

12 Ιουνίου 2013

Διάγνωση φθοράς δομικών υλικών ιστορικών μνημείων

Πολιτισμός / Διαχείριση μελέτη και συντήρηση πολιτισμικής κληρονομιάς

Παναγιώτης Σπαθής, Καθηγητής



Εισαγωγή



λικών και η

διάγνωση της φθοράς είναι το π

απαραίτητο βήμα για μια σωστή προσέγγιση για τον προγραμματισμό των

παρεμβάσεων συντήρησης. Η καταγραφή και η παρουσίαση των τύπων και της έκτασης των ζημιών είναι ένα από τα πιο σημαντικά καθήκοντα για τον έλεγχο της εξέλιξης της φθοράς και τον καλύτερο προγραμματισμό των παρεμβάσεων συντήρησης.

Η σύγχρονη τεχνολογία μας επιτρέπει να γίνει αυτό με χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών επί τόπου, καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή μιας πιο σύγχρονης μεθόδου ελέγχου της παθολογίας ενός κτιρίου, χωρίς κανενός είδους αλλοιώσεις του, (τεχνικές δειγματοληψίας και καταστροφικές τεχνικές). Στις περιπτώσεις φυσικά που είναι δυνατόν να λαμβάνονται δείγματα και καθώς οι μη καταστρεπτικές τεχνικές είναι σε συνεχή ανάπτυξη και τυποποίηση, η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται επί τόπου με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση των βασικών αρχών, των λαμβανόμενων πληροφοριών καθώς και των πεδίων εφαρμογής με χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων για την μελέτη της κατάστασης φθοράς των δομικών υλικών ιστορικών μνημείων και την αξιολόγηση εφαρμοζόμενων μεθόδων και υλικών συντήρησης.

Παρουσιάζονται τέσσερις από τις κυριότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μέχρι σήμερα Μη Καταστρεπτικές Τεχνικές: Μικροσκοπία Οπτικών Ινών, Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας, Υπερηχοσκόπηση, Υπέρυθρη Θερμογραφία.

Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optics Microscopy-FOM)

Η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών αποτελεί μια αποτελεσματική διαγνωστική διαδικασία ικανή να προσδιορίσει τις περιοχές της φθοράς, τις αλλοιώσεις της μορφολογίας της επιφάνειας, την έκταση και το πάχος των διαβρωμένων περιοχών, καθώς και να καταστήσει δυνατή την ταυτοποίηση και ταξινόμηση των φθαρμένων περιοχών πριν και μετά από διεργασίες καθαρισμού της επιφάνειας [1-4].

Αερομεταφερόμενοι ρύποι επηρεάζουν τα δομικά υλικά σχηματίζοντας μαύρες ή διαφόρων χρωματισμών κρούστες στις επιφάνειες των υλικών. Γενικά οι διάφορες χρωματικές αλλοιώσεις μπορεί να οφείλονται σε υπολείμματα παλαιών πολυχρωμιών, μετανάστευση ιόντων σιδήρου (σχηματισμός καστανέρυθρης πατίνας οξειδίων - υδροξειδίων), αποικίες μικροοργανισμών (καστανέρυθρες ή μαύρες κρούστες), επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε γυψοποιημένες επιφάνειες (κρούστες διαφόρων χρωματισμών), συνδυασμό διαδοχικών ανακρυσταλλώσεων - εγκλεισμού ασβεστίτη, γυψοποίησης, διαδοχικών

επικαθίσεων σωματιδίων, αποικιών μικροοργανισμών (μαύρη κρούστα), προγενέστερες επεμβάσεις. Λευκά σωματίδια υποδηλώνουν συνήθως την παρουσία κρυστάλλων γύψου και ανακρυσταλλωμένου ανθρακικού ασβεστίου.

Η μικροσκοπική οπτική επιθεώρηση, μέσω τεχνικών **Επεξεργασίας Εικόνας** - μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις διαβρωμένες περιοχές σε έργα τέχνης και την μη καταστροφική ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των αποσαθρωμένων περιοχών σε επιφάνειες μαρμάρου και πέτρας. Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας εφαρμόζεται επίσης στις λαμβανόμενες φωτογραφίες για την συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μιας εφαρμοζόμενης διεργασίας καθαρισμού καθώς και τον βαθμό απομάκρυνσης των στρωμάτων της κρούστας, των επικαθίσεων, προσμείξεων, κ.λπ. Για την ανάλυση των διαφόρων χρωματισμών σωματιδίων που παρατηρούνται στις εκτεθειμένες - διαβρωμένες περιοχές των υλικών χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό Η/Υ. Μια



σειρών σημάτων μέχρι 10 εκατομμύρια για τη μεταφορά εικόνων.

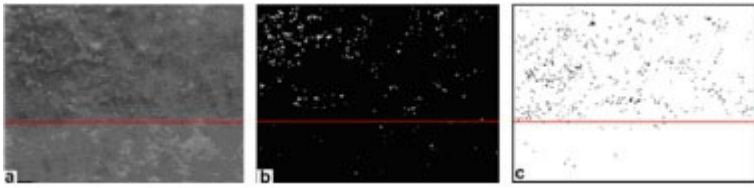
Σχ. 1 [1] Μαύρα και άσπρα σωματίδια

σε επιφάνεια πέτρας: (a) προφυλασσόμενη και (b) μη προφυλασσόμενη από τη βροχή - παρατήρηση με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών.

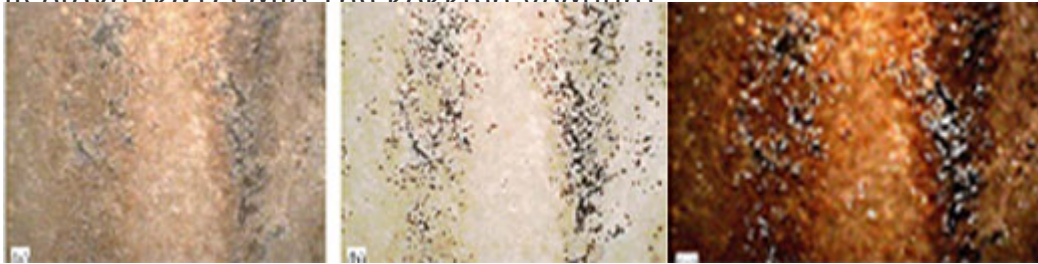
Στις προφυλασσόμενες επιφάνειες (a) οι κρούστες αναπτύσσονται πιο εκτεταμένα, είναι παχύτερες και με πιο σκούρο χρώμα από ότι στις μη προφυλασσόμενες επιφάνειες. Οι επιφανειακές ανωμαλίες λειτουργούν σαν κοιλότητες όπου αποτίθενται ρύποι και αερομεταφερόμενα σωματίδια (ιπτάμενη τέφρα, οξειδία των μετάλλων, ανθρακικά σωματίδια, σκόνη, κλπ).

Οι εκτεθειμένες στη βροχή περιοχές (b) χαρακτηρίζονται από φαινόμενα διαλυτοποίησης και αποκόλλησης των επιφανειακών στρωμάτων της πέτρας,

αποτέλεσμα της επίδρασης της βροχής και του αέρα. Συσσωρεύονται λιγότεροι ρύποι λόγω της έκπλυσης από τη βροχή.

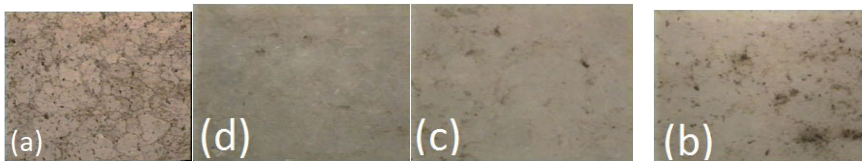


Σχ. 2 [1] (a) Κοιλότητα σε εκτεθειμένη επιφάνεια μαρμάρου, (b) άσπρα (c) μαύρα σωματίδια σε μη καθαρισμένη (πάνω από την κόκκινη γραμμή) και καθαρισμένη περιοχή (κάτω από την κόκκινη γραμμή)



Σχ. 3 [3] (a)

Λίθος, καθαρισμένες και ακαθάριστες περιοχές, (b) μαύρα (c) άσπρασωματίδια.



Σχ. 4 [4] Εικόνες επιφάνειας (a) διακρυσταλλικές ρωγμές με μεγάλη παρουσία μαύρων επικαθήσεων πριν από καθαρισμό, μετά από καθαρισμό με (b) πάστα AB57, (c) πάστα EDTA, (d) πάστα σεπιόλιθου με απιονισμένο νερό.

Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας - Digital Image Processing (DIP)

Στην έρευνα της πολιτιστικής κληρονομιάς, η χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνας συνεισφέρει σημαντικά, χρησιμοποιούμενη μαζί με συμβατικές μεθόδους, στην μελέτη και διάγνωση της φθοράς των λίθινων δομικών υλικών των ιστορικών των ιστορικών μνημείων. Η εφαρμογή μιας κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας της εικόνας σε έγχρωμες εικόνες λίθινων υλικών δίνει χρήσιμες πληροφορίες για περιοχές φθοράς που χαρακτηρίζονται από εσοχές ή ρωγμές. Απαιτείται αξιολόγηση των δυνατοτήτων των διαφόρων μεθόδων/αλγορίθμων επεξεργασίας της εικόνας ώστε να εξαχθούν αντίστοιχα ασφαλή συμπεράσματα [5-12].

Μια τέτοια μεθοδολογία περιλαμβάνει:

Λήψη σειράς εικόνων των φθαρμένων επιφανειών της πέτρας με μικροσκόπιο οπτικών ινών (FOM) και ψηφιακή κάμερα.

Πειραματική εφαρμογή διαφόρων τεχνικών για την απόκτηση χρωματικά και γεωμετρικά σωστών εικόνων.

Χρήση έγχρωμων εικόνων ώστε να μπορεί να ληφθεί και να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος όγκος πληροφοριών.

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των περιοχών φθοράς και την λήψη ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά των φθαρμένων επιφανειών, το μέγεθος και την περίμετρο τους, συνδυάζονται δύο τεχνικές:

- Τεχνική ορίου (Histogram thresholding technique)
- Τεχνική ανίχνευσης ακμών (Edge detection technique)

Οι εξεταζόμενες εικόνες παρουσιάζουν δύο είδη φθαρμένων περιοχών που χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφες σκούρες περιοχές και φωτεινότερες περιοχές αντίστοιχα. Και οι δύο περιοχές παρουσιάζουν ενδιαφέρον και θα πρέπει να γίνει επεξεργασία τους με την κατάλληλη τεχνική. Η πρώτη σχετίζεται με ρωγμές ή εσοχές ενώ η δεύτερη με λιγότερο φθαρμένες περιοχές ή παρουσία επικαθήσεων.

Τεχνική ορίου (Histogram thresholding technique):

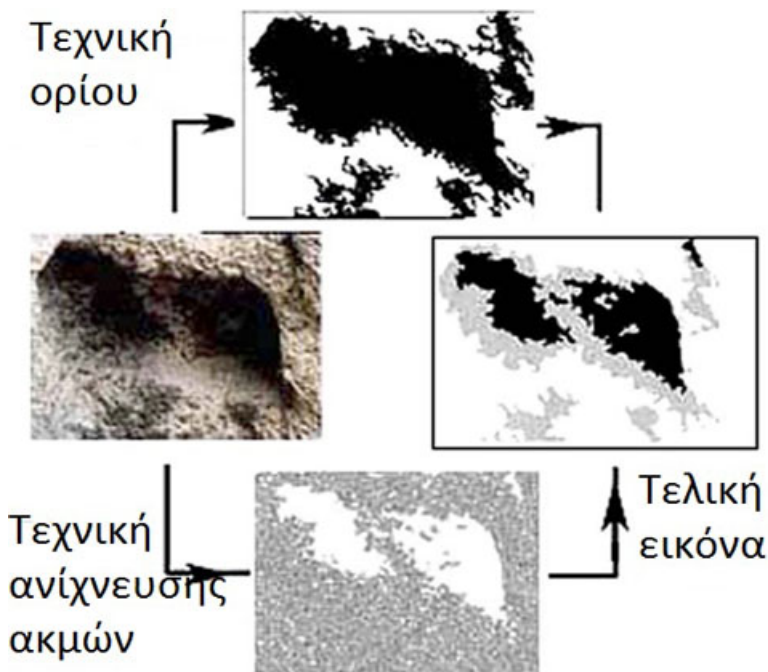
Η εικόνα (ασπρόμαυρη ή έγχρωμη) μετατρέπεται σε δυαδική: Κάθε σημείο της εικόνας (pixel) έχει μία τιμή φωτεινότητας. Μια αριθμητική αντιπροσώπευση μηδενός συνήθως αντιπροσωπεύει το **μαύρο** και η μέγιστη τιμή αντιπροσωπεύει το **λευκό**. Πχ. σε μια εικόνα οκτώ δυαδικών ψηφίων (bits), η μέγιστη τιμή που μπορεί να αναπαρασταθεί από αυτά είναι $2^8=256$, έτσι το 255 είναι η τιμή που χρησιμοποιείται για το λευκό και η τιμή 0 για το μαύρο. Ορίζεται μια οριακή τιμή. Εάν η ένταση (φωτεινότητα) ενός pixel είναι μικρότερη, στην τελική εικόνα θα

εμφανίζεται **μαύρο**. Αν είναι μεγαλύτερη **λευκό**. Μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η απώλεια τοπικών λεπτομερειακών πληροφοριών

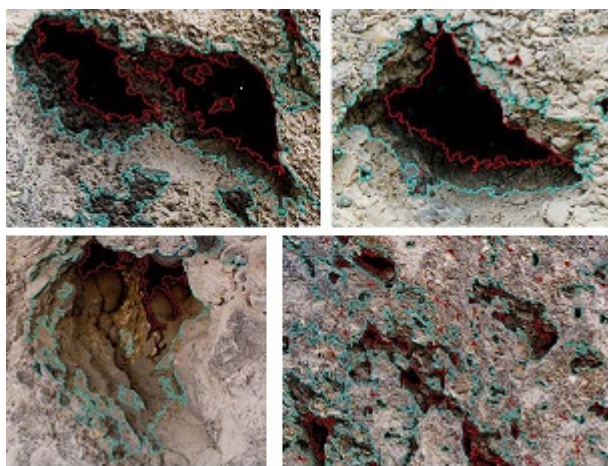
Τεχνική ανίχνευσης ακμών (Edge detection technique):

Με την τεχνική αυτή ανιχνεύονται στην εικόνα σημεία με απότομες μεταβολές έντασης (φωτεινότητας) και έτσι προσδιορίζονται με σαφήνεια το όρια των φθαρμένων περιοχών. Δίνει σαφή αποτελέσματα σε εικόνες που εμφανίζουν ικανοποιητικές αντιθέσεις (ασυνέχειες) μεταξύ των διαφόρων περιοχών που περιέχονται σε αυτές.

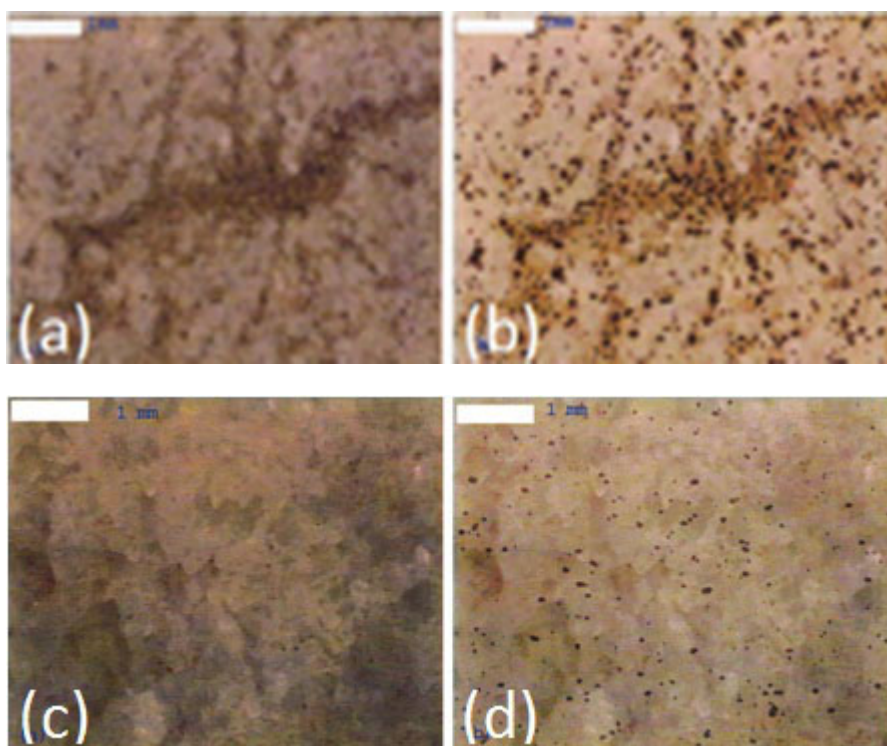
Η συνδυασμένη εφαρμογή των δύο αυτών τεχνικών παρέχει πληρέστερες πληροφορίες για την ένταση, το μέγεθος της φθοράς και τα όρια των φθαρμένων περιοχών.



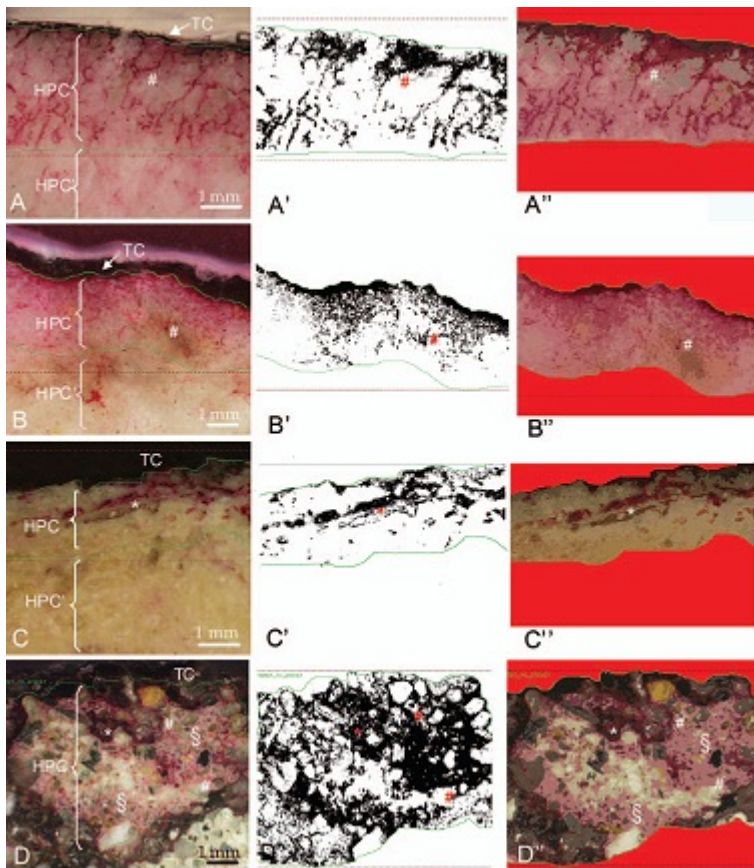
Σχ. 5 [5] Η συνδυασμένη εφαρμογή των 2 μεθόδων επιτρέπει την λήψη λεπτομερών πληροφοριών για το μέγεθος και την ένταση της φθοράς. Η τελική εικόνα ταυτοποιεί περιοχές με δομή ή χωρίς δομή. Οι μαύρες περιοχές είναι ζώνες εσοχών-κοιλοτήτων και οι γκρι περιοχές ζώνες επιφανειακής φθοράς.



Σχ. 6 [5] Τα μπλε περιγράμματα ορίζουν τα επιφανειακά όρια των κοιλοτήτων και τα κόκκινα περιγράμματα οριοθετούν τις βαθύτερες ζώνες των κοιλοτήτων.



Σχ. 7 [6] (a) Ρωγμές και τοπικές φθορές σε προφυλασσόμενη επιφάνεια (FOM), (b) Επεξεργασμένη εικόνα (DIP), (c) Ρωγμές και τοπικές φθορές σε μη προφυλασσόμενη επιφάνεια (FOM), (d) Επεξεργασμένη εικόνα (DIP).



Σχ. 8 [7] Επεξεργασία εικόνων επιφανειών πέτρας με παρουσία μικροοργανισμών με χρωματική κατάταξη των pixel. A: μη πορώδες μάρμαρο, B: πορώδες μάρμαρο, C: τραβερτίνης, D: κονίαμα. *Verrucaria macrostoma* (A, C, D) *nigrescens* (B). A-D: μικροφωτογραφίες, A'-D': αναγνώριση υποστρώματος (λευκές περιοχές) και μικροοργανισμών (μαύρες περιοχές), A''-D'': Ανάκτηση των αρχικών pixels με διαφοροποίηση χρωματικών κατηγοριών για το υπόστρωμα (grey) και τους μικροοργανισμούς (violet).

Υπερηχοσκόπηση - Ultrasonics

Η μετάδοση ελαστικών κυμάτων (υπερήχων-ultrasonics) και ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης τους σε ένα υλικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό της φυσικής του κατάστασης. Σε ένα στερεό η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως: πυκνότητα του υλικού, ποσότητα και μέγεθος των πόρων ή κοιλοτήτων, ποσότητα της υγρασίας που βρίσκεται στους πόρους του υλικού. Αρα η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από την φύση του υλικού δια μέσου του οποίου διαδίδεται, δηλ. τα χαρακτηριστικά σύστασης και δομής του [13-19].

Οι μεταβολές της ταχύτητας μετάδοσης μπορούν να αξιολογηθούν και να

προκύψουν συμπεράσματα για την ποιότητα και την ανθεκτικότητα λίθων και μαρμάρων σε ιστορικά μνημεία και την μελέτη ιδιοτήτων τους όπως μηχανική ανισοτροπία, μηχανική αντίσταση (διατμητική και θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας), πορώδες, ύπαρξη ρηγματώσεων, αποτίμηση του βαθμού φθοράς και της απόδοσης μεθόδων και τεχνικών συντήρησης - αποκατάστασης. Η παρουσία υγρασίας επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα των υπερήχων η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την ύπαρξη νερού στους πόρους του υλικού και οι συνθήκες κορεσμού αυξάνουν την ταχύτητα.

Με την μέθοδο αυτή είναι δυνατή η εκτίμηση του βάθους της φθοράς, του πάχους προστατευτικών επιστρωμάτων, του βαθμού διείδυσης στερεωτικών υλικών, του βάθους ρωγμών που υπάρχουν στην επιφάνεια ενός υλικού. Για την μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων χρησιμοποιούνται συνήθως παλμοί συχνότητας 54-KHz έως 300 kHz ή 500-KHz και υπολογίζεται η ταχύτητα με βάση το χρόνο διάδοσης, t , και την απόσταση, L : ταχύτητα υπερήχων, $UV = L/t$.

Τα πειράματα μπορούν να πραγματοποιηθούν με την χρήση της άμεσης ή της έμμεσης μεθόδου, ανάλογα με την συγκεκριμένη εφαρμογή και τις συνθήκες. Η άμεση μέθοδος αναφέρεται στην τοποθέτηση του πομπού και του δέκτη της συσκευής σε απέναντι επιφάνειες του υλικού. Η έμμεση μέθοδος, χρησιμοποιούμενη ευρέως σε in-situ μετρήσεις, αναφέρεται στην τοποθέτηση πομπού και δέκτη στην ίδια επιφάνεια (πλευρά) του υλικού.

Το βάθος της φθοράς στην επιφάνεια του λίθου μπορεί να εκτιμηθεί με την εφαρμογή της έμμεσης μεθόδου μέτρησης της ταχύτητας των υπερήχων. Στην περίπτωση αυτή ο πομπός τοποθετείται σε ένα σταθερό αρχικό σημείο, ο δέκτης μετακινείται διαδοχικά σε διάφορα σημεία στην επιφάνεια του λίθου και λαμβάνονται αντίστοιχες μετρήσεις κατά μήκος καθορισμένης γραμμής. Καταγράφεται ο χρόνος διάδοσης και υπολογίζεται η αντίστοιχη ταχύτητα με βάση την απόσταση πομπού-δέκτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων (ή χρόνου) - μήκους. Μειωμένες τιμές ταχύτητας (ή αυξημένοι χρόνοι) υποδεικνύουν περιοχές φθοράς. Αλλαγή της κλίσης της ευθείας δηλώνει μεταβολή του πάχους της φθοράς. Με βάση το διάγραμμα υπολογίζεται το πάχος της διαβρωμένης επιφάνειας, D .

Η τοποθέτηση πομπού-δέκτη στην ίδια επιφάνεια του λίθου αλλά στις απέναντι πλευρές μιας ρωγμής επιτρέπει τον υπολογισμό του βάθους της ρωγμής, h . Στο λαμβανόμενο διάγραμμα παρατηρείται μετατόπιση της ευθείας, οφειλόμενη στο βάθος της ρωγμής, h , το οποίο και υπολογίζεται.

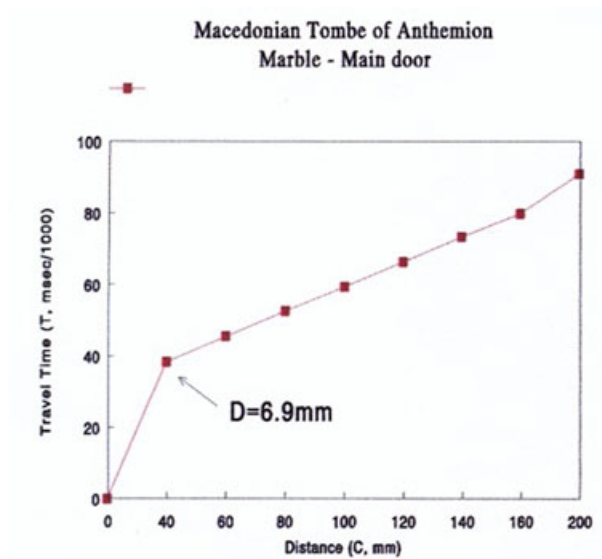
$$D = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

όπου: D: πάχος φθοράς (mm), X_0 : οριζόντια απόσταση όπου παρατηρείται αλλαγή κλίσης (mm), V_s : ταχύτητα υπερήχων στην υγιή επιφάνεια (Km/s):

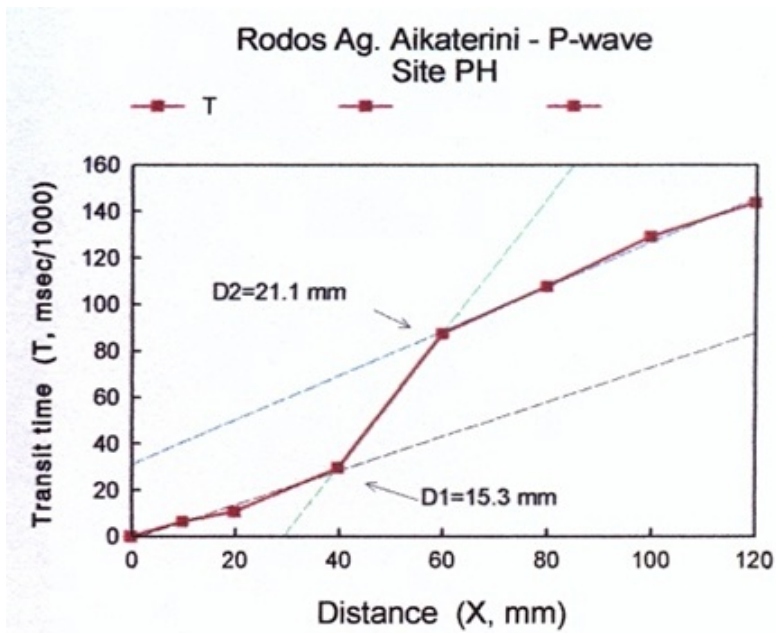
$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

V_d : ταχύτητα υπερήχων στην φθαρμένη επιφάνεια (Km/s),

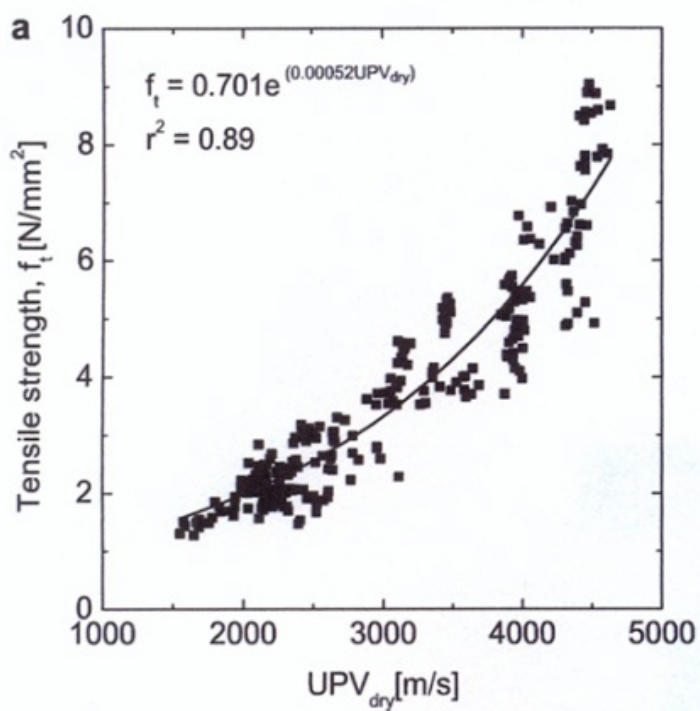
h: βάθος ρωγμής, L: απόσταση μετατόπισης, T_1 , T_2 : χρόνοι πριν και μετά την ρωγή στο σημείο της μετατόπισης.



Σχ. 9 [16] Μαρμάρινη πόρτα του Τάφου του Ανθεμίωνα (Lefkadia Macedonian Tomb, N. Greece) και υπολογισμός του βάθους φθοράς. Ο χρόνος διάδοσης των υπερήχων είναι σταθερός για βάθη μεγαλύτερα των 6.9 mm.

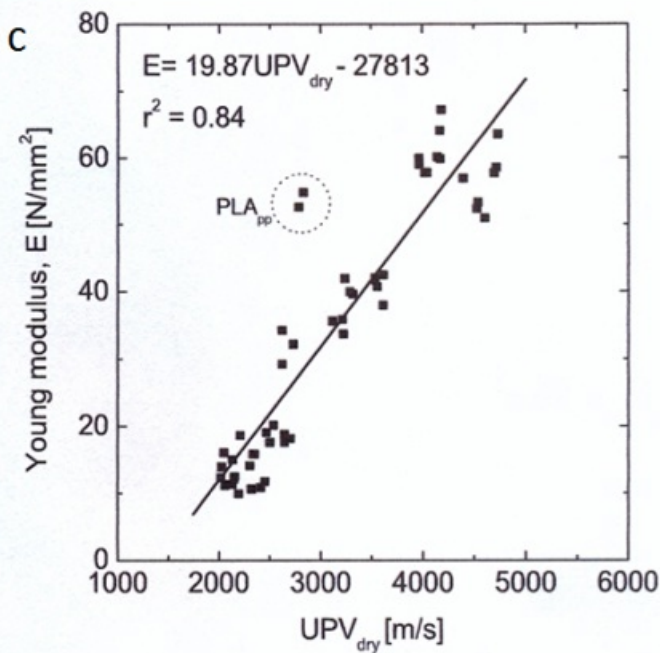
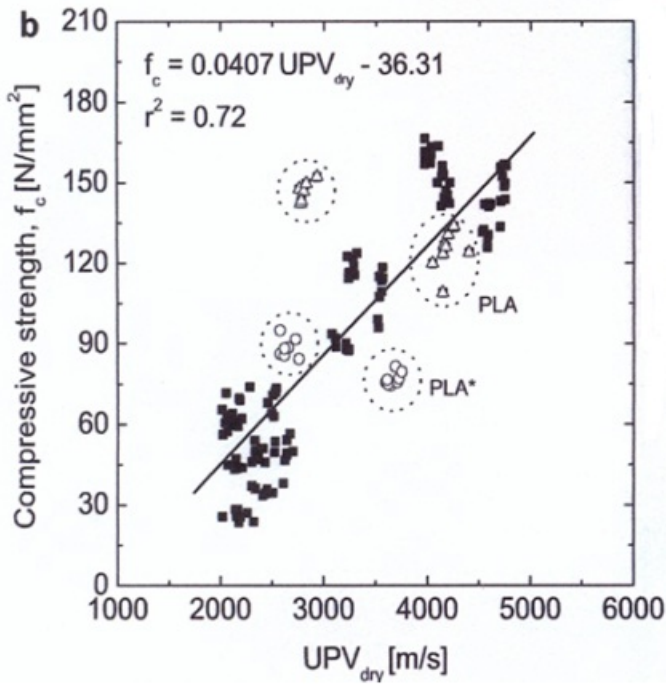


Σχ. 10 [16] Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων (χρόνος-μήκος) σε κατεργασμένη με στερεωτικό υλικό επιφάνεια των ασβεστολιθικών λίθων. Η αλλαγή της κλίσης της ευθείας αντιστοιχεί και σε βάθος στερέωσης και σε βάθος φθοράς.



Σχ. 11 [14] Συσχέτιση ταχύτητας υπερήχων - αντοχής γρανίτη: (a) UPV vs

Διατμητική αντοχή (b) UPV vs Θλιπτική αντοχή, (c) UPV vs μέτρο ελαστικότητας.



Υπέρυθρη Θερμογραφία - Infrared Thermography

Η Υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μη καταστρεπτική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει σε διάφορες εφαρμογές και ειδικότερα την αξιολόγηση των δομικών υλικών και τεχνικών. Εφαρμόζεται στις μελέτες αποκατάστασης δομικών υλικών ιστορικών μνημείων, την διάγνωση των αιτίων και της έκτασης της διάβρωσης και φθοράς, την αξιολόγηση των εργασιών συντήρησης (υλικά και τεχνικές καθαρισμού,

στερέωσης, προστασίας) [20-27].

Με την υπέρυθρη θερμογραφία μετράται η θερμότητα που εκπέμπει ένα σώμα και καταγράφεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος. Οι μετρήσεις γίνονται με ειδικές κάμερες, που ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εστίαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, από τον οπτικό φακό. Μέσω αυτού, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνάει στον ανιχνευτή υπερέυθρων, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα στους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, όπου γίνεται η μετατροπή των δεδομένων αυτών σε έγχρωμη θερμική εικόνα. Με αυτή τη διαδικασία, η ένταση της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό σε έγχρωμη θερμική εικόνα, που εμφανίζεται σε ειδική οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD). Για να είναι ένα θερμογράφημα αξιόπιστο, πρέπει κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων να λαμβάνονται υπόψη και οι συνθήκες του συγκεκριμένου περιβάλλοντος (σκόνες, υγρασία, εκπομπή αερίων, ατμοί, ταχύτητα ανέμων για εξωτερικούς χώρους κ.λπ.), με κατάλληλες ρυθμίσεις ή και με την τοποθέτηση κατάλληλων φίλτρων στις κάμερες, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν τις μετρήσεις, είναι οι ιδιότητες της επιφάνειας του μετρούμενου σώματος και ο συντελεστής εκπομπής.

Το θερμογράφημα, που είναι η θερμική ψηφιακή απεικόνιση ενός αντικειμένου, αποτελείται από pixels. Αυτά περιέχουν το χρώμα, που είναι ανάλογο της θερμοκρασίας της στοιχειώδους επιφάνειας του αντικειμένου, στην οποία αντιστοιχεί. Η αντιστοίχιση των χρωμάτων γίνεται αυτόματα από το ηλεκτρονικό σύστημα της κάμερας, έτσι ώστε στο θερμογράφημα να είναι εύκολα αντιληπτή η θερμοκρασιακή κατανομή στη επιφάνεια του αντικειμένου. Έτσι μπορούν να προκύψουν σημειακή μέτρηση θερμοκρασίας, μέτρηση θερμοκρασίας κατά μήκος γραμμής σε οποιαδήποτε διεύθυνση με απεικόνιση σε διάγραμμα του θερμοκρασιακού προφίλ κατά μήκος της γραμμής, μέτρηση θερμοκρασίας σε καθορισμένη περιοχή με υπολογισμό μέγιστης, ελάχιστης, μέσης τιμής της θερμοκρασίας καθώς και ισοθερμοκρασιακή κατανομή με προσδιορισμό περιοχών της επιφάνειας, που έχουν την ίδια θερμοκρασία. Είναι δυνατή ακόμα η αναγνώριση διαφόρων υλικών, με διαφορετική θερμική αντίσταση που βρίσκονται σε μια τοιχοποιία λόγω της διαφορετικής ταχύτητας μεταφοράς της θερμότητας. Με την θερμογραφία μπορεί επίσης να εντοπιστεί η ύπαρξη νερού ή υγρασίας σε δομικά υλικά (π.χ. ύπαρξη νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης από το έδαφος). Η κίνηση του νερού μέσω των πόρων του υλικού καθώς επίσης και η διαφορετική θερμοκρασιακή του συμπεριφορά λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του, έχει σαν αποτέλεσμα την επιφάνεια της κατασκευής.



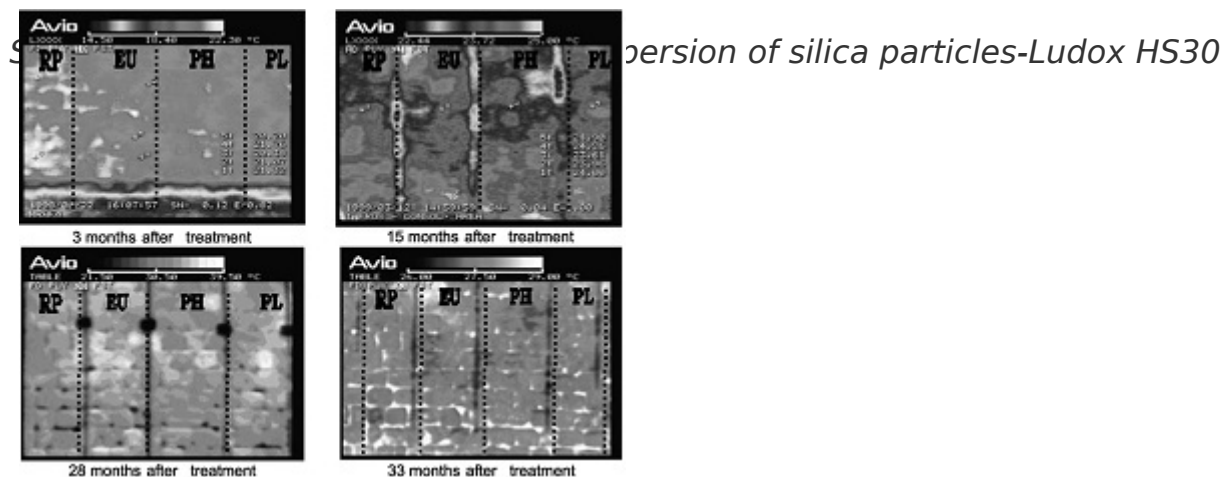
Σχ. 12 [20] Τμήματα τοιχοποιίας στην

μεσαιωνική πόλη της Ρόδου, όπου εφαρμόστηκαν διάφοροι μέθοδοι και υλικά στερέωσης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα υλικά με βάση το πυρίτιο, τα οποία παρουσιάζουν καλή συμβατότητα με την πέτρα, χημική και χρωματική σταθερότητα. Λόγω του χαμηλού ιξώδους των προϊόντων αυτών, είναι μικρή η διείσδυση τους μέσα στην μάζα της πέτρας.

RP-Ethyl silicate Rhodorsil-RC 70

EU-Acryl silicic resin-ACS 2001

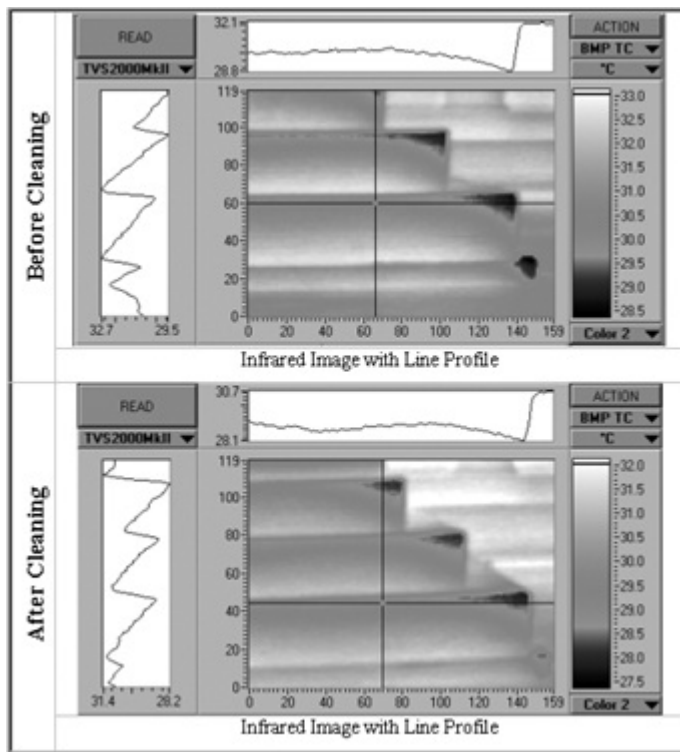
PH-Prehydrolysed ethyl silicate with amorphous silica-



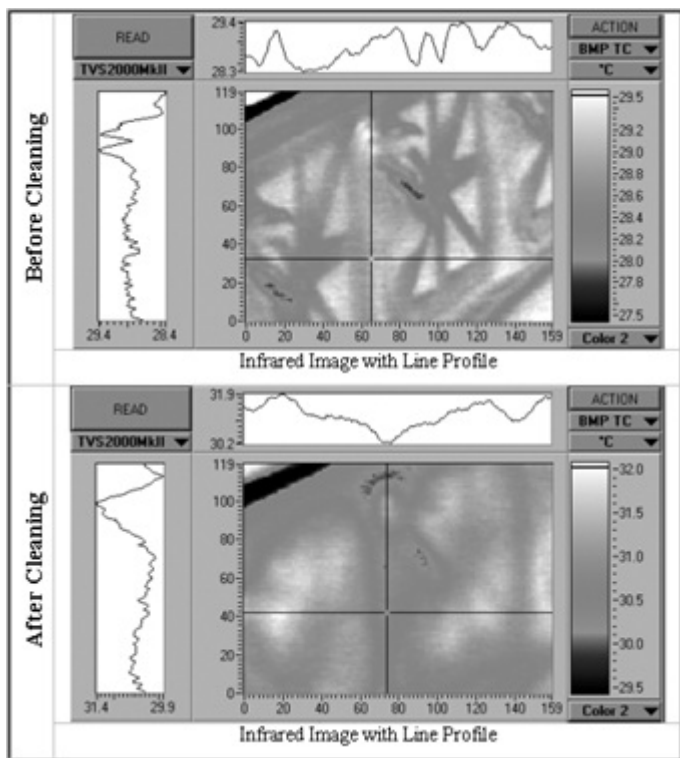
Σχ. 13 [20] Θερμικές εικόνες 3, 15, 28 και 33 μήνες μετά την πραγματοποίηση των εργασιών στερέωσης. Παρατηρούνται διαφορετικές θερμοκρασίες στο ίδιο ύψος της πέτρας, λόγω της χρήσης διαφορετικών στερεωτικών. Περιοχές όπου έγιναν εργασίες στερέωσης με τα υλικά RP και EU, εμφανίζουν σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές των κατεργασιών με PH και PL. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι τα υλικά των δύο πρώτων κατεργασιών έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα στους υδρατμούς, επιτρέποντας την «αναπνοή» της πέτρας.



Σχ. 14 [21] Επιφάνειες μαρμάρου, (a) Ακαδημία Αθηνών, (b) Εθνική Βιβλιοθήκη



Σχ. 15 [21] Θερμογραφικά αποτελέσματα - επιφάνεια μαρμάρου Ακαδημίας Αθηνών πριν και μετά από εργασίες καθαρισμού. Καθώς κατά την διάρκεια του καθαρισμού (μέθοδος υγρής μικροαμβολής) χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες ποσότητες νερού, σημαντικές ποσότητες υγρασίας παρέμειναν και ανιχνεύονται στην επιφάνεια του μαρμάρου.



Σχ. 16 [21] Θερμογραφικά αποτελέσματα - επιφάνεια μαρμάρου Εθνικής. Η θερμοκρασία της καθαρισμένης επιφάνειας αυξήθηκε. Είναι πιθανό η αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας να επηρέασε την απορρόφηση και αντανάκλαση της

ηλιακής θερμότητας και έτσι παρατηρείται έντονη οπτική - θερμική διαφορά μεταξύ λείων και τραχέων περιοχών. Από την σύγκριση των θερμικών εικόνων πριν και μετά τον καθαρισμό, παρατηρείται σημαντική μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων, οφειλόμενη πιθανά στο ότι μετά τον καθαρισμό οι επιφάνειες εμφανίζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια λόγω επιτυχούς απομάκρυνσης του μεγαλύτερου μέρους των προϊόντων φθοράς και διάβρωσης.



Σχ. 17 [27] Μετρήσεις υπέρυθρης θερμομέτρησης, Ιερό Δήμητρας Αρχαιολογικός χώρος Δίου, α) ξηρές συνθήκες ηλιοφάνειας, β) συνθήκες αυξημένης περιβαλλοντικής υγρασίας. Σε ξηρές συνθήκες, η υγρασία διεισδύει στα υλικά μόνο μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης (μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές), ενώ σε υγρές συνθήκες στην συνολική παρουσία υγρασίας συμβάλλουν επίσης το νερό της βροχής και η υγρασία του περιβάλλοντος (μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές).

Συμπεράσματα

Ο Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να αποτιμήσει επεμβάσεις και υλικά σε διάφορα δομικά υποστρώματα και διαφορετικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Μπορεί ακόμα να εφαρμοστεί για να ελέγξει την κατάσταση φθοράς επιφανειών μεγάλης κλίμακας, εξασφαλίζοντας αποτελέσματα υψηλής αξιοπιστίας.

Επειδή οι μη καταστρεπτικές τεχνικές βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της προτυποποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας η οποία θα επιτρέπει τον έλεγχο των ιδιοτήτων, αλλά και την αποτίμηση της φθοράς υλικών, ιδιαίτερα προηγμένων σύνθετων προστατευτικών επιστρωμάτων. Σε

συνδυασμό με γνωστές και προτυποποιημένες εργαστηριακές τεχνικές θα μπορέσει να προκύψει μία πρότυπη και πρωτότυπη μεθοδολογία ελέγχου ποιότητας των υλικών, αποτίμησης των δράσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτά κατά την διάρκεια της παραγωγής τους και αποτίμησης της φθοράς τους όταν αυτά βρεθούν σε διαβρωτικό περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "A morphological fusion algorithm for optical detection and quantification of decay patterns on stone surfaces", *Construction and Building Materials* 22 (2008) 228-238.
- 2) A. Moropoulou, Th. Tsiourva, K. Bisbikou, V. Tsantila, G. Biscontin, G. Longega, M. Groggia, E. Dalaklis, A. Petritaki, "Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the center of Athens", *Building and Environment* 37 (2002) 753 - 760.
- 3) P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces", *NDT&E International* 40 (2007) 2-11
- 4) E.T. Delegou, N.P. Avdelidis, E. Karaviti and A. Moropoulou, "NDT&E techniques and SEM-EDS for the assessment of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces", *X-Ray Spectrom.*, 37 (2008) 435-443.
- 5) R. Cossu, L. Chiappini, "A color image segmentation method as used in the study of ancient monument decay", *Journal of Cultural Heritage* 5 (2004) 385-391.
- 6) P. Kapsalas, M. Zervakis, P. Maravelaki-Kalaitzaki, "Evaluation of image segmentation approaches for non-destructive detection and quantification of corrosion damage on stonework", *Corrosion Science* 49 (2007) 4415-4442.
- 7) C. Gazzano, S.E. Favero-Longo, E. Matteucci and R. Piervittori, "Image analysis for measuring lichen colonization on and within stonework", *The Lichenologist* 41, 3 (2009) 299-313.
- 8) A. Moropoulou, E.T. Delegou, V. Vlahakis, E. Karaviti, "Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces", *Materials Characterization* 58 (2007) 1063-1069.

9) M. J. Thornbush, "Grayscale Calibration of Outdoor Photographic Surveys of Historical

Stone Walls in Oxford, England", *COLOR research and application*, 33, 1 (2008) 61-67.

10) M. Auxiliadora Vázquez, E. Galán, M. Angeles Guerrero, P. Ortiz, "Digital image processing of weathered stone caused by efflorescences: A tool for mapping and evaluation of stone decay", *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1603-1611.

11) K. Zehnder, O. Schoch, "Efflorescence of mirabilite, epsomite and gypsum traced by automated monitoring on-site", *Journal of Cultural Heritage* 10 (2009) 319-330/

12) F. Zezza, "Computerized analysis of stone decay in monuments", *Proceedings of the first international symposium for the conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Bari (1989)* 163-84.

13) J. Rodriguez-Gordillo, M.P. Saez-Perez, "Effects of thermal changes on Macael marble: Experimental study", *Construction and Building Materials* 20 (2006) 355-365.

14) G. Vasconcelos, P.B. Lourenco, C.A.S. Alves, J. Pamplona, "Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites", *Ultrasonics* 48 (2008) 453-466.

15) M.P. Saez-Perez, J. Rodriguez-Gordillo, "Structural and compositional anisotropy in Macael marble (Spain) by ultrasonic, x-rd XRD and optical microscopy methods", *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2121-2126.

16) B. Christaras, "P-wave velocity and quality of building materials", *Proc. 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on Geology and Seismology, Cambridge (2009)* 41-46.

17) A.P. Ferreira Pinto, J. Delgado Rodrigues, "Stone consolidation: The role of treatment procedures", *Journal of Cultural Heritage* 9 (2008) 38-53.

18) Á. Török, B. Vásárhelyi, "The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary", *Engineering Geology* 115 (2010) 237-245.

19) H. Siedel, S. Pfefferkorn, E. von Plehwe-Leisen, H. Leisen, "Sandstone

weathering in tropical climate: Results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia”, *Engineering Geology* 115 (2010) 182–192.

20) N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, “Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures”, *Journal of Cultural Heritage* 5 (2004) 119–127.

21) N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou, “A thermographic study for the assessment of historic structures”, in the 7th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT), Brussels – Belgium, (2004) Proceedings.

22) V. Bosiljkov, M. Uranjek, R. Žarni, V. Bokan-Bosiljkov. “An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures”, *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010) 239–249.

23) A. Tavukçuoğlu, S. Akevren, E. Grinzato, “*In situ* examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing”, *Journal of Modern Optics*, 57, 18 (2010) 1779-1789.

24) C. Maierhofer, M. Röllig, R. Krankenhagen: Integration of active thermography into the assessment of cultural heritage buildings, *Journal of Modern Optics*, 57, 18 (2010) 1790-1802.

25) N. Ludwig, V. Redaelli, E. Rosina, F. Augelli, “Moisture detection in wood and plaster by IR thermography”, *Infrared Physics & Technology* 46 (2004) 161–166.

26) E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, M. Concas, S. Fais, “Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones”, *Infrared Physics & Technology* 46 (2004) 63–68.

27) E. Papanikolaou, P. Spathis, B. Christaras, V. Melfos, N. Katsiotis.: “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 (2012) Proc. of SPIE Vol. 8346, 834610-(1-9).

<http://bit.ly/130buaq>