



Οι μέθοδοι του ραντάρ και της ενδοσκόπησης. Εφαρμογή σε Βυζαντινά και Νεώτερα μνημεία

Βασιλική Παλιεράκη, Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Αικατερίνη-Άννα Μανωλεδάκη, Χρυσή-Ελπίδα Αδάμη,
Βασιλική Νικολοπούλου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σ' αυτή την εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή δύο μεθόδων διερεύνησης, του ραντάρ και της ενδοσκόπησης, στην τοιχοποιία Βυζαντινών μνημείων και κτηρίων του 19ου αιώνα. Η Μονή Δαφνίου, η Μονή Οσίου Λουκά (Μνημεία της Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO), ο Ναός της Παναγίας Κρήνας στη Χίο και ο Ναός της Αγίας Σοφίας στην Τραπεζούντα είναι μνημεία μεγάλης αρχιτεκτονικής και καλλιτεχνικής αξίας, ενώ τα μελετηθέντα νεώτερα μνημεία του 19ου αιώνα (Βίλλα Δουρούτη και Βίλλα Κλωναρίδη) αποτελούν μέρος της σύγχρονης αρχιτεκτονικής ιστορίας της πόλης της Αθήνας.

Τα παραπάνω Βυζαντινά και νεώτερα μνημεία έχουν υποστεί διαφόρων βαθμών βλάβες κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Σημαντικό βήμα της διαδικασίας αποκατάστασης και βελτίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς τους είναι η τεκμηρίωση του τρόπου δόμησης της τρίστρωτης τοιχοποιίας μέσω επιτόπου διερευνήσεων. Ο στόχος των επιτόπου διερευνήσεων, με χρήση των μεθόδων του ραντάρ και της ενδοσκόπησης ήταν διαφορετικός για κάθε μνημείο. Η ανάγκη διερεύνησης προκύπτει από τις παρατηρήσεις σχετικά με την αρχιτεκτονική μορφή των κτηρίων (φάσεις κατασκευής, χρήση διαφορετικών υλικών) και από την καταγραφή της παθολογίας.

Γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και των περιορισμών εφαρμογής των μεθόδων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ραντάρ, ενδοσκόπηση, τρόπος δόμησης, βυζαντινά μνημεία, νεώτερα μνημεία.



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου του ραντάρ και της ενδοσκοπησης στη Μονή Δαφνίου, στη Μονή Οσίου Λουκά (Μνημεία της Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO), στο Ναό της Παναγίας Κρήνας στη Χίο, στο Ναό της Αγίας Σοφίας στην Τραπεζούντα (Βυζαντινά μνημεία μεγάλης αρχιτεκτονικής και καλλιτεχνικής αξίας), καθώς και στη Βίλλα Δουρούτη και Βίλλα Κλωναρίδη (νεώτερα μνημεία του 19ου αιώνα) (Εικ. 1).

Η διαπίστωση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας (τόσο κατά τις όψεις της, όσο και κατά το πάχος της) αποτελεί προϋπόθεση για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της στην παρούσα φάση, για την επιλογή κατάλληλων τεχνικών επέμβασης, καθώς και για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας μετά από την επέμβαση. Ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας κατά τις όψεις της ενδέχεται να είναι ευχερώς διαπιστώσιμος, στις περιοχές όπου δεν υπάρχει επίχρισμα, είτε να χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση, στην περίπτωση επίχρισμένης τοιχοποιίας, είτε τοιχοποιίας η οποία καλύπτεται από τοιχογραφίες, ψηφιδωτά ή ορθομαρμαρώσεις. Σκοπός των επιτόπου διερευνήσεων είναι να διαπιστωθεί ο τρόπος δόμησης των λιθοδομών κατά την όψη τους, όπου δεν είναι ορατές, και κατά το πάχος τους, σε κάθε υπό μελέτη μνημείο.

Δεδομένης της αρχιτεκτονικής και καλλιτεχνικής αξίας των μνημείων, υπάρχουν εν γένει περιορισμοί ως προς τις μεθόδους οι οποίες μπορούν να εφαρμοσθούν, πρέπει δηλαδή να εφαρμοσθούν μη καταστρεπτικές ή ελάχιστα καταστρεπτικές μέθοδοι. Κάθε τεχνική από αυτές που συνήθως εφαρμόζονται σε μνημεία (ραντάρ, ενδοσκοπηση, θερμογραφία, υπέρηχοι, επίπεδοι γρύλλοι κ.ά.) έχει συγκεκριμένα όρια εφαρμογής, τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, και οι μέθοδοι να εφαρμόζονται σε συνδυασμό, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Palieraki et al., 2008, Binda et al., 2005, ONSITEFORMASONRY, 2005, Pérez-Gracia et al., 2011). Η μέθοδος που εφαρμόζεται συνήθως από την ομάδα του Εργαστηρίου Ω.Σ. του ΕΜΠ είναι η μη καταστρεπτική μέθοδος του ραντάρ. Συμπληρωματικά εφαρμόζεται η μέθοδος των ενδοσκοπήσεων. Η εφαρμογή της ελάχιστα καταστρεπτικής μεθόδου της ενδοσκοπησης γίνεται σε επιλεγμένες θέσεις, καθώς, έστω τοπικώς, αποτελεί μικρή επέμβαση στην τοιχοποιία. Επιλέγονται θέσεις στις οποίες οι πληροφορίες που αποκτήθηκαν με τη μέθοδο του ραντάρ δεν θεωρήθηκαν επαρκώς αξιόπιστες, είτε θέσεις στις οποίες, λόγω της μορφής της τοιχοποιίας, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί η μέθοδος του ραντάρ. Σημειώνεται ότι η ενδοσκοπηση, χάρη στην άμεση οπτική επαφή του παρατηρητή με το εσωτερικό της τοιχοποιίας, δίνει πρόσθετες χρήσιμες πληροφορίες σχετικές με τα υλικά κατασκευής και την παρουσία ασυνεχειών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας.

Και για τις δύο μεθόδους χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του ΕΩΣ, ΕΜΠ.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Εικ. 1: Τα υπό μελέτη μνημεία: (α) Μονή Δαφνίου, (β) Ναός Παναγίας Κρήνας στη Χίο, (γ) Μονή Οσίου Λουκά, (δ) Ναός Αγίας Σοφίας στην Τραπεζούντα, (ε) Βίλλα Δουρούτη, (στ) Βίλλα Κλωναρίδη.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

2.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΡΑΝΤΑΡ

Η μέθοδος του ραντάρ, η οποία βασίζεται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όταν διέρχονται από υλικά με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά, δίνει, υπό προϋποθέσεις, αξιόπιστα στοιχεία. Η εφαρμογή της πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό, με γνώση της μεθόδου, καθώς και της μορφής, της ιστορίας και των ιδιοτήτων της υπό μελέτη κατασκευής. Οι διαφορετικές διεπιφάνειες τις

οποίες συναντά το ηλεκτρομαγνητικό σήμα στη διαδρομή του στο εσωτερικό της τοιχοποιίας είναι άγνωστης φύσης και ενδέχεται να προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις του σήματος, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται μια μάλλον ασαφής εικόνα της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.

Όταν είναι γνωστή με σχετική ακρίβεια η διηλεκτρική σταθερά του επιφανειακού υλικού, πάνω στο οποίο κινείται η κεραία, τότε, από την ένταση και το πρόσημο της αντανάκλασης του λαμβάνεται, μπορεί να γίνει ένας χονδρικός προσδιορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς του δεύτερου υλικού το οποίο συναντά το σήμα. Η διαδικασία αυτή δεν είναι βέβαιο ότι μπορεί πάντα να καταλήξει σε αποτέλεσμα, καθώς δεν είναι σε κάθε περίπτωση ευχερής ο υπολογισμός της διηλεκτρικής σταθεράς του πρώτου υλικού και επιπλέον, συχνά δεν είναι ευδιάκριτο το πρόσημο του συντελεστή αντανάκλασης. Επομένως, μπορεί να προσδιοριστεί το βάθος στο οποίο συναντάται η πρώτη διεπιφάνεια, δεν είναι όμως εύκολο να προσδιοριστεί η φύση του δεύτερου υλικού.

Επιπρόσθετα, είναι γνωστό (Daniels, 1996) ότι, όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος του ραντάρ, η ακρίβεια της εικόνας εξαρτάται από τη συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος: σήμα χαμηλότερης συχνότητας επιτρέπει να γίνει διερεύνηση σε μεγαλύτερο βάθος, δίνει, όμως, λιγότερο σαφή αποτελέσματα. Αντιθέτως, τα πιο υψίσυχνα σήματα έχουν μάλλον περιορισμένη διεισδυτικότητα. Εν τούτοις, η εικόνα που λαμβάνεται είναι σαφής για το περιορισμένο βάθος που ερευνάται. Λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά μικρό πάχος της τοιχοποιίας (μικρότερο από 80-100cm σε όλες τις υπό μελέτη περιπτώσεις), επιλέχθηκε κεραία υψηλής συχνότητας (1500MHz). Η κεραία υψηλής συχνότητας έχει ακόμη το πλεονέκτημα του σχετικά μικρού μεγέθους και επομένως, της ευχερούς χρήσης της σε περιοχές με μικρή επιφάνεια διαθέσιμη για την κίνηση της κεραίας.

Σημειώνεται ότι θα ήταν επιθυμητό να γίνεται εφαρμογή της μεθόδου του ραντάρ καθ' όλο το μήκος της τοιχοποιίας των μνημείων, προκειμένου να γίνει πλήρης τεκμηρίωση του τρόπου δόμησης. Αυτό όμως δεν είναι δυνατόν, λόγω του ότι η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνονται είναι χρονοβόρα και έχει σημαντικό κόστος. Οι διαδρομές που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο του ραντάρ θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά. Η επιλογή των διαδρομών γίνεται με βάση πρακτικούς περιορισμούς, όπως το προσβάσιμο, η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου στην ίδια θέση απ' την εξωτερική και απ' την εσωτερική παρειά του τοίχου, η προτίμηση θέσεων στις οποίες η τοιχοποιία είναι εμφανής, χωρίς επίχρισμα, τοιχογραφίες ή ψηφιδωτό διάκοσμο, η γεωμετρία του τοίχου, η οποία θα πρέπει να είναι επαρκώς απλή, ώστε να επιτρέπεται η κίνηση της κεραίας σε μια σχετικά επίπεδη επιφάνεια. Εκτός από τους πρακτικούς περιορισμούς, η επιλογή των θέσεων γίνεται και με βάση την ενδελεχή μελέτη της κατασκευής, από ιστορική και αρχιτεκτονική σκοπιά. Πράγματι, σε μια κατασκευή η οποία είναι γνωστό ότι έχει κατασκευαστεί σε περισσότερες της μίας φάσεις, η διερεύνηση της τοιχοποιίας

δεν πρέπει να περιορίζεται σε τμήμα της κατασκευής, αλλά να γίνεται διερεύνηση τμημάτων που αντιστοιχούν στις διαφορετικές φάσεις της κατασκευής.

2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΔΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Αυτή η μέθοδος, δανεισμένη από την ιατρική επιστήμη, είναι μια μέθοδος ελάχιστα καταστρεπτική. Οπές (διαμέτρου περίπου 25mm) ανοίγονται στην τοιχοποιία, είτε χρησιμοποιούνται διαθέσιμες θέσεις οπών (π.χ. σκαλότρυπες). Μετά από σχολαστικό καθαρισμό της οπής από τη σκόνη και τα χαλαρά υλικά, το ενδοσκόπιο εισάγεται στην οπή. Ο πυρήνας του ενδοσκοπίου, ο οποίος αποτελείται από οπτικές ίνες, επιτρέπει την άμεση παρατήρηση των τοιχωμάτων της οπής. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα φωτογράφισης ή και βιντεοσκόπησης στο εσωτερικό της οπής.

Όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται για μικρή τοπική επέμβαση στην τοιχοποιία, η οποία είναι ευχερώς επισκευάσιμη. Είναι όμως προφανές ότι δεν είναι επιτρεπτή η εφαρμογή ενδοσκοπήσεων στις θέσεις ψηφιδωτών, τοιχογραφιών ή ορθομαρμαρώσεων. Επίσης, σε περιοχές όπου σώζονται τα αυθεντικά υλικά (π.χ. βυζαντινό κονίαμα) είναι προτιμητέα η αποφυγή εφαρμογής της μεθόδου της ενδοσκόπησης. Σημειώνεται ότι και η επιλογή των θέσεων στις οποίες γίνεται η εφαρμογή της μεθόδου της διερεύνησης θα πρέπει να είναι προσεκτική, ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη και υπερβολική διάτρηση της τοιχοποιίας. Οι αρμοί στους οποίους θα γίνεται η διάτρηση θα πρέπει να έχουν πάχος επαρκές, ώστε να μην βλάπτονται οι παρακείμενοι λίθοι, αλλά όχι πολύ μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρο της οπής, ώστε να καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός του ορίου των λίθων, καθώς και η απρόσκοπτη παρατήρηση του εσωτερικού της τοιχοποιίας.

Η παρατήρηση μέσω ενδοσκόπησης προσφέρει, λόγω της άμεσης οπτικής επαφής του παρατηρητή με το εσωτερικό της τοιχοποιίας, τη δυνατότητα εντόπισης ασυνεχειών και κενών καθώς και την απόκτηση ποιοτικών πληροφοριών σχετικών με την κατάσταση των υλικών. Αυτού του είδους οι πληροφορίες είναι πολύτιμες κατά το στάδιο επιλογής των επεμβάσεων. Για παράδειγμα, επιτρέπουν μια κατ' αρχήν εκτίμηση του ποσοστού των κενών της τοιχοποιίας, χαρακτηριστικό το οποίο καθορίζει την ποσότητα του ενέματος, καθώς και την αναμενόμενη αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας. Επίσης, ενδέχεται να επηρεάσει τη διαδικασία εφαρμογής των ενεμάτων (π.χ. λήψη ειδικών μέτρων, ώστε να αποφευχθούν βλάβες στα ψηφιδωτά όταν υπάρχουν κοντά σε αυτά μεγάλα κενά στο εσωτερικό της τοιχοποιίας). Πάντως, αυτή η τελευταία δυνατότητα δεν έχει ακόμη ερευνηθεί εκτενώς.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο στόχος των επιτόπου διερευνήσεων, με χρήση των μεθόδων του ραντάρ και της ενδοσκόπησης, στα Βυζαντινά και νεώτερα μνημεία που παρουσιάζονται ήταν (α) ο προσδιορισμός του πάχους των λίθων των εξωτερικών παρειών της τοιχοποιίας και του υλικού πληρώσεως, (β) ο έλεγχος ύπαρξης διάτνων λίθων, (γ) ο έλεγχος ύπαρξης και της κατάστασης διατήρησης ξυλοδεσιών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και (δ) ο

έλεγχος της ακρίβειας υποθέσεων, οι οποίες προκύπτουν από τις παρατηρήσεις σχετικά με την αρχιτεκτονική μορφή των κτηρίων και οι οποίες αφορούν τις φάσεις κατασκευής και τη χρήση διαφορετικών υλικών.

Η κατάλληλη μέθοδος (ραντάρ, ενδοσκόπηση ή συνδυασμός των δύο μεθόδων) επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των μνημείων και το στόχο της διερεύνησης.

Γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και των περιορισμών εφαρμογής των μεθόδων.

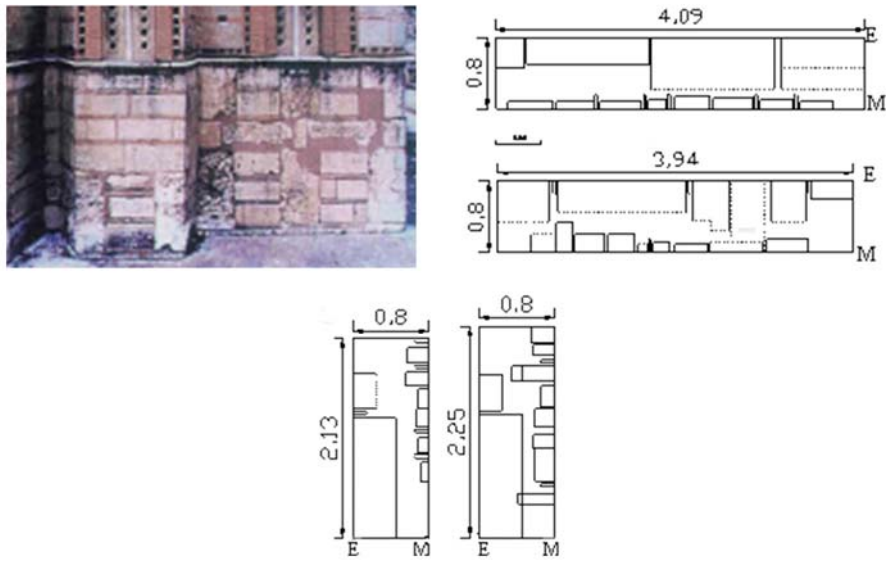
3.1 ΜΟΝΗ ΔΑΦΝΙΟΥ

Η Μονή Δαφνίου είναι ένα από τα σπουδαιότερα Βυζαντινά μνημεία της Ελλάδας, το οποίο υπέστη σοβαρές ζημιές κατά τη διάρκεια του σεισμού του Σεπτεμβρίου του 1999.

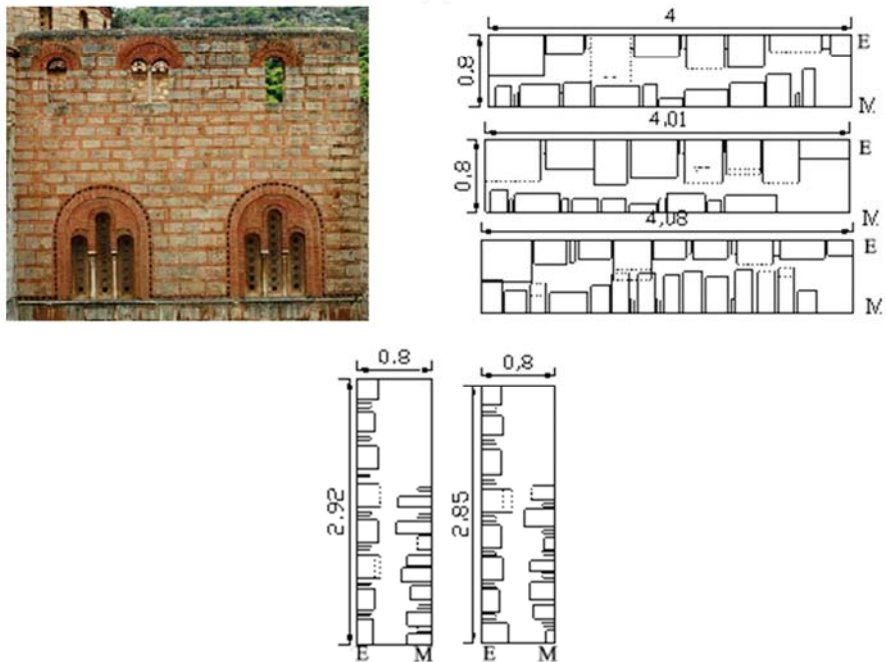
Προκειμένου να προσδιοριστεί ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της, εφαρμόστηκε η τεχνική του ραντάρ. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στην περιμετρική τοιχοποιία του μνημείου. Σαρώθηκαν συνολικά πάνω από 200m, κατά μήκος οριζόντιων και κατακόρυφων διαδρομών. Εφαρμόστηκε και η τεχνική της ενδοσκόπησης, σε επιλεγμένες περιοχές και σε θέσεις στις οποίες τα αποτελέσματα του ραντάρ ήταν ασαφή.

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συνεκτιμήθηκαν και τα πιο αξιόπιστα επιλέχθηκαν ως τελικά. Πρέπει, πάντως, να παρατηρηθεί ότι ακόμη και στην περίπτωση ασυμφωνίας των αποτελεσμάτων, η εκτιμώμενη γεωμετρία της τοιχοποιίας (Εικ. 2) δεν επηρεάζεται ουσιωδώς, λαμβανομένου υπόψη του πρακτικού στόχου της διερεύνησης, ο οποίος ήταν να διαπιστωθεί ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας.

Οι μετρήσεις αποτυπώθηκαν σε οριζόντιες και κατακόρυφες τομές της τοιχοποιίας και επέτρεψαν να διαπιστωθούν οι δύο τρόποι κατασκευής της περιμετρικής τοιχοποιίας του μνημείου (Εικ. 2): Η κατώτερη ζώνη (από τη στάθμη της θεμελίωσης μέχρι την πρώτη στάθμη των παραθύρων), είναι χτισμένη με λίθους μεγάλων διαστάσεων, τοποθετημένους με τη μεγάλη διάστασή τους οριζόντια ή κατακόρυφα, ώστε να σχηματίζουν σταυρούς. Ανάμεσα στους μεγάλους λίθους τοποθετούνται μικρότεροι λίθοι και συμπαγείς οπτόπλινθοι περιμετρικά των λίθων. Στην ανώτερη ζώνη, η τοιχοποιία κατασκευάζεται με μικρότερους λίθους και οπτοπλίνθους στους κατακόρυφους και τους οριζόντιους αρμούς. Και στις δυο περιοχές, ο τρόπος κατασκευής της τοιχοποιίας (με λίθους μεταβαλλόμενων διαστάσεων και κατά τις τρεις διαστάσεις) συνεπάγεται αυξημένο εμβαδόν διεπιφάνειας μεταξύ των εξωτερικών στρώσεων και του υλικού πληρώσεως, έναντι μιας συνήθους τρίστρωτης τοιχοποιίας με σταθερό πάχος των παρειών.



(α)

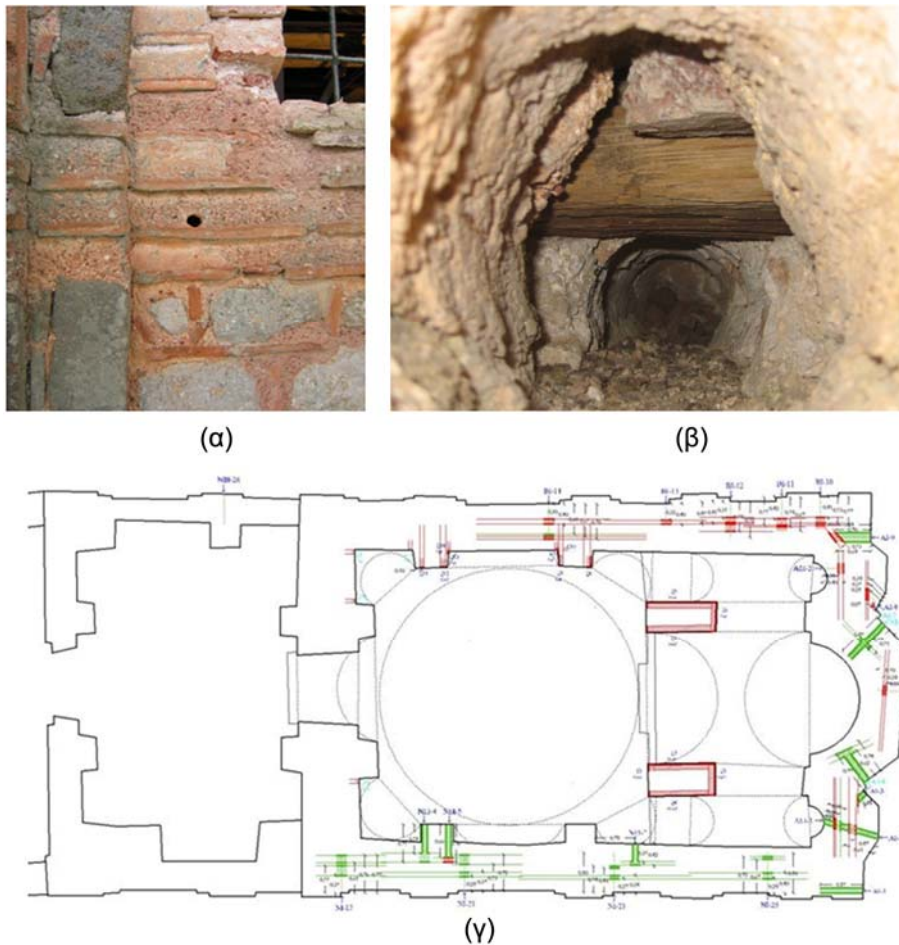


(β)

Εικ. 2: (α) Όψη (φωτογραφία) και οριζόντιες και κατακόρυφες τομές της κατώτερης ζώνης, (β) Όψη (φωτογραφία) και οριζόντιες και κατακόρυφες τομές της ανώτερης ζώνης της τοιχοποιίας.

3.2 ΝΑΟΣ ΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΑΣ ΚΡΗΝΑΣ (ΧΙΟΣ)

Η τοιχοποιία του Ναού της Παναγίας Κρήνας είναι τριστρωτη, με ποικιλία μορφών σε διάφορες θέσεις. Η εξωτερική παρειά είναι κατασκευασμένη από λίθους ή (συχνότερα) από οπτόπλινθους. Ένας ιδιαίτερος τρόπος κατασκευής [με οπτόπλινθους που εξέχουν 20mm από την επιφάνεια ανά δύο σειρές-Εικ.3(α)] δημιουργεί μια μη ομαλή επιφάνεια.



Εικ. 3: (α) Το κατασκευαστικό σύστημα του Ναού της Παναγίας Κρήνας, (β) Φωτογραφία ξυλοδεσιάς με το ενδοσκόπιο, (γ) Η διάταξη των ξυλοδεσιών, με πράσινο οι θέσεις στις οποίες εντοπίστηκε κενό.

Ήταν γνωστή η ύπαρξη ξυλοδεσιών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, όχι όμως και η ακριβής τους θέση και η κατάστασή τους. Οι ξυλοδεσιές περιδένουν την τοιχοποιία με αποτέλεσμα να βελτιώνουν τις μηχανικές της ιδιότητες, προσφέρουν σύνδεση των εξωτερικών παρειών και του υλικού πληρώσεως κατά το πάχος της τοιχοποιίας, βελτιώνουν τη διατμητική και την εκτός επιπέδου καμπτική συμπεριφορά των τοίχων κ.λπ. (Vintzileou, 2008). Η φθορά τους μπορεί να γίνει πηγή αδυναμίας, καθώς και η θετική επιρροή των ξυλοδεσιών μειώνεται ή και καταργείται, ενώ και οι διαστάσεις της διατομής της τοιχοποιίας μειώνονται σημαντικά στην περιοχή τους. Η αποκατάσταση ή αντικατάσταση των κατεστραμμένων ξυλοδεσιών είναι μια δύσκολη επέμβαση, η οποία πρέπει να βασίζεται σε καλή γνώση της γεωμετρίας και της κατάστασης των αρχικών ξυλοδεσιών.

Λόγω της γεωμετρίας της εξωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας και της κάλυψης της ομαλής εσωτερικής παρειάς με τοιχογραφίες, η μέθοδος του ραντάρ δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί αποτελεσματικά. Οι πληροφορίες για τον τρόπο κατασκευής της τοιχοποιίας συλλέχθηκαν από περιοχές με βλάβες (μέσω άμεσης οπτικής παρατήρησης ή ενδοσκόπησης). Η ενδοσκόπηση εφαρμόστηκε συστηματικά, προκειμένου

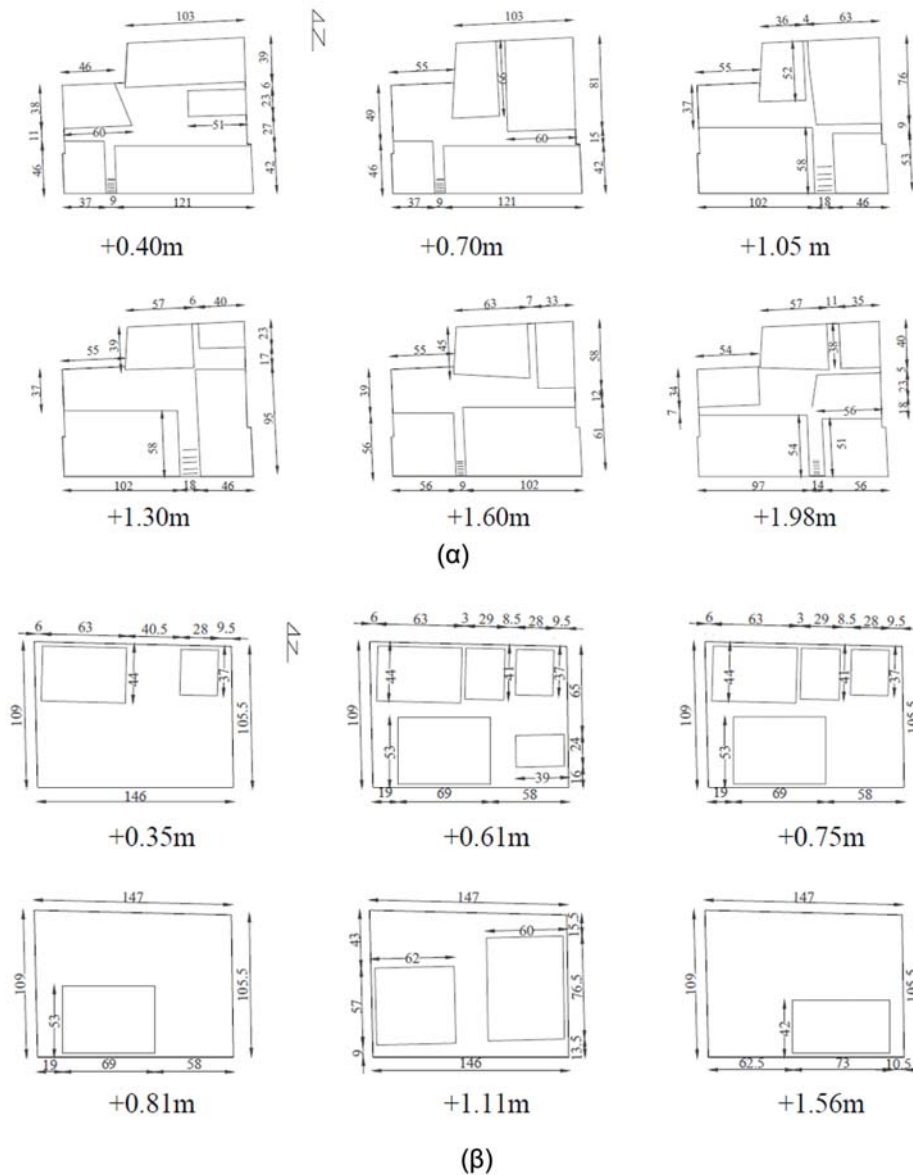


να εντοπιστούν οι ξυλοδεσιές και να διαπιστωθεί η κατάστασή τους. Για αυτόν το λόγο έγινε χρήση των ήδη υπαρχουσών οπών. Σε περιοχές χωρίς οπές, ή όπου αυτές δεν επαρκούσαν για τη διερεύνηση, διανοίχτηκαν νέες.

Η καταγραφή του συστήματος των ξυλοδεσιών βασίστηκε στα αποτελέσματα έρευνας με ενδοσκόπηση σε περίπου 100 θέσεις. Η καταγραφή συμπληρώθηκε με τα εμφανή ξύλινα στοιχεία του μνημείου [π.χ. υπέρθυρα, βάση τρούλλου, ξυλοδεσιές πεσσών, Εικ.3 (β), (γ)]. Οι θέσεις των ξυλοδεσιών λήφθηκαν υπόψη από τους μελετητές, για την εφαρμογή των ενεμάτων.

3.3 ΜΟΝΗ ΟΣΙΟΥ ΛΟΥΚΑ

Το συγκρότημα της Μονής Οσίου Λουκά αποτελείται από δύο εκκλησίες, την εκκλησία της Παναγίας, που είναι η μικρότερη, και το Καθολικό (κύριος ναός). Το Καθολικό του Οσίου Λουκά, ο καλύτερα διατηρημένος Βυζαντινός Ναός της Ελλάδας, είναι μια διώροφη εκκλησία, διάσημη για την αρχιτεκτονική και τα μοναδικά ψηφιδωτά της. Μια από τις κυριότερες δυσκολίες που χρειάστηκε να αντιμετωπιστούν στην προσπάθεια να γίνει κατανοητό το δομικό σύστημα του μνημείου είναι η έλλειψη γραπτών πληροφοριών σχετικά με το Καθολικό.



Εικ. 4: Οριζόντιες τομές σε διάφορες στάθμες από το δάπεδο: (α) Στον πεσσό του Υπερώου, (β) Στον πεσσό του Ισογείου.

Έτσι, πραγματοποιήθηκε πλήθος μετρήσεων, κυρίως στο εξωτερικό του ναού, καθώς η εσωτερική παρεία των στοιχείων είτε είναι καλυμμένη από ορθομαρμάρωση, από νεωτερικά επιχρίσματα, είτε είναι ιστορημένη. Στόχος ήταν να διαπιστωθεί ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας σε διάφορες θέσεις. Στο εσωτερικό του ναού μελετήθηκαν κυρίως οι πεσσοί. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δυσχέρειες που προκύπτουν από το γεγονός ότι η τοιχοποιία είναι καλυμμένη, και για να ληφθεί μια, κατά το δυνατόν, σαφής εικόνα του τρόπου δόμησης των πεσσών, επελέγη πυκνός κάρναβος διαδρομών σάρωσης.

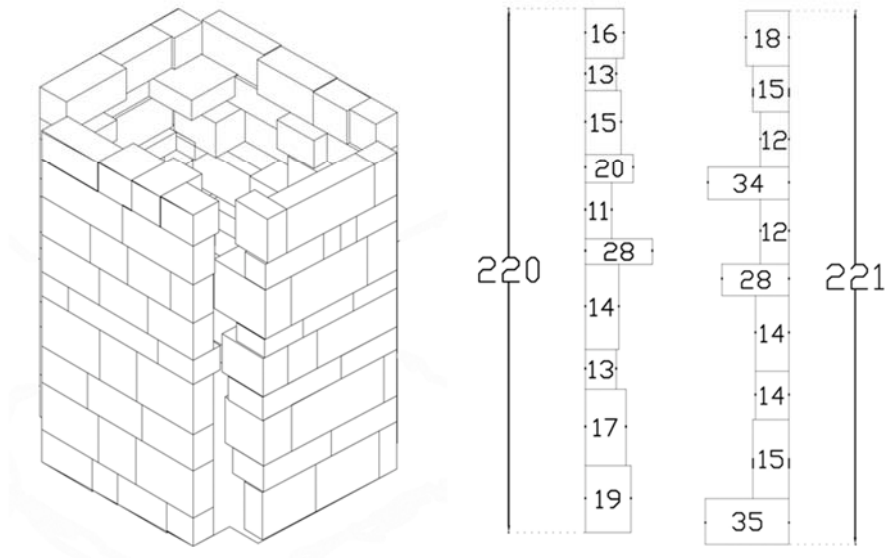
Μελετήθηκε ένας πεσσός στο Υπερώο και ένας πεσσός στο Ισόγειο. Τα αποτελέσματα για τον πεσσό του Ισογείου δεν ήταν ιδιαίτερα σαφή, όμως οι σαρώσεις σε ορισμένες περιοχές επιτρέπουν την υπόθεση

εκτενούς χρήσης πλίνθων. Αντιθέτως, η κατασκευή του πεσσού του Υπερώου είναι συμπαγής, με λίθους μεγάλων διαστάσεων και με προσεκτική εναλλαγή καθ' ύψος. Η φύση του χώρου μεταξύ των λίθων δεν είναι γνωστή, είναι όμως περιορισμένου όγκου. Η κατασκευή του πεσσού του Ισογείου φαίνεται να είναι χαμηλότερης ποιότητας από αυτήν του πεσσού του Υπερώου (Εικ.4). Τούτο είναι δύσκολο να αποδοθεί σε κατασκευαστικό σφάλμα ή σφάλμα σύλληψης. Το να ανήκουν αυτοί οι δύο πεσσοί σε διαφορετικές φάσεις κατασκευής, θα μπορούσε να αποτελεί ερμηνεία, η οποία, όμως, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

3.4 ΝΑΟΣ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ (ΤΡΑΠΕΖΟΥΝΤΑ)

Οι επιτόπου μετρήσεις στο Ναό της Αγίας Σοφίας στην Τραπεζούντα πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Έργου NIKER (New Integrated Knowledge Based Approaches to the Protection of Cultural Heritage from Earthquake Induced Risk). Ο Ναός της Αγίας Σοφίας στην Τραπεζούντα κατασκευάστηκε τον 13^ο αιώνα και είναι ένα από τα λίγα σωζόμενα μνημεία εκείνης της περιόδου. Σκοπός των επιτόπου διερευνήσεων ήταν η επιλογή των κατάλληλων επεμβάσεων. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε κυρίως σε περιοχές στις οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τεχνικές επέμβασης (π.χ. ενέματα), χωρίς σημαντική αλλαγή των δυναμικών χαρακτηριστικών του μνημείου.

Στο μνημείο εφαρμόστηκαν και οι δύο μέθοδοι. Σημειώνεται ότι σε πολλές περιοχές η εικόνα που λαμβάνεται δεν είναι αξιόπιστη: οι λίθοι της εξωτερικής όψης έχουν μικρές διαστάσεις, αποτέλεσμα των οποίων είναι πολλαπλές αντανάκλασεις, σε ορισμένες περιοχές του μνημείου υπάρχει υψηλό ποσοστό υγρασίας (κοντά στο δάπεδο ή σε περιοχές που εκτίθενται στα όμβρια), με αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλαπλών αντανάκλασεων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, οι οποίες δεν επιτρέπουν τον ευχερή προσδιορισμό του πάχους της εξωτερικής παρειάς. Ωστόσο, οι συστηματικές μετρήσεις με το ραντάρ και η συμβολή της μεθόδου της ενδοσκόπησης, έδωσαν τη δυνατότητα προσδιορισμού του πάχους των εξωτερικών στρώσεων στις περισσότερες περιοχές του μνημείου (Εικ.5) (Palieraki et al., 2013).



Εικ. 5: Δυτική όψη, τρισδιάστατη απεικόνιση και κατακόρυφες τομές του βόρειου πεσσού του Ναού της Αγίας Σοφίας, στην Τραπεζούντα.

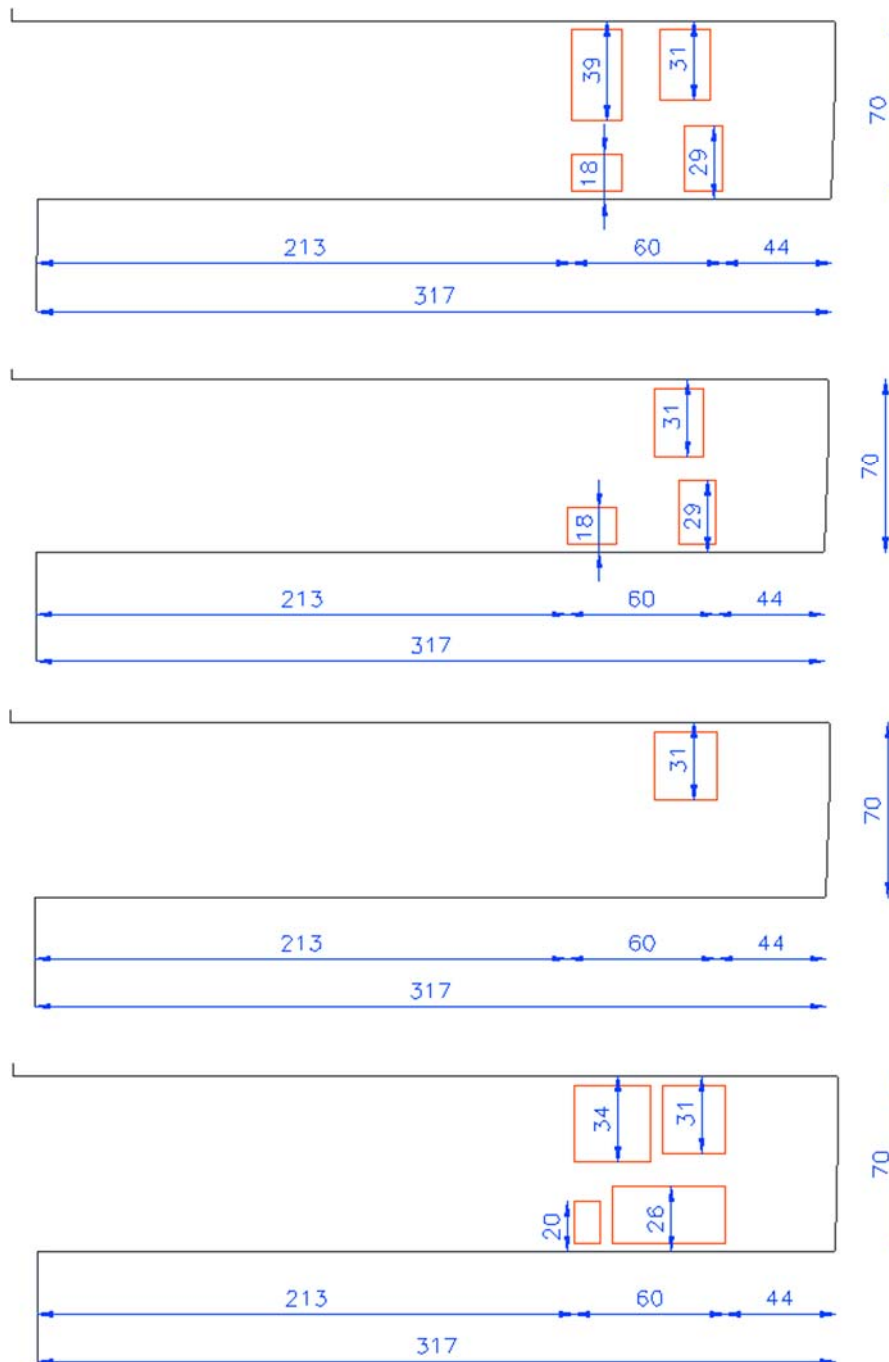
3.5 ΒΙΛΛΑ ΚΛΩΝΑΡΙΔΗ

Στο μεγαλύτερο τμήμα του κτίσματος της Βίλλας Κλωναρίδη, η τοιχοποιία είναι επιχρισμένη, επομένως το ζητούμενο ήταν ο προσδιορισμός και των τριών διαστάσεων των λίθων. Η Βίλλα Κλωναρίδη έχει κατασκευαστεί σε διαφορετικές φάσεις, με διαφορετικά υλικά. Προκειμένου να διευκολυνθεί η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, έγιναν αρχικά διερευνήσεις σε τοιχοποιία κατά τόπους ανεπίχριστη, με γνωστή γεωμετρία. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις σε χαρακτηριστικούς πεσσούς, όπου η τοιχοποιία καλύπτεται από επίχρισμα πάχους 3-4 cm.



Για τους επιχρισμένους πεσσούς του ισογείου ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία διερεύνησης με το ραντάρ. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν στατικές δοκιμές, ώστε να προσδιοριστεί η διηλεκτρική σταθερά της τοιχοποιίας του κάθε πεσσού. Τα αποτελέσματα των στατικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς συμφωνούν με τις προκαταρκτικές δοκιμές. Η σάρωση των πεσσών έγινε με διαδοχικές οριζόντιες και κατακόρυφες σαρώσεις ανά αποστάσεις των 10cm.

Με βάση τις αναλυτικές μετρήσεις με το ραντάρ, διαπιστώθηκε ότι η τοιχοποιία είναι τρίστρωτη, αποτελείται από δύο παράλληλες εξωτερικές παρειές, ενώ το κενό μεταξύ τους πληρούται με χαλαρό υλικό (ενδιάμεση στρώση). Η συγκεκριμένη τεχνική δόμησης ακολουθήθηκε κατά τις δύο κύριες κατασκευαστικές φάσεις του κτίσματος.



Εικ. 6: Σκαριφήματα οριζόντιων τομών πεσσού της Βίλλας Κλωναρίδη σε διάφορες στάθμες.

3.6 ΒΙΛΛΑ ΔΟΥΡΟΥΤΗ

Στη Βίλλα Δουρούτη, η οποία αποτελεί τμήμα του συγκροτήματος του Μεταξουργείου, η διερεύνηση με τη μέθοδο του ραντάρ είχε διπλό σκοπό: τη διερεύνηση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας και τη διαπίστωση χρήσης διαφορετικών υλικών, κατά την πραγματοποίηση παλαιότερων επεμβάσεων στο κτήριο. Δίδεται έμφαση στο δεύτερο μέρος της διερεύνησης.

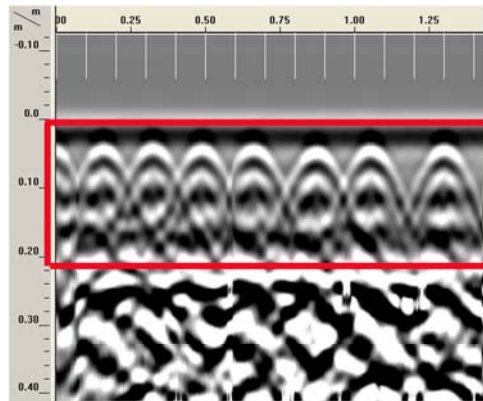
Κατά τη μελέτη της Βίλλας Δουρούτη πραγματοποιήθηκε έρευνα στα αρχεία του Δήμου Αθηναίων, ιδιοκτησία του οποίου αποτελεί το κτήριο. Αποκτήθηκαν χρήσιμες πληροφορίες για τις φάσεις κατασκευής και τις μεταβολές στο δομικό σύστημα. Η παρουσία υποστρωμάτων και δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος στο υπόγειο και στο ισόγειο του κτηρίου και η χρήση τσιμεντιτικού κονιάματος για το αρμολόγημα μέρους της τοιχοποιίας, θεωρήθηκαν ενδεικτικά της χρήσης ωπλισμένου σκυροδέματος σε περιοχές του κτηρίου. Πράγματι, παλαιότερες φωτογραφίες που βρέθηκαν στα αρχεία του Δήμου, δείχνουν ότι η διάταξη και οι διαστάσεις των ανοιγμάτων διέφεραν στην αρχική μορφή της Βίλλας Δουρούτη (Εικ.7).

Κατά τη διερεύνηση των πεσσών του ισογείου με τη μέθοδο του ραντάρ, βρέθηκαν σαφείς ενδείξεις επεμβάσεων με διαφορετικά υλικά. Οι επεμβάσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: Στους πεσσούς μικρών διαστάσεων (μήκους 30-40cm), η τοιχοποιία έχει αντικατασταθεί πλήρως από ωπλισμένο σκυρόδεμα [Εικ.8(α)]. Μεταξύ των πεσσών μεγαλύτερου μήκους εντοπίζονται εκείνοι στους οποίους έχει προστεθεί ωπλισμένο σκυρόδεμα, με σχετικά μεγάλες αποστάσεις συνδετήρων, σε επαφή με την τοιχοποιία [Εικ.8(β)] και εκείνοι στους οποίους δεν εντοπίζεται οπλισμός, αλλά εντοπίζεται διεπιφάνεια μεταξύ διαφορετικών υλικών [Εικ.8(γ)].

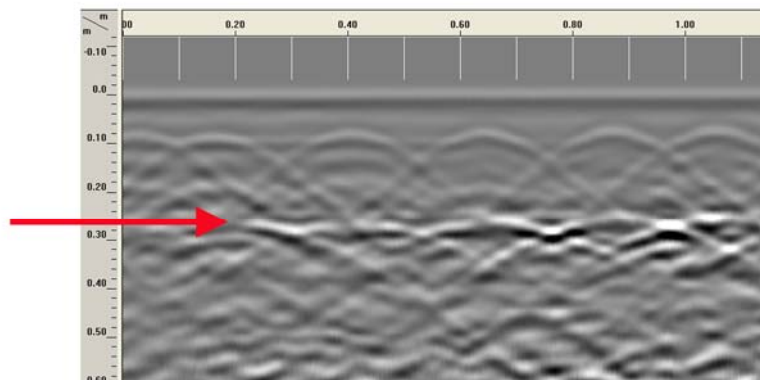
Τα ευρήματα του ραντάρ συνέβαλαν στη διαμόρφωση ακριβέστερου υπολογιστικού ομοιώματος του κτηρίου και, επομένως, στην πιο ρεαλιστική αποτίμηση της κατασκευής.



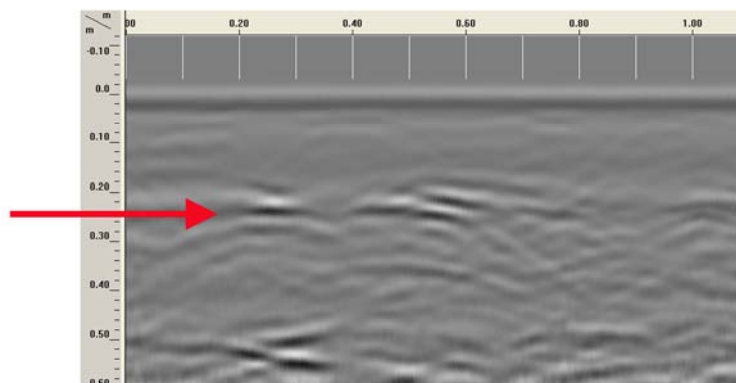
Εικ. 7: Παλαιότερη φωτογραφία (Αρχείο Δήμου Αθηναίων) και πρόσφατη φωτογραφία της κύριας όψης της Βίλλας Δουρούτη. Φαίνονται οι διαφορές στη διάταξη και στις διαστάσεις των ανοιγμάτων.



(α)



(β)



(γ)

Εικ. 8: Εικόνες από το ραντάρ: (α) Πεσσοί ωπλισμένου σκυροδέματος, (β) Πεσσοί με οπλισμό και διεπιφάνεια διαφορετικών υλικών, (γ) Πεσσοί με διεπιφάνεια σε βάθος περίπου ίσο με 25cm.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των διερευνήσεων, τα οποία παρουσιάστηκαν σ' αυτή την εργασία, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της μεθόδου του ραντάρ στην τοιχοποιία μπορεί να καταλήξει σε αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την εις βάθος γεωμετρία της τοιχοποιίας.

Ο συνδυασμός αυτής της μη καταστρεπτικής μεθόδου με την ελάχιστη καταστρεπτική μέθοδο της ενδοσκόπησης μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος της ενδοσκόπησης ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί και μόνη της, αν δεν υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου του ραντάρ.

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή των μεθόδων θα πρέπει να γίνεται με προσεκτική επιλογή των διαδρομών και των θέσεων διάτρησης. Απαραίτητη κρίνεται η συνεργασία διαφόρων ειδικοτήτων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Binda, L., Zanzi, L., Lualdi, M., Condoleo, P. (2005) The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *Int. Journal NDT&E*, 38, 171-179.
- Daniels, D.J. (1996). Surface-penetrating radar. The Institution of Electrical Engineers, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, London.
- ONSITEFORMASONRY. (2005). Results and Research Methodologies of ONSITEFORMASONRY, EC Project Report.
- Palieraki, V., Adami, Ch.-E., Vintzileou, E., (2013) In-situ measurements using radar and boroscopy techniques: Case Study -Hagia Sophia Museum of Trabzon, Turkey. *Proceedings of the BH2013, Milan, Italy*.
- Palieraki, V., Vintzileou, E., Miltiadou-Fézens, A., Delinikolas, N. (2008). The use of radar techniques and boroscopy in investigating old masonry: The case of Dafni Monastery, *International Journal of Architectural Heritage*, 2, 155-186.
- Pérez-Gracia, V., Di Capua, D., Caselles, O., Rial, F., Lorenzo, H., González-Drigo, R., Armesto, J. (2011). Characterization of a Romanesque Bridge in Galicia (Spain). *International Journal of Architectural Heritage*, 5(3), 251-263.
- Vintzileou, E. (2008). Effect of Timber Ties on the Behavior of Historic Masonry. *Journal of Structural Engineering*, 134(6), 961–972.



Η Βασιλική Παλιεράκη είναι Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ. Φοίτησε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, στο Πανεπιστήμιο της Πάντοβα (MSc, 2005 στη Δομητική Αποκατάσταση Μνημείων και Ιστορικών Κτηρίων) και εκπόνησε τη Διδακτορική της Διατριβή σε θέματα διεπιφανειών σκυροδέματος στο ΕΜΠ. Ερευνητικά ασχολείται με επιτόπου μετρήσεις, αξιολόγηση μετρήσεων με ραντάρ και ενδοσκοπήσεις σε μνημεία και σύγχρονες κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Τοιχοποιίας, ανάλυση μνημείων και παραμετρικές αναλύσεις, σχεδιασμό, πραγματοποίηση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών, μελέτη ωπλισμένων διεπιφανειών σκυροδέματος. Διεύθυνση: Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ (ΕΩΣ ΕΜΠ), Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773, Ζωγράφου, vasopal@central.ntua.gr

Η Ελισάβετ Βιντζηλαίου είναι Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Διευθύντρια του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ. Διδάσκει μαθήματα ΩΣ, Μηχανικής της τοιχοποιίας και τεχνικές επεμβάσεων σε ιστορικές κατασκευές, σε προπτυχιακά και μεταπτυχιακά προγράμματα σπουδών. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντά της περιλαμβάνουν τη συμπεριφορά κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα, με έμφαση στην έναντι σεισμού συμπεριφορά, το σχεδιασμό κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα, αποτίμηση και ανασχεδιασμό, τεχνικές επέμβασης, συμπεριφορά υφιστάμενων κατασκευών από τοιχοποιία, αποτίμηση και αποκατάσταση μνημείων, επιτόπου διερευνητικές μεθόδους τεκμηρίωσης κατασκευών. Είναι Μέλος του ΔΣ του ΟΑΣΠ και του Κεντρικού Συμβουλίου Νεωτέρων Μνημείων του Υπουργείου Πολιτισμού. Έχει μετάσχει σε 45 ερευνητικά προγράμματα. Έχει 200 δημοσιευμένες εργασίες σε Περιοδικά και σε Πρακτικά Συνεδρίων. Διεύθυνση: ΕΩΣ ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773, Ζωγράφου, elvintz@central.ntua.gr

Η Αικατερίνη-Άννα Μανωλεδάκη, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, με Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης στο Δομοστατικό Σχεδιασμό και την Ανάλυση των Κατασκευών, είναι Υποψήφια Διδάκτορας του ΕΜΠ. Στο πλαίσιο της Διδακτορικής της Διατριβής ασχολείται με τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς ιστορικών κατασκευών και μνημείων, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Διαθέτει εμπειρία στην εφαρμογή και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μηκαταστρεπτικών μεθόδων, στο σχεδιασμό και στην εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών, στην εφαρμογή μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης σε ιστορικές τοιχοποιίες, στην υπολογιστική διερεύνηση δομικών μελών και φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τρεχόντως εργάζεται στο Υπουργείο Πολιτισμού. Διεύθυνση: ΕΩΣ ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773, Ζωγράφου, katianna_manol@yahoo.gr



Η Δρ. Χρυσή-Ελπίδα Αδάμη, Πολιτικός Μηχανικός, ερευνήτρια του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ, εκπόνησε Διδακτορική Διατριβή σε θέματα υλικών επέμβασης με στόχο την ενίσχυση ιστορικών κατασκευών. Έχει εμπειρία σε τεχνολογία δομικών υλικών, μηχανικές δοκιμές, δοκιμές ανθεκτικότητας, αναλύσεις XRD, παρατηρήσεις σε OEM & SEM, σε στατικές/δυναμικές δοκιμές δοκιμών φυσικής κλίμακας, σε επιτόπου μετρήσεις με μη καταστρεπτικούς ελέγχους σε κατασκευές ωπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και σε μνημεία. Τα ερευνητικά της ενδιαφέροντα εστιάζονται στη συμπεριφορά δομικών υλικών και κατασκευών από σκυρόδεμα και τοιχοποιία (ιστορικών και σύγχρονων). Διεύθυνση: ΕΩΣ ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773, Ζωγράφου, adamis@central.ntua.gr

Η Βασιλική Νικολοπούλου είναι Υποψήφια Διδάκτορας Πολιτικός Μηχανικός στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ. Ολοκλήρωσε τις προπτυχιακές της σπουδές στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και τις μεταπτυχιακές της σπουδές στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (MSc, 2013 στην Προστασία Μνημείων, Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης). Ερευνητικά ασχολείται με επιτόπου μετρήσεις, αξιολόγηση μετρήσεων με ραντάρ και ενδοσκοπήσεις σε μνημεία και μνημειακά σύνολα, ανάλυση μνημείων και παραμετρικές αναλύσεις. Διεύθυνση: ΕΩΣ ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773, Ζωγράφου, villynik@central.ntua.gr