ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

και Βιώσιμου Σχεδιασμού

ΠΜΣ Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

Διπλωματική Εργασία

«Συνδυαστική Αξιοποίηση Φωτογραμμετρίας και Δεδομένων από Φορητό Σαρωτή LIDAR (SLAM) για την Αποτύπωση και Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση Μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής: ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Αλεξανδρούπολη, 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.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«Συνδυαστική Αξιοποίηση Φωτογραμμετρίας και Δεδομένων από Φορητό Σαρωτή LIDAR (SLAM) για την Αποτύπωση και Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση Μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής/Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:	Συν-Επιβλέπων Καθηγητής/Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ	ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
«Ιδιότητα & Ίδρυμα Υπαγωγής»	«Ιδιότητα & Ίδρυμα Υπαγωγής»

Αλεξανδρούπολη, Ιούνιος 2026

«Ευχαριστίες»

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πρώτα από όλα, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη υπομονή, τη στήριξη και την κατανόηση που έδειξαν σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας. Η παρουσία τους αποτέλεσε σταθερό σημείο αναφοράς και πηγή δύναμης.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Λάζαρο Γραμματικόπουλο, για την καθοδήγηση, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξη που προσέφερε σε κάθε στάδιο της έρευνας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την επιστημονική ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αθανάσιο Γουρίδη, Διευθυντή Τεχνικών Υπηρεσιών του Δήμου Σουφλίου, για τις πολύτιμες ιστορικές πληροφορίες και το υλικό που μου παρείχε σχετικά με το μνημείο.

Τέλος, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον τοπογράφο μηχανικό Γεώργιο Τσιανάκα για τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό που διέθεσε, καθώς και για την εθελοντική και καθοριστική παρουσία του κατά την ημέρα των μετρήσεων. Η βοήθειά του υπήρξε ανεκτίμητη για την επιτυχή ολοκλήρωση του πεδίου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον συνδυασμό φωτογραμμετρίας και επίγειας σάρωσης με φορητό LIDAR (SLAM) για την αποτύπωση και τεκμηρίωση μνημείων, με εφαρμογή στον Ιερό Ναό Αγίου Νικολάου στην Παταγή Ορεστιάδας. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός αξιόπιστου υβριδικού νέφους σημείων, ικανού να υποστηρίξει τη δημιουργία ακριβών τρισδιάστατων μοντέλων και αρχιτεκτονικών σχεδίων, τα οποία είναι απαραίτητα για τη μελέτη και την αποκατάσταση του μνημείου.

Για το εξωτερικό του ναού χρησιμοποιήθηκαν επίγειες φωτογραφίες και λήψεις με UAV, ενώ για το εσωτερικό εφαρμόστηκε σάρωση με φορητό σύστημα SLAM, ώστε να καταγραφούν με ακρίβεια οι χώροι και οι γεωμετρικές ιδιαιτερότητες. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν σε εξειδικευμένα λογισμικά, όπου δημιουργήθηκαν πυκνά νέφη σημείων, έγινε η γεωαναφορά τους σε κοινό σύστημα συντεταγμένων και στη συνέχεια συγχωνεύτηκαν σε ένα ενιαίο υβριδικό νέφος. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των νεφών σημείων, ώστε να αξιολογηθεί η συμβατότητα των δύο τεχνολογιών.

Από το τελικό νέφος σημείων δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο υψηλής ακρίβειας, καθώς και ορθοφωτογραφίες, κατόψεις, όψεις και τομές. Τα παραγόμενα σχέδια αποδίδουν με λεπτομέρεια τη γεωμετρία και τη μορφολογία του μνημείου, ενώ η ενσωμάτωση της φωτογραφικής πληροφορίας βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της παθολογίας και των κατασκευαστικών στοιχείων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη προσέγγιση στη μελέτη του ναού, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης.

Συνολικά, η εργασία δείχνει ότι ο συνδυασμός φωτογραμμετρίας και επίγειας σάρωσης μέσω φορητού σαρωτή LIDAR (SLAM) μπορεί να προσφέρει ένα πλήρες και αξιόπιστο ψηφιακό υπόβαθρο για την τεκμηρίωση ιστορικών κατασκευών. Οι δύο μέθοδοι λειτουργούν συμπληρωματικά και δίνουν τη δυνατότητα για ακριβή αποτύπωση, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε μελέτες αποκατάστασης όσο και σε μελλοντικές εφαρμογές ψηφιακής τεκμηρίωσης.

Λέξεις – Κλειδιά

- Φωτογραμμετρία
- Σάρωση SLAM
- Υβριδικό Νέφος Σημείων
- Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση
- Ψηφιακή Αποτύπωση Μνημείων

«“Combined use of Photogrammetry and Handheld LiDAR Scanning for the Documentation and Architectural Recording of Monuments: The Case Study of the Church of Saint Nicholas in Patagi, Orestiada»

«Ioannis K. Kalafatzis»

Abstract

This thesis focuses on the combined use of photogrammetry and terrestrial scanning using mobile LIDAR (SLAM) for the documentation and recording of monuments, with the case study of the Church of Saint Nicholas in Patagi, Orestiada. The aim was to create a reliable hybrid point cloud capable of supporting the production of accurate three-dimensional models and architectural drawings, which are essential for the study and restoration of the monument.

For the exterior of the church, terrestrial photographs and UAV imagery were used, while the interior was recorded with a handheld SLAM system in order to accurately capture the spaces and their geometric characteristics. The datasets were processed in specialized software environments, where dense point clouds were generated, georeferenced within a common coordinate system, and subsequently merged into a unified hybrid cloud. As part of this workflow, a comparison of the point clouds was also carried out to assess the compatibility of the two recording techniques.

From the final point cloud, a high-accuracy three-dimensional model was produced, along with orthophotos, plans, elevations, and sections. These deliverables depict the geometry and morphology of the monument in detail, while the integration of photographic information enhances the understanding of its pathology and construction features. This process enables a more complete and well-documented approach to studying the church compared to conventional surveying methods.

Overall, the study demonstrates that the combination of photogrammetry and handheld LIDAR scanning can provide a comprehensive and reliable digital basis for the documentation of historical structures. The two methods complement each other and allow for precise recording, which can be used both in restoration studies and in future applications of digital documentation.

Keywords

- Photogrammetry
- SLAM Scanning
- Hybrid Point Cloud
- Architectural Documentation
- Cultural Heritage Recording

Περιεχόμενα

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή – Αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο της έρευνας. 1

1.1. Το αντικείμενο της έρευνας και το επιστημονικό πλαίσιο της ψηφιακής τεκμηρίωσης των μνημείων. 1

1.1.1. Η ψηφιακή τεκμηρίωση των μνημείων ως εργαλείο καταγραφής της πολιτιστικής κληρονομιάς. 1

1.1.2. Ο ρόλος της αρχιτεκτονικής αποτύπωσης στη μελέτη αποκατάστασης και τεκμηρίωσης των ιστορικών κατασκευών. 2

1.2. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και οι επιμέρους ερευνητικοί στόχοι. 3

1.2.1. Εισαγωγή στην έννοια του υβριδικού νέφους σημείων μέσω του συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών καταγραφής. 4

1.2.2. Η διαδικασία του μετασχηματισμού των 3D δεδομένων σε δισδιάστατα αρχιτεκτονικά σχέδια τεκμηρίωσης. 5

1.3. Η μεθοδολογική προσέγγιση και δομή της ερευνητικής διαδικασίας. 6

1.3.1. Στάδια της ερευνητικής διαδικασίας και ροής επεξεργασίας των δεδομένων. 6

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Ιστορική, Αρχιτεκτονική και Κατασκευαστική τεκμηρίωση του μνημείου. 9

2.1. Το ιστορικό πλαίσιο εξέλιξης του μνημείου. 9

2.1.1. Η χρονολόγηση και η ιστορική τοποθέτηση του μνημείου. 9

2.1.2. Οι οικοδομικές φάσεις και οι μεταγενέστερες επεμβάσεις στο μνημείο. 10

2.2. Αρχιτεκτονική τυπολογία και μορφολογική ανάλυση του μνημείου. 11

2.2.1. Η τυπολογία και η λειτουργική οργάνωση του ναού. 11

2.2.2. Μορφολογικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά. 13

2.2.3. Η μορφολογία της στέγης και το ανώτερο τμήμα επικάλυψης. 13

2.3. Κατασκευαστική τεχνολογία και δομικό σύστημα του μνημείου. 13

2.3.1. Το δομικό σύστημα του ναού. 13

2.3.2. Τα υλικά δόμησης και οι τεχνικές κατασκευής. 14

2.4. Παθολογία της κατασκευής και γεωμετρικές παραμορφώσεις 14

2.4.1. Οι ρηγματώσεις και οι δομικές ασυνέχειες στην κατασκευή. 14

2.4.2. Οι παραμορφώσεις και αποκλίσεις του κτίσματος. 14

2.4.3. Οι φθορές και οι αλλοιώσεις των δομικών υλικών. 15

2.5. Ανάδειξη της αναγκαιότητας για την γεωμετρικά ελεγχόμενη αποτύπωση του μνημείου. 15

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Το θεωρητικό υπόβαθρο και οι τεχνολογίες ψηφιακής τεκμηρίωσης των μνημείων. 16

3.1. Οι αρχές αρχιτεκτονικής αποτύπωσης των μνημείων. 16

3.1.1. Η θεώρηση της γεωμετρικής ακρίβειας ανάλογα με τη μέθοδο. 17

3.1.2. Θεωρητική προσέγγιση της ερμηνευτικής αποτύπωσης και η τεκμηρίωση της αρχιτεκτονικής μορφής. 19

3.2. Η επίγεια φωτογραμμετρία και η εναέρια φωτογραμμετρία. 21

3.2.1. Ανάλυση της θεωρίας Structure from Motion. 23

3.2.2. Μέθοδος βελτιστοποίησης την γεωμετρίας. 27

3.2.3. Θεωρητική ανάλυση για την παραγωγή πυκνού νέφους σημείων. 28

3.2.4. Οι θεωρητικές πηγές σφαλμάτων στη φωτογραμμετρική ανακατασκευή. 29

3.3. Επίγεια Σάρωση Laser (TLS) 30

3.3.1. Αρχές λειτουργίας των επίγειων σαρωτών Laser. 31

3.3.2. Η ενοποίηση των πολλαπλών θέσεων σάρωσης. 33

3.4. Φορητοί Σαρωτές LiDAR με Τεχνολογία SLAM. 34

3.4.1. Η Αρχή του SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). 34

3.4.2. Ο Ρόλος της IMU (Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης). 35

3.4.3. Loop Closure (Κλείσιμο Βρόχου). 35

3.4.4. Διαφορά από το TLS (Terrestrial Laser Scanning). 35

3.5. Η θεωρητική ακρίβεια των μετρήσεων και οι περιορισμοί της μεθόδου αυτής. 36

3.6. Επίγεια σάρωση laser του μνημείου 38

3.6.1. Χάραξη πορείας σάρωσης. 38

3.6.2. Επικαλύψεις σαρώσεων και γεωμετρική σύνδεση. 38

3.6.3. Ρυθμίσεις πυκνότητας σάρωσης και ανάλυσης δεδομένων. 39

3.7. Επίγεια φωτογραφική καταγραφή με φωτογραφική μηχανή DSLR 39

3.8. Θεωρητικές αρχές γεωδαιτικού ελέγχου στη φωτογραμμετρία. 40

3.8.1. Χωροθέτηση τοπικού γεωδαιτικού δικτύου στάσεων. 41

3.8.2. Η μέτρηση των φωτοσταθερών σημείων. 43

3.8.3. Ο υπολογισμός σφάλματος των στάσεων. 45

3.9. Σχεδιασμός και προγραμματισμός των διαδικασιών για την αποτύπωση του μνημείου. 46

3.9.1. Η συνδυαστική εφαρμογή της φωτογραμμετρίας με την επίγεια σάρωση Laser και τον γεωδαιτικό έλεγχο. 47

3.9.2. Επιλογή των θέσεων λήψης και σάρωσης για την ορθή γεωμετρική κάλυψη του μνημείου. 48

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Οι εργασίες πεδίου και η διαδικασία συλλογής τοπογραφικών δεδομένων. 50

4.1. Η χάραξη και η μέτρηση του γεωδαιτικού δικτύου. 50

1.1.1. Διάταξη και μέτρηση περιμετρικών στάσεων. 50

4.1.1. Υπολογισμός συντεταγμένων και έλεγχος σφαλμάτων του δικτύου 52

4.1.2. Η διαδικασία καταγραφής της στέγης και άλλων δυσπρόσιτων επιφανειών. 53

4.2. Φωτογραμμετρική συλλογή εικόνων. 55

4.2.1. Επιτόπια φωτογραφική τεκμηρίωση με φωτογραφική μηχανή DSLR. 56

4.2.2. Εναέρια φωτογραμμετρική αποτύπωση με drone. 56

4.2.1. Επικάλυψη των φωτογραφιών και οι γωνίες λήψης. 58

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Επεξεργασία δεδομένων και δημιουργία τρισδιάστατου υβριδικού μοντέλου. 60

5.1. Φωτογραμμετρική επεξεργασία στο λογισμικό Metashape της Agisoft. 60

5.1.1. Διαδικασία για την ευθυγράμμιση των φωτογραφιών και υπολογισμός των θέσεων των καμερών (Align Photos). 60

5.1.2. Βελτιστοποίηση φωτογραμμετρικού μοντέλου με τη μέθοδο Gradual Selection. 61

5.1.3. Εισαγωγή φωτοσταθερών σημείων και γεωαναφορά μοντέλου 63

5.1.4. Διαδικασία για την παραγωγή πυκνού νέφους σημείων (Dense Cloud). 63

5.2. Επεξεργασία δεδομένων επίγειας σάρωσης laser 64

5.2.1. Ευθυγράμμιση του σαρωτή laser με χρήση φωτοσταθερών. 64

5.3. Ενοποίηση φωτογραμμετρικών και σαρωτικών νεφών σημείων στο Metashape. 66

5.4. Παραγωγή τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου. 67

5.4.1. Ανακατασκευή επιφανειών και δημιουργία Tiled Model. 67

5.4.2. Παραγωγή ορθοφωτογραφιών (Orthophotos) 68

5.5. Έλεγχος γεωμετρικής συνέπειας και σφάλματος της διαδικασίας συγχώνευσης. .70

5.6. Ευθυγράμμιση και Σύγκριση Νεφών Σημείων στο Cloud Compare με τον Αλγόριθμο ICP: Μεθοδολογία, Αξιολόγηση και Αποτελέσματα. 71

5.6.1. Μεθοδολογία Ευθυγράμμισης Νεφών Σημείων με τον Αλγόριθμο ICP. 71

5.6.2. Αποτελέσματα Εφαρμογής του ICP. 72

5.6.3. Συμπεράσματα της Σύγκρισης. 74

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Μετασχηματισμός της ορθοφωτογραφίας σε δισδιάστατα αρχιτεκτονικά σχέδια τεκμηρίωσης 75

6.1. Εισαγωγή τοπογραφικών δεδομένων στο AutoCAD. 75

6.2. Εισαγωγή και τοποθέτηση των ορθοφωτογραφιών. 75

6.3. Ψηφιοποίηση και παραγωγή δισδιάστατων σχεδίων. 75

6.4. Απόδοση αρχιτεκτονικών και μορφολογικών στοιχείων. 76

7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Επίλογος – Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας. 77

7.1. Συνοπτική παρουσίαση των κύριων αποτελεσμάτων της έρευνας 77

7.2. Συνολική αξιολόγηση της υβριδικής μεθοδολογίας αποτύπωσης 77

7.3. Δυνατότητες εφαρμογής και προτάσεις βελτιστοποίησης της μεθοδολογίας σε μνημεία αντίστοιχης κλίμακας. 77

7.4. Προτάσεις περαιτέρω έρευνας. 79

7.5. Πρωτοτυπία της παρούσας έρευνας. 79

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 - Ακριβής εντοπισμός και χαρτογράφηση της παθολογίας (Παπαδιαμαντή, 2022). 3

Εικόνα 2 - Ενοποιημένο νέφος σημείων. Τα διαφορετικά χρώματα υποδεικνύουν διαφορετικό νέφος από άλλη λήψη (Λάππα, 2018). 5

Εικόνα 3 - Συνδυασμός ορθοεικόνας με γραμμική απόδοση (Παπαδιαμαντή, 2022). 6

Εικόνα 4 - Η διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατου μοντέλου με υφή: 1) λήψη εικόνων, 2) ανακατασκευή αραιού νέφους σημείων, 3) πύκνωση νέφους, 4) καθαρισμός και εισαγωγή κλίμακας, 5) απόδοση υφής (Λάππα, 2018). 7

Εικόνα 5 - Αντιμήνσιο του μητροπολίτη Λιτίτζης από το 1805 (Γουρίδης, 2025). 9

Εικόνα 6 - Επιτύμβιες πλάκες από το δάπεδο του ναού (Γουρίδης, 2025).....10

Εικόνα 7 - Η εικόνα της επιγραφής που βρίσκεται στο υπέρθυρο της δυτικής εισόδου τεκμηριώνει την ανακαίνιση του ναού (Γουρίδης, 2025). 11

Εικόνα 8 – Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την αρχιτεκτονική μορφή μέσω ενός γραφήματος τριών επιπέδων (μορφικές οντότητες, ομάδες, σημεία αναφοράς) (De Luca, 2017). 20

Εικόνα 9 – Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνικές, καθώς ταξινομούνται σε (επίγειες, UAV, εναέριες, δορυφορικές) ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της σκηνής (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). 22

Εικόνα 10 - Διάγραμμα ροής εργασιών για το Structure from Motion (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012).....24

Εικόνα 11 - Δεξιά στην φωτογραφία διακρίνουμε την πρώτη αντιστοίχιση από το SFM για τα σημεία A4 και A5. 25

Εικόνα 12 - Το αντικείμενο φωτογράφισης στον τρισδιάστατο χώρο. 26

Εικόνα 13 - Απαιτούνται τρεις κατ' ελάχιστον φωτογραφίες. 26

Εικόνα 14 - Κάθετη προβολή των σημείων στον χώρο. 27

Εικόνα 15 – Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κεντρική ιδέα του bundle adjustment, όπου οι δέσμες ακτίνων από πολλαπλές κάμερες τέμνονται στα σημεία του αντικειμένου (Kraus, 2004). 28

Εικόνα 16 - Αποτελέσματα Πυκνής Αντιστοίχισης πυκνών νεφών σημείων με ψευδοχρώματα που αναπαριστούν το βάθος των pixel (Remondino, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning., 2011). 29

Εικόνα 17 – Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν πραγματικό επίγειο σαρωτή laser (RIEGL VZ400) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). 31

Εικόνα 18 – Η παραπάνω εικόνα οπτικοποιεί τη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ο παλμός να πάει στο αντικείμενο και να επιστρέψει (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).....32

Εικόνα 19 – Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου συνεχούς κύματος (Shan & Toth, 2017).....32

Εικόνα 20 - Το διάγραμμα επεξηγεί γεωμετρικά πώς υπολογίζεται η απόσταση μέσω της γωνίας εκπομπής και της βάσης (b) μεταξύ πηγής και αισθητήρα (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). 33

Εικόνα 21 - Το σχήμα παρουσιάζει γραφικά τη μεταφορά δύο νεφών σημείων από διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων σε ένα κοινό σύστημα μέσω μεταφοράς και στροφής. 34

Εικόνα 22 - Το διάγραμμα συνοψίζει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη γεωμετρική ποιότητα.

1

_Μέθοδος συλλογής δεδομένων (πυκνότητα σημείων, αριθμός και θέσεις σημείων σύνδεσης, θέσεις και αριθμός σαρώσεων, αποστάσεις από το αντικείμενο, με ή χωρίς εξωτερικό σύστημα αναφοράς), 2_Περιβάλλον (δονήσεις, διαθλάσεις, οπτικές διαταραχές) 3_Μέθοδος υπολογισμού (αναγνώριση στόχων, ενοποίηση/ευθυγράμμιση, υπολογισμός στοιχείων)

3

7

Εικόνα 23 - Επίγειος σαρωτής SLAM Stonex X120GO. 38

Εικόνα 24 - Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon 60D με φακό 17-85 mm F4 IS USM..40

Εικόνα 25 - Το γεωδαιτικό δίκτυο (Geodetic Framework) λειτουργεί ως ο «σκελετός» πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι φωτογραμμετρικές λεπτομέρειες, εξασφαλίζοντας τη γεωμετρική συνοχή (Georgopoulos & Ioannidis, 2004). 41

Εικόνα 26 - Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται οι θέσεις των στάσεων (scanner positions) γύρω από ένα μνημείο, υποδεικνύοντας τη στρατηγική κάλυψης του χώρου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).....43

Εικόνα 27 - Στις παραπάνω φωτογραφίες παρουσιάζονται πραγματικοί στόχοι που χρησιμοποιούνται στο πεδίο (ασπρόμαυροι στόχοι, ανακλαστικοί, σφαιρικοί), οι οποίοι χρησιμεύουν ως φωτοσταθερά σημεία (Muralikrishnan, 2021). 44

Εικόνα 28 - 'From left to right: DJI Osmo, iPhone, LiDAR sensor location, iPhone scanning with onscreen visual feedback, and VZ-400i terrestrial laser scanner.' (Kraus).....48

Εικόνα 29 - Ένα τυπικό σχέδιο για την πλήρη τρισδιάστατη κάλυψη του μνημείου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021). 49

Εικόνα 30 - DJI Matrice 4E (Standard) (Skroutz.gr).....57

Εικόνα 31 - Με την παραπάνω σχέση υπολογίζεται το μέγεθος της εδαφοψηφίδας (Γραμματικόπουλος, 2025). 57

Εικόνα 32 - Η επιφάνεια αντικειμένου D ή εδαφοψηφίδα (Γραμματικόπουλος, 2025). .58

Εικόνα 33 - Δημιουργία αραιού νέφους σημείων από επίγειες και εναέριες λήψης. 61

Εικόνα 34 - Επιλογή παραμέτρων για την βελτίωση των θέσεων των καμερών. 62

Εικόνα 35 - Εισαγωγή συντεταγμένων για τα φωτοσταθερά. 63

Εικόνα 36 - Δημιουργία dense cloud από επίγειες και εναέριες λήψεις. 64

Εικόνα 37 - Η λήψη από τον σαρωτή θα εξαρτηθεί επίσης από τα γνωστά φωτοσταθερά. 65

Εικόνα 38 - Η λήψη από τον σαρωτή θα εξαρτηθεί επίσης από τα γνωστά φωτοσταθερά. 66

Εικόνα 39 - Λήψη από το υβριδικό νέφος σημείων. 67

Εικόνα 40 - Λήψη από το Tiled Model. 68

Εικόνα 41 - Ορθοφωτογραφία της δυτικής όψης. Προβολή σε κατακόρυφο επίπεδο. 69

Εικόνα 42 - Ορθοφωτογραφία σε επίπεδο κάτοψης. Προβολή σε οριζόντιο επίπεδο. 69

Εικόνα 43 - Βλέπουμε το σφάλμα των φωτοσταθερών από το A4 και A5 από τον παρακάτω πίνακα. 70

Εικόνα 44 - Τελικό σφάλμα RMS όπως υπολογίστηκε από το Cloud Compare μετά την εφαρμογή του ICP. 72

Εικόνα 45. Ευθυγραμμισμένα νέφη σημείων στο Cloud Compare με χρωματική απόδοση των διαφορών. 73

Εικόνα 46 - Ιστόγραμμα των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών σημείων μετά την ευθυγράμμιση. 74

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 - Κάτοψη Ισογείου Ι.Ν. Αγίου Νικολάου (Γουρίδης, 2008). 12

Διάγραμμα 2 - Τομή Α-Α Ι.Ν. Αγίου Νικολάου (Γουρίδης, 2008). 12

Διάγραμμα 3 – Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τη λογική σειρά επιλογής μεθόδων και οργάνων με βάση τη σημασία του μνημείου, την πολυπλοκότητά του και τις απαιτούμενες προδιαγραφές (κλίμακα, ακρίβεια, λεπτομέρεια) (Georgopoulos & Ioannidis, 2004). 17

Διάγραμμα 4 – Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση της Μεθόδου, του μεγέθους του αντικειμένου και της επιταχυνόμενης ακρίβειας (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014). 18

Διάγραμμα 5 - Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης υπολοίπων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη στατιστική αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).....46

Διάγραμμα 6 - 'Βασικά στάδια των φωτογραμμετρικών εργασιών' (Kraus). 47

Διάγραμμα 7 – Χάραξη του τοπογραφικού δικτύου. Οι στάσεις εντός του μνημείου και εκτός στον περιβάλλοντα χώρο (Google Maps, 2026). 50

Διάγραμμα 8 - Σημεία τοποθέτησης των φωτοσταθερών. 52

Διάγραμμα 9 - Απόδοση των σημείων επάνω σε απόσπασμα αεροφωτογραφίας. 53

Διάγραμμα 10 - Αεροφωτογραφία από την ημέρα αποτύπωσης.....59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Προϊόντα αποτύπωσης για κάθε μέθοδο (Λάππα, 2018).....2

Πίνακας 2 - Ο παραπάνω πίνακας παρέχει μια πλήρη κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων ανάμεσα στο σύστημα απόκτησης και την περιοχή ενδιαφέροντος (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).....30

Πίνακας 3 - Απόσπασμα του πίνακα σφαλμάτων από την αναφορά του Metashape.....71

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

SfM	Structure from Motion
TLS	Terrestrial Laser Scanning
HBIM	Heritage Building Information Modeling
BIM	Building Information Modeling
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
GCP	Ground Control Point
RMSE	Root Mean Square Error

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή – Αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο της έρευνας.

1.1. Το αντικείμενο της έρευνας και το επιστημονικό πλαίσιο της ψηφιακής τεκμηρίωσης των μνημείων.

1.1.1. **Η ψηφιακή τεκμηρίωση των μνημείων ως εργαλείο καταγραφής της πολιτιστικής κληρονομιάς.**

Η ψηφιακή τεκμηρίωση αποτελεί σήμερα βασικό μέσο οργάνωσης και διατήρησης της γνώσης για τη διαχείριση της πληροφορίας που αφορά την ιστορία και τον πολιτισμό, καθώς βασίζεται στη συστηματική συλλογή και οργάνωση δεδομένων που αποτυπώνουν τη μορφή, την ιστορική εξέλιξη και την κατάσταση διατήρησης ενός μνημείου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (Letellier, 2007). Μέσω αυτής της διαδικασίας διασφαλίζεται μια μορφή «ψηφιακής επιβίωσης» της πολιτιστικής κληρονομιάς, προστατεύοντας τη γνώση ακόμη και σε περιπτώσεις μερικής ή ολικής απώλειας του φυσικού φορέα. (Αλιπράντης, et al., 2020) (Letellier, 2007). Η εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης ψηφιακής ροής εργασίας, που εκτείνεται από τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων έως την τελική ανακατασκευή, εγγυάται την επιστημονική εγκυρότητα και την ιστορική ακρίβεια της τεκμηρίωσης (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014), ενώ παράλληλα καθιστά δυνατή τη δημιουργία αξιόπιστων ψηφιακών αναπαραστάσεων, οι οποίες συμβάλλουν ουσιαστικά στη διατήρηση και τη διάδοση της πολιτιστικής κληρονομιάς στις επόμενες γενιές.

Παράλληλα, τα σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία, όπως το HBIM (Heritage Building Information Modeling), επιτρέπουν την ενοποιημένη διαχείριση γεωμετρικών και σημασιολογικών δεδομένων, ενισχύοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε όλα τα στάδια συντήρησης και αποκατάστασης (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Η ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων (digital twins) διευρύνει περαιτέρω τις δυνατότητες της τεκμηρίωσης, προσφέροντας εργαλεία για τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των μνημείων και την έγκαιρη ανίχνευση φθορών (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Επιπλέον, η καταγραφή των επεμβάσεων στον χρόνο και η συστηματική αξιολόγηση των κινδύνων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη βιώσιμη διαχείριση των ιστορικών κατασκευών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Στο πλαίσιο αυτό, παράγονται ποικίλα προϊόντα αποτύπωσης, όπως νέφη σημείων, τρισδιάστατα μοντέλα και ορθοφωτογραφίες, τα οποία αποτυπώνουν μετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του μνημείου, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 (Λάππα, 2018), και αποτελούν βασικά εργαλεία για την ανάλυση και την τεκμηρίωσή του. (Koller, Frischer, & Humphreys, 2009).

Πίνακας 1 - Προϊόντα αποτύπωσης για κάθε μέθοδο (Λάππα, 2018).

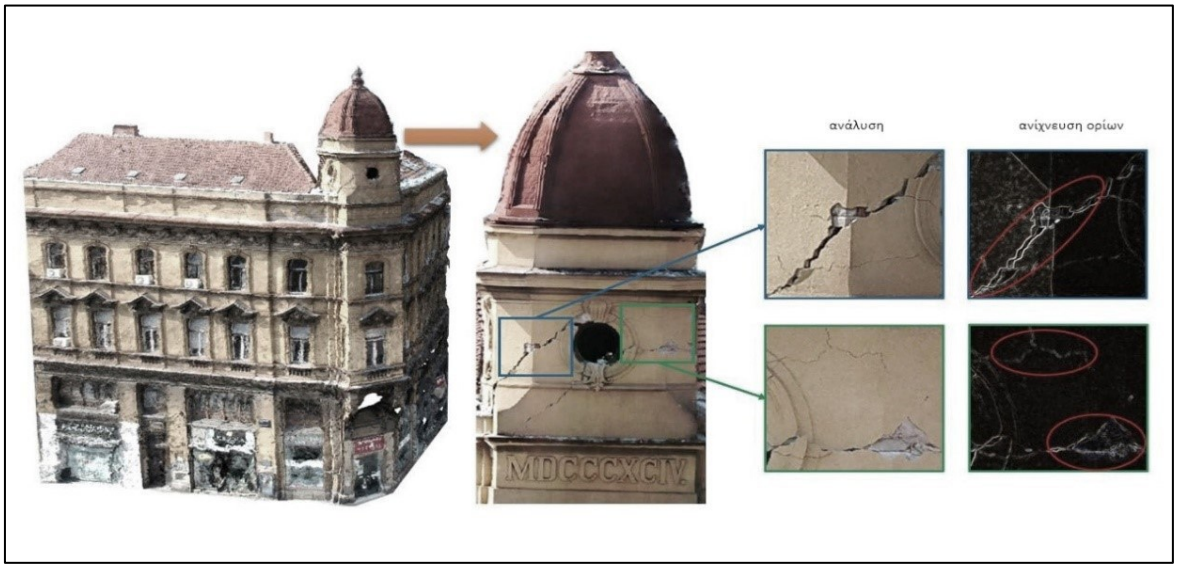
Προϊόντα	Τοπομετρικές	Τοπογραφικές	Φωτογραμμε-τρικές	Laser Scanning
2D διανυ-σματικά	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ με προϋποθέσεις
2D εικο-νιστικά	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
3D	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Φωτο-ρεαλιστικά	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

1.1.2. **Ο ρόλος της αρχιτεκτονικής αποτύπωσης στη μελέτη αποκατάστασης και τεκμηρίωσης των ιστορικών κατασκευών.**

Η αρχιτεκτονική αποτύπωση αποτελεί το αρχικό και ταυτόχρονα καθοριστικότερο στάδιο στη μελέτη και αποκατάσταση ενός μνημείου, καθώς βασίζεται στην άμεση συλλογή δεδομένων από το ίδιο το αντικείμενο και παρέχει την αναγκαία γεωμετρική και μορφολογική πληροφορία για την κατανόησή του (Μπούρας, 1999) (Αλιπράντης, et al., 2020). Μέσω μιας ολιστικής και συστηματικής καταγραφής, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της υφιστάμενης κατάστασης (as-found condition), της παθολογίας και της ιστορικής εξέλιξης της κατασκευής, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η εις βάθος κατανόηση του δομικού συστήματος και των υλικών (Letellier, 2007) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Η γνώση αυτή προηγείται κάθε σχεδιαστικής επέμβασης και είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας και της στατικής συμπεριφοράς του μνημείου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Γουρίδης, 2008).

Τα παραγόμενα σχέδια λειτουργούν ως βασικά υπόβαθρα (base maps), επί των οποίων ενσωματώνονται δεδομένα από επιμέρους επιστημονικά πεδία, όπως η χαρτογράφηση

ρηγματώσεων ή η ανάλυση των υλικών, συμβάλλοντας στη συνολική τεκμηρίωση και ερμηνεία του μνημείου (Letellier, 2007).



Εικόνα 1 - Ακριβής εντοπισμός και χαρτογράφηση της παθολογίας (Παπαδιαμαντή, 2022).

Η σημασία αυτής της διαδικασίας αποτυπώνεται χαρακτηριστικά και στην Εικόνα 1, όπου παρουσιάζεται ο ακριβής εντοπισμός και χαρτογράφηση της παθολογίας (Παπαδιαμαντή, 2022), αναδεικνύοντας τον ρόλο της αποτύπωσης ως εργαλείου διάγνωσης. Η συστηματική καταγραφή των φθορών, όπως ρηγματώσεις και αποσαθρώσεις, καθοδηγεί τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τις κατάλληλες επεμβάσεις συντήρησης (Αλιπράντης, et al., 2020), ενώ η απουσία ακριβούς αποτύπωσης καθιστά προβληματική τόσο την κατανόηση του δομικού συστήματος όσο και τη διασφάλιση της αυθεντικότητας κατά τις επεμβάσεις (Μαλλούχου - Tufano, 2015). Συνεπώς, η αποτύπωση συνιστά την απαραίτητη βάση για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση κάθε έργου αποκατάστασης, διασφαλίζοντας παράλληλα τη στατική επάρκεια και την επιστημονική τεκμηρίωση των παρεμβάσεων.

1.2. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και οι επιμέρους ερευνητικοί στόχοι.

Στην παρούσα ενότητα διατυπώνεται με σαφήνεια το ερευνητικό αντικείμενο και ο βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας, ο οποίος επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυνατότητας συνδυαστικής αξιοποίησης της φωτογραμμετρίας εγγύς πεδίου και της επίγειας σάρωσης laser (SLAM). Συγκεκριμένα, εξετάζεται κατά πόσο η ενοποίηση των δύο αυτών τεχνολογιών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός γεωμετρικά αξιόπιστου υβριδικού νέφους σημείων, ικανού να υποστηρίξει με ακρίβεια την παραγωγή αρχιτεκτονικών σχεδίων που απαιτούνται για τη μελέτη και αποκατάσταση ιστορικών μνημείων.

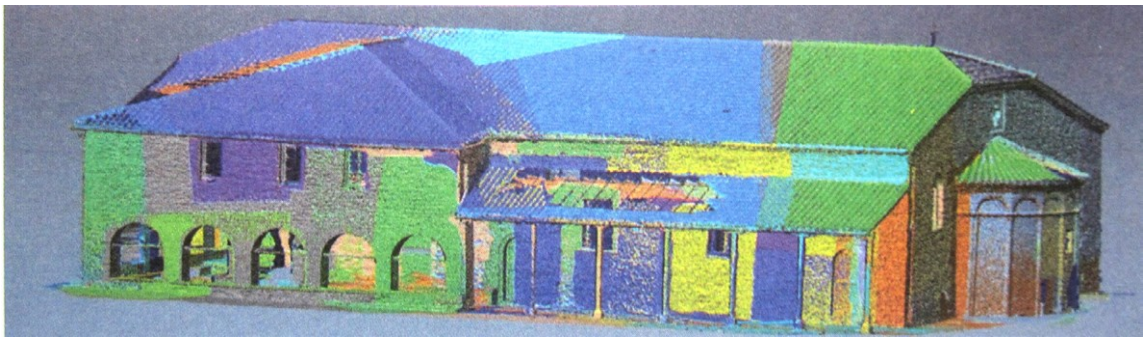
Στο πλαίσιο αυτό, τίθενται επιμέρους ερευνητικοί στόχοι, οι οποίοι αφορούν διαδοχικά στάδια της μεθοδολογικής προσέγγισης:

- την παραγωγή φωτογραμμετρικού νέφους σημείων
- την επεξεργασία των δεδομένων από σαρώσεις SLAM
- τη συγχώνευση των επιμέρους συνόλων σε ένα ενιαίο υβριδικό νέφος
- τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου
- την εξαγωγή αξιόπιστων αρχιτεκτονικών σχεδίων
- την αξιολόγηση της ακρίβειας και της χρηστικότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων, με στόχο την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας
- τις προτάσεις βελτίωσης της διαδικασίας αποτύπωσης μέσω υβριδικών νεφών σημείων
- την πρώτη ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αποτύπωση του μνημείου, μία προσφορά για την διατήρηση και διάσωση ενός κτιρίου πολιτισμικής κληρονομιάς.

1.2.1. **Εισαγωγή στην έννοια του υβριδικού νέφους σημείων μέσω του συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών καταγραφής.**

Το υβριδικό νέφος σημείων προκύπτει από τη συνδυαστική αξιοποίηση πολλαπλών τεχνολογιών καταγραφής, κυρίως της φωτογραμμετρίας και της τρισδιάστατης σάρωσης laser, με στόχο την όσο το δυνατόν πληρέστερη και ακριβέστερη αποτύπωση της πραγματικότητας (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Georgopoulos & Ioannidis, 2004) (Koller, Frischer, & Humphreys, 2009) (Balloni, et al., 2024). Οι επίγειοι σαρωτές laser (TLS), ως ενεργητικά συστήματα, προσφέρουν υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και μεγάλη πυκνότητα σημείων, ενώ η φωτογραμμετρία, είτε εφαρμόζεται επίγεια είτε μέσω UAV, λειτουργεί ως παθητική μέθοδος αποδίδοντας με υψηλή πιστότητα τη χρωματική πληροφορία και την υφή των επιφανειών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Balloni, et al., 2024) (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Η συνέργεια των δύο αυτών προσεγγίσεων οδηγεί σε βέλτιστα αποτελέσματα, καθώς συνδυάζει τη μετρική ακρίβεια της σάρωσης με τον φωτορεαλισμό της φωτογραμμετρικής απεικόνισης (Αλιπράντης, et al., 2020).

Η ενοποίηση των επιμέρους δεδομένων σε ένα ενιαίο νέφος σημείων επιτυγχάνεται μέσω κοινών σημείων αναφοράς και ειδικών στόχων, διασφαλίζοντας την πληρότητα και την αξιοπιστία της αποτύπωσης ακόμη και σε σύνθετες γεωμετρίες ή δυσπρόσιτες περιοχές (Αλιπράντης, et al., 2020) (Balloni, et al., 2024). Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 2, όπου τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε επιμέρους νέφη σημείων από διαφορετικές θέσεις λήψης, τα οποία έχουν ενοποιηθεί σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς (Λάππα, 2018). Επιπλέον, η ενσωμάτωση συμπληρωματικών αισθητήρων, όπως θερμικών καμερών, ενισχύει τη διαγνωστική δυνατότητα της μεθόδου, επιτρέποντας τον εντοπισμό αφανών κατασκευαστικών στοιχείων (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024). Το αποτέλεσμα αυτής της πολυμεθοδικής προσέγγισης είναι η δημιουργία ενός ενιαίου, πολυεπίπεδου και μετρικά αξιόπιστου ψηφιακού υποβάθρου, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά σε περαιτέρω διαδικασίες ανάλυσης, τεκμηρίωσης και διαχείρισης μνημείων (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024).



Εικόνα 2 - Ενοποιημένο νέφος σημείων. Τα διαφορετικά χρώματα υποδεικνύουν διαφορετικό νέφος από άλλη λήψη (Λάππα, 2018).

1.2.2. **Η διαδικασία του μετασχηματισμού των 3D δεδομένων σε δισδιάστατα αρχιτεκτονικά σχέδια τεκμηρίωσης.**

Η μετατροπή των τρισδιάστατων δεδομένων σε δισδιάστατες αναπαραστάσεις αποτελεί μια σύνθετη και πολυπαραμετρική διαδικασία, η οποία ξεκινά από την επεξεργασία του ακατέργαστου νέφους σημείων και οδηγεί στη δημιουργία πολυγωνικών μοντέλων (meshes) ή επιφανειών τύπου NURBS, τα οποία προσεγγίζουν με ακρίβεια τη γεωμετρία του πραγματικού αντικειμένου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Balloni, et al., 2024) (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Από τα μοντέλα αυτά παράγονται ορθοφωτογραφίες και ορθομωσαϊκά υψηλής ανάλυσης, τα οποία λειτουργούν ως ακριβή και κλιμακωτά εικονιστικά υπόβαθρα, απαλλαγμένα από προοπτικές παραμορφώσεις (Αλιπράντης, et al., 2020) (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024) (Mencia, et al., 2024).

Στη συνέχεια, μέσω εξειδικευμένων λογισμικών CAD ή HBIM, τα δεδομένα αυτά μετασχηματίζονται σε συμβατικά αρχιτεκτονικά σχέδια, όπως κατόψεις, όψεις και τομές, επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό των διαστάσεων σε κλίμακα 1:1 και την αποτύπωση των γεωμετρικών σχέσεων του μνημείου (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Η διαδικασία αυτή καθιστά δυνατή την καταγραφή λεπτομερειών υψηλής ακρίβειας, όπως η μορφολογία των ανοιγμάτων ή η γεωμετρία σύνθετων θολωτών και καμπύλων κατασκευών (Letellier, 2007) (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024). Η σύνθεση ορθοεικόνων με γραμμική σχεδιαστική απόδοση, όπως αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 3 (Παπαδιαμαντή, 2022), αναδεικνύει τη συνέργεια μεταξύ

ψηφιακής απεικόνισης και αναλυτικής σχεδίασης, ενισχύοντας την ακρίβεια και την αναγνωσιμότητα των τελικών σχεδίων.



Εικόνα 3 - Συνδυασμός ορθοεικόνας με γραμμική απόδοση (Παπαδιαμαντή, 2022).

Τα παραγόμενα σχέδια αποτελούν βασικό εργαλείο τόσο για τη χαρτογράφηση της παθολογίας όσο και για τη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με ιστορικά τεκμήρια, συμβάλλοντας στη συνολική τεκμηρίωση του μνημείου (Αλιπράντης, et al., 2020). Συνολικά, η εν λόγω ψηφιακή ροή διασφαλίζει την παραγωγή αξιόπιστων και επιστημονικά τεκμηριωμένων σχεδίων, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα καταγραφής και αποτύπωσης (Letellier, 2007).

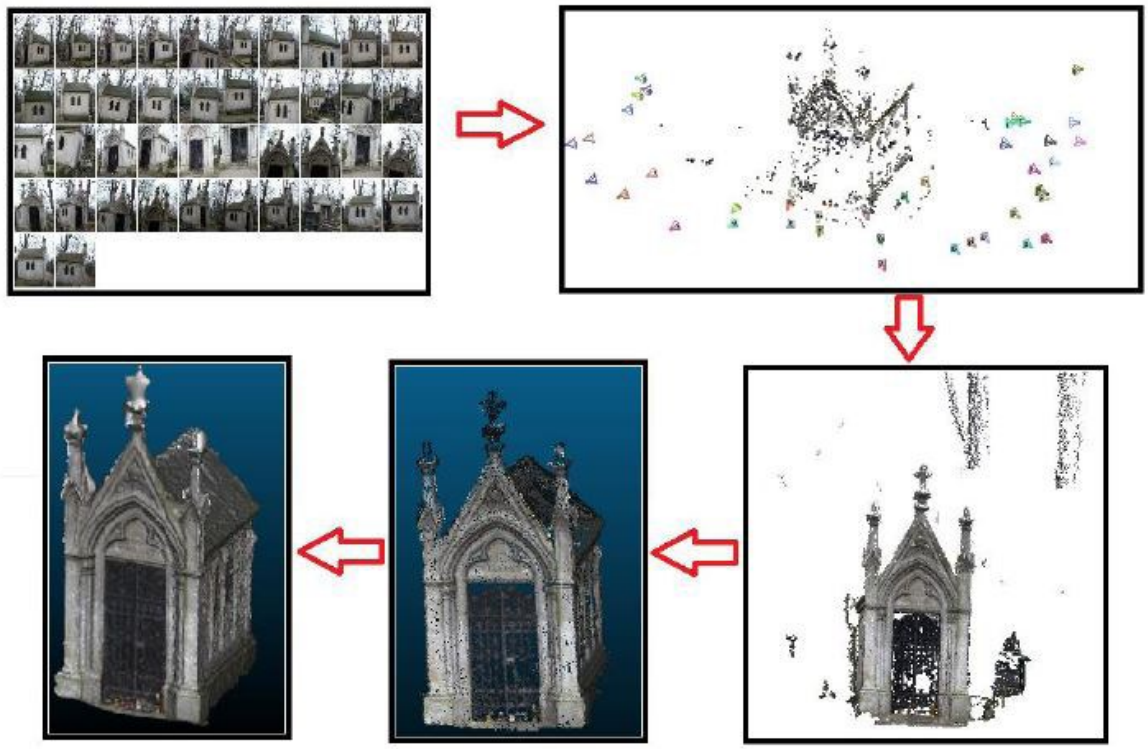
1.3. Η μεθοδολογική προσέγγιση και δομή της ερευνητικής διαδικασίας.

1.3.1. **Στάδια της ερευνητικής διαδικασίας και ροής επεξεργασίας των δεδομένων.**

Η ερευνητική διαδικασία οργανώνεται σε μια αυστηρά δομημένη και διαδοχική ροή εργασιών, η οποία ξεκινά με την επιτόπια ψηφιακή καταγραφή και την προεπεξεργασία των δεδομένων για τη διόρθωση γεωμετρικών σφαλμάτων (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Balloni, et al., 2024) (Mencia, et al., 2024). Ακολουθεί η εφαρμογή αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης, όπως το Structure from Motion (SfM), για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού των λήψεων και τη δημιουργία αρχικού αραιού νέφους σημείων, το οποίο εμπλουτίζεται σε πυκνό νέφος (dense cloud) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Αλιπράντης, et al., 2020) (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024) (Penjor, Banihashemi, Hajirasouli, & Golzad, 2024).

Στη συνέχεια, τα επιμέρους σύνολα δεδομένων ενοποιούνται και μετατρέπονται σε τρισδιάστατο πλέγμα (mesh), ενώ παράλληλα πραγματοποιείται η γεωαναφορά (georeferencing) σε κοινό σύστημα συντεταγμένων, εξασφαλίζοντας μετρική ακρίβεια (Mencia, et al., 2024) (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024). Ακολουθεί η απόδοση υφής (texture mapping) για την επίτευξη φωτορεαλιστικού αποτελέσματος και την εξαγωγή τελικών προϊόντων, όπως μοντέλα BIM ή ορθοφωτοχάρτες (Dardeniz, Ozcan, & Yazici, 2024) (Mencia, et al., 2024) (Balloni, et al., 2024).

Η συνολική αυτή διαδικασία αποδίδεται σχηματικά στην Εικόνα 4 (Λάππα, 2018), όπου παρουσιάζονται τα βασικά στάδια παραγωγής ενός τρισδιάστατου μοντέλου με υφή, από τη λήψη εικόνων έως την τελική απόδοση.



Εικόνα 4 - Η διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατου μοντέλου με υφή: 1) λήψη εικόνων, 2) ανακατασκευή αραιού νέφους σημείων, 3) πύκνωση νέφους, 4) καθαρισμός και εισαγωγή κλίμακας, 5) απόδοση υφής (Λάππα, 2018).

Στο τελικό στάδιο της μετά-επεξεργασίας πραγματοποιείται καθαρισμός θορύβου, πλήρωση κενών και βελτιστοποίηση (decimation) του πλέγματος, ώστε να εξισορροπείται η υψηλή ανάλυση με την αποδοτική υπολογιστική διαχείριση (Αλιπράντης, et al., 2020).

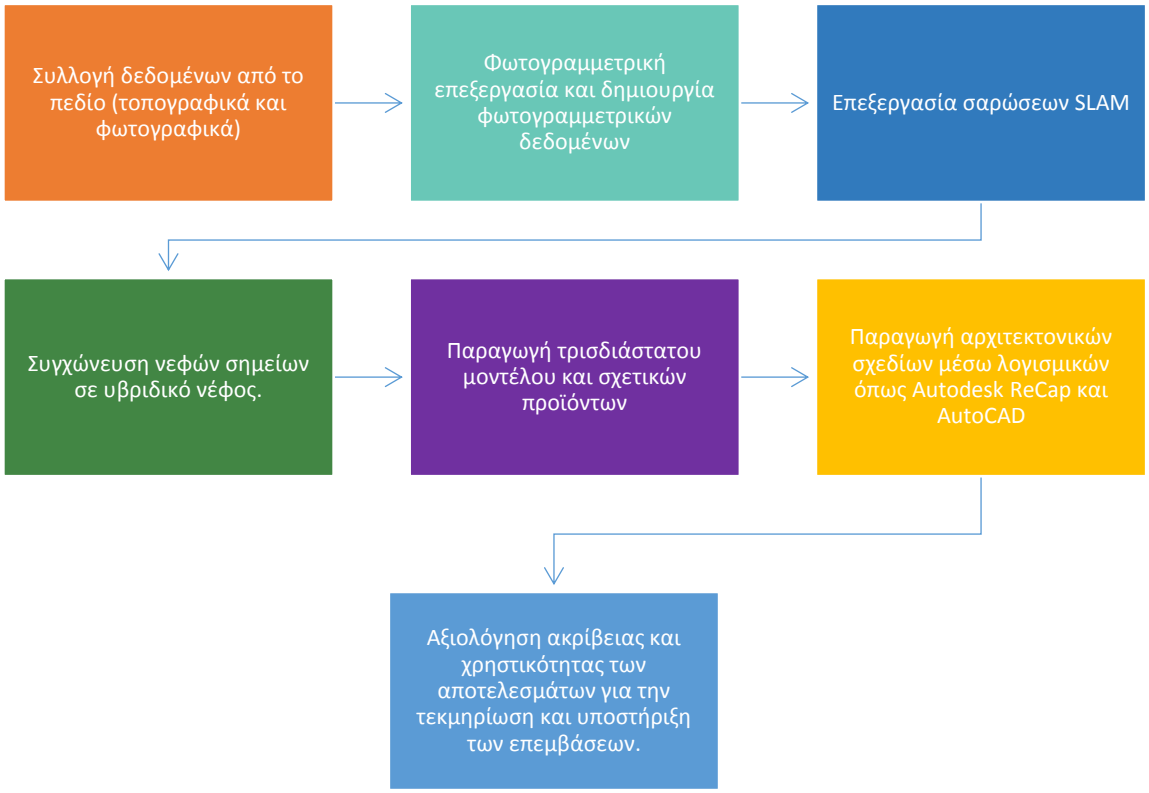
Η δομημένη αυτή προσέγγιση διασφαλίζει την επαναληψιμότητα της διαδικασίας, στοιχείο κρίσιμο για τη διαχρονική παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης του μνημείου (Mencia, et al., 2024).

Συνοπτικά, η διαδικασία μπορεί να αναπαρασταθεί στα ακόλουθα στάδια:

- Συλλογή δεδομένων από το πεδίο (τοπογραφικά και φωτογραφικά).

- Φωτογραμμετρική επεξεργασία και δημιουργία φωτογραμμετρικών δεδομένων (π.χ. στο Metashape).
- Επεξεργασία σαρώσεων SLAM.
- Συγχώνευση νεφών σημείων σε υβριδικό νέφος.
- Παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου και σχετικών προϊόντων (point cloud, mesh, orthomosaic).
- Παραγωγή αρχιτεκτονικών σχεδίων μέσω λογισμικών όπως Autodesk ReCap και AutoCAD.
- Αξιολόγηση ακρίβειας και χρηστικότητας των αποτελεσμάτων για την τεκμηρίωση και υποστήριξη των επεμβάσεων.

Διάγραμμα μεθοδολογίας.



2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Ιστορική, Αρχιτεκτονική και Κατασκευαστική τεκμηρίωση του μνημείου.

2.1. Το ιστορικό πλαίσιο εξέλιξης του μνημείου.

2.1.1. **Η χρονολόγηση και η ιστορική τοποθέτηση του μνημείου.**

Ο οικισμός της Παταγής παλαιότερα ονομάζονταν Παζαρλί ή Ταπάρ Παζαρλί αποτελούσε ένα από τα σημαντικότερα κεφαλοχώρια της ευρύτερης περιοχής. Το γεγονός ότι σώζονται ταφικές στήλες που χρονολογούνται στο πρώτο μισό του 18ου αιώνα, τεκμηριώνει τη συνεχή παρουσία ελληνικού πληθυσμού στον οικισμό ήδη από την περίοδο αυτή (Γουρίδης, 2025).

Κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα ο οικισμός της Παταγής υπαγόταν στην μητρόπολη Διδυμοτείχου (Γουρίδης, 2008). Παλαιότερα όμως ανήκε στην μητρόπολη Λιτίτζης με έδρα το σημερινό Ιβαίλοβγκραντ της Βουλγαρίας, γεγονός που επιβεβαιώνεται από αντιμήνσιο του 1805 (Εικόνα 5), το οποίο φυλάσσεται στο ναό (Γουρίδης, 2008).



Εικόνα 5 - Αντιμήνσιο του μητροπολίτη Λιτίτζης από το 1805 (Γουρίδης, 2025).

Ο ναός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μπορεί να χαρακτηρισθεί ως «μνημείο μέσα σε μνημείο» δεδομένου ότι το δάπεδο του ναού είναι εξ ολοκλήρου στρωμένο από

επιτύμβιες πλάκες, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 6, που χρονολογούνται από τον 17ο έως τον 19ο αιώνα (Γουρίδης, 2025).



Εικόνα 6 - Επιτύμβιες πλάκες από το δάπεδο του ναού (Γουρίδης, 2025).

Κατά τις εργασίες αποκατάστασης του ναού το 2007-2008 εντοπίσθηκαν στον βόρειο τοίχο επιτύμβιες στήλες, οι οποίες βάσει αρχαιολογικών συγκρίσεων από τον βουλγάρικο χώρο ανάγονται ακόμη και στον 16ο αιώνα (Γουρίδης, 2008).

Κατά την δεκαετία του 1950 αναπτύχθηκαν στατικά προβλήματα που ανέστειλαν προσωρινά την λειτουργία του παλιού ναού. Το 1967 ανεγέρθηκε νέος ενοριακός ναός αφιερωμένος στον Άγιο Νικόλαο, ενώ ο παλιός αποκαταστάθηκε πλήρως στο πλαίσιο διασυνοριακού προγράμματος και σήμερα χρησιμοποιείται τόσο για λατρευτικούς σκοπούς όσο και ως εκθεσιακός χώρος (Γουρίδης, 2008).

2.1.2. **Οι οικοδομικές φάσεις και οι μεταγενέστερες επεμβάσεις στο μνημείο.**

Ο Ιερός Ναός του Αγίου Νικολάου στην Παταγή Ορεστιάδας θεωρείται το αρχαιότερο σωζόμενο θρησκευτικό μνημείο του Βορείου Έβρου και ένα από τα πλέον αξιόλογα οικοδομήματα της θρακικής ενδοχώρας. Πρόκειται για ένα πρώιμο μεταβυζαντινό ναό, του οποίου η ιστορική πορεία διαχωρίζεται σε τρεις οικοδομικές φάσεις (Γουρίδης, 2025).

Κατά την Α’ Φάση, που τοποθετείται χρονικά στα τέλη του 17ου με αρχές του 18ου αιώνα, ο ναός ήταν μονόχωρος και χαμηλός ναΐσκος. Η χρονολόγηση αυτής της φάσης

τεκμηριώνεται από μία λιθανάγλυφη πλάκα με σταυρό στην αψίδα πάνω στην οποία αχνώς διακρίνεται η χρονολογία 1711.



Εικόνα 7 - Η εικόνα της επιγραφής που βρίσκεται στο υπέρθυρο της δυτικής εισόδου τεκμηριώνει την ανακαίνιση του ναού (Γουρίδης, 2025).

Επιπροσθέτως, στο δάπεδο του ιερού εντοπίζεται η αρχαιότερη επιτύμβια στήλη σε όλο τον Έβρο η οποία φέρει την χρονολογία 1655 και ανήκει στον «δούλο του Θεού Καρεφύλλη» (Γουρίδης, 2025).

Η Β΄Φάση του μνημείου χρονολογείται στα τέλη του 18ου με αρχές του 19ου αιώνα. Στην φάση αυτή το μνημείο επεκτάθηκε προς τον βορρά και την δυτική πλευρά. Προστέθηκε το βόρειο κλίτος με κιονοστοιχία, μετατρέποντας το ναό σε δίκλιτη βασιλική, ενώ παράλληλα διαμορφώθηκαν τα υφιστάμενα ανοίγματα των παραθύρων. Στην ίδια φάση τοποθετούνται και οι τέσσερις δεσποτικές εικόνες του τέμπλου, οι οποίες χρονολογούνται στο δεύτερο μισό του 18ου αιώνα (Γουρίδης, 2025).

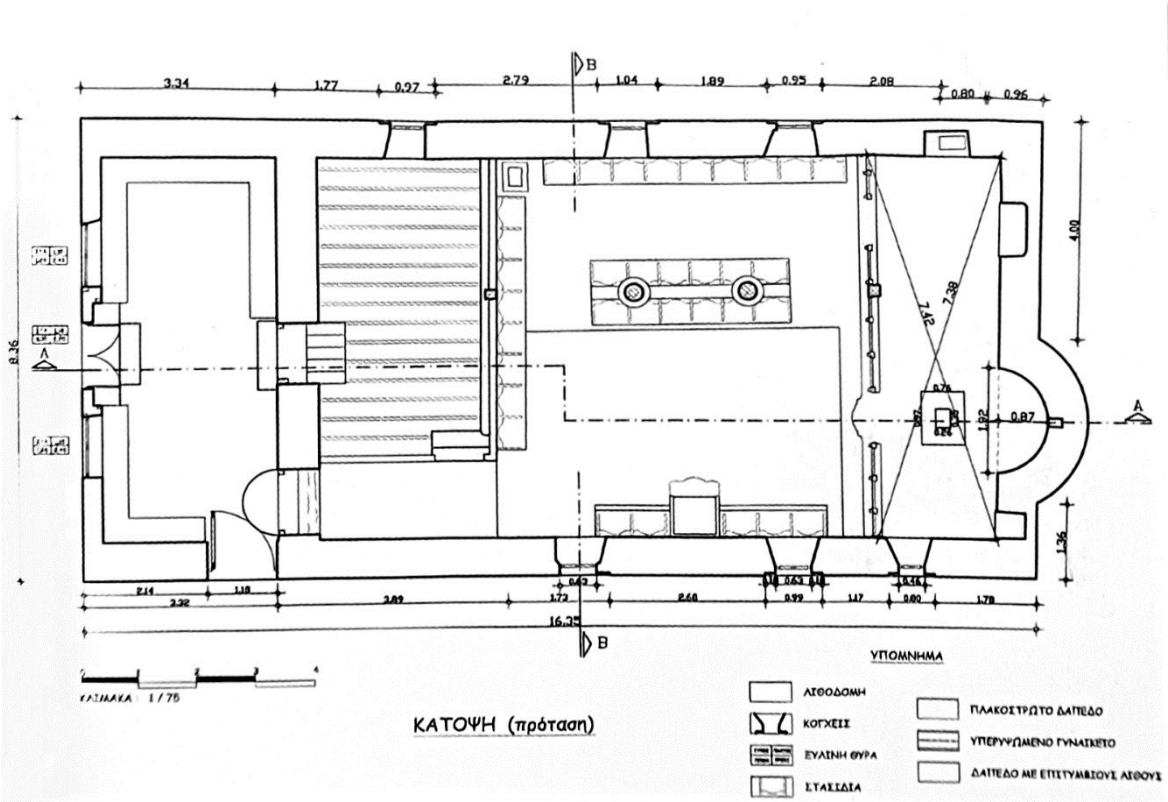
Η Γ’ Φάση του μνημείου τοποθετείται χρονικά στο διάστημα από το 1852 μέχρι το 1853. Την περίοδο αυτή πραγματοποιήθηκε μία εκτεταμένη ανακαίνιση του ναού, κατά την οποία προστέθηκε ο δυτικός νάρθηκας, το ενιαίο λίθινο γείσο, η δίρριχτη στέγη και η επιγραφή της εισόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 που τεκμηριώνει τον χρόνο κατασκευής (1852) (Γουρίδης, 2025).

2.2. Αρχιτεκτονική τυπολογία και μορφολογική ανάλυση του μνημείου.

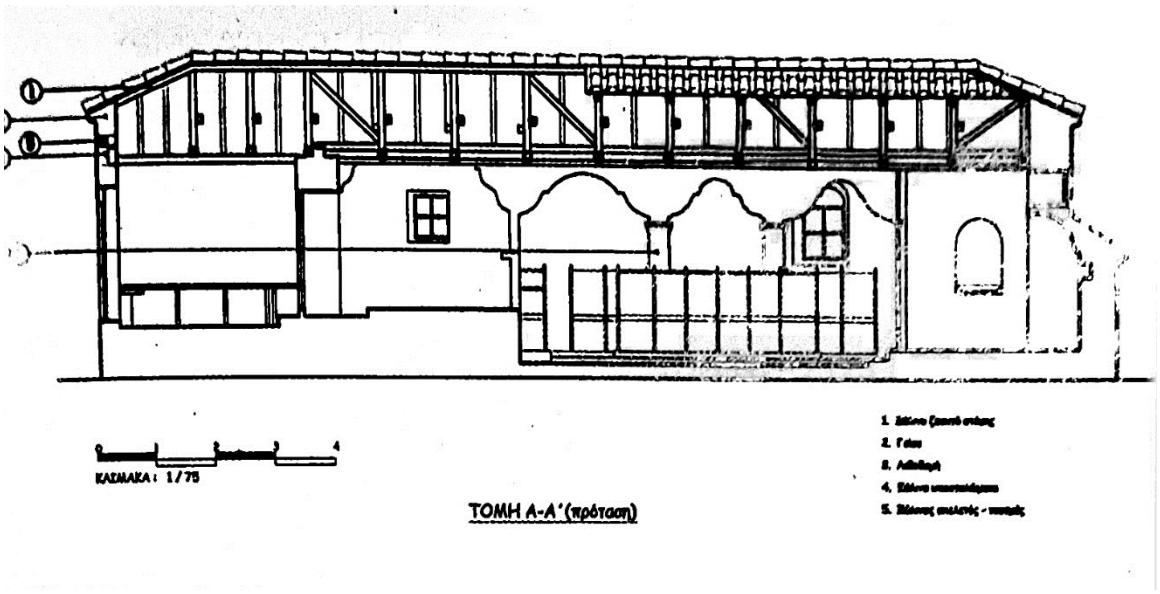
2.2.1. **Η τυπολογία και η λειτουργική οργάνωση του ναού.**

Ο ναός συνιστά μία ιδιότυπη, χαμηλού ύψους, δίκλιτη βασιλική με ξύλινη στέγη και επικάλυψη κεραμιδιών. Η λειτουργική του διάρθρωση όπως βλέπουμε και στο Διάγραμμα 1 Κάτοψη Ισογείου, οργανώνεται ως εξής:

Ο νάρθηκας τοποθετείται στη δυτική πλευρά και αποτελεί μεταγενέστερη προσθήκη. Το δάπεδό του βρίσκεται σε στάθμη ανυψωμένη κατά 0,40 μ. σε σχέση με τον κυρίως ναό (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).



Διάγραμμα 1 - Κάτοψη Ισογείου Ι.Ν. Αγίου Νικολάου (Γουρίδης, 2008).



Διάγραμμα 2 - Τομή Α-Α Ι.Ν. Αγίου Νικολάου (Γουρίδης, 2008).

Ο γυναικωνίτης αναπτύσσεται στο δυτικό τμήμα του ναού, είναι ξύλινης κατασκευής και υπερυψώνεται κατά 0,80 μ. από τον κυρίως χώρο λατρείας, από τον οποίο διαχωρίζεται με στηθαίο και απλό καφασωτό διαχωριστικό, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Τομή του Διαγράμματος 2.

Το Ιερό Βήμα διαχωρίζεται από τον κυρίως ναό μέσω ξύλινου τέμπλου και παρουσιάζει ανύψωση κατά 0,25 μ. Η ημικυκλική αψίδα διατάσσεται έντονα έκκεντρα, ευθυγραμμισμένη με τον άξονα του κυρίου (νότιου) κλίτους (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Οι είσοδοι του ναού είναι τέσσερις. Οι δύο εξωτερικές οδηγούν στον νάρθηκα (μία δίφυλλη στη δυτική πλευρά και μία μονόφυλλη στη νότια, προορισμένη για τη διέλευση των γυναικών). Οι εσωτερικές εξυπηρετούν την πρόσβαση στον γυναικωνίτη και στο κύριο κλίτος μέσω στενού διαδρόμου (Γουρίδης, 2008).

2.2.2. **Μορφολογικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά.**

Εξωτερικά, ο ναός εμφανίζει λιτή και ανεπιτήδευτη μορφή, χωρίς διακοσμητικά στοιχεία, γεγονός που αντανακλά τόσο τις περιορισμένες οικονομικές δυνατότητες όσο και τις συνθήκες της εποχής ανέγερσής του.

Τα παράθυρα διαμορφώνονται εξωτερικά ως ορθογώνια, ενώ στο πάχος της τοιχοποιίας αποκτούν τραπεζοειδή μορφή. Φέρουν λίθινα περίθυρα από μονολιθικούς σχιστόλιθους και υπερκαλύπτονται από ανακουφιστικά τόξα (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Η κιονοστοιχία συγκροτείται από τέσσερις ξύλινους κίονες, εκ των οποίων οι δύο είναι απλοί, ενώ οι άλλοι δύο φέρουν επίχρισμα γύψου, με στόχο την απομίμηση λίθινων στοιχείων (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Στον εσωτερικό διάκοσμο αν και απουσιάζουν εικονογραφικές τοιχογραφίες διατηρούνται ίχνη διακοσμητικών θεμάτων, κυρίως φυτικών και γραμμικών μοτίβων στα τόξα, σε αποχρώσεις, γαλάζιου, μωβ και κίτρινου, καθώς και ζωγραφικός διάκοσμος φυτικής θεματολογίας στους κίονες (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Η Αγία Τράπεζα στην άνω επιφάνειά της φέρει πολύστιχη χαρακτή επιγραφή με αρχικά ονομάτων πιστών, πρακτική που φαίνεται να ανάγεται σε εκκλησιαστικές παραδόσεις με πιθανή προέλευση από την Κωνσταντινούπολη (Γουρίδης, 2025).

2.2.3. **Η μορφολογία της στέγης και το ανώτερο τμήμα επικάλυψης.**

Το κτίριο στεγάζεται με ενιαία δίρριχτη ξύλινη στέγη, η οποία παρουσιάζει διπλή απότμηση στις στενές πλευρές. Η κάλυψη της στέγης πραγματοποιείται με κεραμίδια βυζαντινού τύπου. Η απόληξη των τοίχων διαμορφώνεται με κομψό λίθινο γείσο καμπύλης μορφής διπλής καμπυλότητας, το οποίο συνεχίζεται περιμετρικά και στην περιοχή της αψίδας, σε χαμηλότερη στάθμη. Η στέγη διατηρεί ενιαία κλίση της τάξης του 40% σε όλα τα επιμέρους τμήματά της (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

2.3. Κατασκευαστική τεχνολογία και δομικό σύστημα του μνημείου.

2.3.1. **Το δομικό σύστημα του ναού.**

Το δομικό σύστημα του ναού βασίζεται σε μικτό δομικό σύστημα, το οποίο συνδυάζει φέρουσα τοιχοποιία με εσωτερικά ξύλινα στοιχεία στήριξης. Οι περιμετρικοί φέροντες

τοίχοι είναι λιθόκτιστοι, με μέσο πάχος περίπου 0,68 μ. ενώ ο ανατολικός τοίχος φτάνει τα 0,78 μ. Η εσωτερική στήριξη της ανωδομής επιτυγχάνεται μέσω κιονοστοιχίας τεσσάρων κιόνων, οι οποίοι συνδέονται με ξύλινα τόξα (μπαγδατί) (Γουρίδης, 2008).

Η ανωδομή της στέγης συγκροτείται από ξύλινα ζευκτά, τοποθετημένα σε αποστάσεις 1,20 – 1,23 μ., με την παρεμβολή ενδιάμεσων αμειβόντων (Γουρίδης, 2008).

Το κτίριο αρχικά εδραζόταν σε πατημένο έδαφος. Κατά τις εργασίες αποκατάστασης ενισχύθηκε η θεμελίωση με την κατασκευή αφανούς χαλινού από οπλισμό σκυρόδεμα, κυρίως κάτω από τον ανατολικό και τον βόρειο τοίχο (Γουρίδης, 2008).

2.3.2. **Τα υλικά δόμησης και οι τεχνικές κατασκευής.**

Στην λιθοδομή χρησιμοποιούνται επιμελώς κατεργασμένοι λίθοι, τοποθετημένοι σε σχετικά κανονικές στρώσεις. Στον βόρειο τοίχο έχουν εντοπισθεί εντοιχισμένες επιτύμβιες πλάκες του 16ου και 17ου αιώνα.

Ο δυτικός τοίχος κατασκευάζεται με την τεχνική του τσατμά, δηλαδή με ξύλινο φέροντα σκελετό με πλήρωση από ακανόνιστους λίθους, με συνολικό πάχος περίπου 0,36 μ. (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Οι κίονες διαθέτουν πυρήνα από ανθεκτική ξυλεία μεσιάς (βελανιδιάς), ενώ για τα νεότερα στασίδια χρησιμοποιήθηκε ξυλεία καστανιάς (Γουρίδης, 2008) (Γουρίδης, 2025).

Στην αρχική κατασκευή εφαρμόστηκαν ασβεστοκονιάματα ή πηλοκονιάματα, ενώ κατά την αποκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν βελτιωμένα κονιάματα με θηραϊκή γη και υδράσβεστο (Γουρίδης, 2025).

Το δάπεδο είναι πλήρως επιστρωμένο με λίθινες επιτύμβιες πλάκες, οι οποίες χρονολογούνται από τον 17ο έως τον 19ο αιώνα (Γουρίδης, 2025).

2.4. Παθολογία της κατασκευής και γεωμετρικές παραμορφώσεις

2.4.1. **Οι ρηγματώσεις και οι δομικές ασυνέχειες στην κατασκευή.**

Διακρίνονται σαφείς κατακόρυφοι αρμοί διακοπής στην τοιχοποιία, οι οποίοι οριοθετούν τις επιμέρους οικοδομικές φάσεις του ναού (ενδεικτικά, μεταξύ κυρίως ναού και νάρθηκα) (Γουρίδης, 2008).

Παρατηρήθηκαν εκτεταμένες ρηγματώσεις στη λιθοδομή, οι οποίες αντιμετωπίστηκαν με καθαρισμό, ενέσεις ειδικού κονιάματος και ενίσχυση με μεταλλικό πλέγμα.

2.4.2. **Οι παραμορφώσεις και αποκλίσεις του κτίσματος.**

Πριν από την αποκατάσταση, το κτίριο παρουσίαζε έντονα στατικά προβλήματα: Μετά από εδαφικές επεμβάσεις τη δεκαετία του 1950, σημειώθηκε σημαντική ολίσθηση προς τα ανατολικά, με οριζόντιες μετακινήσεις που έφτασαν έως και τα 17 εκ. Καταγράφηκε απόκλιση του κελύφους από την κατακόρυφο (ύβωση), η οποία σε ορισμένα σημεία έφτανε τα 22 εκ.

Το δάπεδο εμφάνιζε παραμορφώσεις, λόγω της ανεπαρκούς έδρασης και της μακροχρόνιας χρήσης. Οι οριζόντιες δοκοί είχαν υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις, γεγονός που κατέστησε αναγκαία την αντικατάστασή τους (Γουρίδης, 2008).

2.4.3. **Οι φθορές και οι αλλοιώσεις των δομικών υλικών.**

Στις τοιχοποιίες διαπιστώθηκε εκτεταμένη αποσάθρωση των λίθων και των κονιαμάτων, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της μηχανικής αντοχής τους, ιδιαίτερα στην εσωτερική παρειά και σε ζώνες με αυξημένη παρουσία υγρασίας. Η φθορά αυτή επιδεινωνόταν από την κακή κατάσταση της αρχικής στέγης, η οποία συνέβαλε καθοριστικά στη συνολική επιβάρυνση της παθολογίας του μνημείου. Παράλληλα, τα σωζόμενα φυτικά μοτίβα στα τόξα διατηρούνταν σε ιδιαίτερα επιβαρυμένη κατάσταση, γεγονός που αντανακλά τη γενικευμένη φθορά του εσωτερικού διακόσμου. Αντίστοιχα, οι τέσσερις δεσποτικές εικόνες του 18ου αιώνα παρουσίαζαν σοβαρές αλλοιώσεις και απαιτούσαν εξειδικευμένες επεμβάσεις συντήρησης (Γουρίδης, 2008).

2.5. Ανάδειξη της αναγκαιότητας για την γεωμετρικά ελεγχόμενη αποτύπωση του μνημείου.

Η γεωμετρικά ελεγχόμενη αποτύπωση του μνημείου κρίνεται επιβεβλημένη για την ακριβή καταγραφή της σοβαρής παθολογίας του, η οποία περιλαμβάνει καθίζηση-ολίσθηση 17 εκατοστών προς τα ανατολικά και ύβωση-απόκλιση από την κατακόρυφο που αγγίζει τα 22 εκατοστά. Η διαδικασία αυτή αποτελεί τη βάση για τη σχεδιαστική και μελετητική τεκμηρίωση της αυθεντικής μορφής του ναού, επιτρέποντας την πρωτογενή επιστημονική έρευνα των διαδοχικών οικοδομικών του φάσεων (Γουρίδης, 2008).

Παράλληλα, η υψηλή ακρίβεια των γεωμετρικών δεδομένων είναι απαραίτητη για τη δομική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία εξασφαλίζει τη στατική επάρκεια του κτιρίου χωρίς να αλλοιώνεται η αυθεντικότητα του ιστορικού φέροντα οργανισμού. Τέλος, η αποτύπωση αυτή διευκολύνει τη δομική επίλυση της στέγης και του κελύφους, καθώς επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής με τις πραγματικές αναλυτικές της διαστάσεις και τις ιδιότητες των υλικών (Γουρίδης, 2008).

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Το θεωρητικό υπόβαθρο και οι τεχνολογίες ψηφιακής τεκμηρίωσης των μνημείων.

3.1. Οι αρχές αρχιτεκτονικής αποτύπωσης των μνημείων.

Η αρχιτεκτονική αποτύπωση των μνημείων συνιστά μια συστηματική και απαιτητική διαδικασία τεκμηρίωσης, η οποία διέπεται από σαφώς καθορισμένες μεθοδολογικές αρχές και κανόνες δεοντολογίας. Κεντρική παραδοχή αποτελεί το γεγονός ότι τα ιστορικά κτίσματα δεν υπακούουν σε ιδανικές γεωμετρικές συνθήκες, σπανίως εμφανίζουν απόλυτα ευθείες, ορθογώνιες ή οριζόντιες επιφάνειες, γεγονός που καθιστά αναγκαία την πιστή καταγραφή της πραγματικής τους κατάστασης, χωρίς εξιδανικεύσεις (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Η διαδικασία αποτύπωσης ακολουθεί ιεραρχική προσέγγιση, από το γενικό προς το ειδικό, σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας σφαλμάτων, και στηρίζεται στη συγκρότηση ενός αξιόπιστου συστήματος αναφοράς και ελέγχου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

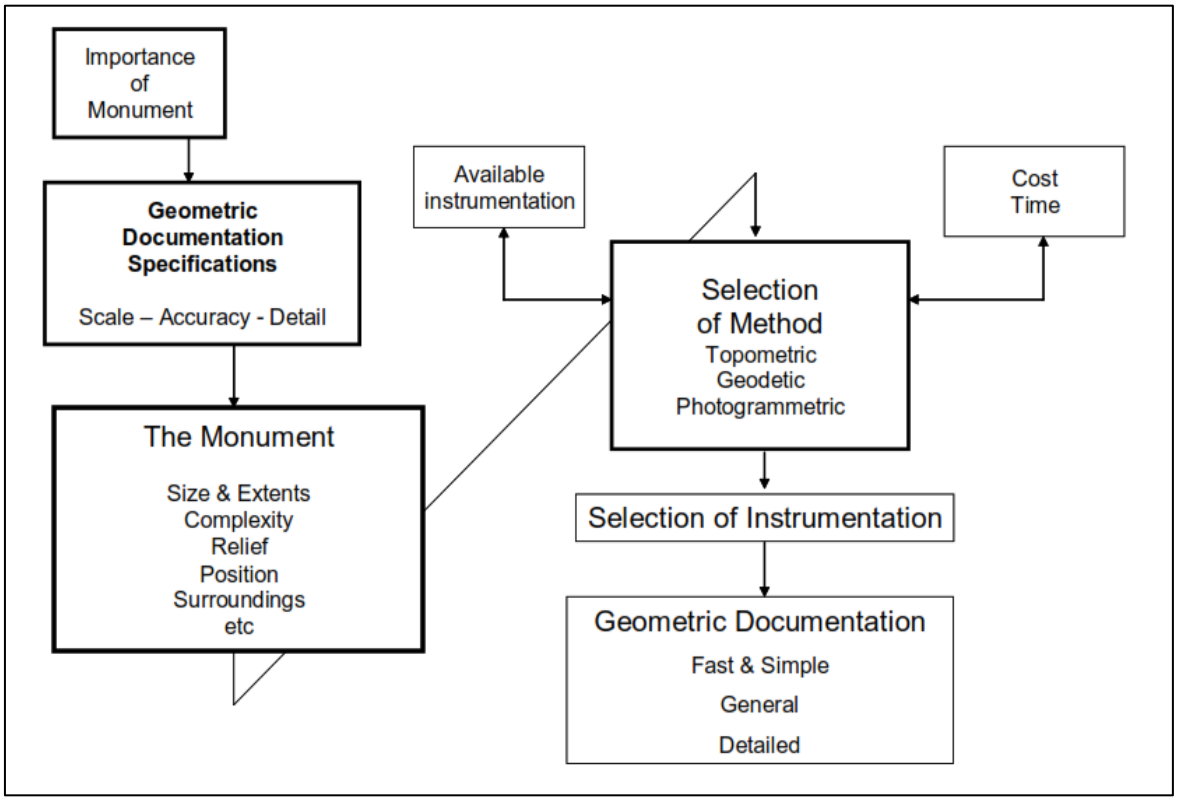
Ιδιαίτερα σε μελέτες συντήρησης, καθοριστική είναι η αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, δηλαδή η καταγραφή αποκλειστικά των ορατών στοιχείων, με σαφή διάκριση μεταξύ εμπειρικών παρατηρήσεων και ερμηνευτικών υποθέσεων (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Η γεωμετρική τεκμηρίωση περιλαμβάνει τη συλλογή, επεξεργασία και καταγραφή δεδομένων που προσδιορίζουν τη θέση, τη μορφή και τις διαστάσεις του μνημείου στον τρισδιάστατο χώρο σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Georgopoulos & Ioannidis, 2004). Τα παραγόμενα προϊόντα, όπως διανυσματικά σχέδια και τρισδιάστατα μοντέλα, οφείλουν να διαθέτουν μετρική ακρίβεια και να αποτελούν αξιόπιστη βάση τόσο για την ανάλυση του παρελθόντος όσο και για τον σχεδιασμό μελλοντικών επεμβάσεων (Georgopoulos & Ioannidis, 2004).

Η αρχιτεκτονική αποτύπωση συνίσταται στη συστηματική συλλογή και καταγραφή δεδομένων που αποδίδουν τη μορφολογία, την κατάσταση διατήρησης και τη λειτουργία μνημείων και χώρων σε συγκεκριμένες χρονικές φάσεις (11th ICOMOS General Assembly, 1996). Αποτελεί θεμελιώδες στάδιο της διαδικασίας συντήρησης, καθώς συμβάλλει στην τεκμηριωμένη κατανόηση και ανάδειξη των αξιών της πολιτιστικής κληρονομιάς (11th ICOMOS General Assembly, 1996).

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες αρχές του ICOMOS, οι μέθοδοι τεκμηρίωσης οφείλουν να είναι μη επεμβατικές, ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε επιβάρυνση ή φθορά του μνημείου (11th ICOMOS General Assembly, 1996). Η διαδικασία ξεκινά με την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, πριν από κάθε είδους παρέμβαση (Letellier, 2007). Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνεται η συλλογή πρωτογενών δεδομένων μέσω μετρητικών σχεδίων και οργανωμένης φωτογραφικής καταγραφής (Μπούρας, 1999).

Όπως βλέπουμε και στο Διάγραμμα 3, η επιλογή των τεχνικών και του επιπέδου λεπτομέρειας εξαρτάται από τη φύση του μνημείου, τους στόχους της τεκμηρίωσης και

τους διαθέσιμους πόρους (11th ICOMOS General Assembly, 1996) (Letellier, 2007). Εν τέλει, η αποτύπωση δεν περιορίζεται σε μια τεχνική διαδικασία, αλλά συνιστά μια ουσιαστική γνωστική λειτουργία, η οποία αποκαλύπτει τη δομική και συνθετική λογική του αρχιτεκτονικού έργου (Letellier, 2007).



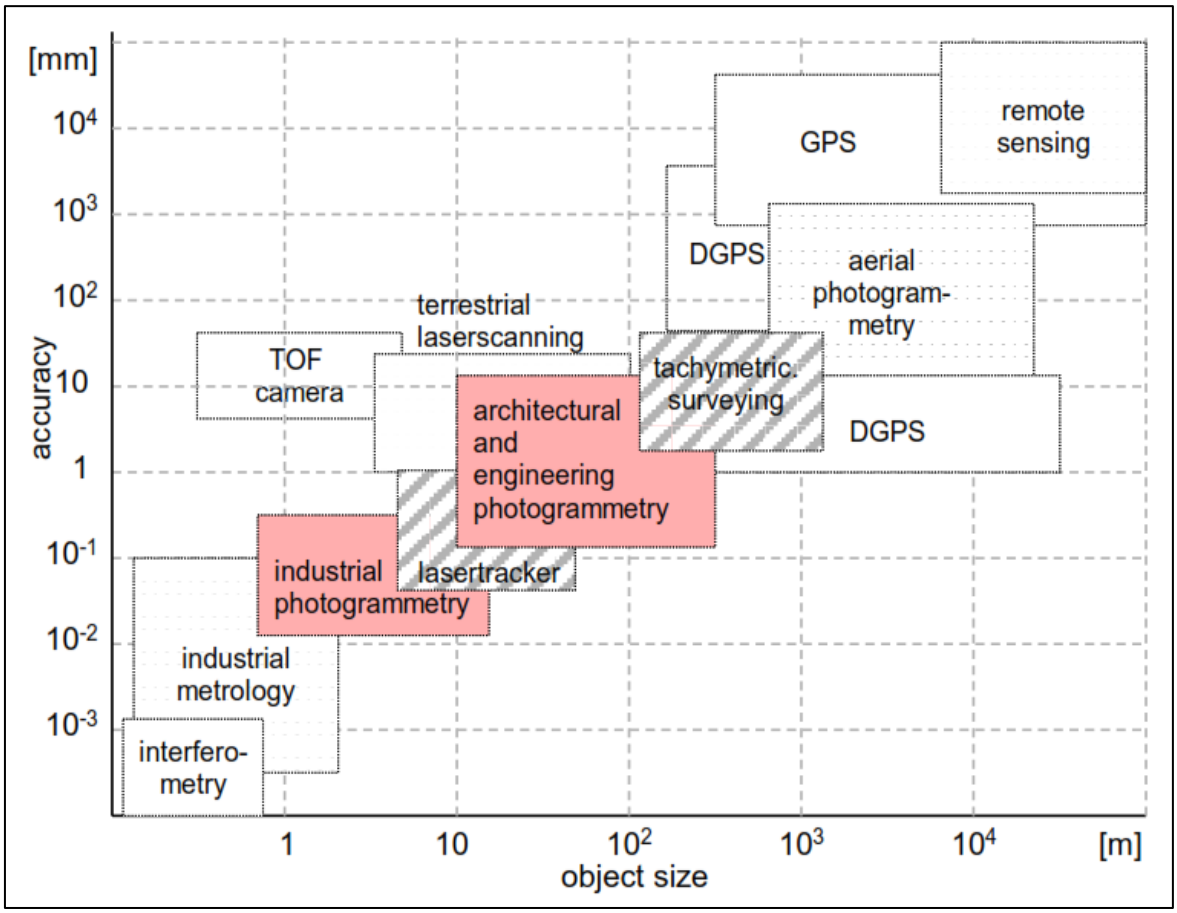
Διάγραμμα 3 – Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τη λογική σειρά επιλογής μεθόδων και οργάνων με βάση τη σημασία του μνημείου, την πολυπλοκότητά του και τις απαιτούμενες προδιαγραφές (κλίμακα, ακρίβεια, λεπτομέρεια) (Georgopoulos & Ioannidis, 2004).

3.1.1. **Η θεώρηση της γεωμετρικής ακρίβειας ανάλογα με τη μέθοδο.**

Η γεωμετρική ακρίβεια μιας αποτύπωσης συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο και τα όργανα που χρησιμοποιούνται, καθώς και με το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας και τις επιτρεπτές ανοχές της εκάστοτε εφαρμογής (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Οι σύγχρονες ψηφιακές μέθοδοι, όπως η φωτογραμμετρία και η επίγεια σάρωση laser, χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αντικειμενικότητας, ταχύτητα και δυνατότητα αυτοματοποιημένης επεξεργασίας, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές χειροκίνητες τεχνικές που είναι περισσότερο χρονοβόρες και ενέχουν υποκειμενικότητα (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Η ακρίβεια των φωτογραμμετρικών εφαρμογών εξαρτάται από παράγοντες όπως η κλίμακα των λήψεων, η γεωμετρία του δικτύου εικόνων και η επάρκεια της φωτογραφικής κάλυψης, με τη σχετική ακρίβεια για αρχιτεκτονικές εφαρμογές να κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1:5.000 και 1:20.000 (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Αντίστοιχα, στην επίγεια

σάρωση laser (TLS), η ακρίβεια επηρεάζεται από την απόσταση μέτρησης, τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης και τα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, ενώ συχνά εμφανίζονται φαινόμενα σφαλμάτων στις ακμές, όπως το λεγόμενο mixed pixel effect. Η αξιολόγηση της ακρίβειας πραγματοποιείται με τη χρήση στατιστικών δεικτών, όπως η τυπική απόκλιση (σ) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS), που επιτρέπουν τον εντοπισμό τοπικών αποκλίσεων και γεωμετρικών αλλοιώσεων (Salah, Geczy, & Karolyfi, 2025). Συνολικά, οι απαιτήσεις ακρίβειας διαφοροποιούνται ανάλογα με την κλίμακα και τον σκοπό της αποτύπωσης, κυμαινόμενες από επίπεδο εκατοστών για γενικές εφαρμογές έως επίπεδο χιλιοστού για εξειδικευμένες μελέτες συντήρησης (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014) (Salah, Geczy, & Karolyfi, 2025).



Διάγραμμα 4 – Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση της Μεθόδου, του μεγέθους του αντικειμένου και της επιταχυνόμενης ακρίβειας (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014).

Όπως βλέπουμε και στο Διάγραμμα 4, η γεωμετρική ακρίβεια μιας αποτύπωσης εξαρτάται άμεσα από την κλίμακα και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, καθώς και από το επιδιωκόμενο επίπεδο ανάλυσης (Grussenmeyer, Landes, Voegtle, & Ringle, 2008). Στη βιβλιογραφία διακρίνονται τρία βασικά επίπεδα τεκμηρίωσης — αναγνωριστικό, προκαταρκτικό και λεπτομερές — με την αύξηση της ακρίβειας να συνεπάγεται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε χρόνο, εξοπλισμό και κόστος (Letellier, 2007).

Οι επίγειοι σαρωτές laser (TLS) παρέχουν δεδομένα υψηλής πυκνότητας, ωστόσο η ακρίβειά τους επηρεάζεται από παραμέτρους όπως η απόσταση μέτρησης, η γωνία

πρόσπτωσης και οι ιδιότητες ανακλαστικότητας των υλικών (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021). Συχνά εμφανίζονται σφάλματα στις ακμές, λόγω του φαινομένου των μικτών σημείων (mixed pixel effect) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

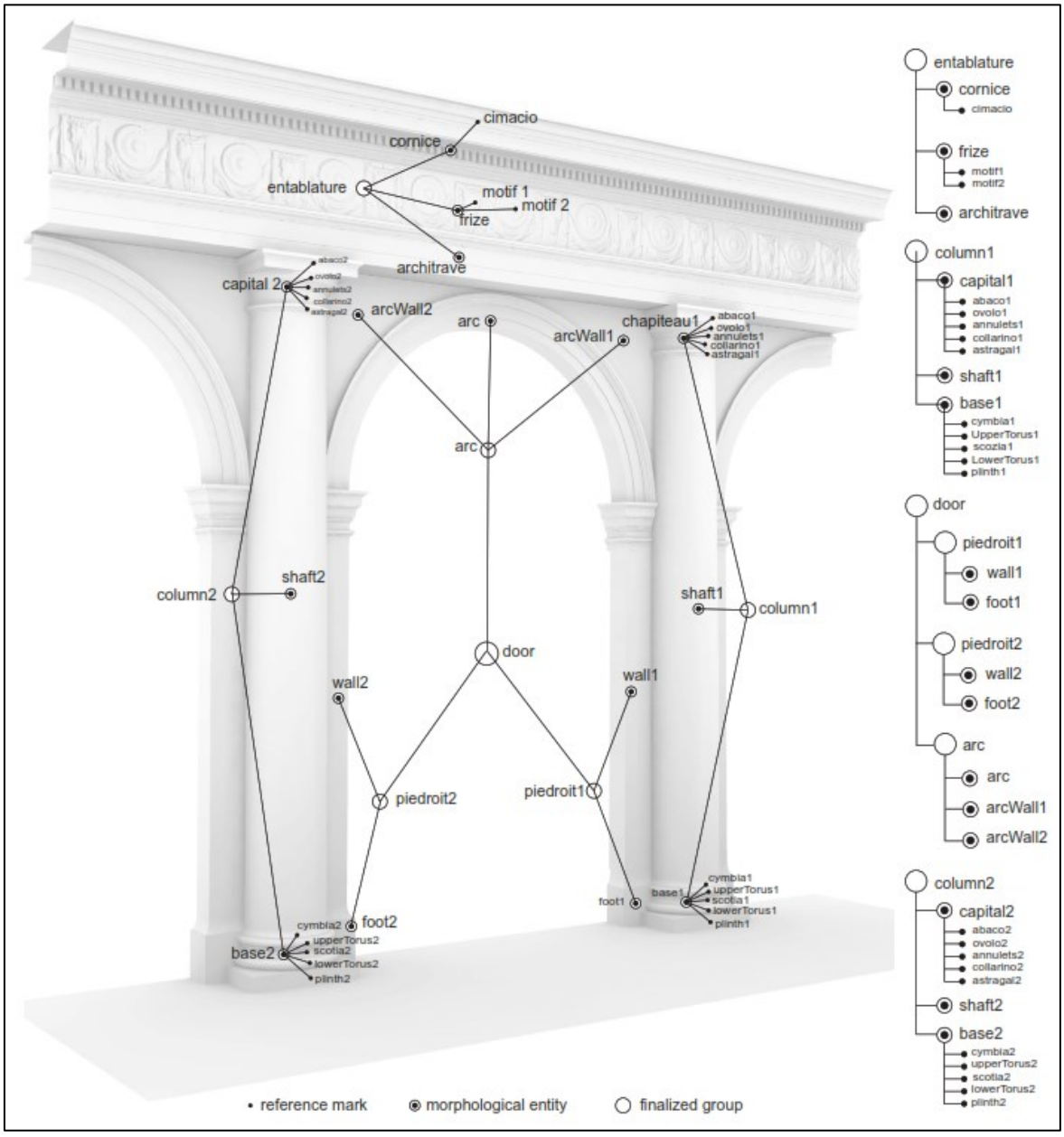
Η φωτογραμμετρία εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα υφής και χρωματικής πληροφορίας, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις υστερεί ως προς τη γεωμετρική ακρίβεια σε σύγκριση με τη σάρωση laser. Επιπλέον, απαιτεί επαρκή επικάλυψη εικόνων και ορθή βαθμονόμηση για τον περιορισμό του θορύβου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Αντίθετα, οι χειροκίνητες μέθοδοι, παρά τον αυξημένο χρόνο που απαιτούν, επιτρέπουν άμεση επαφή με το αντικείμενο και ενδελεχή παρατήρηση, προσφέροντας ποιοτικά στοιχεία που ενδέχεται να διαφεύγουν από τις αυτοματοποιημένες τεχνικές (Letellier, 2007). Παράλληλα, σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα, όπως οι σταθμοί total station και οι σαρωτές τριγωνισμού, μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια της τάξης του χιλιοστού σε μικρές αποστάσεις (Letellier, 2007) (Boehler, Heinz, & Marbs).

3.1.2. **Θεωρητική προσέγγιση της ερμηνευτικής αποτύπωσης και η τεκμηρίωση της αρχιτεκτονικής μορφής.**

Η αρχιτεκτονική αποτύπωση υπερβαίνει τη στενή έννοια της απλής μετρικής καταγραφής και συγκροτεί μια διαδικασία ερμηνευτικής προσέγγισης της δομημένης πραγματικότητας (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Στο πλαίσιο αυτό, μια ολοκληρωμένη αποτύπωση δεν περιορίζεται στην αποτύπωση της γεωμετρίας, αλλά επιδιώκει την «ανάγνωση» του μνημείου ως ιστορικού και κατασκευαστικού συνόλου, μέσω της αναγνώρισης οικοδομικών φάσεων, τεχνικών δόμησης, στρωματογραφικών σχέσεων και ιδιαιτεροτήτων της δομής (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Η απλή συλλογή μετρήσεων, χωρίς ερμηνευτική επεξεργασία, περιορίζει ουσιαστικά τη δυνατότητα κατανόησης, καθώς η τεκμηρίωση οφείλει να συνθέτει ποσοτικά δεδομένα με ιστορική και αναλυτική προσέγγιση (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Η αντίληψη αυτή ενισχύεται από τη θεώρηση της αποτύπωσης ως μιας μορφής κριτικής ερμηνείας, που στοχεύει στη σε βάθος κατανόηση του μνημείου και της αρχιτεκτονικής του λογικής (Letellier, 2007) (Μπούρας, 1999). Υπό αυτή την οπτική, η σχεδιαστική αναπαράσταση λειτουργεί ως ένα «ιστορικο-κριτικό εργαλείο», μέσω του οποίου αναδεικνύονται τόσο οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες όσο και οι διαδοχικές φάσεις εξέλιξης του μνημείου (Letellier, 2007). Χαρακτηριστικά, η αρχιτεκτονική μορφή μπορεί να αποδοθεί μέσα από πολυεπίπεδα σχήματα αναπαράστασης, όπως το τριεπίπεδο γράφημα που περιλαμβάνει μορφικές οντότητες, ομάδες και σημεία αναφοράς, αναδεικνύοντας τη δομική και εννοιολογική οργάνωση του μνημείου (De Luca, 2017)(Εικόνα 8).



Εικόνα 8 – Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την αρχιτεκτονική μορφή μέσω ενός γραφήματος τριών επιπέδων (μορφικές οντότητες, ομάδες, σημεία αναφοράς) (De Luca, 2017).

Στο σύγχρονο θεωρητικό πλαίσιο, η γεωμετρική πληροφορία εντάσσεται σε ευρύτερα σημασιολογικά μοντέλα αναπαράστασης, όπου η αρχιτεκτονική μορφή αποδίδεται όχι μόνο μέσω διαστάσεων, αλλά και μέσω ποιοτικών χαρακτηριστικών, όπως η υφή και το χρώμα (De Luca, Busayarat, Stefani, Veron, & Florenzano, 2011). Στο πλαίσιο αυτό διακρίνονται τρία βασικά επίπεδα γεωμετρικής αναπαράστασης: τα νέφη σημείων (point clouds), που αποδίδουν με υψηλή ακρίβεια τα δεδομένα χωρίς ερμηνευτική επεξεργασία, οι καμπυλογραμμικές αναπαραστάσεις, που αναδεικνύουν βασικά μορφολογικά όρια και περιγράμματα, και τα πολυγωνικά μοντέλα, τα οποία επιτρέπουν την απόδοση του όγκου και της οπτικής υπόστασης των επιφανειών (De Luca, Busayarat, Stefani, Veron, & Florenzano, 2011). Μέσα από αυτή τη διαβάθμιση, η αποτύπωση μετασχηματίζεται σε

διαδικασία παραγωγής γνώσης, που αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη κατανόηση της μορφής, της δομής και της ιστορικής εξέλιξης του αρχιτεκτονικού αντικειμένου (Pellegri, 2015).

Η εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών ενισχύει περαιτέρω αυτή την κατεύθυνση, με έμφαση στον σημασιολογικό εμπλουτισμό (semantic enrichment) των τρισδιάστατων μοντέλων και τη διασύνδεση γεωμετρικών δεδομένων με ιστορική τεκμηρίωση ((De Luca, 2017). Μέσω του HBIM (Historic Building Information Modelling), η αποτύπωση μετασχηματίζεται σε ένα δυναμικό σύστημα παραμετρικών αντικειμένων, το οποίο ενσωματώνει κανόνες και αναλογίες που προκύπτουν από ιστορικές πραγματείες, όπως αυτές του Βιτρούβιου και του Palladio (Murphy, McGovern, & Pavia, 2013).

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την καταγραφή όχι μόνο των εμφανών χαρακτηριστικών, αλλά και των αφανών ιδιοτήτων του μνημείου, όπως οι τεχνικές κατασκευής και η σύσταση των υλικών. Παράλληλα, η μορφολογική ανάλυση αξιοποιεί μορφολογικούς περιγραφείς για την ενίσχυση της αναγνωσιμότητας των νεφών σημείων, διευκολύνοντας την ταξινόμηση γεωμετρικών μορφών και τον εντοπισμό αποκλίσεων (Murphy, McGovern, & Pavia, 2013).

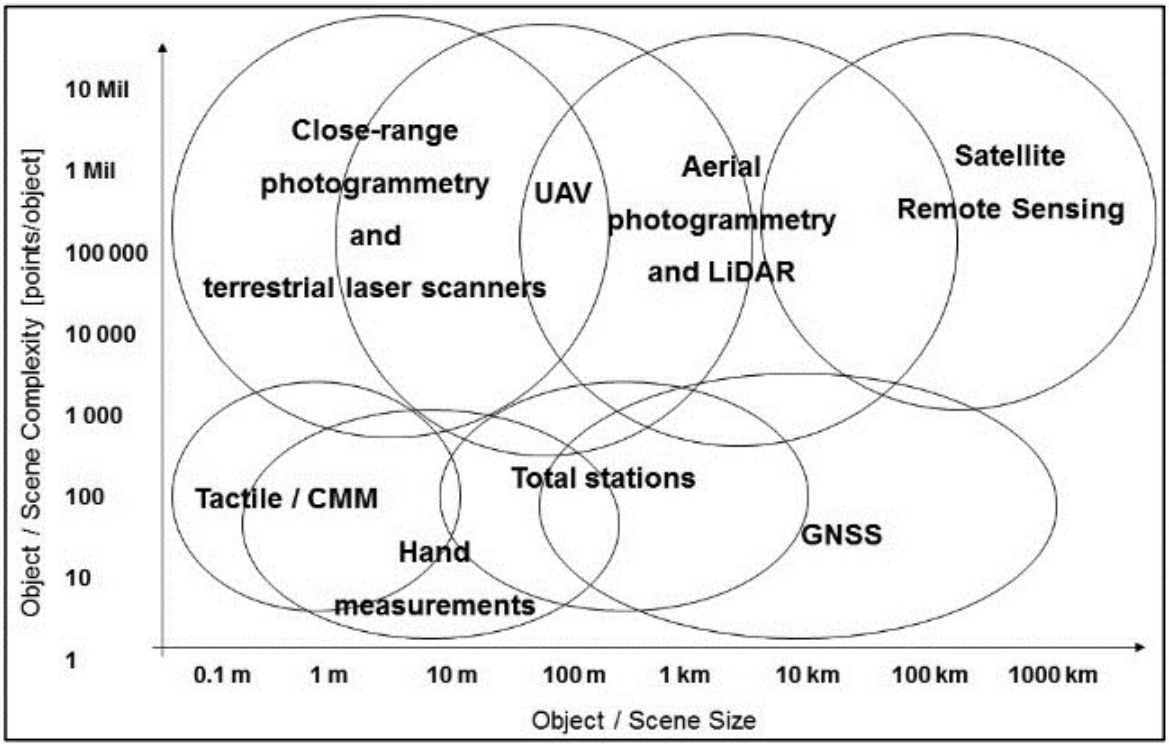
Συνολικά, η ερμηνευτική αποτύπωση συνιστά μια συνθετική διαδικασία που ενσωματώνει τη μετρική ακρίβεια με την ποιοτική και ιστορική ανάλυση, μετατρέποντας το μνημείο από αντικείμενο απλής καταγραφής σε ένα συνεκτικό και ερμηνεύσιμο σύστημα γνώσης (Letellier, 2007) (De Luca, 2017).

3.2. Η επίγεια φωτογραμμετρία και η εναέρια φωτογραμμετρία.

Η φωτογραμμετρία αποτελεί επιστημονικό πεδίο που ασχολείται με την εξαγωγή ακριβών μετρικών, γεωμετρικών και σημασιολογικών πληροφοριών από εικόνες, μετασχηματίζοντας δισδιάστατα δεδομένα σε τρισδιάστατες ψηφιακές αναπαραστάσεις (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014). Στο πλαίσιο αυτό, διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες: η επίγεια και η εναέρια φωτογραμμετρία, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τη γεωμετρία λήψης και την κλίμακα εφαρμογής (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Η ταξινόμηση αυτή μπορεί να επεκταθεί σε ένα ευρύτερο φάσμα τεχνικών, το οποίο περιλαμβάνει επίσης εφαρμογές με UAV και δορυφορικά συστήματα, όπως αποτυπώνεται και σχηματικά στη σχετική κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της σκηνής (Recomondino & Campana, 2014) (Εικόνα 9).

Η επίγεια φωτογραμμετρία (Terrestrial Photogrammetry) βασίζεται σε λήψεις που πραγματοποιούνται από σταθερές θέσεις στο έδαφος, με τις κάμερες να βρίσκονται σε άμεση προσβασιμότητα, επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού. Εφαρμόζεται ευρέως στην αποτύπωση αρχιτεκτονικών μνημείων και αρχαιολογικών χώρων, αξιοποιώντας εξοπλισμό που κυμαίνεται από απλές ψηφιακές κάμερες έως εξειδικευμένες μετρικές διατάξεις υψηλής ακρίβειας (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014)

(Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Kraus, Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans, 2004).



Εικόνα 9 – Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνικές, καθώς ταξινομούνται σε (επίγειες, UAV, εναέριες, δορυφορικές) ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της σκηνής (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Αντίθετα, η εναέρια φωτογραμμετρία (Aerial Photogrammetry) πραγματοποιείται από ιπτάμενες πλατφόρμες, όπως αεροσκάφη, ελικόπτερα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV/drones), επιτρέποντας την ταχεία αποτύπωση εκτεταμένων ή δυσπρόσιτων περιοχών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Nex & Remondino, 2014). Ιδιαίτερα τα UAV έχουν αναδειχθεί σε ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική λύση, παρέχοντας εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης (GSD), οι οποίες αξιοποιούνται για την παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας (DSM) και ορθοφωτογραφιών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Nex & Remondino, 2014) (Colomina & Molina, 2014). Επιπλέον, η φωτογραμμετρία επεκτείνεται και σε δορυφορικές εφαρμογές, υποστηρίζοντας τη χαρτογράφηση μεγάλης κλίμακας και τη μελέτη μεταβολών του τοπίου (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Για την αποτύπωση των μνημείων συνήθως χρησιμοποιείται η τεχνική των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα καθώς είναι ιδιαίτερα αποδοτική και οικονομική. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα στην αποτύπωση στεγών και άλλων δυσπρόσιτων σημείων όπου οι επίγειες τεχνικές αδυνατούν να προσφέρουν αποδοτικές λύσεις (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Nex & Remondino, 2014).

Πριν από την πτήση πρέπει να καθορισθούν κάποιες παράμετροι για την βέλτιστη απόδοση ανάλογα με τις μελέτες που πρόκειται να εξυπηρετήσουν. Οι παράμετροι αυτές είναι το ύψος πτήσης καθώς και ο καθορισμός της περιοχής πτήσης και ποια πρέπει να είναι η επικάλυψη των φωτογραφιών. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα του τρισδιάστατου μοντέλου που σχηματίζεται (Nex & Remondino, 2014).

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν την δυνατότητα για αυτοματοποιημένες εφαρμογές πτήσης. Καθώς όμως παρουσιάζονται ιδιαίτερες παράμετροι και προβληματισμοί προτιμάται η χειροκίνητη πτήση. Η τεχνική μπορεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα χωρικά κατά την αποτύπωση αλλά και στην αντιμετώπιση εμποδίων όπως οι ριπές ανέμου, τα δέντρα, και άλλα απροσδόκητα χωρικά ζητήματα (Nex & Remondino, 2014).

Συμπερασματικά, μπορούμε να καταλάβουμε ότι χωρίς την εναέρια φωτογραμμετρία προκύπτουν ασυνέχειες στο μοντέλο καθώς οι επίγειες λήψεις δεν καλύπτουν όλες τις επιφάνειες του μοντέλου, καθώς η ορατότητα είναι περιορισμένη. Έτσι, η χρήση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) συμβάλλει στην παραγωγή ολοκληρωμένων και αξιόπιστων αποτελεσμάτων (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Οι δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου είναι η γεωμετρία των λήψεων και η επικάλυψη των εικόνων. Από αυτούς τους παράγοντες εξαρτάται η ευθυγράμμιση των εικόνων και η ποιότητα του παραγόμενου μοντέλου.

Η αυξημένη επικάλυψη των σημείων είναι ο παράγοντας στον οποίο οφείλεται η αποφυγή τυφλών σημείων και η διασφάλιση επίτευξης επαρκών κοινών σημείων για να καλύπτεται το σύνολο του μοντέλου χωρίς κενά. Κατά την χρήση των UAV στην πράξη η επικάλυψη φτάνει το 80-90%. Πιθανή απόκλιση κατά την χρήση των UAV μπορεί να οφείλεται στις ριπές του ανέμου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

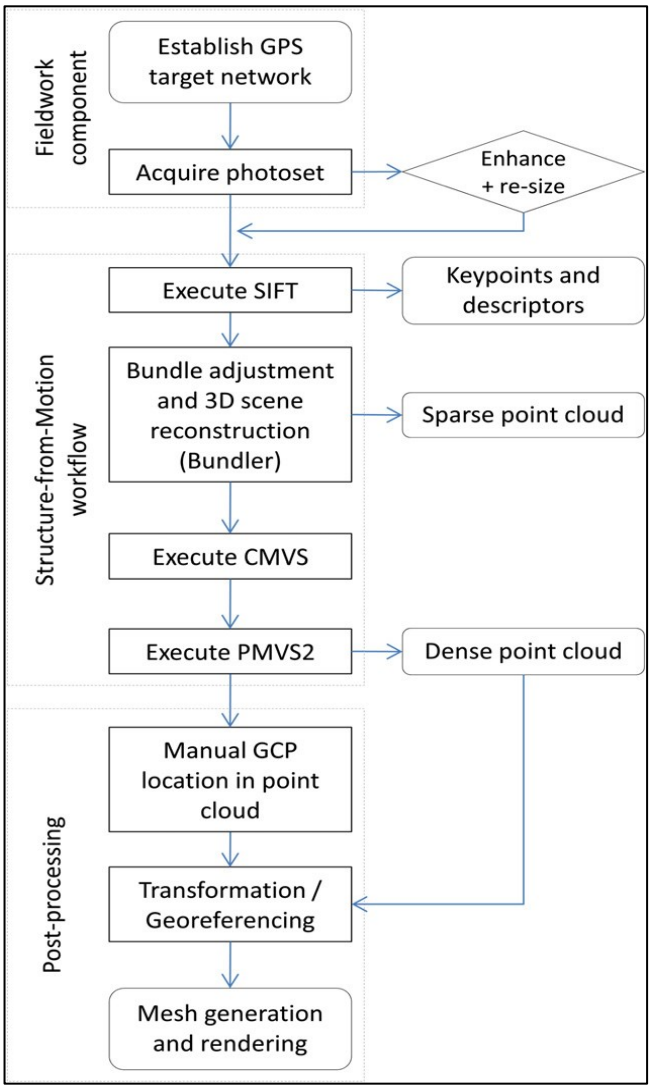
Η γεωμετρία των λήψεων είναι επίσης πολύ σημαντική. Επιθυμητό είναι οι φωτογραφικές λήψεις να είναι ομόκεντρες ώστε να αποδίδουν βέλτιστα οι αλγόριθμοι κατά το Structure-from-Motion (SfM) και να βελτιώνεται η ακρίβεια της τρισδιάστατης ανακατασκευής (James & Robson, 2012).

Για την αξιόπιστη ανακατασκευή ενός σημείου θα πρέπει ένα κοινό σημείο να εμφανίζεται σε τρεις φωτογραφίες. Επίσης η λήψη φωτογραφιών ανά 10-20° ενισχύει την κάλυψη και την γεωμετρική σταθερότητα του φωτογραμμετρικού δικτύου. Η επικάλυψη των λήψεων είναι ο βασικός παράγοντας για την παραγωγή ακριβών και αξιόπιστων μοντέλων (James & Robson, 2012).

3.2.1. **Ανάλυση της θεωρίας Structure from Motion.**

Η μέθοδος Structure from Motion (SfM), προερχόμενη από τον χώρο της υπολογιστικής όρασης, συνιστά μια σύγχρονη και ιδιαίτερα αποτελεσματική προσέγγιση για την ταυτόχρονη εκτίμηση της γεωμετρίας της σκηνής και του προσανατολισμού των καμερών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012). Σε αντίθεση με την κλασική φωτογραμμετρία, η SfM δεν προϋποθέτει την ύπαρξη προκαθορισμένου

δικτύου σημείων με γνωστές τρισδιάστατες συντεταγμένες, αλλά βασίζεται στην αυτόματη ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων (keypoints) σε πολλαπλές επικαλυπτόμενες εικόνες (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012). Η συνολική ροή της μεθόδου ακολουθεί μια διαδοχική και αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία απεικονίζεται χαρακτηριστικά σε αντίστοιχα διαγράμματα ροής εργασιών (Εικόνα 10) (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012).



Εικόνα 10 - Διάγραμμα ροής εργασιών για το Structure from Motion (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012).

Η διαδικασία του SfM ξεκινά με την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των λήψεων, μέσω αλγορίθμων όπως ο SIFT, ο οποίος παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε μεταβολές κλίμακας, περιστροφής και φωτισμού (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012) (Schonberger & Frahm, 2016). Ακολουθεί η αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων και ο γεωμετρικός έλεγχος μέσω τεχνικών όπως ο RANSAC, με στόχο την απομάκρυνση εσφαλμένων αντιστοιχίσεων (Schonberger & Frahm, 2016) (Lowe, 2004). Εφόσον ολοκληρωθεί η αντιστοίχιση των κοινών σημείων υπολογίζονται οι θέσεις των καμερών. Οι θέσεις των καμερών είναι δυνατόν να υπολογισθούν από τις μικρές μετατοπίσεις που διαπιστώνονται από ένα σημείο μίας λήψης σε σχέση με το ίδιο σημείο επόμενης λήψης. Το κάθε σημείο πάνω στον αισθητήρα της κάμερας λαμβάνει τοπικά X,Y συντεταγμένες.

Η διαδικασία της τρισδιάστατης ανακατασκευής από εικόνες βασίζεται θεμελιωδώς στις αρχές της επιπολικής γεωμετρίας, η οποία ορίζει τους γεωμετρικούς περιορισμούς και τις σχέσεις μεταξύ των σημείων που απεικονίζονται σε δύο ή περισσότερες λήψεις, καθορίζοντας ότι ένα σημείο σε μια εικόνα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη επιπολική γραμμή στην άλλη. Στο πλαίσιο των σύγχρονων ροών εργασίας, όπως το Structure from Motion (SfM), ο αρχικός προσδιορισμός της σχετικής θέσης και του προσανατολισμού των καμερών επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικών επιλύσεων του essential matrix (ουσιώδης

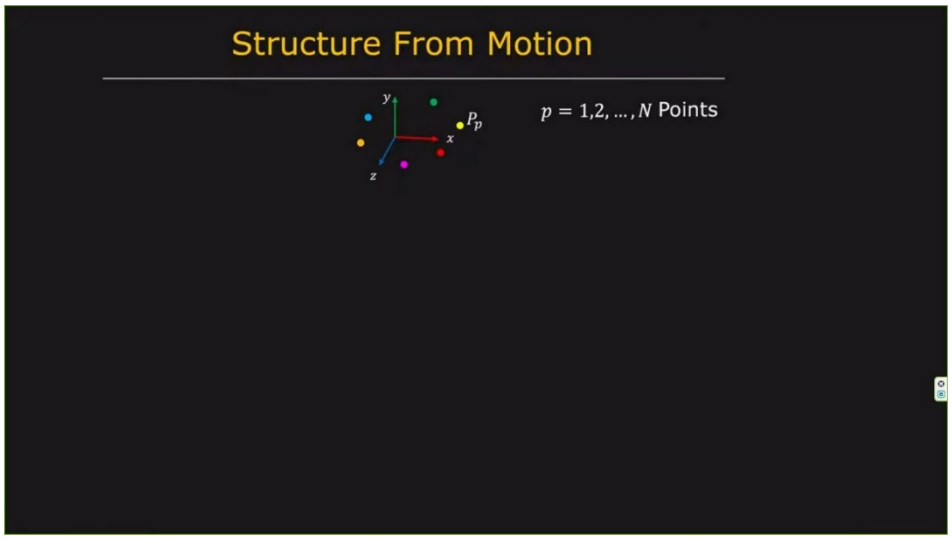
πίνακας), ο οποίος για βαθμονομημένες κάμερες εμπεριέχει την πλήρη γεωμετρική πληροφορία της κίνησης και επιτρέπει τον υπολογισμό των παραμέτρων των καμερών και της δομής του σκηνικού από αντιστοιχίες σημείων. Η τελική και πιο κρίσιμη φάση της επεξεργασίας είναι η μέθοδος δέσμης (bundle adjustment), μια αυστηρή διαδικασία ταυτόχρονης και μη-γραμμικής βελτιστοποίησης που διορθώνει από κοινού τις θέσεις των καμερών και τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) για τη διασφάλιση της μέγιστης γεωμετρικής ακρίβειας και παγκόσμιας συνέπειας του παραγόμενου μοντέλου. (Remondino & Campana, 2014) (Hartley & Zisserman, 2004) (Lourakis & Argyros, 2009)

Στην Εικόνα 11 βλέπουμε τα δύο φωτοσταθερά Α4 και Α5 μετά την πρώτη αντιστοίχισή τους. Το λογισμικό metashape έχει υλοποιήσει τις διευθύνσεις τους και αναμένει την αντιστοίχιση με το επόμενο σημείο. Εάν επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία για το ίδιο χαρακτηριστικό σημείο σε κάθε λήψη, τότε οι διευθύνσεις από την κάθε λήψη πρέπει να τέμνονται σε μία θέση στον τρισδιάστατο χώρο.

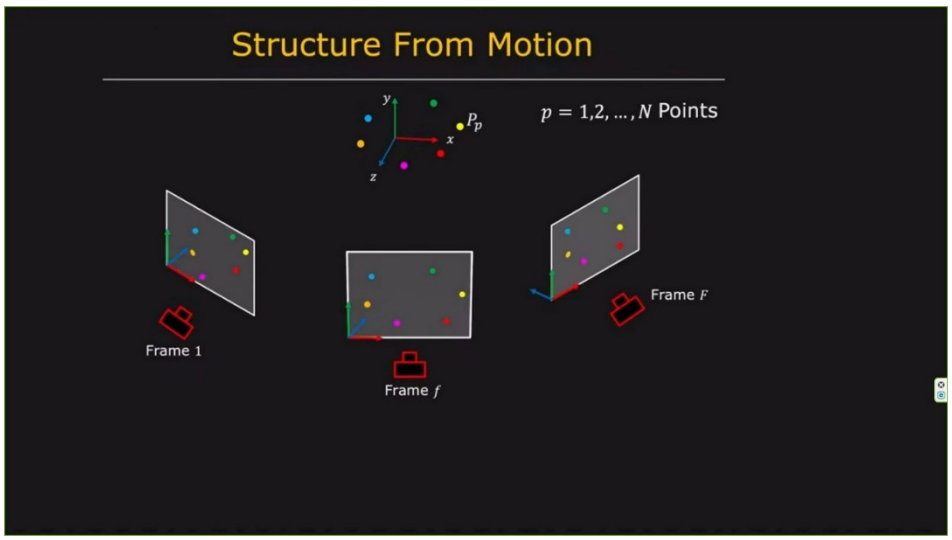


Εικόνα 11 - Δεξιά στην φωτογραφία διακρίνουμε την πρώτη αντιστοίχιση από το SFM για τα σημεία Α4 και Α5.

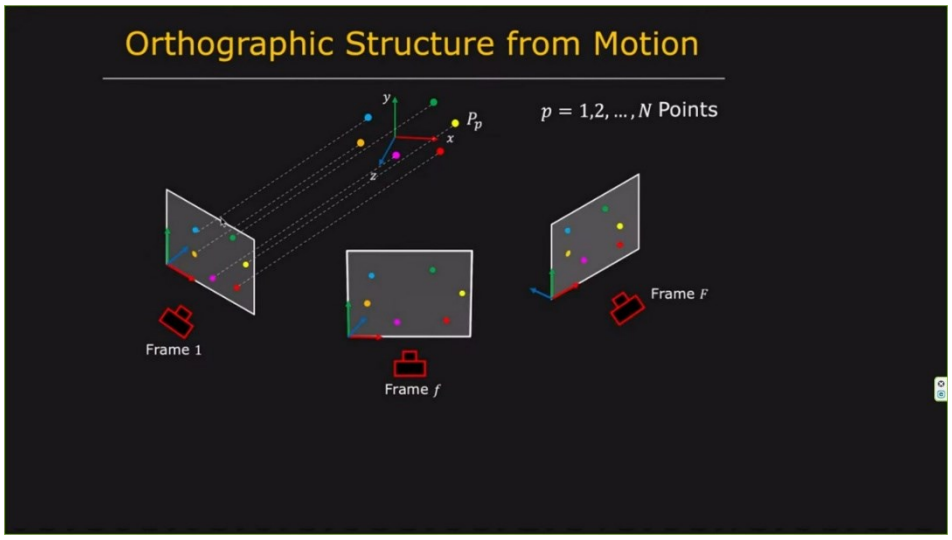
Εφόσον η διαδικασία αυτή επαναληφθεί για κάθε χαρακτηριστικό σημείο, το αποτέλεσμα θα είναι η παραγωγή ενός αραιού νέφους σημείων (sparse point cloud) σε σχετικό σύστημα αναφοράς, το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί σε απόλυτο μέσω της χρήσης σημείων ελέγχου εδάφους (GCPs) (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012) (Schonberger & Frahm, 2016).



Εικόνα 12 - Το αντικείμενο φωτογράφισης στον τρισδιάστατο χώρο.



Εικόνα 13 - Απαιτούνται τρεις κατ' ελάχιστον φωτογραφίες.

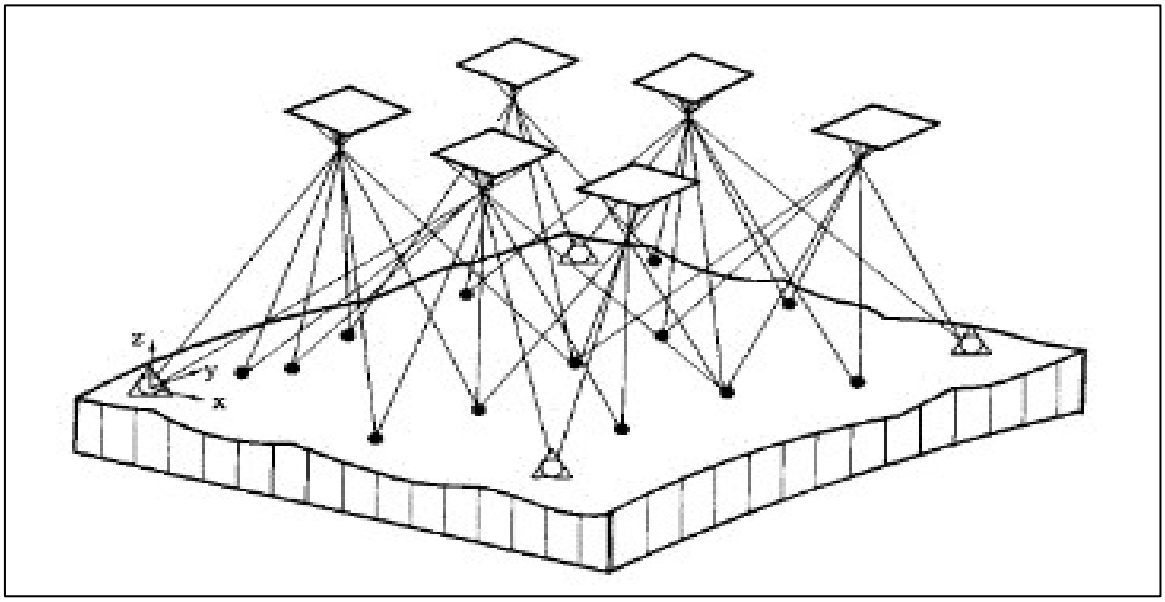


Εικόνα 14 - Κάθετη προβολή των σημείων στον χώρο.

3.2.2. **Μέθοδος βελτιστοποίησης την γεωμετρίας.**

Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας στη φωτογραμμετρική ανακατασκευή επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας Bundle Adjustment (BA), η οποία αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη διασφάλιση της ακρίβειας του μοντέλου (Lourakis & Argyros, 2009). Πρόκειται για μια μη γραμμική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η οποία επιλύει ταυτόχρονα τις παραμέτρους εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των καμερών, καθώς και τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) (Schonberger & Frahm, 2016) (Lourakis & Argyros, 2009). Η βασική αρχή της διαδικασίας αυτής εδράζεται στη γεωμετρική σύγκλιση των ακτίνων παρατήρησης από πολλαπλές θέσεις λήψης προς τα σημεία του αντικειμένου, όπως αποτυπώνεται χαρακτηριστικά και στη σχετική σχηματική απεικόνιση της μεθόδου (Εικόνα 15) (Kraus, 2004).

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ευρέως ο αλγόριθμος Levenberg–Marquardt, ο οποίος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Gauss–Newton και gradient descent, εξασφαλίζοντας ταχεία και σταθερή σύγκλιση (Lourakis & Argyros, 2009). Σε περιπτώσεις μεγάλων συνόλων δεδομένων, η υπολογιστική επιβάρυνση μειώνεται μέσω του συμπληρώματος Schur (Schur complement), που επιτρέπει τον διαχωρισμό της επίλυσης των παραμέτρων καμερών από εκείνες των σημείων (Schonberger & Frahm, 2016) (Lourakis & Argyros, 2009). Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει τη μετρική συνέπεια και αξιοπιστία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Schonberger & Frahm, 2016).

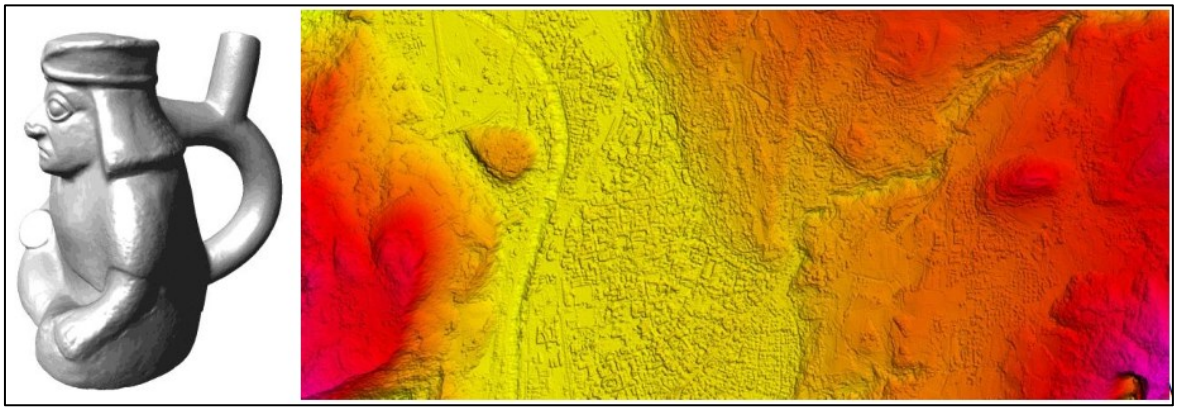


Εικόνα 15 – Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κεντρική ιδέα του bundle adjustment, όπου οι δέσμες ακτίνων από πολλαπλές κάμερες τέμνονται στα σημεία του αντικειμένου (Kraus, 2004).

3.2.3. **Θεωρητική ανάλυση για την παραγωγή πυκνού νέφους σημείων.**

Μετά τον προσδιορισμό του προσανατολισμού των εικόνων, ακολουθεί η παραγωγή πυκνού νέφους σημείων μέσω τεχνικών dense image matching (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Nex & Remondino, 2014). Στόχος της διαδικασίας είναι η εύρεση αντιστοιχίσεων για σχεδόν κάθε εικονοστοιχείο, επιτρέποντας τη δημιουργία μιας λεπτομερούς αναπαράστασης της επιφάνειας (Alshawabkeh, El-Khalili, Almasri, Bala'awi, & Al-Massarweh, 2020) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021). Η αρχή αυτής της πυκνής αντιστοίχισης αποτυπώνεται χαρακτηριστικά σε αποτελέσματα όπου η πληροφορία βάθους αποδίδεται με ψευδοχρωματική κωδικοποίηση, αναδεικνύοντας τις μορφολογικές διαφοροποιήσεις της επιφάνειας (Remondino, 2011) (Εικόνα 16).

Σύγχρονοι αλγόριθμοι, όπως ο Semi-Global Matching (SGM), επιτρέπουν την παραγωγή πυκνών Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας ακόμη και σε σύνθετες γεωμετρίες (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Nex & Remondino, 2014) (Remondino, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning., 2011). Εναλλακτικά, προσεγγίσεις βασισμένες σε τμήματα εικόνας (patch-based), όπως η μέθοδος PMVS, υλοποιούν την ανακατασκευή μέσω διαδοχικών σταδίων αντιστοίχισης, επέκτασης και φιλτραρίσματος (Furukawa & Ponce). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό νέφος σημείων που αποδίδει τόσο τη γεωμετρία όσο και την υφή του αντικειμένου, αποτελώντας τη βάση για τη δημιουργία πολυγωνικών πλεγμάτων (mesh) (Remondino, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning., 2011).



Εικόνα 16 - Αποτελέσματα Πυκνής Αντιστοίχισης πυκνών νεφών σημείων με ψευδοχρώματα που αναπαριστούν το βάθος των pixel (Remondino, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning., 2011).

3.2.4. **Οι θεωρητικές πηγές σφαλμάτων στη φωτογραμμετρική ανακατασκευή.**

Τα σφάλματα στη φωτογραμμετρική διαδικασία διακρίνονται σε σφάλματα του συστήματος απόκτησης και σε σφάλματα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της σκηνής (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Στα συστηματικά σφάλματα περιλαμβάνονται οι παραμορφώσεις του φακού (ακτινικές και εφαπτομενικές), η ατμοσφαιρική διάθλαση και η καμπυλότητα της γης, καθώς και αστάθειες του αισθητήρα ή του μέσου καταγραφής (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

Παράλληλα, η ίδια η φύση του αντικειμένου μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες, όπως στην περίπτωση επιφανειών χωρίς υφή, έντονων σκιών ή απότομων μεταβολών φωτισμού, που επηρεάζουν αρνητικά τη διαδικασία αντιστοίχισης (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021). Το φαινόμενο της απόφραξης (occlusion) οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας (Stal, Tack, De Maeyer, De Wulf, & Goosens, 2011), ενώ τυχαία σφάλματα στις μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων και των σημείων ελέγχου επηρεάζουν τη συνολική ακρίβεια της ανακατασκευής (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Η συστηματική κατηγοριοποίηση και κατανόηση των παραπάνω πηγών σφαλμάτων αποτυπώνεται συνοπτικά στον Πίνακα 2, όπου παρουσιάζεται η διάκριση μεταξύ σφαλμάτων που σχετίζονται με το σύστημα καταγραφής και εκείνων που απορρέουν από την περιοχή ενδιαφέροντος, αναδεικνύοντας την πολυπαραμετρική φύση της φωτογραμμετρικής διαδικασίας (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Πίνακας 2 - Ο παραπάνω πίνακας παρέχει μια πλήρη κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων ανάμεσα στο σύστημα απόκτησης και την περιοχή ενδιαφέροντος (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Source	Relation	Description of error
Acquisition system	Platform-related	Platform movement (altitude, velocity)
		Platform attitude (roll, pitch, yaw)
	Sensor-related	Viewing angles
		Panoramic effect with field of view
		Sensor mechanics (scan rate, scanning velocity, etc.)
	Instrument-related	Time-variations or drift
		Clock synchronicity
Area of interest	Atmosphere-related	Refraction and turbulence
	Earth-related	Rotation, curvature, topographic relief
	Map-related	Choice of coordinate system, approximation of reality

3.3. Επίγεια Σάρωση Laser (TLS)

Η επίγεια σάρωση laser (Terrestrial Laser Scanning – TLS) αποτελεί ενεργή τεχνολογία τρισδιάστατης αποτύπωσης, η οποία επιτρέπει την ταχεία και αυτοματοποιημένη καταγραφή της γεωμετρίας επιφανειών με υψηλή πυκνότητα σημείων (Muralikrishnan, 2021). Το σύστημα λειτουργεί παρόμοια με έναν εξελιγμένο γεωδαιτικό σταθμό, σαρώνοντας το περιβάλλον και συλλέγοντας εκατομμύρια μετρήσεις που συγκροτούν το νέφος σημείων (point cloud) (Borkowski, 2024).

Η μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως στην τεκμηρίωση μνημείων, στην παρακολούθηση παραμορφώσεων και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, προσφέροντας ακρίβεια από επίπεδο εκατοστού έως και υπο-εκατοστόμετρη (Wan Aziz, Syahmi, Anuar, & Khairul, 2012) (Muralikrishnan, 2021) (Cuartero, Armesto, Rodriguez, & Arias, 2010). Σε αντίθεση με τη φωτογραμμετρία, δεν απαιτεί τη χρήση τεχνητών στόχων, καθώς βασίζεται στην ανάκλαση της ακτίνας laser από τις επιφάνειες της σκηνής (Muralikrishnan, 2021). Η λειτουργική διάταξη ενός τέτοιου συστήματος αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 17, όπου παρουσιάζεται ένας επίγειος σαρωτής laser τύπου RIEGL VZ400, αναδεικνύοντας τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στην πράξη για την απόκτηση των τρισδιάστατων δεδομένων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).



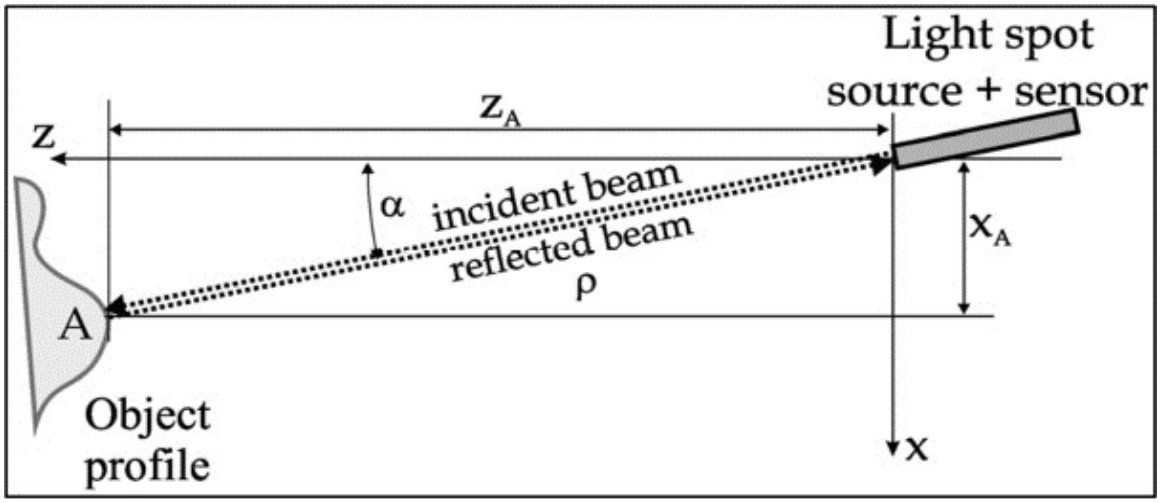
Εικόνα 17 – Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν πραγματικό επίγειο σαρωτή laser (RIEGL VZ400) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

3.3.1. **Αρχές λειτουργίας των επίγειων σαρωτών Laser.**

Η λειτουργία των σαρωτών βασίζεται σε τρεις κύριες αρχές μέτρησης απόστασης:

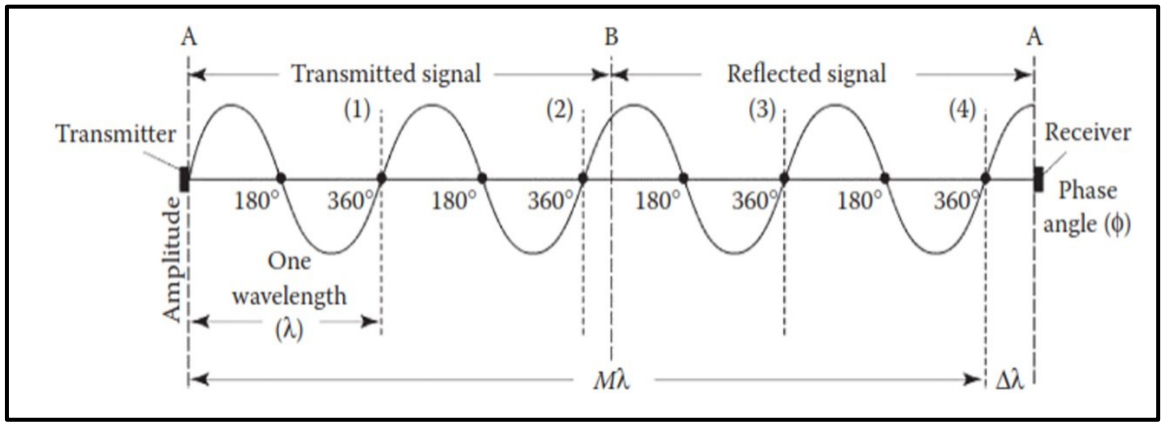
- τον χρόνο πτήσης που απαιτείται από την δέσμη φωτός να φτάσει στον στόχο και να επιστρέψει, Εικόνα 18 (Time of Flight) (Remondino & Campana, 3D Recording and

Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Letellier, 2007) (Boehler, Heinz, & Marbs),



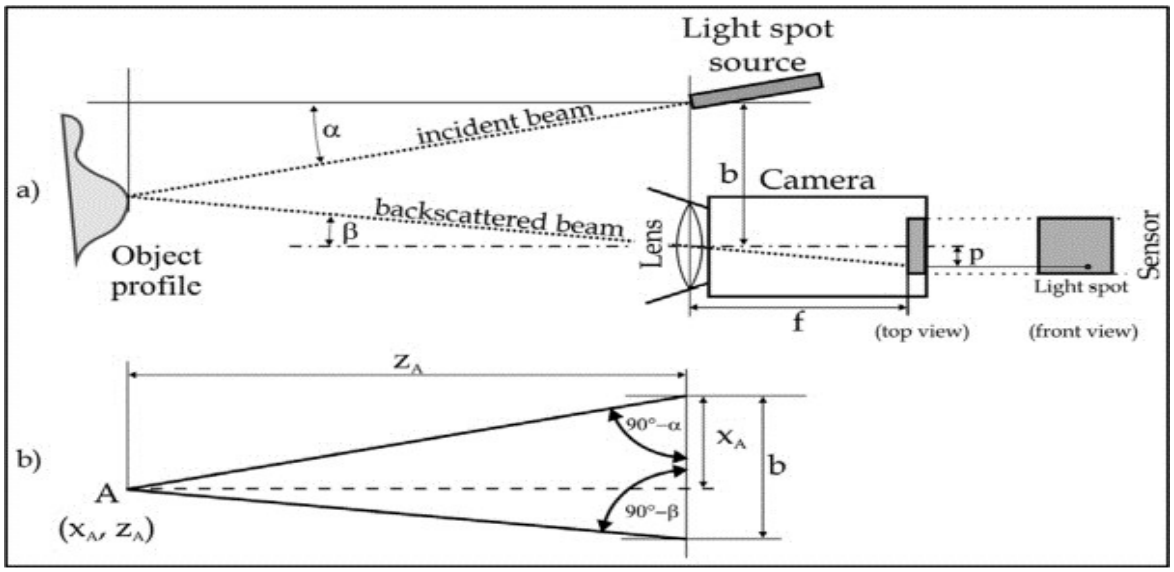
Εικόνα 18 – Η παραπάνω εικόνα οπτικοποιεί τη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ο παλμός να πάει στο αντικείμενο και να επιστρέψει (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

- τη σύγκριση φάσης (phase-shift) μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου συνεχούς κύματος, Εικόνα 19 (Reshetyuk, 2009) (Letellier, 2007) (Shan & Toth, 2017)



Εικόνα 19 – Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου συνεχούς κύματος (Shan & Toth, 2017).

- τον τριγωνισμό (triangulation), Εικόνα 20 (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Letellier, 2007) (Boehler, Heinz, & Marbs).



Εικόνα 20 - Το διάγραμμα επεξηγεί γεωμετρικά πώς υπολογίζεται η απόσταση μέσω της γωνίας εκπομπής και της βάσης (b) μεταξύ πηγής και αισθητήρα (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την απόσταση και τις γωνιακές συνιστώσες, οι οποίες μετατρέπονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες, επιτρέποντας την τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου (Reshetyuk, 2009) (Borkowski, 2024).

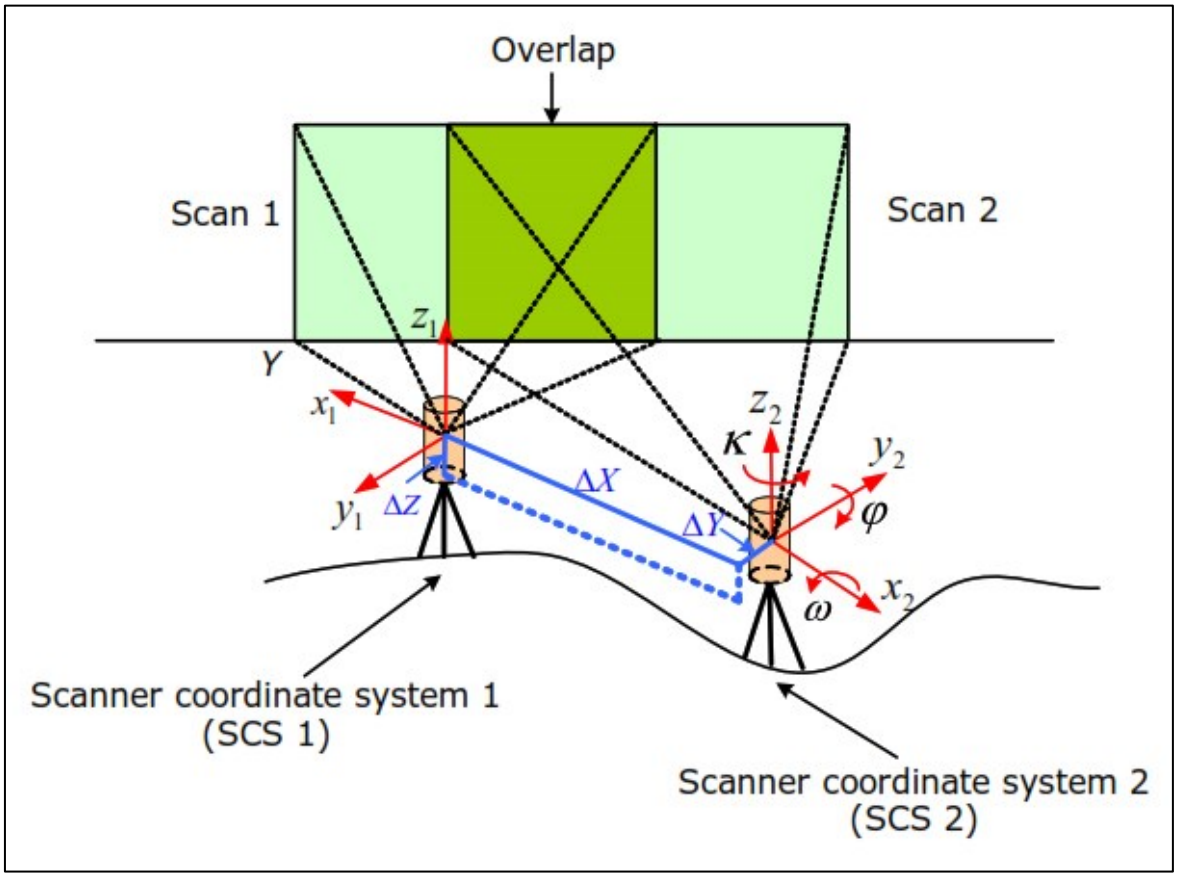
3.3.2. **Η ενοποίηση των πολλαπλών θέσεων σάρωσης.**

Λόγω της μεγάλης κλίμακας και της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των προς αποτύπωση αντικειμένων, η πλήρης καταγραφή τους απαιτεί τη λήψη δεδομένων από πολλαπλές θέσεις σάρωσης (Reshetyuk, 2009). Η διαδικασία ενοποίησης (registration) αφορά τον μετασχηματισμό και την ευθυγράμμιση των επιμέρους νεφών σημείων σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, ώστε να προκύψει ένα ενιαίο και συνεκτικό σύνολο δεδομένων (Reshetyuk, 2009).

Οι βασικές προσεγγίσεις ενοποίησης περιλαμβάνουν τη χρήση τεχνητών στόχων, την ταύτιση επιφανειών και τον άμεσο γεωεντοπισμό.

- Στην πρώτη περίπτωση, τοποθετούνται ανακλαστικοί στόχοι με γνωστές συντεταγμένες στον χώρο, οι οποίοι λειτουργούν ως κοινά σημεία αναφοράς μεταξύ των διαφορετικών σαρώσεων (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).
- Στη δεύτερη, εφαρμόζονται αλγοριθμικές μέθοδοι, όπως ο Iterative Closest Point (ICP), ο οποίος προσαρμόζει επαναληπτικά τη σχετική θέση των νεφών σημείων ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ γειτονικών σημείων (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).
- Τέλος, μέσω της ενσωμάτωσης συστημάτων GPS και αδρανειακών μονάδων (IMU) στον εξοπλισμό, καθίσταται δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός της θέσης και του

προσανατολισμού του σαρωτή κατά τη διάρκεια της λήψης (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Reshetyuk, 2009).



Εικόνα 21 - Το σχήμα παρουσιάζει γραφικά τη μεταφορά δύο νεφών σημείων από διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων σε ένα κοινό σύστημα μέσω μεταφοράς και στροφής.

Η αρχή της ενοποίησης αποδίδεται σχηματικά στην Εικόνα 21, όπου παρουσιάζεται η μεταφορά και περιστροφή δύο ανεξάρτητων νεφών σημείων από διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, αναδεικνύοντας τη γεωμετρική βάση της διαδικασίας. Μετά την ολοκλήρωση της ενοποίησης, τα δεδομένα μπορούν να ενταχθούν σε παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων μέσω διαδικασιών γεωαναφοράς (Reshetyuk, 2009).

3.4. Φορητοί Σαρωτές LiDAR με Τεχνολογία SLAM.

3.4.1. **Η Αρχή του SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).**

Η τεχνολογία SLAM αποτελεί τη θεμελιώδη διαδικασία μέσω της οποίας ένα κινητό σύστημα εκτιμά ταυτόχρονα τη θέση του σε έναν άγνωστο χώρο, ενώ παράλληλα δημιουργεί έναν τρισδιάστατο χάρτη του περιβάλλοντος. (Zhou, et al., 2023) (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) Η δομή ενός τέτοιου συστήματος χωρίζεται συνήθως σε δύο κύρια μέρη: το Front-end και το Back-end. Το Front-end αναλαμβάνει τη συλλογή των

δεδομένων από τον αισθητήρα LiDAR και τον υπολογισμό της μετατόπισης μεταξύ διαδοχικών σαρώσεων (scan-to-scan alignment) χρησιμοποιώντας αλγορίθμους όπως ο ICP ή ο NDT. Από την άλλη πλευρά, το Back-end είναι υπεύθυνο για τη διόρθωση των συσσωρευμένων σφαλμάτων της οδομετρίας και τη βελτιστοποίηση της συνολικής τροχιάς μέσω αλγορίθμων εξομάλυνσης, διασφαλίζοντας την παγκόσμια συνέπεια του παραγόμενου χάρτη. (Zhou, et al., 2023) (Zhong, Xing, Liu, & Luo, 2026)

3.4.2. **Ο Ρόλος της IMU (Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης).**

Η ενσωμάτωση μιας IMU είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία των φορητών σαρωτών, καθώς παρέχει δεδομένα κίνησης σε πολύ υψηλότερη συχνότητα από το LiDAR, επιτρέποντας την εκτίμηση της τροχιάς μεταξύ των διαδοχικών λήψεων. Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες της είναι η διόρθωση των παραμορφώσεων (deskewing) στο νέφος σημείων, οι οποίες προκαλούνται αναπόφευκτα από την κίνηση του αισθητήρα κατά τη διάρκεια μιας σάρωσης. Επιπλέον, η IMU παρέχει μια αρχική πρόβλεψη κίνησης (motion prediction) που βοηθά στη σύγκλιση των αλγορίθμων ταυτοποίησης των νεφών σημείων, ενώ η στενή σύζευξη (tight coupling) των αισθητήρων LiDAR και IMU επιτρέπει στο σύστημα να παραμένει εύρωστο ακόμα και σε περιβάλλοντα με φτωχά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) (Yu, Chao, Xie, Hua, & Wu, 2023) (Zhong, Xing, Liu, & Luo, 2026)

3.4.3. **Loop Closure (Κλείσιμο Βρόχου).**

Το Loop Closure είναι η ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει πότε ο χρήστης επιστρέφει σε μια θέση που έχει ήδη επισκεφθεί στο παρελθόν. Η λειτουργία αυτή είναι απαραίτητη για την εξάλειψη του σφάλματος ολίσθησης (drift), δηλαδή του συσσωρευμένου σφάλματος στην εκτίμηση της θέσης που αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και της απόστασης. Μόλις ανιχνευθεί ένας τέτοιος βρόχος, το σύστημα εισάγει έναν περιορισμό σε ένα γράφημα παραγόντων (factor graph), το οποίο αναγκάζει ολόκληρη την τροχιά και τον χάρτη να ευθυγραμμιστούν εκ νέου. Αυτή η διαδικασία βελτιστοποίησης μειώνει δραστικά τα σφάλματα και εξασφαλίζει ότι ο τελικός χάρτης είναι γεωμετρικά ακριβής και παγκοσμίως συνεκτικός. (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) (Zhou, et al., 2023) (Pan, Hou, & Yu, 2026) (Zhou, et al., 2023) (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) (Pan, Hou, & Yu, 2026)

3.4.4. **Διαφορά από το TLS (Terrestrial Laser Scanning).**

Η κύρια διαφορά μεταξύ των συστημάτων SLAM και της Επίγειας Σάρωσης (TLS) έγκειται στον τρόπο λήψης των δεδομένων: το TLS είναι μια στατική μέθοδος όπου ο σαρωτής τοποθετείται σε τρίποδο, ενώ το SLAM είναι κινηματικό και επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων κατά την κίνηση. Αν και το TLS προσφέρει εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια χιλιοστών και «καθαρά» νέφη σημείων, οι φορητοί σαρωτές LiDAR με SLAM υπερτερούν σε ταχύτητα και ευελιξία, ειδικά σε χώρους που δεν είναι προσβάσιμοι με τρίποδα, όπως στενοί διάδρομοι ή πολύπλοκα εσωτερικά κτιρίων. Παρά το γεγονός ότι τα συστήματα SLAM είναι πιο επιρρεπή σε θόρυβο, η ακρίβειά τους κυμαίνεται πλέον σε επίπεδο εκατοστών (π.χ. περίπου 20cm σε δομημένα περιβάλλοντα), καθιστώντας τα ιδανικά για

γρήγορη και αποτελεσματική χαρτογράφηση. (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) (Yu, Chao, Xie, Hua, & Wu, 2023) (Zhou, et al., 2023)

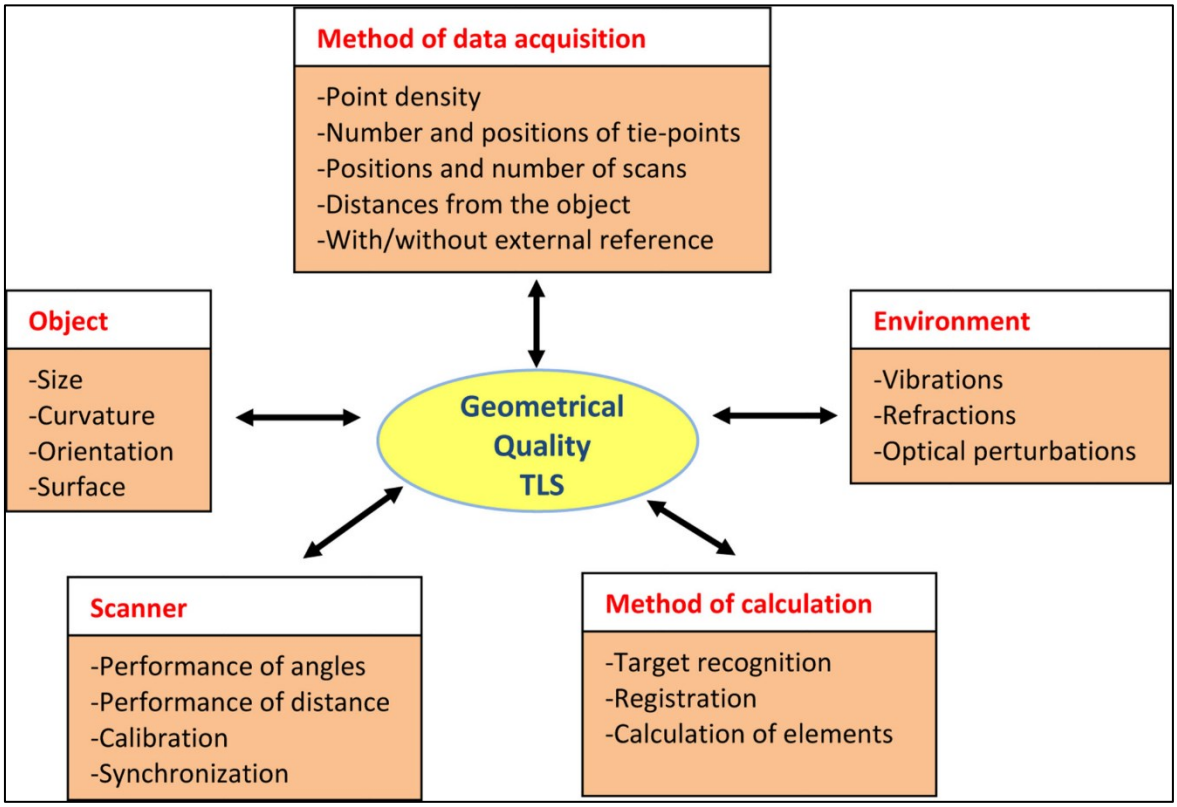
3.5. Η θεωρητική ακρίβεια των μετρήσεων και οι περιορισμοί της μεθόδου αυτής.

Η ακρίβεια των μετρήσεων της επίγειας σάρωσης laser (TLS) καθορίζεται από ένα σύνολο παραγόντων που σχετίζονται τόσο με τον εξοπλισμό όσο και με τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και του περιβάλλοντος (Muralikrishnan, 2021) (Reshetyuk, 2009). Σε επίπεδο οργάνου, τα σφάλματα προκύπτουν από την ευθυγράμμιση των αξόνων, την ακρίβεια των γωνιακών κωδικοποιητών και τις επιδόσεις του αποστασιόμετρου (Muralikrishnan, 2021) (Reshetyuk, 2009). Παράλληλα, οι ιδιότητες της επιφάνειας του αντικειμένου, όπως η ανακλαστικότητα, η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης και η πιθανή διείσδυση του laser σε υλικά όπως το ξύλο ή το μάρμαρο, επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των μετρήσεων (Remondino, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning., 2011) (Reshetyuk, 2009).

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν επίσης κρίσιμο παράγοντα, καθώς μεταβολές στη θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση μπορούν να επηρεάσουν την ταχύτητα διάδοσης της ακτίνας laser, ενώ δονήσεις του εδάφους ή του εξοπλισμού εισάγουν επιπλέον θόρυβο στα δεδομένα (Muralikrishnan, 2021) (Reshetyuk, 2009). Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς της μεθόδου είναι το φαινόμενο των «μικτών εικονοστοιχείων» (mixed pixels), το οποίο εμφανίζεται κυρίως στις ακμές, όταν η δέσμη προσπίπτει ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικές επιφάνειες, παράγοντας εσφαλμένες ενδιάμεσες μετρήσεις (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Reshetyuk, 2009) (Boehler, Heinz, & Marbs).

Οι παραπάνω παράγοντες συνοψίζονται σχηματικά στην Εικόνα 22, όπου αποτυπώνεται η πολυπαραμετρική φύση της ακρίβειας της μεθόδου, περιλαμβάνοντας τη μέθοδο συλλογής δεδομένων (πυκνότητα σημείων, αριθμός και θέσεις σαρώσεων, αποστάσεις), τις περιβαλλοντικές επιδράσεις (δονήσεις, διαθλάσεις), τη μεθοδολογία επεξεργασίας (αναγνώριση στόχων, ενοποίηση, υπολογισμοί), τα χαρακτηριστικά του σαρωτή (ακρίβεια γωνιών και αποστάσεων, βαθμονόμηση, συγχρονισμός) και, τέλος, τις ιδιότητες του αντικειμένου (μέγεθος, καμπυλότητα, προσανατολισμός, επιφάνεια) (Muralikrishnan, 2021).

Επιπλέον, η τεχνολογία TLS παρουσιάζει μειωμένη απόδοση σε επιφάνειες με πολύ χαμηλή ανακλαστικότητα ή έντονα κατοπτρική συμπεριφορά (specularity), καθώς και σε περιοχές που δεν είναι άμεσα ορατές από τη θέση σάρωσης, δημιουργώντας τα λεγόμενα «τυφλά» σημεία. Οι περιορισμοί αυτοί καθιστούν αναγκαίο τον προσεκτικό σχεδιασμό της στρατηγικής σάρωσης και, συχνά, τον συνδυασμό με άλλες μεθόδους καταγραφής για την επίτευξη πληρέστερων και ακριβέστερων αποτελεσμάτων (Reshetyuk, 2009) (Alshawabkeh, El-Khalili, Almasri, Bala'awi, & Al-Massarweh, 2020) (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012).



Εικόνα 22 - Το διάγραμμα συνοψίζει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη γεωμετρική ποιότητα.
1_Μέθοδος συλλογής δεδομένων (πυκνότητα σημείων, αριθμός και θέσεις σημείων σύνδεσης, θέσεις και αριθμός σαρώσεων, αποστάσεις από το αντικείμενο, με ή χωρίς εξωτερικό σύστημα αναφοράς),
2_Περιβάλλον (δονήσεις, διαθλάσεις, οπτικές διαταραχές)
3_Μέθοδος υπολογισμού (αναγνώριση στόχων, ενοποίηση/ευθυγράμμιση, υπολογισμός στοιχείων)
4_Σαρωτής (ακρίβεια γωνιακών μετρήσεων, ακρίβεια μετρήσεων απόστασης, βαθμονόμηση, συγχρονισμός)
5_Αντικείμενο (μέγεθος, καμπυλότητα, προσανατολισμός, επιφάνεια) (Muralikrishnan, 2021).

Η τεχνολογία SLAM παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Η θεωρητική ακρίβεια των φορητών συστημάτων LiDAR με SLAM υπολείπεται συνήθως της στατικής επίγειας σάρωσης (TLS), καθώς η κινηματική φύση της λήψης εισάγει σύνθετα σφάλματα που δεν υπάρχουν στις σταθερές λήψεις. Ενώ το TLS προσφέρει ακρίβεια χιλιοστών, οι μελέτες δείχνουν ότι τα συστήματα SLAM επιτυγχάνουν ακρίβεια που κυμαίνεται σε επίπεδο εκατοστών (για παράδειγμα, περίπου 20cm σε δομημένα περιβάλλοντα), με την πιστότητα του τελικού νέφους σημείων να εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της στενής σύζευξης (tight coupling) μεταξύ LiDAR και IMU. (Tiozzo Fasiolo, Scalera, & Maset, 2023) (Zhou, et al., 2023) (Zhong, Xing, Liu, & Luo, 2026)

3.6. Επίγεια σάρωση laser του μνημείου



Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύεται η λειτουργία ενός σαρωτή laser τύπου Stonex X120GO. Πρόκειται για ένα σαρωτή που μπορεί να λαμβάνει σημεία καθώς βρίσκεται σε κίνηση, καθώς έχει την δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα από τον χώρο ταχύτατα. Η διαφορά με τους στατικούς σαρωτές TLS είναι ότι το σύστημα αυτό μπορεί να σαρώνει τον χώρο και ταυτόχρονα να προσδιορίζει την τροχιά της συσκευής (Borkowski, 2024).

Το σύστημα αυτό διαθέτει περιστρεφόμενη κεφαλή LiDAR 360ο και κάμερες, με μεγάλη ταχύτητα σάρωσης έως και 650.000 σημεία το δευτερόλεπτο με την δυνατότητα της έγχρωμης απόδοσης του νέφους σημείων.

Ενώ τεχνολογικά παρουσιάζει πλεονεκτήματα η γεωμετρική του ποιότητα καθορίζεται από παράγοντες όπως η ταχύτητα της κίνησης, η απόσταση από το αντικείμενο αλλά και οι καιρικές συνθήκες (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Muralikrishnan, 2021).

Εικόνα 23 - Επίγειος σαρωτής SLAM Stonex X120GO.

3.6.1. **Χάραξη πορείας σάρωσης.**

Η ιδιαιτερότητα του SLAM πλέον δεν αφορά τις στάσεις αλλά την τροχιά που ακολουθεί στο χώρο (Borkowski, 2024).

Το κλείσιμο της όδευσης είναι απαραίτητο για τους σαρωτές αυτούς. Ο χειριστής ακολουθεί πορεία η οποία καταλήγει πάντα στο σημείο εκκίνησης. Με την τεχνική αυτή μπορεί ο αλγόριθμος να διορθώνει σφάλματα θέσης και να επαληθεύει την γεωμετρία του χώρου.

Ο σαρωτής πρέπει να καλύψει όλες τις επιφάνειες. Έτσι πρέπει να διασφαλισθεί η ορατότητα όλων των αντικειμένων του μνημείου ώστε να μην υπάρχουν φαινόμενα σκίασης. Η ταχύτητα κίνησης μέσα στον χώρο είναι πολύ σημαντική, και πρέπει να είναι σταθερή σε όλη την πορεία της κίνησης εξασφαλίζοντας ότι ο αισθητήρας ‘βλέπει’ επαρκώς όλες τις επιφάνειες προς αποτύπωση (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

3.6.2. **Επικαλύψεις σαρώσεων και γεωμετρική σύνδεση.**

Ο επίγειος σαρωτής που χρησιμοποιούμε έχει την δυνατότητα να κάνει σάρωση με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση ο σαρωτής πραγματοποιεί μία εσωτερική ευθυγράμμιση

σε πραγματικό χρόνο καθώς συνδέει αυτόματα τα σαρωμένα περιβάλλοντα μέσω σύγκρισης και ταύτισης χαρακτηριστικών στοιχείων (Borkowski, 2024).

Ένας άλλος τρόπος είναι με την χρήση φωτοσταθερών που αναλύσαμε παραπάνω. Ο τρόπος αυτός προσφέρει απόλυτη γεωαναφορά και περιορίζει τα σφάλματα σε μεγάλο βαθμό (Nex & Remondino, 2014) (Haddad, et al., 2012).

Ένας ακόμη τρόπος σύνδεσης των δεδομένων είναι με την αλληλοεπικάλυψη πολλαπλών διαδρομών. Όταν το μνημείο σαρωθεί με αλληλοεπικαλυπτόμενες διαδρομές τότε ο αλγόριθμος ICP ταυτίζει τις επικαλυπτόμενες περιοχές στο νέφος σημείων (Boehler & Marbs, 2004) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

3.6.3. **Ρυθμίσεις πυκνότητας σάρωσης και ανάλυσης δεδομένων**

Η διαφοροποίηση του επίγειου σαρωτή διαπιστώνεται και στην πυκνότητα σάρωσης, όπου στο Stonex X120GO η πυκνότητα των σημείων εξαρτάται από την ταχύτητα βάδισης του χειριστή (Borkowski, 2024).

Από την ανάλυση των ανωτέρω καταλαβαίνουμε ότι για να αυξήσουμε το επίπεδο λεπτομέρειας, πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα βάδισης του χειριστή ώστε να αυξηθεί η πυκνότητα των σημείων ανά τετραγωνικό εκατοστό (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Το νέφος σημείων που δημιουργείται είναι συνήθως αρκετά μεγάλο. Μπορεί να γίνει μείωση με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να είναι διαχειρίσιμο (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Από άποψη ραδιομετρίας ο συγκεκριμένος σαρωτής έχει την δυνατότητα οι ενσωματωμένες κάμερες να λαμβάνουν χρώμα και να βελτιώνουν την φωτορεαλιστική απόδοση βοηθώντας στην ερμηνεία των γραμμικών στοιχείων του μνημείου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

3.7. Επίγεια φωτογραφική καταγραφή με φωτογραφική μηχανή DSLR

Η φωτογραφική μηχανή DSLR με φακό σταθερής εστιακής απόστασης, παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα όταν πρόκειται να αποτυπωθούν αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες όπως εξώστες θύρες κλπ. Ο συνδυασμός αυτών των δύο, της μηχανής DSLR και του φακού σταθερής εστιακής απόστασης, ανταποκρίνεται σε υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας σε αρχιτεκτονικές αποτυπώσεις (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Οι φακοί με σταθερή εστιακή απόσταση παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση γιατί μειώνονται οι παραμορφώσεις καθώς διευκολύνεται η διαδικασία βαθμονόμησης και βελτιώνεται η αξιοπιστία της φωτογραμμετρικής ανακατασκευής, καθώς η εστιακή απόσταση είναι σταθερή. Οι φακοί αυτοί προσφέρουν καλύτερη δυναμική αντίθεση με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση λεπτομερειών **(James & Robson, 2012)**. Οι φωτογραφικές λήψεις για την αποτύπωση του μνημείου έγιναν με ψηφιακή

φωτογραφική μηχανή Canon 60D με φακό 17-85 mm F4 IS USM Εικόνα 24.



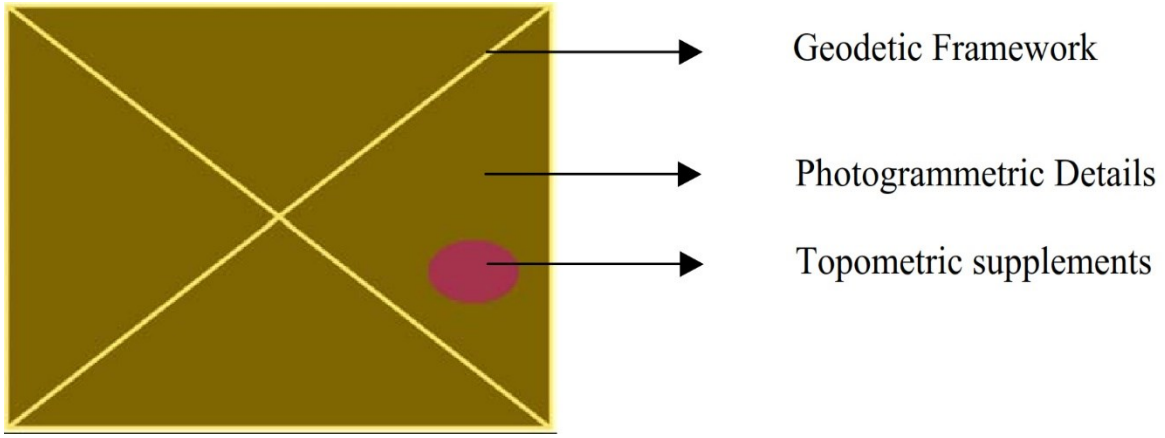
Εικόνα 24 - Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon 60D με φακό 17-85 mm F4 IS USM.

Για εφαρμογές τρισδιάστατης αποτύπωσης καταλληλότεροι φακοί είναι οι ευρυγώνιοι φακοί σταθερής εστίασης 17 mm καθώς προσφέρουν βάθος πεδίου αλλά και γεωμετρική ακρίβεια. Αντίθετα οι φακοί fisheye παρουσιάζουν έντονες γραμμικές παραμορφώσεις και προβληματίζουν κατά την διαδικασία ανακατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου (James & Robson, 2012).

Οι φωτογραφίες θα πρέπει να έχουν επικάλυψη ικανή και η λήψη τους να γίνει με συστηματικό τρόπο σε κυκλική πορεία γύρω από το αντικείμενο ώστε να προσφέρεται μεγάλη ποικιλία θέασης και αρκετή επικάλυψη. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να καταγράψει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στοιχεία με σύνθετη γεωμετρία (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

3.8. Θεωρητικές αρχές γεωδαιτικού ελέγχου στη φωτογραμμετρία.

Ο γεωδαιτικός έλεγχος συνιστά το θεμελιώδες πλαίσιο σύνδεσης των φωτογραμμετρικών δεδομένων με τον πραγματικό χώρο, επιτρέποντας τον ορθό προσανατολισμό και τη γεωαναφορά των εικόνων, είτε πρόκειται για αεροφωτογραφίες είτε για επίγειες λήψεις (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Βασίζεται σε ένα σύνολο σημείων με γνωστές συντεταγμένες σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς, τα οποία μπορούν να εντοπιστούν με σαφήνεια στις εικόνες (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Reshetyuk, 2009). Ο έλεγχος αυτός διακρίνεται σε οριζόντιο και κατακόρυφο, ανάλογα με το σύστημα αναφοράς (datum) στο οποίο αναφέρεται, αν και στην πράξη τα ίδια σημεία χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό και των δύο συνιστωσών (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).



Εικόνα 25 - Το γεωδαιτικό δίκτυο (Geodetic Framework) λειτουργεί ως ο «σκελετός» πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι φωτογραμμετρικές λεπτομέρειες, εξασφαλίζοντας τη γεωμετρική συνοχή (Georgopoulos & Ioannidis, 2004).

Η δημιουργία ενός γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου συνδέει τις επιμέρους λήψεις με τα δεδομένα τους σε ένα καθορισμένο σύστημα αναφοράς, όπως το EGSA87. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η πραγματική γεωγραφική θέση του μνημείου καθώς και οι πραγματικές του διαστάσεις. Το δίκτυο αυτό λειτουργεί ως ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς πάνω στο οποίο βασίζονται όλες οι μετρήσεις της κάθε μεθόδου (Haring, 2009) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Kraus).

Σε κάθε επιφάνεια τοίχου που υπήρχε η δυνατότητα τοποθετήθηκαν φωτοσταθερά σημεία (Ground Control Points – GCPs) τα οποία αποτυπώθηκαν από γεωδαιτικό εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας, όπως είναι οι γεωδαιτικοί σταθμοί (total stations) και οι δέκτες GPS. Με τον δέκτη GPS μετρήθηκαν οι εξωτερικές περιμετρικές στάσεις. Έπειτα με τον γεωδαιτικό σταθμό ελήφθησαν ακριβείς μετρήσεις των συντεταγμένων επιλεγμένων σημείων στον χώρο (στάσεις), τα οποία λειτουργούν ως σημεία αναφοράς για την ενοποίηση και γεωαναφορά των δεδομένων (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Shi, Muralikrishnan, & Sawyer, 2021).

Το κάθε σημείο, είτε είναι στάση είτε φωτοσταθερό επί τοίχου, έλαβε συντεταγμένες (X, Y, Z). Η τοποθέτηση αυτών έγινε προσεκτικά ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη γεωμετρική κατανομή σημείων ελέγχου σε ολόκληρο το μνημείο με την καλύτερη δυνατή κατανομή (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Kraus).

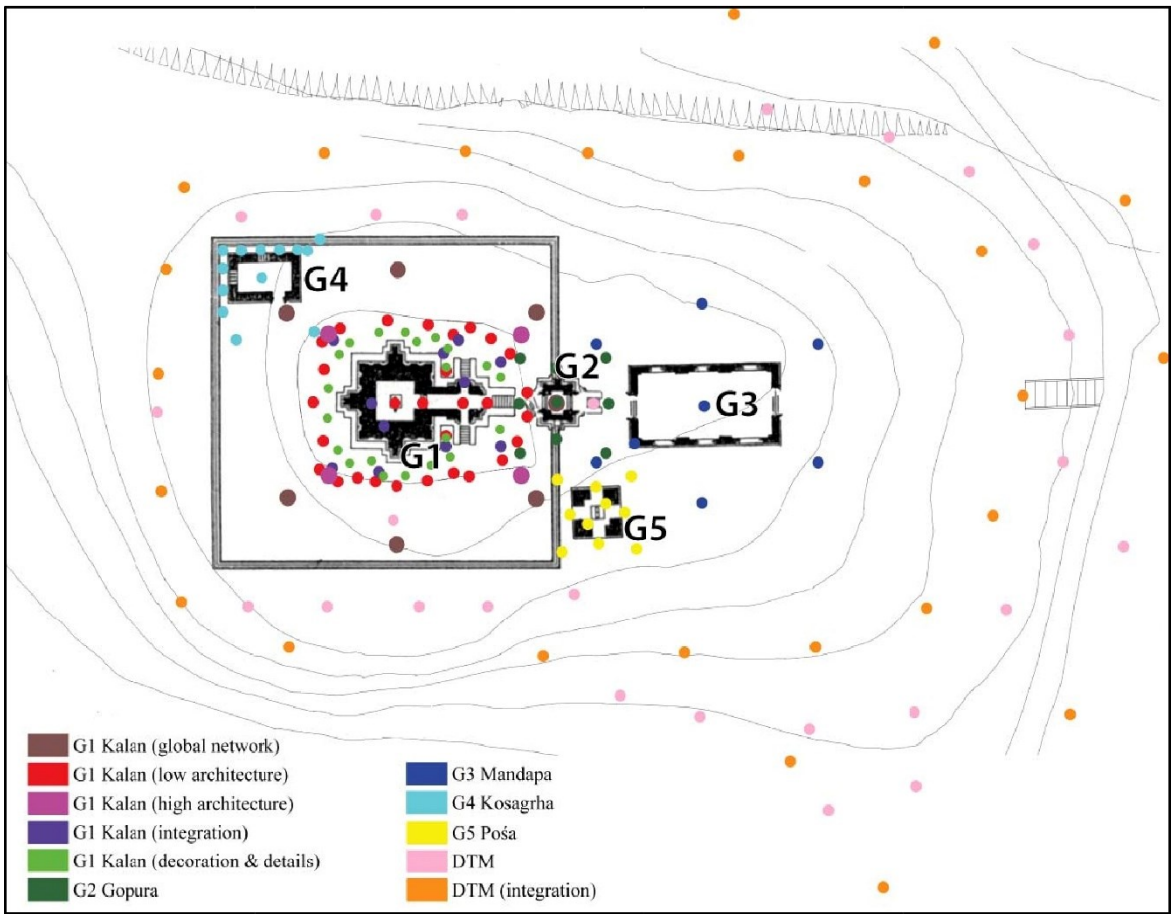
Συνολικά, η ορθή χάραξη και μέτρηση του γεωδαιτικού δικτύου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση της απόλυτης γεωμετρικής ακρίβειας, υποστηρίζοντας αποτελεσματικά τη σύνθεση και την αξιοπιστία των τελικών τρισδιάστατων προϊόντων.

3.8.1. **Χωροθέτηση τοπικού γεωδαιτικού δικτύου στάσεων.**

Η ανάπτυξη ενός τοπικού γεωδαιτικού δικτύου πραγματοποιείται σε δύο βασικά στάδια: αρχικά δημιουργείται ένα δίκτυο βασικού ελέγχου στην περιοχή μελέτης και στη συνέχεια προσδιορίζονται οι θέσεις των φωτοσταθερών σημείων μέσω εξαρτημένων οδεύσεων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει οριζόντια σημεία αναφοράς και υψομετρικές αφετηρίες (benchmarks), τα οποία συγκροτούν το γεωμετρικό υπόβαθρο της αποτύπωσης (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

Η χωροθέτηση των στάσεων βασίζεται σε κλασικές γεωδαιτικές μεθόδους, όπως η όδευση, ο τριγωνισμός και ο τριπλευρισμός, με χρήση γεωδαιτικών σταθμών (total stations) για τη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Τα σημεία του δικτύου πρέπει να υλοποιούνται με σταθερά και ανθεκτικά ορόσημα, εξασφαλίζοντας παράλληλα ισχυρή γεωμετρική διάταξη, ώστε να αποφεύγονται παραμορφώσεις κατά την επεξεργασία των δεδομένων (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Ιδιαίτερη σημασία έχει η ομοιόμορφη κατανομή των σημείων στον χώρο, τόσο περιμετρικά όσο και στο εσωτερικό της περιοχής ενδιαφέροντος (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014). Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή σε σύνθετα μνημεία, απαιτείται αυξημένη ακρίβεια στην ίδρυση του δικτύου, ενώ συχνά είναι απαραίτητος και ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο φωτογραμμετρικό σύστημα αναφοράς (Georgopoulos & Ioannidis, 2004).

Τα σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά) ιδανικά τοποθετούνται στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Η πρακτική αυτή διασφαλίζει ότι οι μετασχηματισμοί γίνονται εσωτερικά και έτσι αποφεύγονται σφάλματα (James & Robson, 2012). Τα εσωτερικά σημεία ενισχύουν τον προσδιορισμό και την διόρθωση συστημικών σφαλμάτων βελτιώνοντας τη συνολική ακρίβεια του δικτύου (Kraus). Η αύξηση της αξιοπιστίας γίνεται μέσω των πλεοναζόντων σημείων. Ο πλεονασμός των σημείων επιτρέπει τον εντοπισμό των σφαλμάτων και τον έλεγχο της συνέπειας μεταξύ των σημείων (Kraus).



Εικόνα 26 - Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται οι θέσεις των στάσεων (scanner positions) γύρω από ένα μνημείο, υποδεικνύοντας τη στρατηγική κάλυψης του χώρου (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

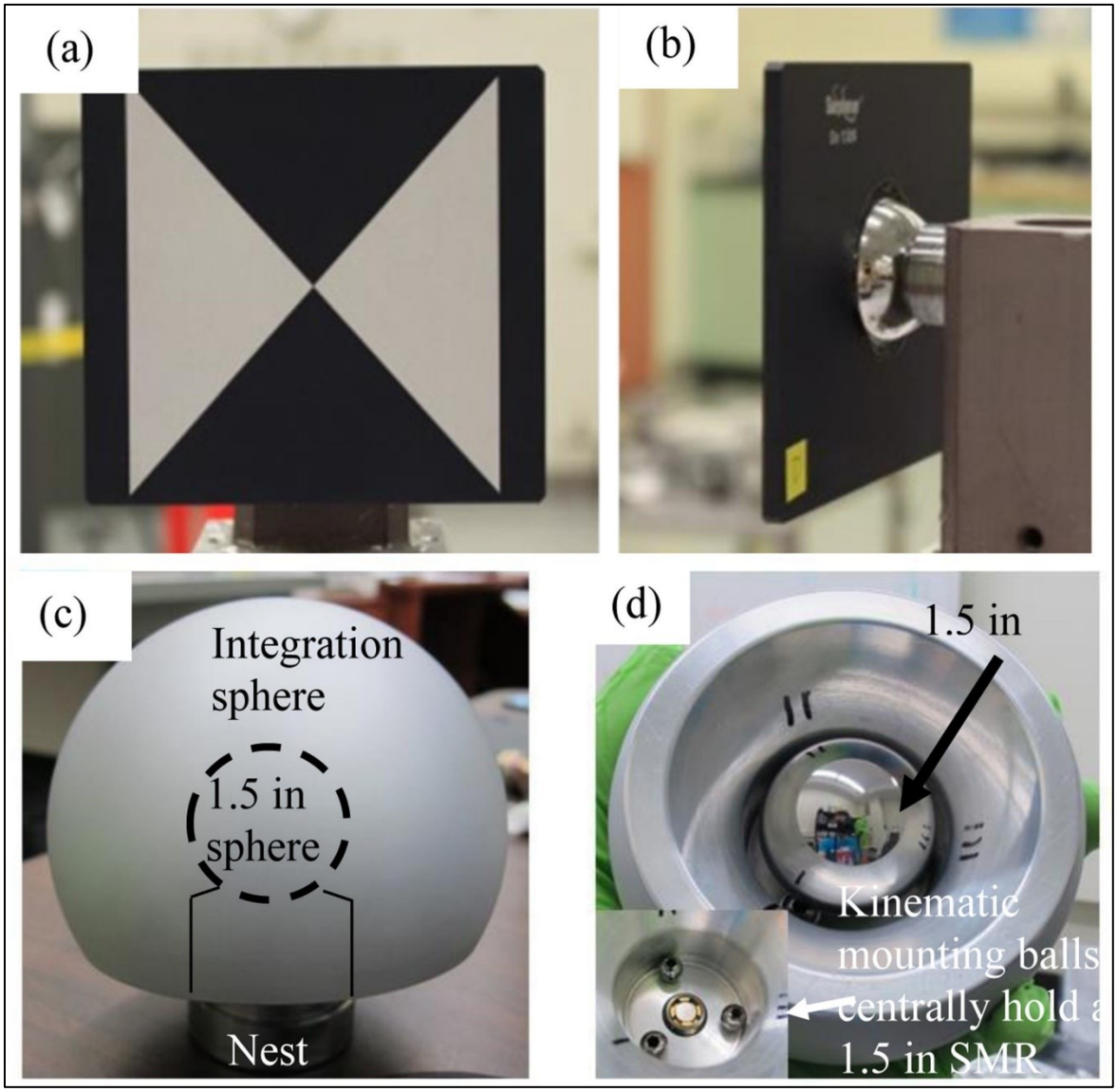
3.8.2. **Η μέτρηση των φωτοσταθερών σημείων.**

Η διαδικασία μέτρησης των φωτοσταθερών σημείων (GCPs) περιλαμβάνει τον προσδιορισμό σημείων που είναι αφενός ευδιάκριτα στις εικόνες και αφετέρου γνωστά ως προς τις συντεταγμένες τους στο χώρο του αντικειμένου (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Η επιλογή τους βασίζεται είτε σε φυσικά χαρακτηριστικά με έντονη αντίθεση είτε στη χρήση τεχνητών στόχων, όπως σταυροί ή κυκλικά μοτίβα, που διευκολύνουν την αναγνώριση και την ακρίβεια της μέτρησης (Stal, Tack, De Maeyer, De Wulf, & Goosens, 2011) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014).

Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιούνται συνήθως με γεωδαιτικά συστήματα υψηλής ακρίβειας, όπως GPS σε λειτουργία RTK ή γεωδαιτικούς σταθμούς, επιτυγχάνοντας ακρίβεια επιπέδου εκατοστών ή και χιλιοστών (Stal, Tack, De Maeyer, De Wulf, & Goosens, 2011) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Letellier, 2007). Για τον κατακόρυφο έλεγχο

προτιμώνται επίπεδες επιφάνειες, ενώ αποφεύγονται γεωμετρικά δυσμενείς θέσεις, όπως κορυφές λόφων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

Η χρήση τυποποιημένων στόχων στο πεδίο διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία αναγνώρισης και μέτρησης των σημείων, συμβάλλοντας στην αύξηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των δεδομένων (Εικόνα 27).



Εικόνα 27 - Στις παραπάνω φωτογραφίες παρουσιάζονται πραγματικοί στόχοι που χρησιμοποιούνται στο πεδίο (ασπρόμαυροι στόχοι, ανακλαστικοί, σφαιρικοί), οι οποίοι χρησιμεύουν ως φωτοσταθερά σημεία (Muralikrishnan, 2021).

Κατά τη φάση της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας, η ακριβής και συνεπής ταύτιση των σημείων στις εικόνες είναι κρίσιμη, καθώς σφάλματα στη σήμανση μεταφέρονται άμεσα στις τελικές συντεταγμένες (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Στα ψηφιακά περιβάλλοντα, η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω δρομέα στην οθόνη, ενώ η χρήση

κωδικοποιημένων στόχων επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση με ακρίβεια υπο-εικονοστοιχείου (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014) (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014).

3.8.3. **Ο υπολογισμός σφάλματος των στάσεων.**

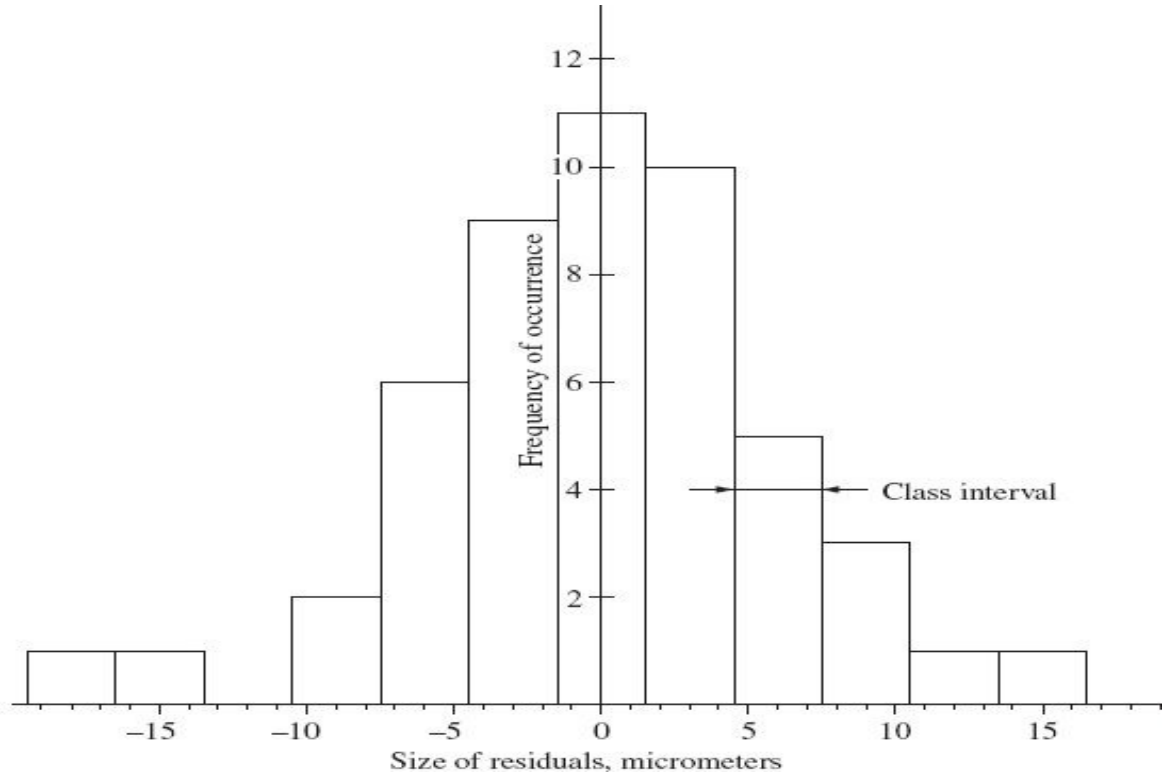
Ο υπολογισμός των συντεταγμένων (X,Y,Z) από ένα γεωδαιτικό όργανο γίνεται με την μέτρηση τριών βασικών μεγεθών για κάθε σημείο. Αυτά είναι τα πρωτογενή δεδομένα της κεκλιμένης απόστασης, της οριζόντιας γωνίας και της κατακόρυφης γωνίας για κάθε σημείο από τα οποία προκύπτει ο υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων (X,Y,Z). Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ο πίνακας «Συντεταγμένες Στάσεων Όδευσης».

Εφόσον έχουμε υπολογίσει τις συντεταγμένες για κάθε στάση ακολουθεί η διαδικασία συνόρθωσης του δικτύου. Καθώς μπορεί να συναντάμε μικροδιαφορές που να οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις ή μικροσφάλματα μετρήσεων, τα σφάλματα κατανέμονται στο σύνολο των παρατηρήσεων ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη εκτίμηση της θέσης κάθε σημείου. Η μέθοδος της συνόρθωσης χρησιμοποιεί την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ώστε να επιτύχει την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, οδηγώντας στη βέλτιστη δυνατή λύση ή θέση για κάθε σημείο (Shi, Murallkrishnan, & Sawyer, 2021).

Η αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση δεικτών όπως το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE), η τυπική απόκλιση και ο πίνακας συνδιακύμανσης, οι οποίοι αποτυπώνουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των υπολογισμών (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Stal, Tack, De Maeyer, De Wulf, & Goosens, 2011).

Τα υπόλοιπα των σημείων ελέγχου αποτελούν σημαντικό εργαλείο ποιοτικού ελέγχου, επιτρέποντας τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων και ασυνεπειών στις μετρήσεις (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Σε περιπτώσεις εκτεταμένων φωτογραμμετρικών λωρίδων, τα σφάλματα μπορεί να συσσωρεύονται και να προκαλούν συστηματικές παραμορφώσεις, οι οποίες αντιμετωπίζονται με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων διόρθωσης (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Η τελική ακρίβεια επηρεάζεται από τη γεωμετρία του δικτύου και τον αριθμό των ακτίνων που συγκλίνουν σε κάθε σημείο, ενώ η διαδικασία επίλυσης επαναλαμβάνεται μέχρι την επίτευξη σύγκλισης (Remondino & Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, 2014) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014). Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται μέσω ανεξάρτητων ελέγχων σε σημεία επαλήθευσης (checkpoints), τα οποία μετρούνται με μεθόδους υψηλότερης ακρίβειας, διασφαλίζοντας την ανίχνευση τυχόν υπολειπόμενων συστηματικών σφαλμάτων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

Η στατιστική κατανομή των υπολοίπων μπορεί να αποδοθεί γραφικά μέσω ιστογραμμάτων συχνότητας, τα οποία επιτρέπουν την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των σφαλμάτων και τη διερεύνηση πιθανών αποκλίσεων από την κανονική κατανομή (βλ. Διάγραμμα 5) (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

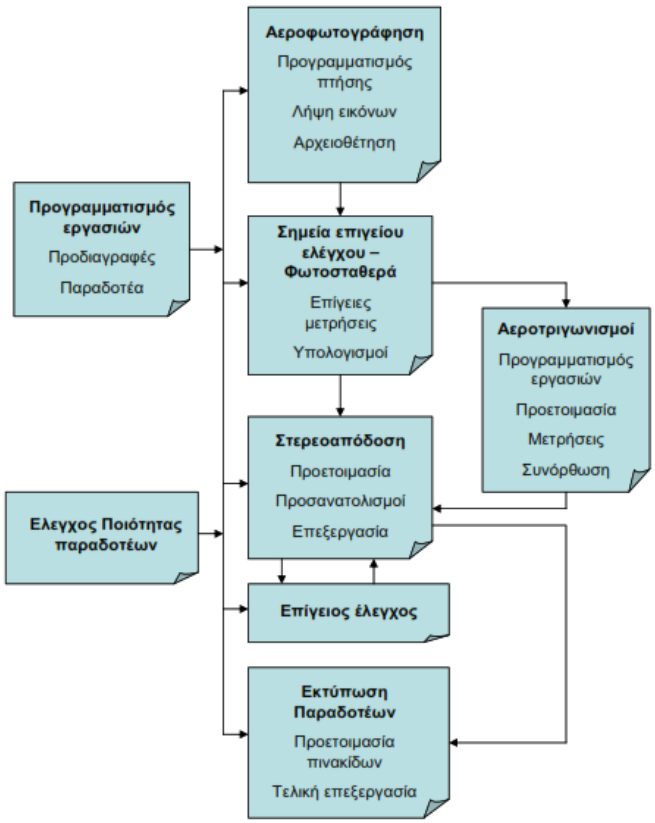


Διάγραμμα 5 - Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης υπολοίπων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη στατιστική αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2014).

3.9. Σχεδιασμός και προγραμματισμός των διαδικασιών για την αποτύπωση του μνημείου.

Ο σχεδιασμός μιας αποστολής τεκμηρίωσης είναι το σημαντικότερο σημείο από το οποίο πρέπει να εκκινήσει η διαδικασία της αποτύπωσης. Στο στάδιο αυτό συνεκτιμώνται όλες οι παράμετροι όπως η επιθυμητή ποιότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων, το κόστος, ο διαθέσιμος χρόνος, ο απαιτούμενος εξοπλισμός, καθώς και οι πιθανοί κίνδυνοι και περιορισμοί (Boehler & Marbs, 2004). Η διαδικασία ξεκινά με τον σαφή καθορισμό των προδιαγραφών και των επιθυμητών παραδοτέων, τα οποία αποτελούν οδηγό για όλα τα επόμενα βήματα.

Ο επιχειρησιακός σχεδιασμός της αποστολής, αποτελείται από ορισμένα βασικά στοιχεία όπως τον προγραμματισμό της πτήσης, τον προσδιορισμό και τη χωροθέτηση σημείων επίγειου ελέγχου, τον προσδιορισμό των φωτοσταθερών, καθώς και τις απαιτούμενες ενέργειες για τη συλλογή δεδομένων. Κατά τη φάση αυτή, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση του μνημείου, για την διάκριση των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως η απαιτούμενη χωρική ανάλυση για την αποτύπωση των λεπτομερειών, ο αποδεκτός βαθμός σκίασης ή απόκρυψης, καθώς και ο αριθμός και η γεωμετρική κατανομή των λήψεων ή σαρώσεων που απαιτούνται για την πλήρη και αξιόπιστη κάλυψη του αντικειμένου (Kraus).



Διάγραμμα 6 - 'Βασικά στάδια των φωτογραμμετρικών εργασιών' (Kraus).

Στο διάγραμμα 6 αποδίδονται τα στάδια των φωτογραμμετρικών εργασιών. Για να διασφαλιστεί ένα ποιοτικό αποτέλεσμα προϋπόθεση είναι ένας ολοκληρωμένος και τεκμηριωμένος προγραμματισμός. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα οι αβεβαιότητες και τα σφάλματα κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων (Borkowski, 2024). Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης των παραμέτρων στο παρόν κεφάλαιο διαμορφώνονται σαφείς οδηγίες για μία ορθή επιχειρησιακά ολοκλήρωση των μετρήσεων. Μία αποτυχημένη διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί καθώς το αποτέλεσμα θα αποκλίνει σημαντικά από την πραγματικότητα.

3.9.1. **Η συνδυαστική εφαρμογή της φωτογραμμετρίας με την επίγεια σάρωση Laser και τον γεωδαιτικό έλεγχο.**

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο συνδυασμός των μεθόδων της φωτογραμμετρίας, της επίγειας σάρωσης laser και των γεωδαιτικών μεθόδων ελέγχου. Η εφαρμογή της συνδυαστικής διαδικασίας είναι μία από τις πλέον ολοκληρωμένες και αποτελεσματικές προσεγγίσεις. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις τεκμηρίωσης μεγάλων και σύνθετων μνημείων. Η κάλυψη των αδυναμιών της κάθε μεθόδου, επιτυγχάνεται με την συνέργεια των παραπάνω μεθόδων, παράγοντας υψηλής ποιότητας πολυεπίπεδα αποτελέσματα (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Η επίγεια σάρωση laser πλεονεκτεί κυρίως για την ακριβή γεωμετρική αποτύπωση των βασικών δομικών στοιχείων. Έχει την δυνατότητα να παράγει νέφη σημείων υψηλής

πυκνότητας που αποδίδουν με λεπτομέρεια τη μορφή και τις διαστάσεις του μνημείου. Παρουσιάζει όμως κάποιους περιορισμούς κατά την απόδοση χρωμάτων και κατά την ακριβή απόδοση ορισμένων λεπτών χαρακτηριστικών, όπως οι αιχμηρές ακμές (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Η φωτογραμμετρία πλεονεκτεί συγκριτικά καθώς μπορεί να αποδώσει υψηλής ποιότητας ραδιομετρικά δεδομένα, όπως χρώμα και υφή, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ερμηνεία της επιφάνειας και στην απόδοση σύνθετων μορφολογικών και διακοσμητικών στοιχείων. Η μία μέθοδος συμπληρώνει την άλλη, και έτσι επιτυγχάνεται μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική αναπαράσταση του μνημείου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Ο γεωδαιτικός έλεγχος είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την απόδοση μετρικών δεδομένων και για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας, χρησιμοποιούνται γεωδαιτικά όργανα, όπως οι σταθμοί total station και τα συστήματα GPS. Κατά τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των φωτοσταθερών σημείων (Ground Control Points – GCPs) (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Kraus) (Boehler & Marbs, 2004). Τα φωτοσταθερά σημεία (Ground Control Points – GCPs) δημιουργούν ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων, για να επιτευχθεί η αλληλοκάλυψη των δεδομένων σε ένα σύστημα υψηλής, απόλυτης γεωμετρικής ακρίβειας.



Εικόνα 28 - 'From left to right: DJI Osmo, iPhone, LiDAR sensor location, iPhone scanning with onscreen visual feedback, and VZ-400i terrestrial laser scanner.' (Kraus)

Η συνέργεια των μεθόδων προσφέρει τη μετρική αξιοπιστία όσο και την ποιοτική πληρότητα της τεκμηρίωσης. Ο συνδυασμός διαφορετικών οργάνων όπως φαίνονται στην Εικόνα 28, επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της κάθε μεθόδου. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για αποτυπώσεις που απαιτείται υψηλό επίπεδο ακρίβειας και λεπτομέρειας.

3.9.2. **Επιλογή των θέσεων λήψης και σάρωσης για την ορθή γεωμετρική κάλυψη του μνημείου.**

Τόσο κατά την σάρωση με τον επίγειο σαρωτή όσο και κατά την λήψη φωτογραφιών, επίγεια ή εναέρια, η επιλογή των θέσεων για την καταγραφή του μνημείου αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Αυτό καθορίζει κατά πόσο θα έχουμε μία πλήρη και αξιόπιστη γεωμετρική κάλυψη του μνημείου. Η τεχνική που ακολουθείται καθορίζει την παρουσία «τυφλών» σημείων (occlusions) και την ποιότητα των δεδομένων. Ένας ορθός σχεδιασμός κάλυψης της περιοχής και καταγραφής των αντικειμένων μπορεί να ελαχιστοποιήσει την εμφάνιση των περιοχών απόκρυψης (Borkowski, 2024).

Κρίσιμο στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι θα πρέπει να τονίσουμε ότι η πορεία λήψης με τον επίγειο σαρωτή είναι καθοριστική για την επίτευξη μίας ποιοτικής αποτύπωσης. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία του αντικειμένου, καθώς η ιδανική σάρωση θα πρέπει να γίνεται μετωπικά σε κάθε επιφάνεια του αντικειμένου, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις περιοχές που παραμένουν μη καταγεγραμμένες (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η επικάλυψη των δεδομένων, η οποία είναι απαραίτητη για την επιτυχή ευθυγράμμιση και ενοποίηση των επιμέρους λήψεων. Στη φωτογραμμετρία, η επικάλυψη των εικόνων είναι πολύ σημαντική για να διασφαλισθεί επαρκής αριθμός κοινών σημείων για αντιστοίχιση. Επιθυμητή θα ήταν μία επικάλυψη 80% και πάνω — ώστε να διασφαλίζεται επαρκής αριθμός κοινών χαρακτηριστικών σημείων. Επίσης, στην επίγεια σάρωση laser για να επιτευχθεί η γεωμετρική σύνδεση απαιτείται η ύπαρξη τουλάχιστον τριών κοινών σημείων (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).



Εικόνα 29 - Ένα τυπικό σχέδιο για την πλήρη τρισδιάστατη κάλυψη του μνημείου (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021).

Σημαντικός παράγοντας για ένα ποιοτικό αποτέλεσμα είναι και η γωνία λήψης φωτογραφίας ή καταγραφής του σημείου καθώς και η απόσταση του οργάνου. Η ακρίβεια των δεδομένων μειώνεται σε λήψεις από μεγάλη απόσταση ή σε δυσμενείς γωνίες, καθιστώντας αναγκαίο τον προσεκτικό σχεδιασμό των θέσεων λήψης (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Borkowski, 2024) (Muralikrishnan, 2021).

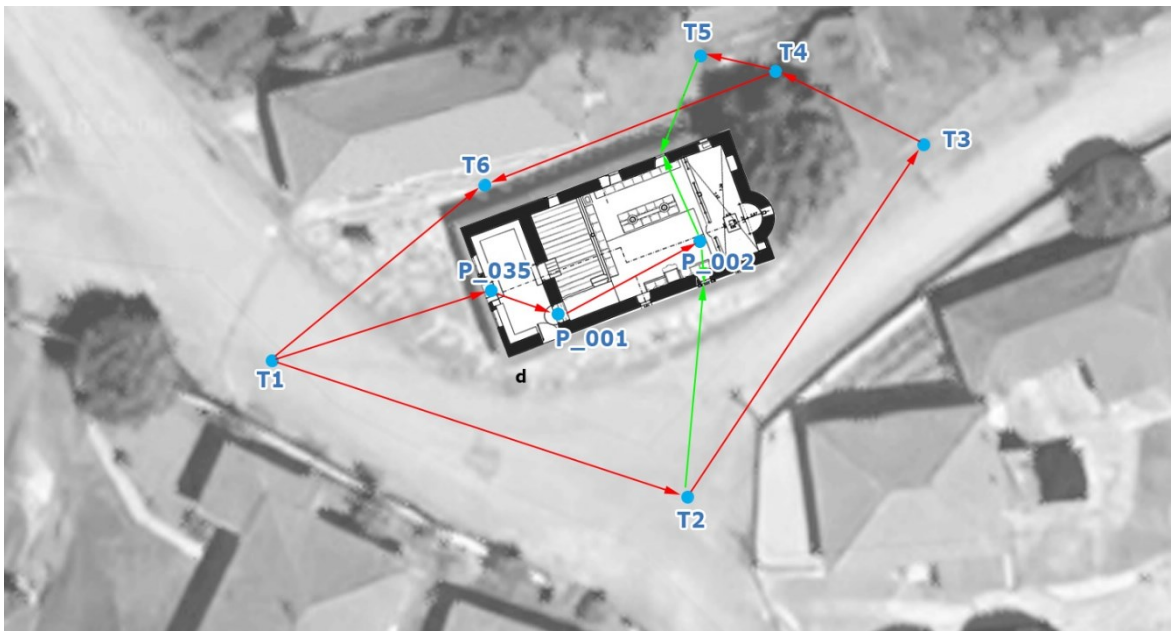
Συνοψίζοντας τα παραπάνω η κατάλληλη θέση λήψης των δεδομένων είναι βασική προϋπόθεση για την παραγωγή πλήρων, ακριβών και αξιόπιστων γεωμετρικών αποτελεσμάτων, που αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικό για τα επόμενα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης. Ένα τυπικό σχέδιο χωροθέτησης των σαρώσεων φαίνεται στην Εικόνα 29 με τις στάσεις του γεωδαιτικού οργάνου και τις εσωτερικές και εξωτερικές θέσεις σάρωσης.

.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Οι εργασίες πεδίου και η διαδικασία συλλογής τοπογραφικών δεδομένων.

4.1. Η χάραξη και η μέτρηση του γεωδαιτικού δικτύου.

1.1.1. Διάταξη και μέτρηση περιμετρικών στάσεων.



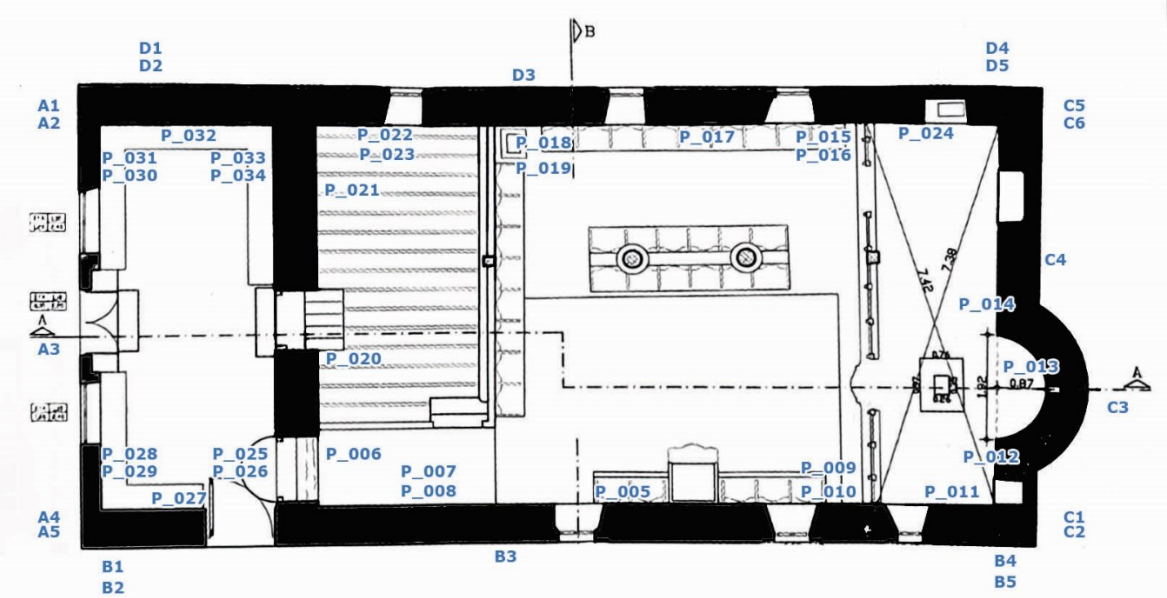
Διάγραμμα 7 – Χάραξη του τοπογραφικού δικτύου. Οι στάσεις εντός του μνημείου και εκτός στον περιβάλλοντα χώρο (Google Maps, 2026).

Για να οριστεί το δίκτυο στάσεων πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί σχεδιαστικά. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η κάτοψη του μνημείου και του ευρύτερου περιβάλλοντος χώρου. Η λογική χάραξης του τοπογραφικού δικτύου είναι απλή και δεσμεύεται από συγκεκριμένους λειτουργικούς και γεωμετρικούς περιορισμούς όπως αναλύονται στη συνέχεια. Οι στάσεις ονοματίζονται ως T1,T2,T3,T4,T5,T6,P_035, P_001, P_002 από τις οποίες οι P_035, P_001, P_002 τοποθετούνται εντός του ναού ενώ οι T1,T2,T3,T4,T5,T6, τοποθετούνται περιμετρικά του μνημείου σε συγκεκριμένες θέσεις. Στο στάδιο αυτό κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί ότι η θέση κάθε στάσης επιλέγεται σε σημείο ώστε να μπορεί να συνδεθεί γεωμετρικά με άλλες δύο στάσεις. Η οπτική σύνδεση της βάσης των στάσεων μεταξύ τους, είναι σημαντική ώστε να μην χρησιμοποιηθεί σταδία και δημιουργηθεί σφάλμα λόγω απόκλισης από την κατακόρυφο. Βάσει αυτής της αρχής επιλέχθηκαν οι θέσεις των στάσεων. Η στάση (P_002) τοποθετείται στο εσωτερικό του ναού κοντά στην ‘ωραία πύλη‘ του ιερού. Η πρώτη στάση (P_002) είναι η δυσκολότερη θέση για σύνδεση με περιμετρικές στάσεις καθώς εσωτερικά οι ελευθερίες κίνησης είναι περιορισμένες. Από το σημείο αυτό η οπτική άνεση περιορίζεται σε γραμμικούς άξονες από το εσωτερικό του ναού προς τον περιβάλλοντα χώρο μέσω των παραθύρων αλλά και των θυρών. Από τη διάταξη αυτή προκύπτει ότι η στάση (P_002) συνδέεται έμμεσα με την στάση (T2) και την στάση (T5) μέσω δύο στόχων διπλής όψης

και γνωστού πάχους εκατέρωθεν σε κάθε όψη. Οι ανακλαστικοί στόχοι διπλής όψης τοποθετούνται ένας στο παράθυρο της Βόρειας όψης και ένας στο παράθυρο της Νότιας όψης. Αντίστοιχα ο κάθε στόχος θα μετρηθεί από τις εξωτερικές στάσεις (Τ2) και (Τ5) και από την εσωτερική στάση (P_001). Με την χάραξη αυτή επιτυγχάνουμε το κλείσιμο της όδευσης και έτσι περιορίζονται τα συσσωρευμένα σφάλματα μέτρησης, καθώς οι στάσεις συνδέονται άμεσα.

Εφόσον ολοκληρωθεί η χάραξη της δομής του δικτύου, πλέον πρέπει να συνδεθεί το δίκτυο με ένα γνωστό σύστημα συντεταγμένων. Στην Ελλάδα το πιο διαδεδομένο σύστημα αναφοράς σε μέτρα (μ.) είναι το ΕΓΣΑ87. Με την βοήθεια δορυφορικών συστημάτων GPS λήφθηκαν μετρήσεις για τις εξωτερικές στάσεις Τ1,Τ2,Τ3,Τ4,Τ5,Τ6 που βρίσκονται περιμετρικά του μνημείου. Για κάθε στάση προσδιορίστηκαν συντεταγμένες Χ, Υ, Ζ μέσω δορυφορικών δεδομένων GPS. Βεβαίως για την εξάρτηση του τοπικού δικτύου θα ήταν αρκετά τα δεδομένα δύο στάσεων και μόνο. Για την κριτική αξιολόγηση όμως των λήψεων από δορυφορικά σύστημα GPS και την ανάδειξη της σημασίας της παρούσας μεθοδολογίας, λήφθηκαν δορυφορικά δεδομένα για όλες τις εξωτερικές στάσεις. Τα δεδομένα που λήφθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα «Συντεταγμένες Στάσεων από GPS» του Παραρτήματος Α.

Η πρώτη στάση του τοπογραφικού οργάνου είναι η στάση (Τ1), με μηδενισμό του οργάνου στη στάση (Τ2). Έπειτα μετρήθηκε η στάση (Τ2) και η στάση (Τ6) και ακόμη 5 φωτοσταθερά στην δυτική όψη. Ακολουθήθηκε πορεία όδευσης όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 7 δηλαδή αριστερόστροφα από την στάση (Τ1). Από τη στάση (Τ2) έγινε μηδενισμός στη στάση (Τ1) και μετρήθηκε η στάση (Τ3) και ακόμη 5 φωτοσταθερά στη νότια όψη. Σε παράθυρο της νότιας όψης τοποθετήθηκε ανακλαστικός στόχος διπλής όψης και γνωστού πάχου, ο οποίος και μετρήθηκε. Από τη στάση (Τ3) έγινε μηδενισμός στη στάση (Τ2) και μετρήθηκε η στάση (Τ4), η στάση (Τ5) και ακόμα 5 φωτοσταθερά σημεία στη ανατολική όψη του ναού. Τοποθετήθηκε το όργανο στη στάση (Τ4) και έγινε μηδενισμός στη στάση (Τ3), έπειτα μετρήθηκε η στάση (Τ5) και η στάση (Τ6). Από τη στάση (Τ5) έγινε μηδενισμός στη στάση (Τ3) και μετρήθηκε η στάση (Τ4), ο αντίστοιχος ανακλαστικός στόχος διπλής όψης και ακόμα 5 φωτοσταθερά σημεία στη βόρεια όψη του ναού. Από την στάση (P_035) έγινε μηδενισμός στην στάση (Τ1) και μετρήθηκε η στάση (P_002) και 4 φωτοσταθερά στον πρόναο. Από την στάση (P_002) έγινε μηδενισμός στην στάση (P_035) και μετρήθηκε η στάση (P_001) και 5 φωτοσταθερά στο Ιερό. Έτσι παρατηρείται ότι η όδευση κλείνει μία φορά εξωτερικά και έπειτα όπως προαναφέρθηκε από την εσωτερική στάση (P_001), η όδευση κλείνει σε δύο στάσεις την (Τ1) και την (Τ5) μέσω των στόχων διπλής όψης. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό και τη μεταγενέστερη διόρθωση πιθανών σφαλμάτων κατά τη διαδικασία συνόρθωσης. Οι γωνίες που λήφθηκαν αποθηκεύονται στο μηχάνημα για την επεξεργασία και τον υπολογισμό των συντεταγμένων σε Χ,Υ,Ζ για κάθε στάση.



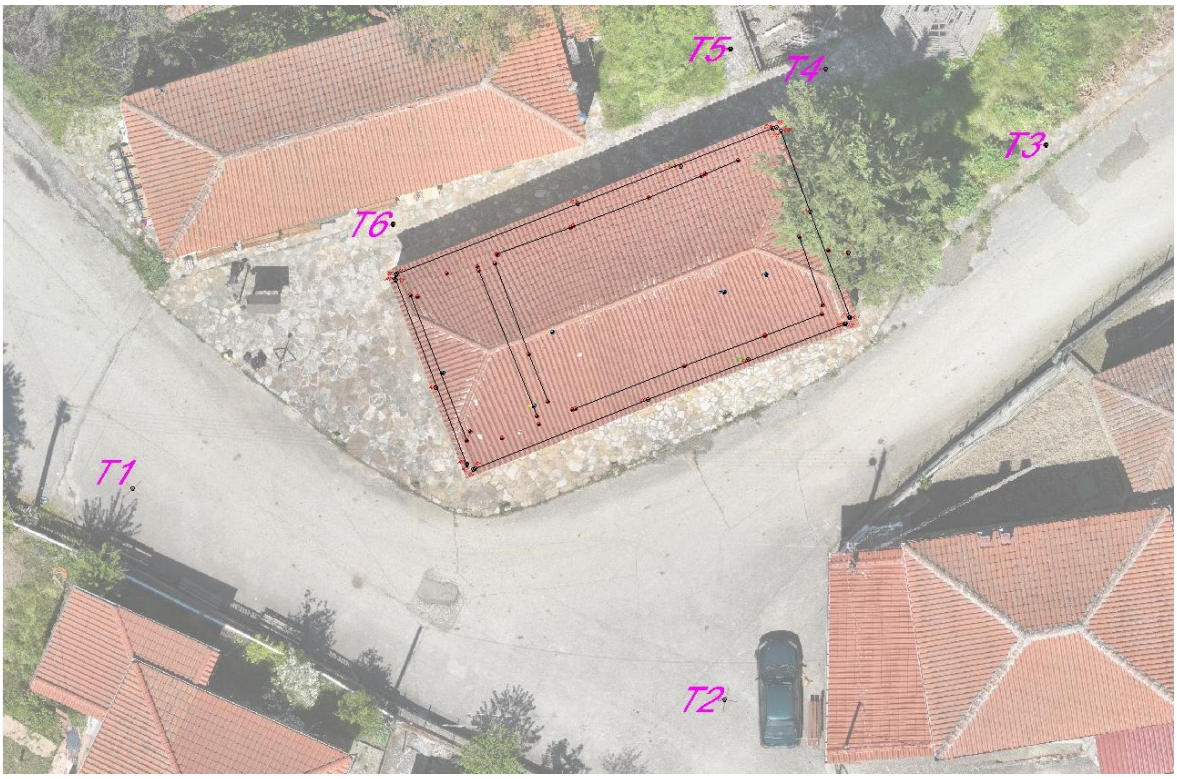
Διάγραμμα 8 - Σημεία τοποθέτησης των φωτοσταθερών.

Κατά την πορεία όδευσης με το τοπογραφικό όργανο, σε κάθε μία από τις παραπάνω στάσεις μετρήθηκαν και τα σημεία ελέγχου (τα φωτοσταθερά) που έχουν τοποθετηθεί στις τέσσερις γωνίες κάθε τοίχου. Στο Διάγραμμα 8 διακρίνεται η θέση των φωτοσταθερών τόσο περιμετρικά όσο και στο εσωτερικό του ναού.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η επεξεργασία των δεδομένων που λήφθηκαν από το δορυφορικό δέκτη GPS και ο τρόπος υπολογισμού των συντεταγμένων κάθε στάσης και σημείου ελέγχου.

4.1.1. **Υπολογισμός συντεταγμένων και έλεγχος σφαλμάτων του δικτύου**

Στο σημείο αυτό για την κάθε στάση υπάρχουν συντεταγμένες που είναι πλέον βελτιωμένες, δηλαδή έχουν διορθωθεί βάσει του σφάλματος κλεισίματος που προέκυψε από την όδευση. Έτσι λαμβάνοντας τα δεδομένα των συντεταγμένων για κάθε στάση μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες για τα φωτοσταθερά. Το σύνολο των συντεταγμένων από τις στάσεις και τα σημεία ελέγχου εισάγονται στο λογισμικό Metashape όπου θα αξιοποιηθούν για την εσωτερική διόρθωση των κοινών σημείων, αλλά και για τον προσανατολισμό και την γεωαναφορά, ώστε να λάβει το τρισδιάστατο μοντέλο την ορθή κλίμακα. Στο παρακάτω απόσπασμα της αεροφωτογραφίας παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των σημείων σε σχέση με το μνημείο.



Διάγραμμα 9 - Απόδοση των σημείων επάνω σε απόσπασμα αεροφωτογραφίας.

4.1.2. **Η διαδικασία καταγραφής της στέγης και άλλων δυσπρόσιτων επιφανειών.**

Κατά την αποτύπωση ενός κτιρίου συναντώνται δυσπρόσιτα σημεία που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Καθώς όμως στόχος είναι η πλήρης αποτύπωση του μνημείου θα πρέπει αυτά να αντιμετωπιστούν, με τρόπο που θα αναλυθεί παρακάτω. Μία περίπτωση τέτοιων σημείων είναι τα τμήματα στεγών που συχνά δεν είναι ορατά από τους επίγειους σαρωτές. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η συμπερίληψη και εναέριων τεχνικών στην διαδικασία αποτύπωσης.

Η δυνατότητα καταγραφής από υπερυψωμένες θέσεις παρέχεται με τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV/drones). Μέσω αυτών αποκτάται μία ολοκληρωμένη απόδοση της γεωμετρίας των μνημείων. Η καταγραφή αντικειμένων σε ανώτερες στάθμες μπορεί να γίνει μόνο μέσω των (UAV/drones) ώστε να εξαλειφθούν οι σκιασμένες περιοχές από τις τεχνικές επίγειας λήψης (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Colomina & Molina, 2014).

Τα εκκλησιαστικά μνημεία έχουν αυξημένες απαιτήσεις καθώς είναι πολύπλοκα με πολλές διακοσμητικές λεπτομέρειες. Έτσι είναι απαραίτητη η συνεισφορά των εναέριων μεθόδων με (UAV/drones) εκτός από τις επίγειες μεθόδους, ώστε να συμβάλλουν στην ολοκληρωμένη αναπαράσταση της μορφής και των λεπτομερειών της κατασκευής. (Alshawabkeh, Baik, & Miky, 2021) (Nex & Remondino, 2014).

Εκτός από τις στέγες υπάρχουν και άλλες δυσπρόσιτες περιοχές. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η λήψη με τον επίγειο σαρωτή πρέπει να γίνεται μετωπικά στην

επιφάνεια προς αποτύπωση. Μέσα στο μνημείο έχουμε κατακόρυφες αλλά και οριζόντιες επιφάνειες. Κάποιες από τις οριζόντιες επιφάνειες φωτογραφίζονται μετωπικά από κάτω προς τα πάνω και άλλες από πάνω προς τα κάτω. Αντίστοιχα κατά την διαδικασία με τον επίγειο σαρωτή είναι αναγκαίο η λήψη να γίνεται σε διαφορετικά υψόμετρα ώστε να λαμβάνονται μετωπικά διαφορετικές οριζόντιες επιφάνειες και από διαφορετική απόσταση. Για τους παραπάνω λόγους, εκτός από την πορεία του επίγειου σαρωτή είναι σημαντικό να οριστεί και το υψόμετρο. Για την καταγραφή του τέμπλου και από τις δύο πλευρές, ο σαρωτής θα πρέπει να σαρώσει από ψηλότερη στάθμη από το μέγιστο ύψος του τέμπλου. Κατά την ίδια λογική, ο σαρωτής θα πρέπει να διέλθει σε χαμηλότερη στάθμη από το χαμηλότερο σημείο του τέμπλου, κατά το ελάχιστο δυνατό ύψος.

Μία ακόμη δυσκολία αποτύπωσης στο μνημείο προέρχεται από τα μεταλλικά κάγκελα-σιδεριές στα ανοίγματα των παραθύρων. Αυτά είναι δύσκολο να αποτυπωθούν λόγω της θάμπωσης που προκαλείται από το εισερχόμενο φως. Το πρόβλημα αυτό αναδεικνύεται όταν γίνεται προσπάθεια να καταγραφεί το κούφωμα πάνω στον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής. Οι φωτογραφίες αποδίδονται υπερφωτισμένες - ‘καμένες’ - με αποτέλεσμα να χάνεται η πληροφορία. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπισθεί εάν καλυφθούν τα ανοίγματα με λευκά πανιά κατά την στιγμή της φωτογράφησης. Η πρακτική αυτή περιορίζει το εσωτερικό φως, κάτι που πρέπει να αντισταθμιστεί με τεχνητό φωτισμό.

Ένα ακόμη αξιοπρόσεκτο σημείο βρίσκεται στο εξωτερικό πίσω μέρος του ναού, όπου η κυλινδρική κόγχη του ιερού, στεγάζεται εξωτερικά με κεραμίδι βυζαντινού τύπου που αναπτύσσεται σε μορφή τεταρτοσφαιρίου. Ο κατακόρυφος τοίχος διαμορφώνεται σε σχήμα ημικυλίνδρου. Αν και η διαμόρφωση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα περίπλοκη θα πρέπει να αποτυπωθεί με περισσότερες φωτογραφίες, τόσο από μακριά για την εξασφάλιση της γεωμετρίας όσο και από κοντά για την απόδοση της υφής.

Η ημέρα της εφαρμογής εναέριων τεχνικών αποτύπωσης πρέπει να επιλεχθεί με ιδιαίτερη προσοχή καθώς συμβάλει στην παραγωγή ορθών λήψεων τόσο στην επίγεια φωτογραφία όσο και στην εναέρια (Nex & Remondino, 2014). Κατά την διάρκεια μίας ηλιόλουστης ημέρας υπάρχουν σκληρές σκιές και έντονος φωτοσκιασμός. Αυτό θα δημιουργήσει σκιές επάνω στο μοντέλο μέχρι και διαφορετική υφή, γεγονός που μπορεί να παραπλανήσει τα συμπεράσματα της παθολογίας. Η επιλογή της ημέρας αποτύπωσης θα πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να υπάρχει μία ήπια συννεφιά χωρίς δυνατό άνεμο.

Στο ανατολικό πίσω μέρος του μνημείου, υψώνεται ένα δέντρο σε απόσταση 2 μέτρων από το ναό. Τα κλαδιά του φτάνουν μέχρι την στέγη, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα κατά την πτήση του drone. Η αντιμετώπισή τους γίνεται με αργή κίνηση του drone κοντά στην στέγη και το δέντρο, και βεβαίως η πραγματοποίηση των λήψεων επιβάλλεται να γίνει μία μέρα χωρίς άνεμο, για να μην υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος και καταστραφεί ο εξοπλισμός.

Στην υπερύψωση του γυναικωνίτη, υπάρχουν μεταλλικές καρέκλες που εμποδίζουν την σωστή αποτύπωση του ξύλινου δαπέδου. Οι καρέκλες αυτές είναι σύγχρονες και πυκνά τοποθετημένες, και σίγουρα δεν αποτελούν μέρος του μνημείου. Καθώς είναι αδύνατο να φωτογραφηθούν οι καρέκλες σύμφωνα με τις απαιτήσεις της φωτογραμμετρίας,

κρίνεται αναγκαίο να μετακινηθούν εκτός του χώρου αποτύπωσης. Έτσι είναι δυνατόν να φωτογραφηθούν τα σταθερά μέρη του μνημείου όπως δάπεδα, τοίχοι, διαχωριστικά κλπ. Η ίδια λύση θα μπορούσε να δοθεί για ένα τραπέζι και δύο παγκάκια εξωτερικά του ναού, αντικείμενα που εξυπηρετούν τις καθημερινές ανάγκες στην λειτουργία του ναού. Τα στοιχεία αυτά είναι νεότερα και δεν προσφέρουν στην πολιτιστική αποτύπωση του ναού. Αντίθετα περιορίζουν τις δυνατότητες αποτύπωσης του εξωτερικού τοίχου του ναού.

Στους τοίχους υπάρχουν κάδρα με κεντητές παραστάσεις και αγιογραφίες που προστατεύονται από γυάλινες επιφάνειες. Το γεγονός αυτό δημιουργεί έντονες ανακλάσεις με αποτέλεσμα την απώλεια της πληροφορίας. Παρομοίως απαντάται το ίδιο πρόβλημα και σε μεταλλικά μπρούτζινα κηροπήγια που είναι ιδιαίτερα γυαλιστερά. Το φαινόμενο αυτό γίνεται ακόμα δυσκολότερο στις λεπτές αλυσίδες των καντηλιών που κρέμονται από την οροφή. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ικανή γεωμετρική επιφάνεια για κοινά σημεία. Έτσι κατά την απόδοση του μοντέλου οι λεπτές αλυσίδες δεν αποδίδονται στο μοντέλο. Σίγουρα η λύση του προβλήματος θα ήταν η λήψη περισσότερων φωτογραφιών από πιο κοντινή θέση.

Ένα ακόμα θέμα που αντιμετωπίστηκε πριν την έναρξη των ενεργειών αποτύπωσης ήταν η ανάπτυξη άγριας φύτευσης περιμετρικά του ναού. Τα φυτά απομακρύνθηκαν πριν την αποτύπωση με φωτογραφίες καθώς υψώνονταν αρκετά με αποτέλεσμα τον κίνδυνο της απώλεια της πληροφορίας επάνω στην εξωτερική τοιχοποιία.

Εντός του μνημείου, η παρουσία «τυφλών» σημείων (occlusions) θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη για κτίρια που βρίσκονται σε λειτουργία κατά την αποτύπωση. Μόνον εάν ήταν δυνατή η απομάκρυνση ορισμένων στοιχείων θα μπορούσε να ξεπεραστεί η δυσκολία φωτογράφησης, καθώς υπάρχουν αντικείμενα σε επαφή με τους τοίχους. Στην περίπτωση αυτή, τα αντικείμενα είναι δυνατό να αποτυπωθούν μόνο από την μία πλευρά τους. Από την άλλη καλύπτονται από μέρος της τοιχοποιίας που δεν είναι δυνατόν να φωτογραφηθεί. Έτσι σκιάζονται το πίσω μέρος των αντικειμένων και ένα μέρος του τοίχου. Η λήψη περισσότερων φωτογραφιών θα έλυνε επίσης το πρόβλημα μέχρι ενός βαθμού αλλά δεν θα μπορούσε να το εξαλείψει εφόσον δεν μπορούν να απομακρυνθούν τα αντικείμενα αυτά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα άμφια των ιερέων που κρέμονται στο πίσω μέρος του ιερού, η αγία τράπεζα που καλύπτεται από κεντητά υφάσματα, η επίπλωση που καλύπτει μέρος των τοίχων.

4.2. Φωτογραμμετρική συλλογή εικόνων.

Η φωτογραμμετρία δίνει την δυνατότητα τρισδιάστατης ανακατασκευής του μοντέλου. Για τη δημιουργία του μοντέλου είναι απαραίτητο να γίνει συλλογή κατάλληλων εικόνων. Είναι το πρωτογενές υλικό που πρέπει να είναι κατάλληλο, ώστε να παρέχει ποιότητα και αξιοπιστία στο ανακατασκευασμένο μοντέλο (Honkavaara, και συν., 2009).

Όπως επισημάνθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο επιχειρησιακός σχεδιασμός είναι κρίσιμος παράγοντας καθώς θα προσδιορισθούν οι αναγκαίες παράμετροι για την αποτύπωση, που είναι η χωρική απαιτούμενη ανάλυση, η κλίμακα λήψης των εικόνων και εν γένει ο κατάλληλος εξοπλισμός. Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να εξυπηρετούν τους

στόχους της εργασίας και να δίνουν λύσεις στους προβληματισμούς και τις ιδιαιτερότητες που μπορεί να εμφανισθούν (Honkavaara, και συν., 2009).

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας οι αισθητήρες μπορούν να αποδώσουν πολύ καλύτερα με αυξημένη ευαισθησία, προσφέροντας υψηλότερο ραδιομετρικό δυναμικό. Πλέον υπάρχει η δυνατότητα να συλλέγονται περισσότερα δεδομένα σε σύγκριση με τα παλαιότερα αναλογικά συστήματα. Μεγάλη διαφορά έγινε σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ενισχύοντας την συνολική ποιότητα και πληρότητα ανακατασκευής (Honkavaara, και συν., 2009).

4.2.1. **Επιτόπια φωτογραφική τεκμηρίωση με φωτογραφική μηχανή DSLR.**

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας φωτογράφησης γίνεται μία αξιολόγηση των λήψεων πριν την έναρξη της επεξεργασίας στο λογισμικό. Γεγονός που αποτυπώνεται ξεκάθαρα, είναι η αδυναμία της συγκεκριμένης μηχανής να αποδώσει σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Μία σύγχρονη mirrorless φωτογραφική μηχανή θα απέδιδε πολύ καλύτερα με ένα σταθερό φακό.

Αλλά η αλλαγή στην φωτογραφική μηχανή δεν είναι αρκετή για να κάνει την διαφορά. Αυτό που θα μπορούσε να βελτιώσει αισθητά τη διαδικασία είναι ο διάχυτος φωτογραφικός φωτισμός, από περιμετρικές πηγές που θα μπορούσαν να εξαλείψουν τις σκληρές πηγές, αρκετά δυνατός ώστε να μην χρειασθεί επιπλέον φλας ή μεγαλύτερη ευαισθησία ISO. Με τον παραπάνω φωτισμό δεν θα υπήρχε ανάγκη για επιπλέον φωτισμό από τα φωτιστικά του ναού που είναι ακατάλληλα τύπου σποτ, προκαλούν θάμπωση και γενικότερα χαμηλής ποιότητας φωτογραφία.

4.2.2. **Εναέρια φωτογραμμετρική αποτύπωση με drone.**

Η στέγη του μνημείου που εξετάζεται έχει ιδιαίτερη διαμόρφωση, με τετράρριχτη επικεράμωση με απομείωση στις στενές πλευρές. Η τετρακλινής επικάλυψη γίνεται από βυζαντινό κεραμίδι. Για να αποτυπωθεί το ημικυλινδρικό σχήμα του κεραμιδιού έπρεπε να γίνει λήψη φωτογραφιών κάθετα στην επιφάνεια κάθε φορά για την κάθε μία κλίση της στέγης. Έτσι το UAV πήρε παράλληλη κλίση με αυτή του πετσώματος για να γίνει μία φωτογράφηση. Το ίδιο επαναλήφθηκε για κάθε μία από τις τέσσερις κλίσεις και έτσι φωτογραφήθηκε μετωπικά το κάθε κεραμίδι. Στην συνέχεια έπρεπε να γίνει λήψη φωτογραφιών κάθετα στην καμπυλότητα του κεραμιδιού προς την μία άκρη. Εφαρμόζοντας την αρχή αυτή στο εξεταζόμενο μνημείο, το UAV φωτογράφισε κεκλιμένα με πορεία από την Δύση προς την Ανατολή και από τον Βορρά προς τον Νότο. Αντίστροφα, έγινε λήψη φωτογραφιών για τις στενές πλευρές κεκλιμένα δηλαδή κάθετα στην άλλη καμπυλότητα από Ανατολή προς Δύση και από το Νότο προς το Βορρά. Με αυτή την αρχή φωτογράφησης αντιμετωπίσθηκε το σύνολο των μερών της στέγης.

Για αρχιτεκτονικές αποτυπώσεις απαιτείται μεγάλη σχεδιαστική ακρίβεια. Αυτό καθορίζεται από το ύψος πτήσης του UAV. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να προηγηθεί ένας υπολογισμός για να προσδιοριστεί το ύψος πτήσης. Καθώς το αντικείμενο μελέτης του UAV είναι η στέγη, αναλύοντάς το διαπιστώνουμε ότι βρίσκεται σε διαφορετικά ύψη, δηλαδή εκτείνεται υψομετρικά από τον κορφιά μέχρι το κάτω μέρος της στέγης. Έτσι

πρέπει να προσδιοριστεί η μέγιστη αποδεκτή απόσταση του αντικειμένου από το φακό, που θα αποδώσει την ελάχιστη αποδεκτή ακρίβεια για το αντικείμενο.

Για να υπολογιστεί αυτό, πρώτα πρέπει να προσδιοριστούν κάποια δεδομένα που είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 30 - DJI Matrice 4E (Standard) (Skroutz.gr)

Μοντέλο UAV : DJI Matrice 4E (Standard)

Η Εστιακή απόσταση ανάμεσα στο φακό και αισθητήρα στο Drone.

Η φυσική εστιακή απόσταση της wide camera είναι περίπου:

f= 24 mm (ισοδύναμο full frame)

Η πραγματική εστιακή απόσταση είναι (physical): 8,8 mm

Το μέγεθος της εικονοψηφίδας στον αισθητήρα του Drone.

Έχουμε αισθητήρα 20 MP

Μέγεθος αισθητήρα: 13.2 mm × 8.8 mm

Ανάλυση: 5472 × 3648 px

Μέγεθος εικονοψηφίδας : 13,2 / 5472 = 2.4 μm (micrometers)

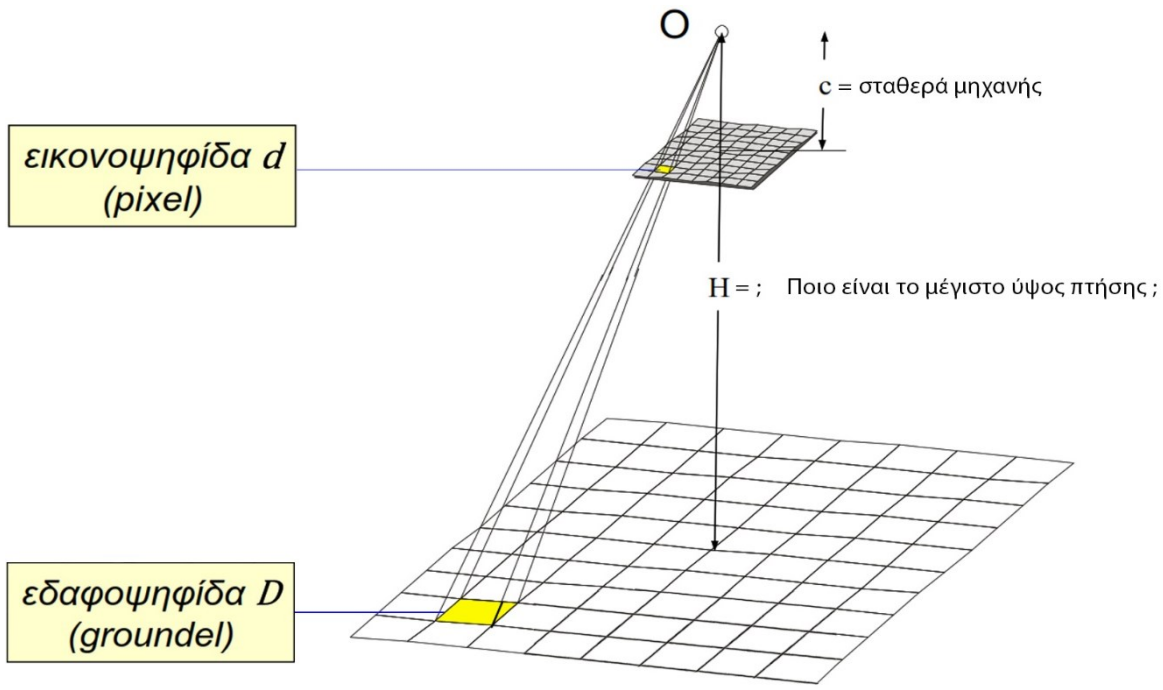
Το επιθυμητό μέγεθος της εδαφοψηφίδας GSD (Ground Sampling Distance), του αντικειμένου 0,5 εκ/pixel.

Γνωρίζουμε ότι το επιθυμητό μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι 0,005 μ.

$$D = d \cdot \frac{H}{c}$$

(Σχέση 3)

Εικόνα 31 - Με την παραπάνω σχέση υπολογίζεται το μέγεθος της εδαφοψηφίδας (Γραμματικόπουλος, 2025).



Εικόνα 32 - Η επιφάνεια αντικειμένου D ή εδαφοψηφίδα (Γραμματικόπουλος, 2025).

Ο ανωτέρω τύπος μετασχηματίζεται βάσει των δεδομένων που ανακτήθηκαν παραπάνω ώστε να υπολογιστεί το ύψος πτήσης.

$$D = d\frac{H}{C} \Rightarrow \frac{H}{C} = \frac{D}{d} \Rightarrow H = c\frac{D}{d} = 0{,}0088\ \frac{0{,}008}{0.0000024} = 29{,}33\ \mu.$$

Στο σημείο αυτό έχει υπολογιστεί ότι εάν η πτήση γίνει μέχρι τα 29 μέτρα από το μακρινότερο κεραμίδι θα εξασφαλιστεί ακρίβεια αποτύπωσης 0,5 εκ/pixel ή καλύτερη. Με την ακρίβεια αυτή αποτυπώνονται και τα φωτοσταθερά που βρίσκονται επί του εδάφους, τα οριζόντια ή επάνω στους τοίχους, τα κατακόρυφα.

4.2.1. **Επικάλυψη των φωτογραφιών και οι γωνίες λήψης.**

Κατά την αξιολόγηση του μοντέλου που προέκυψε από τις εναέριες λήψεις του UAV, διαπιστώθηκε ότι η κάλυψη δεν ήταν επαρκής σε ορισμένα κρίσιμα σημεία της στέγης. Συγκεκριμένα, φάνηκε πως απαιτούνταν περισσότερες κατακόρυφες λήψεις, καθώς η έλλειψή τους οδήγησε στη δημιουργία οπών στο μοντέλο, ιδιαίτερα στην περιοχή του κορφιά όπου η γεωμετρία παρουσιάζει έντονες αλλαγές. Παράλληλα, παρατηρήθηκε αδυναμία καταγραφής κάτω από την προεξοχή της στέγης, ένα σημείο που συχνά δυσκολεύει τα UAV λόγω της γωνίας πρόσπτωσης και των περιορισμών ορατότητας. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, η περιοχή αυτή καλύφθηκε με επιπλέον επίγειες φωτογραφίες που λήφθηκαν με τη φωτογραφική μηχανή, εξασφαλίζοντας έτσι την πλήρη αποτύπωση της μορφής της.



Διάγραμμα 10 - Αεροφωτογραφία από την ημέρα αποτύπωσης.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Επεξεργασία δεδομένων και δημιουργία τρισδιάστατου υβριδικού μοντέλου.

5.1. Φωτογραμμετρική επεξεργασία στο λογισμικό Metashape της Agisoft.

5.1.1. **Διαδικασία για την ευθυγράμμιση των φωτογραφιών και υπολογισμός των θέσεων των καμερών (Align Photos).**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εισαγωγή των φωτογραφιών στο λογισμικό, η ανίχνευση των χαρακτηριστικών σημείων, ο υπολογισμός των θέσεων των καμερών και η δημιουργία του αραιού νέφους σημείων.

Εισάγονται εναέριες φωτογραφίες στο Chunk 1 και μετονομάζεται σε εξωτερικές λήψεις. Οι φωτογραφίες από το Matrice 4E περιέχουν EXIF και GPS, δεδομένα θέσης (lat/long/alt) και προσανατολισμού (yaw/pitch/roll), οπότε θα τοποθετηθούν προσεγγιστικά. Στη συνέχεια εισάγονται επίγειες φωτογραφίες. Οι φωτογραφίες από την Canon 60D δεν περιέχουν δεδομένα GPS οπότε θα τοποθετηθούν μέσω των φωτοσταθερών, και από τη δημιουργία κοινών σημείων. Επιλέγεται από το μενού Workflow → Add Photos. Έπειτα από το ίδιο μενού επιλέγεται Align Photos.

Για την διαδικασία του Align Photos των εναέριων φωτογραφιών επιλέγονται οι παρακάτω ρυθμίσεις.

Accuracy: High

Adaptive camera model fitting: ON

Reference preselection: ON

Generic preselection: ON

Key point limit: 80.000

Tie point limit: 8.000

Generic preselection: Enabled

Reference preselection: Enabled

Για την ευθυγράμμιση των επίγειων φωτογραφιών επιλέγονται

Accuracy: High

Key point limit: 80.000

Tie point limit: 8.000

Αξιολογώντας την εναέρια φωτογραφική κάλυψη μέσω του τρισδιάστατου μοντέλου που παράχθηκε, γίνεται αντιληπτό ότι οι φωτογραφικές λήψεις δεν ήταν επαρκείς. Από το αποτέλεσμα που λαμβάνεται διαπιστώνεται ότι θα έπρεπε να ληφθούν περισσότερες κατακόρυφες φωτογραφίες πάνω από την σκεπή. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την απώλεια χαρακτηριστικών σημείων στην περιοχή του κορφιά της στέγης. Έτσι όπως θα

αναλυθεί στο επόμενο βήμα το σφάλμα αυτό οδηγεί σε κενά κατά την αναπαράσταση του μοντέλου. Από τα παραπάνω αναδεικνύεται η σημασία του σωστού σχεδιασμού των πτήσεων και της επαρκούς επικάλυψης των λήψεων μεταξύ τους. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη αστοχία δεν επηρεάζει τη γεωμετρική ακρίβεια του υπόλοιπου μοντέλου.



Εικόνα 33 - Δημιουργία αραιού νέφους σημείων από επίγειες και εναέριες λήψης.

Σε διαφορετικό Chunk εισάγεται το σύνολο του εσωτερικού χώρου που περιλαμβάνει τον γυναικωνίτη, τον πρόναο, το κεντρικό τμήμα, και το ιερό. Σε επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η εισαγωγή δεδομένων από τα φωτοσταθερά πάνω στις εικόνες. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία του Align Photos στις εσωτερικές εικόνες και επιλέγονται οι ίδιες ρυθμίσεις όπως παραπάνω.

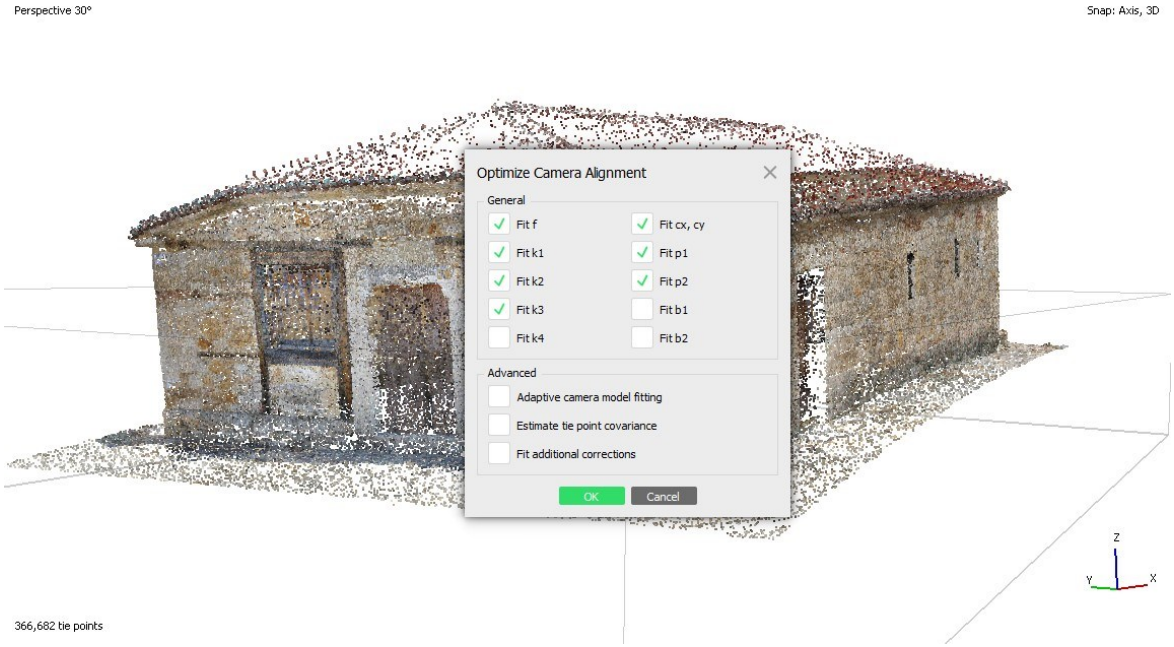
5.1.2. **Βελτιστοποίηση φωτογραμμετρικού μοντέλου με τη μέθοδο Gradual Selection.**

Στην υποενότητα αυτή αναλύεται η διαδικασία που ακολουθείται ώστε να εντοπιστούν τα σημεία με υψηλό σφάλμα, να διαγραφούν τα προβληματικά σημεία και να γίνει εφαρμογή των φίλτρων (reprojection error, reconstruction uncertainty, projection accuracy) για να βελτιωθεί το αραιό νέφος σημείων. Με τα παραπάνω βελτιώνεται η γεωμετρική ακρίβεια του μοντέλου που θα παραχθεί έπειτα. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για κάθε chunk. Αρχικά επιλέγεται από το μενού Tools → Tie Points → Gradual Selection→ Reconstruction Uncertainty και threshold (15). Στη συνέχεια επιλέγονται τα σημεία με Select και έπειτα διαγράφονται με Delete Selected. Κατόπιν γίνεται επιλογή της εντολής Optimize Cameras ενεργοποιώντας τα παρακάτω,

f, cx, cy

k1, k2, k3

p1, p2



Εικόνα 34 - Επιλογή παραμέτρων για την βελτίωση των θέσεων των καμερών.

Με την επιλογή Fit f προσαρμόζεται η εστιακή απόσταση του φακού και είναι σημαντική γιατί επηρεάζει την κλίμακα του μοντέλου και γενικά δίνει ακρίβεια στις αποστάσεις. Με την επιλογή Fit cx, cy προσαρμόζεται το κέντρο του αισθητήρα καθώς μπορεί να υπάρχει μικρή μετατόπιση. Η επιλογή Fit k1 διορθώνει την κύρια ακτινική παραμόρφωση του φακού, ενώ η k2 βελτιώνει την δευτερεύουσα ακτινική παραμόρφωση και η k3 την τριτογενή ακτινική παραμόρφωση. Με την επιλογή p1, p2 διορθώνεται η έκκεντρη τοποθέτηση του φακού.

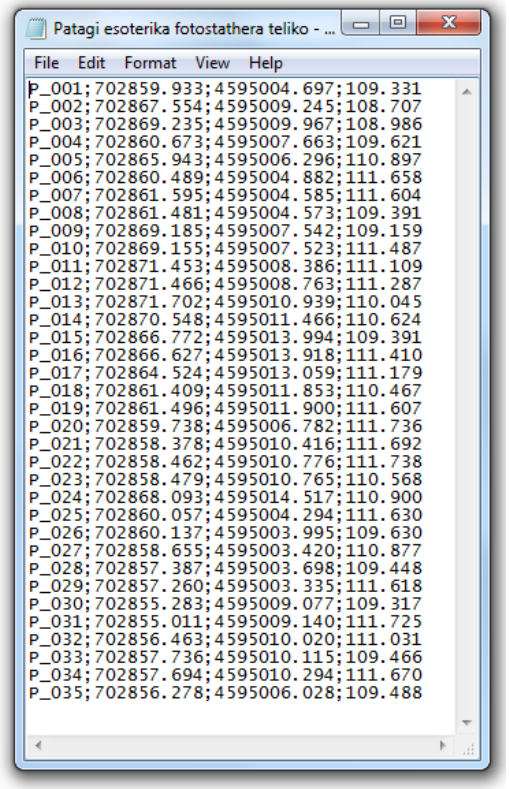
Από το ίδιο μενού επιλέγεται Projection Accuracy και Threshold: 3. Έπειτα επιλέγονται τα σημεία και διαγράφονται. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή της εντολής Optimize Cameras με τις ίδιες ρυθμίσεις.

Επιλέγεται πάλι από το ίδιο μενού Reprojection Error, εφαρμόζεται μείωση κατά 0.3 και ενεργοποιείται εκ νέου η εντολή Optimize Cameras.

Με οπτική παρατήρηση του μοντέλου και προσεκτική επιλογή, μπορούν να επιλεγούν από το νέφος σημείων, τα σημεία που είναι ξεκάθαρα εκτός θέσης. Διαγράφονται τα σημεία αυτά και επιλέγεται και πάλι Optimize Cameras.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί εάν κριθεί απαραίτητο, μέχρι το μοντέλο να παρουσιάζει συνοχή σημείων χωρίς σημεία εκτός γεωμετρίας.

5.1.3. **Εισαγωγή φωτοσταθερών σημείων και γεωαναφορά μοντέλου**



Εικόνα 35 - Εισαγωγή συντεταγμένων για τα φωτοσταθερά.

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εισαγωγή των συντεταγμένων των φωτοσταθερών σημείων. Επιλέγεται από το μενού Reference Pane → Import → Import Markers και έπειτα αρχείο CSV ή TXT. Ορίζεται το ΕΓΣΑ87 για CRS. Γίνεται αναγνώριση των Markers. Έπειτα τοποθετούνται τα σημεία σε επίγειες και εναέριες φωτογραφίες αλλά και στο νέφος σημείων από το σαρωτή. Τέλος επιλέγεται Optimize Cameras ενεργοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους.

f, cx, cy

k1, k2, k3

p1, p2

Σε Πίνακα του Παραρτήματος Α παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών ανά κατηγορία. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά η μορφή του αρχείου TXT που εισάγεται στο Metashape (Εικόνα 35).

5.1.4. **Διαδικασία για την παραγωγή πυκνού νέφους σημείων (Dense Cloud).**

Στην υποενότητα αυτή αναλύεται η διαδικασία που εκτελούμε μέσα στο λογισμικό για να παράγουμε ένα πυκνό νέφος σημείων με όλα τα χαρακτηριστικά. Επιλέγεται από το μενού Workflow → Build Point Cloud→ Quality: High, Depth filtering : Moderate → OK. Στο τέλος της διαδικασίας ο υπολογιστής έχει δημιουργήσει ένα πυκνό νέφος σημείων χρησιμοποιώντας τα κοινά σημεία και διορθώνοντας τις παραμορφώσεις με βάση τις συντεταγμένες των σημείων.



Εικόνα 36 - Δημιουργία dense cloud από επίγειες και εναέριες λήψεις.

5.2. Επεξεργασία δεδομένων επίγειας σάρωσης laser

5.2.1. **Ευθυγράμμιση του σαρωτή laser με χρήση φωτοσταθερών.**

Στην υποενότητα αυτή αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η τοποθέτηση των φωτοσταθερών σημείων επάνω στο νέφος σημείων από τον επίγειο σαρωτή. Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η τοποθέτηση των συντεταγμένων από τα φωτοσταθερά επάνω στις φωτογραφίες. Κατά ανάλογο τρόπο θα αναγνωριστούν ένα προς ένα τα φωτοσταθερά στο νέφος σημείων από τον σαρωτή.

Έτσι κατά την εξαγωγή των δεδομένων από το laser scanner θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το νέφος σημείων είναι γεωαναφερμένο στο σύστημα ΕΓΣΑ87. Καθώς στην εξεταζόμενη περίπτωση το νέφος σημείων είναι εξαγμένο σε τυχαίο σύστημα χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Cloud Compare και τα δεδομένα από τρία φωτοσταθερά από το εσωτερικό του μοντέλου για να στραφεί το νέφος στη σωστή θέση. Εξάγεται το νέφος σημείων από το Cloud Compare και εισάγεται στο Metashape σε ένα νέο chunk.



Εικόνα 37 - Η λήψη από τον σαρωτή θα εξαρτηθεί επίσης από τα γνωστά φωτοσταθερά.

Ως προς την ποιότητα του νέφους σημείων, κρίνεται ότι θα έπρεπε η σάρωση να εκτελεστεί με μικρότερη ταχύτητα κίνησης για να επιτευχθεί μεγαλύτερη πυκνότητα στο νέφος σημείων. Επίσης έπρεπε να επαναληφθούν ακόμα δύο σαρώσεις σε διαφορετικά ύψη. Ιδιαίτερη προσοχή θα έπρεπε να δοθεί σε αντικείμενα με ιδιαίτερα ανακλαστικές επιφάνειες όπως καντήλια και πολυέλαιοι που έχουν περιορισμένη επιφάνεια και μάλιστα μεταλλική που δημιουργεί έντονες ανακλάσεις. Οι ανακλάσεις προκαλούν θάμπωση και απώλεια εστίασης, χαρακτηριστικά μίας μη ποιοτικής φωτογραφίας. Έτσι θα μπορούσε να προκύψει ένα πυκνότερο και πληρέστερο νέφος σημείων με περισσότερες λεπτομέρειες που θα ήταν δύσκολο να καλύψει η φωτογραμμετρία στον εσωτερικό χώρο. Επιπλέον οι σαρώσεις από διαφορετικά ύψη θα μπορούσαν να καλύψουν επαρκώς τις οριζόντιες επιφάνειες σε κάθε υψόμετρο μέσα στο μνημείο.



Εικόνα 38 - Η λήψη από τον σαρωτή θα εξαρτηθεί επίσης από τα γνωστά φωτοσταθερά.

Στο σημείο αυτό έχουν προκύψει νέφη σημείων από διαφορετικές πηγές που είναι έτοιμα να ενοποιηθούν σε ένα νέο Chunk.

5.3. Ενοποίηση φωτογραμμετρικών και σαρωτικών νεφών σημείων στο Metashape.

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα βήματα για την εφαρμογή ενός ενοποιημένου υβριδικού νέφους σημείων. Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε η διαδικασία της ευθυγράμμισης του φωτογραμμετρικού μοντέλου μέσω των φωτοσταθερών. Για την ενοποίηση των δύο νεφών σημείων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αναφορά τους στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

Μετά την ολοκλήρωση της ευθυγράμμισης τα Chunks απεικονίζονται στη σωστή θέση. Η συγχώνευση των Chunks γίνεται από το κεντρικό μενού επιλέγοντας Workflow → Merge Chunks. Επιλέγονται τα Chunks προς ενοποίηση καθώς και τα δεδομένα που έχουν ήδη παραχθεί.



Εικόνα 39 - Λήψη από το υβριδικό νέφος σημείων.

5.4. Παραγωγή τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου.

5.4.1. **Ανακατασκευή επιφανειών και δημιουργία Tiled Model.**

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία για την ανακατασκευή επιφανειών από το ενοποιημένο υβριδικό νέφος σημείων, για τη δημιουργία του mesh. Η ενοποίηση μπορεί να γίνει επίσης στο λογισμικό Metashape. Από το κεντρικό μενού επιλέγεται Workflow → Build Tiled Model. Στη συνέχεια δίνονται οι παρακάτω επιλογές.

Source data: Mesh

Tile size: 256 ή 512 px

Face count: High

Texture size: 8192–16384 px

Enable normals: Yes

Enable texture: Yes

Το Metashape δημιουργεί ένα μοντέλο με επίπεδα το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία ορθοφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης. Θα πρέπει να γίνει ένας έλεγχος για την παρουσία κενών και την διόρθωση ασυνεχειών για την τελική αξιολόγηση της γεωμετρικής ποιότητας του μοντέλου.



Εικόνα 40 - Λήψη από το Tiled Model.

5.4.2. **Παραγωγή ορθοφωτογραφιών (Orthophotos)**

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία για τη δημιουργία ορθοφωτογραφιών των όψεων και των τομών. Οι ορθοφωτογραφίες είναι από τα σημαντικότερα στάδια της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Η ορθοφωτογραφία είναι μία υψηλής ανάλυσης εικόνα γεωμετρικά διορθωμένη κατάλληλη για τη σχεδιαστική αποτύπωση του μνημείου.

Με την ολοκλήρωση της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας και την γεωαναφορά του μοντέλου μέσω των φωτοσταθερών ακολουθεί η διαδικασία παραγωγής ορθοφωτογραφιών στο λογισμικό Metashape. Οι ορθοφωτογραφίες παράγονται με την προβολή των αρχικών εικόνων επάνω στο μοντέλο.

Το μοντέλο είναι ήδη γεωαναφερμένο στο σύστημα ΕΓΣΑ87. Αυτό εξασφαλίζει τη δυνατότητα πραγματικών μετρήσεων επάνω στο μοντέλο και τον προσδιορισμό της πραγματικής θέση του μοντέλου στον χώρο. Καθώς ο στόχος μέσω των ορθοφωτογραφιών, είναι η παραγωγή αρχιτεκτονικών σχεδίων, η σωστή θέση του μνημείου στο χώρο είναι πολύ σημαντική. Δεν αρκεί να είναι γνωστή η ακριβής γεωμετρία και κλίμακα του μοντέλου. Για τη διάγνωση της παθολογίας π.χ. παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων, είναι σημαντικό να είναι γνωστή και η στροφή γύρω από κάθε άξονα, για να μπορεί να ερμηνευθεί η αιτία της κάθε παραμόρφωσης. Έτσι, η ορθή θέση του μοντέλου διασφαλίζεται από τα φωτοσταθερά. Για την παραγωγή κατόψεων και άνοψης ορίστηκε ένα οριζόντιο επίπεδο μέσω νέων σημείων για τον σκοπό αυτό. Αντίστοιχα για την παραγωγή όψεων και τομών δημιουργήθηκαν στον χώρο νέα κατακόρυφα επίπεδα σε κατάλληλες θέσεις ώστε να προβάλλεται κατακόρυφα η επιθυμητή οψοτομή. Η διεύθυνση των κατακόρυφων τομών είναι παράλληλη με τα φωτοσταθερά των τοίχων. Καθώς το μοντέλο ορίζεται σε στροφή και θέση από τα φωτοσταθερά, υπάρχει η

βεβαιότητα ότι θα έχει την σωστή προβολή επάνω στο κατακόρυφο επίπεδο. Μόνο μέσω της παραπάνω διαδικασίας μπορούν να ληφθούν ορθά δεδομένα σχεδιασμού που απεικονίζονται στις ορθοφωτογραφίες.



Εικόνα 41 - Ορθοφωτογραφία της δυτικής όψης. Προβολή σε κατακόρυφο επίπεδο.



Εικόνα 42 - Ορθοφωτογραφία σε επίπεδο κάτοψης. Προβολή σε οριζόντιο επίπεδο.

5.5. Έλεγχος γεωμετρικής συνέπειας και σφάλματος της διαδικασίας συγχώνευσης.

Στην υποενότητα αυτή αναλύεται το σφάλμα RMSE και το κατά πόσο είναι αποδεκτό για αρχιτεκτονική αποτύπωση. Στην συνέχεια γίνεται μία μικρή σύγκριση επίγειας σάρωσης και φωτογραμμετρίας.

Για να είναι εφικτή η αξιολόγηση της γεωμετρικής συνέπειας του φωτογραφικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τα φωτοσταθερά σημεία που τοποθετήθηκαν στις όψεις του μνημείου. Τα σημεία στο κέντρο των φωτοσταθερών μετρήθηκαν με τοπογραφικό όργανο και μετασχηματίσθηκαν στο σύστημα ΕΓΣΑ87. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωαναφορά και την βελτιστοποίηση του φωτογραμμετρικού μοντέλου. Η ποιότητα της προσαρμογής του μοντέλου αξιολογήθηκε με το σφάλμα RMSE ανά άξονα X,Y,Z αλλά και συνολικά για το τρισδιάστατο σφάλμα.

Από το λογισμικό Metashape λαμβάνεται αναφορά (report) όπου φαίνονται όλα τα παραπάνω δεδομένα των σφαλμάτων. Οι αποκλίσεις αυτές αποτελούν τον βασικό δείκτη της γεωμετρικής αξιοπιστίας του μοντέλου και της ποιότητας γεωαναφοράς του. Τα σφάλματα μπορεί να προκύπτουν από την αδυναμία ακριβούς εντοπισμού στο κέντρο του φωτοσταθερού κατά την αντιστοίχιση στο λογισμικό αλλά και κατά την διαδικασία μέτρησης με το όργανο.



Εικόνα 43 - Βλέπουμε το σφάλμα των φωτοσταθερών από το A4 και A5 από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3 - Απόσπασμα του πίνακα σφαλμάτων από την αναφορά του Metashape.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
A1	-3.86055	1.75986	13.4328	14.0869	0.488 (7)
A2	-6.22252	-0.626652	14.358	15.661	1.520 (8)
A3	-3.41463	-1.39741	5.36812	6.51377	0.444 (7)
A4	1.03215	-2.81821	-0.300525	3.01628	0.472 (9)
A5	0.176866	1.4377	-0.490683	1.52939	0.307 (7)

Στο μνημείο που εξετάζεται στη μελέτη αυτή το συνολικό σφάλμα των φωτοσταθερών ανέρχεται στα 0,94 cm. Το X error: 0.36 cm, το Y error: 0,52 cm, το Z error: 0,70 cm, το XY error: 0,63 cm. Τα παραπάνω δεδομένα καταδεικνύουν την μεγάλη ευαισθησία της φωτογραμμετρικής προσαρμογής στην ορθή αναγνώριση και τοποθέτηση των φωτοσταθερών σημείων. Στο Πίνακα 3 βλέπουμε ενδεικτικά το σφάλμα από τα φωτοσταθερά Α4 και Α5.

Η τελική τιμή δίνει μεγάλη ακρίβεια για εφαρμογές αρχιτεκτονικής τεκμηρίωσης και αποτύπωσης μνημείων. Το ιδιαίτερα μικρό σφάλμα δηλώνει την πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των φωτογραμμετρικών συντεταγμένων και των τοπογραφικών συντεταγμένων από το σύστημα ΕΓΣΑ87.

5.6. Ευθυγράμμιση και Σύγκριση Νεφών Σημείων στο Cloud Compare με τον Αλγόριθμο ICP: Μεθοδολογία, Αξιολόγηση και Αποτελέσματα.

Η σύγκριση και αξιολόγηση των νεφών σημείων αποτελεί θεμελιώδες στάδιο στη διαδικασία τεκμηρίωσης τρισδιάστατων δεδομένων, καθώς επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση του βαθμού γεωμετρικής συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών σαρώσεων. Στην περίπτωση του υβριδικού νέφους σημείων, οι ασυνέχειες ή τα κενά που εμφανίζονται στο φωτογραμμετρικό νέφος μπορούν να συμπληρωθούν από το νέφος σημείων του σαρωτή, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη σύγκριση των δύο συνόλων δεδομένων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο λογισμικό Cloud Compare, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για τον γεωμετρικό έλεγχο και τη στατιστική ανάλυση νεφών σημείων από διαφορετικές μεθόδους αποτύπωσης. Το λογισμικό επιτρέπει την αρχική ευθυγράμμιση των νεφών, την εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης της θέσης και, καταληκτικά, τον υπολογισμό των αποκλίσεων μέσω στατιστικών δεικτών. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μια αντικειμενική και τεκμηριωμένη αξιολόγηση της ποιότητας της ευθυγράμμισης.

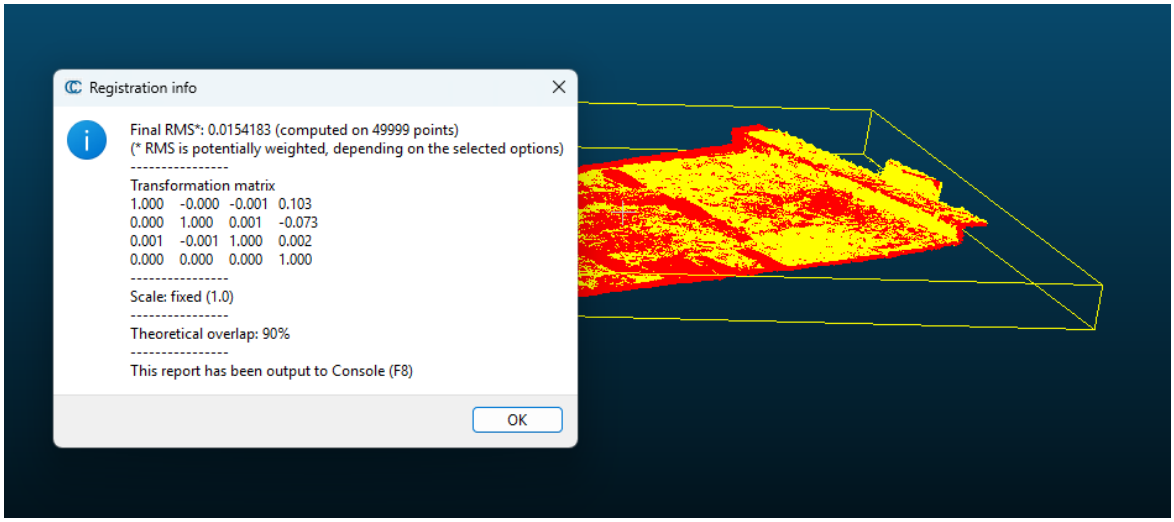
5.6.1. Μεθοδολογία Ευθυγράμμισης Νεφών Σημείων με τον Αλγόριθμο ICP.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση των νεφών σημείων είναι ο ICP (Iterative Closest Point), ο οποίος αποτελεί μία από τις πλέον καθιερωμένες μεθόδους για τη γεωμετρική προσαρμογή τρισδιάστατων δεδομένων. Ο ICP λειτουργεί

επαναληπτικά, εντοπίζοντας για κάθε σημείο του «κινούμενου» νέφους το πλησιέστερο σημείο στο «σταθερό» νέφος και υπολογίζοντας τον μετασχηματισμό (μεταφορά και περιστροφή) που ελαχιστοποιεί το συνολικό σφάλμα μεταξύ των δύο συνόλων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις αντιστοιχίες σημείων, με στόχο τη σταδιακή μείωση του σφάλματος και τη σύγκλιση σε μία βέλτιστη λύση. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν 120 επαναλήψεις, με απενεργοποιημένη την κλιμάκωση, καθώς τα νέφη βρίσκονταν ήδη στην ίδια μονάδα μέτρησης (μέτρα). Μετά την ολοκλήρωση της ευθυγράμμισης, υπολογίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των δύο νεφών και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε μορφή ιστογράμματος, προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα της προσαρμογής.

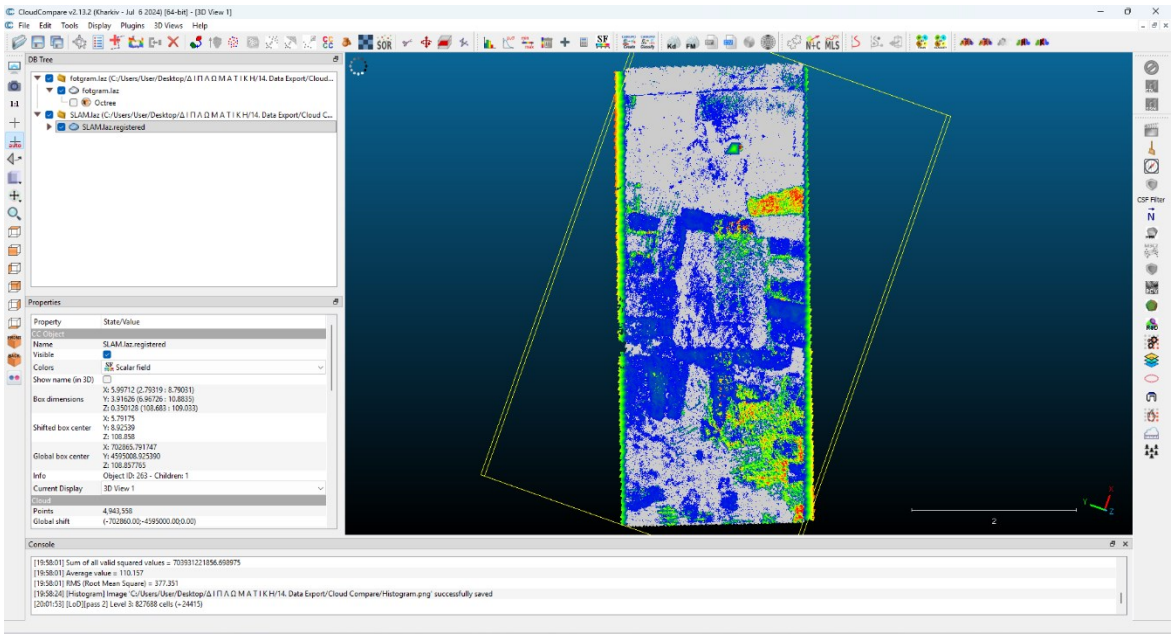
5.6.2. Αποτελέσματα Εφαρμογής του ICP.

Μετά τον υπολογισμό της νέας θέσης, το λογισμικό παρέχει πληροφορίες για το τελικό σφάλμα RMS. Από την εφαρμογή του αλγορίθμου ICP λαμβάνεται σφάλμα **0.0154 m**, δηλαδή περίπου **1.5 cm**. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου σε κτιριακά μοντέλα, αλλά και λόγω της διαφοράς στις τεχνολογίες δημιουργίας των νεφών σημείων, η τιμή αυτή θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητική. Έπειτα πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση του ιστογράμματος των αποστάσεων.



Εικόνα 44 - Τελικό σφάλμα RMS όπως υπολογίστηκε από το Cloud Compare μετά την εφαρμογή του ICP.

Η ανάλυση αυτή επιβεβαιώνει την ποιότητα της ευθυγράμμισης: το 85% των σημείων εμφανίζει αποστάσεις cloud-to-cloud κάτω από ~2 cm. Από την ανάλυση αυτή γίνεται κατανοητό ότι η πλειοψηφία των σημείων μεταξύ των δύο νεφών βρίσκεται σε μικρή απόκλιση, γεγονός που επιβεβαιώνει την επιτυχή γεωμετρική προσαρμογή των δύο νεφών σημείων.



Εικόνα 45. Ευθυγραμμισμένα νέφη σημείων στο Cloud Compare με χρωματική απόδοση των διαφορών.

Γκρι – Ταύτιση (0mm)

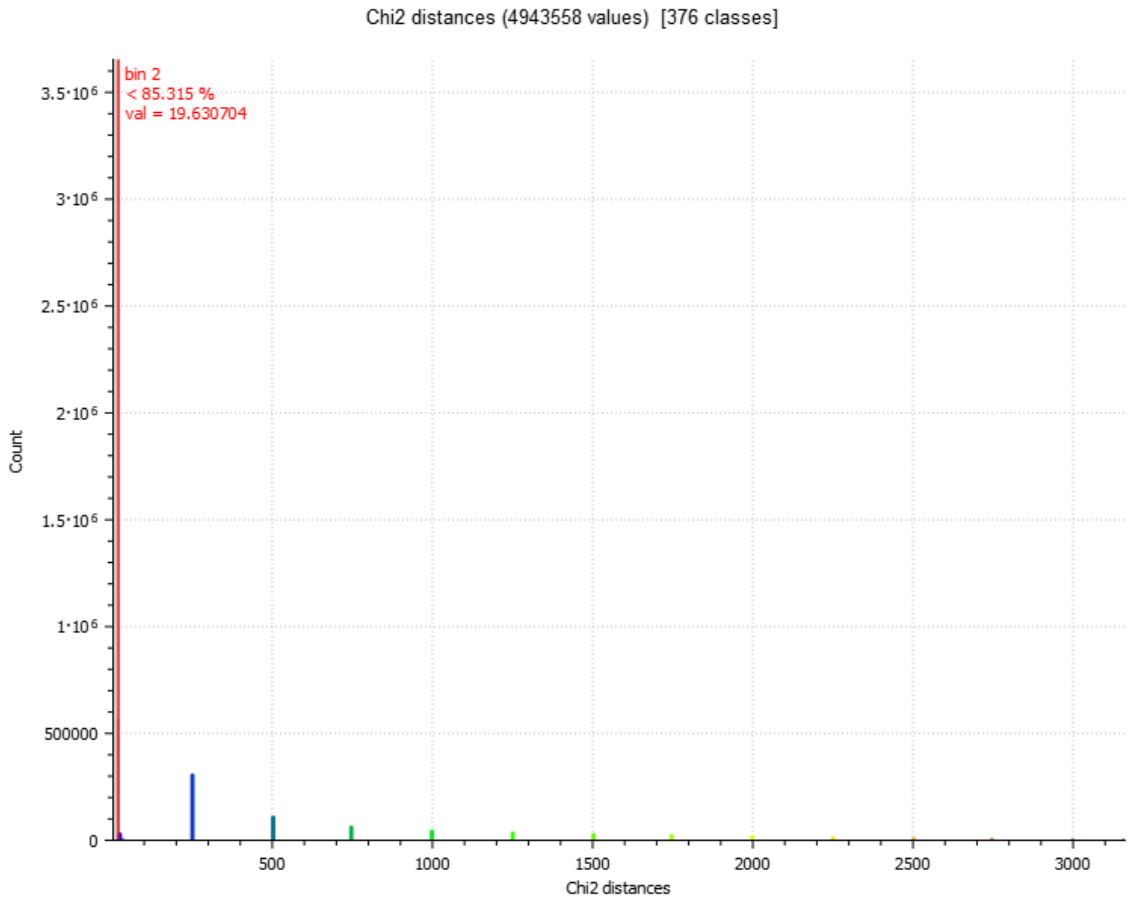
Μπλε - Πολύ μικρή απόκλιση (0–5 mm)

Πράσινο - Μικρή απόκλιση (5–10 mm)

Κίτρινο - Μεσαία απόκλιση (10–20 mm)

Πορτοκαλί - Αυξημένη απόκλιση (20–30 mm)

Κόκκινο - Μεγάλη απόκλιση (>30 mm)



Εικόνα 46 - Ιστόγραμμα των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών σημείων μετά την ευθυγράμμιση.

5.6.3. Συμπεράσματα της Σύγκρισης.

Η διαδικασία ευθυγράμμισης και σύγκρισης των νεφών σημείων στο Cloud Compare καταδεικνύει ότι τα δύο σύνολα δεδομένων ταιριάζουν πολύ καλά μεταξύ τους, παρουσιάζοντας υψηλό βαθμό γεωμετρικής συμβατότητας. Το χαμηλό RMS, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πλειονότητα των σημείων εμφανίζει αποκλίσεις της τάξης των 1–2 cm, δείχνει ότι η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε λειτούργησε αποτελεσματικά και ότι τα δεδομένα είναι αξιόπιστα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, η ευθυγράμμιση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής και κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία ή παραγωγή προϊόντων, όπως ορθοφωτογραφίες, τομές ή τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ακρίβειας.

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Μετασχηματισμός της ορθοφωτογραφίας σε δισδιάστατα αρχιτεκτονικά σχέδια τεκμηρίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για τη μετατροπή των ορθοφωτογραφιών σε δισδιάστατα αρχιτεκτονικά σχέδια. Αναλυτικότερα θα αναλυθεί η μετατροπή των δεδομένων και η εισαγωγή τους στο λογισμικό CAD. Στο περιβάλλον αυτό θα περιγραφούν εργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή αρχιτεκτονικών σχεδίων.

6.1. Εισαγωγή τοπογραφικών δεδομένων στο AutoCAD.

Αναγκαία είναι αρχικά η εισαγωγή των τοπογραφικών δεδομένων στο λογισμικό AutoCAD. Έτσι πρώτα εισάγονται οι συντεταγμένες από τα σημεία των στάσεων όδευσης αλλά και από τα φωτοσταθερά από τον εσωτερικό αλλά και τον εξωτερικό χώρο. Θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι τα σημεία αυτά είναι το κύριο μέσο σύνδεσης των γεωμετρικών δεδομένων με τα ορθοφωτογραμμετρικά προϊόντα που θα χρησιμοποιηθούν ως υπόβαθρο για την παραγωγή των δισδιάστατων σχεδίων. Σε επόμενο βήμα ελέγχονται τα δεδομένα γεωαναφοράς ώστε να επαληθευτεί η κλίμακα σχεδίασης. Έτσι μπορεί να διασφαλιστεί η ορθή τοποθέτηση των ορθοφωτογραφιών και η μέγιστη ακρίβεια των μετρήσεων που θα προκύψει κατά την παραγωγή των τελικών σχεδίων. Με την παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζεται η συμβατότητα μεταξύ των τοπογραφικών μετρήσεων και των φωτογραμμετρικών δεδομένων με ικανή αξιοπιστία για την παραγωγή των αρχιτεκτονικών σχεδίων.

6.2. Εισαγωγή και τοποθέτηση των ορθοφωτογραφιών.

Εφόσον έχει εξασφαλιστεί η ορθή θέση των τοπογραφικών δεδομένων, μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία στην εισαγωγή των παραγόμενων ορθοφωτογραφιών στο περιβάλλον του AutoCAD. Οι ορθοφωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο προσφέροντας ρεαλισμό και ακρίβεια, παράγοντες απαραίτητους για την εκπόνηση σχεδίων τεκμηρίωσης. Η τοποθέτηση των ορθοφωτογραφιών γίνεται επάνω στα αντίστοιχα φωτοσταθερά σημεία ώστε να εξασφαλιστεί η κλίμακα και η στροφή του σχεδίου. Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει την ακρίβεια για την παραγωγή των τελικών αρχιτεκτονικών σχεδίων.

6.3. Ψηφιοποίηση και παραγωγή δισδιάστατων σχεδίων.

Με την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των ορθοφωτογραφιών σε περιβάλλον AutoCAD ακολούθησε η διαδικασία ψηφιοποίησης των ορθοφωτογραφιών για την παραγωγή δισδιάστατων αρχιτεκτονικών σχεδίων. Σε αυτή τη φάση ο σχεδιαστής μπορεί να αποδώσει όποιες από τις λεπτομέρειες της ορθοφωτογραφίας επιθυμεί στο γραμμικό σχέδιο. Το υπόλοιπο σχέδιο μπορεί να παραμείνει ως ράστερ στο φόντο του σχεδίου. Οι αστοχίες που καταγράφονται στα σχέδια της παθολογίας αποδίδονται μοναδικά με τις ορθοφωτογραφίες. Η απόδοσή τους σε γραμμικό σχέδιο ίσως θα μειώσει την ακρίβεια

απόδοσης της πραγματικότητας. Για παράδειγμα οι σχηματισμοί μούχλας ή υγρασίας σε μία επιφάνεια μπορεί να έχουν μία χρωματική διακύμανση που είναι δύσκολο να αποδοθεί στο γραμμικό σχέδιο. Επίσης οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ξύλου είναι επίσης δύσκολο να αποδοθούν. Έτσι η ενσωμάτωση των ορθοφωτογραφιών στα γραμμικά σχέδια παρέχει πλεονεκτήματα όπως η ακρίβεια των μετρήσεων και ο ρεαλισμός της φωτογραφίας.

6.4. Απόδοση αρχιτεκτονικών και μορφολογικών στοιχείων.

Η εξέλιξη των σύγχρονων μεθόδων αρχιτεκτονικής αποτύπωσης έχει μεταβάλει ριζικά τον τρόπο τεκμηρίωσης των μνημείων, καθιστώντας δυνατή την παραγωγή αποτελεσμάτων που μέχρι πριν από λίγα χρόνια θεωρούνταν εξαιρετικά δύσκολο ή και αδύνατο να επιτευχθούν. Η ενσωμάτωση της φωτογραφικής πληροφορίας στα γραμμικά σχέδια επιτρέπει την ακριβή απόδοση αρχιτεκτονικών και μορφολογικών στοιχείων, όπως τα κηροπήγια, τα στασίδια, οι αγιογραφίες, οι πεσσοί με τα τόξα, καθώς και το ιδιαίτερα περίτεχνο τέμπλο του ναού. Η λεπτομέρεια και η πιστότητα με την οποία αποδίδονται τα στοιχεία αυτά υπερβαίνουν τις δυνατότητες των συμβατικών μεθόδων αποτύπωσης, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο και τεκμηριωμένο αρχείο της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου. Με τον τρόπο αυτό, η τεκμηρίωση αποκτά νέες προοπτικές, παρέχοντας πολύτιμο υλικό για την ανάλυση, τη μελέτη και τον σχεδιασμό επεμβάσεων αποκατάστασης και ανάδειξης των μνημείων, με υψηλό βαθμό ακρίβειας και αξιοπιστίας.

7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Επίλογος – Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας.

7.1. Συνοπτική παρουσίαση των κύριων αποτελεσμάτων της έρευνας

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου, που είναι η επιτυχής ψηφιακή αποτύπωση του μνημείου, η δημιουργία υβριδικού νέφους σημείων από φωτογραμμετρία και επίγεια σάρωση, η παραγωγή τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου και η μετατροπή των δεδομένων σε αρχιτεκτονικά σχέδια τεκμηρίωσης.

7.2. Συνολική αξιολόγηση της υβριδικής μεθοδολογίας αποτύπωσης

Στην ενότητα αυτή θα αξιολογήσουμε στο σύνολο την υβριδική μεθοδολογία. Η απόδοση του Laser σαρωτή παρουσίασε κάποια πλεονεκτήματα και κάποιους περιορισμούς. Ο σαρωτής απέδειξε μεγάλη αποδοτικότητα στην ακριβή καταγραφή της χωρικής θέσης των επιφανειών και της συνολικής γεωμετρίας του εσωτερικού χώρου. Παρ' όλα αυτά ο σαρωτής παρουσιάζει περιορισμένη απόδοση στην καταγραφή μικρών μορφολογικών χαρακτηριστικών σε διάφορα αντικείμενα, καθώς δεν μπορεί να καταγράψει φωτογραφικές λεπτομέρειες όπως την υφή των υλικών.

Αντίθετα η φωτογραμμετρία μπορεί να καταγράψει φωτογραφικά κάθε λεπτομέρεια υφής των υλικών και να την μεταφέρει στην σωστή θέση επάνω στο μοντέλο. Ωστόσο η αποδοτικότητά της εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού και την ποιότητα των φωτογραφικών λήψεων.

Από την εφαρμογή της παρούσας έρευνας αναδείχθηκε η ανάγκη για σύμπραξη των δύο μεθοδολογιών. Διαπιστώθηκε ότι όσο μειώνεται η ποιότητα φωτισμού στον εσωτερικό χώρο, τόσο περιορίζεται η ποιότητα των φωτογραφικών δεδομένων. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αυξάνεται η ανάγκη για συμβολή του επίγειου σαρωτή, για την ολοκλήρωση της καταγραφής του νέφους σημείων. Καταληκτικά αποδεικνύεται ότι οι δύο μέθοδοι δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά η μία στην άλλη, καθώς η κάθε μία καλύπτει τους περιορισμούς της άλλης.

7.3. Δυνατότητες εφαρμογής και προτάσεις βελτιστοποίησης της μεθοδολογίας σε μνημεία αντίστοιχης κλίμακας.

Ο συνδυασμός της φωτογραμμετρίας με την επίγεια σάρωση αποδείχθηκε ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο που μπορεί να παράγει γεωαναφερμένα τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ακρίβειας, για την εξαγωγή αξιόπιστων ορθοφωτογραφιών και αρχιτεκτονικών σχεδίων τεκμηρίωσης. Η παραπάνω μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αξιόπιστη ώστε να μπορεί να αποδίδει σύνθετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας και τεκμηρίωσης.

Για την βελτίωση της παραπάνω διαδικασίας διατυπώνονται προτάσεις για την συστηματοποίηση της μεθοδολογίας, αλλά και την δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου αυτής και σε άλλα μνημεία.

1. Στρατηγικός σχεδιασμός της διαδικασίας αποτύπωσης πριν την έναρξη εργασιών.
2. Καθορισμός και επιλογή απαραίτητων ή διαθέσιμων μηχανημάτων ανάλογα με τις απαιτήσεις του μνημείου.
3. Εξασφάλιση υψηλής ποιότητας φωτογραφικού υλικού, με έμφαση στη μετωπική φωτογράφηση, τη σωστή εστίαση, και την αποφυγή θαμπωμάτων.
4. Ορθός καθορισμός των υψομέτρων και ταχύτητας σάρωσης κατά τη λειτουργία του επίγειου σαρωτή.
5. Κάλυψη των ανοιγμάτων με αδιαφανείς επιφάνειες, ώστε να μην προκαλείται έντονη μεταβολή του φωτισμού κατά τη φωτογράφηση.
6. Επιλογή κατάλληλων καιρικών συνθηκών για την αποφυγή έντονων σκιών στις εξωτερικές φωτογραφήσεις.
7. Απομάκρυνση της βλάστησης ή άλλων εμποδίων κοντά στο μνημείο πριν την έναρξη των φωτογραφήσεων.
8. Ιδιαίτερη προσοχή στις ανακλάσεις από τις γυάλινες επιφάνειες, στα κηροπήγια, σε τζάμια, καντήλια κλπ. που προκαλούν σφάλματα στις σαρώσεις ή στη φωτογραμμετρική αντιστοίχιση.
9. Εξασφάλιση ομοιόμορφου και διάχυτου φωτογραφικού φωτισμού εντός του μνημείου και αποφυγή λαμπτήρων σποτ.
10. Αντιμετώπιση τυφλών σημείων εντός του μνημείου. Αναγνωρίζοντας εγκαίρως τα σημεία αυτά, μπορούμε να τοποθετήσουμε σωστό φωτισμό και καλύτερες λήψεις.
11. Επιμέρους αντικείμενα με υψηλή μορφολογική λεπτομέρεια πρέπει να αντιμετωπισθούν ως διαφορετικά υποσύνολα αποτυπώνοντάς τα μεμονωμένα και έπειτα να ενσωματωθούν μέσα στο μοντέλο.
12. Οι φωτογραφικές λήψεις και οι σαρώσεις να γίνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα η μία με την άλλη, γιατί μπορεί να έχουμε αλλοιώσεις στα φωτοσταθερά ή στις συνθήκες του περιβάλλοντος.
13. Οι επιφάνειες σε λευκό χρώμα όπως οι τοίχοι, δυσχεραίνουν την παραγωγή κοινών σημείων αντιστοίχισης, ιδίως όταν γειτνιάζουν με ανοίγματα που προκαλούν έντονες αντιθέσεις φωτισμού.
14. Ορθολογική κατανομή των φωτοσταθερών σημείων στον χώρο, τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά, ώστε να μειωθούν οι παραμορφώσεις του μοντέλου.
15. Επαλήθευση της γεωαναφοράς σε κάθε στάδιο, ώστε να αποφεύγονται λάθη που μεταφέρονται από στάδιο σε στάδιο.
16. Διαχωρισμός των λήψεων σε εσωτερικές και εξωτερικές σε διαφορετικά στάδια εργασίας. Θα ενοποιούνται όταν έχει ολοκληρωθεί ο έλεγχος και η ευθυγράμμιση των σφαλμάτων.
17. Διατήρηση υψηλού ποσοστού επικάλυψης μεταξύ των διαδοχικών λήψεων.
18. Ενδιάμεσοι μορφολογικοί έλεγχοι πριν από μεγάλα υπολογιστικά στάδια όπως dense cloud, tiled model κλπ.

19. Καταγραφή περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη διάρκεια αποτύπωσης μπορεί να βοηθήσει στην ερμηνεία πιθανών σφαλμάτων.

Εάν το σύνολο των παραπάνω προτάσεων εφαρμοστεί, τότε θα έχουμε σίγουρα ένα καλύτερο αποτέλεσμα με λιγότερη προσπάθεια.

7.4. Προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής έρευνας αναδείχθηκαν ζητήματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω επιστημονικής έρευνας. Παρακάτω προτείνονται μερικές από αυτές τις κατευθύνσεις:

- Περαιτέρω ιστορική τεκμηρίωση του μνημείου μέσω του χρονολογικού προσδιορισμού επιμέρους στοιχείων του μνημείου, μέσω των μεθόδων της αρχαιομετρίας, με αντικείμενο έρευνας τις αγιογραφίες, τα ξυλόγλυπτα στοιχεία, καθώς και τη διερεύνηση της προέλευσης των χρωστικών της αγιογραφίας κ.λπ.
- Συγκριτική αξιολόγηση φωτογραφικού υλικού διαφορετικής ποιότητας για την παραγωγή φωτογραμμετρικών μοντέλων. Στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ανάλυσης, της ποιότητας και της επεξεργασίας των εικόνων στην τελική ακρίβεια του παραγόμενου μοντέλου.
- Διερεύνηση των τεχνικών προϋποθέσεων και παραμέτρων που απαιτούνται ώστε οι επίγειοι σαρωτές να αποδίδουν λεπτομέρειας σε συγκρίσιμο επίπεδο με εκείνο της φωτογραμμετρίας.
- Ενσωμάτωση των παραγόμενων δεδομένων σε περιβάλλοντα HBIM (Historic Building Information Modelling) με στόχο την ανάπτυξη έξυπνων μοντέλων διαχείρισης μνημείων για τη δημιουργία μεθόδων αναγνώρισης της παθολογίας των υλικών, την αναγνώριση δομικών φθορών κ.α. μέσω τεχνητής νοημοσύνης (AI).
- Τυποποίηση της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης μνημείων σε διακριτά στάδια εργασίας, με στόχο ενός ολοκληρωμένου πρωτοκόλλου εφαρμογής της μεθοδολογίας και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς του μέσω της εφαρμογής του σε μνημεία διαφορετικής τυπολογίας και κλίμακας.

7.5. Πρωτοτυπία της παρούσας έρευνας.

1. Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στην ολοκληρωμένη ενοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών αποτύπωσης όπως, η χρήση του τοπογραφικού οργάνου για τη μέτρηση των στάσεων και των φωτοσταθερών, η εναέρια φωτογραμμετρία, η επίγεια φωτογραμμετρία, και ο επίγειος σαρωτής SLAM LiDAR. Όλες οι παραπάνω τεχνολογίες συνδυάστηκαν με στόχο την παραγωγή ενός ενιαίου γεωαναφερμένου μοντέλου υψηλής ακρίβειας.

2. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ακρίβειας διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης σε ένα κοινό δίκτυο αναφοράς μέσω της οποίας αξιολογήθηκε η ακρίβεια του φωτογραμμετρικού μοντέλου, τα σφάλματα των φωτοσταθερών σημείων GCPs, οι τιμές RMSE πριν και μετά την διόρθωση, καθώς και η επίδραση λανθασμένων αντιστοιχίσεων.
3. Η μετατροπή των παραγόμενων ορθοφωτογραφιών σε δισδιάστατα σχέδια υψηλής λεπτομέρειας για το μνημείο με πολύπλοκο εσωτερικό, ως εναλλακτική πρακτική για την παραγωγή σχεδίων τεκμηρίωσης.
4. Η χρήση επίγειου σαρωτή και η αξιολόγηση της απόδοσής του σε μνημειακό χώρο, ανέδειξε σημαντικά ζητήματα, που σχετίζονται με τις απαιτήσεις εφαρμογής της μεθόδου και τους προβληματισμούς που αναδείχθηκαν.
5. Η παρούσα έρευνα συμβάλλει ουσιαστικά στην ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου. Με τον τρόπο αυτό προσφέρεται στην επιστημονική κοινότητα μία ακόμη μελέτη τεκμηρίωσης για τη διάσωση και ανάδειξη του μνημείου αυτού καθώς και γενικότερα στην ενίσχυση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς της ευρύτερης περιοχής.
6. Μέσω της παρούσας μελέτης συμβάλλουμε στη συστηματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής αρχιτεκτονικών αποτυπώσεων μέσω των υβριδικών μοντέλων, τα οποία προκύπτουν από τον συνδυασμό των φωτογραμμετρικών μεθόδων με λήψεις από τους επίγειους σαρωτές.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

11th ICOMOS General Assembly. (1996). *PRINCIPLES FOR THE RECORDING OF MONUMENTS, GROUPS OF BUILDINGS AND SITES (1996).* Sofia: ICOMOS.

Alshawabkeh, Y., Baik, A., & Miky, Y. (2021). *Integration of Laser Scanner and Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement.* Basel: Geo-Inf.

Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Bala'awi, F., & Al-Massarweh, A. (2020). *Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan.* Zarqa, Jordan: Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 16.

Balloni, E., Ceka, D., Pierdicca, R., Paolanti, M., Mancini, A., & Zingaretti, P. (2024). *Comparative assessment of Neural Rendering methods for the 3D reconstruction of complex heritage sites in the inner areas of the Marche region - Italy.* Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 35.

Boehler, W., & Marbs, A. (2004). 3D SCANNING AND PHOTOGRAMMETRY FOR HERITAGE RECORDING: A COMPARISON. *Proc. 12th Int. Conf. on Geoinformatics − Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic* (pp. 291-298). Gävle, Sweden: University of Gävle.

Boehler, W., Heinz, G., & Marbs, A. (n.d.). *THE POTENTIAL OF NON-CONTACT CLOSE RANGE LASER SCANNERS FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING.* Mainz: Institute for Spatial Information and Surveying Technology.

Borkowski, A. (2024). *Integration of Laser Scanning, Digital Photogrammetry and BIM Technology: A Review and Case Studies.* Basel, Switzerland.: MDPI.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review.* Castelldefels, Spain: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92.

Cuartero, A., Armesto, J., Rodriguez, P. G., & Arias, P. (2010, August 10). Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of. *Sensors* , pp. 10129-10145.

Dardeniz, G., Ozcan, O., & Yazici, D. (2024). *Integrating thermal and optical models with legacy excavation data for spatial inventories.* Istanbul: Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 35 (2024) e00378 .

De Luca, L. (2017). *Formalisms Methods and Tools for the Large-Scale Morphological Analysis of Architectural Heritage Shapes.* National Centre for Scientific Research.

De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Veron, P., & Florenzano, M. (2011). *A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage.* Computers and Graphics.

Furukawa, Y., & Ponce, J. (n.d.). *Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis.* Illinois : Department of Computer Science.

Georgopoulos, A., & Ioannidis, C. (2004). *Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments.* Athens: FIG Working Week 2004.

Google Maps. (2026, Απρίλιος 13). Retrieved from https://www.google.com/maps/place/%CE%A0%CE%B1%CF%84%CE%B1%CE%B3%CE%AE+682+00/@41.4835574,26.431351,3a,80.6y,69.13h,97.21t/data=!3m7!1e1!3m5!1st8tYCMaO18EegOmkiGMHMg!2e0!6shttps:%2F%2Fstreetviewpixels-pa.googleapis.com%2Fv1%2Fthumbnail%3Fcb_client%3Dmaps_

Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T., & Ringle, K. (2008). *COMPARISON METHODS OF TERRESTRIAL LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY AND TACHEOMETRY DATA FOR RECORDING OF CULTURAL HERITAGE BUILDINGS .* Beijing: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Haddad, D. E., Akciz, S., Arrowsmith, R., Rhodes, D., Oldow, J., ZIelke, O., . . . Shilpakar, P. (2012, August). Applications of airborne and terrestrial laser scanning to paleoseismology. *Geosphere*, pp. 771-786.

Haring, R. (2009). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. *GIM international*.

Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in computer vision.* CAMBRIDGE: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez , L., Cramer, M., Bovet, S., . . . Veje, N. (2009, July 29). Digital Airborne Photogrammetry—A New Tool for Quantitative Remote Sensing?—A State-of-the-Art Review On Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images. *Remote Sens*, pp. 577-605.

James, M., & Robson, S. (2012). *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application.* London.: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117.

Koller, D., Frischer, B., & Humphreys, G. (2009). *Research Challenges for Digital Archives of 3D Cultural Heritage Models.* Virginia: ACM Journal on Computing and Cultural Heritage. doi:10.1145/1658346.1658347

Kraus, K. (2004). *Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans.* Berlin: Walter de Gruyter.

Kraus, K. (n.d.). ΑΕΡΟΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ. In *ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ – Τόμος 1: Βασικές έννοιες και μέθοδοι* (pp. 1-58). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Letellier, R. (2007). *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places.* Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Lourakis, M. A., & Argyros, A. A. (2009). *SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment.* Hellas: Foundation for Research and Technology.

Lowe, D. G. (2004). *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.* Canada: International Journal of Computer Vision 60.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2014). *Close-Range Photogrammetry an 3D Imaging.* Berlin: Walter de Gruyter GmbH.

Mencia, J., Polo, M.-E., Felicisimo, A., Daire, M.-Y., Guimil - Farina, A., Manana - Borrazas, P., . . . Lopez - Romero, E. (2024). *Comprehensive workflow for erosion monitoring of coastal archaeological sites by means of digital photogrammetry: An Iberian case study.* Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 35 (2024) e00373 .

Muralikrishnan, B. (2021). *Performance Evaluation of Terrestrial Laser Scanners - A Review.* Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). *Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture.* Dublin: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 76 .

Nex, F., & Remondino, F. (2014). *UAV for 3D mapping applications: a review .* Trento, Italy : 3D Optical Metrology Unit, Bruno Kessler Foundation (FBK).

Pan, Z., Hou, J., & Yu, L. (2026, JUNE 6). Sematic - Enhanced LiDAR-Inertial SLAM With Robust Loop Closure and Global COnsistency. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEM FOR VIDEO TECHNOLOGY*, pp. 7431-7443.

Pellegri, G. (2015). *Survey and drawing representation of architecture and environment: different teaching approach for architects and engineers. .* Genoa: Procedia - Social and Behavioral Sciences 174.

Penjor, T., Banihashemi, S., Hajirasouli, A., & Golzad, H. (2024). *Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM.* Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage 35.

Remondino, F. (2011). *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning.* Trento, Italy: MDPI.

Remondino, F., & Campana, S. (2014). *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage.* BAR International Series 2598.

Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* . Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH) .

Salah, R., Geczy, N., & Karolyfi, K. (2025). *Architectural Heritage Digitization: A Classification-Driven Semi_Automated Scan-to-HBIM Workflow.* Basel: Buildings.

Schonberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). *Structure from Motion Revisited.* Zurich: CVPR.

Shan, J., & Toth, C. K. (2017). *Topographic Laser Ranging and Scanning.* Ohio: CRC PRESS.

Shi, S., Muralikrishnan, B., & Sawyer, D. (2021). *Terrestrial laser scanner calibration and performance evaluation using the network method.* USA: National Institute of Standards and Technology.

Stal, C., Tack, F., De Maeyer, P., De Wulf, A., & Goosens, R. (2011). *AIRBORNE PHOTOGRAMMETRY AND LIDAR FOR DSM EXTRACTION AND 3D CHANGE*

DETECTION OVER AN URBAN AREA – A COMPARATIVE STUDY . Ghent : Journal of Remote Sensing, vol. 34.

Tiozzo Fasiolo, D., Scalera, L., & Maset, E. (2023, March 25). Comparing LiDAR and IMU - based SLAM approaches for 3D robotic mapping. *Robbotica*, pp. 2588-2604.

Tips, G. (2025, Απρίλιος 28). *Agisoft Metashape - Complete Tutorial (Cloud, Mesh, DSM, DTM, Classify, Orthoimage - No GCPs)*. Retrieved from www.youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=je79gV8HsZI

Wan Aziz, W., Syahmi, W., Anuar, A., & Khairul, N. T. (2012). Terrain Slope Analyses between Terrestrial Laser Scanner and Airborne Laser Scanning. *2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC 2012)* (pp. 242-247). Johor Bahru, Johor, Malaysia: Faculty of Geoinformation.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications.* London: Geomorphology 179 .

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.* New York: McGraw Hill Education.

Yu, C., Chao, Z., Xie, H., Hua, Y., & Wu, W. (2023, December 21). An Enhanced Multi-Sensor Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Framework with Coarse-to-Fine Loop Closure Detection Based on a Tightly Coupled Error State Iterative Kalman Filter. *Robotics*, pp. 1-21.

Zhong, Q., Xing, J., Liu, J., & Luo, L. (2026, April 229). Uncertainty-Aware LiDAR-Inertial-Visual SLAM with Adaptive Fusion and Multi-Channel Geometric Loop Closure. *Robotics*, pp. 1-31.

Zhou, B., Li, C., Chen, S., Xie, D., Yu, M., & Li, Q. (2023, June 15). ASL-SLAM: A LiDAR SLAM With Activity Semantics-Based Loop Closure. *IEEE Sensors Council*, pp. 13499 - 13510.

Αλιπράντης, Ι., Μιχαλάκης, Κ., Κατηφόρη, Α., Κούτρης, Β., Μποϊλε, Μ., Παυλίδης, Γ., & Καρυδάκης, Γ. (2020). 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο - Ψηφιοποιήσης Πολιτιστικής Κληρονομιάς. In Κ. Σκριάπας (Ed.), *Κέντρο ολοκληρωμένης ψηφιακής διαχείρισης πολιτισμικής κληρονομιάς CultKiosk: Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στα νησιά του Βορείου Αιγαίου. Α*, pp. 788-798. Αιγάλεω Αττικής: Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Δίκτυο "Περραιβία" . Retrieved Μάιος 26, 2026

Γουρίδης, Α. Ι. (2008). *Ο ΜΕΤΑΒΥΖΑΝΤΙΝΟΣ ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΤΗ ΠΑΤΑΓΗ ΟΡΕΣΤΙΑΔΑΣ ΚΑΙ Η ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ.* ΟΡΕΣΤΙΑΔΑ: ΔΗΜΟΣ ΟΡΕΣΤΙΑΔΑΣ.

Γουρίδης, Α. Ι. (2025). *ΟΨΕΙΣ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ & ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ.* ΟΡΕΣΙΑΔΑ: ΔΗΜΟΣ ΟΡΕΣΤΙΑΔΑΣ.

Γραμματικόπουλος, Λ. (2025, Μάρτιος). Φωτογραμμετρία Παρουσίαση ΟΣΣ1. Πάτρα: ΕΑΠ.

Λάππα, Μ. (2018). *Μέθοδοι αποτύπωσης για αρχιτεκτονικές εφαρμογές.* Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.

Μαλλούχου - Tufano, Φ. (2015). *Προστασία και Διαχείριση Μνημείων.* Ζωγράφου: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ.

Μπούρας, Χ. Θ. (1999). *ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ.* ΑΘΗΝΑ: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.

Παπαδιαμαντή, Κ. (2022). *Σύγχρονες Μέθοδοι Γεωμετρικής Τεκμηρίωσης Μνημείων.* Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.

Παράρτημα Α: «Πίνακες συντεταγμένων»

Ακολουθεί, σε νέα σελίδα, το παράρτημα της Εργασίας.

Συντεταγμένες Στάσεων από GPS			
A/A	X	Y	Z
T1S	702843.879	4595001.398	109.252
T2S	702867.546	4594992.970	109.320
T3S	702880.408	4595015.106	107.558
T4S	702871.587	4595018.160	108.252
T5S	702867.789	4595018.963	108.469
T6S	702854.310	4595011.955	109.258

Συντεταγμένες Στάσεων Όδευσης			
A/A	X	Y	Z
T1S	702843.879	4595001.398	109.252
T2	702867.539	4594992.972	109.303
T3	702880.401	4595015.141	107.541
T4	702871.571	4595018.188	108.237
T5	702867.775	4595018.980	108.449
T6	702854.294	4595011.972	109.235

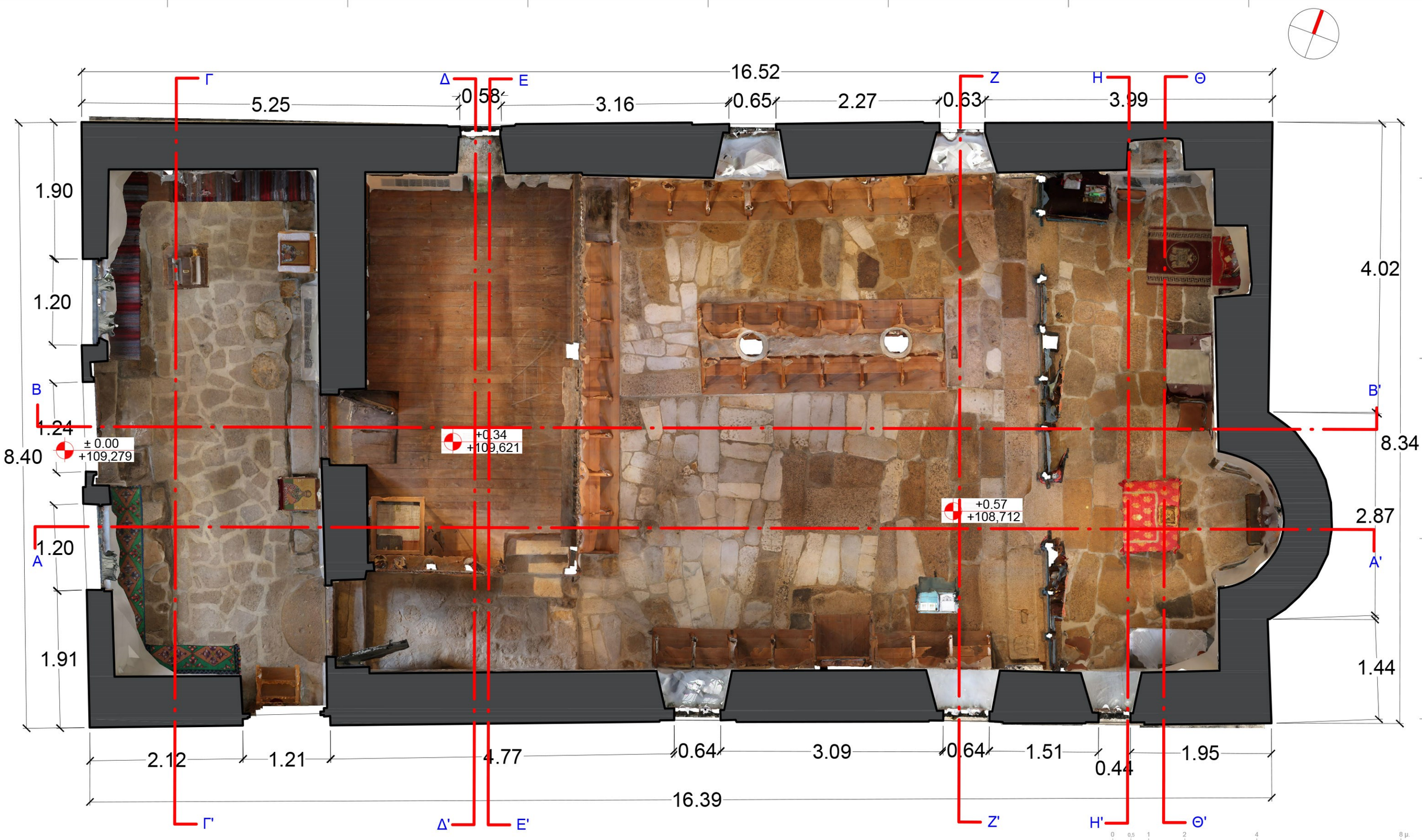
Συντεταγμένες Φωτοσταθερών στο Εξωτερικό			
A1	702854.395	4595009.738	110.007
A2	702854.380	4595009.781	111.723
A3	702856.007	4595005.452	111.517
A4	702857.260	4595002.348	111.631
A5	702857.237	4595002.377	109.943
B1	702857.566	4595002.210	111.615
B2	702857.489	4595002.180	109.931
B3	702864.481	4595004.949	110.662
B4	702872.361	4595007.985	111.473

B5	702872.386	4595007.972	109.315
B6	702868.503	4595006.553	110.487
C1	702872.580	4595008.225	108.942
C2	702872.539	4595008.245	111.464
C3	702872.504	4595010.839	110.096
C4	702870.953	4595012.463	111.435
C5	702869.800	4595015.693	111.330
C6	702869.816	4595015.699	108.701
D1	702869.484	4595015.819	111.502
D2	702869.620	4595015.836	108.739
D3	702861.705	4595012.769	110.622
D4	702854.450	4595009.992	111.506
D5	702854.414	4595009.948	109.605
Συντεταγμένες Φωτοσταθερών στο Εσωτερικό			
P_001	702859.933	4595004.697	109.331
P_002	702867.554	4595009.245	108.707
P_003	702869.235	4595009.967	108.986
P_004	702860.673	4595007.663	109.621
P_005	702865.943	4595006.296	110.897
P_006	702860.489	4595004.882	111.658
P_007	702861.595	4595004.585	111.604
P_008	702861.481	4595004.573	109.391
P_009	702869.185	4595007.542	109.159
P_010	702869.155	4595007.523	111.487
P_011	702871.453	4595008.386	111.109
P_012	702871.466	4595008.763	111.287
P_013	702871.702	4595010.939	110.045
P_014	702870.548	4595011.466	110.624
P_015	702866.772	4595013.994	109.391
P_016	702866.627	4595013.918	111.41

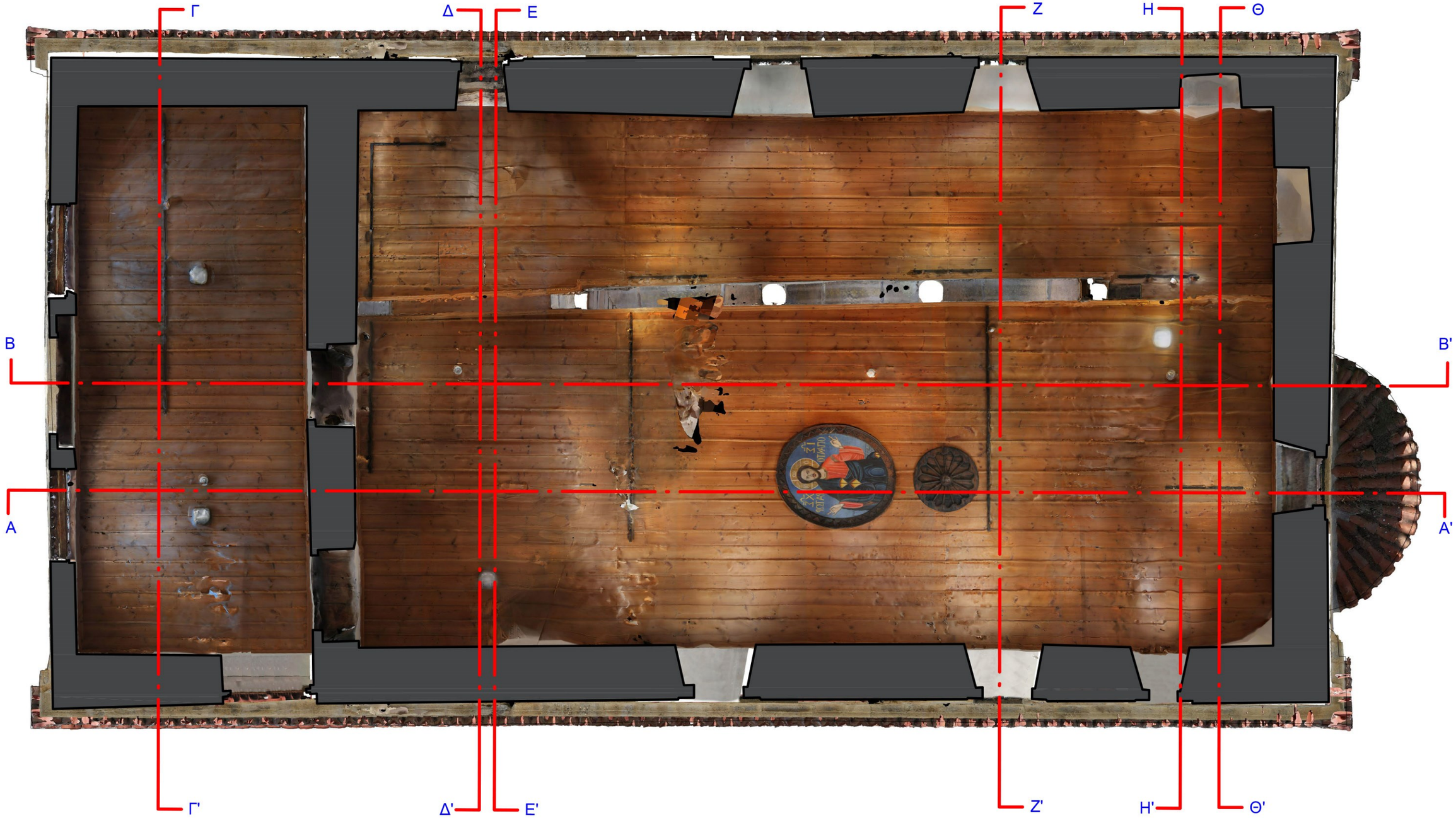
P_017	702864.524	4595013.059	111.179
P_018	702861.409	4595011.853	110.467
P_019	702861.496	4595011.9	111.607
P_020	702859.738	4595006.782	111.736
P_021	702858.378	4595010.416	111.692
P_022	702858.462	4595010.776	111.738
P_023	702858.479	4595010.765	110.568
P_024	702868.093	4595014.517	110.9
P_025	702860.057	4595004.294	111.630
P_026	702860.137	4595003.995	109.630
P_027	702858.655	4595003.420	110.877
P_028	702857.387	4595003.698	109.448
P_029	702857.260	4595003.335	111.618
P_030	702855.283	4595009.077	109.317
P_031	702855.011	4595009.140	111.725
P_032	702856.463	4595010.020	111.031
P_033	702857.736	4595010.115	109.466
P_034	702857.694	4595010.294	111.670
P_035	702856.278	4595006.028	109.488

…

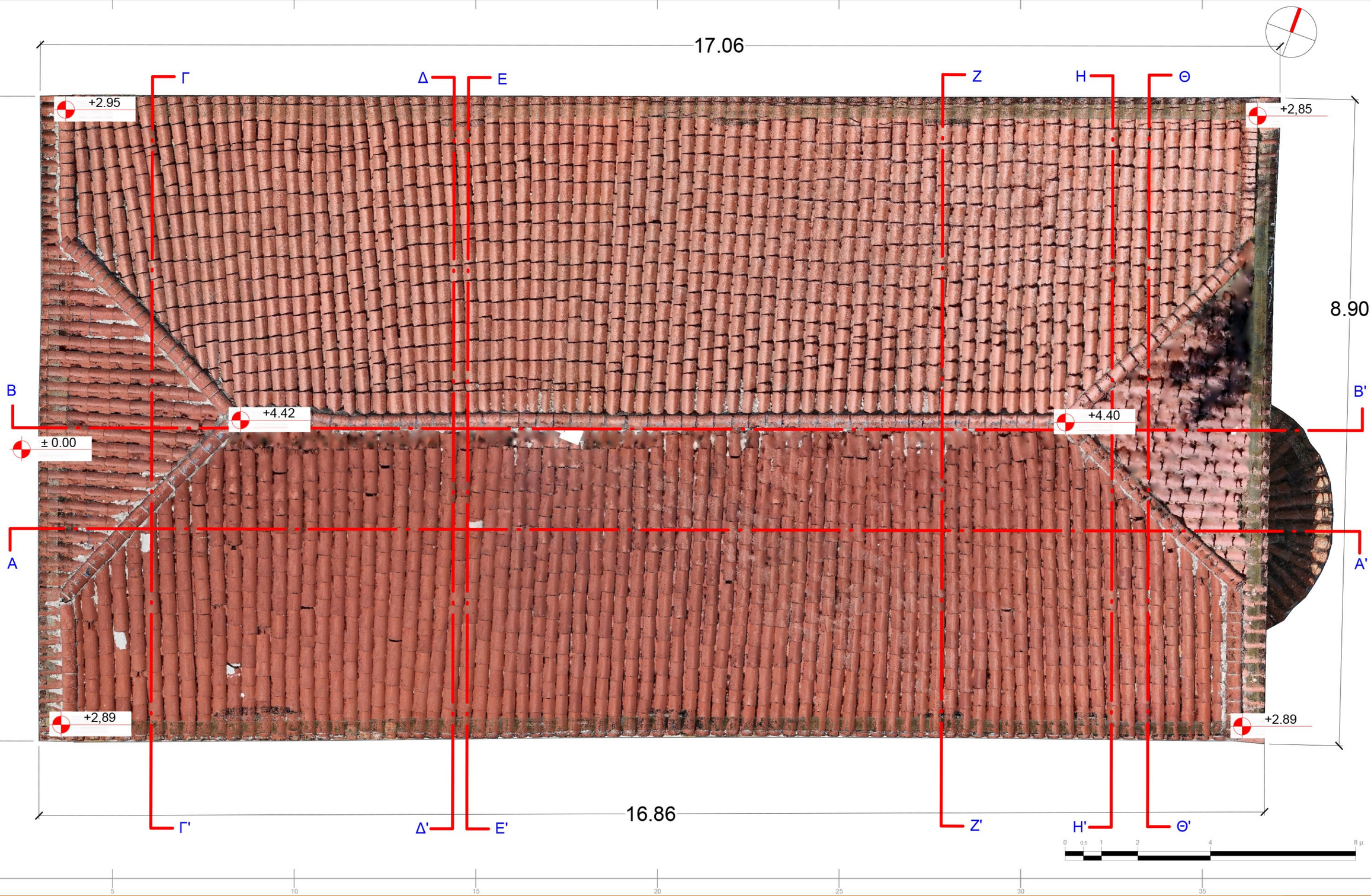
Παράρτημα Β: «Σχέδια»



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	ΘΕΜΑ: **ΚΑΤΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ**	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: **A1**	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ: ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
	Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού	«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»			Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ: ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
	Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων		ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	ΘΕΜΑ: **ΑΝΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ**	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: **A2**	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
	Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού	«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»			Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
	Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων		ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	ΘΕΜΑ: **ΚΑΤΟΨΗ ΣΤΕΓΗΣ**	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: **A3**	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
	Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού	«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»			Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
	Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων		ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	ΘΕΜΑ: Δ Υ Τ Ι Κ Η Ο Ψ Η	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: A4
	Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού	«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»		Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ: ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
	Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων			Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ: ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026
				ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Ν Ο Τ Ι Α Ο Ψ Η

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A5

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0.5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	ΘΕΜΑ:	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
	Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού	«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»	**ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ**	**A6**	Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ
	Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων		ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Β Ο Ρ Ε Ι Α Ο Ψ Η

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: A7

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Α - Α '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A8

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: «Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»	ΘΕΜΑ: Τ Ο Μ Η Β - Β ' ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50 ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: A9	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Γ - Γ '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A10

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Δ - Δ '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A11

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0.5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Ε - Ε '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A12

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Ζ - Ζ '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: A13

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ



0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»

ΘΕΜΑ:

Τ Ο Μ Η Η - Η '

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ:

A14

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
ΙΟΥΛΙΟΣ 2026

Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ
ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:
ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ

+4,42

+4,42



+0.00

+0.00

0 0,5 1 2 4 8 μ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού Π.Μ.Σ. - Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: «Συνδυαστική αξιοποίηση φωτογραμμετρίας και δεδομένων επίγειας σάρωσης laser για την αποτύπωση και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση μνημείων: Μελέτη περίπτωσης Ι.Ν. Αγίου Νικολάου Παταγής - Ορεστιάδας»	ΘΕΜΑ: Τ Ο Μ Η Θ - Θ ' ΚΛΙΜΑΚΑ: 1 : 50	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: A15 ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2026	Α' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ Β' ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Κ. ΚΑΛΑΦΑΤΖΗΣ

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.