



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού

ΠΜΣ Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και
Αρχαιολογικών Χώρων

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης Τεκμηρίωσης και
Μοντελοποίησης Μνημείων Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Ελισάβετ Τσιλιμαντού

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης Τεκμηρίωσης και
Μοντελοποίησης Μνημείων Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ελισάβετ Τσιλιμαντού

Μέλος ΣΕΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Σωτήριος Λυκουργιώτης

Μέλος ΣΕΠ

Πάτρα, Ιούνιος, 2026



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης και Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου κα. Τσιλιμαντού Ελισάβετ για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις συμβουλές της καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΓΑΙΑ Α.Ε. ΜΕΛΕΤΩΝ στην οποία εργάζομαι, για την παροχή του απαραίτητου υλικοτεχνικού εξοπλισμού που συνέβαλε στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πολυ-αισθητηριακή τρισδιάστατη τεκμηρίωση και τη συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων αποτύπωσης, εφαρμοσμένων στο προσβάσιμο εξωτερικό του μνημείου Αλατζά Ιμαρέτ στη Θεσσαλονίκη, του μοναδικού σωζόμενου ζαβιγιελί τζαμιού τύπου ανεστραμμένου T στην ελληνική επικράτεια (1484). Για την τεκμηρίωση αξιοποιήθηκαν τέσσερις συμπληρωματικές μέθοδοι: επίγεια σάρωση laser (TLS) με το σύστημα FARO Focus, αποτύπωση SLAM με το Xgrids K1, εναέρια φωτογραμμετρία με το UAV DJI Mini 3 Pro και επίγεια φωτογραμμετρία κοντινής λήψης με τη Sony A6000. Τα νέφη σημείων καταχωρήθηκαν σε κοινό σύστημα αναφοράς στο CloudCompare, με το TLS ως νέφος αναφοράς. Η ποσοτική αξιολόγηση βασίστηκε σε ανάλυση αποστάσεων cloud-to-cloud (C2C) για τρία ζεύγη σύγκρισης, αναδεικνύοντας μέσες αποστάσεις 13,5-19,7 mm, εντός των βιβλιογραφικών ορίων για ανάλογες αποτυπώσεις. Σημαντικό μεθοδολογικό εύρημα αποτελεί ότι στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, η χειροκίνητη εγγραφή παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο ICP, κάτι που αποδίδεται στον εσωτερικό drift του SLAM, στην ανομοιογένεια πυκνότητας νεφών και στη θεμελιώδη ασυμμετρία γεωμετρικής κάλυψης μεταξύ των αισθητήρων. Από το ενοποιημένο νέφος παράχθηκαν προϊόντα τεκμηρίωσης: αρχιτεκτονικές όψεις και κάτοψη του μνημείου, οριζόντιες και κατακόρυφες τομές, καθώς και ανακατασκευή της επιφάνειας του μνημείου μέσω παραγωγής τριγωνοποιημένου πλέγματος (mesh).

Λέξεις – Κλειδιά

Τρισδιάστατη τεκμηρίωση μνημείων, TLS, Φωτογραμμετρία UAV, SLAM, Νέφος Σημείων, Εγγραφή Νεφών, CloudCompare, C2C, Αλατζά Ιμαρέτ, Θεσσαλονίκη, Οθωμανική Αρχιτεκτονική

Investigation of Methods for Three – Dimensional Documentation and Modeling of Monuments Case Study Alatza Imaret Thessaloniki

Athanasios Mamoutopoulos

Abstract

This thesis addresses the multi-sensor three-dimensional documentation and comparative evaluation of surveying methods, applied to the accessible exterior of the Alatza Imaret monument in Thessaloniki, the only surviving inverted-T-plan zaviye-type mosque in the Greek territory (1484). Four complementary methods were employed for the documentation: terrestrial laser scanning (TLS) using the FARO Focus system, SLAM-based capture using the Xgrids K1, aerial photogrammetry using the DJI Mini 3 Pro UAV, and terrestrial close-range photogrammetry using the Sony A6000. The point clouds were registered to a common reference frame in CloudCompare, with the TLS point cloud serving as the reference. The quantitative evaluation was based on cloud-to-cloud (C2C) distance analysis for three comparison pairs, revealing mean distances of 13.5–19.7 mm, within the range reported in the literature for comparable surveys. A significant methodological finding is that, in this case study, manual registration yielded better results than the ICP algorithm, an outcome attributed to the inherent drift of SLAM, the heterogeneity in point cloud density, and the fundamental asymmetry in geometric coverage between the sensors. From the unified point cloud, a set of documentation products was generated: architectural elevations and a floor plan of the monument, horizontal and vertical sections, as well as a reconstruction of the monument's surface through the generation of a triangulated mesh.

Keywords

3D heritage documentation, TLS, UAV photogrammetry, SLAM, Point Cloud, Point Cloud Registration, CloudCompare, C2C, Alatza Imaret, Thessaloniki, Ottoman Architecture

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	10
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	11
1. Εισαγωγή	12
1.1 Ιστορικό Πλαίσιο και Σημασία του Μνημείου	12
1.2 Ψηφιακή Τεκμηρίωση Μνημείων – Γενικό Πλαίσιο	13
1.3 Πολυ - Αισθητηριακή Αποτύπωση	13
1.4 Σκοπός, Στόχοι και Όρια	14
1.5 Δομή της Εργασίας	17
2. Ιστορικό Στοιχεία και Αρχιτεκτονική Περιγραφή	18
2.1 Η Θεσσαλονίκη υπό Οθωμανική Κυριαρχία	18
2.2 Ο Ισχάκ Πασάς Ιδρυτής και Κτήτορας	18
2.3 Κτητορική Επιγραφή	19
Η επιγραφή αποτελεί ένα από τα στοιχεία που τεκμηριώθηκαν με ιδιαίτερη λεπτομέρεια στην παρούσα εργασία μέσω της επίγεια φωτογραμμετρίας (Sony A6000).	20
2.4 Αρχιτεκτονική Περιγραφή	20
2.4.1 Αρχιτεκτονικός Τύπος	20
2.4.2 Κάτοψη και Διαστάσεις	21
2.4.3 Τοιχοποιία και Υλικά	22
2.4.4 Προστώο, Κίονες και Είσοδος	23
2.4.5 Μιναρές και Ονομασία	23
2.5 Το μνημείο στο Πλαίσιο της Οθωμανικής Κληρονομιάς	24
2.6 Ιστορία Αποκατάστασης και Σημερινή Κατάσταση	25
2.6.1 Ιστορία Επεμβάσεων	25
2.6.2 Σημερινή Κατάσταση	25
3. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	27
3.1 Πεδίο και Οργάνωση	27
3.2 Φωτογραμμετρική Τεκμηρίωση	27
3.3 Επίγεια Σάρωση Laser	28
3.4 Κινητή Χαρτογράφηση Βάσει SLAM	28
3.5 Πολυ – Αισθητηριακή Ολοκλήρωση	29
3.6 Συγκριτική Αξιολόγηση και Μέθοδοι Σύγκρισης	30
3.7 Ψηφιακή Τεκμηρίωση Μνημείων στην Ελλάδα	31
3.8 Σύνθεση και Ερευνητικό Κενό	32
4. Θεωρητικό Υπόβαθρο	33
4.1 Φωτογραμμετρία	33
4.2 Επίγεια Σάρωση Laser (TLS)	34
4.3 SLAM — Simultaneous Localization and Mapping	35
4.4 Επεξεργασία, Καταχώρηση και Σύγκριση Νεφών Σημείων	36
5. Μεθοδολογική Προσέγγιση και Εφαρμογή	38
5.1 Γενική Επισκόπηση	38
5.2 Απόκτηση δεδομένων πεδίου	38



5.2.1 Επίγεια σάρωση Laser	38
5.2.2 Σάρωση Slam	42
5.2.3 Επίγεια φωτογραμμετρία	45
5.2.4 Εναέρια φωτογραμμετρία	48
5.3 Φωτογραμμετρική επεξεργασία στο metashape	51
5.4 Προετοιμασία νεφών σημείων TLS και SLAM	54
5.5 Καταχώρηση και συγχώνευση στο CloudCompare	55
5.6 Σύγκριση Χαρακτηριστικών Νεφών	55
6. Σύγκρισή Νεφών Σημείων	57
6.1 Μεθοδολογία C2C Ανάλυσης	57
6.2 TLS – SLAM	57
6.2.1 Αποτελέσματα Εγγραφής	57
6.2.2 C2C Ανάλυση	58
6.2.3 Χωρική Αξιολόγηση – Χρωματικοί Χάρτες	59
6.3 TLS – Φωτογραμμετρία Drone	62
6.3.1 Αποτελέσματα Εγγραφής	62
6.3.2 C2C Ανάλυση	63
6.3.3 Χωρική Αξιολόγηση – Χρωματικοί Χάρτες	64
6.4 SLAM – Φωτογραμμετρία Drone	67
6.5 Σύγκριση με Βιβλιογραφία	71
6.6 Παραγωγή Προϊόντων Τεκμηρίωσης	72
7. Συμπεράσματα και Προτάσεις	74
7.1 Σύνοψη Εργασίας	74
7.2 Κύρια Συμπεράσματα	74
7.2.1 Ακρίβεια Εγγραφής	74
7.2.2 Αξιολόγηση Μεθόδων	75
7.2.4 Συμπληρωματικότητα Μεθόδων	76
7.3 Περιορισμοί	77
7.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	78
Βιβλιογραφία	80
Παράρτημα Α: Παραγόμενα Προϊόντα	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής εργασιών	16
Εικόνα 2: Κτητορική Επιγραφή (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).....	20
Εικόνα 3: Κάτοψη του Αλατζά Ιμαρέτ κατά τον Eyice (1954). (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 311)	21
Εικόνα 4: Άποψη εξώστη πέντε τόξων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).....	22
Εικόνα 5: Εναέρια λήψη υλικών μνημείου (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).....	22
Εικόνα 6 Ο τρούλος του χώρου της κλειστής αυλής (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 181).23	
Εικόνα 7 Αποκατεστημένη όψη στα τέλη του 19ου αιώνα (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 372)	24
Εικόνα 8: Βόρεια πλευρά Ιμαρέτ Κομοτηνής (Πηγή: wikipedia)	24
Εικόνα 9: Φθορές μνημείου (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).....	26
Εικόνα 10: Συγκριτικό διάγραμμα των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των τεσσάρων μεθόδων τρισδιάστατης τεκμηρίωσης που εφαρμόστηκαν στο Αλατζά Ιμαρέτ	30
Εικόνα 11 Θέσεις επίγειου σαρωτή.....	39
Εικόνα 12: Ενδεικτική θέση TLS	39
Εικόνα 13 Θέσεις λήψης φωτογραφιών.....	52
Εικόνα 14 Ιστόγραμμα C2C αποστάσεων TLS–SLAM (76.3M σημεία, max 0.5 m)	59
Εικόνα 15 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0135 m, Std: 0.0333 m.....	59
Εικόνα 16 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM–TLS) ανά κατηγορία απόστασης.....	62
Εικόνα 17 Ιστόγραμμα C2C TLS–Φωτογραμμετρία (296.8M σημεία)	63
Εικόνα 18 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0197 m, Std: 0.0570 m.....	64
Εικόνα 19 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (TLS–Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία απόστασης.....	67
Εικόνα 20 Ιστόγραμμα C2C SLAM–Φωτογραμμετρία Drone.....	68
Εικόνα 21 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0161 m, Std: 0.0501 m.....	68
Εικόνα 22 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM–Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία απόστασης	71
Εικόνα 23 Τομές μνημείου	91
Εικόνα 24 ΒΔ Όψη μνημείου	92
Εικόνα 25 ΝΔ Όψη μνημείου	93
Εικόνα 26 ΝΑ Όψη μνημείου	94
Εικόνα 27 ΒΑ Όψη μνημείου	95
Εικόνα 28 Κάτοψη μνημείου	96
Εικόνα 29 Κάτοψη από 3D μοντέλο.....	97
Εικόνα 30 Σημεία ενδιαφέροντος όψης από 3D μοντέλο.....	97
Εικόνα 31 Εσωτερική άποψη τρούλων προστώου από 3D μοντέλο	97
Εικόνα 32 Υψομετρική πληροφορία.....	100



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποτύπωσης.....	38
Πίνακας 2 Όψεις νέφους σημείων από TLS	42
Πίνακας 3 Όψεις νέφους σημείων από SLAM	45
Πίνακας 4 Όψεις επίγειου φωτογραμμετρικού νέφους.....	48
Πίνακας 5 Όψεις εναέριου φωτογραμμετρικού νέφους	51
Πίνακας 6 Όψεις φωτογραμμετρικού νέφους.....	54
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά νεφών μετά την επεξεργασία.....	56
Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εγγραφής και C2C ανάλυσης.....	57
Πίνακας 9 Colormap TLS - SLAM	61
Πίνακας 10 Colormap TLS – Φωτογραμμετρία	66
Πίνακας 11 Colormap SLAM – Φωτογραμμετρία	70
Πίνακας 12 Σύγκριση C2C αποτελεσμάτων με βιβλιογραφικές αναφορές.....	72
Πίνακας 13 Λεπτομέρεια αναπαράστασης επιφάνειας του μνημείου σε τρεις μορφές: νέφος σημείων (point cloud), τριγωνισμένο πλέγμα (mesh σε μορφή wireframe) και τελικό mesh.....	99



Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

C2C Cloud-to-Cloud Distance

C2M Cloud-to-Mesh Distance

GCP Ground Control Point — Σημείο Ελέγχου Εδάφους

GSD Ground Sampling Distance

GIS Geographic Information System

GNSS Global Navigation Satellite System

HBIM Historic Building Information Model

HDR High Dynamic Range

ICP Iterative Closest Point

IMU Inertial Measurement Unit

M3C2 Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison

MVS Multi-View Stereo

NDT Normal Distributions Transform

RGB Red Green Blue

RMS / RMSE Root Mean Square Error

SfM Structure from Motion

SLAM Simultaneous Localization and Mapping

TLS Terrestrial Laser Scanning — Επίγεια Σάρωση Laser

ToF Time of Flight

UAV Unmanned Aerial Vehicle — Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό Πλαίσιο και Σημασία του Μνημείου

Το Αλατζά Ιμαρέτ (τουρκ. *Alaca İmaret*) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σωζόμενα οθωμανικά μνημεία στον ιστορικό πυρήνα της Θεσσαλονίκης. Ιδρύθηκε το 1484 από τον Ισχάκ Πασά (υψηλόβαθμο οθωμανό αξιωματούχο), ως τέμενος τύπου *zaviye* συνδεδεμένο με ιμαρέτ, φιλανθρωπικό ίδρυμα φιλοξενίας και υποστήριξης, από το οποίο το συγκρότημα αντλεί μέρος της ονομασίας του (Perdikoroulou, 2025). Η κάτοψή του ανήκει στον τύπο του ανεστραμμένου T (*zaviyeli*), γνωστό και ως «τύπος Προύσας», ο οποίος διαδόθηκε στην πρώιμη οθωμανική Βαλκανική και συνέβαλε στη διαμόρφωση νεοκατακτημένων πόλεων μέσω του εκκλησιαστικού, φιλανθρωπικού και αστικού προγράμματος που ενσωμάτωνε (Boykon, 2016). Η προσωδυμία *alaca*, που σημαίνει «ποικιλόχρωμος», προέρχεται από τη γυαλιστερή πολύχρωμη διακόσμηση του μιναρέ του (Perdikoroulou, 2025). Το κτήριο ανεγέρθηκε στις δεκαετίες που ακολούθησαν την οθωμανική εδραίωση στη Θεσσαλονίκη, μια πόλη της οποίας ο πληθυσμός και η τοπογραφία των τελών του 15ου αιώνα τεκμηριώνονται από οθωμανικά φορολογικά κατάστιχα (Lowry, 2010) και αντανakλά τον ρόλο των μεγαλοβεζιρικών και επαρχιακών ελίτ ως κτητόρων αστικών και φιλανθρωπικών ιδρυμάτων της εποχής (Stavrides, 2001).

Πέρα από την αρχιτεκτονική του αξία, το μνημείο εντάσσεται στον πολυεπίπεδο αστικό ιστό της Θεσσαλονίκης, όπου βυζαντινές, οθωμανικές και νεότερες κατασκευές συνυπάρχουν σε περιορισμένη έκταση. Εκτίθεται παράλληλα στους συνήθεις κινδύνους της ιστορικής τοιχοδομίας: φθορά υλικών, σεισμική καταπόνηση και πίεση από ένα ζωντανό αστικό περιβάλλον. Κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας εργασίας (2026), το μνημείο παρουσιάζει σημαντική υποβάθμιση, με εμφανείς φθορές στην τοιχοποιία και ανάπτυξη βλάστησης στις οριζόντιες επιφάνειες των θόλων, ένδειξη χρόνιας διείσδυσης υγρασίας (επιτόπια παρατήρηση 2026). Στο πλαίσιο αυτό, η ακριβής γεωμετρική τεκμηρίωση αποτελεί πρακτική αναγκαιότητα για τη μελέτη, τη συντήρηση και τη διαχείριση του μνημείου.

Το μνημείο έχει ήδη αποτελέσει αντικείμενο ψηφιακής αποτύπωσης. Μια προγενέστερη εργασία χρησιμοποίησε τρισδιάστατη μοντελοποίηση και εικονική πραγματικότητα για την παρουσίαση σεναρίου αποκατάστασης (Oudatzi, 2010), εστιάζοντας όμως περισσότερο στην οπτικοποίηση παρά στην μετρική αποτύπωση. Μια δεύτερη εργασία παρήγαγε νέφος

σημείων και αρχιτεκτονικά σχέδια αποκλειστικά με επίγεια σάρωση laser (Δανάκης, 2016). Η παρούσα εργασία καλύπτει διαφορετικό κενό. Παράγει μια ολοκληρωμένη αποτύπωση με τέσσερις συμπληρωματικές μεθόδους, με αξιολόγηση ακρίβειας για το προσβάσιμο εξωτερικό του μνημείου.

1.2 Ψηφιακή Τεκμηρίωση Μνημείων – Γενικό Πλαίσιο

Η ψηφιακή τεκμηρίωση αποτελεί σήμερα καθιερωμένο εργαλείο στην αποτύπωση και συντήρηση πολιτισμικής κληρονομιάς. Η βασισμένη στην πραγματικότητα τρισδιάστατη αποτύπωση, δηλαδή η ανακατασκευή της γεωμετρίας ενός αντικειμένου από μετρημένες εικόνες ή δεδομένα εμβέλειας, υποστηρίζει την αποτίμηση κατάστασης, τον σχεδιασμό αποκατάστασης, τη δομική παρακολούθηση, την αρχαική τεκμηρίωση και την παραγωγή μετρικών σχεδίων (Remondino & Rizzi, 2010· Remondino, 2011). Οι δύο κύριες οικογένειες τεχνικών, η φωτογραμμετρία βάσει εικόνων και η σάρωση laser βάσει εμβέλειας αντιμετωπίζονται γενικά ως συμπληρωματικές παρά ως ανταγωνιστικές μέθοδοι και η συνδυαστική χρήση τους διαθέτει εκτεταμένη μεθοδολογική βιβλιογραφία (Remondino & El-Hakim, 2006· Stylianidis & Remondino, 2016).

Τα τρισδιάστατα σύνολα δεδομένων χρησιμοποιούνται επίσης ολοένα και περισσότερο σε Μοντέλα Πληροφοριών Κτηρίων Κληρονομιάς (HBIM - Heritage Building Information Models), τα οποία οργανώνουν τη γεωμετρία που προκύπτει από αποτυπώσεις μαζί με σημασιολογικές και πληροφορίες συντήρησης για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση (López et al., 2018· Lovell et al., 2023). Η αξία της ακριβούς προγενέστερης τεκμηρίωσης καταδεικνύεται εμπράκτως σε περιπτώσεις καταστροφής: η λεπτομερής ψηφιακή αποτύπωση του κτηρίου Mackintosh της Σχολής Τεχνών της Γλασκώβης αποδείχθηκε καθοριστική για τις εργασίες ανοικοδόμησης μετά την πυρκαγιά (Wilson et al., 2018).

1.3 Πολυ - Αισθητηριακή Αποτύπωση

Καμία μεμονωμένη τεχνική αποτύπωσης δεν ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις της τεκμηρίωσης μνημείων. Η επίγεια φωτογραμμετρία είναι οικονομική και παράγει υφή υψηλής ανάλυσης, αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού και παρέχει περιορισμένη κάλυψη

υπερυψωμένων ή δυσπρόσιτων τμημάτων. Η εναέρια φωτογραμμετρία με UAV τη συμπληρώνει καλύπτοντας στέγες και ανώτερες ζώνες όψεων. Η επίγεια σάρωση laser (TLS) παράγει πυκνά και μετρικά αξιόπιστα νέφη σημείων, αλλά είναι συγκριτικά αργή και λειτουργεί από σταθερούς σταθμούς. Η κινητή σάρωση βάσει SLAM, αντίθετα, ανταλλάσσει ορισμένη ακρίβεια για ταχεία και συνεχή κάλυψη σύνθετων ή περιορισμένων χώρων. Επειδή κάθε μέθοδος συνεπάγεται διαφορετική ισορροπία ακρίβειας, πληρότητας, κόστους και ταχύτητας, οι πολυ - αισθητηριακές αποτυπώσεις συχνά ενσωματώνουν πολλές τεχνικές και τις αξιολογούν συγκριτικά για το συγκεκριμένο αντικείμενο (Remondino, 2011· Li et al., 2025).

Μελέτες περίπτωσης έχουν συνδυάσει εναέρια και επίγεια φωτογραμμετρία με σάρωση laser για μοντελοποίηση εκκλησιών, κάστρων και τεμενών (Luhmann et al., 2020· Ulvi, 2021· Kompoti et al., 2023· Tsiachta et al., 2024), ενώ συγκριτικές μελέτες αξιολογούν φωτογραμμετρία, TLS και SLAM ως προς ακρίβεια, πυκνότητα σημείων και αποδοτικότητα απόκτησης (Ulvi & Yigit, 2022· Conti et al., 2024· Chrbolková et al., 2025). Ελληνικές μελέτες περίπτωσης, συμπεριλαμβανομένης της τεκμηρίωσης μεταβυζαντινού μνημείου στη Θεσσαλονίκη με στατική και κινητή σάρωση laser (Karolos et al., 2025), αποδεικνύουν τη σκοπιμότητα και τη συγκριτική αξία αυτής της προσέγγισης.

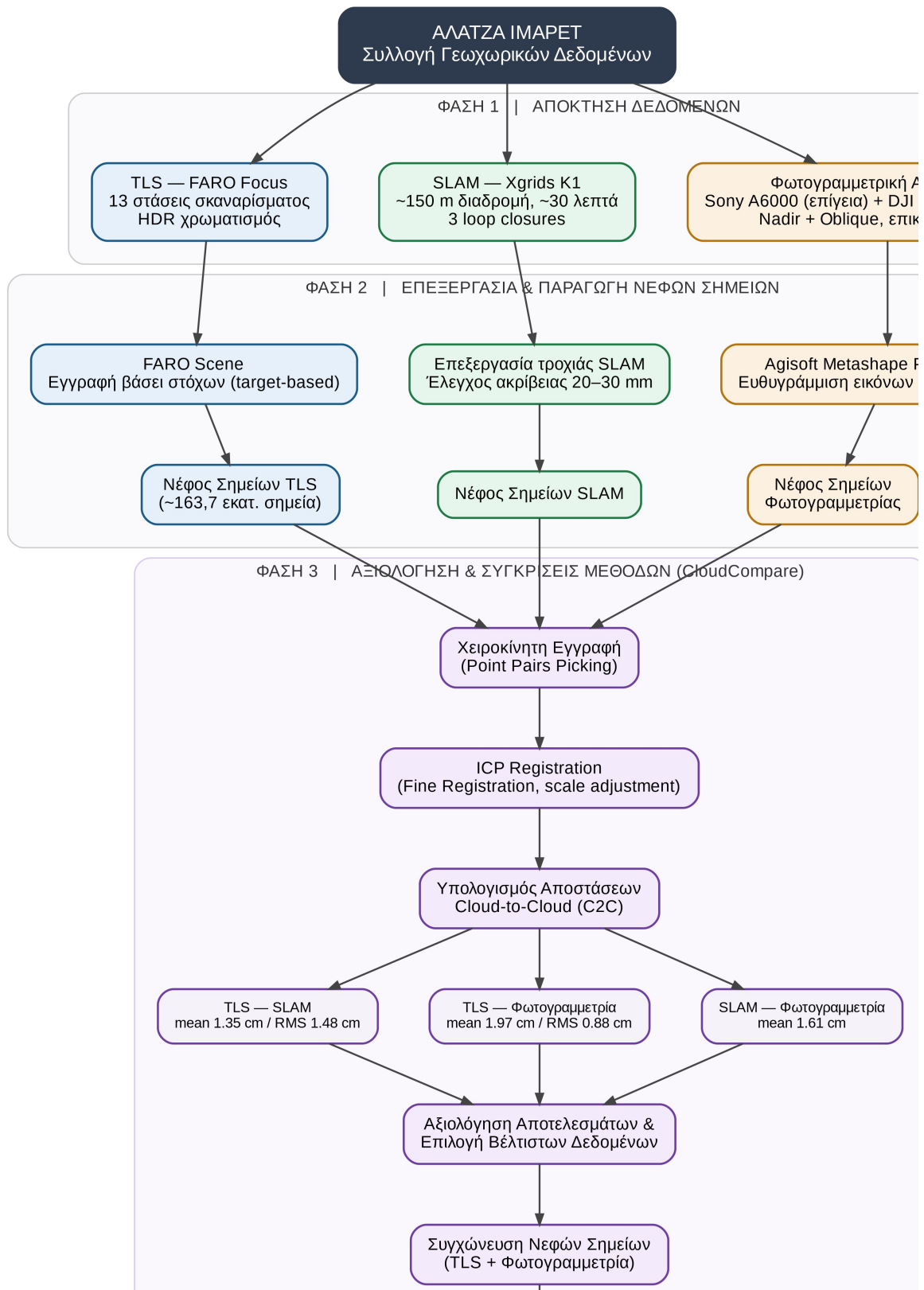
1.4 Σκοπός, Στόχοι και Όρια

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τεκμηρίωση του προσβάσιμου εξωτερικού του Αλατζά Ιμαρέτ με τέσσερις συμπληρωματικές μεθόδους αποτύπωσης: επίγεια φωτογραμμετρία, εναέρια φωτογραμμετρία, επίγεια σάρωση laser (TLS) και SLAM, καθώς και τη συγκριτική και αξιολόγηση των παραγόμενων συνόλων δεδομένων. Η εργασία επιδιώκει τέσσερις επιμέρους στόχους:

1. Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων εικόνας και εμβέλειας για το μνημείο, με σκοπό την παραγωγή νέφους σημείων από κάθε μέθοδο.
2. Εγγραφή των φωτογραμμετρικών, TLS και SLAM συνόλων δεδομένων σε κοινό σύστημα αναφοράς.

3. Ποσοτικοποίηση της γεωμετρικής συμφωνίας τους μέσω σύγκρισης νεφών σημείων ανά ζεύγη (C2C).
4. Παραγωγή αντιπροσωπευτικών προϊόντων τεκμηρίωσης: όψεις του μνημείου, δύο τομές και παραγωγή επιφάνειας (mesh).

Η εργασία παρουσιάζει τρία κύρια όρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Πρώτον, εστιάζει στη γεωμετρική τεκμηρίωση και σύγκριση του προσβάσιμου εξωτερικού, χωρίς να περιλαμβάνει δομική ανάλυση, χαρακτηρισμό υλικών ή κατασκευή πλήρους HBIM, αν και τα παραγόμενα σύνολα δεδομένων θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τέτοια εργασία στο μέλλον. Δεύτερον, η αξιολόγηση ακρίβειας είναι σχετική, βασισμένη σε σύγκριση νεφών μεταξύ μεθόδων και όχι σε ανεξάρτητο γεωδαιτικό δίκτυο ανώτερης τάξης. Τρίτον, το νομικό καθεστώς προστασίας και η λεπτομερής ιστορία συντήρησης του μνημείου αντιμετωπίζονται μόνο ως πλαίσιο αναφοράς.



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής εργασιών



1.5 Δομή της Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει το ιστορικό πλαίσιο και την αρχιτεκτονική του Αλατζά Ιμαρέτ. Το Κεφάλαιο 3 επισκοπεί συγκρίσιμες μελέτες ψηφιακής τεκμηρίωσης μνημείων και τοποθετεί την παρούσα εργασία εντός αυτής της βιβλιογραφίας. Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τις θεωρητικές αρχές της φωτογραμμετρίας, της επίγειας σάρωσης laser και του SLAM. Το Κεφάλαιο 5 περιγράφει τη μεθοδολογία, καλύπτοντας την απόκτηση εικόνων, την επεξεργασία SfM–MVS στο Metashape, την απόκτηση δεδομένων TLS και SLAM, και την εγγραφή των νεφών στο CloudCompare. Το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τη σύγκριση νεφών σημείων, τα τρία ζεύγη ανά ζεύγη, τις παραγόμενες όψεις και τις τομές και την προσπάθεια ανακατασκευής επιφάνειας. Το Κεφάλαιο 7 εξάγει συμπεράσματα για τη σχετική απόδοση των τεσσάρων μεθόδων και διατυπώνει προτάσεις.

2. Ιστορικά Στοιχεία και Αρχιτεκτονική Περιγραφή

2.1 Η Θεσσαλονίκη υπό Οθωμανική Κυριαρχία

Η Θεσσαλονίκη πέρασε οριστικά υπό οθωμανικό έλεγχο το 1430, όταν ο στρατός του Μουράτ Β' κατέλαβε την πόλη μετά από μια σύντομη περίοδο βενετικής διοίκησης που είχε ξεκινήσει το 1423 (Mazower, 2005· Vacalopoulos, 1972). Η κατάκτηση αυτή εγκαινίασε μια οθωμανική περίοδο που διήρκεσε έως το 1912. Κατά τους αιώνες αυτούς, η πόλη γνωστή στην οθωμανική χρήση ως Selânik, επανακατοικήθηκε σταδιακά και απέκτησε νέα θρησκευτική και πολιτική τοπογραφία (Mazower, 2005). Οι απώλειες που προκλήθηκαν από την πολιορκία και τις προηγούμενες δεκαετίες αστάθειας αντισταθμίστηκαν αρχικά με την εγκατάσταση μουσουλμανικών πληθυσμών. Από τα τέλη του 15ου αιώνα, ο πληθυσμός ενισχύθηκε περαιτέρω με την άφιξη μεγάλου αριθμού Εβραίων μετά τις εκδιώξεις από την Ιβηρική Χερσόνησο το 1492. Έως τον 16ο αιώνα, οι κοινότητες αυτές είχαν καταστήσει το Selânik μια από τις πυκνοκατοικημένες και οικονομικά δραστήριες πόλεις της οθωμανικής Βαλκανικής (Mazower, 2005· Varlık, 2014).

Τα φιλανθρωπικά και θρησκευτικά ιδρύματα ήταν κεντρικά σε αυτή τη μεταμόρφωση. Αντλώντας από οθωμανικά φορολογικά κατάστιχα (tahrir defterleri) και ιδρυτικά έγγραφα βακουφίων, ο Lowry (2008, 2010) έχει δείξει πώς οι πρώιμες οθωμανικές αρχές χρησιμοποίησαν τεμένη, δερβίσικες στοές, δημόσια λουτρά και ιμαρέτ για να αγκυρώσουν τον εποικισμό και να παράσχουν την υποδομή μιας μουσουλμανικής πόλης. Η οθωμανική τοπογραφία της Θεσσαλονίκης, συμπεριλαμβανομένων των συνοικιών (mahalles), των αγορών και των μνημείων, έχει ανακατασκευαστεί λεπτομερώς από τον Δημητριάδη (1983), η μελέτη του οποίου παραμένει η βασική αναφορά για τη θέση και τα ιδρύματα των τεμενών, λουτρών και φιλανθρωπικών ιδρυμάτων της πόλης, συμπεριλαμβανομένου του Αλατζά Ιμαρέτ. Η ίδρυση του Αλατζά Ιμαρέτ το 1484 πρέπει να κατανοηθεί μέσα σε αυτό το πλαίσιο κατάκτησης, επανεποικισμού και ευσεβούς αφιέρωσης.

2.2 Ο Ισχάκ Πασάς Ιδρυτής και Κτήτορας

Το Αλατζά Ιμαρέτ ιδρύθηκε από τον Ισχάκ Πασά, οθωμανό κρατικό αξιωματούχο που υπηρέτησε ως Μέγας Βεζύρης επί Μεχμέτ Β' και Βαγιαζίτ Β', και συνδέθηκε, στο τέλος της

καριέρας του, με τη διοίκηση του σαντζακιού του Selânik (İshak Paşa, 2000· Kaya, 2020). Η θέση του τον κατέτασσε μεταξύ των μεγαλοβεζιρών και υψηλών αξιωματούχων των οποίων τα αφιερώματα διαμόρφωσαν το δομημένο περιβάλλον των οθωμανικών πόλεων (Stavrides, 2001· Babinger, 1992). Επειδή αρκετοί αξιωματούχοι του 15ου και 16ου αιώνα έφεραν το όνομα Ισχάκ Πασάς, η ταυτότητα και η σταδιοδρομία του έχουν απαιτήσει προσεκτική προσωπογραφική μελέτη (Kaya, 2020).

Η ίδρυση του μνημείου χρονολογείται με ασφάλεια από την ίδια του την επιγραφή. Η κτητορική επιγραφή φέρει ημερομηνία Muharrem 889 του ισλαμικού ημερολογίου, που αντιστοιχεί στις αρχές του 1484. Το ιδρυτικό έγγραφο (vakfiye) που οργάνωσε και χρηματοδότησε το ίδρυμα συντάχθηκε αργότερα, το 892/1487 (Eyice, 1989· Perdikopoulou, 2025). Ο ίδιος κτήτορας χρηματοδότησε επίσης ένα μεγαλύτερο συγκρότημα (külliye) στο İnegöl της Ανατολίας, όπου και ενταφιάστηκε. Οι δύο ιδρύσεις είναι συγγενείς ως προς τη σύλληψη και συχνά συζητούνται από κοινού (Eyice, 1989· Karakaya & Çobanoğlu, 2000).

Το Αλατζά Ιμαρέτ δεν ήταν τέμενος με τη στενή έννοια. Ήταν τέμενος - ιμαρέτ, που συνδύαζε χώρο λατρείας με ίδρυμα φιλοξενίας, φιλανθρωπικής υποστήριξης και σε πολλά πλαίσια παροχής τροφής. Τέτοια ιδρύματα χρηματοδοτούνταν μέσω του συστήματος vakıf (βακουφίου), με το οποίο ένας κτήτορας αφιέρωνε μόνιμα εισοδηματοφόρα ακίνητα στη συντήρηση ενός θρησκευτικού ή φιλανθρωπικού ιδρύματος (Singer, 2002). Στα ζαβιγιελί τεμένη - ιμαρέτ όπως το Αλατζά Ιμαρέτ, η φιλοξενία ταξιδιωτών, δερβίσηδων και επισκεπτών αποτελούσε βασική λειτουργία του ιδρύματος, δίπλα στον ευρύτερο φιλανθρωπικό χαρακτήρα του θεσμού (Singer, 2002, 2005· Wolper, 2020). Τα ιμαρέτ ενσωματώνονταν συχνά σε μεγαλύτερα αφιερωμένα συγκροτήματα, και η μελέτη τους αποτελεί σήμερα ξεχωριστό κλάδο της οθωμανικής κοινωνικής και αρχιτεκτονικής ιστορίας (Ergin et al., 2007).

2.3 Κτητορική Επιγραφή

Πάνω από την κεντρική είσοδο διατηρείται η κτητορική επιγραφή (1.44×0.70 μ.), χαραγμένη σε μάρμαρο σε πρόστυπο ανάγλυφο και αποδοσμένη σε παλαιο-οθωμανική γραφή. Το κείμενο αναπτύσσεται σε τέσσερις στίχους, συνδυάζοντας τα καλλιγραφικά στυλ Rūmī και Thuluth, ενώ τα γράμματα φέρουν επένδυση χρυσού επιχρίσματος. Η επιγραφή

αναφέρει ρητά τον ιδρυτή, τον χαρακτήρα του έργου και χρονολογεί την ολοκλήρωσή του στον μήνα Muharrem έτους 889 Εγίρας (1484 μ.Χ.) (Eyice, 1989· Περδικοπούλου, 2022). Ο ακριβής αυτός χρονολογικός προσδιορισμός αποσαφηνίζει παλαιότερη αμφισβήτηση ανάμεσα στα έτη 1484 και 1485 που απαντάται σε παλαιότερες πηγές.



Εικόνα 2: Κτητορική Επιγραφή (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

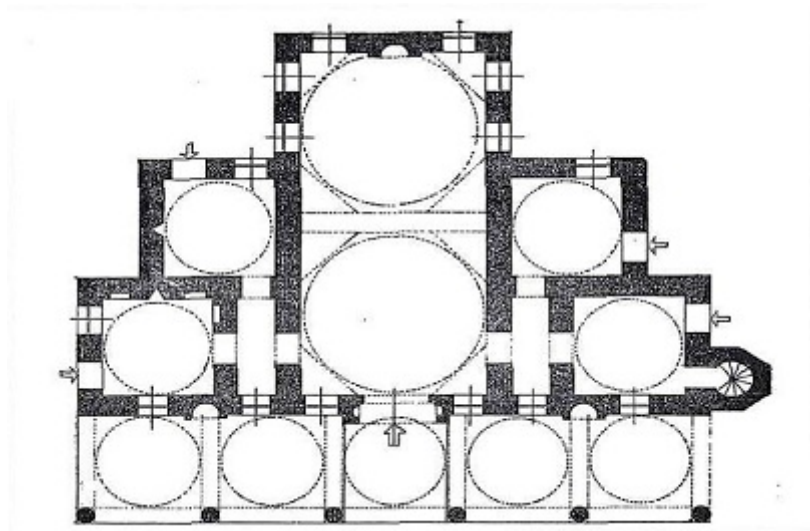
Η επιγραφή αποτελεί ένα από τα στοιχεία που τεκμηριώθηκαν με ιδιαίτερη λεπτομέρεια στην παρούσα εργασία μέσω της επίγειας φωτογραμμετρίας (Sony A6000).

2.4 Αρχιτεκτονική Περιγραφή

2.4.1 Αρχιτεκτονικός Τύπος

Αρχιτεκτονικά, το Αλατζά Ιμαρέτ ανήκει στον τύπο του ανεστραμμένου T (zaviyeli), γνωστό και ως τύπος tabhane ή «τύπος Προύσας» από τα πρώιμα κέντρα του. Αυτός ο πολυδύναμος τύπος κάτοψης είναι χαρακτηριστικός της πρώιμης οθωμανικής αρχιτεκτονικής (Eyice, 1989· Goodwin, 1971· Kuran, 1968). Η πιο λεπτομερής μελέτη του κτηρίου είναι η μονογραφία της Περδικοπούλου (2022), που αναπτύχθηκε από τη διδακτορική της έρευνα. Η περιγραφή που ακολουθεί αντλεί κυρίως από αυτή, μαζί με τη συγκριτική τυπολογία οθωμανικών τεμενών στη βόρεια Ελλάδα (Loukma & Stefanidou, 2017) και το λήμμα του μνημείου στο έργο του Υπουργείου Πολιτισμού (Brouskari, 2008).

Το Αλατζά Ιμαρέτ αποτελεί το μοναδικό σωζόμενο παράδειγμα ζαβιγιελί τζαμιού τύπου ανεστραμμένου T στην ελληνική επικράτεια που διατηρείται σε σχεδόν αναλλοίωτη αρχική μορφή (Περδικοπούλου, 2022). Η τυπολογική αυτή σπανιότητα προσδίδει στο μνημείο εξαιρετική επιστημονική αξία και καθιστά την τρισδιάστατη τεκμηρίωσή του ιδιαίτερης σημασίας για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 3: Κάτοψη του Αλατζά Ιμαρέτ κατά τον Eyice (1954). (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 311)

2.4.2 Κάτοψη και Διαστάσεις

Το κτήριο εισέρχεται μέσω εξώστη πέντε τόξων (Εικόνα 4), φερόμενου από εναλλασσόμενες κολόνες γρανίτη και μαρμάρου και με επίπεδους θόλους (Περδικοπούλου, 2022, Kaplan Çinçin et al., 2016). Πίσω από τον εξώστη, δύο τοξοστεγασμένα διαμερίσματα σχεδόν ίσου μεγέθους συγκροτούν τον πυρήνα της κάτοψης. Τοποθετούνται το ένα πίσω από το άλλο και χωρίζονται από φαρδύ τόξο, ώστε ο κύριος χώρος λατρείας να διπλασιάζεται αποτελεσματικά. Το πρώτο τμήμα αποτελεί τον κεντρικό στεγασμένο χώρο, ανοιχτό αρχικά στο φως από ψηλά, ενώ το δεύτερο αποτελεί τον κυρίως χώρο προσευχής (Loukma & Stefanidou, 2017· Περδικοπούλου, 2022). Πλαϊνά δωμάτια σε ζεύγη, τα *eyvan* ή *tabhane* πλαισιώνουν αυτά τα κεντρικά τμήματα. Το καθένα καλύπτεται από τον δικό του θόλο και διαθέτει τζάκια και επιτοίχιες κόγχες. Αυτά τα δωμάτια, που προορίζονταν για τη στέγαση ταξιδιωτών, δερβίσηδων και επισκεπτών, δίνουν στην κάτοψη το χαρακτηριστικό ανεστραμμένο T σχήμα.



Εικόνα 4: Άποψη εξώστη πέντε τόξων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

Το μνημείο έχει γενικές διαστάσεις 29.25×27.71 μ. και προσανατολισμό ΝΑ - ΒΔ (Περδικοπούλου, 2022). Ο κεντρικός χώρος προσευχής έχει διαστάσεις 19.30×8.80 μ. και στεγάζεται από δύο ισομεγέθεις τρούλους διαμέτρου 8.80 μ., με μέγιστο ελεύθερο ύψος 16.30 μ. (Δανάκης, 2016). Λόγω της καμπυλόγραμμης γεωμετρίας τους, οι θόλοι αποτέλεσαν το πιο προκλητικό τμήμα για την αεροφωτογραμμετρική αποτύπωση (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Εναέρια λήψη υλικών μνημείου (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

2.4.3 Τοιχοποιία και Υλικά

Οι τοίχοι είναι κτισμένοι με την κλειζονέ (πλινθοπερίκλειστη) τεχνική της βυζαντινής παράδοσης, στην οποία λαξευμένοι λίθοι πλαισιώνονται από δύο έως τρεις σειρές πλίνθων (Loukma & Stefanidou, 2017· Kiel, 1970). Το σύστημα αυτό αναπτύσσεται σε 24 οριζόντιες

ζώνες στον κύριο κορμό, με επιπλέον 6 ζώνες στα οκταγωνικά τύμπανα των τρούλων (Περδικοπούλου, 2022). Οι τοιχοποιίες έχουν πάχος 1.10 - 1.42 μ. και ενισχύονται εσωτερικά με ξυλοδεσιές. Η κατασκευή των τρούλων πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά με πλίνθους κατά το εκφορικό σύστημα.

2.4.4 Προστώο, Κίονες και Είσοδος

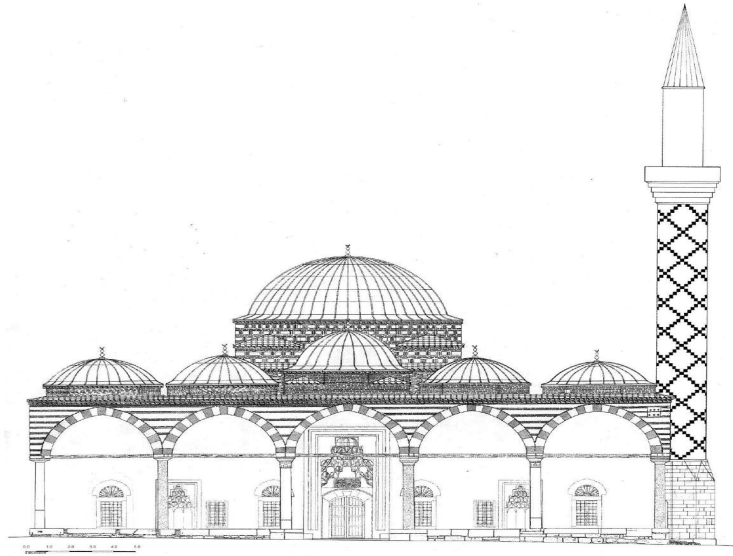
Στο εσωτερικό, το κτήριο διατηρεί σκαλιστή και ζωγραφιστή διακόσμηση: επεξεργασμένα κιονόκρανα, λεπτομέρειες muqarnas, κόγχη mihrab και ζωγραφιστά μοτίβα και κορανικές επιγραφές στους θόλους και τα σφαιρικά τρίγωνα (Περδικοπούλου, 2022). Η εσωτερική διακόσμηση δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας αποτύπωσης, η οποία επικεντρώθηκε στο προσβάσιμο εξωτερικό. Η συστηματική τρισδιάστατη τεκμηρίωση του εσωτερικού προτείνεται ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.



Εικόνα 6 Ο τρούλος του χώρου της κλειστής αυλής (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 181)

2.4.5 Μιναρές και Ονομασία

Το μνημείο οφείλει την ονομασία του στον μιναρέ του. Ο άξονάς του ήταν επενδυμένος με πολύχρωμα γυαλιστερά πλακίδια σε ρομβοειδή σχέδια, εξ ου και alaca («ποικιλόχρωμος»), ένα στοιχείο που το διέκρινε μεταξύ των τεμενών της πόλης (Eyice, 1989· Perdikopoulou, 2025). Ο μιναρές κατεδαφίστηκε μετά το 1912, και σήμερα σώζεται μόνο η τετράγωνη λίθινη βάση του.



Εικόνα 7 Αποκατεστημένη όψη στα τέλη του 19ου αιώνα (Πηγή: Περδικοπούλου, 2022, σ. 372)

2.5 Το μνημείο στο Πλαίσιο της Οθωμανικής Κληρονομιάς

Τυπολογικά, το Αλατζά Ιμαρέτ είναι συγκρίσιμο με το τέμενος που ίδρυσε ο ίδιος κτήτορας στο İnegöl της Ανατολίας (Eyice, 1989· Karakaya & Çobanoğlu, 2000). Μεταξύ των βαλκανικών μνημείων συγγενεύει επίσης με το ιμαρέτ του Γαζή Εβρενού στην Κομοτηνή (Εικόνα 8), το αρχαιότερο σωζόμενο κτήριο τύπου ανεστραμμένου T στην περιοχή, με το οποίο μοιράζεται τον κεντρικό θολωτό χώρο, τα πλευρικά δωμάτια φιλοξενίας και την κλειζονέ τοιχοποιία (Çağartay, 2011).



Εικόνα 8: Βόρεια πλευρά Ιμαρέτ Κομοτηνής (Πηγή: wikipedia)

Η λειτουργία κτηρίων αυτού του τύπου (κατά πόσον πρόκειται κυρίως για τέμενος, δερβίσικη στοά ή φιλανθρωπικό ίδρυμα), αναλύθηκε πρώτα από τον Eyice (1963) και παραμένει αντικείμενο επιστημονικής συζήτησης (Kafescioglu, 2021).

Το μνημείο επιβιώνει εντός ευρύτερης ομάδας οθωμανικών μνημείων στη Θεσσαλονίκη, δίπλα στο Τζαμί Χαμζά Μπέη, το Μπέη Χαμάμ, το Βεζεστένι και το Γενί Τζαμί. Εθνικές και διεθνείς επισκοπήσεις της οθωμανικής αρχιτεκτονικής στην Ελλάδα το εντάσσουν στο ευρύτερο corpus των σωζόμενων οθωμανικών κτηρίων (Brouskari, 2008· Kaplan Çinçin et al., 2016), ενώ πρόσφατες εργασίες το συζητούν σε σχέση με ζητήματα συντήρησης, ερμηνείας και αμφιλεγόμενης κληρονομιάς (Kolonos et al., 2023).

2.6 Ιστορία Αποκατάστασης και Σημερινή Κατάσταση

2.6.1 Ιστορία Επεμβάσεων

Μετά το τέλος της οθωμανικής κυριαρχίας, το κτήριο έπαψε να λειτουργεί ως τέμενος - ιμαρέτ. Υπέστη κατά τη διάρκεια των αιώνων σειρά καταστροφών, επισκευών και αλλαγών χρήσης. Η τελευταία μεγάλη συντήρηση πριν από το 1912 πραγματοποιήθηκε το 1849, ενώ κατά την Κατοχή (1941 - 1944) αφαιρέθηκαν τα μολυβδόφυλλα των θόλων. Κατά το 1945 - 1946 οι βοηθητικοί χώροι χρησιμοποιήθηκαν ως κατοικίες από ανταρτόπληκτους (Δανάκης, 2016). Το 1967 κατέρρευσαν δύο κίονες του προστώου και το 1969 αντικαταστάθηκαν με κίονες οπλισμένου σκυροδέματος. Το 1985 παραχωρήθηκε στον Δήμο Θεσσαλονίκης. Εργασίες αποκατάστασης πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις: 1991 - 1994 (στατικότητα) και 1996 - 1997 (εσωτερικό, τοιχογραφίες), με χρηματοδότηση Ε.Ε. και Οργανισμού Πολιτιστικής Πρωτεύουσας 1997 (Περδικοπούλου, 2022· Δανάκης, 2016). Οι τεκμηριωμένες επεμβάσεις, η υφιστάμενη κατάσταση και η νομική κατάταξη του μνημείου καταγράφονται στη βιβλιογραφία συντήρησης και στα αρχεία της αρμόδιας Εφορείας Αρχαιοτήτων Πόλεως Θεσσαλονίκης (Brouskari, 2008· Stefanidou, 2009· Loukma & Stefanidou, 2018).

2.6.2 Σημερινή Κατάσταση

Κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας εργασίας (2026), το μνημείο παρουσιάζει σημαντική υποβάθμιση σε σχέση με την κατάσταση που περιγράφεται στις εργασίες αποκατάστασης της δεκαετίας του 1990. Παρά το καθεστώς προστασίας του ως διατηρητέου

μνημείου (ΦΕΚ 191/Α/11-06-1926), βρίσκεται σε ουσιαστική εγκατάλειψη κατά τα τελευταία χρόνια, χωρίς εμφανείς εργασίες συντήρησης. Οι εξωτερικές επιφάνειες παρουσιάζουν αυξανόμενη φθορά, αποκόλληση αρμών και τοπικές απώλειες υλικού, ενώ στις οριζόντιες επιφάνειες των θόλων έχει αναπτυχθεί βλάστηση (Εικόνα 9), ένδειξη χρόνιας διείσδυσης υγρασίας που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή δομική αποδυνάμωση (επιτόπια παρατήρηση, 2026). Η κατάσταση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της παρούσας αποτύπωσης. Η ψηφιακή καταγραφή αποτελεί αναντικατάστατο εργαλείο τόσο για τον σχεδιασμό μελλοντικών αποκαταστάσεων όσο και για την παρακολούθηση της φθοράς μέσω διαδοχικών αποτυπώσεων.



Εικόνα 9: Φθορές μνημείου (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

3. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

3.1 Πεδίο και Οργάνωση

Η ψηφιακή τρισδιάστατη τεκμηρίωση μνημείων αποτελεί πλέον εδραιωμένο πεδίο στη συμβολή αποτύπωσης, φωτογραμμετρίας και συντήρησης. Η τρισδιάστατη καταγραφή βάσει πραγματικότητας ανακατασκευάζει τη γεωμετρία και την εμφάνιση ενός αντικειμένου από μετρητικές εικόνες ή δεδομένα απόστασης και υποστηρίζεται από εκτεταμένη μεθοδολογική και εφαρμοσμένη βιβλιογραφία (Remondino & El-Hakim, 2006· Remondino & Rizzi, 2010· Remondino, 2011· Xiao et al., 2018). Πρόσφατες ανασκοπήσεις προσεγγίζουν το πεδίο από διαφορετικές οπτικές: αισθητήρες εγγύς εμβέλειας και σύντηξη δεδομένων για επιθεώρηση και παρακολούθηση της δομημένης κληρονομιάς (Adamopoulos & Rinaudo, 2021), τρισδιάστατα νέφη σημείων για πολιτιστική κληρονομιά (S. Yang et al., 2022), ενσωμάτωση δεδομένων αποτύπωσης σε μοντέλα πληροφοριών κληρονομιάς (X. Yang et al., 2020) και ψηφιακές τεχνολογίες για τη διατήρηση της κληρονομιάς γενικότερα (Diaz Mendoza et al., 2023· Li et al., 2025). Επιστημονικά συγγράμματα αναφοράς έχουν συστηματοποιήσει τις εικονιστικές και τηλεμετρικές μεθόδους τεκμηρίωσης και τη συνδυαστική αξιοποίησή τους (Stylianidis & Remondino, 2016).

Αυτό το κεφάλαιο ανασκοπεί τη βιβλιογραφία που σχετίζεται περισσότερο με την παρούσα μελέτη. Εξετάζει πρώτα τις τρεις οικογένειες απόκτησης δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην εργασία: φωτογραμμετρία (Ενότητα 3.2), επίγεια σάρωση laser (Ενότητα 3.3) και κινητή χαρτογράφηση βάσει SLAM (Ενότητα 3.4). Στη συνέχεια εξετάζει την πολυ-αισθητηριακή ολοκλήρωση (Ενότητα 3.5), τη συγκριτική αξιολόγηση και τις μεθόδους καταχώρησης/σύγκρισης νεφών σημείων (Ενότητα 3.6), και ελληνικές μελέτες περίπτωσης τεκμηρίωσης μνημείων (Ενότητα 3.7). Η Ενότητα 3.8 συνθέτει την ανασκόπηση και εντοπίζει το ερευνητικό κενό που καλύπτει η εργασία.

3.2 Φωτογραμμετρική Τεκμηρίωση

Η εικονιστική μοντελοποίηση ανακατασκευάζει τη γεωμετρία τριών διαστάσεων από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες και αποτελεί εδώ και καιρό μέρος της καταγραφής κληρονομιάς (Remondino & El-Hakim, 2006). Στη σύγχρονη πρακτική ακολουθεί συνήθως

την αλυσίδα Structure-from-Motion και Multi-View Stereo (SfM-MVS), η οποία εκτιμά τις θέσεις κάμερας και παράγει πυκνές πληροφορίες επιφάνειας. Αυτή η ροή εργασίας έκανε την οικονομική, υψηλής ανάλυσης ανακατασκευή ευρέως προσβάσιμη (Westoby et al., 2012). Η φωτογραμμετρία εγγύς εμβέλειας έχει επικυρωθεί για την αρχιτεκτονική και αρχαιολογική κληρονομιά μέσω συγκρίσεων πυκνότητας σημείων και γεωμετρίας πλέγματος έναντι δεδομένων αναφοράς (Moyano et al., 2020). Η φωτογραμμετρία UAV επεκτείνει την κάλυψη σε στέγες, ανώτερες όψεις και μεγαλύτερες ή απρόσιτες κατασκευές και η ροή εργασίας UAV SfM-MVS, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής της σε λογισμικό όπως το Agisoft Metashape, έχει ανασκοπηθεί για εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομιάς (Pepe et al., 2022). Η επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία είναι επομένως συμπληρωματικές: η πρώτη καταγράφει προσόψεις και λεπτομέρειες σε κοντινή απόσταση, ενώ η δεύτερη καταγράφει τη γεωμετρία από ψηλά.

3.3 Επίγεια Σάρωση Laser

Η επίγεια σάρωση laser (TLS) καταγράφει πυκνά νέφη σημείων μέσω άμεσης μέτρησης απόστασης και αποτελεί πλέον στανταρ όργανο για την αρχιτεκτονική τεκμηρίωση (Yakar & Yilmaz, 2025). Πρόσφατες πρακτικές κατευθύνσεις καθορίζουν τη ροή εργασίας TLS για εφαρμογές κληρονομιάς, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού σάρωσης, της καταχώρησης πολλαπλών σταθμών και του ελέγχου ακρίβειας (Liu et al., 2025). Επειδή η TLS παρέχει υψηλή γεωμετρική αξιοπιστία από σταθερές θέσεις, χρησιμοποιείται συχνά ως αναφορά έναντι της οποίας αξιολογούνται άλλες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένης της παρούσας μελέτης. Τα κύρια μειονεκτήματά της είναι ο χρόνος που απαιτείται για πολυσταθμικές αποτυπώσεις, οι αποκλεισμοί που δημιουργούνται από τις σταθερές οπτικές γωνίες, γεγονός που εξηγεί γιατί συνδυάζεται συχνά με εικονιστικές και κινητές μεθόδους και το αρκετά μεγάλο κόστος χρήσης.

3.4 Κινητή Χαρτογράφηση Βάσει SLAM

Τα συστήματα κινητής χαρτογράφησης βάσει Ταυτόχρονου Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (SLAM) ανακατασκευάζουν τη γεωμετρία συνεχώς καθώς ο χειριστής κινείται μέσα σε ένα περιβάλλον. Ανταλλάσσουν μέρος της ακρίβειας για ταχύτερη απόκτηση δεδομένων και

πληρέστερη κάλυψη σύνθετων ή γεμάτων εμπόδια χώρων. Οι δυνατότητες και η ακρίβεια της κινητής σάρωσης laser βάσει SLAM έχουν ανασκοπηθεί λεπτομερώς (Di Stefano et al., 2021), ενώ πρώιμες μελέτες επικύρωσαν τη γεωμετρική περιεχόμενο τέτοιων νεφών σημείων εντός πολυ - αισθητηριακών αποτυπώσεων (Sammartano & Spanò, 2018). Εφαρμοσμένες μελέτες συγκρίνουν πλέον χειριστικά και φορούμενα συστήματα έναντι μέτρων αναφοράς: κινητά συστήματα εσωτερικής χαρτογράφησης έχουν αξιολογηθεί έναντι TLS με αποστάσεις cloud-to-mesh και M3C2 (Tucci et al., 2018). SLAM και TLS έχουν αμοιβαία επικυρωθεί για εσωτερική χαρτογράφηση (Keitaanniemi et al., 2021) και χειροκίνητοι σαρωτές έχουν συγκριθεί με TLS σε εσωτερικούς και χώρους κληρονομιάς (Yiğit et al., 2024· Del Duca & Machado, 2023). Άλλες μελέτες έχουν προτείνει πρωτόκολλα αξιολόγησης πληρότητας για οικονομικά συστήματα LiDAR - SLAM (Trybała et al., 2023), συγκρίνει χειροκίνητα και σακίδιο -φορούμενα συστήματα (Moon et al., 2023) και εφαρμόσει SLAM σάρωση σε ιστορικά συγκροτήματα (Aricò et al., 2023). Συνολικά, αυτές οι μελέτες παρουσιάζουν το SLAM ως γρήγορη μέθοδο τεκμηρίωσης που μπορεί να επιτύχει ακρίβεια εκατοστού σε ευνοϊκές συνθήκες, παραμένοντας ωστόσο λιγότερο ακριβής από τη στατική σάρωση.

3.5 Πολυ – Αισθητηριακή Ολοκλήρωση

Καμία μεμονωμένη τεχνική δεν ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις της τεκμηρίωσης μνημείων, για αυτό, οι πολυ-αισθητηριακές αποτυπώσεις συνδυάζουν μεθόδους με διαφορετικές δυνατότητες (Adamopoulos & Rinaudo, 2021· Remondino, 2011). TLS και φωτογραμμετρία UAV έχουν συνδυαστεί για την τεκμηρίωση χώρων, με TLS να καταγράφει προσόψεις και λεπτομέρειες και εικόνες UAV να καλύπτουν στέγες και ανώτερα τμήματα (Jo & Hong, 2019). Η TLS έχει επίσης ολοκληρωθεί με επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία σε σύνθετους χώρους όπως ιστορικοί κήποι (Liang et al., 2018). Άλλες μελέτες περίπτωσης συντήκουν εικονιστικά και τηλεμετρικά δεδομένα για την ανακατασκευή εκκλησιών, τζαμιών, κάστρων και άλλων μνημείων (Luhmann et al., 2020· Ulvi, 2021· Mulahusić et al., 2022· Małyszczek et al., 2023· Tsiachta et al., 2024· Kompoti et al., 2023). Πρόσφατα παραδείγματα επεκτείνουν αυτή την προσέγγιση σε ιστορικά πλοία που τεκμηριώνονται με TLS και φωτογραμμετρία UAV (Bojakowski et al., 2025) και σε δύσκολες τοποθεσίες που αποτυπώνονται με LiDAR smartphone και φωτογραμμετρία (Soyluoğlu et al., 2025). Το

πρακτικό σκεπτικό είναι συνεπές: η ολοκλήρωση μπορεί να μειώσει τους αποκλεισμούς και να βελτιώσει την κάλυψη σε σχέση με οποιονδήποτε μεμονωμένο αισθητήρα.

Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Τρισδιάστατης Αποτύπωσης

TLS (Επίγεια Σάρωση Laser)	SLAM (π.χ. Xgrids K1)	Επίγεια Φωτογραμμετρία	UAV Φωτογραμμετρία
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✓ Πολύ υψηλή ακρίβεια & πυκνότητα νέφους ✓ Σταθερή γεωμετρία - ιδανικό ως νέφος αναφοράς ✓ Καλή απόδοση σε εσωτερικούς/οικειούς χώρους ✓ Άμεση γεωαναφορά μέσω σταθερών σταθμών	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✓ Ταχύτατη, κινητική συλλογή δεδομένων ✓ Ευελιξία σε σύνθετους/δύσβατους χώρους ✓ Ταυτόχρονη κάλυψη εσωτερικού-εξωτερικού ✓ Δεν απαιτεί στατικές θέσεις σταθμού	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✓ Υψηλή φωτορεαλιστική απόδοση υφής/χρώματος ✓ Σχετικά οικονομικός εξοπλισμός (DSLR) ✓ Ευελιξία λήψης από πολλές οπτικές γωνίες ✓ Καλή απόδοση λεπτομερειών διακόσμησης	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✓ Κάλυψη δυσπρόσιτων περιοχών (στέγες, ψηλές όψεις) ✓ Ταχύτατη κάλυψη μεγάλων επιφανειών ✓ Παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκού & DSM ✓ Ολιστική αεροφωτογραφική άποψη μνημείου
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✗ Αργή & χρονοβόρα συλλογή δεδομένων ✗ Δυσκολία πρόσβασης σε δυσπρόσιτα σημεία (στέγες κ.λπ.) ✗ Υψηλό κόστος εξοπλισμού ✗ Μεγάλος όγκος δεδομένων (νέφη)	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✗ Χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με TLS ✗ Συσσωρευτικό σφάλμα (drift) σε μεγάλες διαδρομές ✗ Ευαισθησία σε φωτιά σε χαρακτηριστικά περιβάλλοντα ✗ Απαιτεί post-processing για βελτιστοποίηση τροχιάς	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✗ Ευαισθησία σε συνθήκες φωτισμού ✗ Απαιτεί πυκνό δίκτυο λήψεων & επικαλύψεις ✗ Υψηλός υπολογιστικός χρόνος (SfM/MVS) ✗ Ακρίβεια κλίμακας εξαρτάται από GCPs	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ✗ Περιορισμοί πτήσης (κανονισμοί, καιρός, χώρος) ✗ Μικρότερη ακρίβεια σε λεπτομέρειες κοντινής κλίμακας ✗ Εξάρτηση από GNSS/GCPs για γεωαναφορά ✗ Δυσκολίες σε στενούς/κλειστούς χώρους

Εικόνα 10: Συγκριτικό διάγραμμα των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των τεσσάρων μεθόδων τρισδιάστατης τεκμηρίωσης που εφαρμόστηκαν στο Αλατζά Ιμαρέτ

3.6 Συγκριτική Αξιολόγηση και Μέθοδοι Σύγκρισης

Για την παρούσα εργασία, οι πιο σχετικές μελέτες είναι εκείνες που προχωρούν από την ολοκλήρωση στη ρητή ποσοτική σύγκριση. Αυτές οι μελέτες αξιολογούν φωτογραμμετρία, TLS και SLAM σε μνημεία και κτήρια χρησιμοποιώντας κριτήρια όπως ακρίβεια, πυκνότητα σημείων, πληρότητα και χρόνος απόκτησης δεδομένων. Τα ευρήματα είναι γενικά συνεπή. Η TLS προσφέρει συνήθως την υψηλότερη γεωμετρική ακρίβεια και χρησιμοποιείται συχνά ως αναφορά. Η εγγύς εμβέλεια και η φωτογραμμετρία UAV μπορεί να πλησιάσει την TLS όταν η ποιότητα εικόνας και η γεωμετρία δικτύου είναι ευνοϊκές. Το SLAM είναι γενικά η ταχύτερη αλλά λιγότερο ακριβής μέθοδος (Ulvi & Yiğit, 2022· Conti et al., 2024· Chrbolková et al., 2025· Mohammadi et al., 2021). Τριπλές και τετραπλές τεχνικές συγκρίσεις σε μεμονωμένα αντικείμενα συνδυάζοντας TLS, φορητή σάρωση και

φωτογραμμετρία είναι λιγότερο συνηθισμένες αλλά αναφέρονται ολοένα και περισσότερο (Puniach & Widuch, 2019· Cristian et al., 2026).

Τέτοιες συγκρίσεις βασίζονται σε δύο μεθοδολογικά βήματα: καταχώρηση και ανάλυση αποκλίσεων. Ανεξάρτητα σύνολα δεδομένων πρέπει πρώτα να αναχθούν σε κοινό σύστημα αναφοράς, συνήθως μέσω ακατέργαστης ευθυγράμμισης που ακολουθείται από λεπτή καταχώρηση με τον αλγόριθμο Iterative Closest Point (ICP). Οι Besl και McKay (1992) εισήγαγαν τη μορφή σημείο προς σημείο του ICP, ενώ οι Chen και Medioni (1992) ανέπτυξαν μια παραλλαγή σημείο προς επίπεδο. Οι Rusinkiewicz και Levoy (2001) στη συνέχεια συστηματοποίησαν τις βασικές επιλογές σχεδιασμού που επηρεάζουν την ακρίβεια και τη σύγκλιση του ICP, ενώ οι Cheng et al. (2018) ανασκόπησαν το ευρύτερο τοπίο καταχώρησης από ακατέργαστο έως λεπτό. Μόλις καταχωρηθούν, η γεωμετρική συμφωνία μεταξύ νεφών μετράται μέσω υπολογισμού αποστάσεων. Βασικά μέτρα περιλαμβάνουν αποστάσεις cloud-to-cloud (C2C) και cloud-to-mesh (C2M), ενώ ο αλγόριθμος Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) εκτιμά τοπικές κάθετους επιφανείας και παρέχει διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε απόσταση (Lague et al., 2013).

3.7 Ψηφιακή Τεκμηρίωση Μνημείων στην Ελλάδα

Ένα περιφερειακό σώμα εργασιών εφαρμόζει τις ίδιες τεχνικές σε ελληνικά μνημεία και παρέχει άμεσα προηγούμενα για την παρούσα εργασία. Πολυ - αισθητηριακές αποτυπώσεις περιλαμβάνουν επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία συνδυασμένη με TLS για ένα οθωμανικό τζαμί στις Σέρρες (Tsiachta et al., 2024), TLS με φωτογραμμετρία UAV για το κάστρο της Παλαιά Ναυαρίνου στην Πύλο (Kompoti et al., 2023) και τρισδιάστατη γεωχωρική τεκμηρίωση για διαδικτυακή πλατφόρμα του αρχαιολογικού πάρκου του Δίου (Pliodromitis et al., 2025). Μελέτες συνδεδεμένες με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης είναι ιδιαίτερα σχετικές: συγκρίσεις τρισδιάστατων τεχνολογιών για την ανασκαφή Τούμπας Θεσσαλονίκης (Stamnas et al., 2021), TLS συνδυασμένη με συμπληρωματικά δεδομένα για τεκμηρίωση κτηρίων κληρονομιάς (Karagianni, 2021), και τεκμηρίωση μεταβυζαντινού μνημείου στη Θεσσαλονίκη με στατική και SLAM σάρωση laser (Karolos et al., 2025). Το Αλατζά Ιμαρέτ έχει ήδη τεκμηριωθεί μέσω μεταπτυχιακής αποτύπωσης TLS στο ΑΠΘ, η οποία παρήγαγε μοντέλο νέφους σημείων και αρχιτεκτονικά σχέδια του μνημείου χρησιμοποιώντας αποκλειστικά TLS (Δανάκης, 2016).

3.8 Σύνθεση και Ερευνητικό Κενό

Τρία συμπεράσματα προκύπτουν από αυτή την ανασκόπηση. Πρώτον, φωτογραμμετρία, TLS και SLAM είναι ώριμες και συμπληρωματικές τεχνικές, η καθεμία με διαφορετική ισορροπία ακρίβειας, πληρότητας, κόστους και ταχύτητας. Δεύτερον, η πολυ-αισθητηριακή ολοκλήρωση είναι εδραιωμένη και υπάρχει στέρεη μεθοδολογική βάση για την καταχώρηση και σύγκριση νεφών σημείων μέσω καταχώρησης ICP και ανάλυσης αποκλίσεων C2C, C2M και M3C2. Τρίτον, οι συγκριτικές αξιολογήσεις είναι ακόμα συχνά ανά ζεύγος, ιδίως TLS έναντι φωτογραμμετρίας ή TLS έναντι ενός κινητού/SLAM συστήματος. Μελέτες που αποκτούν και συγκρίνουν επίγεια φωτογραμμετρία, εναέρια φωτογραμμετρία, TLS και SLAM στο ίδιο μνημείο παραμένουν λιγότερο συνηθισμένες.

Αυτό το κενό είναι ακόμα πιο έντονο για τα οθωμανικά μνημεία στην Ελλάδα. Αν και η ελληνική τεκμηρίωση κληρονομιάς αντιπροσωπεύεται καλά στη βιβλιογραφία, οι συγκριτικές πολυ-αισθητηριακές μελέτες οθωμανικής περιόδου παραμένουν περιορισμένες, και το Αλατζά Ιμαρέτ έχει μέχρι στιγμής καταγραφεί μόνο με TLS (Δανάκης, 2016). Η παρούσα εργασία καλύπτει αυτό το κενό τεκμηριώνοντας το προσβάσιμο εξωτερικό του Αλατζά Ιμαρέτ με τέσσερις συμπληρωματικές μεθόδους. Επίγεια φωτογραμμετρία, εναέρια φωτογραμμετρία, TLS και SLAM, αξιολογώντας τα παραγόμενα νέφη σημείων έναντι της αναφοράς TLS χρησιμοποιώντας τις μεθόδους καταχώρησης και ανάλυσης αποκλίσεων που ανασκοπήθηκαν παραπάνω.

4. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Αυτό το κεφάλαιο εκθέτει τις αρχές των τεσσάρων μεθόδων απόκτησης δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην εργασία και της επεξεργασίας νεφών σημείων στην οποία βασίζεται η σύγκρισή τους. Οι Ενότητες 4.1 έως 4.3 περιγράφουν, με τη σειρά, τη φωτογραμμετρία, την επίγεια σάρωση laser και το SLAM. Η Ενότητα 4.4 καλύπτει την καταχώρηση, τη σύγκριση και την ανακατασκευή επιφάνειας νεφών σημείων, που εφαρμόζονται στα αποτελέσματα και των τεσσάρων μεθόδων.

4.1 Φωτογραμμετρία

Η φωτογραμμετρία ανακατασκευάζει τη γεωμετρία τριών διαστάσεων ενός αντικειμένου από μετρήσεις που γίνονται σε δύο ή περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες. Η γεωμετρική της βάση είναι το μοντέλο κεντρικής προβολής, κατά το οποίο ένα σημείο αντικειμένου, το αντίστοιχο σημείο εικόνας και το κέντρο προβολής της κάμερας βρίσκονται σε μία ευθεία γραμμή. Αυτή η συνθήκη εκφράζεται από τις εξισώσεις συγγραμμικότητας, που συσχετίζουν τις συντεταγμένες εικόνας ενός σημείου με τις συντεταγμένες αντικειμένου μέσω του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας (κύρια απόσταση, κύριο σημείο και παράμετροι στρεβλής διαμόρφωσης φακού) και του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας (θέση και στάση κάμερας τη στιγμή της έκθεσης) (Kraus, 2007· Luhmann et al., 2023). Επειδή καταναλωτικές κάμερες όπως η Sony A6000 και η κάμερα του DJI Mini 3 Pro δεν είναι μετρικά όργανα, ο εσωτερικός τους προσανατολισμός ανακτάται μέσω βαθμονόμησης, είτε εκ των προτέρων είτε ταυτόχρονα με την ανακατασκευή (Luhmann et al., 2023).

Στις σύγχρονες ψηφιακές ροές εργασίας, ο προσανατολισμός ανακτάται αυτόματα μέσω Structure-from-Motion (SfM). Χαρακτηριστικές λεπτομέρειες ανιχνεύονται και αντιστοιχίζονται στο σύνολο εικόνων, η σχετική γεωμετρία μεταξύ εικόνων εκτιμάται και επαληθεύεται χρησιμοποιώντας την επιπολική δέσμευση, και οι θέσεις κάμερας μαζί με ένα αραιό σύνολο σημείων αντικειμένου ανακατασκευάζονται βαθμιαία (Hartley & Zisserman, 2004· Schönberger & Frahm, 2016). Η λύση βελτιώνεται με ρύθμιση δέσμης (bundle adjustment), μη γραμμική ελαχιστοτετραγωνική βελτιστοποίηση που εκτιμά από κοινού όλες τις παραμέτρους κάμερας και τις συντεταγμένες σημείων αντικειμένου ελαχιστοποιώντας το σφάλμα επαναπροβολής (Triggs et al., 2000). Η προσέγγιση SfM-MVS έκανε την υψηλής

ανάλυσης ανακατασκευή προσβάσιμη με χαμηλό κόστος και χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για την καταγραφή κληρονομιάς (Westoby et al., 2012· Remondino & El-Hakim, 2006).

Μόλις προσανατολιστούν οι εικόνες, το Multi-View Stereo (MVS) παράγει πυκνή ανακατασκευή. Με αφετηρία τη γνωστή γεωμετρία κάμερας, το MVS εκτιμά τιμή βάθους για μεγάλο ποσοστό των εικονοστοιχείων επιβάλλοντας φωτο-συνέπεια μεταξύ των απόψεων, και συγχωνεύει αυτές τις εκτιμήσεις σε πυκνό νέφος σημείων, από το οποίο μπορεί να προκύψει η αντίστοιχη επιφάνεια (πλέγμα) (Furukawa & Hernández, 2015). Η αλυσίδα αυτή, που υλοποιείται στο Agisoft Metashape Professional, εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη τόσο στα επίγεια όσο και στα εναέρια σύνολα εικόνων.

4.2 Επίγεια Σάρωση Laser (TLS)

Η επίγεια σάρωση laser (TLS) μετρά τη γεωμετρία μιας σκηνής άμεσα, εκπέμποντας παλμούς laser και καταγράφοντας την κατεύθυνση και την απόσταση των επιφανειών που κτυπούν. Δύο αρχές μέτρησης απόστασης είναι σε κοινή χρήση. Σαρωτές χρόνου πτήσης (παλμικοί) προσδιορίζουν την απόσταση από τον χρόνο ταξιδιού ενός εκπεμπόμενου παλμού προς τον στόχο και πίσω, ενώ σαρωτές διαφοράς φάσης (διαμορφωμένου πλάτους συνεχούς κύματος) την εκτιμούν από τη διαφορά φάσης μεταξύ εκπεμπόμενου και επιστρέφοντος σήματος. Τα όργανα διαφοράς φάσης — η κατηγορία στην οποία ανήκει το FARO Focus της παρούσας μελέτης, επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μέτρησης και υψηλή ακρίβεια σε μικρές έως μεσαίες αποστάσεις (Vosselman & Maas, 2010· Shan & Toth, 2018).

Η ακρίβεια μιας σάρωσης διέπεται από αρκετές ομάδες πηγών σφαλμάτων. Οργανικά σφάλματα επηρεάζουν τη μέτρηση απόστασης και τις δύο γωνιακές μετρήσεις και αντιμετωπίζονται μέσω βαθμονόμησης· το συστηματικό συστατικό του προϋπολογισμού σφαλμάτων και οι συσχετισμοί μεταξύ παραμέτρων απόστασης και γωνίας έχουν χαρακτηριστεί μέσω μοντελοποίησης σφαλμάτων και αυτο-βαθμονόμησης (Lichti, 2007, 2010). Επιπλέον, φαινόμενα σχετιζόμενα με το αντικείμενο όπως η ανακλαστικότητα της επιφάνειας και η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης, καθώς και περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν τη μέτρηση. Ο Reshetyuk (2009) παρέχει δομημένη κατηγοριοποίηση αυτών των πηγών σφαλμάτων.

Επειδή ένας μεμονωμένος σταθμός μπορεί να καταγράψει μόνο τις επιφάνειες εντός της οπτικής του γωνίας, η κάλυψη του προσβάσιμου εξωτερικού ενός μνημείου απαιτεί αρκετές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις, οι οποίες στη συνέχεια πρέπει να αναχθούν σε κοινό σύστημα συντεταγμένων. Αυτή η καταχώρηση επιτυγχάνεται είτε μέσω σταθμισμένων στόχων ορατών στις επικαλυπτόμενες σαρώσεις είτε μέσω βασισμένης σε επιφάνεια ευθυγράμμισης των επικαλυπτόμενων νεφών σημείων (Reshetyuk, 2009· Cheng et al., 2018). Η υψηλή γεωμετρική αξιοπιστία του TLS καθιστά το νέφος σημείων TLS την αναφορά έναντι της οποίας αξιολογούνται οι άλλες μέθοδοι στην παρούσα εργασία.

4.3 SLAM — Simultaneous Localization and Mapping

Το Ταυτόχρονου Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (SLAM) αποτελεί το πρόβλημα της ταυτόχρονης εκτίμησης, τόσο της τροχιάς ενός κινούμενου αισθητήρα όσο και ενός χάρτη του περιβάλλοντος μέσω του οποίου κινείται, όταν κανένα από τα δύο δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Προήλθε από την κινητή ρομποτική και διατυπώνεται πιθανοθεωρητικά ως εκτίμηση της κοινής εκ των υστέρων κατανομής πάνω στις θέσεις αισθητήρα και τον χάρτη, δεδομένων των παρατηρήσεων αισθητήρα και της κίνησης της πλατφόρμας (Durrant-Whyte & Bailey, 2006· Thrun et al., 2005). Η επίλυση αυτού του προβλήματος επιτρέπει σε έναν φορητό ή αλλιώς κινητό σαρωτή να δημιουργεί συνεκτικό νέφος σημείων ενώ βρίσκεται σε κίνηση, χωρίς σταθερές θέσεις ή εξωτερικό εντοπισμό θέσης.

Υπάρχουν δύο ευρείες οικογένειες λύσεων. Οι φιλτραρισμένες προσεγγίσεις, όπως το εκτεταμένο φίλτρο Kalman, ενημερώνουν αναδρομικά μια εκτίμηση της τρέχουσας θέσης και του χάρτη καθώς κάθε παρατήρηση φτάνει. Οι βελτιστοποιητικές προσεγγίσεις αναπαριστούν την τροχιά και τις παρατηρήσεις ως κόμβους και ανακτούν την πιο πιθανή διαμόρφωση ελαχιστοποιώντας το συνολικό σφάλμα, μια προσέγγιση που κλιμακώνεται καλύτερα σε μεγάλα προβλήματα και έχει καταστεί κυρίαρχη (T. Bailey & Durrant-Whyte, 2006· Cadena et al., 2016). Ένα σύστημα SLAM χωρίζεται συνήθως σε μπροστινό τμήμα (front end), που επεξεργάζεται τα ακατέργαστα δεδομένα αισθητήρα, εκτελεί καταχώρηση μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων και ανιχνεύει κλείσιμο βρόχου (επανεπισκεπτόμενους χώρους που περιορίζουν την τροχιά), και οπίσθιο τμήμα (back end), που εκτελεί τη συνολική βελτιστοποίηση (Cadena et al., 2016). Το κλείσιμο βρόχου είναι ουσιώδες επειδή η σταδιακή

εκτίμηση κίνησης συσσωρεύει ολίσθηση με την πάροδο του χρόνου, την οποία ένας ανιχνευμένος βρόχος επιτρέπει στο σύστημα να διορθώσει.

Στο LiDAR βάσει SLAM, οι παρατηρήσεις είναι σαρώσεις laser και η κίνηση μεταξύ πλαισίων ανακτάται μέσω καταχώρησης διαδοχικών σαρώσεων μεταξύ τους και στον συσσωρευόμενο χάρτη. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος εξάγει χαρακτηριστικά ακμών και επιπέδων από κάθε σάρωση και διαχωρίζει το πρόβλημα σε εκτίμηση ωδομετρίας υψηλής συχνότητας και βήμα χαρτογράφησης χαμηλότερης συχνότητας, επιτυγχάνοντας ακριβή, πραγματικού χρόνου εκτίμηση κίνησης (J. Zhang & Singh, 2014). Το Xgrids K1 που χρησιμοποιείται στη μελέτη αυτή είναι φορητό σύστημα LiDAR-SLAM αυτού του τύπου: ανακατασκευάζει τη γεωμετρία του μνημείου συνεχώς καθώς ο χειριστής κινείται γύρω από αυτό, ανταλλάσσοντας βαθμό ακρίβειας για ταχύτητα και για κάλυψη περιοχών δύσκολων να καταγραφούν από σταθερές θέσεις (Sammartano & Spanò, 2018).

4.4 Επεξεργασία, Καταχώρηση και Σύγκριση Νεφών Σημείων

Και οι τέσσερις μέθοδοι παράγουν νέφη σημείων και η ολοκλήρωση και σύγκρισή τους βασίζονται σε κοινό σύνολο λειτουργιών. Τα ακατέργαστα νέφη σημείων περιέχουν θόρυβο και παραπλανητικά σημεία, τα οποία μειώνονται μέσω φιλτραρίσματος και καθαρισμού πριν από περαιτέρω επεξεργασία (G. Bailey et al., 2022· Remondino, 2011). Τα νέφη από τις διαφορετικές μεθόδους εκφράζονται αρχικά σε ανεξάρτητα συστήματα συντεταγμένων και πρέπει να καταχωρηθούν σε ένα κοινό πλαίσιο. Η καταχώρηση εκτελείται συνήθως σε δύο στάδια. Μια ακατέργαστη ευθυγράμμιση παρέχει προσεγγιστικό μετασχηματισμό, ο οποίος στη συνέχεια βελτιώνεται από τον αλγόριθμο Iterative Closest Point (ICP). Ο ICP συζευγνύει επαναληπτικά κάθε σημείο με το πλησιέστερο σημείο στο νέφος αναφοράς και υπολογίζει τον άκαμπτο μετασχηματισμό που ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των ζευγών, επαναλαμβάνοντας μέχρι σύγκλισης (Besl & McKay, 1992).

Μόλις καταχωρηθούν δύο νέφη, η γεωμετρική τους συμφωνία ποσοτικοποιείται υπολογίζοντας αποστάσεις μεταξύ τους. Τα απλούστερα μέτρα είναι η απόσταση cloud-to-cloud (C2C), που λαμβάνεται ως η απόσταση πλησιέστερου γείτονα μεταξύ σημείων των δύο νεφών, και η απόσταση cloud-to-mesh (C2M), που μετράται από ένα νέφος σε μια ανακατασκευασμένη επιφάνεια. Ένα πιο στιβαρό μέτρο για τη σύγκριση επιφανειών είναι το

Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2), το οποίο εκτιμά τοπική κάθετο επιφάνεια σε κάθε σημείο αξιολόγησης και μετρά την απόσταση κατά μήκος αυτής, παρέχοντας παράλληλα διάστημα εμπιστοσύνης που λαμβάνει υπόψη την τραχύτητα επιφάνειας και την αβεβαιότητα καταχώρησης (Lague et al., 2013). Αυτά τα μέτρα, υλοποιημένα σε ανοιχτού κώδικα λογισμικό όπως το CloudCompare, χρησιμοποιούνται στο Κεφάλαιο 6 για τη σύγκριση των νεφών σημείων φωτογραμμετρίας, TLS και SLAM.

Τέλος, μπορεί να ανακατασκευαστεί συνεχής επιφάνεια από νέφος σημείων για οπτικοποίηση και παραγωγή παράγωγων σχεδίων. Η κυρίαρχη προσέγγιση είναι η ανακατασκευή επιφάνειας Poisson, η οποία προσαρμόζει υδατοστεγή επιφάνεια σε σύνολο προσανατολισμένων σημείων λύνοντας εξίσωση Poisson για σιωπηρή συνάρτηση δείκτη (Kazhdan et al., 2006). Η εκτεταμένη (screened) παραλλαγή της προσθέτει τα σημεία εισόδου ως περιορισμούς θέσης, οξύνοντας τις λεπτομέρειες (Kazhdan & Hoppe, 2013). Επειδή παράγει κλειστή, υδατοστεγή επιφάνεια, η ανακατασκευή Poisson μπορεί επίσης να γεφυρώσει κενά στα δεδομένα, παρεμβάλλοντας εύλογη επιφάνεια σε οπές που έχουν δημιουργηθεί από αποκλεισμούς ή αραιή δειγματοληψία.

5. Μεθοδολογική Προσέγγιση και Εφαρμογή

5.1 Γενική Επισκόπηση

Το μνημείο τεκμηριώθηκε με τέσσερις μεθόδους απόκτησης δεδομένων και τα δεδομένα επεξεργάστηκαν μέσω κοινής αλυσίδας. Επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία επεξεργάστηκαν μαζί στο Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2025) και συνδυάστηκαν σε ένα φωτογραμμετρικό νέφος σημείων. Ο επίγειος σαρωτής laser και το σύστημα SLAM παρήγαγαν δύο επιπλέον νέφη σημείων μέσω των δικών τους λογισμικών επεξεργασίας. Αυτά τα τρία σύνολα δεδομένων εισήχθησαν στο CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2024) και καταχωρήθηκαν σε κοινό σύστημα αναφοράς, όπου αποτελούν τη βάση της σύγκρισης ανά ζεύγος στο Κεφάλαιο 6. Επιπλέον, όλα τα νέφη σημείων που παρήχθησαν, συγχωνεύτηκαν σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο νέφος με κοινά σημεία, αλλά ο μεγάλος όγκος πληροφορίας είχε ως αποτέλεσμα την πρόσθεση θορύβου στο τελικό νέφος σημείων. Για τον λόγο αυτόν, επιλέχθηκε η συνένωση των νεφών από το TLS και της φωτογραμμετρίας για την παραγωγή ενός ενιαίου νέφους που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των προϊόντων τεκμηρίωσης. Οι τέσσερις μέθοδοι και τα όργανά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Μέθοδος	Όργανο	Κύρια χαρακτηριστικά	Βασικές παράμετροι απόκτησης
Επίγεια φωτογραμμετρία	Sony A6000	APS-C αισθητήρας (24.3 MP), εστιακή απόσταση 18 mm	1.315 εικόνες, αυτόματη έκθεση
Εναέρια φωτογραμμετρία	DJI Mini 3 Pro	48 MP (1/1.3" CMOS αισθητήρας)	533 εικόνες, ύψος πτήσης 15–30 m, επικάλυψη $\geq 80\%$
Επίγεια σάρωση laser (TLS)	FARO Focus	Εμβέλεια 0.6–70 m, ακρίβεια ± 2 mm @ 10 m	13 σταθμοί σάρωσης, HDR χρωματισμός
SLAM	Xgrids K1	SLAM LiDAR, δηλωμένη ακρίβεια 20–30 mm, εμβέλεια 0–30 m	Χρόνος απόκτησης ~ 30 min, τροχιά ~ 150 m, 3 βρόχοι κλεισίματος

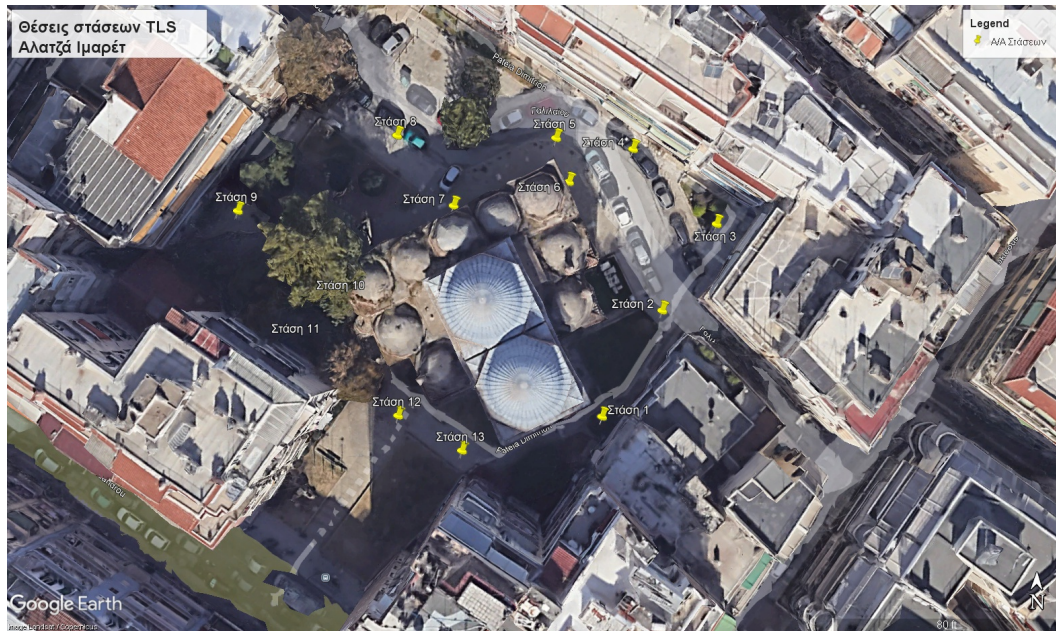
Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποτύπωσης

5.2 Απόκτηση δεδομένων πεδίου

5.2.1 Επίγεια σάρωση Laser

Το μνημείο σαρώθηκε με το FARO Focus από 13 θέσεις, επιλεγμένες ώστε να μεγιστοποιηθεί η κάλυψη των κατακόρυφων επιφανειών του προσβάσιμου εξωτερικού, να ελαχιστοποιηθούν οι ζώνες αποκλεισμού (shadow zones) και να διασφαλιστεί επικάλυψη $\sim 30\%$ μεταξύ γειτονικών σαρώσεων. Κάθε σάρωση αποκτήθηκε με ανάλυση 1/5 και ρύθμιση

HDR colorization, εξασφαλίζοντας πλούσια χρωματική πληροφορία παράλληλα με την τρισδιάστατη γεωμετρία.



Εικόνα 11 Θέσεις επίγειου σαρωτή

Η εγγραφή των επιμέρους νεφών πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό FARO Scene με τη μέθοδο target-based, αξιοποιώντας την εσωτερική ακρίβεια του οργάνου ($\pm 2 \text{ mm @ } 10 \text{ m}$) ως σύστημα αναφοράς. Το τελικό ενοποιημένο νέφος σημείων TLS ανήλθε σε 163.680.902 σημεία (Πίνακας 2).



Εικόνα 12: Ενδεικτική θέση TLS



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

ΚΑΤΟΨΗ



ΒΛΟΨΗ





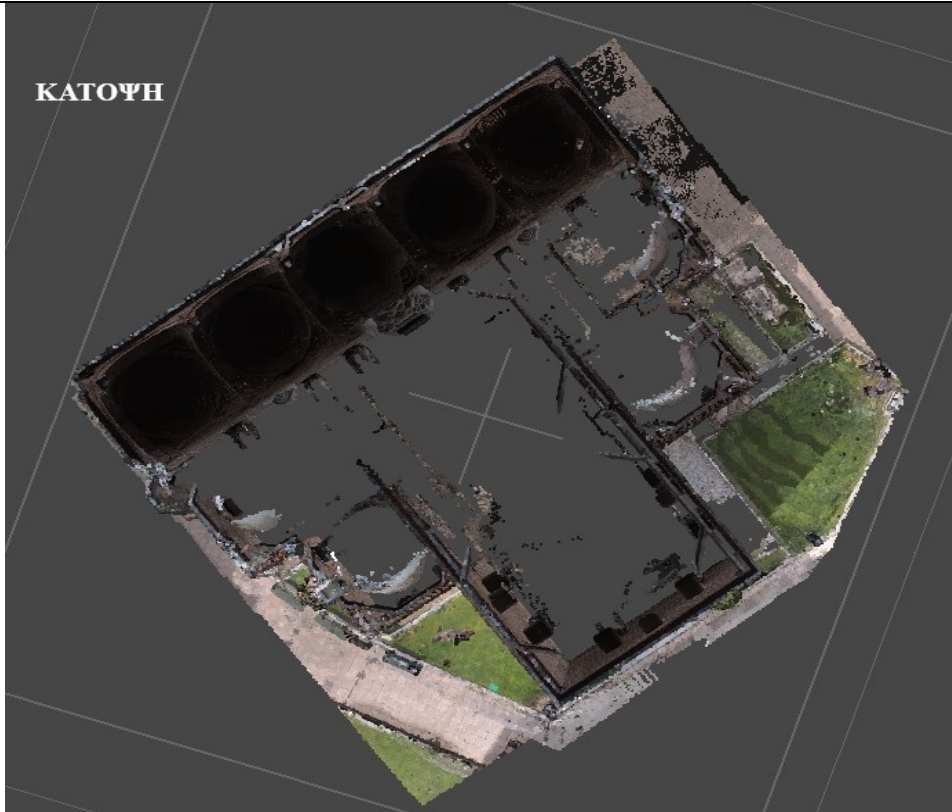


Πίνακας 2 Όψεις νέφους σημείων από TLS

5.2.2 Σάρωση SLAM

Συνεχής αποτύπωση SLAM πραγματοποιήθηκε με τον σαρωτή χειρός Xgrids K1, διαπερνώντας τροχιά συνολικού μήκους 150 m γύρω από το προσβάσιμο εξωτερικό του μνημείου σε διάρκεια 30 λεπτών. Η διαδρομή σχεδιάστηκε ώστε να περιλαμβάνει 3 κλεισίματα βρόχου (loop closures) σε διαφορετικά σημεία της περιμέτρου, επιτρέποντας στο λογισμικό επεξεργασίας να εντοπίσει και να διορθώσει αναδρομικά τη συσσωρευμένη ολίσθηση (drift) κατά μήκος της διαδρομής (Sammartano & Spanò, 2018· Di Stefano et al., 2021). Το τελικό ενοποιημένο νέφος σημείων SLAM ανήλθε σε 76.310.309 σημεία (Πίνακας 3).

ΚΑΤΟΨΗ



ΒΛ ΟΨΗ





ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης





Πίνακας 3 Όψεις νέφους σημείων από SLAM

5.2.3 Επίγεια φωτογραμμετρία

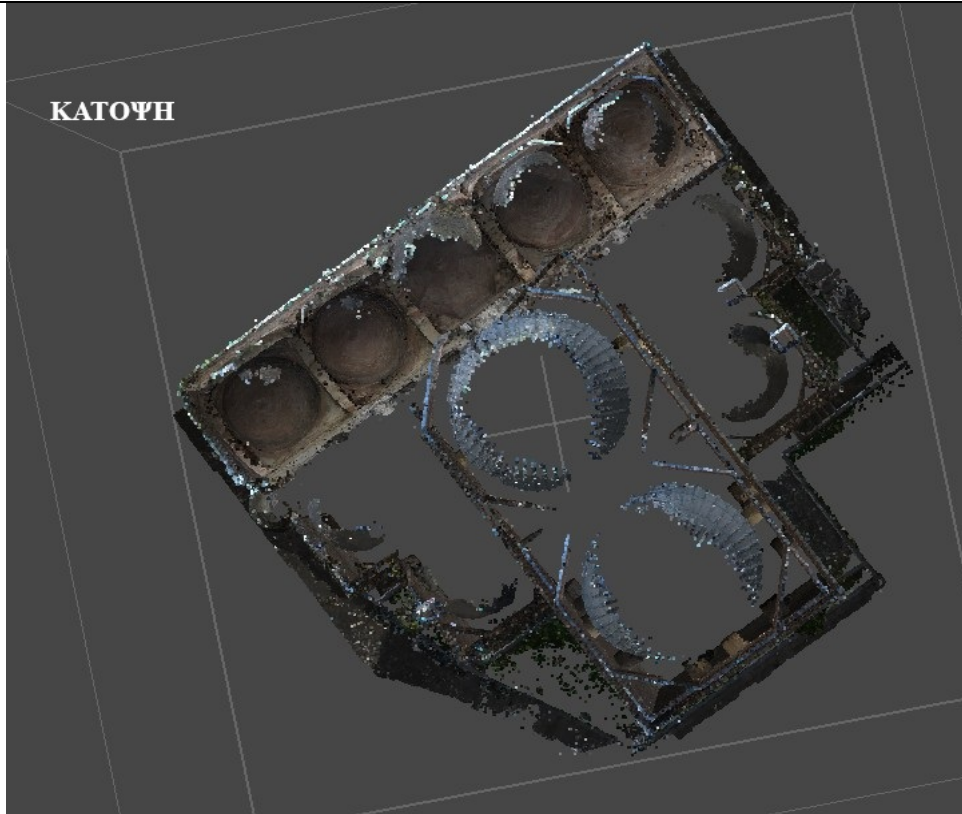
Οι εικόνες του εξωτερικού του μνημείου λήφθηκαν με τη Sony A6000 σε αυτόματη λειτουργία έκθεσης, με σταθερή εστιακή απόσταση (σταθερός φακός). Η διατήρηση σταθερής εστιακής απόστασης αποτελεί βασική προϋπόθεση για αξιόπιστη αυτοβαθμονόμηση, καθώς εξασφαλίζει σταθερή γεωμετρία φακού καθ' όλη τη διάρκεια της λήψης. Η αυτόματη ρύθμιση έκθεσης επελέγη για την αντιστάθμιση των μεταβαλλόμενων συνθηκών φωτισμού στον εξωτερικό χώρο, χωρίς να επηρεάζει τις γεωμετρικές παραμέτρους της κάμερας. Η λήψη των φωτογραφιών ακολούθησε ένα περιμετρικό κατά το μήκος των όψεων του κτηρίου και από διαφορετικές αποστάσεις (σε σχέση με το μνημείο) μοτίβο, διατηρώντας επικάλυψη εικόνων τουλάχιστον 80% για αξιόπιστη αντιστοίχιση χαρακτηριστικών (Westoby et al., 2012). Συνολικά 1315 εικόνες διατηρήθηκαν μετά από πρώτο έλεγχο ποιότητας και παρήγαγαν νέφος 296.826.776 σημείων (Πίνακας 4).



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

ΚΑΤΟΥΗ



ΒΛ ΟΥΗ







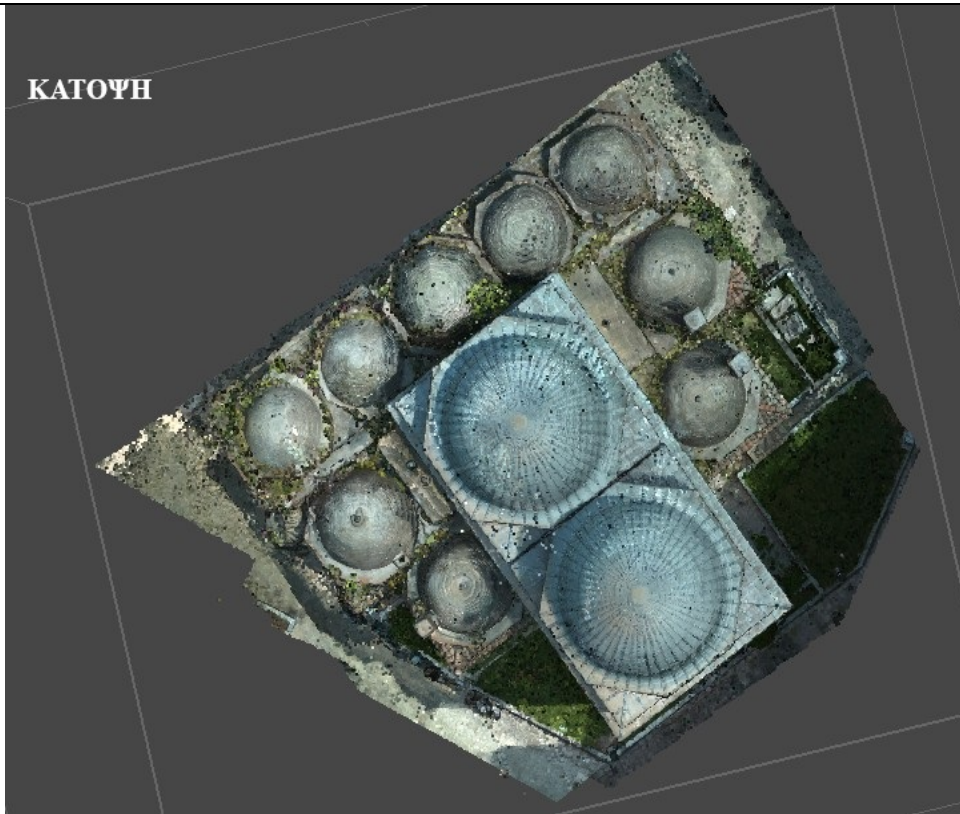
Πίνακας 4 Όψεις επίγειου φωτογραμμετρικού νέφους

5.2.4 Εναέρια φωτογραμμετρία

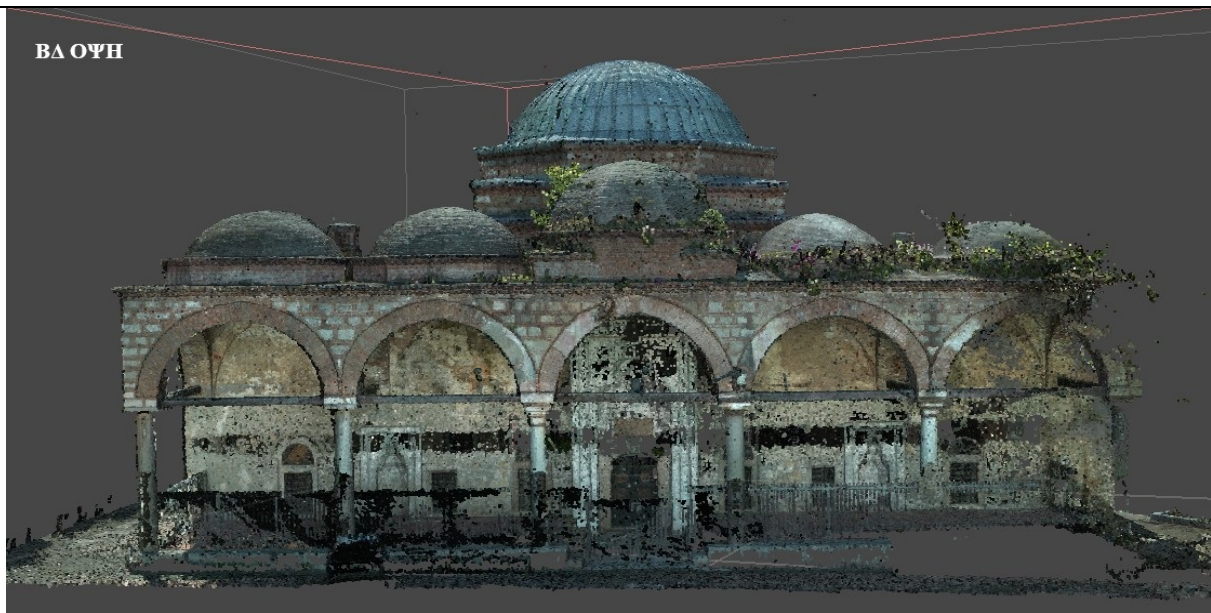
Εναέριες εικόνες αποκτήθηκαν με το DJI Mini 3 Pro για την καταγραφή της στέγης και των ανώτερων τμημάτων των όψεων που δεν είναι προσβάσιμα από το έδαφος. Οι πτήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ύψος ~20 m με συνδυασμένο μοτίβο δύο φάσεων: ναδιρική φάση με κάνναβο (grid pattern), εμπρός και πλευρική επικάλυψη $\geq 80\%$ και GSD ~1,5–2,0 cm/pixel, και πλάγια φάση (~45°) σε 5 κατευθύνσεις (Β, Ν, Α, Δ και διαγώνιες). Ο συνδυασμός ναδιρικών και πλάγιων λήψεων αποτρέπει το φαινόμενο doming και εξασφαλίζει πλήρη κάλυψη τόσο οριζόντιων όσο και κατακόρυφων επιφανειών (Pepe et al., 2022). Συνολικά λήφθηκαν 533 εικόνες, που παρήγαγαν νέφος 27.337.287 σημείων (Πίνακας 5)



ΚΑΤΟΨΗ



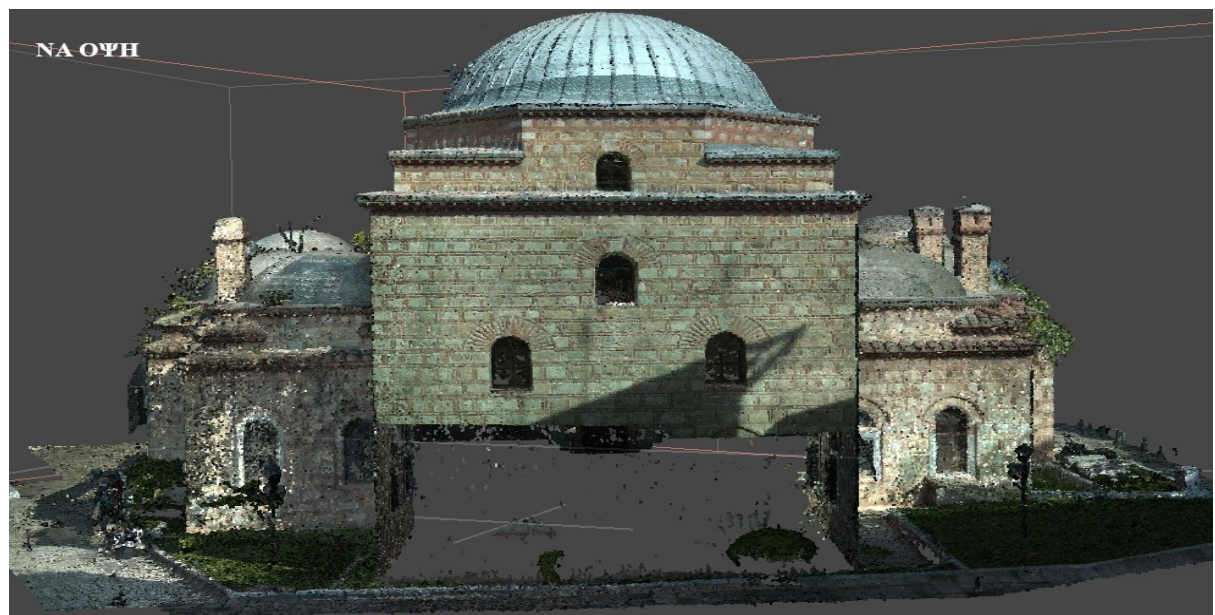
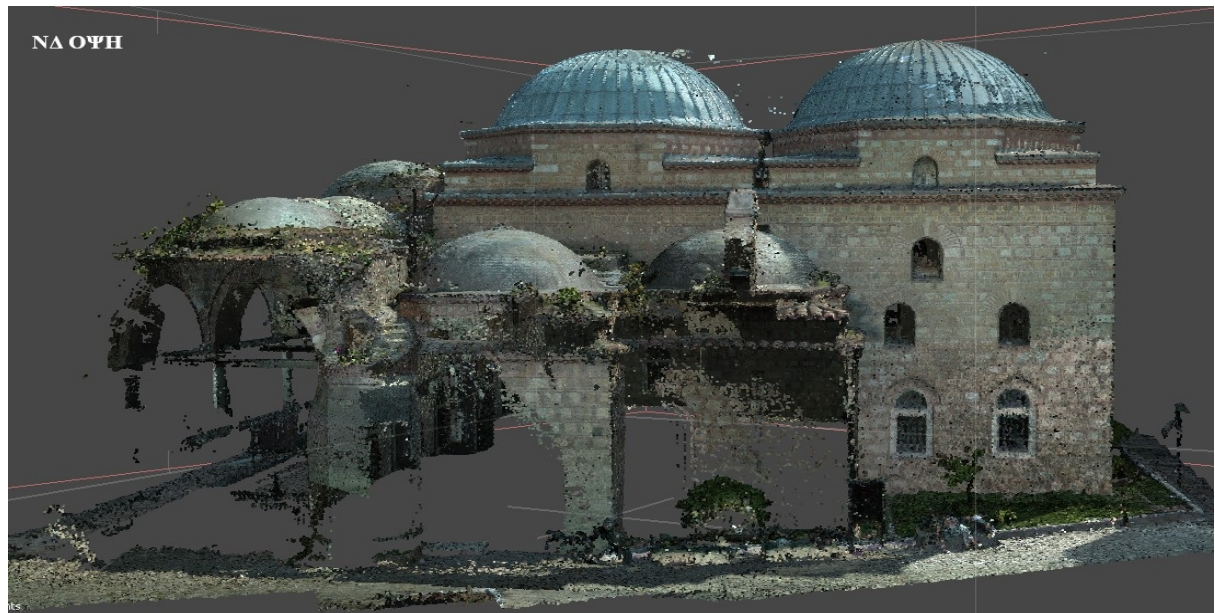
ΒΛΟΨΗ





ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

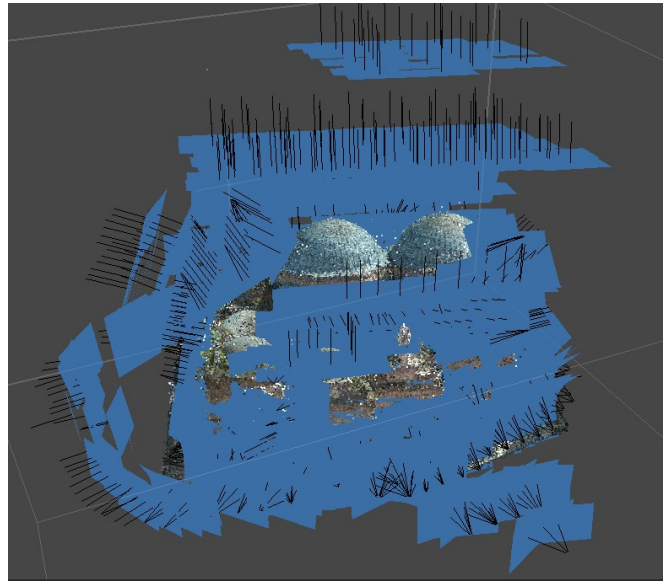




Πίνακας 5 Όψεις εναέριου φωτογραμμετρικού νέφους

5.3 Φωτογραμμετρική επεξεργασία στο metashape

Τα επίγεια και εναέρια σύνολα εικόνων επεξεργάστηκαν στο Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2025) ακολουθώντας την αλυσίδα Structure-from-Motion και Multi-View Stereo (Schönberger & Frahm, 2016· Pepe et al., 2022). Επειδή η σύγκριση στο Κεφάλαιο 6 αντιμετωπίζει τη φωτογραμμετρία ως ενιαία μέθοδο, τα επίγεια και εναέρια σύνολα εικόνων συνδυάστηκαν σε ένα φωτογραμμετρικό μοντέλο, στο οποίο εφαρμόστηκε η ακόλουθη αλυσίδα επεξεργασίας.



Εικόνα 13 Θέσεις λήψης φωτογραφιών

Η ευθυγράμμιση (Align Photos) εκτελέστηκε σε επίπεδο ακρίβειας High, αξιοποιώντας τον αλγόριθμο SIFT για την εξαγωγή και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων, με bundle adjustment που επέτυχε σφάλμα επανακαταβολής (reprojection error) μικρότερο του 1 pixel. Η πυκνή ανακατασκευή (Dense Cloud) πραγματοποιήθηκε με ποιότητα High και ήπιο φιλτράρισμα βάθους (Mild depth filtering), παράγοντας ενιαίο συνδυασμένο νέφος σημείων 213.590.386 σημείων με χρωματική πληροφορία RGB. Το τελικό νέφος εξήχθη σε μορφή LAS (Πίνακας 6) με εφαρμογή global shift για την αποφυγή σφαλμάτων ακρίβειας κινητής υποδιαστολής κατά την περαιτέρω επεξεργασία.



ΒΔ ΟΨΗ



ΒΔ ΟΨΗ





Πίνακας 6 Όψεις φωτογραμμετρικού νέφους

5.4 Προετοιμασία νεφών σημείων TLS και SLAM

Οι μεμονωμένες σαρώσεις TLS καταχωρήθηκαν σε ενιαίο νέφος σημείων στο λογισμικό FARO Scene χρησιμοποιώντας κοινά σημεία, με μέσο σφάλμα καταχώρησης εντός των ορίων ακρίβειας του οργάνου ($\pm 2 \text{ mm @ } 10 \text{ m}$) (Reshetyuk, 2009). Τα δεδομένα SLAM επεξεργάστηκαν στο λογισμικό Xgrids LixelStudio για ανακατασκευή της τροχιάς και του

νέφους σημείων, με εφαρμογή βελτιστοποίησης κλεισίματος βρόχου (loop closure optimization). Και τα δύο νέφη εξήχθησαν σε μορφή .las για περαιτέρω επεξεργασία.

5.5 Καταχώρηση και συγχώνευση στο CloudCompare

Τα φωτογραμμετρικά, TLS και SLAM νέφη σημείων καταχωρήθηκαν σε κοινό σύστημα αναφοράς στο CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2024). Επειδή το νέφος σημείων TLS είναι το πλέον μετρικά αξιόπιστο, υιοθετήθηκε ως νέφος αναφοράς, και τα φωτογραμμετρικά και SLAM νέφη ευθυγραμμίστηκαν σε αυτό (Jo & Hong, 2019· Ulvi, 2021). Ακολουθήθηκε στρατηγική δύο σταδίων. Προσεγγιστικής ευθυγράμμισης και λεπτής βελτιστοποίησης, που αποτελεί την καθιερωμένη προσέγγιση για καταχώρηση νεφών σημείων διαφορετικής προέλευσης (Cheng et al., 2018· Xu et al., 2022).

Στο πρώτο στάδιο, η προσεγγιστική ευθυγράμμιση επιτεύχθηκε με χειροκίνητη επιλογή 10-12 ζευγών αντίστοιχων σημείων σε καλά ορισμένα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά κοινά και στα δύο νέφη. Στο δεύτερο στάδιο, η ευθυγράμμιση βελτιώθηκε με τον αλγόριθμο Iterative Closest Point (ICP) (Besl & McKay, 1992· Rusinkiewicz & Levoy, 2001). Η ποιότητα κάθε καταχώρησης αξιολογήθηκε μέσω του τελικού σφάλματος RMS, του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Τα χωριστά καταχωρημένα νέφη αποτελούν τη βάση της σύγκρισης στο Κεφάλαιο 6, όπου η γεωμετρική συμφωνία μεταξύ των μεθόδων ποσοτικοποιείται μέσω αποστάσεων cloud-to-cloud (C2C)· το ολοκληρωμένο νέφος χρησιμοποιείται για την παραγωγή των προϊόντων τεκμηρίωσης.

5.6 Σύγκριση Χαρακτηριστικών Νεφών

Σύστημα	Σημεία	Κύρια Κάλυψη	Υφή RGB	Γεωμ. Ακρίβεια
TLS	163.680.902M	Κατακόρυφες	Υψηλή (HDR)	Πολύ υψηλή
SLAM	76.310.309M	Κατακόρυφες & ημι-οριζόντιες	Μέτρια (Fisheye camera)	Μέτρια
UAV	27.337.287M	Οριζόντιες & ανώτερες ζώνες	Υψηλή (48 MP)	Υψηλή
Sony A6000	296.826.776M	Κατακόρυφες λεπτομέρειες	Πολύ υψηλή	Υψηλή
Sony - UAV	213.590.386M	Κατακόρυφες-οριζόντιες &	Πολύ υψηλή	Υψηλή



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

		ανώτερες ζώνες		
TLS – Sony - Uav	235.249.800M	Κατακόρυφες- οριζόντιες & ανώτερες ζώνες	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά νεφών μετά την επεξεργασία

6. Σύγκριση Νεφών Σημείων

6.1 Μεθοδολογία C2C Ανάλυσης

Η ποσοτική αξιολόγηση της γεωμετρικής συμφωνίας μεταξύ των νεφών σημείων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Cloud-to-Cloud (C2C) απόστασης στο λογισμικό CloudCompare. Για κάθε σημείο p_i του νέφους αξιολόγησης υπολογίστηκε η ελάχιστη ευκλείδεια απόστασή του από το νέφος αναφοράς Q , δηλαδή $d(p_i, Q) = \min \|p_i - q_j\|$, όπου q_j τα σημεία του νέφους αναφοράς. Το σύνολο αυτών των αποστάσεων αποθηκεύτηκε ως scalar field και αξιολογήθηκε στατιστικά. Η C2C επιλέχθηκε έναντι της C2M (Cloud-to-Mesh) λόγω της δυνατότητάς της να συγκρίνει απευθείας πυκνά νέφη χωρίς την ενδιάμεση κατασκευή επιφάνειας, η οποία θα εισήγαγε επιπλέον αβεβαιότητα (Lague et al., 2013).

Για κάθε ζεύγος ορίστηκε ανώτατο όριο αποκοπής 0.5 m, ώστε να αποκλειστούν σημεία χωρίς αντίστοιχη κάλυψη στο νέφος αναφοράς, κυρίως σημεία σε δυσπρόσιτες ζώνες ή σημεία κινούμενων αντικειμένων. Το σύστημα αναφοράς για όλες τις συγκρίσεις ήταν το TLS. Η αξιολόγηση κάθε ζεύγους στηρίχθηκε σε τρία επίπεδα ανάλυσης: (α) ιστόγραμμα κατανομής αποστάσεων (256 κλάσεις), (β) προσαρμογή κατανομής Gauss για εξαγωγή μέσης τιμής (mean) και τυπικής απόκλισης (std), και (γ) χρωματικός χάρτης (colormap) για χωρική αξιολόγηση των αποκλίσεων ανά όψη του μνημείου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Ζεύγος	Manual RMS (m)	C2C Mean (m)	C2C Std Dev (m)	Σημεία	Scale
TLS - SLAM	0.0148	0.0135	0.0333	76.310.309	0.9999
TLS - Φωτογραμμετρία	0.0088	0.0197	0.0570	296.826.776	1.0083
SLAM - Φωτογραμμετρία	-	0.0161	0.0501	76.310.309	-

Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εγγραφής και C2C ανάλυσης

6.2 TLS – SLAM

6.2.1 Αποτελέσματα Εγγραφής

Η χειροκίνητη εγγραφή του SLAM cloud στο σύστημα αναφοράς TLS επιτεύχθηκε με RMS 0.0148 m (~1.5 cm). Ο πίνακας μετασχηματισμού παρουσιάζει σχεδόν ταυτοτική δομή

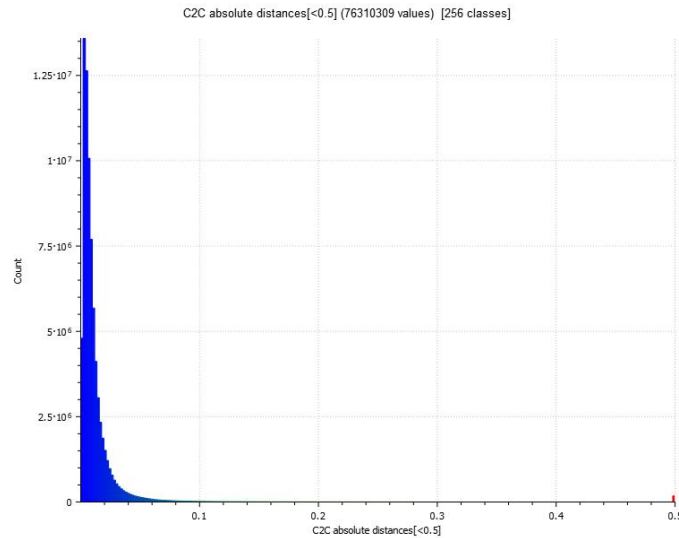


rotation matrix (διαγώνιες τιμές ~ 1.000 , εκτός διαγωνίου < 0.001), υποδηλώνοντας ότι τα δύο νέφη ήταν ήδη εγγύς ευθυγράμμισης σε επίπεδο προσανατολισμού, αναμενόμενο αφού αμφότερα αποτύπωσαν το ίδιο μνημείο από παρόμοιες εξωτερικές θέσεις. Ο παράγοντας κλίμακας (Scale = 0.9999) είναι πρακτικά αμελητέος, επιβεβαιώνοντας συμβατότητα συστημάτων συντεταγμένων.

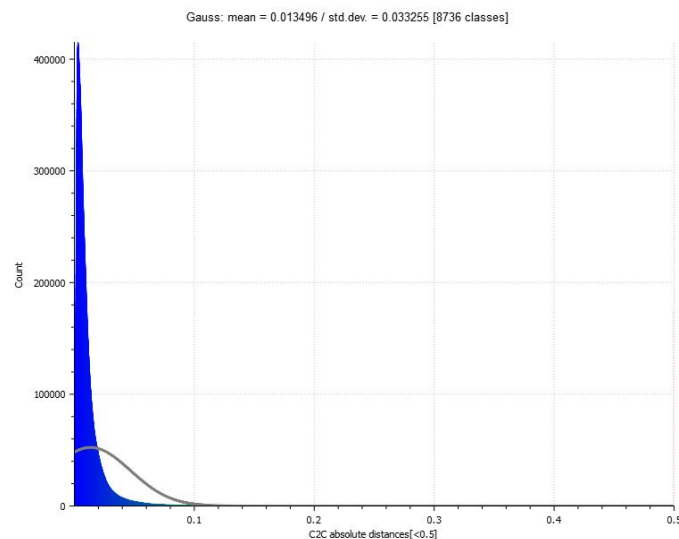
Η δοκιμή λεπτής εγγραφής με τον αλγόριθμο ICP (Besl & McKay, 1992· Rusinkiewicz & Levoy, 2001) απέδωσε σε όλες τις δοκιμές (επικάλυψη 70%, 85%, 90%) RMS μεταξύ 0.111 και 0.136 m, δηλαδή $\sim 7-9 \times$ μεγαλύτερο από τη χειροκίνητη εγγραφή. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται σε τρεις αλληλένδετες αιτίες: πρώτον, τη σημαντική διαφορά πυκνότητας σημείων μεταξύ TLS ($\sim 163.7M$) και SLAM ($\sim 76.3M$), δεύτερον στο εσωτερικό drift του SLAM cloud που εισάγει τοπικές παραμορφώσεις μη διορθώσιμες με ενιαία rigid transformation (Sammartano & Spanò, 2018) και τρίτον τη διαφορετική γεωμετρική κάλυψη των δύο αισθητήρων. Συνεπώς, η χειροκίνητη εγγραφή βάσει αρχιτεκτονικών σημείων υιοθετήθηκε ως βέλτιστη μέθοδος για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης.

6.2.2 C2C Ανάλυση

Η C2C ανάλυση επί 76.310.309 σημείων (εντός ορίου 0.5 m) έδωσε μέση απόσταση 0.0135 m (1.35 cm) και τυπική απόκλιση 0.0333 m (3.33 cm). Η αναλογία τυπικής απόκλισης προς μέση τιμή ($\sim 2.5:1$) υποδηλώνει επικέντρωση της κατανομής κοντά στο μηδέν με ουρά από outliers σε περιοχές διαφορετικής κάλυψης, χαρακτηριστικό καλής εγγραφής (Lague et al., 2013). Η μέση τιμή 1.35 cm εντάσσεται εντός της ονομαστικής ακρίβειας του Xgrids K1 (20–30 mm) και είναι συνεπής με το Manual Align RMS (1.48 cm).



Εικόνα 14 Ιστογράμμο C2C αποστάσεων TLS-SLAM (76.3M σημεία, max 0.5 m)



Εικόνα 15 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0135 m, Std: 0.0333 m

Η κατανομή παρουσιάζει έντονη θετική ασυμμετρία: η συντριπτική πλειοψηφία των σημείων συγκεντρώνεται κάτω από 0.05 m, ενώ η ουρά (>0.10 m) αντιστοιχεί σε περιοχές εκτός κοινής κάλυψης, κυρίως το εδαφικό επίπεδο και ζώνες βλάστησης.

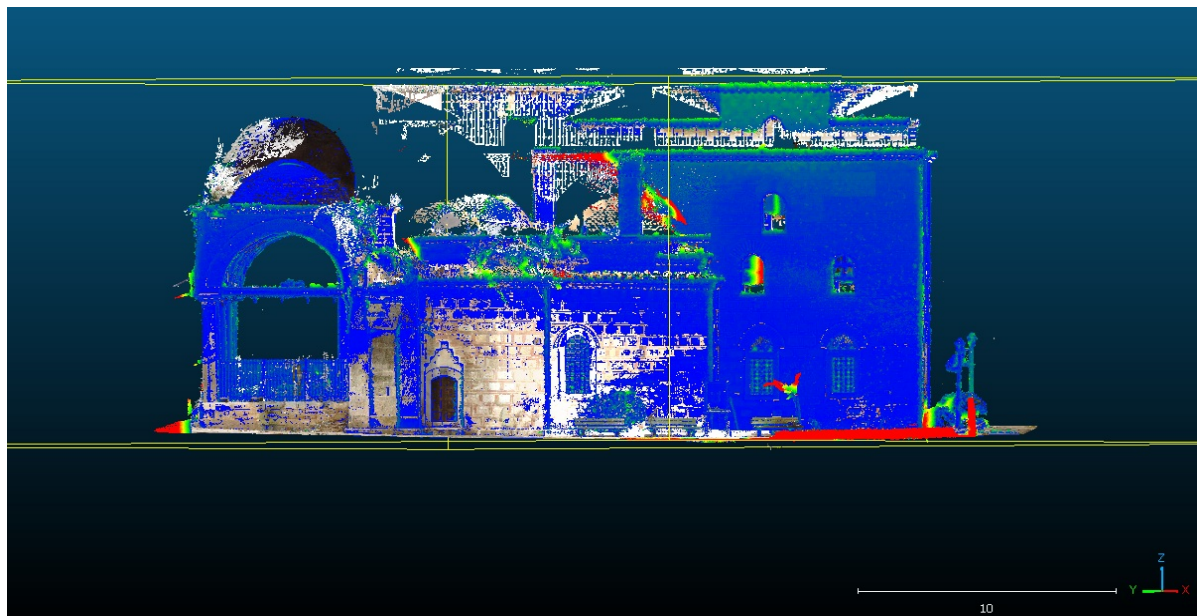
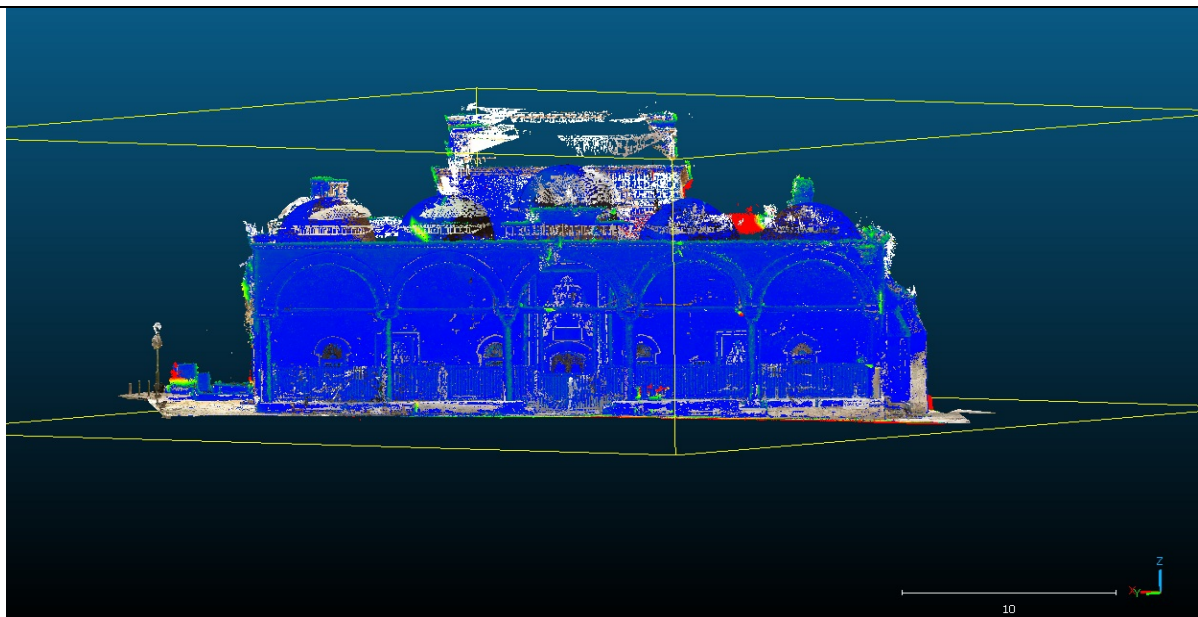
6.2.3 Χωρική Αξιολόγηση – Χρωματικοί Χάρτες

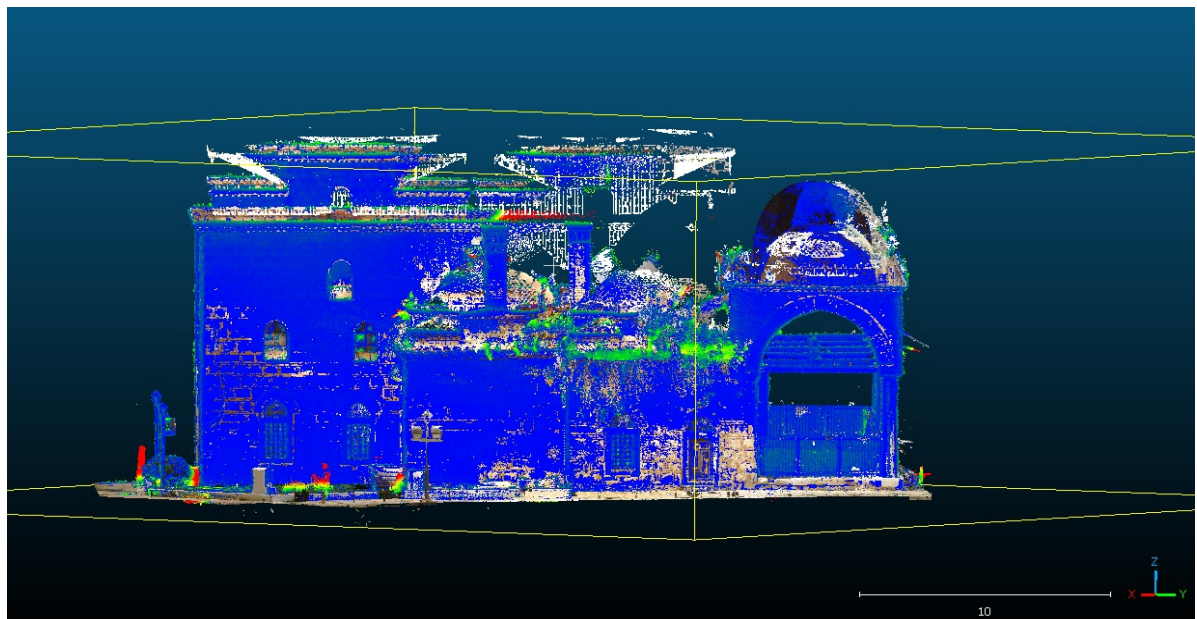
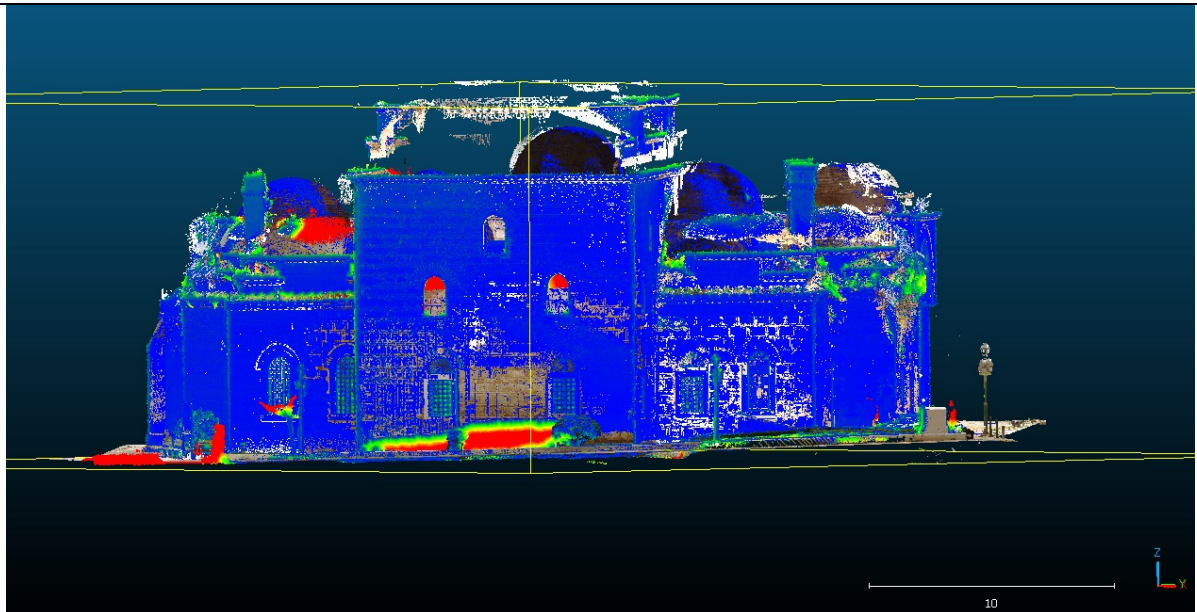
Οι χρωματικοί χάρτες (colormaps) απεικονίζουν χωρικά τις C2C αποστάσεις: Μπλε (<0.02 m) | Κυανό-Πράσινο (0.02–0.05 m) | Κίτρινο-Πορτοκαλί (0.05–0.10 m) | Κόκκινο (>0.10 m).



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

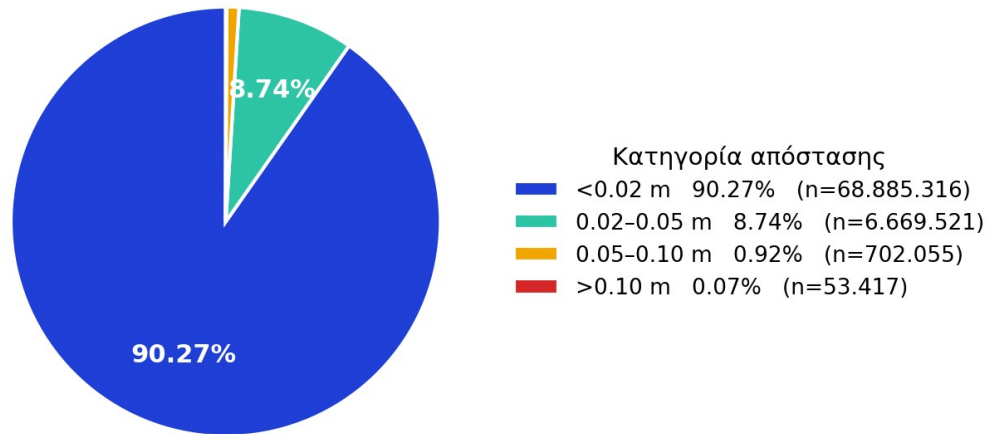
Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης



**Πίνακας 9 Colormap TLS - SLAM**

Ο χρωματικός χάρτης καταδεικνύει κυρίαρχο μπλε χρωματισμό στις κύριες κατακόρυφες επιφάνειες τοιχοποιίας και στις τέσσερις όψεις, επιβεβαιώνοντας εξαιρετική γεωμετρική συμφωνία ($<2\text{ cm}$) στα αρχιτεκτονικά στοιχεία. Πράσινος χρωματισμός ($0.02\text{--}0.05\text{ m}$) εμφανίζεται στις μεταβατικές ζώνες τοίχου-στέγης, όπου η πυκνότητα σημείων του SLAM αραιώνει λόγω γωνίας σάρωσης. Κόκκινος χρωματισμός ($>0.10\text{ m}$) εντοπίζεται αποκλειστικά στο εδαφικό επίπεδο και σε μεμονωμένα σημεία βλάστησης, αντικατοπτρίζοντας δυναμικά αντικείμενα κατά την αποτύπωση SLAM και δεν αντιπροσωπεύει σφάλμα εγγραφής.

Κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM-TLS) ανά κατηγορία



Σύνολο σημείων: 76.310.309

Εικόνα 16 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM-TLS) ανά κατηγορία απόστασης

Ο εκτιμώμενος λόγος επιφάνειας με αποκλίσεις <0.05 m υπερβαίνει το 85% της αρχιτεκτονικής επιφάνειας, συμβατό με αντίστοιχες μελέτες (Sammartano & Spanò, 2018· Conti et al., 2024).

6.3 TLS – Φωτογραμμετρία Drone

6.3.1 Αποτελέσματα Εγγραφής

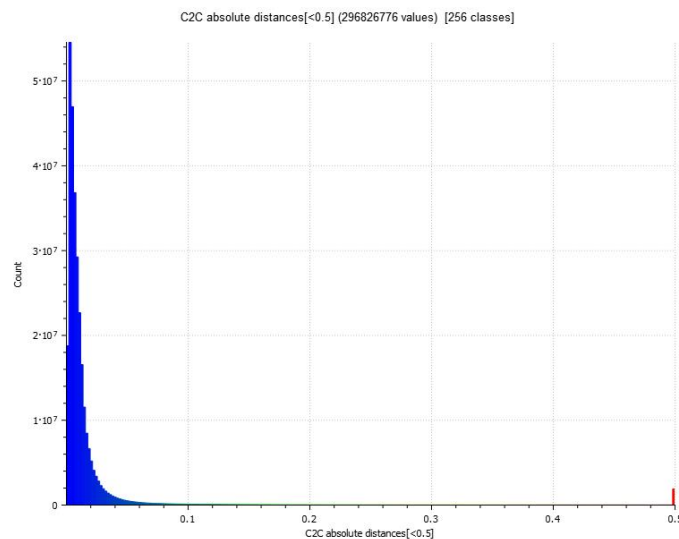
Η χειροκίνητη εγγραφή του φωτογραμμετρικού νέφους επιτεύχθηκε με RMS 0.0088 m (~ 8.8 mm), το καλύτερο αποτέλεσμα εκ των τριών ζευγών, αντανακλώντας την υψηλή εσωτερική γεωμετρική συνέπεια του SfM μοντέλου. Ο παράγοντας κλίμακας (Scale = 1.0083, $\sim 0.83\%$) αντικατοπτρίζει τη διαφορά κλίμακας μεταξύ των δύο ανεξάρτητων τοπικών συστημάτων συντεταγμένων, τιμή αναμενόμενη για εγγραφή SfM-TLS χωρίς κοινό γεωδαιτικό πλαίσιο (Westoby et al., 2012) και ενσωματώθηκε αυτόματα στον πίνακα μετασχηματισμού.

Ο αλγόριθμος ICP απέδωσε RMS 0.177 m με overlap 90% ($\sim 20\times$ μεγαλύτερο). Πέρα από τις γενικές αιτίες αποτυχίας, εδώ συνέβαλε και η εκτεταμένη αναπαράσταση οριζόντιων επιφανειών (θόλοι, στέγη) από το drone, ~ 297 M σημεία που δεν αντιστοιχούν σε σημεία του TLS, «παρασύροντας» τον ICP εκτός σύγκλισης. Το εύρημα αυτό συνάδει με τη

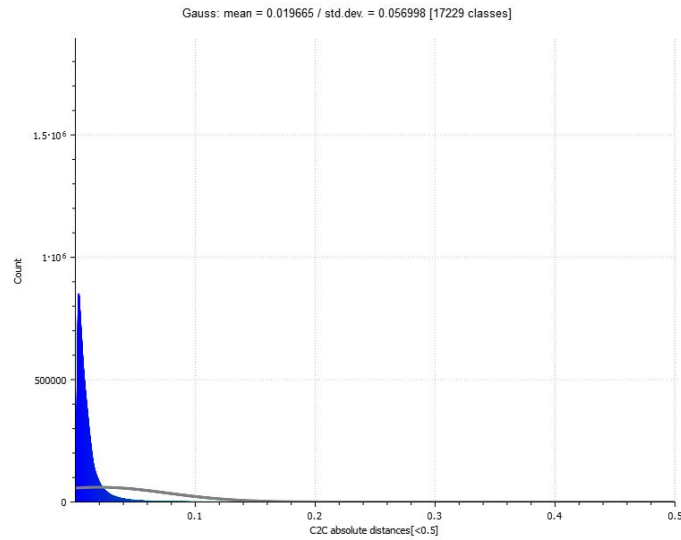
βιβλιογραφία για περιορισμούς του ICP σε νέφη με ετερογενή γεωμετρική κατανομή (Besl & McKay, 1992· Cheng et al., 2018).

6.3.2 C2C Ανάλυση

Η C2C ανάλυση επί 296.826.776 σημείων έδωσε μέση απόσταση 0.0197 m (1.97 cm) και τυπική απόκλιση 0.0570 m (5.70 cm). Παρά τον καλύτερο Manual Align RMS (8.8 mm) σε σχέση με το SLAM (14.8 mm), η C2C mean είναι υψηλότερη. Η φαινομενική αυτή αντίφαση εξηγείται από δύο παράγοντες: πρώτον, το $\sim 4\times$ μεγαλύτερο πλήθος σημείων που περιλαμβάνει εκτεταμένες περιοχές με εγγενείς αποκλίσεις (βλάστηση, περιβάλλον χώρος, στέγη), αυτό που η βιβλιογραφία αποκαλεί «coverage bias» (Lague et al., 2013), δεύτερον τη θεμελιώδη γεωμετρική ασυμμετρία κάλυψης: το drone αποτυπώνει τις θολωτές κατασκευές εξ υπερύθρου με υψηλή πυκνότητα, ενώ το TLS τις σαρώνει υπό γωνία $<20^\circ$ από το έδαφος, δημιουργώντας συστηματική απόκλιση στις μεταβατικές ζώνες θόλων–τοιχών.

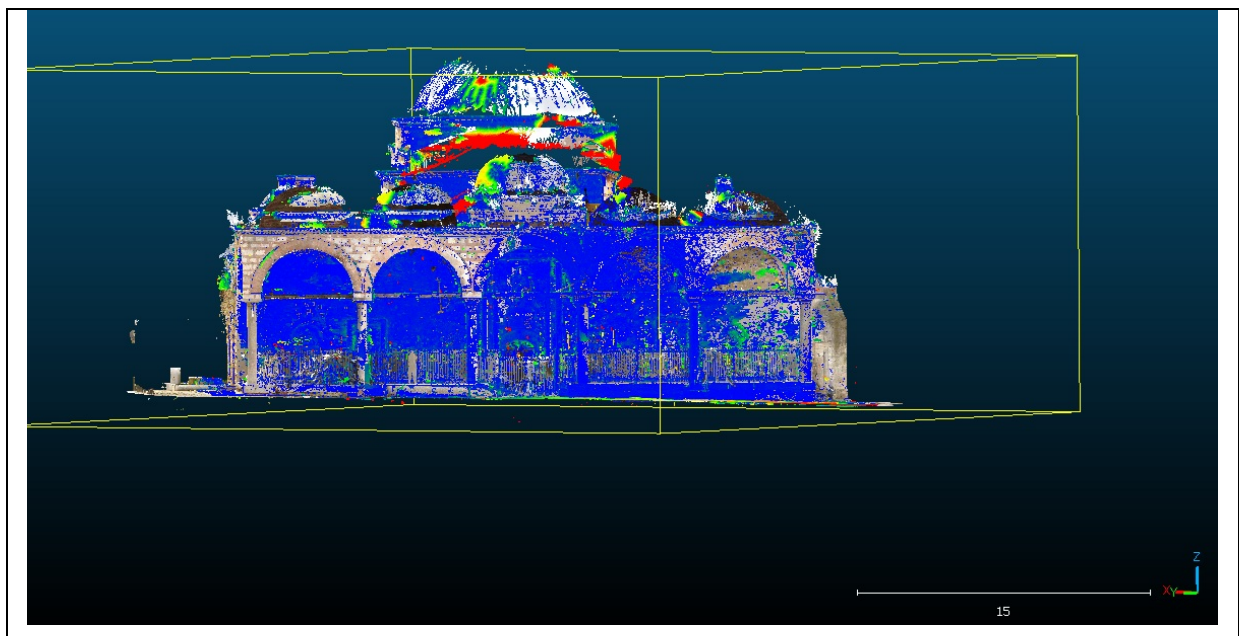


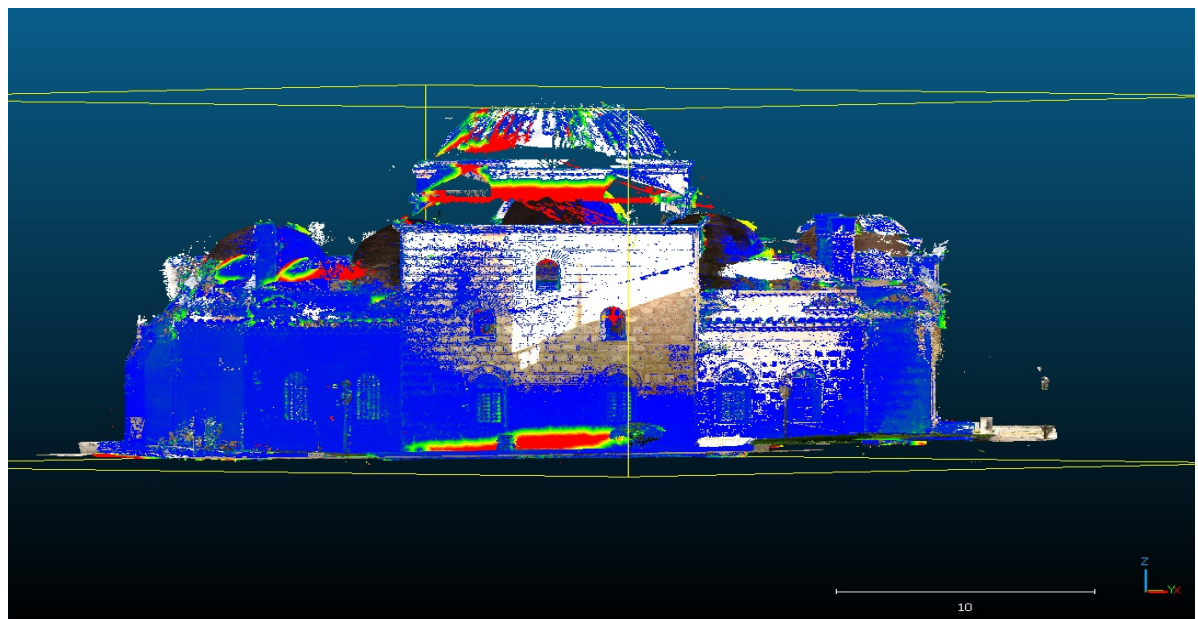
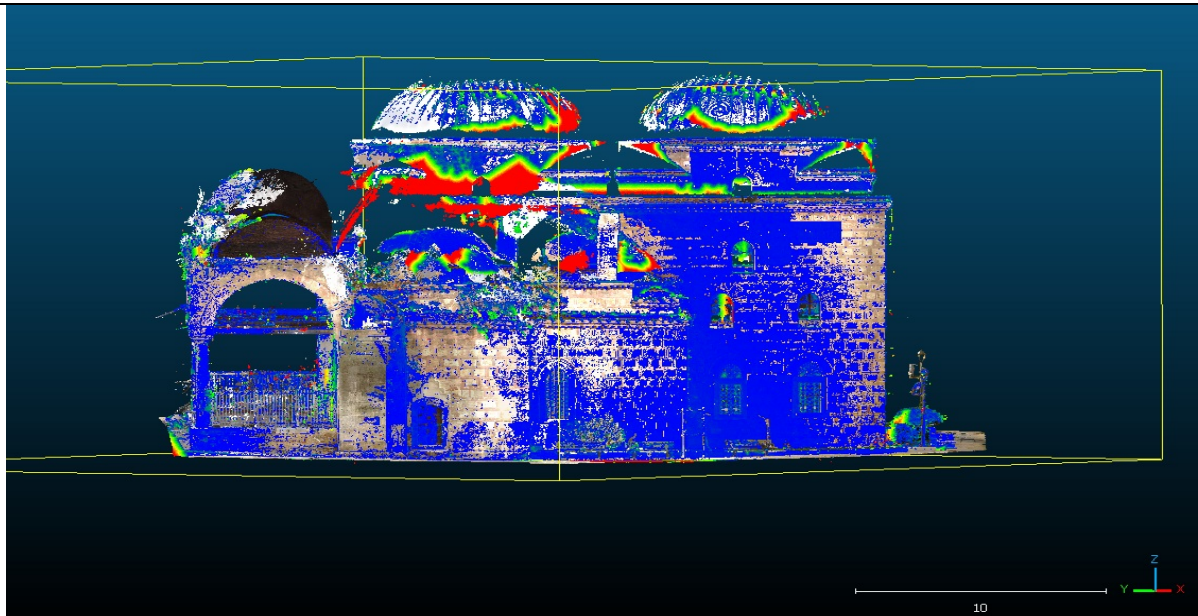
Εικόνα 17 Ιστόγραμμα C2C TLS–Φωτογραμμετρία (296.8M σημεία)

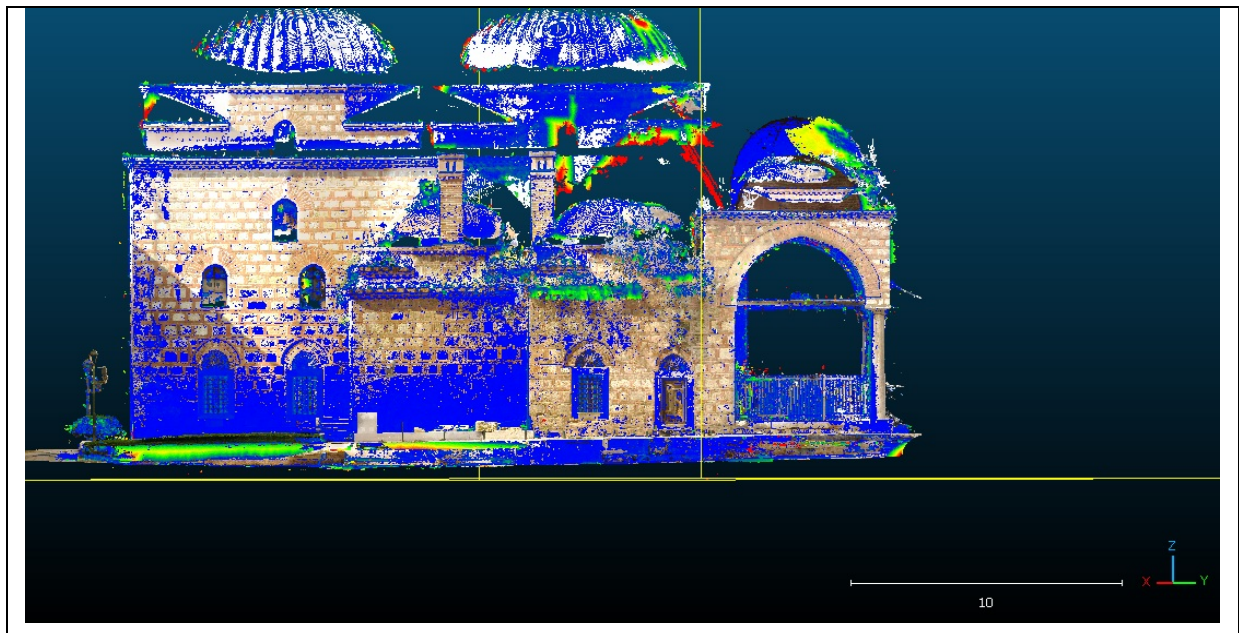


Εικόνα 18 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0197 m, Std: 0.0570 m

6.3.3 Χωρική Αξιολόγηση – Χρωματικοί Χάρτες



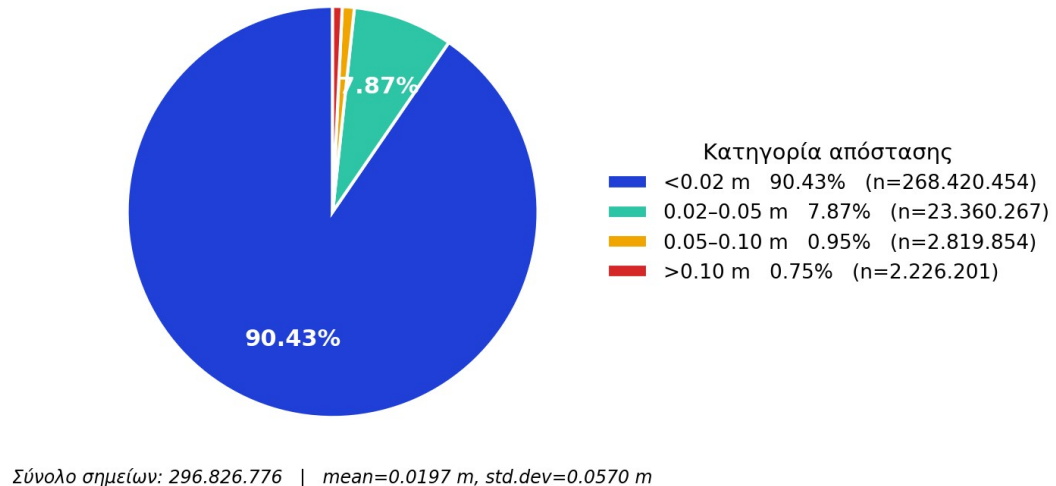




Πίνακας 10 Colormap TLS – Φωτογραμμετρία

Ο χρωματικός χάρτης αποκαλύπτει εξαιρετική συμφωνία (μπλε) στις κατακόρυφες επιφάνειες τοιχοποιίας, στη στοά και στα τοξωτά ανοίγματα. Οι σημαντικότερες αποκλίσεις (κόκκινο–πορτοκαλί) εντοπίζονται στις μεταβατικές ζώνες θόλων–τοιχών, όπου η γεωμετρική ασυμμετρία κάλυψης TLS vs drone δημιουργεί συστηματική απόκλιση που δεν αντικατοπτρίζει σφάλμα εγγραφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανεπαρκής κάλυψη θόλων από χαμηλές θέσεις αποτύπωσης αποτελεί γνωστό περιορισμό της TLS-only προσέγγισης: ο Δανάκης (2016) είχε αντιμετωπίσει ακριβώς αυτό για το ίδιο μνημείο, αναγκασμένος να χρησιμοποιήσει ταρατσες γειτονικών κτιρίων, περιορισμός που η drone αποτύπωση της παρούσας εργασίας ξεπερνά πλήρως. Κόκκινη λωρίδα στο εδαφικό επίπεδο κατά μήκος όλων των όψεων αντικατοπτρίζει διαφορετική κάλυψη αστικού χώρου στις δύο αποτυπώσεις.

Κατανομή αποστάσεων C2C (TLS-Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία

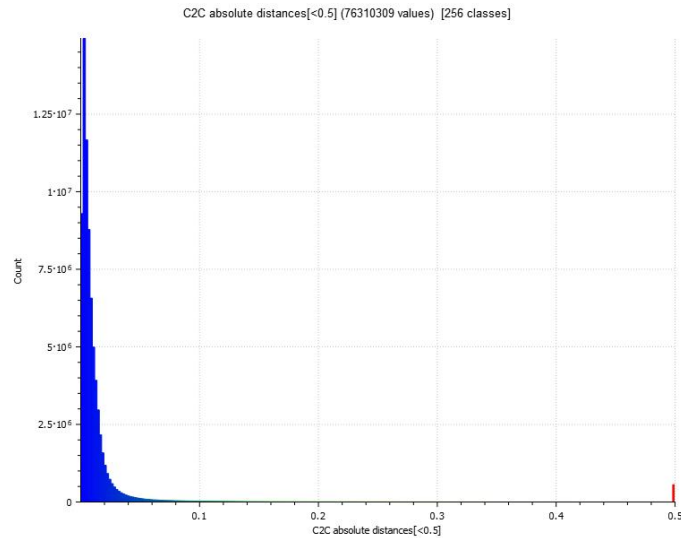


Εικόνα 19 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (TLS-Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία απόστασης

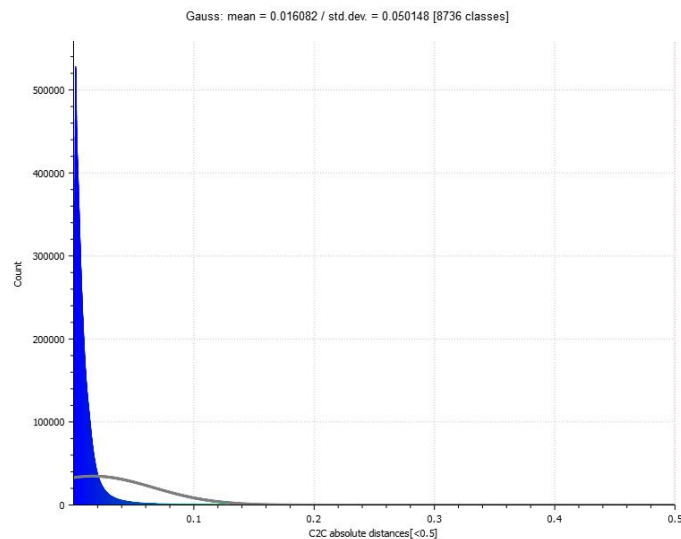
6.4 SLAM – Φωτογραμμετρία Drone

Η σύγκριση SLAM-Φωτογραμμετρίας πραγματοποιήθηκε χωρίς νέα εγγραφή: αμφότερα τα νέφη είχαν ήδη εγγραφεί στο κοινό σύστημα αναφοράς TLS, εξασφαλίζοντας πλήρη συνέπεια με τα προηγούμενα ζεύγη και λειτουργώντας ως έμμεσος έλεγχος ποιότητας εγγραφών.

Η C2C ανάλυση επί 76.310.309 σημείων έδωσε μέση απόσταση 0.0161 m (1.61 cm) και τυπική απόκλιση 0.0501 m (5.01 cm). Η τιμή 1.61 cm είναι ενδιάμεση μεταξύ TLS-SLAM (1.35 cm) και TLS-Φωτογραμμετρία (1.97 cm), επιβεβαιώνοντας την εσωτερική συνέπεια του συνόλου εγγραφών.

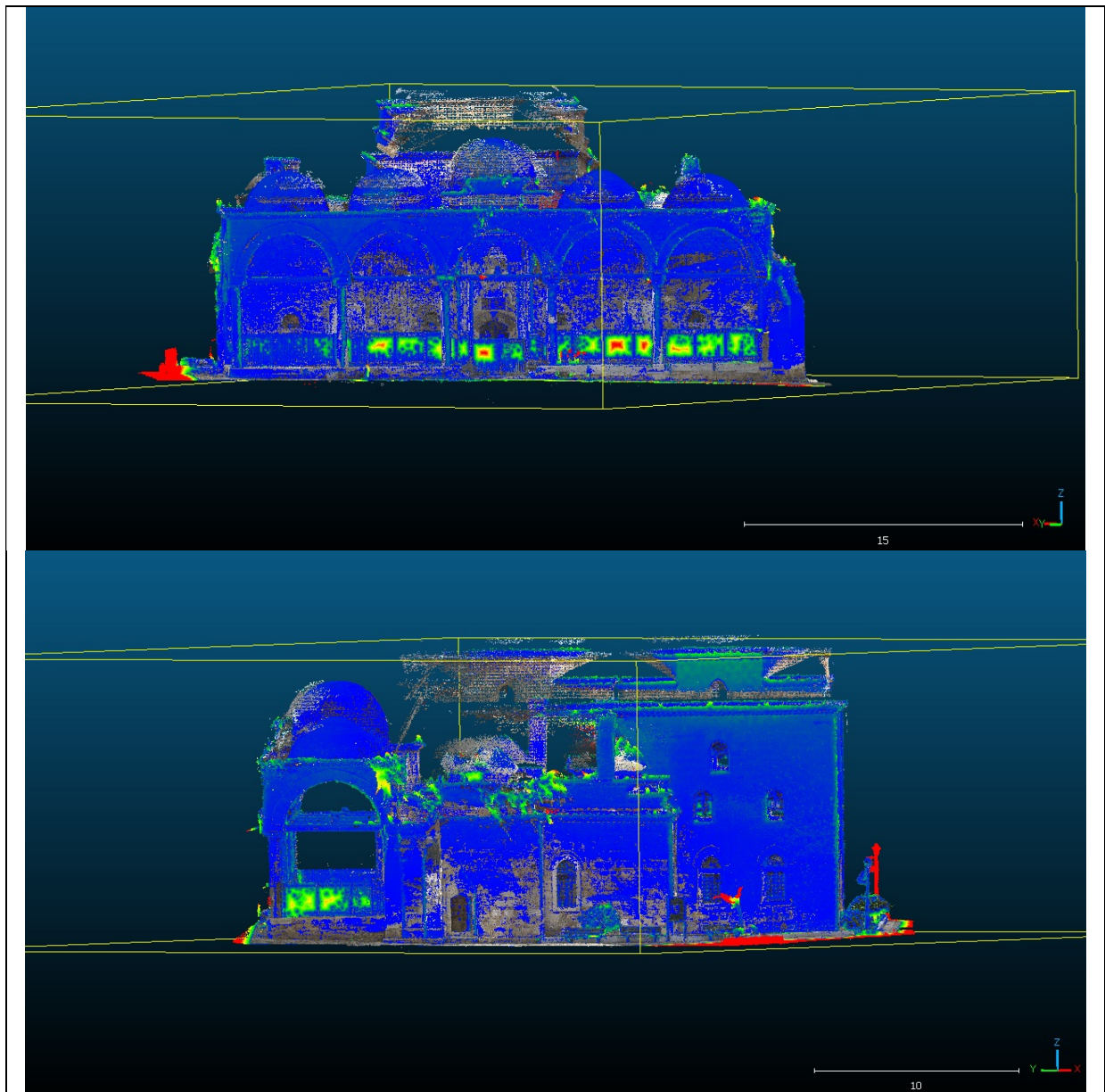


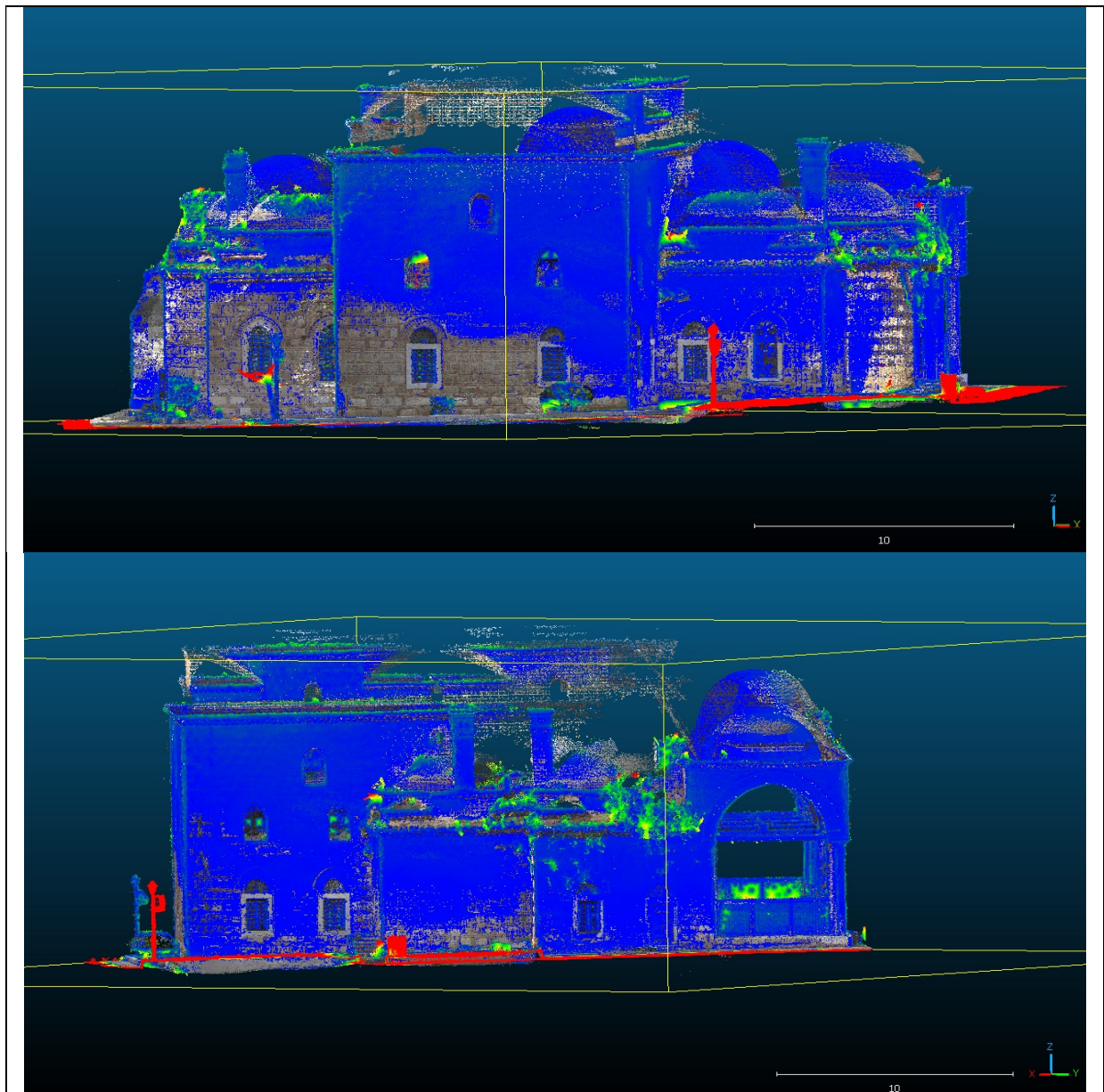
Εικόνα 20 Ιστόγραμμα C2C SLAM–Φωτογραμμετρία Drone



Εικόνα 21 Κατανομή Gauss — Mean: 0.0161 m, Std: 0.0501 m

Αξιοσημείωτη παρατήρηση: οι θολωτές κατασκευές παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες αποκλίσεις σε σχέση με το TLS–Φωτογραμμετρία, επιβεβαιώνοντας ότι η απόκλιση στο συγκεκριμένο ζεύγος οφείλεται πράγματι στον περιορισμό κάλυψης του TLS και όχι σε ανακρίβεια του SfM μοντέλου.

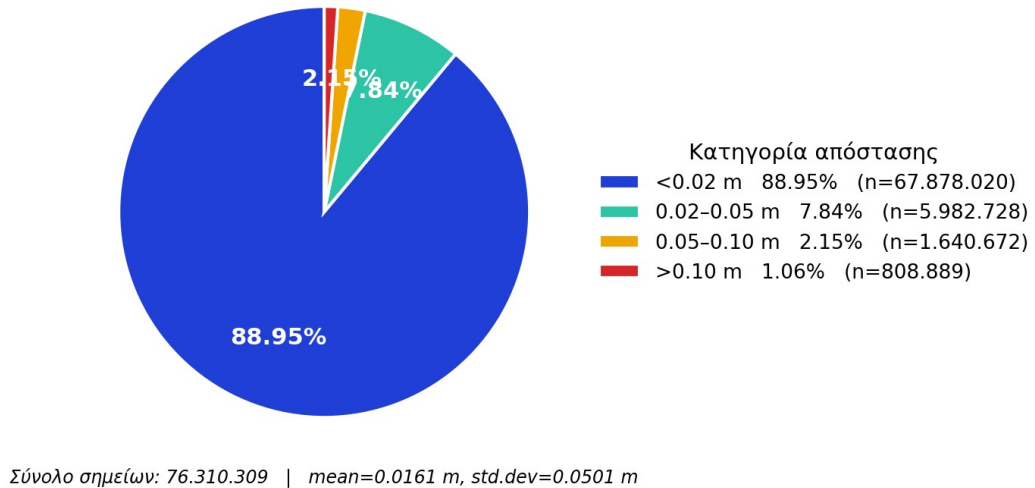




Πίνακας 11 Colormap SLAM – Φωτογραμμετρία

Οι χρωματικοί χάρτες επιβεβαιώνουν ομοιόμορφο μπλε στις κύριες αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Κόκκινη λωρίδα εντοπίζεται στο εδαφικό επίπεδο, αντικατοπτρίζοντας τη διαφορετική αναπαράσταση υπαίθριου χώρου μεταξύ SLAM (σάρωση κατά βάδιση) και drone (nadir/oblique λήψεις). Σημεία βλάστησης εμφανίζουν αποκλίσεις 0.05–0.10 m, αναμενόμενες λόγω της διαφορετικής αναπαράστασης φύλλωσης από κάθε αισθητήρα.

Κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM-Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία



Εικόνα 22 Ποσοστιαία κατανομή αποστάσεων C2C (SLAM-Φωτογραμμετρία) ανά κατηγορία απόστασης

6.5 Σύγκριση με Βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας (13,5–19,7 mm) βρίσκονται εντός ή κάτω από το φάσμα τιμών που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία για αντίστοιχες συγκρίσεις πολυαισθητηριακής εγγραφής σε πλαίσιο πολιτιστικής κληρονομιάς. Ειδικότερα, για το ζεύγος TLS-Φωτογραμμετρία, η τιμή των 19,7mm είναι συγκρίσιμη με πρόσφατο εύρημα σύγκρισης UAV φωτογραμμετρίας και TLS σε σύνθετο μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς (Κάστρο Avdalaz, Τουρκία), όπου η μέση απόσταση C2C για τις εξωτερικές επιφάνειες ήταν μικρότερη από 2 cm (Yiğit et al., 2025), επιβεβαιώνοντας ότι τιμές της τάξης του 1,5–2 cm αποτελούν ρεαλιστικό όριο ακρίβειας για φωτογραμμετρική τεκμηρίωση σύνθετων ιστορικών κτισμάτων.

Για το ζεύγος TLS-SLAM, το εύρος τιμών στη βιβλιογραφία είναι ευρύτερο. Στη μελέτη των Tucci et al. (2018) σε σύνθετο δοκιμαστικό πεδίο εσωτερικού/εξωτερικού χώρου (φρούριο Fortezza da Basso, Φλωρεντία), η μέση απόσταση τριών φορητών συστημάτων SLAM (Karta Stencil, Leica Pegasus Backpack, GeoSlam Zeb-Revo) ως προς νέφος αναφοράς TLS κυμάνθηκε στα 40–80mm, τιμή σημαντικά υψηλότερη από αυτή της παρούσας εργασίας (13,5mm), γεγονός που ενισχύει περαιτέρω το επιχείρημα ότι η συστηματική χωρική κατανομή χειροκίνητων σημείων αναφοράς σε όλες τις επιφάνειες και τα ύψη του μνημείου



οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ακρίβειας έναντι αμιγώς αυτοματοποιημένων προσεγγίσεων εγγραφής.

Η τάση αυτή, ότι η χειροκίνητη ή ημι-αυτόματη παρέμβαση παραμένει απαραίτητη για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε πολύπλοκα ιστορικά κτίσματα, επιβεβαιώνεται και από πρόσφατη μελέτη αξιολόγησης φορητών συστημάτων SLAM σε ιστορικούς ναούς στην Ιταλία (Bonora & Colapietro, 2026), όπου διαπιστώθηκε ότι, παρότι όλα τα συστήματα SLAM κατέγραψαν αποτελεσματικά τις κύριες γεωμετρίες σύνθετων ιστορικών κτιρίων, εμφανίστηκαν διαφορές ως προς την ακρίβεια, τη συνέπεια των δεδομένων και την αναγνωσιμότητα αρχιτεκτονικών λεπτομερειών.

Ζεύγος	Manual RMS (m)	C2C Mean (m)	C2C Std Dev (m)
Zlot et al. (2014)	TLS vs SLAM	~20–40 mm	Κτίρια εσωτερικού
Nocerino et al. (2017)	TLS vs SLAM	~15–35 mm	Αρχαιολογικοί χώροι
Tucci et al. (2018)	TLS vs Φωτογραμμετρία	~10–25 mm	Ιστορικά μνημεία
Yigit et al. (2025)	TLS vs Φωτογραμμετρία	<20 mm	Κάστρο Avdalaz, Τουρκία (σύνθετο μνημείο)
Παρούσα εργασία	TLS vs SLAM / Φωτ.	13.5–19.7 mm	Alatza Imaret, Θεσ/νίκη

Πίνακας 12 Σύγκριση C2C αποτελεσμάτων με βιβλιογραφικές αναφορές

6.6 Παραγωγή Προϊόντων Τεκμηρίωσης

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη συνδυασμένη γεωμετρική και χρωματική ποιότητα, αποφασίστηκε η ενοποίηση του νέφους σημείων TLS με τα νέφη φωτογραμμετρίας (Sony A6000 και DJI Mini 3 Pro) σε ένα ενιαίο νέφος αναφοράς. Το TLS παρέχει γεωμετρική ακρίβεια και πυκνότητα στις κατακόρυφες επιφάνειες, ενώ η φωτογραμμετρία συνεισφέρει πλούσια χρωματική πληροφορία RGB και καλύτερη κάλυψη οριζόντιων και δυσπρόσιτων περιοχών. Το ενοποιημένο νέφος (235.249.800 σημεία) αποτέλεσε τη βάση για την παραγωγή όλων των προϊόντων τεκμηρίωσης.

Από το ενοποιημένο νέφος σημείων παράχθηκαν συνολικά έξι κατηγορίες προϊόντων αποτύπωσης. Πρώτον, εξήχθησαν δύο γεωμετρικές τομές: οριζόντια τομή που αποδίδει κάτοψη με τον εσωτερικό χώρο, τα πλευρικά δωμάτια και το περιβάλλον του μνημείου, και κατακόρυφη διαμήκης τομή, που αναδεικνύει το προφίλ των θόλων, τα ύψη και τη δομή του

κτιρίου (Εικόνα 22). Δεύτερον, παράχθηκαν αρχιτεκτονικές όψεις με ορθογωνική προβολή απευθείας από το νέφος σημείων, χρωματισμένες βάσει έντασης ανάκλασης (reflectance intensity) του TLS, που αναδεικνύουν λεπτομέρειες τοιχοποιίας, ανοίγματα και αρχιτεκτονικά στοιχεία, καθώς και η αντίστοιχη κάτοψη σε ορθοπροβολή (Εικόνα 23-27). Τρίτον, παράχθηκε τριγωνοποιημένο πλέγμα (mesh) του συνολικού μνημείου μέσω της διαδικασίας Build Model στο Metashape, με χρήση του ενοποιημένου νέφους ως δεδομένου αναφοράς (point cloud-based reconstruction). Τέταρτον, για επιλεγμένα τμήματα του μνημείου (regions of interest) με αρχιτεκτονικό ή κατασκευαστικό ενδιαφέρον εκτελέστηκε τοπική ανακατασκευή υψηλής ανάλυσης, με παραγωγή τόσο τριγωνοποιημένου πλέγματος όσο και συνεχούς επιφάνειας (Πίνακας 13). Πέμπτον, παράχθηκε όψη με υψομετρική πληροφορία υπό μορφή ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM) σε raster, που αποδίδει την κατανομή του ανάγλυφου και των υψών του μνημείου σε επιλεγμένη προβολή (Εικόνα 31)

Η ανακατασκευή mesh αντιμετώπισε τρεις βασικές δυσκολίες: (α) κενά στις ζώνες μετάβασης μεταξύ αισθητήρων λόγω διαφορετικής γεωμετρικής κάλυψης, (β) υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις μνήμης για το σύνολο του νέφους, και (γ) παρουσία θορύβου από βλάστηση στην περιμετρική ζώνη του μνημείου. Η παραγωγή πλήρως επεξεργασμένου και καθαρισμένου mesh αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

7. Συμπεράσματα και Προτάσεις

7.1 Σύνοψη Εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε την πολυ-αισθητηριακή τρισδιάστατη τεκμηρίωση του προσβάσιμου εξωτερικού του Αλατζά Ιμαρέτ της Θεσσαλονίκης, του μοναδικού σωζόμενου ζαβιγιελί τζαμιού τύπου ανεστραμμένου T στην ελληνική επικράτεια (1484) και τη συγκριτική αξιολόγηση τεσσάρων μεθόδων αποτύπωσης. Για την απόκτηση δεδομένων αξιοποιήθηκαν επίγεια σάρωση laser (FARO Focus TLS), κινητή σάρωση SLAM (Xgrids K1), εναέρια φωτογραμμετρία (DJI Mini 3 Pro) και επίγεια φωτογραμμετρία κοντινής λήψης (Sony A6000). Τα παραγόμενα νέφη σημείων καταχωρήθηκαν σε κοινό σύστημα αναφοράς στο CloudCompare και αξιολογήθηκαν ποσοτικά μέσω ανάλυσης αποστάσεων cloud-to-cloud (C2C) για τρία ζεύγη σύγκρισης, με το νέφος TLS ως αναφορά. Παράλληλα, από το ενοποιημένο νέφος παράχθηκαν προϊόντα τεκμηρίωσης: αρχιτεκτονική όψη, οριζόντια και κατακόρυφη τομή, και πειραματική ανακατασκευή επιφάνειας.

7.2 Κύρια Συμπεράσματα

7.2.1 Ακρίβεια Εγγραφής

Η ποσοτική αξιολόγηση της γεωμετρικής συμφωνίας μεταξύ των νεφών σημείων έδωσε μέσες C2C αποστάσεις στο εύρος 13,5–19,7 mm για τα τρία ζεύγη σύγκρισης, τιμές που εντάσσονται εντός ή κάτω από τα αντίστοιχα βιβλιογραφικά εύρη για ανάλογες πολυ-αισθητηριακές αποτυπώσεις μνημείων. Το καλύτερο αποτέλεσμα χειροκίνητης εγγραφής επιτεύχθηκε για το ζεύγος TLS–Φωτογραμμετρία (RMS 8,8 mm), αντισταθμίζοντας την υψηλή εσωτερική γεωμετρική συνέπεια του SfM μοντέλου. Η χαμηλότερη μέση C2C απόσταση καταγράφηκε για το ζεύγος TLS–SLAM (1,35 cm), γεγονός που αποδίδεται στην κοινή κατακόρυφη κάλυψη των δύο συστημάτων και στην απουσία εκτεταμένων οριζόντιων επιφανειών που θα εισήγαγαν συστηματική απόκλιση. Η εσωτερική συνέπεια των τριών ζευγών με το ζεύγος SLAM–Φωτογραμμετρία να αποδίδει ενδιάμεση τιμή (1,61 cm) χωρίς νέα εγγραφή, επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του συνόλου των εγγραφών.

7.2.2 Αξιολόγηση Μεθόδων

Κάθε μέθοδος αποτύπωσης ανέδειξε διακριτά πλεονεκτήματα και περιορισμούς σε σχέση με τις απαιτήσεις τεκμηρίωσης του συγκεκριμένου μνημείου. Η επίγεια σάρωση laser (FARO Focus TLS) επιβεβαίωσε την αναμενόμενη μετρική της αξιοπιστία ($\pm 2 \text{ mm @ } 10 \text{ m}$), παρέχοντας το πυκνότερο και γεωμετρικά συνεπέστερο νέφος για τις κατακόρυφες επιφάνειες του μνημείου, και για τον λόγο αυτό υιοθετήθηκε ως σύστημα αναφοράς για όλες τις συγκρίσεις. Ο κύριος περιορισμός της εντοπίστηκε στις θολωτές κατασκευές, όπου η γωνία σάρωσης από το έδαφος ($< 20^\circ$) δημιουργεί αραιή κάλυψη, περιορισμός που είχε επισημανθεί ήδη από τον Δανάκη (2016) για το ίδιο μνημείο.

Η εναέρια φωτογραμμετρία (DJI Mini 3 Pro) παρήγαγε το πυκνότερο συνολικά νέφος ($\sim 296,8 \times 10^6$ σημεία) και κάλυψε αποκλειστικά τις οριζόντιες επιφάνειες θόλων και στέγης που παραμένουν εκτός εμβέλειας τόσο του TLS όσο και του SLAM, αποδεικνύοντας την αναντικατάστατη συμβολή της εναέριας αποτύπωσης σε μνημεία με σύνθετη ανώτερη γεωμετρία. Η επίγεια φωτογραμμετρία (Sony A6000) συνέβαλε με την υψηλότερη ανάλυση υφής στις κατακόρυφες επιφάνειες και αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, στοιχείο ιδιαίτερης αξίας για την τεκμηρίωση της κτητορικής επιγραφής και της διακοσμητικής τοιχοποιίας.

Το σύστημα SLAM (Xgrids K1) απέδωσε νέφος $\sim 76,3 \times 10^6$ σημείων με μέση C2C απόσταση 1,35 cm έναντι TLS, επιβεβαιώνοντας ότι η μέθοδος επιτυγχάνει ακρίβεια εκατοστού σε εξωτερικό περιβάλλον, εντός των ορίων που αναφέρει η βιβλιογραφία για ανάλογα συστήματα (Sammartano & Spanò, 2018· Conti et al., 2024). Η κύρια αδυναμία του εντοπίστηκε στο εσωτερικό drift, το οποίο εισάγει τοπικές παραμορφώσεις μη διορθώσιμες με ενιαίο άκαμπτο μετασχηματισμό, και στην απουσία υψηλής ανάλυσης χρωματικής πληροφορίας λόγω της fisheye κάμερας του συστήματος.

7.2.3 Μεθοδολογία Εγγραφής

Ένα από τα σημαντικότερα μεθοδολογικά ευρήματα της εργασίας αφορά τη διαπίστωση ότι ο αλγόριθμος ICP, παρά την καθιερωμένη χρήση και την τεκμηριωμένη αποτελεσματικότητά του σε αντίστοιχες εφαρμογές εγγραφής νεφών σημείων (Besl & McKay, 1992), δεν απέδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης. Οι δοκιμές ICP με επικάλυψη 70%, 85% και 90% απέδωσαν RMS μεταξύ 0,111 και 0,177 m, δηλαδή 7 έως 20 φορές υψηλότερο από τη χειροκίνητη εγγραφή, τιμές που υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια ακρίβειας για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Η απόκλιση αυτή δεν αναιρεί τη

γενική καταλληλότητα της μεθόδου, αλλά αποδίδεται σε τρεις αλληλένδετες αιτίες, ιδιαίτερες στη φύση και τη σύνθεση των υπό σύγκριση νεφών της παρούσας μελέτης: πρώτον, τη σημαντική ανομοιογένεια πυκνότητας μεταξύ των νεφών (TLS ~163,7M, SLAM ~76,3M, Φωτογραμμετρία ~296,8M σημεία), η οποία παραβιάζει την υπόθεση ομοιόμορφης κατανομής που προϋποθέτει ο ICP, δεύτερον το εσωτερικό drift του SLAM νέφους, που εισάγει τοπικές παραμορφώσεις μη διορθώσιμες με ενιαίο άκαμπτο μετασχηματισμό (Sammartano & Spanò, 2018) και τρίτον, τη θεμελιώδη ασυμμετρία γεωμετρικής κάλυψης μεταξύ των συστημάτων, ιδίως την εκτεταμένη αναπαράσταση οριζόντιων επιφανειών από το drone που δεν αντιστοιχεί σε σημεία του TLS, παρασύροντας τον αλγόριθμο εκτός σύγκλισης (Cheng et al., 2018). Οι παράγοντες αυτοί καταδεικνύουν ότι η επιτυχής εφαρμογή του ICP εξαρτάται κρίσιμα από τη συμβατότητα των εισόδων δεδομένων, και ότι υπό συνθήκες έντονης ετερογένειας πηγών, όπως αυτές της παρούσας πολυαισθητηριακής προσέγγισης, απαιτείται προηγούμενη χειροκίνητη ή ημι-αυτόματη ευθυγράμμιση πριν την εφαρμογή του.

Αντίθετα, η χειροκίνητη εγγραφή βάσει 10–12 ζευγών αντίστοιχων αρχιτεκτονικών σημείων σε συνδυασμό με ICP ως βήμα λεπτής βελτιστοποίησης επέτυχε RMS 8,8–14,8 mm, επιβεβαιώνοντας ότι η ανθρώπινη εποπτεία στην επιλογή σημείων αντιστοίχισης παραμένει κρίσιμη όταν τα προς εγγραφή νέφη προέρχονται από αισθητήρες διαφορετικής φύσης, πυκνότητας και γεωμετρικής κάλυψης. Το εύρημα αυτό έχει άμεσες μεθοδολογικές προεκτάσεις για ανάλογες πολυ-αισθητηριακές αποτυπώσεις μνημείων: η αυτοματοποιημένη εγγραφή με ICP δεν μπορεί να θεωρείται δεδομένη όταν συνδυάζονται νέφη TLS, SLAM και φωτογραμμετρίας, και η χειροκίνητη επιλογή σημείων αντιστοίχισης αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για αξιόπιστα αποτελέσματα.

7.2.4 Συμπληρωματικότητα Μεθόδων

Τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν εμπράκτως το θεωρητικό επιχείρημα που διατρέχει τη βιβλιογραφία πολυ-αισθητηριακής τεκμηρίωσης: καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν επαρκεί για την ολοκληρωμένη αποτύπωση ενός σύνθετου ιστορικού μνημείου (Remondino, 2011· Adamopoulos & Rinaudo, 2021). Στην περίπτωση του Αλατζά Ιμαρέτ, η συμπληρωματικότητα των τεσσάρων μεθόδων εκδηλώθηκε σε τρία επίπεδα.

Σε επίπεδο γεωμετρικής κάλυψης, το TLS κάλυψε με υψηλή ακρίβεια τις κατακόρυφες επιφάνειες του προσβάσιμου εξωτερικού, ενώ η εναέρια φωτογραμμετρία κάλυψε

αποκλειστικά τις θολωτές κατασκευές και τη στέγη, περιοχές που παρέμεναν εκτός εμβέλειας του TLS από το έδαφος, επαναλαμβάνοντας και υπερβαίνοντας τον περιορισμό που είχε αντιμετωπίσει ο Δανάκης (2016) στην προηγούμενη αποτύπωση του μνημείου. Σε επίπεδο ταχύτητας και ευελιξίας, το SLAM απέδωσε πλήρη περιμετρική κάλυψη σε 30 λεπτά, χρόνος που αντιστοιχεί σε κλάσμα της συνολικής διάρκειας της TLS αποτύπωσης, αναδεικνύοντας τη χρησιμότητά του για ταχεία αναγνώριση ή προκαταρκτική τεκμηρίωση. Σε επίπεδο χρωματικής πληροφορίας, η επίγεια φωτογραμμετρία με τη Sony A6000 παρήγαγε την υψηλότερη ανάλυση υφής στις κατακόρυφες επιφάνειες, συμπληρώνοντας την HDR χρωματοδότηση του TLS και την εναέρια χρωματική πληροφορία του drone.

Συνολικά, η τετρα-μεθοδική προσέγγιση παρήγαγε ένα ενοποιημένο σύνολο δεδομένων που υπερβαίνει σε πληρότητα και αξιοπιστία οποιαδήποτε μεμονωμένη μέθοδο, και αποτελεί πρότυπο για μελλοντικές αποτυπώσεις μνημείων ανάλογης γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

7.3 Περιορισμοί

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τέσσερις κύριους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Πρώτον, η αποτύπωση πραγματοποιήθηκε σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων, χωρίς γεωδαιτική σύνδεση με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87). Το γεγονός αυτό περιορίζει την πιθανή σύνδεση των δεδομένων αυτών του μνημείου με τη χωρική του σύνδεση με άλλα γεωχωρικά σύνολα δεδομένων (π.χ. κτηματολογικά υπόβαθρα, χαρτογραφικές βάσεις), καθώς και την πιθανή σύγκριση με μελλοντικές αποτυπώσεις (που πιθανά θα υλοποιηθούν σε άλλα αυθαίρετα συστήματα αναφοράς) στο πλαίσιο παρακολούθησης φθοράς (monitoring). Η αξιολόγηση της ακρίβειας που πραγματοποιήθηκε είναι, ως εκ τούτου, σχετική, βασισμένη στη διαμεθοδική σύγκριση των νεφών σημείων, και όχι απόλυτη ως προς ένα υφιστάμενο ανεξάρτητο γεωδαιτικό δίκτυο υλοποιημένο στο χώρο του μνημείου.

Δεύτερον, η αποτύπωση SLAM πραγματοποιήθηκε σε αστικό περιβάλλον με διερχόμενα οχήματα και πεζούς, των οποίων η παρουσία εισήγαγε δυναμικά αντικείμενα στο νέφος σημείων. Αν και τα σημεία αυτά εντοπίζονται στους χρωματικούς χάρτες ως τοπικές αποκλίσεις, δεν αφαιρέθηκαν συστηματικά κατά την επεξεργασία, προκειμένου να

αποφευχθεί ο κίνδυνος απώλειας έγκυρης μετρητικής πληροφορίας, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν οριακά τη στατιστική της C2C ανάλυσης.

Τρίτον, η χειροκίνητη εγγραφή βάσει αρχιτεκτονικών σημείων, αν και απέδωσε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα έναντι του ICP, εισάγει βαθμό υποκειμενικότητας στην επιλογή των ζευγών σημείων αντιστοίχισης. Διαφορετικός χειριστής ή διαφορετική επιλογή σημείων θα μπορούσε να αποδώσει ελαφρώς διαφορετικές τιμές RMS, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλει τα ποιοτικά συμπεράσματα.

Τέταρτον, η ανακατασκευή επιφάνειας (mesh) παρέμεινε σε πειραματικό στάδιο λόγω της υπολογιστικής απαίτησης του ενοποιημένου νέφους (~235M σημεία) και των κενών στις μεταβατικές ζώνες μεταξύ αισθητήρων. Η παραγωγή πλήρους και αξιόπιστου mesh αποτελεί ανοιχτό ζήτημα για μελλοντική εργασία.

7.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Τα ευρήματα και οι περιορισμοί της εργασίας υποδεικνύουν τέσσερις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή.

Η άμεση προτεραιότητα είναι η γεωδαιτική σύνδεση της αποτύπωσης με το ΕΓΣΑ '87 μέσω GNSS ή Total Station, ώστε το ενοποιημένο νέφος σημείων να αποκτήσει γεωγραφικές συντεταγμένες. Αυτό θα επιτρέψει την ενσωμάτωσή του σε GIS περιβάλλοντα, τη σύγκριση με μελλοντικές αποτυπώσεις για ποσοτική παρακολούθηση της φθοράς και την αξιοποίησή του από την αρμόδια Εφορεία Αρχαιοτήτων.

Δεύτερον, η συστηματική αποτύπωση του εσωτερικού του μνημείου, συμπεριλαμβανομένων των τοιχογραφιών, των muqarnas και της κόγχης mihrab που παραμένει αδιεξερεύνητη. Λόγω της πολυπλοκότητας των εσωτερικών επιφανειών και των περιορισμών πρόσβασης, ο συνδυασμός TLS και SLAM θα αποτελούσε την πλέον κατάλληλη μεθοδολογία, ενδεχομένως συνδυασμένος με φωτογραμμετρία κοντινής λήψης για την τεκμηρίωση της διακοσμητικής λεπτομέρειας.

Τρίτον, κατόπιν της εργασίας αυτής όπου τελικά επιλέχθηκε να γίνει η χρήση χειροκίνητης ενοποίησης των νεφών, αναδεικνύουν την ανάγκη διερεύνησης άλλης αυτόματης ενοποίησης νεφών μέσω εναλλακτικών αλγορίθμων εγγραφής για ετερογενή νέφη όπως ο Normal



Distributions Transform (NDT) ή προσεγγίσεις Deep Learning, που ενδέχεται να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικότερα την ανομοιογένεια πυκνότητας και τον SLAM drift.

Τέλος, το ενοποιημένο νέφος σημείων αποτελεί ιδανική βάση για την ανάπτυξη μοντέλου Heritage Building Information (HBIM), το οποίο θα οργάνωνε τη γεωμετρική πληροφορία μαζί με σημασιολογικά δεδομένα συντήρησης και ιστορικής τεκμηρίωσης, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό εργαλείο για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση και ανάδειξη του μνημείου.

Βιβλιογραφία

- Adamopoulos, E., & Rinaudo, F. (2021). Close-range sensing and data fusion for built heritage inspection and monitoring. *Remote Sensing*, 13(19), Article 3936. <https://doi.org/10.3390/rs13193936>
- Agisoft LLC. (2025). Metashape Professional (Version 2.3.1) [Computer software]. <https://www.agisoft.com/>
- Antonakaki, T. (2007). Lighting and spatial structure in religious architecture: Byzantine church and Ottoman mosque in Thessaloniki. *Proceedings 6th International Space Syntax Symposium (Paper 057)*. ITU Faculty of Architecture.
- Aricò, M., et al. (2023). Mobile mapping for cultural heritage: St. John of the Hermits, Palermo. *ISPRS Archives*, XLVIII-1/W1-2023, 25–32. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-25-2023>
- Babinger, F. (1992). *Mehmed the Conqueror and his time* (R. Manheim, Trans.). Princeton University Press.
- Bailey, G., et al. (2022). Comparison of ground point filtering algorithms. *Remote Sensing*, 14(19), Article 4776. <https://doi.org/10.3390/rs14194776>
- Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 108–117.
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Bojakowski, P. T., et al. (2025). TLS and UAV photogrammetry in documentation of historic ships. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 37, e00423. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00423>
- Bonora, V., & Colapietro, M. (2026). Performance assessment of portable SLAM-based systems for 3D documentation of historic built heritage. *Sensors*, 26(2), 657. <https://doi.org/10.3390/s26020657>

- Boykov, G. (2016). The T-shaped zaviye/imarets of Edirne. *Journal of the Ottoman and Turkish Studies Association*, 3(1), 29–48. <https://doi.org/10.2979/jottturstuass.3.1.04>
- Brouskari, E. (Ed.). (2008). *Ottoman architecture in Greece*. Hellenic Ministry of Culture.
- Cadena, C., et al. (2016). Past, present, and future of SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309–1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>
- Çağaptay, S. (2011). The road from Bithynia to Thrakia: Gazi Evrenos' imaret in Komotini. *Byzantinische Forschungen*, 30, 429–442.
- Chen, Y., & Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3), 145–155. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(92\)90066-C](https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C)
- Cheng, L., et al. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 18(5), Article 1641. <https://doi.org/10.3390/s18051641>
- Chrbolková, A., et al. (2025). A comparative study of indoor accuracies between SLAM and static scanners. *Applied Sciences*, 15(14), Article 8053. <https://doi.org/10.3390/app15148053>
- Conti, A., et al. (2024). A comparison between TLS and hand-held mobile mapping for built heritage documentation. *ISPRS Archives*, XLVIII-2/W4-2024, 141–147. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-141-2024>
- Cristian, G., et al. (2026). Surveying techniques for built heritage conservation. *Sustainability*, 18(9), Article 4237. <https://doi.org/10.3390/su18094237>
- Δανάκης, Δ. (2016). Τρισδιάστατη αποτύπωση στο Αλατζά Ιμαρέτ Θεσσαλονίκης με Laser Scanner [Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΑΠΘ]. IKEE. <http://ikee.lib.auth.gr/record/286754>
- Del Duca, G., & Machado, C. (2023). Assessing the quality of the Leica BLK2GO vs Focus 3D S120. *Heritage*, 6(2), 1007–1027. <https://doi.org/10.3390/heritage6020057>
- Diaz Mendoza, M. A., et al. (2023). Technologies for the preservation of cultural heritage. *Sustainability*, 15(2), Article 1059. <https://doi.org/10.3390/su15021059>
- Di Stefano, F., et al. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387–2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>

Δημητριάδης, Β. (1983). Τοπογραφία της Θεσσαλονίκης κατά την εποχή της τουρκοκρατίας, 1430–1912. Εταιρεία Μακεδονικών Σπουδών.

Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(2), 99–110.

Ergin, N., Neumann, C. K., & Singer, A. (Eds.). (2007). Feeding people, feeding power: Imarets in the Ottoman Empire. Eren Yayıncılık.

Eyice, S. (1963). İlk Osmanlı devrinin dinî-içtimaî bir müessesesi: Zâviyeler ve zâviyeli câmiler. İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Mecmuası, 23(1–2), 3–80.

Eyice, S. (1989). Alaca İmaret Camii. TDV İslâm Ansiklopedisi, 2, 313.
<https://islamansiklopedisi.org.tr/alaca-imaret-camii>

Furukawa, Y., & Hernández, C. (2015). Multi-view stereo: A tutorial. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 9(1–2), 1–148.
<https://doi.org/10.1561/06000000052>

Girardeau-Montaut, D. (2024). CloudCompare (Version 2.13.2) [Computer software].
<https://www.cloudcompare.org>

Goodwin, G. (1971). A history of Ottoman architecture. Thames & Hudson.

Grenzdörffer, G. J., et al. (2015). Symbiosis of UAS photogrammetry and TLS for 3D modeling of cultural heritage monuments. ISPRS Archives, XL-1/W4, 91–96.

Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). Multiple view geometry in computer vision (2nd ed.). Cambridge University Press.

Iliodromitis, A., et al. (2025). 3D digital geospatial documentation for cultural heritage: Dion archaeological park. Land, 14(5), Article 1062. <https://doi.org/10.3390/land14051062>

İshak Paşa. (2000). TDV İslâm Ansiklopedisi, 22, 537–538.
<https://islamansiklopedisi.org.tr/ishak-pasa>

Jo, Y. H., & Hong, S. (2019). 3D digital documentation of cultural heritage site based on TLS and UAV photogrammetry. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(2), Article 53. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020053>

Kafescioglu, Ç. (2021). Lives and afterlives of an urban institution: The early Ottoman ‘imāret as mosque. In *Historicizing Sunni Islam in the Ottoman Empire* (pp. 255–307). Brill. https://doi.org/10.1163/9789004440296_009

Kaimaris, D., et al. (2018). Locating and mapping traces of the covered ancient theater of Amphipolis. *Heritage*, 1(2), 306–319. <https://doi.org/10.3390/heritage1020020>

Kaplan Çinçin, S., et al. (2016). Ottoman monumental buildings in Thessaloniki. *JOEEP*, 1(1), 73–84.

Karakaya, E., & Çobanoğlu, A. V. (2000). İshak Paşa Külliyesi. *TDV İslâm Ansiklopedisi*, 22, 541–542. <https://islamansiklopedisi.org.tr/ishak-pasa-kulliyesi>

Karagianni, A. (2021). TLS and satellite data in cultural heritage building documentation. *ISPRS Archives*, XLVI-M-1-2021, 361–366. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-361-2021>

Karolos, I.-A., et al. (2025). 3D documentation and 2D drafting of a post-Byzantine monument using LiDAR. In *Transforming Heritage Research* (pp. 103–110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06389-2_10

Kaya, H. (2020). Bayezid sancakbeyi İshak Paşa üzerine bir araştırma. *e-Şarkiyat*, 12(1), 21–35. <https://doi.org/10.26791/sarkiat.688521>

Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 61–70.

Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened Poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(3), Article 29. <https://doi.org/10.1145/2487228.2487237>

Keitaanniemi, A., et al. (2021). The combined use of SLAM laser scanning and TLS for 3D indoor mapping. *Buildings*, 11(9), Article 386. <https://doi.org/10.3390/buildings11090386>

Kiel, M. (1970). Notes on the history of some Turkish monuments in Thessaloniki and their founders. *Balkan Studies*, 11(1), 123–156.

Kiel, M. (1990). *Studies on the Ottoman architecture of the Balkans*. Variorum.

Kolovos, E., Pallis, G., & Poulos, P. C. (Eds.). (2023). *Ottoman monuments in Greece: Heritages under negotiation*. Kapon Editions.



- Kompoti, A., et al. (2023). 3D laser scanning and UAVs in cultural heritage: Old Navarino castle in Pylos. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 52, Article 104223. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104223>
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans* (2nd ed.). De Gruyter.
- Kuran, A. (1968). *The mosque in early Ottoman architecture*. University of Chicago Press.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with TLS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lehtola, V. V., et al. (2017). Comparison of state-of-the-art 3D indoor scanning methods. *Remote Sensing*, 9(8), Article 796. <https://doi.org/10.3390/rs9080796>
- Li, F., et al. (2025). 3D digital technologies in historic gardens and cultural heritage: A scoping review. *Heritage*, 8(2), Article 46. <https://doi.org/10.3390/heritage8020046>
- Liang, H., et al. (2018). Integration of TLS and UAV photogrammetry for Chinese classical gardens. *Journal of Cultural Heritage*, 33, 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.004>
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5), 307–324. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004>
- Lichti, D. D. (2010). Terrestrial laser scanner self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.08.005>
- Liu, J., Willkens, D., & Gentry, R. (2025). Developing a practice-based guide to TLS for heritage documentation. *Heritage*, 8(8), Article 313. <https://doi.org/10.3390/heritage8080313>
- López, F. J., et al. (2018). A review of heritage building information modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), Article 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>

- Loukma, M., & Stefanidou, M. (2017). The morphology and typology of Ottoman mosques of northern Greece. *International Journal of Heritage Architecture*, 1(1), 78–88. <https://doi.org/10.2495/HA-V1-N1-78-88>
- Loukma, M., & Stefanidou, M. (2018). Causes of deterioration of Ottoman mosques. In *Islamic heritage architecture and art II (WIT Transactions on the Built Environment, Vol. 177, pp. 173–180)*. WIT Press. <https://doi.org/10.2495/IHA180141>
- Lovell, L. J., et al. (2023). The application of HBIM to cultural heritage: A review. *Heritage*, 6(10), 6691–6717. <https://doi.org/10.3390/heritage6100350>
- Lowry, H. W. (2008). *The shaping of the Ottoman Balkans, 1350–1550*. Bahçeşehir University Press.
- Lowry, H. W. (2010). Portrait of a city: Population and topography of Ottoman Selânik in 1478. In *Studies in defterology (pp. 65–100)*. Gorgias Press. <https://doi.org/10.31826/9781463231828-005>
- Lowry, H. W. (2023). *Ottoman Selânik: Then and now*. Bahçeşehir University Press.
- Luhmann, T., Chizhova, M., & Gorkovchuk, D. (2020). Fusion of UAV and terrestrial photogrammetry with laser scanning for historic churches in Georgia. *Drones*, 4(3), Article 53. <https://doi.org/10.3390/drones4030053>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2023). *Close-range photogrammetry and 3D imaging (4th ed.)*. De Gruyter.
- Małyszczek, H. A., Stachula, S., & Kępowicz, B. (2023). Using photogrammetric systems and laser scanning for 3D modeling of cultural heritage. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(6), 345–357. <https://doi.org/10.12913/22998624/174063>
- Mazower, M. (2005). *Salonica, city of ghosts: Christians, Muslims, and Jews, 1430–1950*. Alfred A. Knopf.
- Mohammadi, M., et al. (2021). Quality evaluation of digital twins based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sensing*, 13(17), Article 3499. <https://doi.org/10.3390/rs13173499>



- Moon, S. H., Nam, O., & Choi, Y. S. (2023). Accuracy comparison of mobile handheld and backpack laser scanners for indoor 3D mapping. *Journal of the Korean Society of Surveying*, 41(6), 529–536. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2023.41.6.529>
- Moyano, J., et al. (2020). Validation of close-range photogrammetry for architectural and archaeological heritage. *Remote Sensing*, 12(21), Article 3571. <https://doi.org/10.3390/rs12213571>
- Mulahusić, A., et al. (2022). Simultaneous use of TLS and photogrammetry for documentation of heritage monuments. In *Advanced technologies, systems, and applications VI* (pp. 502–513). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90055-7_39
- Oudatzi, K. (2010). Virtual reality in restoration of historic buildings: 3D model of Alaca Imaret. In *2010 16th International Conference on Virtual Systems and Multimedia* (pp. 361–364). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VSM.2010.5665931>
- Pepe, M., Alfio, V. S., & Costantino, D. (2022). UAV platforms and the SfM-MVS approach in 3D surveys: A review in cultural heritage. *Applied Sciences*, 12(24), Article 12886. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Perdikopoulou, M. (2025). The Alaca Imaret of Thessaloniki. In M. A. Rossi & A. I. Sullivan (Eds.), *Mapping Eastern Europe: North of Byzantium*. <https://mappingeasterneurope.princeton.edu/item/the-alaca-imaret-of-thessaloniki.html>
- Περδικοπούλου, Μ. Σ. (2022). Το Αλατζά Ιμαρέτ της Θεσσαλονίκης και ο θεσμός των Ιμαρέτ στα Βαλκάνια. Εκδόσεις Μπαρμπουνάκη.
- Puniach, E., & Widuch, K. (2019). Comparative analysis of 3D archaeological documentation utilizing TLS, handheld scanning and photogrammetry. In *Topical issues of rational use of natural resources 2019* (Vol. 1, pp. 253–258). CRC Press.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>

- Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>
- Reshetyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning [Doctoral dissertation, KTH Stockholm]. DiVA Portal.
- Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *Proceedings 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling* (pp. 145–152). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423>
- Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping: Accuracy and geometric content validation. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–339. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7>
- Sánchez-Aparicio, L. J., et al. (2023). Detection of damage in heritage constructions based on 3D point clouds. *Journal of Building Engineering*, 77, Article 107440. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107440>
- Schönberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings CVPR 2016* (pp. 4104–4113). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing* (2nd ed.). CRC Press.
- Singer, A. (2002). *Constructing Ottoman beneficence: An imperial soup kitchen in Jerusalem*. SUNY Press.
- Singer, A. (2005). Serving up charity: The Ottoman public kitchen. *The Journal of Interdisciplinary History*, 35(3), 481–500. <https://doi.org/10.1162/0022195052564252>
- Soyluoğlu, M., et al. (2025). Digitizing challenging heritage sites with iPhone LiDAR and photogrammetry: Sourp Magar Monastery in Cyprus. *Geomatics*, 5(3), Article 44. <https://doi.org/10.3390/geomatics5030044>
- Stamnas, A., et al. (2021). Comparing 3D digital technologies for archaeological fieldwork: Thessaloniki Toumba excavation. *ISPRS Archives*, XLVI-M-1-2021, 713–720. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-713-2021>



Stavrides, T. (2001). The sultan of vezirs: The life and times of the Ottoman grand vezir Mahmud Pasha Angelović (1453–1474). Brill. <https://doi.org/10.1163/9789004492332>

Stefanidou, A. (Ed.). (2009). Η συντήρηση και η αποκατάσταση των οθωμανικών μνημείων στην Ελλάδα. AIMOS· University Studio Press.

Stylianidis, E., & Remondino, F. (Eds.). (2016). 3D recording, documentation and management of cultural heritage. Whittles Publishing.

Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). Probabilistic robotics. MIT Press.

Triggs, B., et al. (2000). Bundle adjustment — A modern synthesis. In Vision Algorithms: Theory and Practice (LNCS 1883, pp. 298–372). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21

Trybała, P., et al. (2023). Comparison of low-cost handheld LiDAR-based SLAM systems for mapping underground tunnels. ISPRS Archives, XLVIII-1/W1-2023, 517–524. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-517-2023>

Tsiachta, A., et al. (2024). Multi-sensor techniques for geometric documentation and 3D modeling of complex architectural monuments. Sensors, 24(9), Article 2671. <https://doi.org/10.3390/s24092671>

Tucci, G., et al. (2018). Examination of indoor mobile mapping systems in a diversified test field. Applied Sciences, 8(3), Article 401. <https://doi.org/10.3390/app8030401>

Ulvi, A. (2021). Documentation, 3D modelling and visualization of cultural heritage by UAV photogrammetry and TLS. International Journal of Remote Sensing, 42(6), 1994–2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1834164>

Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2022). Comparison of the WMLS with other point cloud data collection methods: Diokaisareia case study. Journal on Computing and Cultural Heritage, 15(4), Article 73. <https://doi.org/10.1145/3551644>

Vacalopoulos, A. E. (1972). A history of Thessaloniki (T. F. Carney, Trans.). Institute for Balkan Studies.

Varlık, N. (2014). Plague, conflict, and negotiation: The Jewish broadcloth weavers of Salonica. Jewish History, 28(3–4), 261–288. <https://doi.org/10.1007/s10835-014-9219-9>

Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Eds.). (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing.

Westoby, M. J., et al. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wilson, L., et al. (2018). 3D digital documentation for disaster management in historic buildings: Glasgow School of Art fire. *Journal of Cultural Heritage*, 31, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.012>

Wolper, E. S. (2020). Imaret. In *Encyclopaedia of Islam*, THREE. Brill. https://doi.org/10.1163/1573-3912_ei3_COM_32440

Xiao, W., et al. (2018). Geoinformatics for the conservation of cultural heritage in support of UN SDGs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 389–406. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.001>

Yakar, M., & Yılmaz, H. M. (2025). The use of TLS technology in the documentation of cultural heritage. *Cultural Heritage and Science*, 6(2), 138–148. <https://doi.org/10.58598/cuhs.1801497>

Yang, S., Xu, S., & Huang, W. (2022). 3D point cloud for cultural heritage: A scientometric survey. *Remote Sensing*, 14(21), Article 5542. <https://doi.org/10.3390/rs14215542>

Yang, X., et al. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 46, 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>

Yiğit, A. Y., et al. (2024). Comparative analysis of mobile laser scanning and TLS for indoor mapping. *Building Research & Information*, 52(4), 402–417. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2227900>

Yiğit, A. Y., Seyrek, E. C., Hamal, S. N. G., Ulvi, A., & Uysal, M. (2025). Assessing the effectiveness of UAV photogrammetry, terrestrial laser scanning and iPad LiDAR for complex cultural heritage sites documentation and web-based VR visualization. *Archaeological Prospection*. <https://doi.org/10.1002/arp.70020>

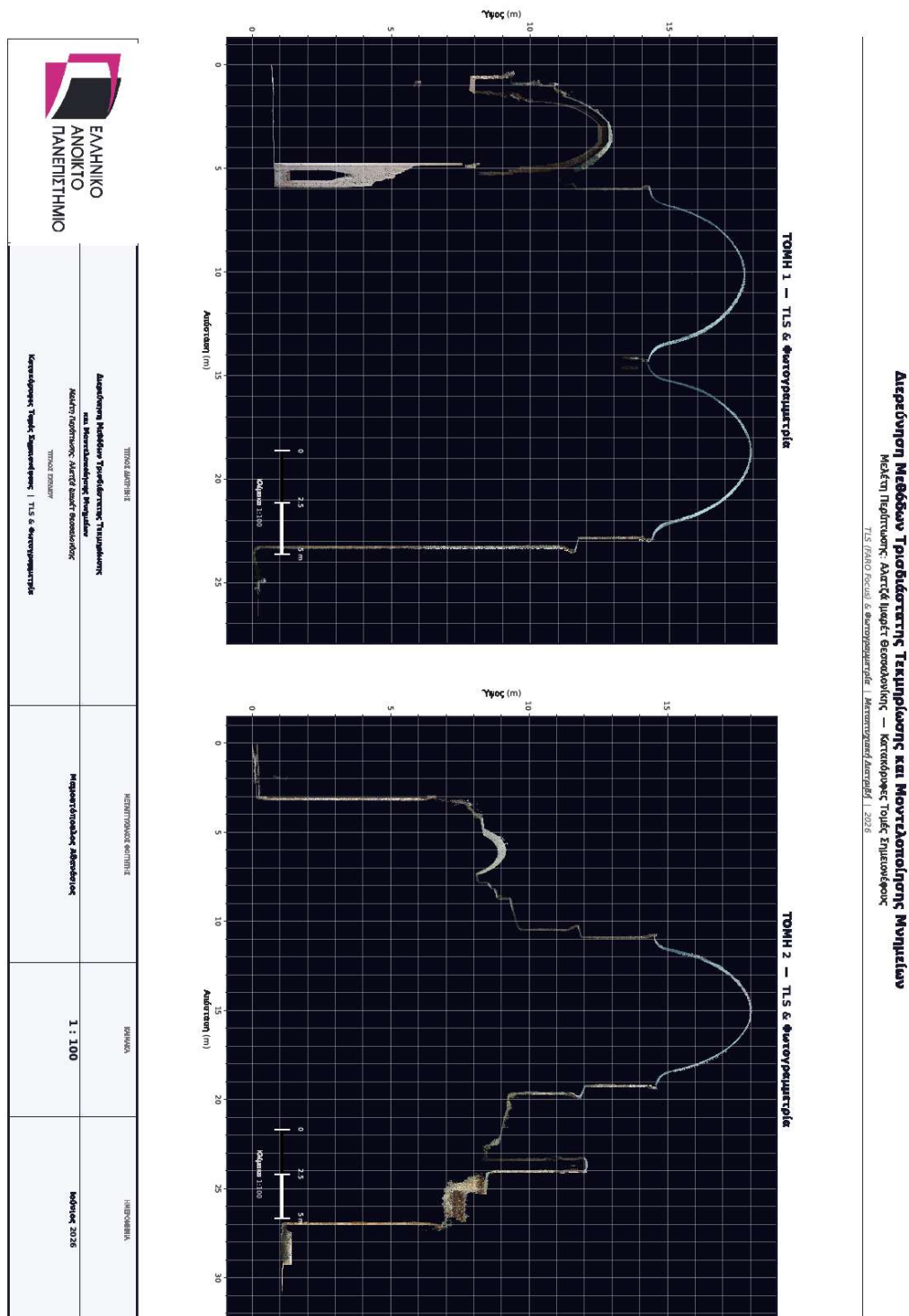


ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

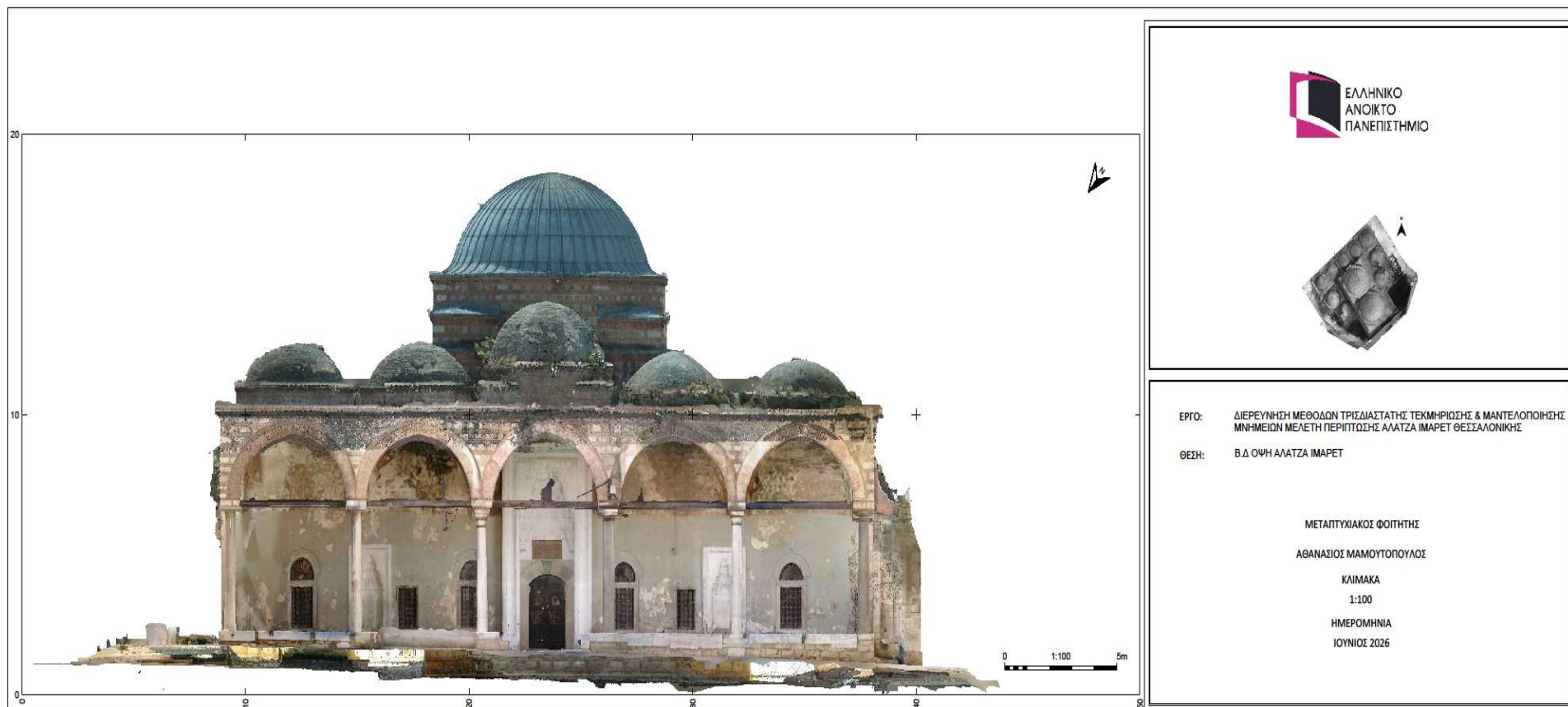
Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης

Zhang, J., & Singh, S. (2014). LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. In
Robotics: Science and Systems X. <https://doi.org/10.15607/RSS.2014.X.007>

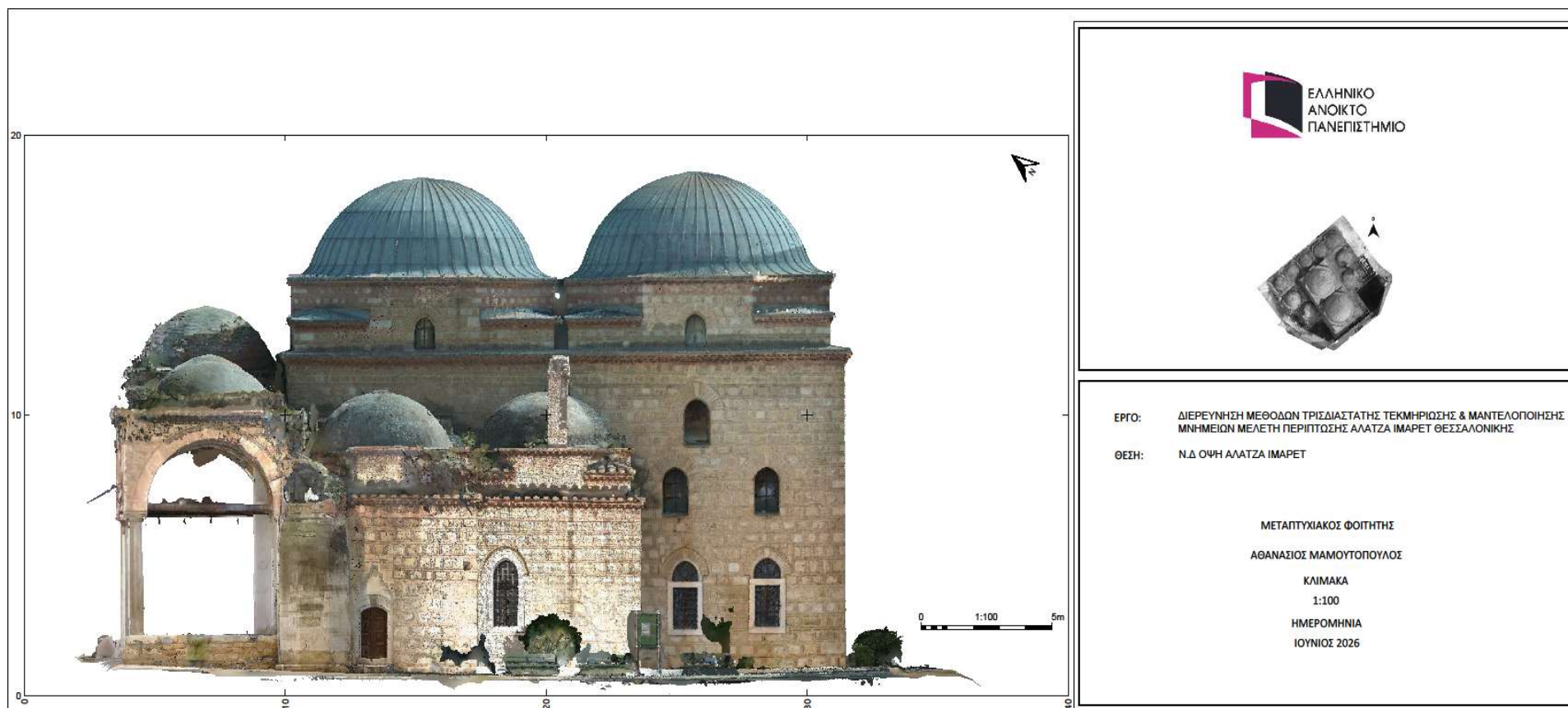
Παράρτημα Α: Παραγόμενα Προϊόντα



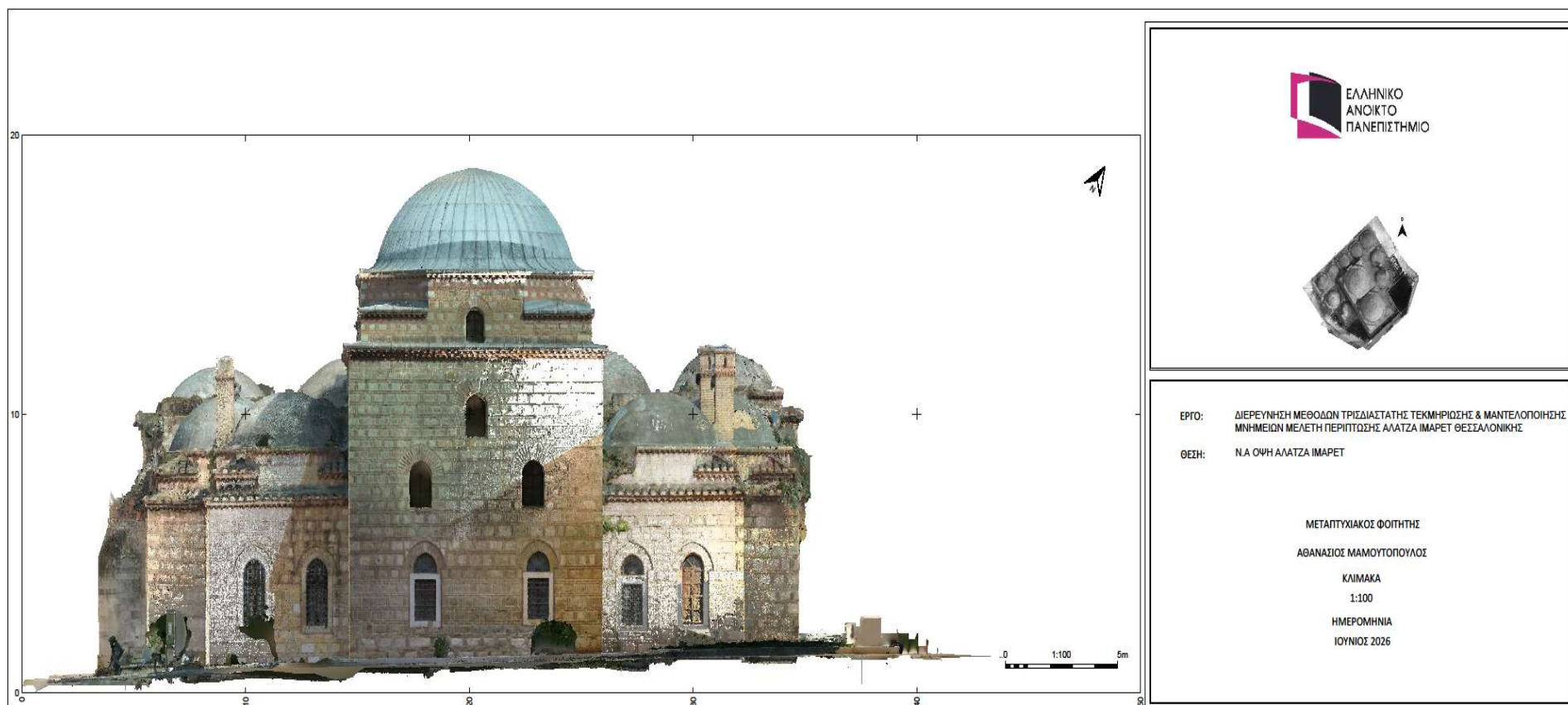
Εικόνα 23 Τομές μνημείου



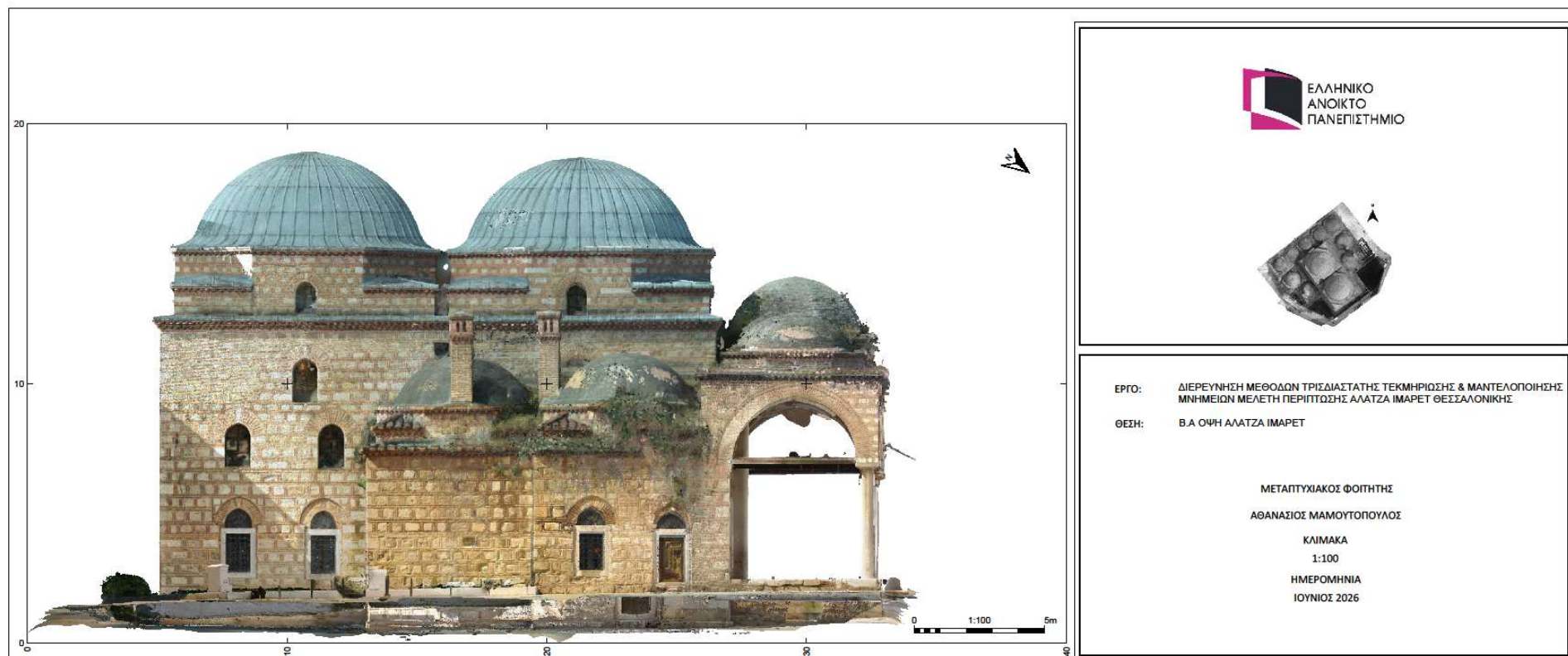
Εικόνα 24 ΒΔ Όψη μνημείου



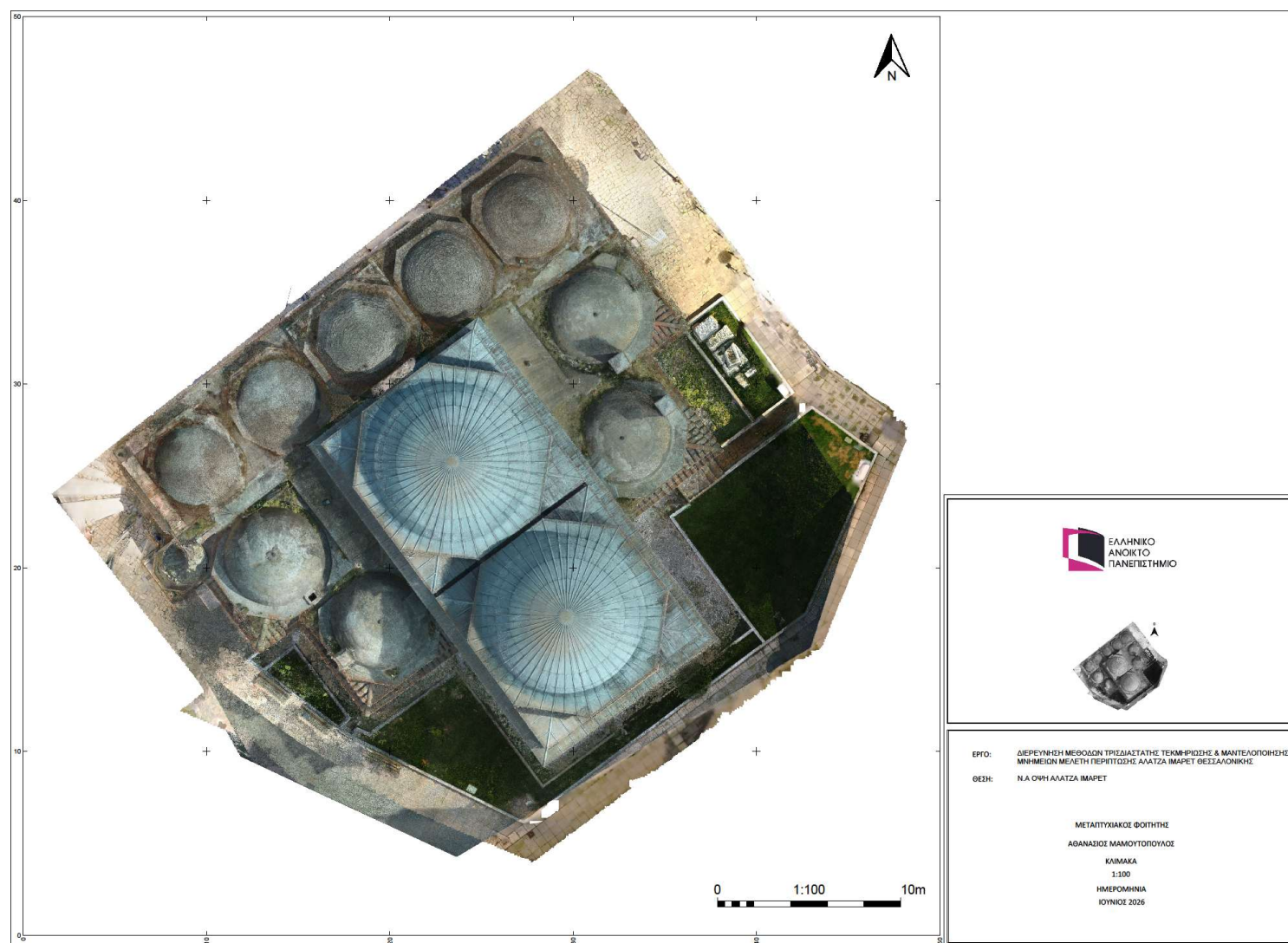
Εικόνα 25 ΝΑ Όψη μνημείου



Εικόνα 26 ΝΑ Όψη μνημείου



Εικόνα 27 ΒΑ Όψη μνημείου



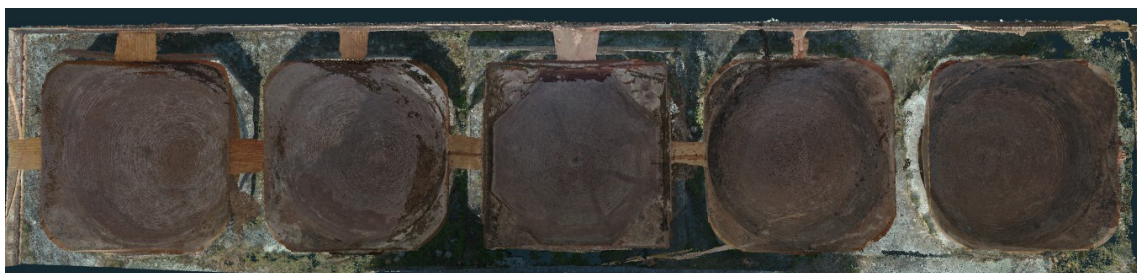
Εικόνα 28 Κάτοψη μνημείου



Εικόνα 29 Κάτοψη από 3D μοντέλο



Εικόνα 30 Σημεία ενδιαφέροντος όψης από 3D μοντέλο

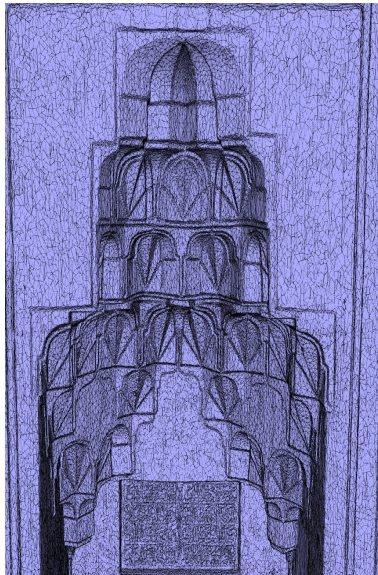
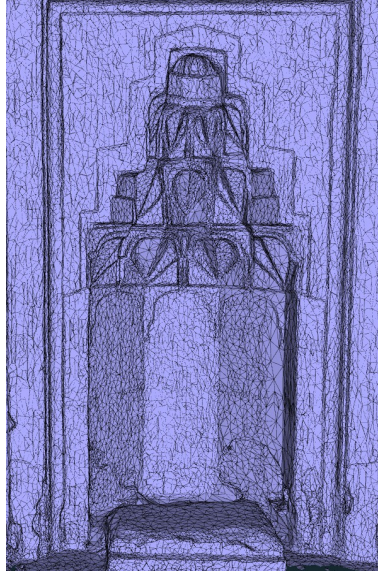


Εικόνα 31 Εσωτερική άποψη τρούλων προστώου από 3D μοντέλο



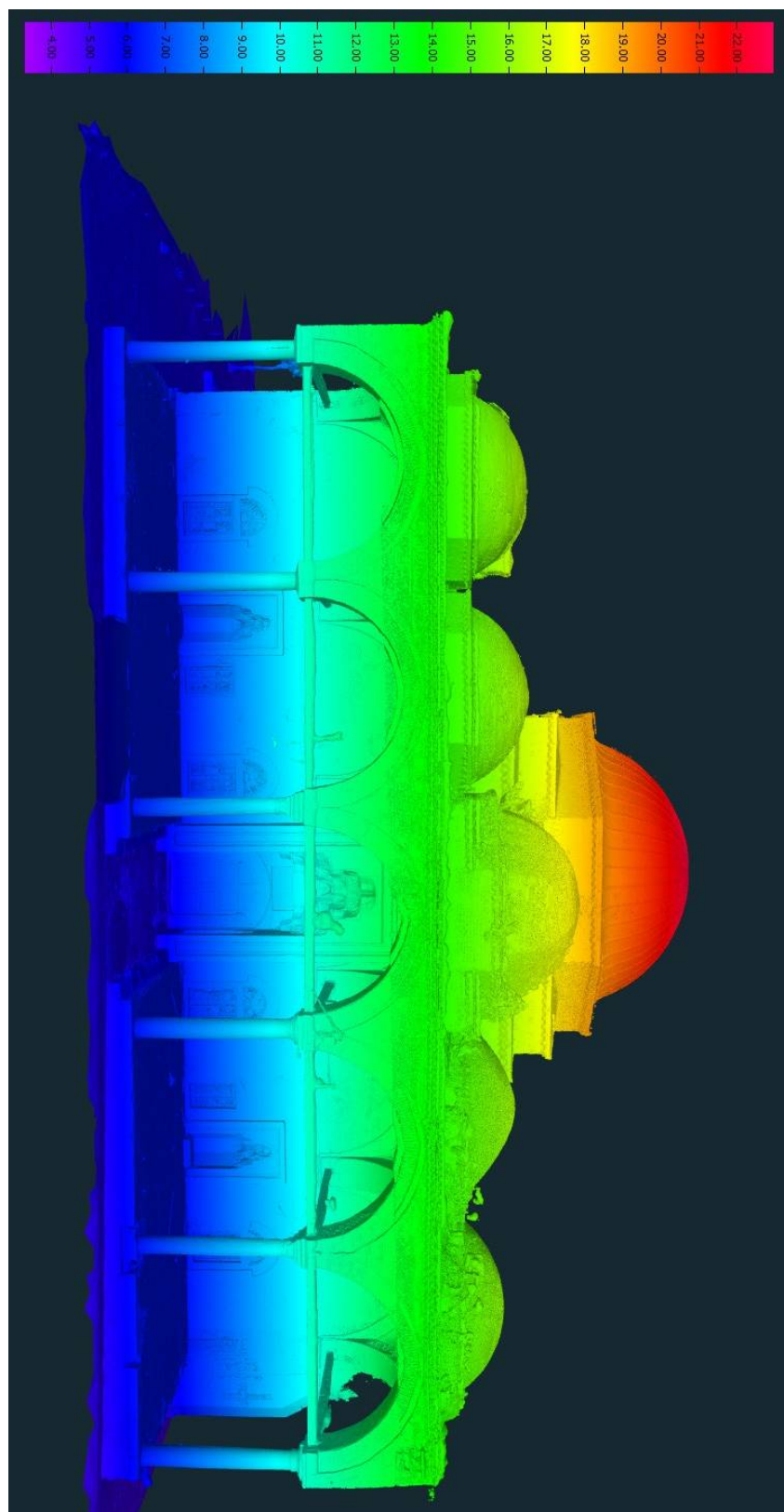
ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αθανάσιος Μαμουτόπουλος, Διερεύνηση Μεθόδων Τρισδιάστατης
Τεκμηρίωσης & Μοντελοποίησης Μνημείων. Μελέτη Περίπτωσης Αλατζά Ιμαρέτ
Θεσσαλονίκης





Πίνακας 13 Λεπτομέρεια αναπαράστασης επιφάνειας του μνημείου σε τρεις μορφές: νέφος σημείων (point cloud), τριγωνισμένο πλέγμα (mesh σε μορφή wireframe) και τελικό mesh



Εικόνα 32 Υψομετρική πληροφορία



Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.