

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΝΑΓΙΟΥ ΤΑΦΟΥ – Η ΕΙΔΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ ΤΩΝ ΦΑΤΝΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟΥ

Αντωνία Μοροπούλου¹, Ελισάβετ Τσιλιμαντού¹, Νικόλαος Τσονάκας², Γεώργιος
Πανταζής², Σοφία Σοιλέ³, Σεβαστή Ταπεινάκη³, Χαράλαμπος Ιωαννίδης³,
Ανδρέας Γεωργόπουλος³, Ευαγγελία Λάμπρου†²

¹Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

²Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ

³Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ

Περίληψη

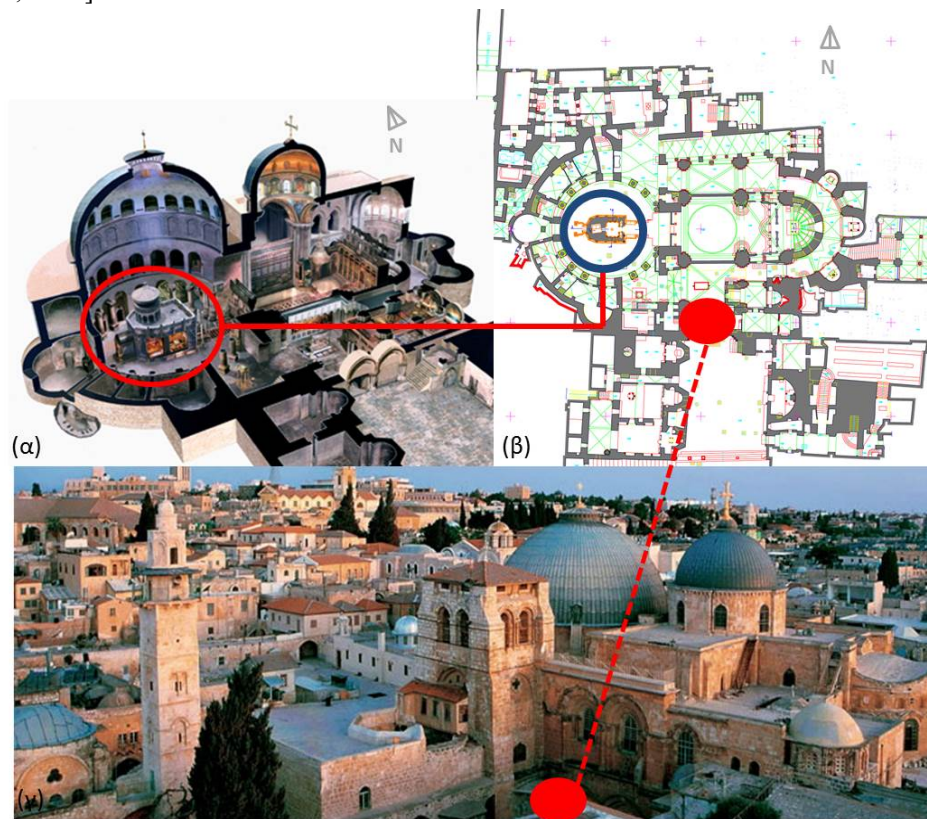
Αυτή η σύντομη παρουσίαση της εργασίας «Η συμβολή της Τρισδιάστατης τεκμηρίωσης στη διεπιστημονική προσέγγιση του έργου αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου - Η Ειδική Τεκμηρίωση των λίθων των φατνωμάτων του Ιερού Κουβουκλίου», αποτελεί δημοσίευση αδημοσίετου υλικού στον τιμητικό – συλλεκτικό αυτό τόμο, προς τιμήν της μνήμης της καθ. Λίτσας Λάμπρου για την επιστημονική και προσωπική της συμβολή στο έργο του Παναγίου Τάφου.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμβολή της γεωμετρικής τεκμηρίωσης στη μελέτη της δομικής αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου ως κρίσιμος παράγοντας στη λήψη αποφάσεων στη μελέτη, αλλά και κατά τη διάρκεια του έργου αποκατάστασης του μνημείου. Οι υψηλής ακρίβειας εργασίες γεωμετρικής τεκμηρίωσης, συνέβαλαν στην ανάλυση και δημιουργία προϊόντων πολύ υψηλών προδιαγραφών, που συνεισέφεραν στην αποτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου, καθώς και στη μελέτη, τις εργασίες αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου και την αποτίμηση των εργασιών αυτών. Πιο συγκεκριμένα, σαρώσεις με επιλεγμένο ψηφιακό σαρωτή πραγματοποιήθηκαν στα λίθινα μέλη, που απομακρύνθηκαν από τα φατνώματα του μνημείου, κατά τη διάρκεια του έργου της αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου και τα οποία επανατοποθετήθηκαν στο τέλος του. Αποτελούν μία καινοτόμα προσέγγιση στην τεκμηρίωση των δομικών στοιχείων μιας ιστορικής κατασκευής και επίσης συνεισφέρουν στο σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης και δομικής αποκατάστασης της. Συνολικά η συνδρομή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με τη συμμετοχή τεσσάρων σχολών διαφορετικών ειδικοτήτων υπήρξε καθοριστική, για την αποκατάσταση του μοναδικού αυτού μνημείου, η οποία πραγματοποιήθηκε υπό την επιστημονική εποπτεία της διεπιστημονικής ομάδας του ΕΜΠ με επικεφαλής την Καθ. Α. Μοροπούλου.

1. Το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

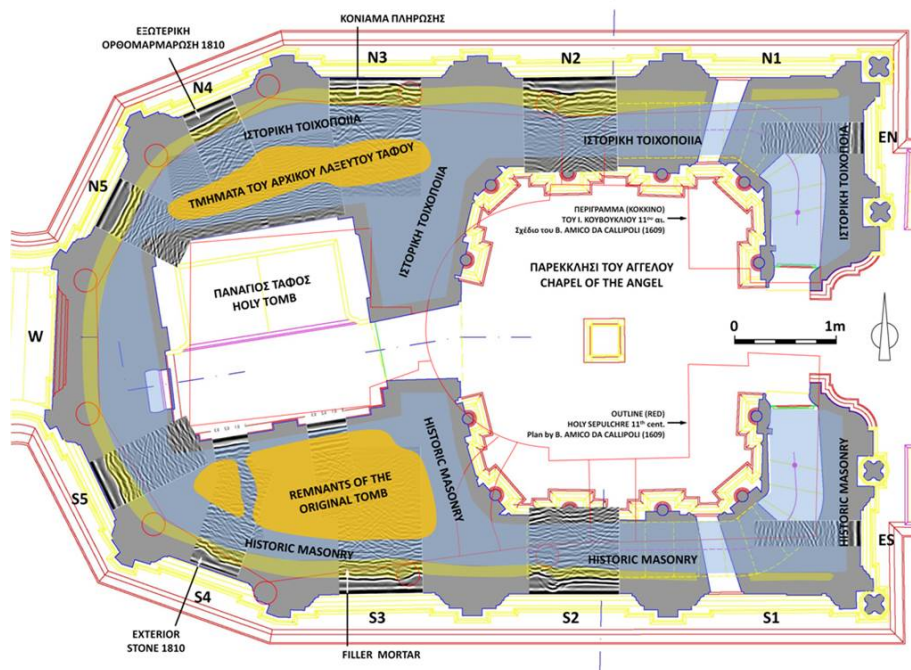
Το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, είναι το σημαντικότερο μνημείο της Χριστιανοσύνης, καθώς αποτελεί το δόμημα που, σύμφωνα με την παράδοση, περικλείει τον Τάφο του Χριστού. Αποτελεί εμβληματικό μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Η θέση του Ιερού Κουβουκλίου είναι στο κέντρο της Ροτόντας

στον Ιερό Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα (Εικόνα 1: (α) Θέση του Ιερού Κουβουκλίου στον Ιερό Ναό της Αναστάσεως (β) με τη γενική εικόνα του Ιερού Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα (γ)). Η μορφολογία του Παναγίου Τάφου, καθώς και του Ιερού Κουβουκλίου που τον περικλείει, έχει τροποποιηθεί αρκετές φορές στο βάθος των αιώνων σε μια αέναη εξέλιξη οικοδομικών φάσεων, από το 326 μ.Χ. που ορίζεται η Κωνσταντινεία περίοδος, στη Βυζαντινή (11^{ος} αιώνας) και την πρώτη Σταυροφορική περίοδο (1099-1187), μέχρι και την τελευταία ανακατασκευή από τον Κάλφα Κομνηνό (1809-1810 μ.Χ.) μετά την καταστροφική πυρκαγιά του 1808. Η τελευταία αυτή μορφή αποτελεί και το δόμημα που μελετήθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Στη μορφή αυτή του Ιερού Κουβουκλίου, δέσποζε η παρουσία του σιδηρού κλωβού, που είχε τοποθετηθεί από τη Βρετανική Αρμοστεία το 1947, με σκοπό την αντιμετώπιση της προϊούσας παραμόρφωσής του Ιερού Κουβουκλίου μετά το σεισμό του 1927 [Lavvas, 2009],[Μητρόπουλος, 2009],[Pringle, 2010], [Biddle, 1999],[Lavvas, 2004],[Balodimos et al, 2003].



Εικόνα 1: (α) Θέση του Ιερού Κουβουκλίου στον Ιερό Ναό της Αναστάσεως (β) με τη γενική εικόνα του Ιερού Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα (γ) [Balodimos et al, 2003]

Δομικά, το Ιερό Κουβούκλιο αποτελείται από δύο μέρη, το Παρεκκλήσι του Αγγέλου που βρίσκεται προς τα ανατολικά και τον Ταφικό Θάλαμο που βρίσκεται στα δυτικά. Το Κουβούκλιο καλύπτεται από ορθομαρμαρώσεις τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό του. Ο Τάφος του Χριστού, βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του Ταφικού Θαλάμου και περικλείεται επίσης από μαρμαρίνες πλάκες. Η παρουσία των ορθομαρμαρώσεων απέκρυπτε την υφιστάμενη δομική κατάσταση του Κουβουκλίου, ωστόσο οι έντονες παραμορφώσεις και η απόκλισή τους από την κατακόρυφο υποδεικνυαν σοβαρά προβλήματα ως προς τη δομική του ακεραιότητα.



Εικόνα 2: Κάτοψη του Ιερού Κουβουκλίου, με πληροφορίες σε σχέση με τη δομή του και τις ιστορικές του φάσεις μετά από διασκόπηση της τοιχοποιίας με γεωραντάρ και αρχιτεκτονική ανάλυση [Lamproroulos et al, 2017]

2. Διεπιστημονική σύμπραξη στο έργο της αποκατάστασης

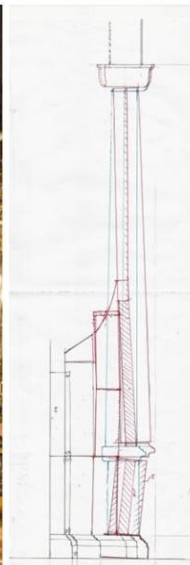
Το 2015, ο Μακαριότατος Πατριάρχης Ιεροσολύμων, Θεόφιλος ΙΙΙ, προσκάλεσε την διεπιστημονική ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που αποτελείται από τέσσερα εργαστήρια, με επικεφαλής την Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Α. Μοροπούλου, να διεξαγάγει μελέτη με σκοπό τη διάγνωση των παραγόντων φθοράς, καθώς και την αποτίμηση της κατάστασης διατήρησης του Ιερού Κουβουκλίου [1,8,9]. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, αποτίμησαν την κατάσταση διατήρησης του μνημείου ως κρίσιμη και ανέδειξε την ανάγκη για άμεσες εργασίες αποκατάστασης, ώστε να διασφαλιστεί η δομική του ακεραιότητα. Το 2016, μετά από μια ιστορική συμφωνία μεταξύ των τριών Χριστιανικών Κοινοτήτων, υλοποιήθηκε το έργο αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου, «Ολοκληρωμένο Πρόγραμμα Διαγνωστικής Έρευνας και Στρατηγικός Σχεδιασμός Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης και Αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανιέρο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα», με επιστημονική εποπτεία από το ΕΜΠ και επικεφαλής την Καθ. Α. Μοροπούλου. Το έργο ολοκληρώθηκε στις 22 Μαρτίου 2017 [Moropoulou et al, 2017], [Moropoulou et al, 2017]. Η Διεπιστημονική Ομάδα του ΕΜΠ, αποτελούνταν από τον Καθ. Ε. Κορρέ, από τη Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, τον Καθ. Α. Γεωργόπουλο από τη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, την Καθ. Α. Μοροπούλου από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών, τον Καθ. Κ. Σπυράκο από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και τον Αν. Καθ. Χ. Μουζάκη, ως Αναπληρωτή Υπεύθυνο Εργοταξίου, από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Η κατασκευαστική πολυπλοκότητα του μνημείου και η έλλειψη επαρκών επιστημονικών δεδομένων, δεδομένου ότι η προηγούμενη αποκατάσταση είχε λάβει χώρα δυο αιώνες νωρίτερα, και η τελευταία επέμβαση στη δομή του μνημείου, είχε πραγματοποιηθεί την περίοδο της Βρετανικής Αρμοστείας, είχε ως συνέπεια την ελλιπή τεκμηρίωση του

μνημείου σε σχέση με τη εσωτερική του δομή],[Μητρόπουλος, 2009],[Pringle, 2010], [Biddle, 1999]. Συνεπώς, δεν ήταν γνωστό αν παρέμεναν ενσωματωμένα στο δόμημα εναπομένοντα τμήματα του Ιερού Βράχου, δηλαδή του αυθεντικού λαξευμένου ταφικού θαλάμου, ή αν υπήρχε εσωτερική τοιχοποιία μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών ορθομαρμαρώσεων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με καινοτόμα διεπιστημονική προσέγγιση, με έμφαση στη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών, επιτυγχάνοντας μια διεπιστημονική και ολοκληρωμένη τεκμηρίωση [Lampropoulos et al, 2017], [Georgopoulos et al, 2018], [Georgopoulos et al, 2017] [Alexakis et al, 2018], [Agrafiotis et al, 2017]. Πιο συγκεκριμένα, η ομάδα του ΕΜΠ έκανε χρήση τεχνικών όπως η θερμογραφία υπερύθρου, η μικροσκοπία οπτικών ινών, το γεωραντάρ, η υπερηχοσκόπηση, η σάρωση με ψηφιακό σαρωτή laser, η σάρωση με επίγειο σαρωτή laser, η λήψη φωτογραφιών, αξιοποιώντας τεχνικές μη καταστρεπτικές και μη παρεμβατικές. Παράλληλα ελήφθησαν δείγματα με σκοπό τον χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς του μνημείου [Apostolopoulou et al, 2018].

3. Συμβολή της Τρισδιάστατης Τεκμηρίωσης

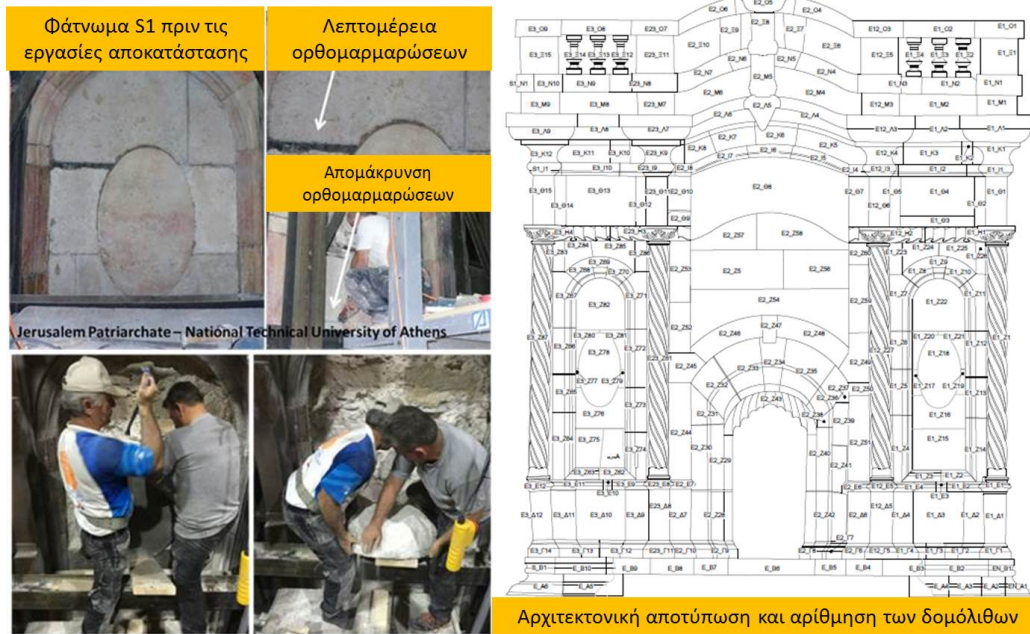
Κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου, ήταν κρίσιμο να αποκαλυφθεί η δομή του μνημείου πίσω από τις ορθομαρμαρώσεις, για να διαπιστωθεί η κατάσταση διατήρησής του, λόγω της καταγραφής αρκετών παραμορφώσεων, καθώς και τη διόγκωση του δομήματος (Εικόνα 3). Τα αίτια της παραμόρφωσης ήταν η εξαλλοίωση των κονιαμάτων με κύρια πηγή την υγρασία (παραμένουσα και τριχοειδή) [Apostolopoulou et al, 2018]. Ειδικότερα, συγκεκριμένα μέρη της τοιχοποιίας, ιδιαίτερα στην περιοχή γύρω από το Ταφικό Θάλαμο, ήταν σε πολύ κακή κατάσταση διατήρησης, καθιστώντας την αποκατάσταση αυτών των τμημάτων απαραίτητη ώστε να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα του μνημείου. Πραγματοποιήθηκε η αποσυναρμολόγηση και η απομάκρυνση των λίθινων μελών των ορθομαρμαρώσεων από τα φατνώματα του μνημείου, ενώ απομακρύνθηκαν και τα αποσθρωμένα κονιαμάτων της εσωτερικής τοιχοποιίας που αποκαλύφθηκε πίσω από τις ορθομαρμαρώσεις. Παράλληλα με την εσωτερική τοιχοποιία, αποκαλύφθηκαν τμήματα του Ιερού Βράχου.



Κατακόρυφη αξονική τομή στη θέση της θύρας με θέα προς τον δεξιό αυτής κίονα (Εμ. Κορρές, 2015)

Εικόνα 3: Διόγκωση της τοιχοποιίας στην ανατολική όψη του μνημείου [Moropoulou et al, 2017]

Πριν την απομάκρυνση των ορθομαρμαρώσεων έγινε η αρχιτεκτονική τεκμηρίωση της υπάρχουσας κατάστασης των όψεων, καθώς και η αρίθμηση κάθε μέλους των ορθομαρμαρώσεων (Εικόνα 4). Κάθε λίθος που αποσπάστηκε, μεταφέρθηκε στο εργαστήριο συντήρησης που δημιουργήθηκε και λειτουργούσε καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης, στη γαλαρία των Λατίνων, μέσα στο Ναό της Αναστάσεως.



Εικόνα 4: Απομάκρυνση Ορθομαρμαρώσεων, Αρχιτεκτονική Αποτύπωση και Αρίθμηση των λίθων [Γιαννακόπουλος, 2017]

Για την αποτύπωση των λίθινων μελών που αποτελούν τις ορθομαρμαρώσεις, επιλέχθηκε η χρήση σαρωτή δομημένου φωτός, και συγκεκριμένα ο σαρωτής Artec EVA 3D [<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva-v2>. (Ημερομηνία πρόσβασης 29/04/2020)] (Εικόνα 5). Σε ένα σαρωτή δομημένου φωτός γίνεται χρήση πηγής φυσικού φωτός (flashbulb) και όχι laser, όπως στους κλασικούς σαρωτές τρισδιάστατης αποτύπωσης. Είναι ένας πολύ γρήγορος σαρωτής πεδίου. Πρόκειται για μια τρισδιάστατη συσκευή σάρωσης για τη καταγραφή ενός αντικειμένου στο χώρο, κάνοντας χρήση εναλλασσόμενων μοτίβων προβαλλόμενου φωτός και ενός συστήματος φωτογράφισης. Προβάλλεται μια στενή λωρίδα φωτός στην επιφάνεια του αντικειμένου προς αποτύπωση, που εμφανίζεται παραμορφωμένη, λόγω της μορφής του αναγλύφου του αντικειμένου, σε σύνολο εικόνων που λαμβάνονται από συγκεκριμένη οπτική διάταξη, με γωνίες λήψης διαφορετικές εκείνης του προβολέα. Έτσι, επιτυγχάνεται η γεωμετρική αναπαράσταση της επιφάνειας του σχήματος του αντικειμένου με μεγάλη ακρίβεια [<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva-v2>. (Ημερομηνία πρόσβασης 29/04/2020)]. Ο επιλεγμένος σαρωτής Artec EVA 3D καταγράφει έως και 16 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Αυτά προσανατολίζονται αυτόματα σε πραγματικό χρόνο και καθιστούν τη σάρωση εύκολη και γρήγορη. Στα τεχνικά του χαρακτηριστικά, η ανάλυση φτάνει έως 0.5 mm και η σημειακή ακρίβεια έως 0.1 mm. Επίσης, η εμβέλεια της σάρωσης κυμαίνεται από 0.4 m έως 1.0 m. Οι σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν από μέση απόσταση 0.5 m από κάθε δομολίθο.



Εικόνα 5: Σαρωτής Artec Eva 3D (α), Διάταξη εξοπλισμού για την τρισδιάστατη σάρωση (β).

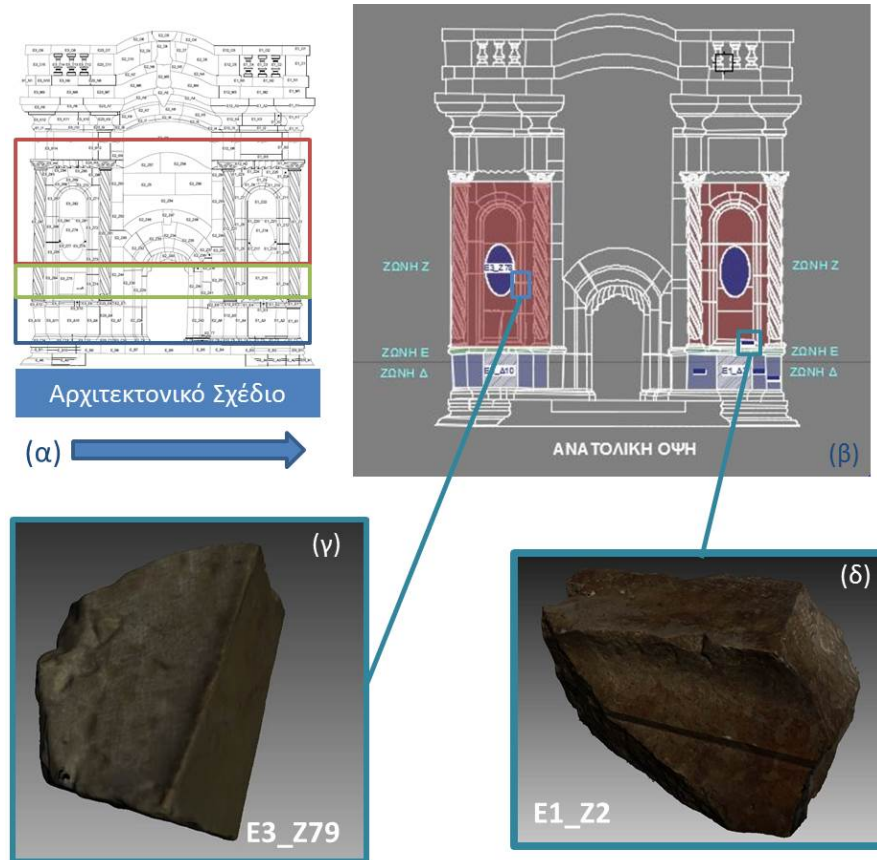
Στο σύνολο πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 500 σαρώσεις για όλους τους λίθους, που καθαιρέθηκαν από τα φανώματα του Ιερού Κουβουκλίου. Σε πολλές περιπτώσεις ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν τουλάχιστον δύο σαρώσεις ανά λίθο για να ολοκληρωθεί η πλήρης καταγραφή του. Το εύρος τιμών καταγραφής ήταν 328-796 fps (frame per second), πολύ καλής ποιότητας (0.2-0.6 mm ακρίβεια ανά σάρωση). Στο πεδίο εφαρμογής δεν υπήρχε ικανοποιητικός φωτισμός, καθώς δεν υπάρχει επαρκής φυσικός φωτισμός μέσα στο ναό της Αναστάσεως και ειδικότερα στη γαλαρία των Λατίνων, όπου είχε στηθεί και το εργαστήριο συντήρησης κατά τη διάρκεια των εργασιών της αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου. Επομένως, έγινε χρήση εξωτερικής πηγής φωτός για τη σάρωση και αποτύπωση της ακανόνιστης επιφάνειας κάθε λίθου, αλλά και για την επίτευξη ομοιομορφίας στην καταγραφή της υφής του αντικειμένου (Εικόνα 5).

4. Αποτελέσματα της Τρισδιάστατης σάρωσης των λίθων

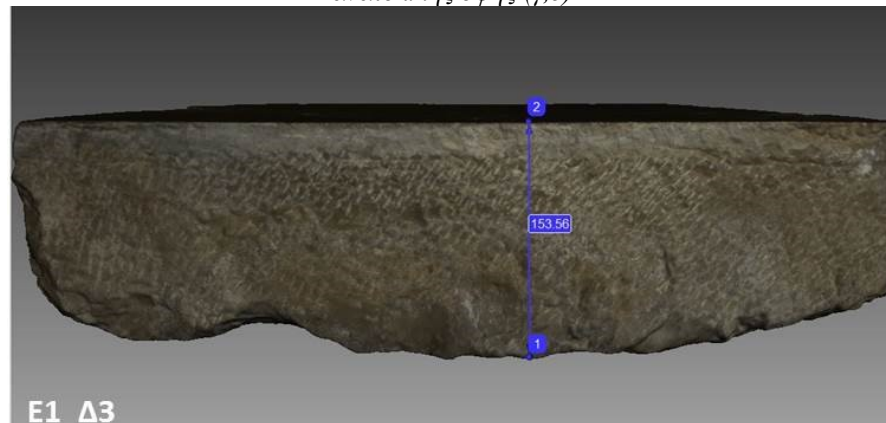
Στις σαρώσεις επιλέχθηκε να γίνει καταγραφή της γεωμετρίας και της υφής κάθε δομολίθου (και επεξεργασία μέσω του αντίστοιχου λογισμικού). Η επεξεργασία των αρχικών δεδομένων από τις σαρώσεις περιελάμβανε τη συνένωση και γεωαναφορά των επί μέρους νεφών σημείων, τον καθαρισμό/αφαίρεση θορύβου και τον έλεγχο του τελικού ενιαίου νέφους σημείων μέσω εφαρμογής επιλεγμένων αλγορίθμων στο λογισμικό Artec Studio 11 Professional [<https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio> (Ημερομηνία πρόσβασης 29/04/2020)]. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα νέφος σημείων για κάθε σαρωμένο δομολίθο, που περιλαμβάνει και την υφή του (Εικόνα 6). Σε κάποιες περιπτώσεις, κατά τη διαδικασία της σάρωσης, παρατηρήθηκε ότι υπήρχαν περιοχές σε δομολίθους που δεν ήταν δυνατή η καταγραφή/αποτύπωση, λόγω σκιάσεων. Οι περιοχές αυτές ήταν οι θέσεις που είχε γίνει λάξευση των λίθων για την τοποθέτηση συνδέσμων, στην ανακατασκευή του Κάλφα Κομνηνού [Μητρόπουλος, 2009]. Στις περιπτώσεις αυτές, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον σαρώσεις με διαφορετική διάταξη της εξωτερικής πηγής φωτός, για να εξαλειφθούν οι σκιάσεις και να πραγματοποιηθεί η αποτύπωση.

Για κάθε λίθο πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη καταγραφή τόσο της γεωμετρίας του, όσο και της υφής του. Η τεκμηρίωση αυτή είναι πολύ μεγάλης σημασίας, μιας και είναι σχεδόν αδύνατο να πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη αποτύπωση σε δομικό μέλος μιας τοιχοποιίας όταν αυτό είναι στην θέση του και συνήθως πρακτική αποτελεί η χρήση τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου, για τον υπολογισμό του πάχους της τοιχοποιίας καθώς και της διαστρωμάτωσης αυτής. Στην περίπτωση του Ιερού Κουβουκλίου, η καταγραφή της τρισδιάστατης πληροφορίας των ορθομαρμαρώσεων κατέστη επιβεβλημένη, εξαιτίας της

αναγκαιότητας να αποκαλυφθεί η εσωτερική δομή του μνημείου, για να υλοποιηθεί η αποκατάστασή του με παράλληλη διατήρηση και ενίσχυση του Ιερού Βράχου, η θέση του οποίου είχε διαπιστωθεί κατά τη διάρκεια της μελέτης του Ε.Μ.Π. με χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών [Lamproroulos et al, 2017], [Alexakis et al, 2018], [Agrafiotis et al, 2017], [Mororoulou et al, 2019]. Συνεπώς, για κάθε λίθο πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη καταγραφή του, αρχικά για λόγους τεκμηρίωσης. Επίσης, για κάθε ένα από τους 255 λίθους, έγινε υπολογισμός του μέσου και του μέγιστου πάχους, σε ειδικό φύλλο καταγραφής (Εικόνα 7).



Εικόνα 6: Καταγραφή κάθε λίθου σε σχέση με την αρχιτεκτονική αποτύπωση (α), Ορισμός ζωνών αποτύπωσης στην ανατολική όψη (β), Τρισδιάστατα μοντέλα με υφή δύο λίθων της ανατολικής όψης (γ,δ)



Εικόνα 7: Μέτρηση μέσου πάχους 153.5 mm για το λίθο E1_Δ3, της Ανατολικής Όψης μέσα από το πρόγραμμα Artec Studio 11 Professional

Η γεωμετρική τεκμηρίωση των λίθων ήταν απαραίτητη, επίσης, για τον υπολογισμό του όγκου (V) των ορθομαρμαρώσεων των φατνωμάτων. Γνωρίζοντας την πυκνότητα (ρ) του υλικού (των λίθων), η μάζα κάθε λίθου υπολογίζεται με τον τύπο $m = \rho/V$. Την πληροφορία της πυκνότητας των λίθων την παρείχε το Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών, και ήταν ίση με 2.67 g/cm^3 . Όλες οι πληροφορίες ανά λίθο σημειώθηκαν σε φύλλα καταγραφής ανά όψη, σύμφωνα με την κωδικοποίηση, που είχε προηγηθεί κατά τη διαδικασία της αρχιτεκτονικής τεκμηρίωσης. Ενδεικτικά, οι πληροφορίες που καταγράφηκαν για κάποιους λίθους της Ανατολικής Όψης, παρουσιάζονται στον

Πίνακας 1: Αποτελέσματα καταγραφής δομολίθων που αποσπάστηκαν από την Ανατολική όψη του Ιερού Κουβουκλίου

<i>Stone Name</i>	<i>Volume (cm³)</i>	<i>Mass (kg)</i>	<i>M_width (cm)</i>	<i>Max_width (cm)</i>
E1_D3	39426,61	105,405	15,35	16,30
E1_E3	2845,99	7,609	26,20	28,20
ES_Z1	19931,12	53,285	7,60	9,57
E1_Z2	5354,86	14,316	16,70	19,50
E1_Z15	17480,61	46,734	14,60	15,75
E1_Z16	24101,49	64,434	14,00	15,33
E1_Z17	3125,83	8,357	11,20	11,80
E1_Z19	3428,70	9,166	13,40	15,30
E1_Z21	8731,61	23,344	14,80	19,20
E3_D10	43936,74	117,463	13,80	15,68
E3_Z62	4048,78	10,824	11,60	13,46

Η μάζα κάθε δομολίθου, καθώς και οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από το τρισδιάστατο μοντέλο κάθε λίθου, εισήχθησαν ως δεδομένα και ενσωματώθηκαν στη μελέτη της δομοστατικής απόκρισης του μνημείου [Spyrakos et al, 2016]. Πιο συγκεκριμένα, το μνημείο μελετήθηκε από το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, στην κατάσταση πριν από τις εργασίες αποκατάστασης, διαμέσου ανάλυσης μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, ενώ πραγματοποιήθηκε ανάλυση και μετά το πέρας των εργασιών, ενσωματώνοντας στο Μοντέλο όλα τα διεπιστημονικά δεδομένα. Έτσι, στο αρχικό μοντέλο λήφθηκαν υπόψη τα γεωμετρικά δεδομένα του μνημείου, όπως προέκυψαν από την τρισδιάστατη τεκμηρίωση αυτού, καθώς και τα αποτελέσματα της μελέτης των ιστορικών υλικών, με σκοπό την αποτίμηση της απόκρισής του σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις [Moropoulou et al, 2017], [Moropoulou et al, 2019]. Κατόπιν της ολοκλήρωσης όλων των εργασιών αποκατάστασης, όλα τα δεδομένα εισήχθησαν σε βελτιστοποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο ενσωμάτωσε όλα τα δεδομένα, που προέκυψαν από την γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου (ανάταξη των πεσσών, επανατοποθέτηση ορθομαρμαρώσεων, πάχη λίθων κλπ) και όλα τα χαρακτηριστικά των υλικών αποκατάστασης με τα επικαιροποιημένα χαρακτηριστικά των ιστορικών υλικών, όπως επίσης και πληροφορίες σχετικές με τη διαστρωμάτωση του μνημείου με τα υλικά που το απαρτίζουν [Spyrakos et al, 2018].

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται η γεωμετρική τεκμηρίωση των λίθινων μελών των ορθομαρμαρώσεων των φατνωμάτων του Ιερού Κουβουκλίου και αναδεικνύεται η συμβολή της τόσο στην οργάνωση των εργασιών, όσο και στην αποτίμηση της δομικής ακεραιότητας ενός μνημείου. Η τρισδιάστατη καταγραφή των λίθων κατέστη εφικτή δεδομένης της απομάκρυνσης των λίθινων μελών, για τις ανάγκες του έργου αποκατάστασης. Η τρισδιάστατη αυτή τεκμηρίωση αποτελεί πολύ σημαντικό αρχαιακό υλικό, που αφορά τόσο στην ιστορική τεκμηρίωση όσο και στην γεωμετρική καταγραφή της ιστορικής αυτής φάσης του μνημείου. Επίσης, μέσω της διεπιστημονικής προσέγγισης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα γεωμετρικής και αρχιτεκτονικής τεκμηρίωσης καθώς και δεδομένα που προέκυψαν από τη μελέτη των δομικών υλικών, για να ενσωματωθούν σε επικαιροποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τη βελτιστοποιημένη δομοστατική μελέτη διαμέσου ανάλυσης μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Από την τρισδιάστατη τεκμηρίωση προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με τον όγκο, το πλάτος και την μάζα κάθε λίθινου μέλους των φατνωμάτων, κάθε όψης του Ιερού Κουβουκλίου και ενσωματώθηκαν στον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων των ορθομαρμαρώσεων κατά την ανάλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, η δυνατότητα καταγραφής των πληροφοριών αυτών, σε τοιχοποιία διαφορετικής διαστρωμάτωσης, μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για διεπιστημονική μελέτη, με τη συσχέτιση με αποτελέσματα άλλων μη καταστρεπτικών τεχνικών, όπως για παράδειγμα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μέσω γεωραντάρ και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

6. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες απευθύνονται στη διεπιστημονική ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που είχε την ευθύνη για τη μελέτη και το έργο της αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου, και αποτελούνταν από την καθ. Α. Μοροπούλου, Επιστημονικά Υπεύθυνη του έργου, Επικεφαλής Υλικών και Επεμβάσεων Αποκατάστασης, τον Ομοτ. Καθ. Ε. Κορρέ, Επικεφαλής Αναστήλωσης, τον Καθ. Α. Γεωργόπουλο, Επικεφαλής Γεωμετρικής Τεκμηρίωσης, τον Καθ. Κ. Σπυράκο, Επικεφαλής Επεμβάσεων Ενίσχυσης και τον Αν. Καθ. Χ. Μουζάκη, Αναπληρωτή Υπεύθυνο Εργοταξίου.

Βιβλιογραφία

Agrafiotis, P., Lampropoulos, K., Georgopoulos, A., Moropoulou, A. 2017. 3D Modelling the Invisible using Ground Penetrating Radar. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2-W3, 33-37, TC II & CIPA 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures 1–3 March 2017, Nafplio, Greece Editor(s): D. Aguilera, A. Georgopoulos, T. Kersten, F. Remondino, and E. Stathopoulou, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-33-2017

Alexakis, E., Delegou, E. T., Lampropoulos, K. C., Apostolopoulou, M., Ntoutsis, I., Moropoulou, A. (2018). NDT as a monitoring tool of the works progress and the assessment of materials and rehabilitation interventions at the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre. *Construction and Building Materials*, 189, 512-526

Apostolopoulou, M., Delegou, E. T., Alexakis, E., Kalofonou, M., Lampropoulos, K. C., Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2018). Study of the historical mortars of the Holy Aedicule as a basis for the design, application and assessment of repair mortars: A multispectral approach applied on the Holy Aedicule. *Construction and Building Materials*, 181, 618-637.

- Biddle, M. (1999). *The tomb of Christ*. Gloucestershire: Sutton.
- Balodimos, D., Lavvas G., Georgopoulos, A., 2003. Wholly Documenting Holy Monuments CIPA XIX International Symposium, 2003, Antalya.
- Γιαννακόπουλος Δ. (2017), “Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση σε διαδραστική σχέση με την ολοκληρωμένη μελέτη προστασίας του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα”, Μεταπτυχιακή εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων».
- Georgopoulos, A., Ioannidis, C., Soile, S., Tapeinaki, S., Chliverou, R., Tsilimantou, E., Lampropoulos, K. & Moropoulou, A. (2018, October). “The role of digital geometric documentation for the rehabilitation of the Tomb of Christ”. In 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018) (pp. 1-8). IEEE.
- Georgopoulos, A., Lambrou, E., Pantazis, G., Agrafiotis, P., Papadaki, A., Kotoula, L., Lampropoulos, K., Delegou, E., Apostolopoulou, M., Alexakis, M. and Moropoulou, A., 2017. Merging geometric documentation with materials characterization and analysis of the history of the Holy Aedicule in the Church of the Holy Sepulchre in Jerusalem. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII-5/W1, 487-494.
- Lampropoulos, K. C., Moropoulou, A., Korres, M. (2017). Ground penetrating radar prospection of the construction phases of the Holy Aedicula of the Holy Sepulchre in correlation with architectural analysis. *Construction and Building Materials*, 155, 307-322.
- Lavvas, G. (2004). *The All-Holy Church of Resurrection in Jerusalem*. Corpus, 60, 30-47.
- Lavvas G. (2009). *The Holy Church of the Resurrection in Jerusalem*. The Academy of Athens, Athens, Greece
- Μητρόπουλος, Θ. Γ. (2009). *Ο πανίερος ναός της Αναστάσεως Ιεροσολύμων: Τό εργο του Κάλφα Κομνηνου*. Θεσσαλονίκη: Ευρωπαϊκό Κέντρο Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Μνημείων.
- Moropoulou, A., Korres, E., Georgopoulos, A., Spyrakos, C., Mouzakis, C., Lambrou, E., Pantazis, G., Kavvadas, M., Marinos, P., Moropoulos, N., Zafeiris, V., Lampropoulos, K., Apostolopoulou, M., Maniatakis, C.A., Agapakis, M., Agapakis, J., Fragkiadoulakis, A.: Faithful Rehabilitation. *Civil Engineering – ASCE* 87(10), 54-61 & 78-78 (2017).
- Moropoulou, A., Georgopoulos, A., Korres, M., Bakolas, A., Labropoulos, K.C., Agrafiotis, P., Delegou, E.T., Moundoulas, P., Apostolopoulou, M., Lambrou, E., Pantazis, G., Kotoula, L., Papadaki, A., Alexakis, Emm. (2017). Five-Dimensional (5D) Modelling of the Holy Aedicule of the Church of the Holy Sepulchre Through an Innovative and Interdisciplinary Approach. In: M. Ioannides, N. Magnenat-Thalmann, G. Papagiannakis (Eds.), *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage* (247-270). Springer International Publishing, Cham.
- Moropoulou, A., Korres, E., Georgopoulos, A., Spyrakos, C., Mouzakis, C. (2017) Presentation upon completion of the Holy Sepulchre’s Holy Edicule Rehabilitation, National Technical University of Athens. ISBN: 978-618-82196-4-9.
- Moropoulou, A., Korres, Emm., Georgopoulos, A., Spyrakos, C., Mouzakis, Ch., Lampropoulos, K.C., Apostolopoulou M., Delegou, E.T., Alexakis, Emm. The rehabilitation of the Holy Aedicule, in: XXXIII Convegno Internazionale e Scienza e Beni

Culturali, *Le Nuove Frontiere del Restauro: Trasferimenti, Contaminazioni, Ibridazioni*, Bressanone, 27–30 Giugno 2017, Arcadia Ricerche Editore, 2017, pp. 1–16.

Moropoulou, A., Lampropoulos, K., Apostolopoulou, M., Tsilimantou, E. (2019). Novel, Sustainable Preservation of Modern and Historic Buildings and Infrastructure. The Paradigm of the Holy Aedicule's Rehabilitation. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-21.

Pringle D. (2010), "The Churches of the Crusader Kingdom of Jerusalem. A Corpus. Volume III, The City of Jerusalem. Cambridge University Press, Cambridge

Spyrakos, C., Maniatakis, Ch.: Assessment of current condition under static and seismic loading for the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre. In: Moropoulou, A., Korres, Emm., Georgopoulos, A., Spyrakos, C. (ed) *Materials and Conservation, Reinforcement and Rehabilitation Interventions in the Holy Edicule of the Holy Sepulchre*, NTUA, 2016, ISBN: 978-618-82612-0-4

Spyrakos, C. C., Maniatakis, C. A., Moropoulou, A. (2018, October). Preliminary assessment of the structural response of the Holy Tomb of Christ under static and seismic loading. In *International Conference on Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage* (pp. 44-57). Springer, Cham.

<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva-v2>. (Ημερομηνία πρόσβασης 29/04/2020).

<https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio> (Ημερομηνία πρόσβασης 29/04/2020).