

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΔΟΜΙΚΟΥΣ ΛΙΘΟΥΣ ΤΟΥ ΑΜΦΙΑΡΕΙΟΥ – ΩΡΩΠΟΥ

Τσίπουρα-Βλάχου Μ., Μιχόπουλος Κ.

*ΕΚΠΑ, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Ορυκτολογίας και Πετρολογίας,  
Πανεπιστημιόπολη, Ανω Ιλίσια 15784, Αθήνα.*

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι περιβαλλοντικές επιδράσεις της υγρασίας, της αλατονέφωσης, της όξινης βροχής και των μικροοργανισμών στους δομικούς λίθους στον αρχαιολογικό χώρο του Αμφιάρειου στον Ωρωπό, που βρίσκεται σε χαράδρα, στις όχθες του ρέματος Μαυροδήλεσι. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως είναι η έντονη υγρασία σε συνδυασμό με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την επίδραση αερολυμμάτων (aerosol), επέδρασαν στους δομικούς λίθους με φαινόμενα διάλυσης-απόθεσης και προκάλεσαν την ανάπτυξη των φαινομένων φθοράς. Η επίδραση των παραπάνω παραγόντων ευνόησε και τη δημιουργία μικροοργανισμών που με τη σειρά τους υποβάθμισαν περαιτέρω την αντοχή των λίθων. Οι κυριότερες φθορές που διαπιστώθηκαν είναι α) ρηγμάτωση, αποφλοιώση, αποκόλληση μεγάλων τεμαχών, που χαρακτηρίζουν κυρίως τους μαργαικούς ασβεστόλιθους και β) κυψέλωση-διάνοιξη οπών και κοιλοτήτων που χαρακτηρίζουν κυρίως τους ασβεστοψαμμίτες. Για την αντιμετώπιση των εκτεταμένων φθορών, προτείνεται η αντικατάσταση των πλέον αποσασθρωμένων λίθων με αντίστοιχους «νέους».

### ENVIRONMENTAL EFFECTS ON THE BUILDING STONE OF AMPHIARION – OROPOS, ATTICA, GREECE

Tsipoura-Vlachou M., Michopoulos K.

*NKUA, Department of Geology and Geoenvironment, Section of Mineralogy and Petrology,  
Panepistimiopolis, Ano Ilissia 15784, Athens, Greece*

### Abstract

In the present study the environmental effects of humidity, aerosol, acid rain and the biodeterioration on the building stones in the archaeological site of Amphiarion in Oropos are studied. The specific archaeological site is located in a gully, by the Mavrodilesi stream. The environmental factors as the intense humidity, the acid rainfalls and probably the aerosol attack have affected the building stone and caused the deterioration by dissolution-precipitation procedures. The above environmental factors favored, also, the development of microorganism colonies in the stone that diminished the stone durability even more. The deterioration types observed are a) cracking, peeling, removal of big pieces especially on marly limestone pieces and b) sugaring formation of vugs and cavities especially on calcarenite pieces. Suggestions for the preservation of the monument are proposed, as, the restoration using corresponding "fresh" stones.

**Λέξεις κλειδιά:** Υγρασία, Ασβεσίτης, Πορώδες, Άλατα.

**Key words:** Humidity, Calcite, Porosity, Salts.

### 1. Εισαγωγή

Οι φυσικοί δομικοί λίθοι διαβρώνονται μέσω ποικίλων διεργασιών που μπορεί να έχουν χαρακτήρα φυσικό, χημικό, ηλεκτροχημικό, ακόμα και βιολογικό. Συνήθως η γήρανση

(φθορά) του λίθου είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο κατά το οποίο συνυπάρχουν περισσότεροι από ένας μηχανισμοί. Η κυρίαρχη επιρροή κάποιου από τους παραπάνω μηχανισμούς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του λίθου, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το μικροκλίμα. Η αντοχή του λίθου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την χημικά, ορυκτολογικά, πετρογραφικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του. Το πορώδες είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και αντοχή των λίθων στις περιβαλλοντικές συνθήκες, καθόσον λίθοι με πορώδες μεγαλύτερο του 2-7% αποδεικνύονται πιο ευάλωτοι (Hale & Shakoor 2003). Το μέγεθος και η κατανομή των πόρων έχουν κρίσιμο ρόλο στις διαδικασίες φθοράς. Οι μικροί πόροι απορροφούν νερό συχνά και τείνουν να το συκκρατούν για περισσότερο διάστημα (Camuffo, 1993). Ειδικά σε λίθους ιζηματογενούς προέλευσης που έχουν μεγάλο ποσοστό ασβεσίτη ο ρόλος του πορώδους είναι κρίσιμος λόγω της ευδιαλυτότητας του ασβεσίτη από την όξινη βροχή, (Lipfert et al, 1989). Ο Camuffo (1983) έχει αποδείξει ότι πόροι με διάμετρο  $< 0,1\mu\text{m}$  είναι πολύ ευαίσθητοι σε συμπύκνωση ακόμα και σε σχετικά χαμηλή υγρασία (λόγω του φαινομένου Kelvin).

Η επίδραση του νερού είναι κρίσιμος παράγοντας στην αποσάθρωση των πετρωμάτων και κατ' επέκταση στο βαθμό γήρανσης των φυσικών δομικών λίθων. Κατά την αποσάθρωση διαλυμένα συστατικά όπως  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  και  $\text{Cl}$  είναι οι πιο διαβρωτικοί παράγοντες για τους δομικούς λίθους (Winkler, 1966; Θεουλάκης, 1993).

Η κρυστάλλωση αλάτων στους πόρους του πετρώματος θεωρείται ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας φθοράς (Benavente et al, 2001; Cardell et al, 2003) με κατάληξη την απώλεια μάζας, (Tsiourga-Vlachou & Michoroulos, 2007). Τα άλατα συγκεντρώνονται στους πόρους με την διαδικασία της ύγρυνσης-ξήρανσης (Hicks, 1982). Η προέλευσή τους μπορεί να είναι θαλάσσια ή/και ηπειρωτική, βιογενής και ανθρωπογενής (Chabas, 1997).

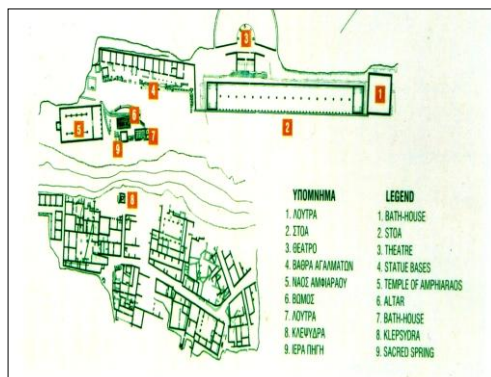
Κατά την κρυστάλλωση αλάτων, αναπτύσσεται πίεση στους πόρους του πετρώματος γνωστή με τον όρο «πίεση κρυστάλλωσης» (pressure crystallization). Ο βαθμός φθοράς εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού του διαλύματος και το μέγεθος των πόρων του πετρώματος (Benavente et al, 1999). Η κατανομή των πόρων είναι επίσης σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία κρυστάλλωσης αλάτων, καθόσον λίθοι με μεγάλο ποσοστό μεγάλων πόρων και μικρότερο ποσοστό μικρών πόρων εμφανίζονται πιο ευάλωτοι στην διάβρωση από κρυστάλλωση αλάτων (Theoulakis and Moropoulou 1997).

Επιπλέον, η δράση των μικροοργανισμών είναι ένας παράγοντας που ευνοεί την διάβρωση, (Sterflinger & Krumbain, 1997; Winkler et al, 1997).

## 2. Θέση-περιγραφή

Ο αρχαιολογικός χώρος του Αμφιάρειου βρίσκεται στην Βόρεια Αττική 2χιλ. βορειοδυτικά του Καλάμου και 5χιλ. νοτιοανατολικά της Σκάλας Ωρωπού, σε μία κατάφυτη χαράδρα, στις όχθες του ρέματος Μαυροδήλεσι,.

Ήταν το μεγαλύτερο ιερό του μάντη και ήρωα Αμφιάραου που μετά τον θάνατό του θεοποιήθηκε. Το συγκρότημα είναι του 4<sup>ου</sup> πΧ αιώνα, στους δε Χριστιανικούς χρόνους χρησιμοποιήθηκαν οι λουτρικές εγκαταστάσεις του σαν θερμές. Περιλαμβάνει διάφορα τμήματα, όπως: ναό, θέατρο, λουτρά, βωμό, στοά, αγάλματα, ιερή πηγή, κλεψύδρα, ξενώνες, και κατοικίες, καθόσον οι χρησμοί και οι θεραπείες πραγματοποιούντο κατά την διάρκεια του ύπνου, (Σχήμα 1,2). Ο ναός του 4<sup>ου</sup> πΧ αιώνα ήταν εξάστυλος δωρικός. Το νότιο μισό τμήμα του όμως, παρασύρθηκε από το διερχόμενο ρέμα κατά τα ρωμαϊκά χρόνια. Περιεβάλλετο από τείχος (περίβολο) το ποίο έχει καταστραφεί (Πετράκος, 1968). Η επίσημη γιορτή του ιερού τα Αμφιάρεια, γίνονταν καλοκαίρι και διακρίνονταν σε Μικρά (ετήσια) και Μεγάλα (κάθε 5 χρόνια). Οι ανασκαφές στον χώρο άρχισαν το 1884.



Σχήμα 1. Κάτοψη του αρχαιολογικού χώρου (από Πετράκο, 1968)



Σχήμα 2. Γενική άποψη του αρχαιολογικού χώρου από τα βόρεια. Διακρίνονται οι μαρμαρίνοι κίονες του προσκηνίου, το θέατρο στα δεξιά και αριστερά η στοά.

### 3. Γεωλογικά στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Αττικής συνίσταται από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους από τους παρακάτω σχηματισμούς:

**Προνεογενείς Σχηματισμοί:** Ανήκουν στην Πελαγονική ζώνη. Σχιστόλιθοι με ενδιαστρώσεις μαρμάρων, σιπολινιών του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύματος (ΙΓΜΕ, φύλλο Ερέτρια 1: 50000) Επικείται αυτών επωθημένοι ασβεστόλιθοι Μ.Τριαδικού-Κ.Ιουρασικού, μέσω έως παχυστρωματώδεις, ανοικτότεφροι και τοπικά ροδόχρωμοι που κατά θέσεις εμφανίζονται σαν βίο ή ωσειδείς ασβεστόλιθοι.

Στους παραπάνω σχηματισμούς ανήκουν και οφιόλιθοι που εμφανίζονται μαζί με Ιουρασικούς ασβεστόλιθους. Έχουν χαρακτηριστική εμφάνιση κατά μήκος του δρόμου από τον Κάλαμο προς τους Αγίους Αποστόλους.

**Νεογενείς Σχηματισμοί:** Πρόκειται κυρίως για εναλλαγές σχηματισμών ποτάμιας και λιμναίας φάσης. Συνίστανται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους, μαργαίκοις ασβεστόλιθους, σκληρούς τραβερτίνες ή τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθους και σκληρές τεφρόλευκες μάργες (ΙΓΜΕ, φύλλο Ερέτρια 1: 50000). Οι παραπάνω σχηματισμοί έχουν ηλικία Άνω-Μειόκαινο. Υπερκείμενοι των παραπάνω σχηματισμών απαντώνται Κάτω-Πλειστοκαινικοί αποθέσεις ποταμοχερσαίας φάσης (Μέττος, 1992). Συνίστανται κυρίως από αποθέσεις αργίλων, πηλών και κροκαλοπαγών. Οι σχηματισμοί αυτοί υπόκεινται των ολοκαινικών αποθέσεων που αποτελούνται από χαλαρά αργίλοσαμμώδη υλικά με διάσπαρτες κροκάλες και λατύπες, χειμάρριες αποθέσεις και παράκτιες αποθέσεις άμμων και κροκαλών.

### 4. Δεδομένα και μεθοδολογία

Στον Αρχαιολογικό χώρο η έρευνα εστίαστηκε στο ναό του Αμφιάρου, το αναλημματικό τείχος (συγκράτησης), στο θέατρο και στη στοά (εγκοιμητήριο), από όπου μελετήθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα.

Οι δομικοί λίθοι, εκτός λίγων περιπτώσεων που αφορούν αγάλματα και χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο, είναι ιζηματογενούς προέλευσης.

Στον πίνακα 1 αναφέρονται τα διάφορα τμήματα του αρχαιολογικού χώρου και οι δομικοί λίθοι που έχουν χρησιμοποιηθεί. Η ακριβής θέση προέλευσης των δομικών λίθων δεν έχει

πιστοποιηθεί από αρχαιολογικές μελέτες. Το μόνο γνωστό είναι ότι προέρχονται από περιοχές που δεν απείχαν πολύ από το ιερό. Από την γεωλογική μελέτη της ευρύτερης περιοχής τόσο στο υπαίθρο όσο και βιβλιογραφικά (Μέττος, 1992) διαπιστώθηκε ότι ο αρχαιολογικός χώρος και η ευρύτερη περιοχή συνίσταται από μάρμες και μαργαίους ασβεστόλιθους της ενότητας Μαλακάσας - Καλάμου. Αυτός ο μαργαίος ασβεστόλιθος μπορεί να αποτελεί δομικό υλικό στο ναό και στο θέατρο. Όσον αφορά τον τραβερτίνη και τον εύθρυπτο ασβεστόλιθο του τείχους, που ανήκουν και αυτοί στους Ανω-Μειοκαινικούς σχηματισμούς Μαλακάσας-Καλάμου, (Katsinis et al 1997), δεν εντοπίστηκε επιφανειακή εμφάνιση τους στην ευρύτερη περιοχή. Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την υπαίθρια παρατήρηση διαπιστώθηκε η επιφανειακή εμφάνιση υπόλευκου τραβερτίνη στο ύψωμα του Καμαρίου που ωστόσο διέφερε σημαντικά από τον αντίστοιχο τραβερτίνη του αναλημματικού τείχους, (Μιχόπουλος, 2006). Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η περιοχή εμφανίζει έντονη φυτική κάλυψη και περιορισμένο οδικό σύστημα.

Τα φαινόμενα γήρανσης που εμφανίζουν οι ιζηματογενείς δομικοί λίθοι μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν έντονα και εκτεταμένα με σημαντική απώλεια μάζας και αλλοίωση του αρχικού σχήματος των τεμαχίων. (Σχήμα 3,4,5,6). Τα φαινόμενα φθοράς μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες ομάδες.



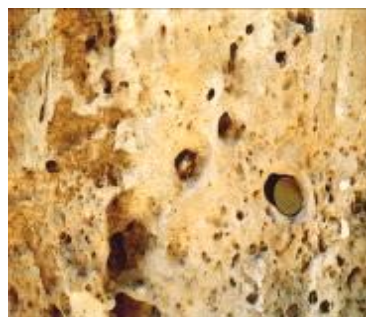
Σχήμα 3. Μαργαίος ασβεστόλιθος σε κίονα του ναού με έντονη αποκόλληση τεμαχίου



Σχήμα 4. Μαργαίος ασβεστόλιθος σε κίονα του ναού με έντονα ρηγματωμένη επιφάνεια.



Σχήμα 5. Κίονας της στοάς από ασβεστοψαμμίτη που παρουσιάζει έντονη γήρανση.



Σχήμα 6. Εκτεταμένη ανάπτυξη οπών ποικίλης διαμέτρου σε κίονα της στοάς από ασβεστοψαμμίτη.

Στην πρώτη, που χαρακτηρίζει κυρίως τους μαργαικούς ασβεστόλιθους, η γήρανση εμφανίζεται: α) έντονη, με την μορφή αποκόλλησης τεμαχών μεγάλου μεγέθους (έως και 40εκ) (Σχήμα 3) και ρηγματώσεων (Σχήμα 4). Πολλά από τα αποκολλημένα τεμάχια βρίσκονται στο έδαφος, στις βάσεις των κιόνων. β) ηπιότερη, με αποφλοίωση και αποκόλληση τεμαχών με μέγεθος μικρότερο των 2εκ.

Στην δεύτερη ομάδα που χαρακτηρίζει τους ασβεστοψαμίτες η γήρανση εμφανίζεται με την μορφή οπών (κοιλοτήτων), με διάμετρο μέχρι 5εκ και βάθος 1-4εκ και χασμάτων ακανόνιστου σχήματος και βάθος περίπου 5-6εκ. (Σχήμα 5, 6).

Αντίθετα τα φαινόμενα γήρανσης των μαρμάρων που έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως σε αγάλματα και στους θρόνους του θεάτρου φαίνονται περιορισμένου βαθμού.

Αντιπροσωπευτικά δείγματα από τις θέσεις του αρχαιολογικού χώρου που φαίνονται στον πίνακα 1, μελετήθηκαν εργαστηριακά ως προς τις φυσικές παραμέτρους, όπως φαινόμενα και απόλυτη πυκνότητα, βαθμός συνεκτικότητας, υδαταπορρόφηση και ποροσιμετρία. Η ποροσιμετρία εκτιμήθηκε με το μικροσκόπιο Motic που ήταν συνδεδεμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Motic Images Plus Version 2.0 ML.

Λεπτές τομές μελετήθηκαν στο πολωτικό μικροσκόπιο. Σπιλνές τομές και φυσικά δείγματα μελετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM JEOL JSM-5600 εξοπλισμένο με συσκευή μικροανάλυσης EDX OXFORD LINKTM ISISTM300.

Τα δείγματα, τυχαία προσανατολισμένα αναλύθηκαν ορυκτολογικά με περιθλασίμετρο ακτίνων X Siemens 5005 με χρήση φίλτρου Ni και ακτινοβολία CuK $\alpha$ .

*Πίνακας 1. Χρήση διαφορετικών λίθων σε τμήματα του αρχαιολογικού χώρου*

ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ	ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ			
Ναός	Γκριζολευκος μαργαικός ασβεστόλιθος κιόνων με έντονη γήρανση	Γκριζος σκληρός ασβεστόλιθος Κιόνων χωρίς έντονη γήρανση	Λευκό μάρμαρο αγάλματος χωρίς έντονη γήρανση	μαργαικός ασβεστόλιθος κατώτερης τοιχοποιίας χωρίς έντονη γήρανση
Αναλημματικό τείχος	Γκριζοί-υπόλευκοι εύθρυπτοι ασβεστόλιθοι με έντονη γήρανση	Υποκίτρινοι-καφέ τραβερτίνες με έντονη γήρανση		
Θέατρο	Λευκό μάρμαρο με περιορισμένη γήρανση Θρόνοι- κιονοστοιχία	Γκριζολευκος μαργαικός ασβεστόλιθος προσκήνιο με έντονη γήρανση	Γκριζολευκος αργιλομιγής ασβεστόλιθος τοιχοποιία περιορισμένη γήρανση	
Στοά	Γκριζοκίτρινος ασβεστοψαμίτης κιόνων με πολύ έντονη γήρανση	Γκριζόλευκος ασβεστόλιθος συνεκτικός κιόνων χωρίς έντονη γήρανση		

**5. Αποτελέσματα - Συζήτηση**

Δείγματα Δομικών λίθων που συλλέχθηκαν από το ναό του Αμφιάραου, το θέατρο και τη στοά προετοιμάστηκαν κατάλληλα και ακολούθησε η μελέτη τους στο πολωτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) καθώς και στη συσκευή περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Η πετρογραφική παρατήρηση των δειγμάτων σε λεπτές τομές στο πολωτικό μικροσκόπιο έδωσε τα στοιχεία ταξινόμησης που φαίνονται στον Πίνακα 2. Οι δομικοί λίθοι των μνημείων είναι κυρίως μεικτά πετρώματα (μαργαίκοι-αργιλομιγείς μικριτικοί-σπαρικοί ασβεστόλιθοι με κυμαινόμενο ποσοστό βιοκλαστών από 5 μέχρι 20%). Ιδιαίτερα έντονη είναι η παρουσία ωοειδών στους ασβεστοψαμμίτες (ωοσπαρίτες) των κίωνων της στοάς.

*Πίνακας 2. Πετρολογικός χαρακτηρισμός των δομικών λίθων*

Δείγμα	Προέλευση (Μνημείο)	Κύρια ορυκτολογικά συστατικά	Ταξινόμηση κατά Folk (1976)
1	Κίονας Στοάς Ναού	Ασβεσίτης, χαλαζίας,	βιομικροσπαρίτης
2a	Προσκήνιο Θεάτρου	Ασβεσίτης,	μικροσπαρίτης
2b	Προσκήνιο Θεάτρου	Ασβεσίτης,	μικροσπαρίτης
2c	Προσκήνιο Θεάτρου	Ασβεσίτης,	βιομικρίτης
3	Κερκίδα Θεάτρου	Ασβεσίτης, χαλαζίας	ασβεστοψαμμίτης
4	Κίονας Στοάς Εγκ.	Ασβεσίτης,	ωοσπαρίτης

Στον πίνακα 3 δίδονται τα στοιχεία των ποιοτικών ορυκτολογικών αναλύσεων με περιθλασίμετρο XRD και ποσοτικών εκτιμήσεων σε αντιπροσωπευτικά δείγματα.

*Πίνακας 3. Ορυκτολογική ανάλυση δειγμάτων*

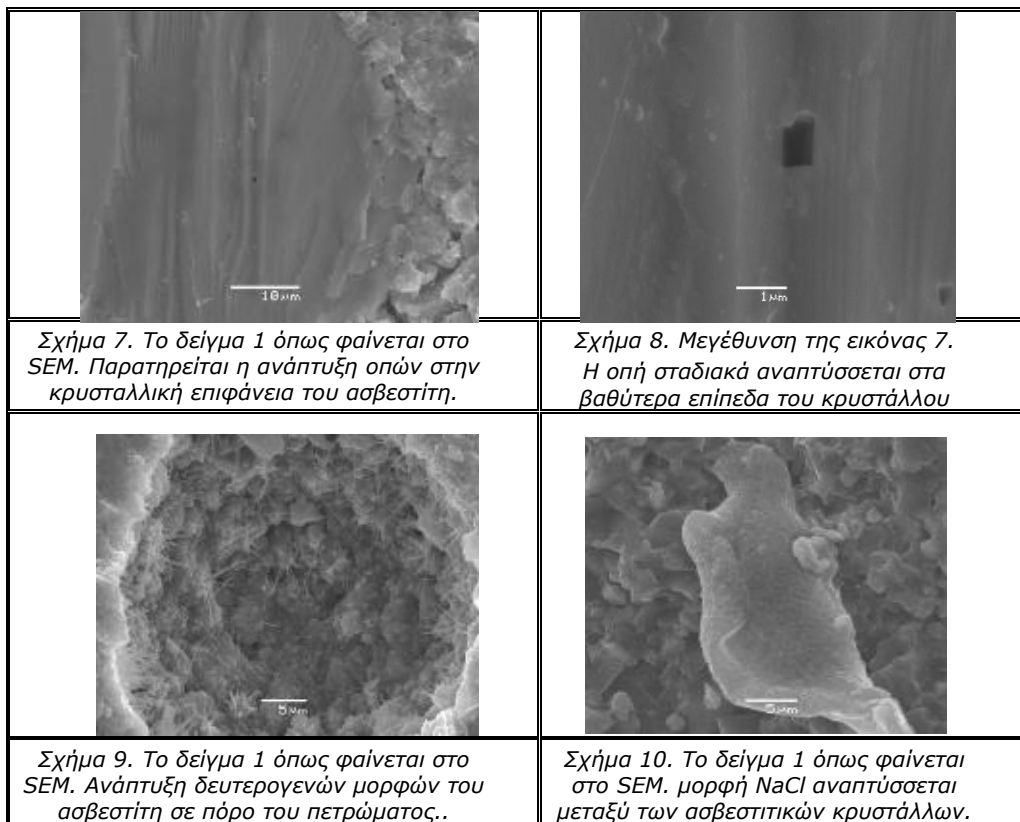
	Cc	Rdch	Ar	Dol	Qtz	Anor	Gyp	Musc	Chl-Sm	Ill	Kaol
1,	++++	+			+	+			+		+
2a,2b	++++	+			+	+			+		+
2c	++++				+		+	+		+	+
3	++++	+			+						++
4	+++		++	+	+				+	+	++

Cc: Ασβεσίτης Rdch: Ροδοχρωσίτης, Ar: Αραγωνίτης, Dol: Δολομίτης, Anor: Ανορθοσίτης, Gyp: γύψος, Kaol: Καολινίτης, Musc: Μοσχοβίτης, Sm: Σμηκτίτης, Ill: Ιλλίτης, Chl:Χλωρίτης,  
 + Ιχνη ++ Χαμηλή Περιεκτικότητα  
 +++ Μέση Περιεκτικότητα ++++ Υψηλή Περιεκτικότητα

Η παρατήρηση των φυσικών δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, επιβεβαίωσε τα στοιχεία των παρατηρήσεων στο πολωτικό, έδωσε όμως και επιπλέον πετρογραφικά στοιχεία, που συνεισφέρουν στην ερμηνεία των φαινομένων φθοράς. Ειδικότερα έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις και διαπιστώσεις.

### 5.1. Ναός Αμφιάραου

Στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο του ναού του Αμφιάραου παρατηρήθηκαν οπές στις κρυσταλλικές επιφάνειες του ασβεστίτη, κυρίως του σπαριτικού. Οι οπές αυτές σταδιακά αναπτύσσονται σε βαθύτερα επίπεδα του κρυστάλλου, υποβαθμίζοντας την συνοχή και γενικότερα την αντοχή του λίθου (Σχήμα.7, 8).

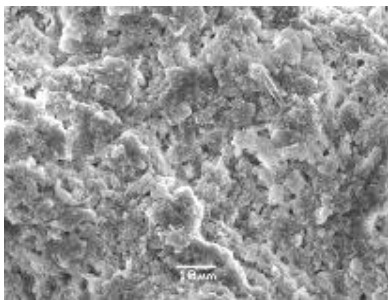


Χαρακτηριστική είναι και η ανάπτυξη δευτερογενών μορφών του ασβεστίτη σε πόρους με διάμετρο μεγαλύτερη των 30μm (Σχήμα 9). Μπορεί να διατάσσονται σε ακανθώδη σχήματα και να συνδέονται κατά το ένα άκρο τους με πρωτογενείς κρυσταλλικές μορφές. Ο σχηματισμός τους οφείλεται σε δευτερογενή επιλεκτική κρυστάλλωση εντός των μεγαλύτερων πόρων από κορεσμένα πορικά διαλύματα. Η επιφάνεια των κρυστάλλων του ασβεστίτη εμφανίζει εκτός από τις οπές και άλλες μορφές διάλυσης όπως λείανση και εξαφάνιση των κρυσταλλικών εδρών καθώς και τον σχηματισμό αυλακώσεων και καναλιών (Σχήμα 7, 23).

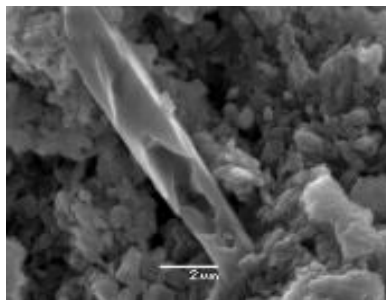
Κατά θέσεις παρατηρήθηκαν μορφές NaCl που έχουν υποστεί μερική διάλυση να αναπτύσσονται μεταξύ των ασβεστιτικών κρυστάλλων (Σχήμα.10).

5.2. Θέατρο

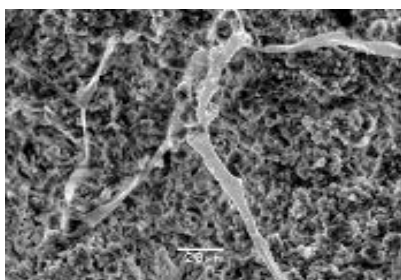
Στον ασβεστόλιθο του προσκηνίου του θεάτρου διαπιστώθηκε η παρουσία μορφών NaCl που έχουν υποστεί μερική διάλυση και αναπτύσσονται μεταξύ των ασβεστιπικών κρυστάλλων (Σχήμα 12). Η κρυστάλλωση αυτή ασκεί πίεση στο εσωτερικό του πετρώματος και υποβαθμίζει προοδευτικά την αντοχή του.



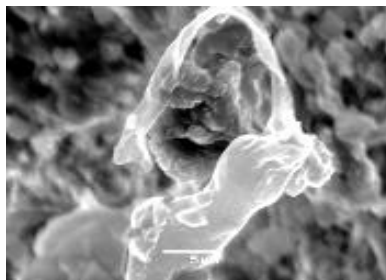
Σχήμα 11. Το δείγμα 2a όπως φαίνεται στο SEM. Διακρίνονται μικρού μεγέθους οπές μεταξύ των κρυστάλλων ασβεσίτη



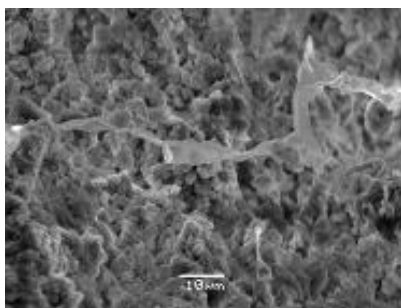
Σχήμα 12. Λεπτομέρεια του σχήματος 11. Διακρίνεται η ανάπτυξη άλατος NaCl σε επιμήκη μορφή.



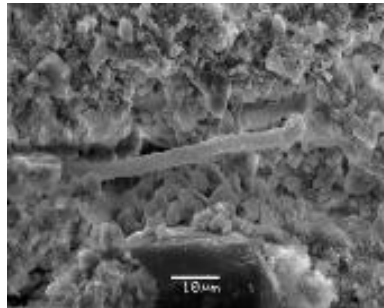
Σχήμα 13. Το δείγμα 2b όπως φαίνεται στο SEM. Μικροοργανισμός αναπτύσσεται μεταξύ των κόκκων.



Σχήμα 14. Λεπτομέρεια του σχήματος 13. Ο μικροοργανισμός περιβάλλει κρυστάλλου ασβεσίτη.



Σχήμα 15. Το δείγμα 2b όπως φαίνεται στο SEM. Μικροοργανισμοί δευτερογενώς καλυμμένοι με ασβεσίτη αναπτύχθηκαν μεταξύ των κόκκων του πετρώματος



Σχήμα 16. Το δείγμα 3 όπως φαίνεται στο SEM. Μικροοργανισμός σωληνόμορφου σχήματος εμφανίζεται μεταξύ των κόκκων του πετρώματος. Πάνω σε αυτόν αναπτύχθηκαν δευτερογενώς ασβεστιπικοί κρύσταλλοι



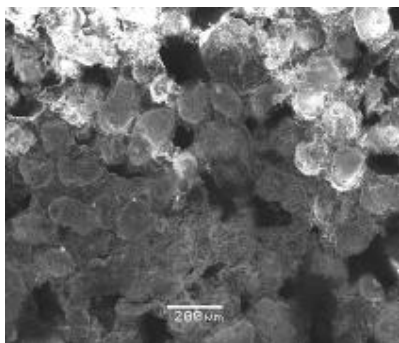
Επίσης στους πόρους του παραπάνω πετρώματος παρατηρήθηκε η ανάπτυξη μικροοργανισμών που εισχωρούν ανάμεσα στους κόκκους και οι οποίοι δευτερογενώς έχουν καλυφθεί από ασβεσίτη (Σχήμα 13,14). Με τις διεργασίες του μεταβολισμού διαλύουν τον ασβεσίτη και συντελούν στην αποδυνάμωση του συνδετικού υλικού και την χαλάρωση-απώλεια των κόκκων, (Gomez-Alarcon et al, 1995). Το ίδιο φαινόμενο διαπιστώθηκε και στον ασβεστόλιθο της κερκίδας του θεάτρου (Σχήμα 15,16). Επειδή η βιοδιάβρωση εξαρτάται από τις συνθήκες υγρασίας, από το είδος των μικροοργανισμών, από τους θρεπτικούς παράγοντες, και τον χρόνο παραμονής (Grassegger, 1999; Dornieden et al, 2000), η ανάπτυξη των μικροοργανισμών δεν είναι ομοιόμορφη σε όλα τα σημεία.

Το δείγμα 2c που συλλέχθηκε από το προσκήνιο του θεάτρου παρουσιάζει μεγαλύτερη συνεκτικότητα (μικρότερο πορώδες) συγκριτικά με το δείγμα 2b. Ομως φαινόμενα εναλλασσόμενης τήξης-πήξης αναπτύσσονται με ιδιαίτερη ένταση σε μικροπορώδες λίθους (Bell & Dearman 1988). Παρόλο που το πορώδες και το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο από το δείγμα 2b, σε μεμονωμένες θέσεις διαπιστώθηκε η ύπαρξη μορφών γύψου.

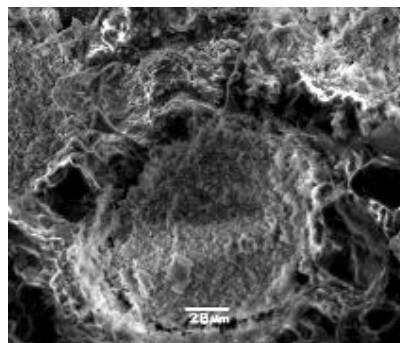
Επιφάνειες ασβεσίτη υγρές απορροφούν εύκολότερα  $SO_2$  από την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τον σχηματισμό γύψου. Με τον σχηματισμό γύψου οι επιφάνειες γίνονται κορεσμένες και ο ρυθμός κρυστάλλωσης μειώνεται. Με την βροχή απομακρύνεται η γύψος λόγω της μεγαλύτερης διαλυτότητας σε σχέση με τον ασβεσίτη και προοδευτικά με επαναλαμβανόμενους κύκλους αυξάνεται ο ρυθμός διάβρωσης. Η προέλευση του  $SO_2$  μπορεί να είναι και βιογενής, από τις διαδικασίες διαβίωσης των μικροοργανισμών.

### 5.3. Στοά (Εγκοιμητήριο)

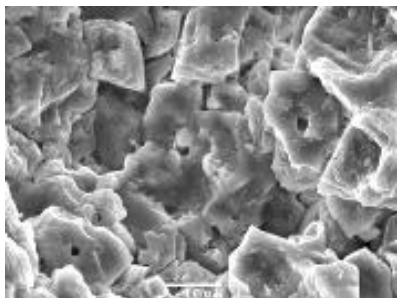
Στους ασβεστόλιθους του εγκοιμητηρίου διαπιστώθηκε σε αρκετές θέσεις η ασθενής σύνδεση των ωοειδών που σχετίζεται με την διαλυτική δράση των διαλυμάτων των πόρων στο ασβεσιτικό συνδετικό υλικό (Σχήμα 17,18).



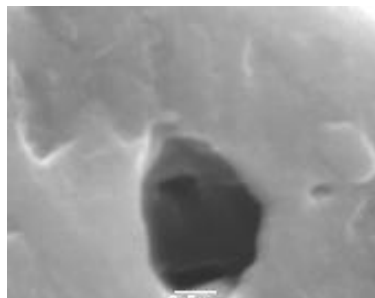
Σχήμα 17. Ωοειδής ασβεστόλιθος από κίονα της στοάς όπως φαίνεται στο SEM. Εμφανίζει διακοκκώδες πορώδες. Οι πόροι απαντούν μεταξύ των ωοειδών στις θέσεις όπου απουσιάζει το ασβεσιτικό συνδετικό υλικό.



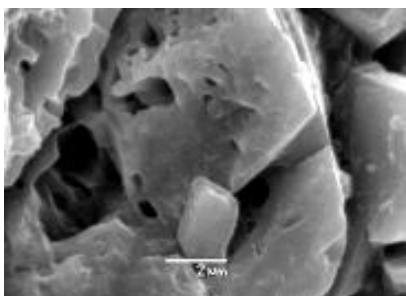
Σχήμα 18. Ωοειδές περιβάλλεται από κρυστάλλους ασβεσίτη του συνδετικού υλικού. Οι τελευταίοι έχουν υποστεί διάλυση σε σημαντικό βαθμό και δεν εμφανίζουν κρυσταλλικές έδρες.



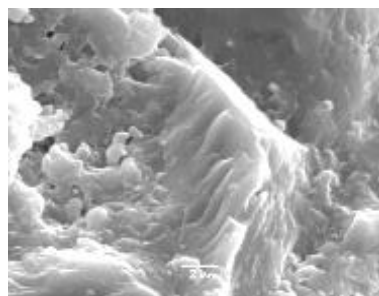
Σχήμα 19. Ο ασβεστόλιθος της στοάς όπως φαίνεται στο SEM. Είναι εμφανής η ανάπτυξη οπών επί των κρυσταλλικών επιφανειών του ασβεστίτη ως αποτέλεσμα μερικής διάλυσης από υδατικά διαλύματα.



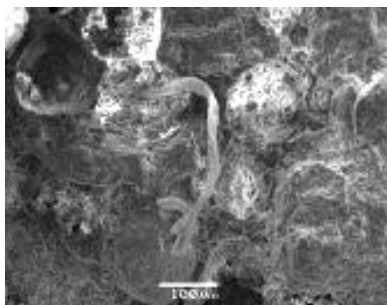
Σχήμα 20. Η οπή του σχήματος υπό μεγέθυνση στο SEM. Διακρίνεται η ανάπτυξη και άλλων οπών στα βαθύτερα επίπεδα του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της επαναλαμβανόμενης επίδρασης των υδατικών διαλυμάτων στο εσωτερικό του.



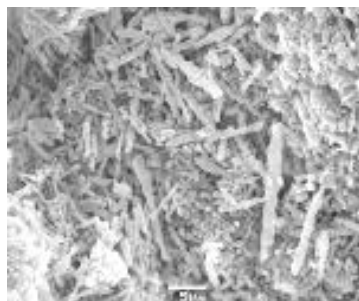
Σχήμα 21. Πολυάριθμες οπές σε κρύσταλλο ασβεστίτη που αναπτύχθηκαν λόγω της εκτεταμένης διάλυσης.



Σχήμα 22. Διακρίνεται η ανάπτυξη αυλακώσεων (καναλιών) στην επιφάνεια του ασβεστίτη.



Σχήμα 23. Ωοειδής ασβεστόλιθος από τον κίονα της στοάς όπως φαίνεται στο SEM. Ο μικροοργανισμός που αναπτύσσεται μεταξύ των ωοειδών υποβαθμίζει τη συνοχή του πετρώματος.



Σχήμα 24. Ραβδόμορφοι μικροοργανισμοί που πιθανόν αντιστοιχούν σε βακτήρια αναπτύσσονται εντός του πυρήνα ωοειδούς.

Επιπλέον διαπιστώθηκε σε αρκετά δείγματα η παρουσία οπών επί της κρυσταλλικής επιφάνειας του ασβεστίτη. Οι οπές αυτές αναπτύσσονται σταδιακά σε βαθύτερα επίπεδα των κρυστάλλων και ελαττώνουν τη συνοχή τους. Ο σχηματισμός τους ευνοείται από την επαναλαμβανόμενη δράση των υδατικών διαλυμάτων των πόρων. Τα διαλύματα αυτά προκαλούν τη μερική διάλυση του ασβεστίτη και σταδιακά εισχωρούν στο εσωτερικό του κρυστάλλου σχηματίζοντας οπές (Σχήμα 19, 20, 21). Επίσης η παρουσία αυλακώσεων (καναλιών) επί της επιφάνειας των κρυστάλλων του ασβεστίτη, αποδόθηκε στην διαλυτική δράση των παραπάνω διαλυμάτων (Σχήμα 22).

Μεμονωμένα διαπιστώθηκε η παρουσία πρόσφατων μικροοργανισμών που με τη βιολογική τους δράση υποβαθμίζουν τη συνοχή του πετρώματος (Σχήμα 23, 24).

Στους παραπάνω παράγοντες διάβρωσης των λίθων μπορεί να προστεθεί και η επίδραση των νερών εδάφους που ανέρχονται με τριχοειδή αναρρίχηση και μπορούν να συμπαρασύρουν τα διαλυτά συστατικά των αργιλοपुरιτικών κυρίως ορυκτών του εδάφους. Τοπικά παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της έντασης των φαινομένων φθοράς κυρίως σε σημεία επαφής με το έδαφος (αναλημματικό τείχος). Το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης του νερού είναι συνηθισμένος τρόπος εισόδου του νερού και απόθεσης αλάτων στο λίθο, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Arnold 1982; Karoglou et al 2005).

## 6. Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη θέση, που βρίσκεται ο αρχαιολογικός χώρος του Αμφιάρειου οι έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας σε συνδυασμό με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και ενδεχομένως την επίδραση αερολυμάτων (aerosol), επέδρασαν στους δομικούς λίθους και ευνόησαν την ανάπτυξη των φαινομένων φθοράς. Ακόμη η επίδραση των κλιματικών παραγόντων ευνόησε τη δημιουργία μικροοργανισμών που με τη σειρά τους υποβάθμισαν περαιτέρω την αντοχή των λίθων.

Οι παραπάνω περιβαλλοντικοί παράγοντες που επέδρασαν κατά τον ίδιο βαθμό στους δομικούς λίθους των μνημείων, προκάλεσαν την εκδήλωση των φαινομένων φθοράς με διαφορετικές μορφές και ένταση. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται στα ιδιαίτερα πετρογραφικά χαρακτηριστικά των λίθων και τον προσανατολισμό-θέση τους στο χώρο. Στους δομικούς λίθους των κιόνων του ναού του Αμφιάραου και του προσκηνίου του θεάτρου διαπιστώθηκαν φαινόμενα αποφλοίωσης-αποκόλλησης τεμαχίων της επιφάνειας σε διαφορετικό βαθμό. Οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των κιόνων του ναού και του προσκηνίου του θεάτρου δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στην ορυκτολογική τους σύσταση. Ωστόσο στο υψηλότερο ποσοστό και στη μεγαλύτερη ανομοιομορφία στο μέγεθος των πόρων των λίθων του ναού αποδίδεται η ανάπτυξη των φαινομένων γήρανσης σε εντονότερο βαθμό.

Αντίθετα στους κίονες της στοάς (ασβεστοψαμμίτες) παρατηρήθηκε η έντονη ανάπτυξη πολυάριθμων οπών ποικίλου μεγέθους, που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν προχωρημένο στάδιο κυψέλωσης, που αλλοίωσε έντονα τα αρχιτεκτονικά τους χαρακτηριστικά. Η δημιουργία των οπών οφείλεται στη διαφορετική κοκκομετρική ταξινόμηση, στο υψηλότερο πορώδες και στη μεγαλύτερη διασπορά των διαμέτρων των πόρων συγκριτικά με τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Η εντονότερη παρουσία των «μικρότερων» πόρων στους ασβεστοψαμμίτες διευκόλυνε την παραμονή διαλυμάτων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ευνοώντας την ανάπτυξη του παραπάνω τύπου φθοράς.

Αξίζει να σημειωθεί ιδιαίτερος, η επίδραση των μικροοργανισμών στους δομικούς λίθους των μνημείων που σε συνδυασμό με τις παραπάνω παραμέτρους, ενίσχυσαν την εκδήλωση των φαινομένων γήρανσης.

## 7. Προτάσεις για την αποκατάσταση του μνημείου

Μια προσέγγιση αποκατάστασης των φθορών των δομικών λίθων είναι η αντικατάσταση

των πολύ αποσπασμένων τμημάτων, από αντίστοιχα «νέα» πετρώματα. Όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο 4 δεν έχουν εντοπισθεί αρχαία λατομεία στην ευρύτερη περιοχή. Για να προσδιοσθούν εμφανίσεις αντίστοιχης λιθολογικής σύστασης με τους δομικούς λίθους, ώστε να αυτοί να ταυτοποιηθούν, απαιτούνται λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής του Αμφιάρειου και εργαστηριακές μελέτες.

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας ερευνήθηκαν, στην ευρύτερη περιοχή, λιθολογικές εμφανίσεις μαργών, μαργαϊκών ασβεστολίθων και τραβερτινών του Ανώτερου Μειόκαινου, που θα μπορούσαν να ταυτοποιηθούν με τους δομικούς λίθους του Αμφιάρειου. Αυτές είναι: α) η περιοχή περιμετρικά του Καλάμου, με έμφαση: στη θέση Κοκκινόγεια (βορειοανατολικά του υψώματος του Καμαρίου), στην περιοχή δυτικά-βορειοδυτικά του Καλάμου, στην περιοχή του ρέματος Μαυροδήλεσι και στο ύψωμα της Μαυρηνώρας. β) η περιοχή Αγίου Γεωργίου-Μαρκόπουλου (Αγίας Παρασκευής)-Μήλεσι.

Περαιτέρω πετρολογική μελέτη στις παραπάνω περιοχές θεωρείται ότι θα συμβάλει στην ταυτοποίηση και στην επιλογή των πλέον κατάλληλων λιθολογικών εμφανίσεων για τυχόν αντικατάσταση δομικών λίθων του Αμφιάρειου, στα πλαίσια αποκατάστασης του μνημείου.

## Βιβλιογραφία

Θεουλάκης Π., 1993. Μελέτη των αιτίων και των μηχανισμών διάβρωσης του ψαμμίτη του κάστρου και της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου. Διδακτορική Διατριβή. ΕΜΠ. Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας της Επιστήμης και Τεχνικής των υλικών.

Ι.Γ.Μ.Ε., 2000. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος, φύλλο Ερέτρια, 1:50000.

Μέττος Α., 1992. Γεωλογική και παλαιογεωγραφική μελέτη των Ηπειρωτικών Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών ΒΑ Αττικής και ΝΑ Βοιωτίας. Διδακτορική Διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Μιχόπουλος Κ. 2006. Μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επί των δομικών λίθων μνημείων της Αττικής. Μεταπτυχιακή διατριβή, Εκ. ΕΚΠΑ.

Πετράκος Β., 1968. Ο Ωρωπός και το ιερό του Αμφιάρειου. *Η εν Αθήναις Αρχαιολογική Εταιρεία*, 7, 72-118.

Arnold A., 1982 In: *Fourth International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone Objects*, Louisville, pp. 11-28.

Bell F.G. and W.R. Dearman, 1988. Assesment of the durability of sandstones with illustrations from some buildings in the North of England. *The Engineering Geology of Ancient Works Monuments and Historical sites. Preservation and Protection*. Proceedings of an International Symposium organized by the Greek National Group of I.A.E.G. vol. 2, 707-716.

Benavente D, M.A. Garcia del Cura, A. Bernabeu, S. Ordonez, 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*: 59: 313-25.

Benavente D., M.A. Garcia del Cura, R. Fort, S. Ordonez, 1999. Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth* 204:168-78.

Camuffo D., 1983. Condensation-Evaporation Cycles in pore and capillary systems according to the Kelvin model. *Water Air and Soil Pollution* 21, pp151-159.

Camuffo D., 1993. Pores Capillary and Moisture Movement in the Stone In: *Diagnosis and Conservation* Ed. F. Zezza, CUM Heraklion Crete, pp27-42.

Cardell C., F. Delalieux, K. Roumpopoulos, A. Moropoulou, F. Auger, R. Van Grieken 2003. Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Construction and Building Materials* 17 165–179.

Chabas A and R.A Lefevre, 1997. The *sea salts transported by aerosols and deposited on stones at the Delos archeological site (Cyclades islands-Greece)* Proc. 4<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes. determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and Building Materials*, Vol. 11, No. 1, pp. 65-71, Elsevier Science Ltd.

Dornieden Th., A.A. Gorbushina, W.E. Krumbein, 2000. Biodecay of cultural heritage as a space/time-related ecological situation an evaluation of a series of studies. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46 261, 2 Elsevier.

Elsevier Science Ltd.

Gomez-Alarcon G., B. Cilleros, M. Flores J. Lorenzo, 1995. Microbial communities and alteration processes in monuments at Alcalá de Henares, Spain. *Science of The Total Environment*; 167:231–9.

Grassegger G., 1999. Decay mechanisms of natural building stones on monuments- A review of the latest theories. Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr-Ing H.-W. Reinhardt. IBW, Stuttgart. Pr. In Germany.

Hale P. and A. Shakoor 2003. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental and Engineering Geoscience* v 9 no2, p117-13.

Hicks B.B. 1982. Wet and dry surface deposition of air pollutant and their modeling. *Conservation of historic stone buildings and monuments*. Academic Press, Washington D. C.

Karoglou M., A. Moropoulou, A. Giakoumaki, M.K. Krokida, 2005. Capillary rise kinetics of some building materials. *Journal of Colloid and Interface Science* 284 260–264,

Katsinis D., St. Lozios, A. Patra, M. Kliafa, 1997. *Technicogeological Recognition of the deteriorations of the surrounding stone wall of the Amfiarion in Oropos*. Proceedings 4<sup>th</sup> International symposium on the conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes.

Lipfert F.W., 1989. Atmospheric damage to calcareous stones: Comparison and reconciliation of recent experimental findings *Atmospheric Environment* Vol. 23, No. 2, pp. 415-429, 1989. Printed in Great Britain. Pergamon press plc.

Sterflinger K. and W.E. Krumbein, 1997. *Biogenic decay of the monuments in the sanctuary of Delos(Cyclades-Greece)- Organisms, mechanisms of decay and possible conservation treatments*. Proceedings 4<sup>th</sup> International symposium on the conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes.

Theoulakis P. and A. Moropoulou, 1997. Microstructural and mechanical parameters

Tsipoura-Vlachou M. and K. Michopoulos, 2007. *Decay characterization and causes of the building stone at the Artemis temple, Brauron*, E. Attiki, Greece. Bull. Geol. Soc. Greece, Proc. 11<sup>th</sup> Inter. Congress, Athens.

Winkler E.M., 1966. Important agents of weathering for building and monumental stone. *Engineering Geology*; 1:381–400.

Winkler E.M., J. Lorenzo, G. Gomez-Alarcon, 1997. Algae and bacteria on historic monuments at Alcalá de Henares, Spain. *International Biodeterioration & Biodegradation*; 40: 241–6.