



Προκαταρκτική μελέτη εφαρμογής για την ανίχνευση του αυθεντικού διακόσμου της φανωματικής οροφής της πρόστασης των καρυατίδων του Ερεχθείου

Γ. Καραγιάννης, Σ. Σωτηροπούλου, Χ. Σαλπιστής

Ίδρυμα Ορμύλια, Διαγνωστικό Κέντρο Έργων Τέχνης, Ορμύλια Χαλκιδικής

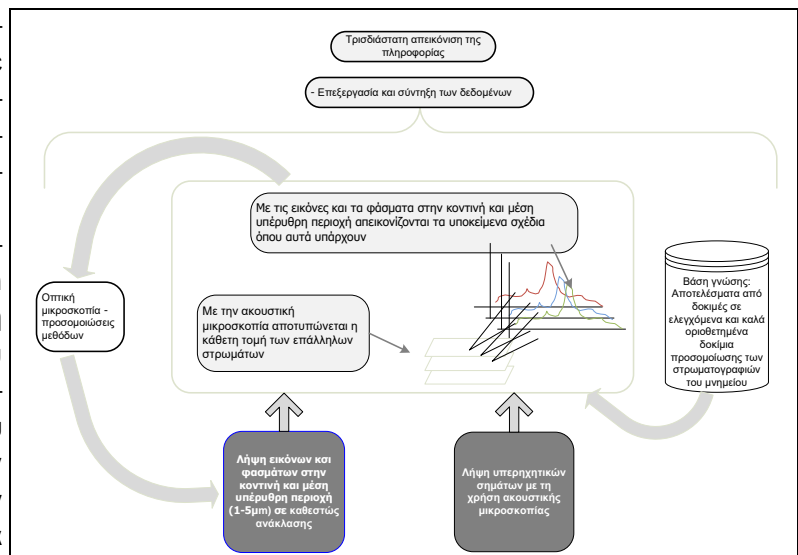
Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε δειγματοληπτικά σε επιλεγμένες περιοχές με σκοπό τη μελέτη σκοπιμότητας για την ανίχνευση του αυθεντικού διακόσμου της φανωματικής οροφής της πρόστασης των Καρυατίδων του Ερεχθείου περιλαμβάνει:

(α) τη λήψη και επεξεργασία υπέρυθρων εικόνων από τα 1000nm έως τα 5000nm στην κοντινή (1000-2500nm) και στη αρχή της μέσης υπέρυθρης περιοχής του φάσματος (2500-5000nm) για την αποτύπωση του σωζόμενου γραπτού διακόσμου καθώς και τη διάκριση μεταξύ αυθεντικών επιχρισμάτων και πιθανών μεταγενέστερων συμπληρώσεων που δεν είναι δυνατόν να διακριθούν με γυμνό μάτι κάτω από το διά-

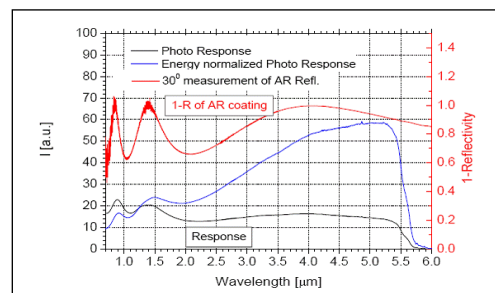
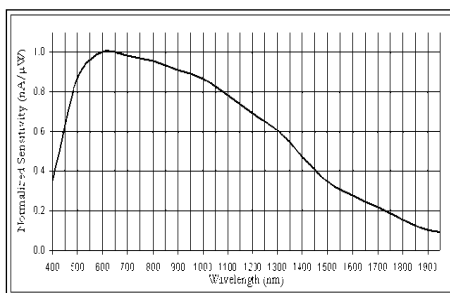
χυτο επιφανειακό στρώμα αιθάλης σε συνδυασμό με

(β) την λήψη σημάτων αντηχήσεων (a-scans) σε μεμονωμένα σημεία με την χρήση της ακουστικής μικροσκοπίας συχνοτήτων της τάξης των 80-100 MHz, η οποία είναι ικανή να διακρίνει την ύπαρξη και να εκτιμήσει το πάχος επιφανειακού αλλά και ενδότερων στρωμάτων επικάλυψης του γραπτού διακόσμου.

Δεδομένου ότι η παραπάνω μεθοδολογία προσφέρεται για τον εντοπισμό αλλά όχι την αναγνώριση της σύστασης των υλικών του ελάχιστου σωζόμενου διακόσμου, συμπληρωματικά έγιναν μετρήσεις στοιχειακής ανάλυσης με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων Χ (XRF) σε περιοχές ενδιαφέροντος, στις οποίες εντοπίστηκαν —είτε μακροσκοπικά είτε στις υπέρυθρες εικόνες— ενδείξεις ύπαρξης επιφανειακών ή υποκείμενων στρωμάτων.



Σχήμα 1 Συνολική αποτύπωση της μεθοδολογίας λήψης και συνδυαστικής επεξεργασίας της πληροφορίας που εφαρμόστηκε στη μελέτη του Ερεχθείου.



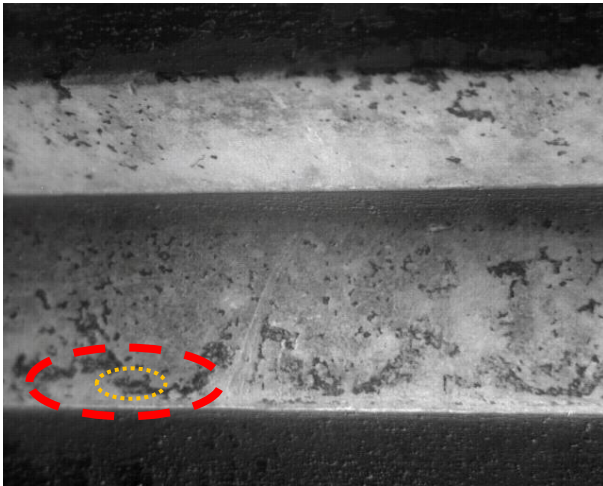
Σχήμα 2 Ευαισθησία των δύο αισθητών του συστήματος λήψης υπέρυθρων εικόνων.

Μετρήσεις – ενδεικτικά παραδείγματα



Εικόνα 1 Φάτνωμα 1Δ βόρεια, 1ο κυμάτιο. Με από το οποίο αποκτήθηκαν υπέρυθρες εικόνες, XRF φάσματα αλλά και σήματα αντηχήσεων (a-scans) με το ακουστικό μικροσκόπιο (βλ. παρακάτω).

Υπέρυθρες εικόνες παρατήρησης και φάσματα



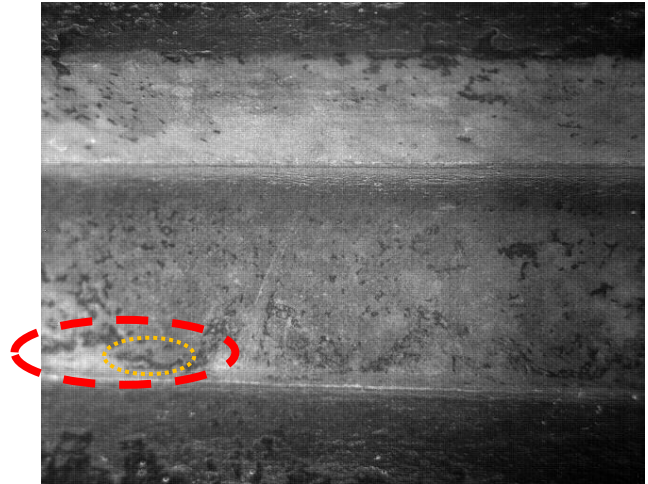
Εικόνα 2 Εικόνα στην υπέρυθρη περιοχή με φίλτρο διέλευσης ζώνης μηκών κύματος περί τα 1700nm.



Εικόνα 3 Εικόνα στην υπέρυθρη περιοχή με φίλτρο διέλευσης ζώνης μηκών κύματος γύρω από τα 1800nm.

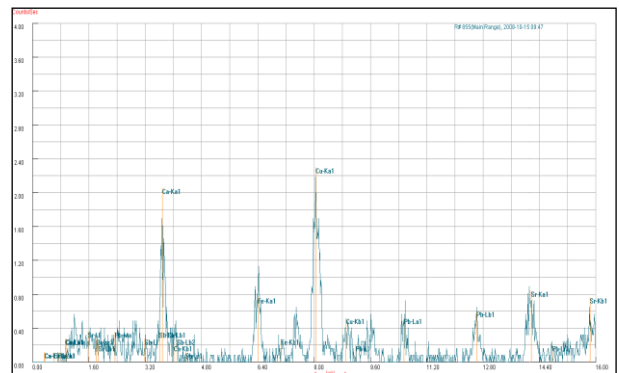
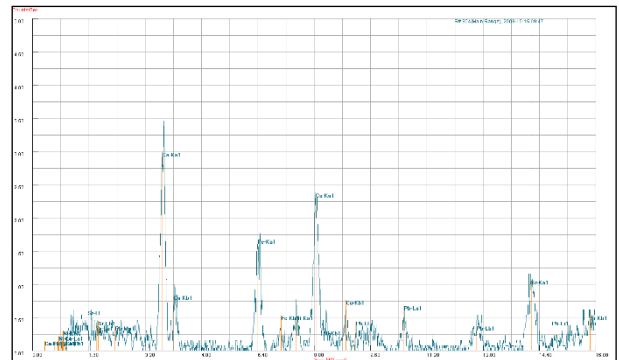
Στα 1800nm η κατανομή των επιστρώσεων διαφέρει ελάχιστα από αυτή που παρατηρείται στην ορατή

περιοχή του φάσματος και κυρίως στις περιοχές όπου παρατηρείται η ύπαρξη ενός πρώτου επιφανειακού στρώματος.



Εικόνα 4 Εικόνα στην υπέρυθρη περιοχή με φίλτρο διέλευσης ζώνης μηκών κύματος γύρω από τα 1900nm.

Στα 1900nm η κατανομή των επιστρώσεων αρχίζει να διαφέρει από αυτή που παρατηρείται στην ορατή περιοχή του φάσματος και στην περιοχή των 1800 και 1700nm παρέχοντας διαφοροποιήσεις στην αποτύπωση των ενδότερων στρωμάτων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές σε συνδυασμό με τα δεδομένα που προκύπτουν από τα XRF φάσματα (**Σχήμα 3**), αποδεικνύουν την αναγκαιότητα λήψης φασμάτων σε εκτενέστερη φασματική περιοχή από το υπεριώδες μέχρι το μέσο υπέρυθρο.



Σχήμα 3 Φάσματα φθορισμού ακτίνων Χ (XRF).

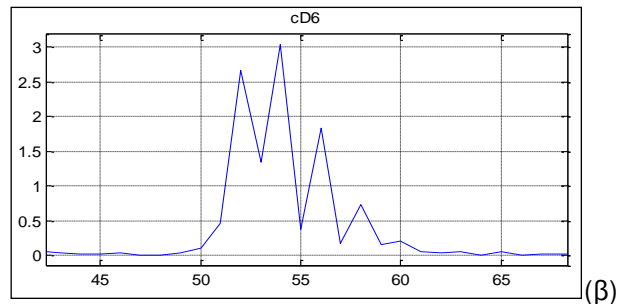
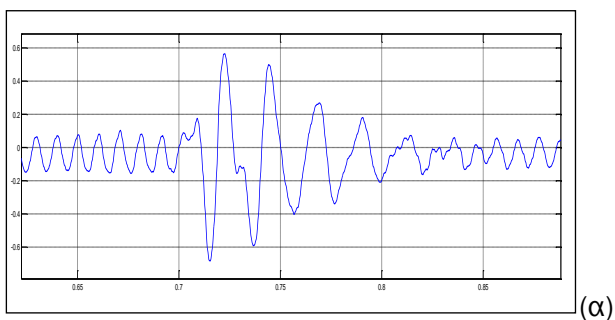
Η ανίχνευση του χαλκού σε συνδυασμό με το διακριτό και μακροσκοπικά μπλε χρώμα του στρώματος που εντοπίστηκε συνηγορεί στην αναγνώριση της χρωστικής του αζουρίτη ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Η ανίχνευση του χαλκού θα μπορούσε να αποδοθεί και σε αιγυπτιακό μπλε ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$), δεδομένου ότι ανιχνεύεται και ασβέστιο, ενώ το πυρίτιο είναι εκτός της ανιχνευτικής ικανότητας του οργάνου. Όμως η κατά τόπους αύξηση της έντασης της κορυφής του χαλκού είναι ανεξάρτητη από την ένταση του ασβεστίου (που ασφαλώς προέρχεται από το υπόστρωμα του μαρμάρου) (και του σιδήρου), γεγονός που απορρίπτει την υπόθεση παρουσίας του αιγυπτιακού μπλε.

Μέτρηση του πάχους των στρωμάτων

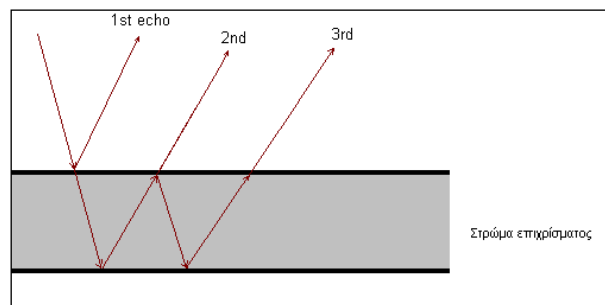
Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν με το ακουστικό μικροσκόπιο στη συχνότητα των 80MHz σε περιοχή με πορτοκαλοκάστανο επίχρισμα (**Εικόνα 5**) αποδεικνύεται ότι είναι εφικτή η μέτρησή τους με τη χρήση των συχνοτήτων υπερήχων κυμάτων αυτών. Τα σήματα αντηχήσεων που αποκτήθηκαν και τα αντίστοιχα επεξεργασμένα στα οποία αναδεικνύονται οι αντηχήσεις από το πορτοκαλοκάστανο στρώμα δίνονται στο **Σχήμα 4 (α)** και **(β)**. Το σχήμα **(β)** απεικονίζει τα επεξεργασμένα σήματα με τη χρήση αλγορίθμων ανίχνευσης αντηχήσεων (echoes) και κατά συνέπεια των διεπιφανειών στρωμάτων.



Εικόνα 5 Πορτοκαλοκάστανο επίχρισμα και θέση μέτρησης του σήματος αντηχήσεων με το ακουστικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 4 (α) Αποκτημένο σήμα αντήχησης (a-scan) από το πορτοκαλοκάστανο στρώμα (οι χρόνοι ισαπέχουν μεταξύ τους ~25nsec) και (β) το αντίστοιχο επεξεργασμένο σήμα με χρήση μετασχηματισμού κυματιδίων στο οποίο αναδεικνύονται οι πολλαπλές αντηχήσεις από το πορτοκαλοκάστανο στρώμα επιχρίσματος.



Σχήμα 5 Πολλαπλές επάλληλες ανακλάσεις από ένα στρώμα επιχρίσματος.

Συμπεράσματα

Σχετικά με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι:

1. Όσο αυξάνεται το μήκος κύματος τόσο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας εφόσον αυτή δεν απορροφάται από τα υλικά τα οποία συναντά στην πορεία της και εφόσον αυτό είναι εφικτό δεδομένων των υλικών τα οποία υπάρχουν στη στρωματογραφία.. Έτσι, με τη χρήση εικόνων στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου αναδεικνύεται η ύπαρξη ενδότερων στρωμάτων.

2. Η αναγνώριση με τη χρήση φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων Χ (XRF) στοιχείων – χαρακτηριστικών της σύστασης υλικών που είναι δυνατόν να έχουν χρησιμοποιηθεί στον γραπτό διάκοσμο, ενισχύει τις ενδείξεις των υπέρυθρων εικόνων (αποτελώντας απόδειξη) για την ύπαρξη σωζόμενων υπολειμμάτων τέτοιου διακόσμου. Συνεπώς, σε μία επόμενη, εκτενέστερη και συστηματικότερη μελέτη προτείνεται η εφαρμογή αναλυτικών σημειακών μετρήσεων για την ταυτοποίηση των υλικών που σώζονται κάτω από την αιθάλη. Ο συνδυασμός φασματοσκοπίας υπεριώδους, ορατού και υπέρυθρου (σε φασματικό εύρος 200 – 4500 nm) και φασματοσκοπίας XRF, που ήδη εφαρμόστηκε δοκιμαστικά, είναι δυνατόν να

επιτρέψει την ταύτιση των υλικών, από την συνεκτίμηση της συμπληρωματικής πληροφορίας που λαμβάνεται από τις δύο μεθόδους (αναγνώριση της μοριακής δομής με φασματοσκοπία υπερύθρου και στοιχειακής ανάλυσης με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων Χ).

3. Η χρήση υψίσυχων ακουστικών κυμάτων τάξης μεγέθους 80-100MHz φαίνεται ότι παρέχει ευκρινή διαχωρισμό των διαφορετικών επιστρώσεων όπου διαχωρίζονται το πολύ τρία με τέσσερα στρώματα. Επιπρόσθετα ο συνδυασμός με τη φασματοσκοπία υπερύθρου όπου θα είναι εφικτή η ταυτοποίηση των υλικών στα ενδότερα στρώματα και κατά συνέπεια η εύρεση των ακουστικών τους ταχυτήτων θα είναι εφικτή η μέτρηση επίσης του πάχους των στρωμάτων.

Προκαταρκτικά ευρήματα

Αξιολογώντας συνολικά τις μετρήσεις που ελήφθησαν στο φάσμα φθορισμού ακτίνων Χ, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

1) Μόλυβδος ανιχνεύεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, με εντάσεις κορυφών που κυμαίνονται. Ο μόλυβδος είναι δυνατόν να αποδοθεί σε ένα στρώμα λευκού του μολύβδου που εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του μαρμάρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόλυβδος ανιχνεύεται και στην μέτρηση που έγινε στο πορτοκαλοκάστανο επίχρισμα.

2) Χαλκός ανιχνεύεται σε διαφορετικές περιοχές ορισμένων κυματίων. Στην περίπτωση του πρώτου κυματίου του φατνώματος 1Δ, η ανίχνευση του χαλκού συνδέεται με το διακριτό και μακροσκοπικά μπλε χρώμα που εντοπίστηκε στο επαναλαμβανόμενο σχέδιο ωοειδούς μορφής και συνηγορεί στην αναγνώριση της χρωστικής του αζουρίτη ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$).

3) Σίδηρος ανιχνεύεται στην πλειοψηφία των μετρήσεων με εντάσεις κορυφών που κυμαίνονται. Δεν κατέστη δυνατόν να συνδεθεί ο σίδηρος με κάποιο εμφανές στρώμα. Ο σίδηρος φαίνεται ότι αποτελεί και συστατικό της μαύρης επιφανειακής κρούστας. Εντούτοις, παρατηρήθηκε από μια σειρά μετρήσεων ότι στους ουρανίσκους ορισμένων φατνωμάτων η σχετική ένταση σιδήρου/ασβεστίου είναι αυξημένη. Το γεγονός αυτό ίσως να δηλώνει την ύπαρξη κάποιου στρώματος οξειδίων του σιδήρου, το οποίο όμως δεν εντοπίστηκε στην επιφάνεια (είτε χρωματικά είτε σχεδιαστικά).

Συμπερασματικά, από την προκαταρκτική αυτή επιτόπια μελέτη προκύπτει ότι οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν και τα αρχικά ευρήματα που αναδείχθηκαν θεμελιώνουν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ικανή ν' αναδείξει πλούσιες πρόσθετες πληροφορίες για την υπό εξέταση περιοχή.

Συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να γίνουν εκτενέστερες μετρήσεις με τη χρήση υπέρυθρων αισθητών λήψης εικόνας καθώς επίσης και αισθητών ακουστικής μικροσκοπίας, όμοιων με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν αλλά με ελεγχόμενη σάρωση των διαφόρων περιοχών. Οι μετρήσεις αυτές σε συνδυασμό με λήψεις φασμάτων από επιλεγμένες περιοχές του μνημείου θα δώσουν πληροφορίες σχετικά με τη μοριακή δομή των υλικών στην επιφάνεια και σε βάθος (φάσματα από την υπεριώδη μέχρι την υπέρυθη περιοχή του η/μ φάσματος). Οι πληροφορίες που θα προκύψουν θα μας προσφέρουν τη δυνατότητα ταύτισης των υλικών που ανιχνεύονται καθώς επίσης και την τρισδιάστατη αναπαράσταση των στρωμάτων επικαθίσεων στις περιοχές σάρωσης.