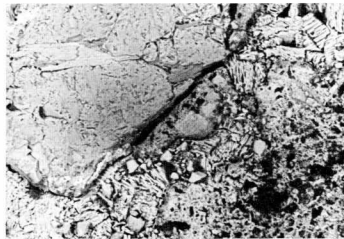


Ναός Απέρου Νίκης. Κρύσταλλα γύφου μέσα σε αργιλοπηριτική φλέβα του μαρμάρου. Ο γύφος προέρχεται από τη θείωση του μαρμάρου και συμβάλλει και ο ίδιος δευτερογενώς στη διάβρωση του υλικού με τις διαλύσεις και ανακρυσταλλώσεις του και με τη δυνατότητα μετάπτωσης από τη μη ένυδρη μορφή (γύφος) στην άλλη (ημιυδρήτη) με μεταβολή όγκου. (φωτογρ. Κέντρο Λίθου, χειρισμός ηλ. μικροσκοπίου Χρ. Τόλιας). (μεγέθ. X540).



Γυνάσιο Δελφών. Κρύσταλλοι χλωριούχου νατρίου μέσα σε αργιλοπηριτική φλέβα. Στην περίπτωση το χλωριούχο νάτριο προέρχεται από τριχοειδή αναφύξεις υπέργειου νερού. Ο συνδυασμός έντονης παρουσίας αργίλων με άλατα από τον υδροφόρο ορίζοντα αποτελεί πάντοτε ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα διάβρωσης της πέτρας. (φωτ. Κέντρο Λίθου, χειριστής ηλ. μικροσκοπίου Χρ. Τόλιας) (μεγέθ. X280).

Η διάβρωση της πέτρας και πως (δεν) θα την αποφύγετε

«Παλιές» και «καινούργιες» μορφές διάβρωσης της πέτρας

Όποιος ασχολείται με οποιοδήποτε τρόπο με πέτρινα μνημεία, θα θεωρήσει μεγάλη κοινοτοπία να τον πληροφορήσουμε ότι οι πέτρες διαβρώνονται με την πάροδο του χρόνου. Τα πράγματα περιπλέκονται μόλις μπούμε σε ερωτήματα του τύπου «πώς», «γιατί» και «τι να κάνουμε για να μην διαβρώνονται».

Οι περισσότερες μορφές φυσικής διάβρωσης της πέτρας ήταν γνωστές στην αρχαία εποχή, γι' αυτό και διακρίνουμε στα μνημεία περιπτώσεις πέτρας που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για θεμέλια, πέτρας που χρειαζόταν οπωσδήποτε σοβάτισμα για να αντέξει στην ατμόσφαιρα, ακόμα και πέτρας εξαιρετικά ανθεκτικής στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτές βέβαια είναι μορφές διάβρωσης που συμβαίνουν στη γη από την εποχή που στερεοποιήθηκε ο φλοιός της, πριν 4 1/2 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια και δεν περιμένουν την εμφάνιση του ανθρώπου για να ξεκινήσουν. Περιμέναν μόνο την ανάπτυξη της επιστήμης της γεωλογίας για να τις μελετήσει.

Υπάρχουν όμως και μορφές διάβρωσης της πέτρας που δεν είναι καθόλου «φυσικές», αλλά τελείως συνδεδεμένες με την ανθρώπινη δραστηριότητα και μάλιστα με την εκβιομηχάνιση και την ανάπτυξη των μέσων μεταφοράς. Αυτές άρχισαν να εμφανίζονται στην Ελλάδα στις πρώτες μεταπολεμικές δεκαετίες και σιγά - σιγά έφτασαν σε ορισμένα πολύ σημαντικά μνημεία να επικρατούν σαν κύριες αιτίες καταστροφής τους.

Νικ. Μπελογιάννης,

χημικός μηχανικός, Α' Εφορεία Κλασικών Αρχαιοτήτων

Ατμοσφαιρική ρύπανση και διάβρωση της πέτρας

Οι όξινοι ρυπαντές που άρχισαν να αφθονούν στην ατμόσφαιρα των πόλεων από τις πρώτες δεκαετίες του αιώνα με την εκβιομηχάνιση, τη χρή-

ση κεντρικών θερμάνσεων στα κτήρια και τη χρήση του αυτοκινήτου, έφτασαν να αποτελούν για ορισμένες περιοχές την κύρια αιτία διάβρωσης της πέτρας (τουλάχιστον της ασοεστολιθικής, γιατί οι ηφαιστειακές πέτρες δεν προσβάλλονται από οξέα), ακόμα και πέτρας που επί αιώ-

νες ήταν η πιο εκλεκτή για την εξαιρετική της αντοχή στην ατμόσφαιρα, όπως είναι το πεντελικό μάρμαρο. Οι πιο συνηθισμένοι τέτοιοι ρυπαντές είναι τα οξείδια του θείου και του αζώτου. Οι πρώτοι, αντιδρώντας με το ανθρακικό αέριο του μαρμάρου και του ασοεστολιθίου, σχηματι-

ζουν γύψο (θειικό ασβέστιο) (εικ. 1). Στα σημεία, όπου το μνημείο βρέχεται από τα νερά της βροχής, ο γύψος που είναι λίγο διαλυτός στο νερό, ξεπλένεται με αποτέλεσμα σταδιακή εξαφάνιση των λεπτομερειών στα γλυπτά. Όταν το μνημείο δεν βρέχεται, ο γύψος, μαζί με τις επικαθίσεις από την ατμόσφαιρα (αιθάλη, οξείδια σιδήρου κλπ) σχηματίζει τη γνωστή «μαύρη κρούστα». Αν προσπαθήσουμε να καθαρίσουμε τη μαύρη κρούστα με συνήθεις μεθόδους, το μόνο που θα πετύχουμε θα είναι η εξαφάνιση των λεπτομερειών των γλυπτών (όπως στην περίπτωση που τα γλυπτά είναι εκτεθειμένα στη βροχή), ενώ η μαύρη κρούστα πολύ σύντομα θα ξανασηματίζεται. Για όποιον επιθυμεί λεπτομερέστερα στοιχεία, παραπέμπουμε στις εργασίες του εργαστηρίου Φυσικοχημείας του ΕΜΠ. Εκεί θα βρει και μια ικανοποιητική απάντηση για την αβυσμια να παρθούν μέτρα προστασίας με απ' ευθείας επέμβαση στην επιφάνεια του μνημείου.

Τα μνημεία που πάσχουν από αυτή τη μορφή διάβρωσης είναι από τα πιο οικεία, και όχι μόνο για τον αρχαιολόγο: Ακρόπολη, Ελευσίνα, Αψίδα Γαλερίου.

Για τη διάβρωση από οξείδια του αζώτου, δεν είναι πολλά πράγματα γνωστά, παρόλο που παίζει σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε μέρη με έντονο κυκλοφορικό φόρτο. Ίσως η δυσκολία μέτρησης των προϊόντων (κυρία νιτρικό ασβέστιο), που δεν παραμένουν ποτέ όπως ο γύψος πάνω στην επιφάνεια της πέτρας, κάνουν τη μορφή αυτή διάβρωσης να μην είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στους ερευνητές. Πάντως από το 1987 η ΕΟΚ χρηματοδοτεί ένα μακροχρόνιο διαπανεπιστημιακό πρόγραμμα, όπου από ελληνικής πλευράς συνεργάζονται το Πανεπιστήμιο Αιγαίου (Τμ. Περιβάλλοντος), το Υπ. Πολιτισμού και το ΠΕΡΡΑ.

Η πιο απλή μορφή φυσικής διάβρωσης: ο παγετός

Είναι γνωστό ότι το νερό όταν παγώνει αυξάνει τον όγκο του κατά 9% περίπου, με αποτέλεσμα να ασκεί τεράστιες μηχανικές τάσεις στα τοιχώματα των πόρων της πέτρας. Αντίθετα με αυτό που θα περιμένα κανείς με πρώτη ματιά στο πρόβλημα, οι πιο πορώδεις πέτρες δεν είναι και οι πιο παγολήπτες. Όταν υπάρχουν πολλοί και μεγάλοι πόροι, υπάρχει διαφυγή για το νερό την ώρα που παγώνει, με αποτέλεσμα μια μερική ανακούφιση των μηχανικών τάσεων. Έτσι βλέπουμε να είναι παγολήπτη

η πέτρα της Αρχαίας Πέλλας, που έχει πολύ λεπτούς πόρους, και ακόμα η πέτρα του Ναού Επικούριου Απόλλωνα, που έχει πορώδες σχεδόν μηδέν, αλλά διαθέτει πολλές μικρο-γυμμές, από τις οποίες Εκκινεί το φαινόμενο. Το ίδιο παρατηρούμε και στο μάρμαρο της Ανατολικής Μοκροσσίας όταν βρεθεί σε πολύ έντονη συνθήκες, όπως συμβαίνει στην Ελληνιστική Ακρόπολη Καλύβας, στο Νομό Σάνθης. Το ίδιο και σε πολλές από τις πιο σκληρές και λιγότερο πορώδεις πέτρες των μνημείων της Επιδάουρου.

Πέτρες που διαβρώνονται ακόμα και από τη βροχή

Με τον όρο «μάργες» η γεωλογία ονομάζει τις λασποπέτρες, που περιέχουν μεγάλο ποσοστό αργίλων. Από τέτοιο είδος ιζηματογενούς πέτρας, με περισσότερο ή λιγότερο ανθρακικό ασβέστιο (μαργαίκο ασβεστολιθό) ή ασβεστολιθικές (μάργες) είναι πολλές φορές κατασκευασμένα τα θεμέλια αρχαίων κτηρίων και είναι ακριβώς αυτά που δεν επιτρέπεται να παραμένουν εκτεθειμένα στη βροχή, αφού με το συνεχές θρέξιμο-στένγνιμο οι αργίλοι μετατρέπονται σε ψιλή σκόνη και μέσα σε λίγους χειμώνες η πέτρα μετατρέπεται σ' ένα σωρό από λάσπη. Στην Αρχαία Αγορά της Αθήνας και στους Δελφούς μπορούμε να δούμε πολλές τέτοιες περιπτώσεις.

Το φαινόμενο της κατάρρευσης από σκέτη διαβροχή εμφανίζεται σπανιότερα και σε ηρωστειακές πέτρες (τόφους, γρανίτες κλπ.). Αυτοί όμως πασχουν πολύ περισσότερο από την μορφή που η γιγνώσκουμε αμέσως παρακάτω.

Η πιο «ύπουλη» μορφή διάβρωσης: τα διαλυτά άλατα

Η διάβρωση από διαλυτά άλατα πλήττει όλες τις πέτρες που έχουν έστω και ελάχιστο πορώδες, έχει πολλές πηγές προέλευσης και, το χειρότερο, η αντιμετώπιση της είναι συνήθως δύσκολη και πολυδάπανη και πολλές φορές ακόμα και αδύνατη. Η πρόκληση των αλάτων μπορεί να είναι:

— από τη θάλασσα, που τροφοδοτεί συνεχώς με χλωριούχο και θειικό νάτριο και μαγνήσιο τα παραθαλάσσια μνημεία.

— από νερό που ανεδείχεται από το έδαφος με τριχοειδή αναρρίχηση και περιέχει πάντοτε διαλυμένα άλατα, χλωριούχα, θειικά και ανθρακικά (εικ. 2).

— από ταίμεντο, που όταν βρισκείται

σε επαφή με την πέτρα αποτελεί μόνη πηγή θεικών κύρια αλάτων. — από τη διάβρωση του ασβεστολιθού από διοξείδιο του θείου, που σχηματίζει γύψο.

Όταν το νερό που περιέχει διαλυμένα τα άλατα βρει την ευκαιρία να εξατμισθεί, τα άλατα κρυσταλλώνονται μέσα στους πόρους της πέτρας ασκώντας μεγάλες πιέσεις στα τοιχώματά τους. Χειρότερη κατάσταση δημιουργούν το θειικό και το ανθρακικό νάτριο, επειδή σε συνθήκη θερμοκρασία αλλάζουν κρυσταλλική μορφή με μεγάλη μεταβολή όγκου. Το αποτέλεσμα της δράσης των αλάτων σε πόρους πέτρας, ασβεστολιθικές ή ηρωστειακές, είναι η κατάρρευση του υλικού με μορφή ψιλής σκόνης και η δημιουργία ολο και μεγαλύτερων κοιλωμάτων στην επιφάνεια. Ο διεθνής όρος «alveolation» για αυτή την αρρωστία της πέτρας έχει αποδοθεί ελληνικά σαν «κυψέλωση». Συχνά, αντί για την κυψέλωση, δημιουργείται στην επιφάνεια της πέτρας μια λεπτή σκληρή κρούστα, ενώ μέσα από αυτήν το υλικό έχει χάσει εντελώς τη συνοχή του. Έτσι, στα σημεία που σπάει η κρούστα από κάποια τυχαία κτύπηση, κρυσταλλικά «αδειάζει» από μέσα η πέτρα με μορφή ψιλής σκόνης μέχρι μεγάλο βάθος.

Η διάγνωση είναι εύκολη...

Σπάνια σε ένα μνημείο υπάρχει μόνο μία από τις μορφές διάβρωσης που προαναφέραμε. Συνήθως υπάρχει συνδυασμένη δράση περισσότερων παραγόντων. Για παραδείγματα:

— Ο μαργαίκο ασβεστολιθός στα Β. τείχος της Ακρόπολης, διαβρώνεται από το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του θείου (διάλυση του ασβεστικού συστατικού), από το συνεχές θρέξιμο-στένγνιμο (κατάρρευση του αργιλικού συστατικού) και από τα διαλυτά άλατα που έχουν σαν προέλευση τη θάλασσα και τα προϊόντα διάβρωσης της ίδιας της πέτρας (θειικά).

— Η Ακρόπολη της Λίνδου διαβρώνεται από το θαλασσινό αλάτι και από τα θειικά κυρίως άλατα του τοιμέντου των ιταλικών ανασηλωμάτων. Μπορεί κανείς να σταθεί σε εκατοντάδες παραδείγματα. Για επαληθεύσει τον πόσο και ποιού παράγοντες διάβρωσης επιδρούν σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν μηχανήματα με τα οποία μπορεί κανείς να αναπαράγει συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης στο εργαστήριο: μηχανήματα που αναπαράγουν συνθήκες παγετού ή υγρασίας ή οξειδίων θείου ή διαβροχής με διάλυμα αλάτων. Από το συνδυασμό των λεπτομερειών επί τόπου παρατηρήσεων σε διάφορες

εποχές του χρόνου με τις πετρογραφικές αναλύσεις και τις εργαστηριακές δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης είναι δυνατή η διάγνωση των αιτιών φθοράς με αρκετή ασφάλεια.

... Τι γίνεται όμως με τη θεραπεία;

Αν αυτό το άρθρο είχε γραφτεί στις αρχές της δεκαετίας του 70, θα τέλειωνε με μια αισιόδοξη κορώνα, ότι υπάρχουν λύσεις για όλα τα παραπάνω προβλήματα, που βασίζονται στην επέλιψη ή στον εμποτισμό με κάποιο προσεκτικά επιλεγμένο πλαστικό. Αυτό θα σταματούσε αντίστοιχα την προσβολή της πέτρας από το διοξείδιο του θείου το άλλο θα την σκλήρυνε τόσο ώστε να μην παθαίνει διάρρηξη από τα διαλυτά άλατα κλπ. κλπ. Αυτή ήταν η πάγια πρακτική ως τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας και ήδη πάρα πολλά μνημεία ανά την υφήλιο είχαν «σωθεί» έτσι. Όταν όμως πέρασαν 10-15 χρόνια από την εφαρμογή του πλαστικού, άρχισαν να συμβαίνουν διάφορα απρόβλεπτα (...), όπως

— πέτρες που εμποτίστηκαν με ακληρυντικά «έσκασαν» ακριβώς στο όριο του εμποτισμού, γιατί τα άλατα που αναρριχάθηκαν από τον υδροφόρο ορίζοντα συσσωρεύτηκαν εκεί δημιουργώντας μεγάλες μηχανικές τάσεις.

— πολλά πλαστικά άρχισαν να κίτρινίζουν και να ξεφλουδίζουν.

— σε ρυπασμένη ατμόσφαιρα πόλεων άρχισε να εμφανίζεται γύψος κάτω ή και πάνω από το στρώμα πλαστικού που υποτίθεται πως προστατεύει την επιφάνεια.

Έτσι πολλά μνημεία πλήρωσαν αυτή την καταφωρη παραδίση του άρθρου 10 του Χάρτη της Βενετίας, που απαιτεί τα χρησιμοποιούμενα υλικά να έχουν γνωστές και δοκιμασμένες στο χρόνο ιδιότητες. Το χειρότερο στην περίπτωση ήταν ότι η εφαρμογή των πλαστικών είναι σχεδόν αναπείραστη, ιδιαίτερα όταν περάσει κάποιο χρονικό διάστημα από την καταγραφή (επέλιψη ή εμποτισμό) της πέτρας μ' αυτά.

Ευτυχώς στην Ελλάδα δεν υπήρξε ποτέ τέτοια περίοδος πλήρους εμπιστοσύνης στα υλικά προστασίας, και όταν τέθηκαν για πρώτη φορά συστηματικά τα προβλήματα διάβρωσης των κυριότερων ελληνικών μνημείων, βρισκόμασταν ήδη στη φση της γενικής κρίσης εμπιστοσύνης προς αυτά τα υλικά, και στη φση που άλλαζε η στρατηγική από την αντιμετώπιση του αποτελέσματος στην αντιμετώπιση του αίτιου. Έτσι σήμερα:

— Δεν εμποτίζει κανείς την πορώδη

πέτρα για να αντέξει στα διαλυτά άλατα, παρά προσπαθεί με αποστραγγίσεις και στεγνώσεις θεμελιών να παρεμποδίσει την άνοδο των αλάτων στην πέτρα.

— Δεν εμποτίζει την μαργαϊκή πέτρα για να αντέξει σε συνεχές θρέξιμο-στέγνωμα, παρά προσπαθεί να την διατηρεί σε συνθήκες συνεχούς υγρασίας (στην ανάγκη και με θάψιμο).

— Δεν κάνει επέλιψη με πλαστικό για να εμποδίσει τη διάβρωση από οξείδια του θείου, αλλά απομακρύνει τα γλυπτά τοποθετώντας τα σε αδρανή ατμόσφαιρα και επιδιώκει τη λήψη μέτρων για καθαρισμό της ατμόσφαιρας των πόλεων.

Εννοείται ότι το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο όσο περισσότεροι παράγοντες φθοράς συνυπάρχουν και όσο πιο τερογενείς είναι το δομικό υλικό (π.χ. κροκαλοπαγή ή κοχυλιάτες). Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι η κρίση στον τομέα των υλικών προστασίας, δεν σημαίνει ότι απορρίπτονται όλα τα υλικά για οποιαδήποτε χρήση. Απλά, υπάρχει μια τάση επιστροφής σε παραδοσιακά υλικά δοκιμασμένα στο χρόνο (π.χ. πολλές στερρώσεις με μικρές απαιτήσεις αντοχής μπορούν να γίνουν με ασθέστη) και μια τάση χρήσης καινούργιων υλικών που παρουσιάζουν αντιπροσέλιψη στην εφαρμογή τους. Για παράδειγμα, τα πολυφθοριωμένα παράγωγα, που αποτελούν μια καινούργια κατηγορία υδροφόβων ουσιών, εκπλύνονται από την επιφάνεια της πέτρας σε μια περίοδο 4-5 χρόνων. Έτσι αν για οποιοδήποτε λόγο δεν μας ικανοποιούν, απλώς δεν τα ξαναεφαρμόζουμε.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η οργανωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος «προστασίας της πέτρας» σε μια χώρα με τεράστιο αριθμό μνημείων απαιτεί μια έξ ου οργανωμένη υποδομή σε ειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό και σε μεγάλα και πανάκριβα μηχανήματα για πετρογραφικές αναλύσεις και δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης. Αυτό το τελευταίο κάνει αδύνατη την ύπαρξη αποκεντρωμένων εργαστηρίων για τέτοια κλίμακας έρευνα και επίβλεψη το σχήμα: εντοπισμός του προβλήματος από την Εφορεία Αρχαιοτήτων, εφαρμοσμένη έρευνα από το κεντρικό εργαστήριο, εξεύρεση μεθόδων προστασίας, εφαρμογή της μεθόδου από την Εφορεία, οπότε αυτό είναι δυνατό.

Και η τελευταία —και πολύ βασική— επισημάνση: στη συντήρηση της πέτρας πανάκειες δεν υπάρχουν. Σε πάμπολλες περιπτώσεις η χημεία και η γεωλογία, μετά από μακροχρόνη έρευνα, έχουν οψώσει τα χέρια ψη-

λά, αν όχι οριστικά, τουλάχιστον ώσπου να βρεθούν καινούργια υλικά και καινούργιες μέθοδοι για τις πιο περίπλοκες περιπτώσεις.

Για όποια ενδιαφέρεται να διαθέσει περισσότερα για τη φυσική διάβρωση της πέτρας, η καλύτερη λύση είναι να προσφύγει σε χειρουργία γεωλογίας. Μπορούμε να πούμε ότι ουσιαστικά δεν υπάρχει χειρουργείο που να ασχολείται αποκλειστικά με την πέτρα των μνημείων. Για το θέμα «διάβρωση και τρόποι προστασίας», η βιβλιογραφία δροσικάτα:

— στα πέντε διεθνή συνέδρια διάβρωσης και προστασίας της πέτρας (La Rochelle 1972, Αθήνα 1976, Βενετία 1979, Louisville - Kentucky 1982, Λωζάννη 1985), οργανωμένα από την αντίστοιχη διεθνή επιτροπή

— στα συνέδρια με παρόμοιο θέμα που διοργάνωσε στην Μπολόνια το 1975 και 1981 το Centro per la Conservazione delle Sculture all'Aperto.

— στο συνέδριο που διοργάνωσε το 1978 η UNESCO στο Παρίσι

— σε παρόμοια συνέδρια του ICOMOS, του ICOM, του ICCROM και άλλων διεθνών φορέων που ασχολούνται κατά οποιοδήποτε τρόπο με τα μνημεία (Ν. Υόρκη 1970, Ζάγκρεμπ 1975 κλπ.).

— στα λίγα περιοδικά που κυκλοφορούν με θέμα τη συντήρηση (όχι αποκλειστικά πέτρας), όπως «Durability of Building Materials» και «Studies in Conservation».

— ειδικά για το πρόβλημα «διάβρωση από οξείδια του θείου» μπορεί κανείς να προσφύγει στις εργασίες του Εργαστηρίου Φυσικοχημείας ΕΜΠ.

The Deterioration of Stone and How You Will (Not) Avoid It.

N. Belogiannis

The decay of stone monuments is due to a combination of factors caused by nature and man. The task to deal with this problem is hard if not unfeasible. The various «protection materials», which in past decades had been considered as efficient have today been proved, at least in their majority, unsuccessful, since progressively they create more problems than they solve.

Therefore, we experience today a strong tendency towards more «traditional» stabilization materials; a search for new protection materials; and a pursuit for treating the reason of deterioration rather than deterioration itself.