Price, C. A., E. Doehne, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Getty Conservation Institute, (2011)
- Price, C. A., G. C. Institute, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Getty Conservation Institute, (1996)
- Rossi-Doria, P. R., "Mortars for restoration: Basic requirements and quality control." *Materials and Structures* 19(6): 445-448, (1986)
- Revie, R. W., *Uhlig's Corrosion Handbook*, Wiley, (2011)
- Saiz-Jimenez, C., *Air Pollution and Cultural Heritage*, Taylor & Francis, (2004)
- Savvidis, T., E. Freskou, V. Papakosta (2006), The lichen flora of archaeological monuments in Greece., IV Balkan Botanical Congress. "Plant, fungal and habitats diversity investigation and conservation", Bulgaria.
- Scheerer, S., O. Ortega-Morales, C. Gaylarde, "Microbial deterioration of stone monuments--an updated overview." *Adv Appl Microbiol* 66: 97-139, (2009)
- Seinfeld, J. H., *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*, Wiley, (1986)
- Sharifi, M., M. Fathy, M. Tayefeh Mahmoudi (2002), A classified and comparative study of edge detection algorithms, *Information Technology: Coding and Computing*, 2002. Proceedings. International Conference on.

Siegesmund, S.,R. Snethlage, Stone in Architecture: Properties, Durability, Springer Berlin Heidelberg, (2014)

Skoog, D. A.,J. J. Leary, Principles of instrumental analysis, Saunders College Pub., (1992)

Teutonico, J. M., A laboratory manual for architectural conservators ICCROM, Italy (1988)

Tranos, M.D., Mountrakis, D. M., 1998. Neotectonic joints of Northern Greece: their significance on the understanding of the active deformation. Bull. Geol. Soc. Greece 32, 1, 209-219.

Tsakalof, A., P. Manoudis, I. Karapanagiotis, I. Chryssoulakis,C. Panayiotou, "Assessment of synthetic polymeric coatings for the protection and preservation of stone monuments." Journal of Cultural Heritage 8(1): 69-72, (2007)

Tsakalof, A., P. Manoudis, I. Karapanagiotis, I. Chryssoulakis,C. Panayiotou, "Assessment of synthetic polymeric coatings for the protection and preservation of stone monuments." Journal of Cultural Heritage 8(1): 69-72, (2007)

Webster, A.,E. May, "Bioremediation of weathered-building stone surfaces." Trends in Biotechnology 24(6): 255-260, (2006)

Wendehorst, R., Δομικά Υλικά, Εκδόσεις Γκιούρδας, (1981)

Wheeler, G.,G. C. Institute, Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone, Getty Publications, (2005)

Winkler, E. M., "Frost damage to stone and concrete: geological considerations." Engineering Geology 2(5): 315-323, (1968)

Winkler, E. M., Stone: properties, durability in man's environment, Springer-Verlag, (1973)

Winkler, E. M., Stone in Architecture: Properties, Durability ; with 63 Tables, Springer-Verlag, (1994)

Ελληνόγλωσση

Αγόρος, Β., Δοκιμές κάμψεως τριών σημείων σε νέα μη εμπορική μηχανή με σύστημα καταγραφής των ανηγμένων παραμορφώσεων, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Κρήτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012

Αραβαντινός, Α., Στερεοσκοπική φωτογραφία, Αρχή λειτουργίας, Στερεοσκοπικές διατάξεις, Δημιουργία ζεύγους στερεοσκοπικών φωτογραφιών Τμήμα Φωτογραφίας και Οπτικοακουστικών Τεχνών, Σχολή Καλλιτεχνικών Σπουδών, Τ.Ε.Ι. Αθηνών,(2014)

Βουτυράς, Ε., Η λατρεία του Ασκληπιού στην αρχαία Μακεδονία, στο αρχαία; Μακεδονίας Ίδρυμα Μελετών Χερσονήσου του Αίμου, Θεσσαλονίκη:, (1993) σελ;

Γιαννοπούλου, Χ., Διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων των ψαμμιτών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών,(2011)

Γραμματικόπουλος, Γ., Ν. Μάνου – Ανδρεάδου,Θ. Χατζηγώγος, Εδαφομηχανική – ασκήσεις και προβλήματα, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, (1998)

- Γραμματικόπουλος, Γ., Ν. Μάνου – Ανδρεάδου,Θ. Χατζηγώγος, Εδαφομηχανική – ασκήσεις και προβλήματα, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, (1998)
- Ζερβός, Σ., Κριτήρια και μεθοδολογία αποτίμησης καταλληλότητας επεμβάσεων συντήρησης χαρτιού, Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ),(2004)
- Θεοδωρίδης, Χ. Δ., Συμβατά υλικά και μέθοδοι συντήρησης και αποκατάστασης ιστορικών κτιρίων, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, Τ.Ε.Ε., Ε.Τ.Ε.Κ.,(2006)
- Ι.Γ.Μ.Ε., (1985). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000, φύλλο Κονταριώτισσα- Λιτόχωρο υπό Λατσούδα,.
- Καμάρης, Α., Προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και φέρουσας ικανότητας των εδαφών μέσω απλών εμπειρικών συσχετίσεων, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Θεσσαλονίκη, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης,(2007)
- Καραδέδος, Γ., Το ελληνιστικό θέατρο του Δίου, Θεσσαλονίκη, (1986)
- Κατσιώτη, Μ., Π. Πιπλικιάκη,Μ. Φαρδής, Μελέτη της επίδρασης της προσθήκης διαφορετικών ποσοστών ασβεστόλιθου σε πάστες σύνθετων τσιμέντων στη διαμόρφωση του πορώδους τους, Πανελλήνιο συνέδριο δομικών υλικών και στοιχείων Αθήνα, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος,(2008)
- Κορωναίος Γ. Αμύλιος,Π. Γ. Ι., Τεχνικά υλικά, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, τόμος 4, (2006)
- Κουή, Μ.,Θ. Λυμπεροπούλου, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ, Σημειώσεις, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Κούκης, Γ.,Ν. Σαμπατακάκης, Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Α. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ & ΣΙΑ ΟΕ, Αθήνα, (2002)
- Κούκης, Γ.,Ν. Σαμπατακάκης, Τεχνική Γεωλογία, Αθήνα, Εκδόσεις Α. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ & ΣΙΑ ΟΕ, (2002)
- Λαμπρινουδάκης, Β.,Σ. Κατάκης, Επίδαυρος, Η πόλις και το ιερό του Ασκληπιού, Αρχαιολογία Πελοπόννησος, Α. Βλαχόπουλος, Αθήνα, (2012)
- Μανούδης, Π. Ν., Μελέτη και αξιολόγηση προστατευτικών επιστρώσεων για την επιφανειακή συντήρηση και προστασία μνημείων πολιτισμού, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Χημείας, Εργαστήριο Φυσικής Χημείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ),(2009)
- Μανούδης, Π. Ν., Μελέτη και αξιολόγηση προστατευτικών επιστρώσεων για την επιφανειακή συντήρηση και προστασία μνημείων πολιτισμού, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Χημείας, Εργαστήριο Φυσικής Χημείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ),(2009)
- Μεραχτσάκη, Δ., Μελέτη της προστασίας του μαρμάρου από τη διάβρωση με προηγμένα σύνθετα πολυμερικά επιστρώματα, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας, Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,(2013)

Μουντράκης, Δ., 2010: Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη

Μουρατίδου, Θ., Μελέτη των ιοντικών συστατικών των μρών αιωρούμενων σωματιδίων (PM 2.5) στο εσωτερικό του Αρχαιολογικού Μουσείου Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,(2000)

Παντερμαλής, Δ. (1977), Λατρείες και ιερά του Δίου Πιερίας, Δεύτερο Διεθνές Συμπόσιο Θεσσαλονίκη

Παντερμαλής, Δ., Περιοδικό Αρχαιολογία 33, (1986)

Παντερμαλής, Δ., Δίον: η ανακάλυψη, ΑΔΑΜ, Αθήνα, (1999)

Παπαγιάννη, Ι.Γ. Μπέη (2000), Κριτήρια αξιολόγησης πηλών και πηλοκονιαμάτων ως υλικών επέμβασης σε ιστορικά κτίρια, Πρακτικά 1ου Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες επεμβάσεις για την προστασία ιστορικών κατασκευών, Θεσ/νικη.

Παπαδόπουλος, Β.Κ. Λουπασάκης, Εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Παυλίδης, Σπ., *Γεωλογία των σεισμών*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη 2003

Πινγιάτογλου, Σ., Το ιερό της Δήμητρας στο Δίον, Ανασκαφή 1990, ΑΕΜΘ 4 (1990), Θεσσαλονίκη (1993)

Πινγιάτογλου, Σ., Δίον: Το Ιερό της Δήμητρος- Οι λύχνοι, Θεσσαλονίκη, (2005)

Πινγιάτογλου, Σ., Δίον 2004-2006. Ανασκαφικές έρευνες στο ιερό του Ασκληπιού και στην πόλη των ελληνιστικών χρόνων, ΑΕΜΘ 20 (2006), Θεσσαλονίκη, (2008)

Πινγιάτογλου, Σ., Δίον : Τα Ιερά της Δήμητρας και του Ασκληπιού : οι ανασκαφές των τελευταίων είκοσι χρόνων, Επετειακό ΑΕΜΘ 23, Θεσσαλονίκη, (2009)

Πινγιάτογλου, Σ., Δίον : Το Ιερό της Δήμητρος, Θεσσαλονίκη, (2015)

Σαββίδης, Θ., Λειχίνες & Βρύα, Τμήμα Βιολογίας Α.Π.Θ., Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Προστασία Συντήρηση και Αποκατάσταση Μνημείων, Σημειώσεις μαθήματος,(2013)

Σακελλαρίου, Μ.Σ. Κοζάνης, Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, (2003)

Σακελλαρίου, Μ.Σ. Κοζάνης, Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2003)

Σαμπατακάκης, Ν., Εδαφομηχανική, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

Σκουλικίδης, Θ., Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, (2000)

Σκουλικίδης, Θ., Διάβρωση και προστασία υλικών, Αθήνα, Συμεών, (2007)

- Σοφιανός, Α. Ι., Π. Π. Νομικός, Μηχανική Πετρωμάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, (2008)
- Σοφιανός, Α. Ι., Π. Π. Νομικός, Μηχανική Πετρωμάτων, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2008)
- Στεφανίδου-Τιβεριού, Η οχύρωση, Ανασκαφή Δίου 1, Θεσσαλονίκη, (1998)
- ΣΥΡΙΔΗΣ, Γ. (1990). Λιθοστρωματογραφική, βιοστρωματογραφική και παλαιογεωγραφική μελέτη των Νεογενών – Τεταρτογενών ιζηματογενών σχηματισμών της Χερσονήσου Χαλκιδικής. *Διδακτορική διατριβή* 1, 11, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 243p.
- Σωτηριάδης, Γ., Ανασκαφή Δίου Μακεδονίας, Πρακτικά Αρχαιολογικής Εταιρείας, Αθήνα, (1931)
- Χατζηδάκη, Μ., Τεκμηρίωση συντήρησης, Οδηγός Πολιτισμικής Τεκμηρίωσης και Διαλειτουργικότητας, Κέντρο Πολιτισμικής Πληροφορικής, Ινστιτούτο Πληροφορικής ΙΤΕ, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα "Κοινωνία της Πληροφορίας", (2005)
- Χατζηδάκη, Μ., Τεκμηρίωση συντήρησης, Οδηγός Πολιτισμικής Τεκμηρίωσης και Διαλειτουργικότητας, Κέντρο Πολιτισμικής Πληροφορικής, Ινστιτούτο Πληροφορικής ΙΤΕ, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα "Κοινωνία της Πληροφορίας", (2005)
- Χρηστάρας, Β., Φυσικοί Δομικοί Λίθοι, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2003)
- Χρηστάρας, Β., Φυσικοί Δομικοί Λίθοι, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2003)
- Χρηστάρας, Β., Συνοπτική περιγραφή των συνηθέστερων εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής-Εδαφομηχανικής, Θεσσαλονίκη, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, (2005)
- Χρηστάρας, Β., Συνοπτική περιγραφή των συνηθέστερων εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής-Εδαφομηχανικής, Θεσσαλονίκη, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, (2005)