

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ, ΣΤΑ ΜΝΗΜΕΙΑ.

ΒΑΣΙΛΗΣ ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ Α.Π.Θ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποσάθρωση που προκαλείται στην επιφάνεια των φυσικών λίθων λόγω των κλιματικών μεταβολών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους παράγοντες φθοράς των ιστορικών μνημείων. Στην περιοχή της Μεσογείου το φαινόμενο είναι αρκετά έντονο και λόγω της δράσης των αλάτων που μεταφέρει ο θαλάσσιος άνεμος όχι μόνο στο παράλιο περιβάλλον αλλά και σε περιοχές που βρίσκονται προς την ενδοχώρα. Η διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας των γεωλογικών σχηματισμών στις θέσεις θεμελίωσης των μνημείων, συμβάλλει επίσης στην επιλογή των μεθόδων προστασίας. Είναι γνωστό άλλωστε ότι οι μεσογειακές χώρες παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωτεκτονική δομή που συνδέεται με σημαντικά φαινόμενα φυσικών καταστροφών.

Η αποσάθρωση μεταβάλλει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των φυσικών λίθων προκαλώντας προβλήματα ευστάθειας στα μνημεία. Οι ιδιότητες αυτές δεν είναι εύκολο να μελετηθούν με εφαρμογή των κλασικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονες κατασκευές, διότι απαιτούν μεγάλο μέγεθος δοκιμίων. Το μέγεθος αυτό δεν είναι δυνατό να διατεθεί στην περίπτωση της έρευνας σε μνημεία, έτσι, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων όπως είναι η μέτρηση της ταχύτητας διέλευσης των υπερήχων μέσα από το υλικό. Η ταχύτητα των υπερήχων συσχετίζεται άμεσα με τις δυναμικές παραμέτρους ελαστικότητας [μέτρο Young (E), συντελεστή Poisson (ν) και μέτρο διάτμησης (G)], την ανισοτροπία την πυκνότητα τη μηχανική αντοχή και το βαθμό αποσάθρωσης του υλικού. Το πορώδες, η απορροφητικότητα και η αντοχή σε τριβή μπορεί επίσης να συσχετιστεί με τα δεδομένα της ταχύτητας υπερήχων.

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (V, ASTM 597, ASTM D 2845-83)

Πρόκειται για έναν αξιόπιστο δείκτη όχι μόνο για τον προσδιορισμό της φυσικο-μηχανικής συμπεριφοράς αλλά επίσης για την εκτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης των πετρωμάτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η φορητή συσκευή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων PUNDIT. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται ο χρόνος διέλευσης ενός παλμού συχνότητας συνήθως 54-KHz (αλλά και 500 KHz, σε περιπτώσεις συμπαγών πετρωμάτων) μέσω του δοκιμίου, με τοποθέτηση ειδικών ακροδεκτών (transducers). Ειδικά transducers των 300-KHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγχρονη μέτρηση της ταχύτητας των P και S κυμάτων.

Οι δοκιμές γίνονται με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, ανάλογα με την περίπτωση. Ο άμεσος τρόπος αναφέρεται στην τοποθέτηση των transducers στις απέναντι βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου, ενώ στον έμμεσο τρόπο, ο οποίος αφορά επί τόπου μετρήσεις βραχιδών επιφανειών, τα transducers τοποθετούνται επί της ίδιας επιφάνειας. Οι τιμές που λαμβάνονται με τον τρόπο αυτό είναι κατά 5% υποβαθμισμένες έναντι της άμεσης μεθόδου.

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (Ed) και ο δυναμικός συντελεστής Poisson (ν_d) υπολογίζονται από τις ταχύτητες των P και S κυμάτων (V_p , V_s) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_d = kdV_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}, \quad V_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

Όπου: k : συντελεστής (συνήθως 1) και d : πυκνότητα

Οι τιμές των δυναμικών παραμέτρων ελαστικότητας είναι λίγο υψηλότερες από τις αντίστοιχες στατικές διότι λαμβάνονται με ταχεία εφαρμογή τάσης. Εντούτοις, έχουν διατυπωθεί διάφορες σχέσεις μεταξύ των δυναμικών και των στατικών παραμέτρων ελαστικότητας μερικές από τις οποίες δίδονται στον Πίνακα 1.

X / Y	Συνάρτηση	Συντελεστής Συσχέτισης (r)	Τυπική απόκλιση
Δυναμικό / Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας (E)	$E_d = -3.16 + 1.05E_s$	0.994	38.02
Dynamic / Static Poisson's Ratio	$\nu_d = 0.063 + 0.71\nu_s$	0.737	0.057
P-wave / Static Elasticity Modulus	$E_d = 3.02e^{0.00055V_p}$	0.970	38.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Σχέσεις μεταξύ στατικών και δυναμικών παραμέτρων ελαστικότητας (δεδομένα από οκτώ διαφορετικούς πετρωλογικούς τύπους από τη Γαλλία, Christaras et al., 1994)

Η σχέση μεταβολής της ταχύτητας υπερήχων με τις παραμέτρους ελαστικότητας (Mosse, 1990, Bruneau et al., 1995), επιτρέπει συγχρόνως την καταγραφή της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς, στο χώρο, ενός πετρώματος ως συνέπεια της μεταβολής της ταχύτητας των P και S κυμάτων (Zezza, 1991).

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ

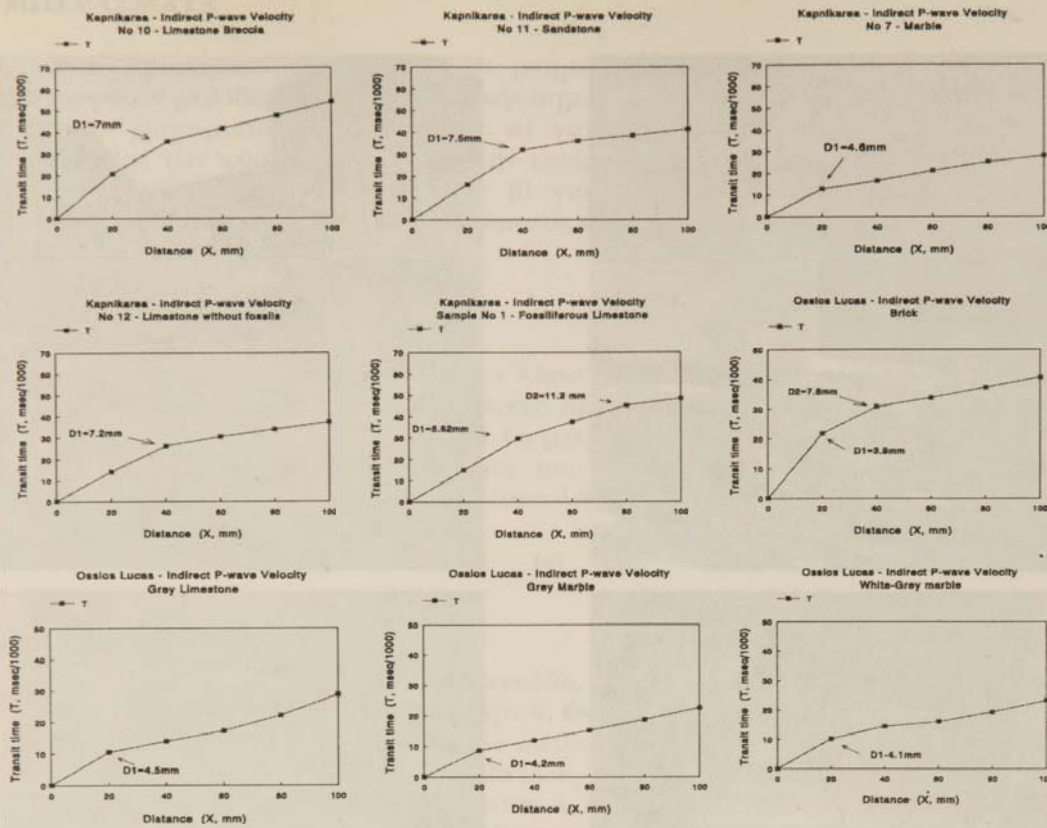
Η ταχύτητα διέλευσης ενός ακουστικού κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για την ταξινόμηση της ποιότητας των φυσικών λίθων καθώς και για την εκτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης (Topal & Doguran, 1995).

Το βάθος της αποσαθρωμένης ζώνης στην επιφάνεια ενός φυσικού λίθου μπορεί να εκτιμηθεί με εφαρμογή της έμμεσης μεθόδου υπολογισμού της ταχύτητας των P κυμάτων (Zezza, 1993). Στην περίπτωση αυτή το «transducer δέκτης» τοποθετείται στην ίδια επιφάνεια με το «transducer πομπό» και μετακινείται επί μιας ευθείας σε ίσες αποστάσεις. Ο χρόνος διέλευσης μετρείται σε κάθε θέση και τα δεδομένα τοποθετούνται σε διάγραμμα «απόστασης / χρόνου». Η μεταβολή της κλίσης της καμπύλης είναι αποτέλεσμα διαφορετικής πυκνότητας του υλικού, με το βάθος και επομένως η αποσαθρωμένη επιφανειακή ζώνη θα συνδέεται με μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης στο αντίστοιχο τμήμα. Μεταβολή της σύστασης του υλικού σε διάφορες θέσεις όπως και οι ρωγμές διαφοροποιούν το αποτέλεσμα της μέτρησης έτσι ώστε αυτά να ορίζονται στο χρόνο με ακρίβεια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το βάθος της ζώνης αποσάθρωσης δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$D = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

Όπου V_s : Ταχύτητα στο υγιές πέτρωμα (Km/s), V_d : ταχύτητα στην αποσαθρωμένη ζώνη (Km/s), X_0 : Απόσταση μεταβολής της κλίσης στο διάγραμμα (mm), D : βάθος αποσάθρωσης (mm)



ΕΙΚ. 1 Εκτίμηση του βάθους αποσάθρωσης σε αντιπροσωπευτικούς λίθους της Καπνικαρέας και του Όσιου Λουκά

Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε σε δομικούς λίθους της τοιχοποιίας του Ι.Ν. Καπνικαρέας (Εικ. 2α), στην Αθήνα και της Ι.Μ. Οσίου Λουκά. (Εικ. 2β,δ) στη Βοιωτία. Για τις ανάγκες της έρευνας, η μέθοδος εφαρμόστηκε, αξιόπιστα, σε διαφορετικά υλικά όπως συμπαγείς ασβεστόλιθοι, ασβεστολιθικά λατυποπαγή, απολιθωματοφόροι ασβεστόλιθοι, μάρμαρα διαφόρων χρωμάτων και κεραμικά. Μερικά αντιπροσωπευτικά διαγράμματα της έρευνας δίδονται στην Εικ. 1. Στα διαγράμματα αυτά διακρίνεται εμφανώς η μεταβολή της κλίσης της καμπύλης στο σημείο μεταβολής της ποιότητας του υλικού.

ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

Εκτός από τα παραδείγματα της προηγούμενης παραγράφου δύο ακόμη αντιπροσωπευτικά διαγράμματα, προερχόμενα από μετρήσεις στο Μακεδονικό Τάφο των Ανθεμίων, στα Λευκάδια, κοντά στη Νάουσα (3ος αι. π.Χ., Αλαμανή, 1995, Christaras et al., 1997, Εικ. 2γ), δίδονται στην Εικ. 3. Πρόκειται για μετρήσεις σε δύο εντελώς διαφορετικής πυκνότητας υλικά όπως είναι το μάρμαρο (συμπαγές) και ο τραβερτίνης (πορώδης). Το πρώτο διάγραμμα (Εικ. 3α) αντιστοιχεί στη μαρμαρίνη πόρτα του τάφου και το βάθος διάβρωσης εκτιμάται σε 6.9 mm. Το δεύτερο διάγραμμα (Εικ. 3β) αντιστοιχεί σε τραβερτίνη από τον οποίο συνίστανται οι ογκόλιθοι με τους οποίους έχει κατασκευασθεί ο τάφος. Στο διάγραμμα αυτό η μεταβολή της καμπύλης δεν εμφανίζει την απλούστευση του πρώτου διαγράμματος. Εδώ, για βάθη μεγαλύτερα των 6.8 mm (ζώνη αποσάθρωσης) παρατηρείται παράλληλη μετατόπιση της ευθείας σε θέσεις που αντιστοιχούν στους πόρους του τραβερτίνης.



(α)



(β)

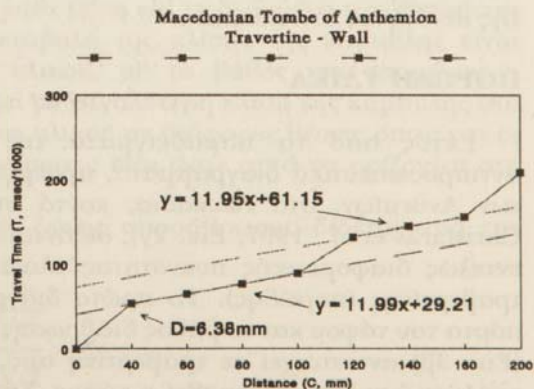
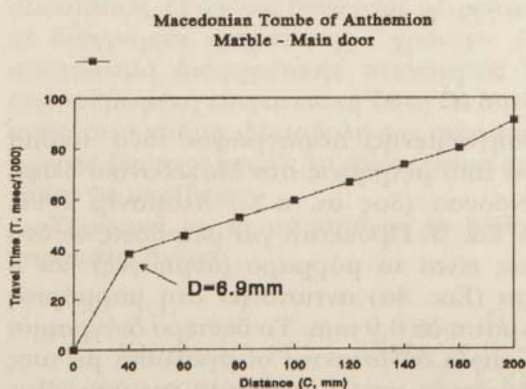


(γ)



(δ)

ΕΙΚ. 2 Τμήμα τοίχου της Καπνικαρέας (α) και του Όσιου Λουκά (β, δ) και μαρμάρινη πόρτα στον τάφο των Ανθεμίων (γ)



Εικ. 3 Διαγράμματα μεταβολής της ποιότητας του μαρμάρου (α) και του τραβερτίνη (β) στον Τάφο των Ανθεμίων (Λευκάδια)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σ' έναν ερευνητικό χώρο, όπως τα μνημεία, όπου η ανάγκη καθιέρωσης μη καταστροφικών μεθόδων είναι πρωταρχικής σημασίας, οι ταχύτητα των Ρ και S κυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα α) για τον υπολογισμό των παραμέτρων ελαστικότητας των φυσικών λίθων και την εκτίμηση της μεταβολής των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους και β) για τον υπολογισμό τόσο του βάθους αποσάθρωσης στην επιφάνεια ενός πετρώματος καθώς και της ποιοτικής μεταβολής του υλικού σε τυχαίες θέσεις της μάζας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι μετρήσεις στην Καπνικαρέα και τον Όσιο Λουκά έγιναν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος ΕΠΕΓ ΙΙ (μελέτης νέων υλικών προστασίας της πέτρας) με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθ. Θ. Σκουλικίδη (ΕΜΠ). Οι μετρήσεις στον Τάφο των Ανθεμίων έγιναν κατά τη διάρκεια γεωτεχνικής έρευνας που χρηματοδοτήθηκε από το ΥΠΠΟ, με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθ. Η. Μαριολάκο (ΕΚΠΑ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλαμανή, Β., *Η αρχαία Μίτζα.. Κοπανός, Λευκάδια, Νάουσα* Δήμος Νάουσας & ΙΖ' Εφορία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, Θεσσαλονίκη 1995.
- Bruneau, C. - Forrer, A. - Cuhe, A., «Une méthode d' investigation non destructive des matériaux pierreux: les mesures à l' ultrason», *Proceedings of the Congr. LCP '95: Preserv. and Restor. of Cultur. Heritage*, Montreux, Switzerland 1995, 187-195.
- Christaras, B. - Auger, F. - Mosse, E., «Determination of the elastic moduli of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods to the direct static one», *Materials & Structures*, 27, 1994, 222-228.
- Christaras, B. - Mariolagos, I. - Foundoulis, J. - Athanasias, S. - Dimitriou, A., «Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece», *Proceedings of the IVth International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Rhodes 1997, pp. 125-132..
- Mosse, E., *Relations entre vitesse du son, module d' élasticité et coefficient de Poisson, mesurés par des méthodes statiques et dynamiques. Application aux matériaux pierreux.- D.E.A., Univer. Poitiers, La Rochelle*, 1990, 1-100.
- Topal, T. - Doyuran V., «Ultrasonic testing of artificially weathered cappadocian tuff», *Proceedings of the Congr. LCP '95: Preserv. and Restor. of Cultur. Heritage*, Montreux, Switzerland 1995, 205-213.
- Zeza, U., «Decay evolution depending on the textural anisotropy of marbles in monuments», *Proceedings of the 2nd Intern. Symp. Conserv. Monum. Medit. Basin*, Geneve, Switzerland 1991, 289-302.
- Zeza, F., «Evaluation criteria of the effectiveness of treatments by non destructive analysis», *Proceedings of the 2nd Course of CUN University School of Monument Conservation*, Heraklion 1993, 198-207.

SUMMARY

NON DESTRUCTIVE METHODS FOR ESTIMATING THE SURFACE DAMAGE OF STONES, IN MONUMENTS

V. CHRISTARAS

In the present paper the building stones of Kapnikarea Church, in Athens (Central Greece), Osios Lukas Monastery, in Beotia region (Central Greece), and some Macedonian Tombs near Naoussa City (Northern Greece) were investigated regarding their weathering conditions, using ultrasonic velocity techniques. Main purpose of this investigation was to estimate the depth of weathering so as the most proper protection methods to be used. The materials were very different between them, in porosity and petrology, a fact that strengthens the accuracy of the method used.

The investigation was performed using the indirect method, which refers to the arrangement of the transducers on the same surface of a stone. In this method if the points of the diagram "time travel - distance between the transducers" do not lie in a straight line and the pulse velocity near the surface is much lower than inner, it is an indicator that the stone near the surface is damaged.