

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ-ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ

**A. Μοροπούλου, Μ. Καρόγλου, Ν.Π. Αβδελίδης, Ε. Αγγελakoπούλου, Α. Μπακόλας**

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Αθήνα

**KEYWORDS:** Έλεγχος ποιότητας, θερμογραφία υπερύθρου, μικροσκοπία οπτικών ιών, υπερηχοσκόπηση, γεωραντάρ, ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, κρουσιμετρία

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση του μη καταστρεπτικού ελέγχου συμβάλλει στην αύξηση της αειφορίας των κατασκευών/ υποδομών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται πώς με τη χρήση ορισμένων μη καταστρεπτικών τεχνικών, όπως είναι η μικροσκοπία οπτικών ιών, η θερμογραφία υπερύθρου, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, η υπερηχοσκόπηση, το γεωραντάρ και η κρουσιμετρία, μπορεί να πραγματοποιηθεί χαρακτηρισμός των υλικών και των τοιχοποιιών, αλλά και να αποτιμηθεί η δράση των περιβαλλοντικών φορτίων στις κατασκευές. Η δυνατότητα που παρέχει της επί τόπου εξέτασης, στην κλίμακα των κτιρίων, καθιστά τη χρήση του ένα καινοτόμο εργαλείο για την παρακολούθηση και τη διατήρηση των κατασκευών/ υποδομών, καθώς και για τον έλεγχο ποιότητας τους.

# ASSESSMENT OF CONSTRUCTIONS-INFRASTRUCTURES SUSTAINABILITY WITH OF THE USE OF NDT

**A. Moropoulou, M. Karoglou, N.P. Avdelidis, E. Aggelakopoulou, A. Bakolas**

National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, Section of Materials Science and Engineering, Zografou Campus 15780, Athens, Greece

**KEYWORDS:** Quality control, infrared thermography, fiber optics microscopy, ultrasonics, ground penetrating radar, digital image processing, schmidt hammer test

## ABSTRACT

The use of non-destructive testing can contribute significantly to build environment sustainability. The non-destructive techniques used such as, infrared thermography, fiber optics microscopy, digital image processing, ultrasonics and ground penetrating radar and schmidt hammer test, contributes to materials characterization, as well as to the assessment of environmental decay factors impact on materials and structures/ infrastructures. Their ability to be applied in situ, without affecting the under investigation structure, composes an innovative tool for monitoring, preservation and quality control of structures/infrastructures.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δομημένο περιβάλλον αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στη διαχείριση των πόρων. Για την κατασκευή και τη λειτουργία τους καταναλώνονται ενέργεια, υλικά, νερό. Επιπλέον το δομημένο περιβάλλον επιδρά στις συνθήκες διαβίωσης, την ποιότητα ζωής και την υγεία των πολιτών. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική, η αναζήτηση στην κατεύθυνση της αιεφόρου ανάπτυξης, κατάλληλου σχεδιασμού, για τη διασφάλιση της αιεφορίας, της υγείας και της οικονομικής ανεκτικότητας των κατασκευών, καθώς και χρήσης καινοτόμων τεχνολογιών στη μελέτη της ανθεκτικότητας και της αποδοτικότητας των κτιρίων και των υποδομών.

Ένα από τα σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία που συμβάλλουν στην αιεφορία των κατασκευών είναι και ο μη καταστρεπτικός έλεγχος (Nondestructive testing). Με τη χρήση του μη καταστρεπτικού ελέγχου είναι δυνατή η αποτίμηση της έκτασης των φθορών και των ελαττωμάτων μιας κατασκευής, σε πραγματική κλίμακα, με μικρό κόστος. Πρόσφατες αναβαθμίσεις στον εξοπλισμό του μη καταστρεπτικού ελέγχου, αλλά και στο συνοδευτικά λογισμικά του, έχουν αυξήσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του και την αποδοχή τους από τη βιομηχανία.

Η χρήση του μη καταστρεπτικού ελέγχου αποτελεί ένα «έμπειρο» πεδίο γνώσης, που απαιτεί τη γνώση, την εμπειρία και την κρίση του μελετητή. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών μη καταστρεπτικών τεχνικών σε γέφυρες, σε αεροδρόμια, σε κτίρια, κ.α. [1]. Ειδικότερα στις κατασκευές από σκυρόδεμα συμβάλλει στην εξοικονόμηση χρημάτων και χρόνου, παρέχοντας πληροφορίες οι οποίες δε μπορούν να αποκτηθούν με απλή οπτική παρατήρηση ή με δειγματοληψία. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν μία βάση για μελλοντικές μελέτες και μία χρήσιμη πηγή για την ανάπτυξη προγραμμάτων συνεχούς παρακολούθησης και διατήρησης των δομών αυτών.

## 2. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Ο ρόλος των μη καταστρεπτικών τεχνικών είναι η ανίχνευση διαφορών ειδών ασυνεχειών στα υλικά, σχετικά με το σχήμα, τη θέση και με τον προσανατολισμό τους. Το επόμενο βήμα μετά την εφαρμογή τους είναι η λήψη αποφάσεων σχετικές με το αν οι ασυνέχειες αυτές επιδρούν στην συνολική αποδοτικότητα των δομών ή όχι. Η λήψη των αποφάσεων γίνεται βάσει:

-προτύπων, ειδικότερα αυτών που περιέχουν κριτήρια για την αποδοχή ή μη των ελαττωμάτων. Τα συχνότερα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά των API, ASME, ASTM και AWS.

-τη χρήση αναλυτικών τεχνικών στο εργαστήριο, τόσο όσον αφορά στις φυσικοχημικές των υλικών όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών [2].

Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου των υλικών και των κατασκευών παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως:

- δυνατότητα εξέτασης επί τόπου
- διατήρηση της ακεραιότητας της εξεταζόμενης δομής
- γρήγορη αποκάλυψη των αποτελεσμάτων χάρη στο υψηλό τεχνολογικό επίπεδο των οργάνων που χρησιμοποιούνται
- παροχή τόσο ποιοτικών αλλά και ποσοτικών αποτελεσμάτων

- εύκολη ανάγνωση των γραφημάτων με τη χρήση ειδικών λογισμικών

Βέβαια υπάρχουν και επικρίσεις σχετικά με την εφαρμογή τους. Τα περισσότερα προβλήματα προκύπτουν για εφαρμογές με πολυπλοκότητα στη δομή τους, με τη χρήση διαφόρων υλικών, καθώς επίσης και ότι τις περισσότερες φορές απαιτείται ειδικευμένη γνώση από το προσωπικό που τις εφαρμόζει, αλλά και την έλλειψη σχετικών προτύπων για την εφαρμογή τους [3].

Για το λόγο αυτό απαιτείται σε εφαρμογές υψηλού ενδιαφέροντος, όπως αποτίμησης της φθοράς και της παθολογίας ιστορικών κτιρίων, τα αποτελέσματά τους να συνεκτιμούνται με τα αποτελέσματα των αναλυτικών τεχνικών για περισσότερο ασφαλή αποτελέσματα. Επιπλέον η έλλειψη προτύπων, ή στην περίπτωση που υπάρχουν το γεγονός ότι αφορούν σε συγκεκριμένες μεθόδους και σε συγκεκριμένα υλικά /συνθήκες, καθιστά την εφαρμογή και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους δύσκολη.

### 3. ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Τα δομικά υλικά, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, αποτελούν μια κρίσιμη παράμετρο για την υλοποίηση ενός αειφόρου σχεδίου ανάπτυξης του δομημένου περιβάλλοντος, συνεπώς η γνώση της «περιβαλλοντικής» ποιότητάς τους αποτελεί τη βάση ανάπτυξής του. Από την άλλη η εκτίμηση των επιπτώσεων του περιβάλλοντος στις κατασκευές αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη συντήρηση των υπάρχοντων κατασκευών και την αύξηση του χρόνου ζωής τους, αλλά και για τη διαχείριση και έλεγχο των κρίσιμων περιβαλλοντικών φορτίων. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των υλικών και των κατασκευών περιλαμβάνει μια σειρά από καινούργιες τεχνικές. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι παρακάτω:

- Φορητό Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών για την εξέταση των επιφανειών από την άποψη της υφής και της μικροδομής των υλικών.
- Λογισμικά ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων επιφανειών για τη χαρτογράφηση της φθοράς τους και την αποτίμηση του πορώδους των δομικών υλικών με χρήση φωτογραφιών Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης.
- Σύστημα υπερηχοσκόπησης για την ανίχνευση ρωγμών πιθανών ατελειών, μικρορωγμών, κ.α., τον προσδιορισμό της κατανομής της υγρασίας σε πορώδη υλικά, την αποτίμηση φυσικοχημικής συμβατότητας στην διεπιφάνεια διαφορετικών υλικών.
- Υπέρυθρη θερμογραφία χαμηλού και υψηλού μήκους κύματος για τον εντοπισμό ατελειών στα υπό εξέταση υλικά, καθώς επίσης και για επιθεώρηση επί τόπου της κατασκευής (ανίχνευση υγρασίας, έλεγχο θερμομονώσεων, έλεγχο ηλεκτρικών εγκαταστάσεων)
- Σύστημα γεωραντάρ για την εξέταση για την εξέταση των υλικών τόσο επιφανειακά όσο και σε βαθύτερα στρώματα με δυνατότητα ανίχνευσης προβλημάτων διαστρωμάτωσης, ρωγμών στα υλικά.
- Κρουσιμετρία για τον προσδιορισμό της ομοιομορφίας του υλικού της τοιχοποιίας, κυρίως των λιθοσωμάτων, σε μια μεγάλη έκταση της κατασκευής

Οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα πλήθος εφαρμογών τόσο σε καινούργιες όσο και σε ιστορικές κατασκευές (Κτίρια ΕΤΕ, ΟΕΚ, Μεσαιωνικές Οχυρώσεις Ρόδου/ Ηρακλείου, Βυζαντινό Μουσείο Αθηνών κλπ) . Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι παρακάτω εφαρμογές:

### 3.1 Έλεγχος των υλικών/ Αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην κλίμακα των κτιρίων

Για τη διάγνωση της μορφολογία της επιφάνειας των υλικών, αλλά και την κατάσταση συντήρησής τους, τόσο στο εργαστήριο, όσο και επί τόπου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μικροσκοπία οπτικών ινών. Με τη βοήθεια της τεχνικής αυτής μπορούν να αποτιμηθούν οι διαβρωτικές δράσεις περιβαλλοντικών φορτίων, όπως είναι το αστικό ρυπασμένο περιβάλλον, αλλά και το θαλάσσιο περιβάλλον στα υλικά και τις κατασκευές. Στην Εικόνα 2 με τη βοήθεια της μικροσκοπίας οπτικών ινών αποκαλύπτονται επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης και αιθάλης σε επιφάνεια πεντελικού μάρμαρου στην Εθνική βιβλιοθήκη (Εικόνα 1) στο κέντρο της Αθήνας λόγω της δράσης της ρυπασμένης ατμόσφαιρας[4]. Στην Εικόνα 4 φαίνονται οι εξανθήσεις αλάτων σε επιφάνεια σκυροδέματος στο καμπαναριό του Αγ. Ιωάννη στη Σύμη (Εικόνα 3) από τη δράση του θαλάσσιου αερολύματος [5].



Εικόνα 1: Κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης



Εικόνα 2: Μεγέθυνση x25, δημιουργία εξανθήσεων αλάτων σε επιφάνεια σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον



Εικόνα 3: Αγ. Ιωάννης στη Σύμη, Καμπαναριό

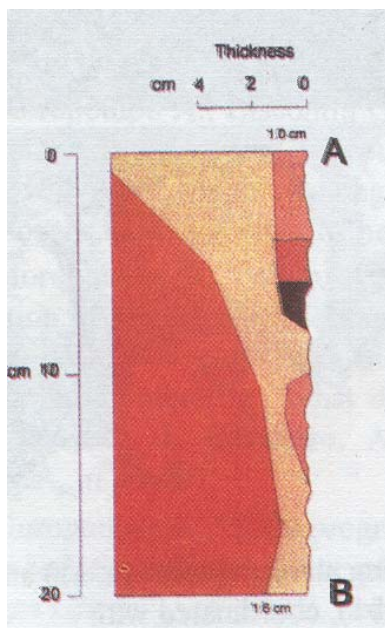


Εικόνα 4: Μεγέθυνση x25, δημιουργία εξανθήσεων αλάτων σε επιφάνεια σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον

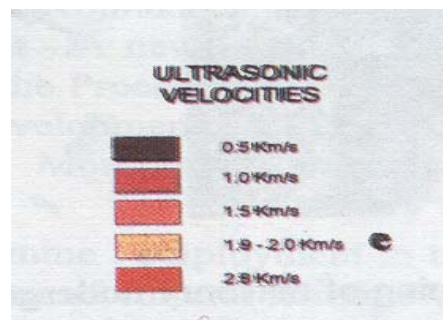
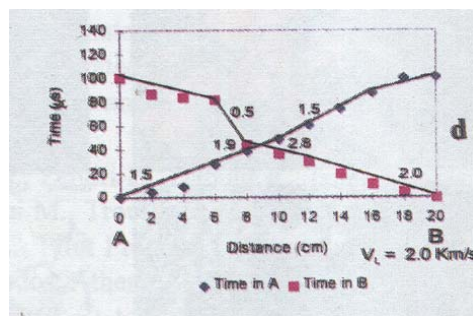
Πέρα από την παρατήρηση των προϊόντων φθοράς ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο προσδιορισμός του βάθους φθοράς. Με τη χρήση του συστήματος της υπερηχοσκόπησης μπορούν να εξεταστεί το βάθος φθοράς των υλικών. Στην Εικόνα 5 φαίνεται η επιφάνεια εφαρμογής συστήματος υπερήχων στις Μεσαιωνικές Οχυρώσεις της Ρόδου για τον υπολογισμό του βάθους φθοράς της τοιχοποιίας από τη δράση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στην Εικόνα 6 φαίνονται ο υπολογισμός της ταχύτητας υπερήχων και πώς αυτές οι μεταβολές αντιστοιχούν σε διαφορετικό βάθος φθοράς [6].



Εικόνα 5: Τοιχοποιία



Εικόνα 6: Μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων και υπολογισμός του βάθους φθοράς



### 3.2. Μηχανικές Ιδιότητες

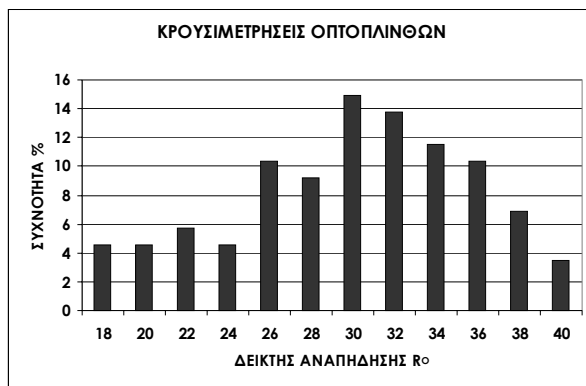
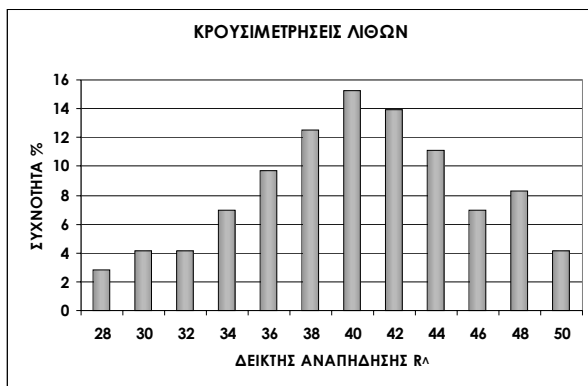
Η τεχνική των υπερήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών των υλικών, παράμετροι ιδιαίτερα σημαντικοί κατά τη μελέτης της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων καθώς και των ελαστικών σταθερών (δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $E_d$ ), λόγος Poisson ( $\nu_d$ ) και μέτρο διάτμησης  $G_d$ ) για τέσσερα είδη λίθων: μάρμαρο Διονύσου (MD), πωρόλιθο Ρεθύμνου (SR), πωρόλιθο Κύπρου (SC) και πωρόλιθο Ρόδου (SRh). Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων διαμέσου των υλικών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Pundit-CNS Electronics με 2 ακροδέκτες (πομπό-δέκτη) συχνότητας 54 KHz.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα ταχύτητα διαμήκων ( $C_l$ ), εγκάρσιων ( $C_t$ ) υπερηχητικών κυμάτων, δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_d$ ), λόγου Poisson ( $\nu_d$ ) και μέτρο διάτμησης ( $G_d$ ).

Λίθοι	$C_l$ m/s	$C_t$ m/s	$E_d$ GPa	$\nu_d$	$G_d$ GPa
MD	6684	3505	86.9	0.310	33.1
SR	3651	2007	21.6	0.283	8.43
SC	2832	1576	12.6	0.276	4.94
SRh	2787	1547	10.5	0.278	4.12

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση των υπερήχων συγκρίθηκαν με αυτά των μηχανικών δοκιμών και επιβεβαιώθηκαν [7]. Κατά συνέπεια η χρήση του συστήματος της υπερηχοσκοπησης σε κτίρια επί τόπου μπορεί να παρέχει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για τις ελαστικές σταθερές των υλικών.

Σε επίπεδο τοιχοποιίας αναφέρεται το παράδειγμα εφαρμογής κρουσιμετρίας επιτόπου σε λίθους και οπτοπλίνθους στις πτέρυγες του Βυζαντινού και Χριστιανικού Μουσείου Αθηνών συχνότητα% του δείκτη αναπήδησης (Γεωργουσόπουλο, Γ & Χρονόπουλο, Μ. 2004) [8].



Σχήμα 1: Κατανομή συχνοτήτων δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρων σε λίθους

Σχήμα 2: Κατανομή συχνοτήτων δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρων σε οπτόπλινθους

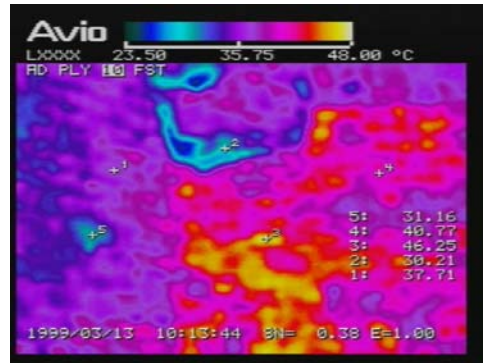
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 η μέση και συχνότερη τιμή του δείκτη αναπήδησης για τους μεν λίθους είναι ίση με  $R_A \approx 40$ , ενώ για τους οπτοπλίνθους είναι  $R_O \approx 30$  (Σχήμα 2). Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας με χρήση ημι-εμπειρικών τύπων που έχουν αναπτυχθεί για παραδοσιακές τοιχοποιίες [9].

### 3.3 Αποτίμηση της συμπεριφοράς μιας τοιχοποιίας σε φαινόμενα μεταφοράς μάζας/ θερμότητας

Η υγρασία αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών. Η δυνατότητα ανίχνευσής, αλλά και κατανομής της υγρασίας επί τόπου μπορεί να γίνει με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου. Αναφέρεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από τις Μεσαιωνικές οχυρώσεις της Ρόδου, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί ασύμβατοι λίθοι αποκατάστασης όσον αφορά τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά τους με το αυθεντικό δομικό υλικό της τοιχοποιίας. Παρατηρώντας το θερμογράφημα (Εικόνα 8) σε ένα τμήμα των μεσαιωνικών οχυρώσεων (Εικόνα 7) διακρίνονται τόσο τα διαφορετικά υλικά της τοιχοποιίας, λόγω του διαφορετικού συντελεστή εκπομπής τους, όσο και ο διαφορετικό τρόπος που άγουν την υγρασία σε αυτήν. Στο αριστερό κομμάτι της Εικόνας 7 φαίνεται η αυθεντική τοιχοποιία που αντιστοιχεί στο θερμογράφημα σε περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ στο δεξί η αποκατάσταση με περισσότερο συμπαγείς λίθους καθώς και με τσιμεντοκονιάματα που μεταβάλλουν το ισοζύγιο μεταφοράς υγρασίας και θερμότητας στην τοιχοποιία απεικονίζονται με υψηλότερες θερμοκρασίες [10].



Εικόνα 7: Τμήμα των μεσαιωνικών οχυρώσεων της Ρόδου



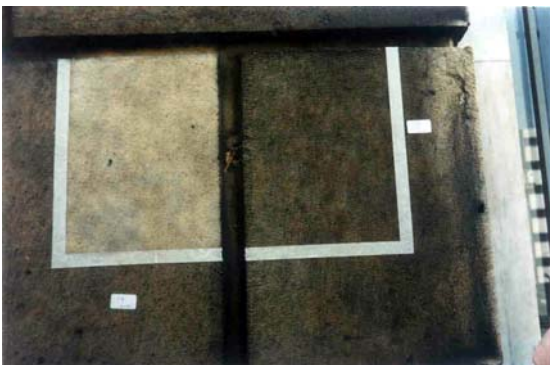
Εικόνα 8: Θερμογράφημα της τοιχοποιίας της Εικόνας 7

Η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο διαφυγών θερμότητας από τις τοιχοποιίες και να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια.

### 3.4 Αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης

Οι μη καταστρεπτικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης είναι η μικροσκοπία οπτικών ινών, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, η θερμογραφία υπερύθρου, η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.

Στη συνέχεια αναφέρεται μία εφαρμογή ενός λογισμικού ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων για την αποτίμηση επέμβασης καθαρισμού. Το υπό εξέταση κτίριο είναι στο κεντρικό κτίριο της Τράπεζας της Ελλάδος στο κέντρο της Αθήνας. Στην Εικόνα 9 φαίνεται η πιλοτική επέμβαση καθαρισμού με μικρο-αμμοβολή σωματιδίων  $Al_2O_3$  διαμέτρου 150 $\mu m$ , πίεσης έως 2atm και ακροφυσίου 1mm σε λίθινη επένδυση (Λίθος Καπανδρίτι). Στην Εικόνα 10 φαίνεται η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας σε περιοχές που έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές μέθοδοι καθαρισμού. Στο αριστερό κομμάτι έχει εφαρμοστεί μικροαμμοβολή, ενώ στο δεξί επίθεμα  $(NH)_4CO_3$  15%. Στην Εικόνα 10 φαίνεται ότι η εφαρμογή του επιθέματος στη δεξιά πλευρά της εικόνας μετά την επεξεργασία έδωσε καλύτερα αποτελέσματα [11].



Εικόνα 9: Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού στην Τράπεζα της Ελλάδος στο κέντρο της Αθήνας



Εικόνα 10: Ψηφιακή επεξεργασία περιοχών με διαφορετικές πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού

### 3.5. Έλεγχος ποιότητας κατασκευών από σκυρόδεμα/ ασφαλτοτάπητων

Η συντήρηση και η ανακαίνιση δομών από σκυρόδεμα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία για την αειφορικότητα του δομημένου περιβάλλοντος. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη για δεδομένα που αφορούν στο χρόνο ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα και η γνώση της κατάστασης του σκυροδέματος αποτελεί μία χρήσιμη παράμετρο για τη σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση των δομών αυτών.

Το συγκρότημα του υδροθεραπευτηρίου της Καλλιθέας της Ρόδου είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα του 1<sup>ου</sup> μισού του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το κτίριο κατασκευάστηκε το 1927 με οπλισμένο σκυρόδεμα από τον ιταλό αρχιτέκτονα P. Lombardi. Το σκυρόδεμα της εποχής ήταν περισσότερο χονδρόκοκκο και δεν περιείχε υψηλά ποσοστά C<sub>3</sub>S όπως το σύγχρονο σκυρόδεμα. Για τη μελέτη της κατάστασης συντήρησής του εφαρμόστηκαν μη καταστρεπτικές, αλλά και καταστρεπτικές τεχνικές, έτσι ώστε από τη μία να κατανοηθεί η δράση των περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς στο σκυρόδεμα, από την άλλη να συλλεχθούν στοιχεία σχετικά με την ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων σε ένα επιθετικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό της λεκάνης της Μεσογείου. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε για δύο κτίρια του συγκροτήματος της Ροτόντας και του τρούλου (Εικόνα 11, 12). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίαζε το γεγονός, ότι τη στιγμή που έγιναν οι μετρήσεις (Σεπτέμβριος του 2001) δεν είχαν γίνει καμία επέμβαση στο κτίριο της Ροτόντας, ενώ το κτίριο του τρούλου είχε μόλις ολοκληρωθεί η επέμβαση με gunite.



Εικόνα 11: Το κτίριο της Ροτόντας



Εικόνα 12: Το κτίριο του τρούλου

Στην Εικόνα 13 με τη βοήθεια της μικροσκοπίας οπτικών ινών φαίνεται η απώλεια συνδετικής ύλης και αδρανών, η δημιουργία κενών και απόθεση αλάτων στο σκυρόδεμα, ενώ στην Εικόνα 14 φαίνεται το μέγεθος των κενών του gunite, αλλά και η ύπαρξη εξανθήσεων αλάτων.





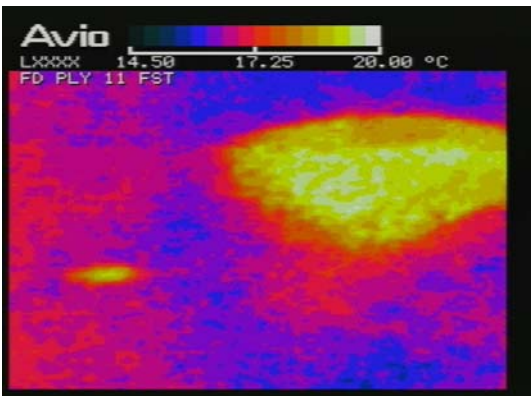
Εικόνα 13: Επιφάνεια σκυροδέματος x25 του κτιρίου Ροτόντας



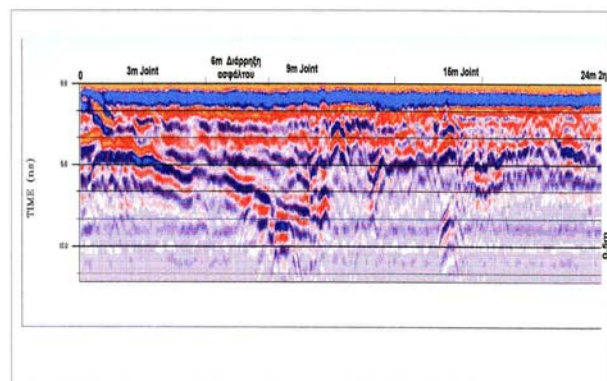
Εικόνα 14: Επιφάνεια gunite x25 του κτιρίου Τρούλου

Με τη χρήση του συστήματος της υπερηχοσκόπησης υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε διάφορα σημεία του κτιρίου της Ροτόντας. Οι ταχύτητες της διάδοσης των υπερήχων κυμαίνονταν μεταξύ 2000-2500 m/sec, τιμές πολύ χαμηλές συγκρινόμενες με τις τιμές των σύγχρονων σκυροδεμάτων, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη κενών, αλλά και ανομοιογένειας της δομής του σκυροδέματος που εξετάστηκε [5].

Μία άλλη εφαρμογή με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον είναι ο έλεγχος ποιότητας οδοστρωμάτων στον κρατικό αερολιμένα Αθηνών, στο Ελληνικό. Με τη συνδυαστική χρήση θερμογραφίας υπέρυθρου και συστήματος γεωραντάρ επιχειρήθηκε η διάγνωση της κατάστασης και της φθοράς του οδοστρώματος. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τη σάρωση μεγάλων επιφανειών. Ο θερμογραφικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε βάσει του προτύπου ASTM D4788-88. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 15 οι περιοχές με υψηλότερες θερμοκρασίες αντιστοιχούν σε τμήματα του οδοστρώματος που παρουσίαζαν φθορά, αποτελέσματα που επιβεβαιώθηκαν με την εφαρμογή του συστήματος του γεωραντάρ (Εικόνα 16 ) [12].



Εικόνα 15: Φθαρμένη Άσφαλτος με χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας



Εικόνα 16: Φθαρμένη Άσφαλτος με χρήση του γεωραντάρ

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος αποτελεί μία καινοτόμα μεθοδολογία που συμβάλλει στην αύξηση της αειφορίας των υλικών και των κατασκευών, επιτρέποντας την εξέταση επί τόπου των κατασκευών, με διασφάλιση της ακεραιότητας της εξεταζόμενης δομής τους, αλλά και την παροχή

άμεσων αποτελεσμάτων. Η χρήση του συμβάλλει στη διασφάλιση της ποιότητας, στην παρακολούθηση και στη διατήρηση των κατασκευών/ υποδομών, αλλά και στον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις κατασκευές.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Das P.C., Hardy M.S.A., Mc Cann D.N., Forde M.V. (2000), “**Specifications for competitive tendering of NDT inspection of bridges**”, In: Ryall M.J., Parke G.A.R., Harding J.E. (editors), Bridge management four, Telford Thomas, pp.568-576.
- [2] Abd El-Ghany K.M., Farag M.M. (2000) “**Expert system to automate the finite element analysis for non-destructive testing**”, NDT&E International, Vol. 44, pp.409-415.
- [3] McCann D. M., Forde M. C (2001), “**Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures**”, NDT & E International, Vol. 34, No 2, pp. 71-84.
- [4] Τεχνική έκθεση (2000), “**Διάγνωση της φθοράς των όψεων του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος & μελέτη των υλικών και των επεμβάσεων για τη συντήρησή τους**”, Επιστ.Υπευθ., Α. Μοροπούλου
- [5] Moropoulou A., Batis G., Bakolas A., Karoglou M., Aggelakopoulou E. (2003), “**Damage Assessment of Concrete structures exposed to aggressive marine environment by NDT and laboratory techniques**”, Sixth CANMET/ACI: Durability of Concrete Durability of Concrete, Editor: V.M. Malhotra, pp.1035-1054.
- [6] Moropoulou A., Tsiourva Th., Theoulakis P., Christaras B., Koui M (1998), “**Non destructive evaluation of pilot scale treatments for porous stone consolidation in the Medieval City of Rhodes**”, PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, Vol. 56, pp. 259-278.
- [7] Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., Pineli, T., Prasianakis, I (2003), “**Estimation of elastic constants of stones, used in historic monuments, using ultrasound techniques and mechanical tests. Correlation of the mechanical characteristics to the microstructure**”, 3<sup>rd</sup> International Conference on Non-Destructive Testing of the Hellenic Society for NDT, Chania, Greece (in press).
- [8] Γεωργουσόπουλος, Γ. (2004), “**Δομοστατική αποτίμηση και σχεδιασμός νέων επεμβάσεων αποκατάστασης στη δυτική και ανατολική πτέρυγα του Βυζαντινού και Χριστιανικού Μουσείου Αθηνών βάσει της διερεύνησης των υλικών και των προγενέστερων επεμβάσεων**”, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, (Επιβλέπουσα Καθ. Α. Μοροπούλου).
- [9] Χρονόπουλος, Μ., Παπαθεωδώρου, Θ. (1991), “**Συμπεριφορά παραδοσιακών αργολιθοδομών υπό ανακυκλωζόμενη καταπόνηση**”, ΕΟΣ-ΕΜΠ.
- [10] Moropoulou A., Koui M., Avdelidis N.P., Achilleopoulos N. (1999), “**NDT for materials quality control, environmental impact assessment and management of cultural heritage**”, INSIGHT, J. of the British Institute of non-destructive testing, Vol.41, No 6, pp. 362-368.
- [11] Moropoulou A., Tsiourva Th., Bisbikou K., Tsantila V., Biscontin G., Longega G., Groggia M., Dalaklis E., Petritaki A (1997), “**Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the centre of Athens**”, in Proc. 4<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, ed. A. Moropoulou, F. Zezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Vol. 4, pp. 343-354.
- [12] Moropoulou A., Avdelidis N.P., Koui M., Aggelopoulos A., Karmis P (2002), “**Infrared thermography and ground penetrating radar for airport pavements assessment**”, J. Nondestructive Testing & Evaluation, Vol. 18, No.1, pp. 37-42.