



«Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών»
«Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και
Αρχαιολογικών Χώρων»

Διπλωματική Εργασία
«Γεωμετρική και Οπτική Τεκμηρίωση του Ναού Hubertuskapelle
στο Düsseldorf, με συνδυασμό εικόνων και 3D σαρώσεων»

Αργύρης Κολτσίδας

Επιβλέπων καθηγητής: Λάζαρος Γραμματικόπουλος

Πάτρα, Ιούλιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αργύρη Κολτσίδα 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.

«Γεωμετρική και Οπτική Τεκμηρίωση του Ναού Hubertuskapelle
στο Düsseldorf, με συνδυασμό εικόνων και 3D σαρώσεων»

«Αργύρης Κολτσίδας»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής

Επιβλέπων Καθηγητής

Λάζαρος Γραμματικόπουλος

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ
Διδάκτωρ Μηχανικός ΕΜΠ

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής

Χρήστος Στεντούμης

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ
Διδάκτωρ Μηχανικός ΕΜΠ

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Πάτρα, Ιούλιος, 2026

Ευχαριστώ

*τη Μαρία, τον Λάμπρο και τη Νεφέλη για την υπομονή τους,
τον Thorsten Spelter για την βοήθεια του*

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τρισδιάστατη γεωμετρική και οπτική τεκμηρίωση της εκκλησίας Hubertuskapelle στο Düsseldorf της Γερμανίας, μέσω της αξιοποίησης σύγχρονων τεχνολογιών αποτύπωσης και μοντελοποίησης. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων της επίγειας σάρωσης Laser (Terrestrial Laser Scanning – TLS) και της φωτογραμμετρίας Structure from Motion (SfM) για την παραγωγή ακριβών και αξιόπιστων τρισδιάστατων μοντέλων πολιτιστικών μνημείων, καθώς και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων.

Για την υλοποίηση της έρευνας πραγματοποιήθηκε η συλλογή γεωμετρικών και οπτικών δεδομένων της εκκλησίας με τη χρήση επίγειου σαρωτή Laser και φωτογραφικών λήψεων. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν σε ειδικά λογισμικά, οδηγώντας στην παραγωγή τεσσάρων τρισδιάστατων μοντέλων: ενός μοντέλου βασισμένου αποκλειστικά στη φωτογραμμετρία SfM, ενός μοντέλου που προέκυψε αποκλειστικά από τα δεδομένα του σαρωτή και δύο υβριδικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν μέσω διαφορετικών διαδικασιών συνδυασμού των δύο πηγών δεδομένων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των παραγόμενων μοντέλων με βάση κριτήρια, όπως η γεωμετρική ακρίβεια, η πληρότητα της αποτύπωσης, η πυκνότητα και ποιότητα των νεφών σημείων και η ρεαλιστική απόδοση των τελικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε μεθόδου, ενώ παράλληλα κατέδειξαν ότι η συνδυαστική αξιοποίηση δεδομένων φωτογραμμετρίας και επίγειας σάρωσης Laser μπορεί να οδηγήσει σε πληρέστερα και ποιοτικότερα τρισδιάστατα μοντέλα σε σχέση με τη χρήση κάθε τεχνικής μεμονωμένα.

Η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση των δυνατοτήτων των σύγχρονων τεχνολογιών τρισδιάστατης τεκμηρίωσης και αναδεικνύει τη σημασία τους για την καταγραφή, διατήρηση και ψηφιακή ανάδειξη μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Λέξεις – Κλειδιά

Τρισδιάστατη τεκμηρίωση, φωτογραμμετρία SfM, επίγεια σάρωση Laser, TLS, πολιτιστική κληρονομιά, νέφος σημείων, 3D μοντέλα, Hubertuskapelle.

«Geometric and Optical Documentation of the Hubertuskapelle Chapel in Düsseldorf Using Combined Imagery and 3D Scanning»

«Argyris Koltsidas»

Abstract

This thesis focuses on the three-dimensional geometric and visual documentation of the Hubertuskapelle chapel in Düsseldorf, Germany, through the application of modern surveying and modeling technologies. The main objective is to investigate the capabilities of Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Structure from Motion (SfM) photogrammetry in the generation of accurate and reliable 3D models of cultural heritage structures, as well as to evaluate the results obtained through the integration of these two techniques.

For this purpose, geometric and visual data of the church were collected using a terrestrial laser scanner and a set of high-resolution digital photographs. The acquired datasets were processed using specialized software to produce four different 3D models: one model generated exclusively from SfM photogrammetry, one model derived solely from laser scanning data, and two hybrid models created through different data fusion approaches combining the outputs of both methods.

A comparative assessment of the resulting models was conducted based on criteria such as geometric accuracy, completeness of the reconstruction, point cloud density and quality, surface representation, and visual realism. The analysis aimed to identify the strengths and limitations of each methodology and to determine the extent to which the integration of photogrammetric and laser scanning data can improve the quality of the final three-dimensional representation.

The results demonstrate that both techniques provide valuable and complementary information for the documentation of cultural heritage monuments. While laser scanning

offers high geometric accuracy and reliable spatial measurements, photogrammetry provides detailed texture information and cost-effective data acquisition. The hybrid approaches were found to enhance the overall quality of the models by combining the advantages of both technologies, leading to more complete and realistic digital representations of the studied structure.

This research contributes to the field of digital heritage documentation by highlighting the potential of integrated surveying methodologies for the preservation, analysis, and visualization of historic buildings.

Keywords

3D documentation, Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry, Terrestrial Laser Scanning (TLS), cultural heritage, point cloud, 3D models, Hubertuskapelle.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων	xiv
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xv
1. Εισαγωγή.....	1
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	4
2.1 Πολιτιστική Κληρονομιά	4
2.2 Φωτογραμμετρία	7
2.2.1 Structure from Motion (SfM).....	7
2.2.2 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV).....	9
2.3 Επίγειοι σαρωτές Laser (TLS)	11
2.3.1 Κατηγορίες Επίγειων Σαρωτών	11
2.3.2 Σφάλματα	13
2.3.3 Ένωση νεφών	13
2.4 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ETRS / UTM 32	14
3. Αντικείμενο μελέτης και συλλογή δεδομένων.....	16
3.1 Η εκκλησία του Αγίου Ουβέρτου (Hubertuskapelle)	16
3.1.1 Γενικά.....	16
3.1.2 Ιστορικά στοιχεία	17
3.1.3 Αρχιτεκτονικά στοιχεία.....	22
3.1.4 Ανακαινίσεις	25
3.1.5 Επιλογή μνημείου.....	25
3.2 Διαθέσιμος εξοπλισμός	28
3.2.1 Επίγειος σαρωτής Laser	28
3.2.2 Μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV)	28
3.2.3 Γεωδαιτικός σταθμός	29
3.2.4 Δέκτης GPS	29
3.2.5 Φωτογραφική μηχανή	29
3.3 Σάρωση με σαρωτή Laser	29
3.4 Φωτογραμμετρική αποτύπωση	33
3.5 Γεωαναφορά.....	38
4. Επεξεργασία δεδομένων	41
4.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή.....	41
4.1.1 Γεωαναφορά νέφους σημείων.....	44
4.2 Επεξεργασία δεδομένων φωτογραμμετρίας.....	48
4.2.1 Ευθυγράμμιση εναέριων φωτογραφιών	49
4.2.2 Ευθυγράμμιση επίγειων φωτογραφιών	51
4.2.3 Συνένωση Components (Merging Components)	52
4.2.4 Έλεγχος ποιότητας αραιού νέφους σημείου	55
4.3 Εισαγωγή δεδομένων σαρωτή στο Reality Scan.....	57
4.4 Δημιουργία αρχείων πλέγματος (Mesh).....	60

4.4.1 Έλεγχος ποιότητας αρχείων πλέγματος (Mesh).....	64
4.5 Δημιουργία Χρώματος και Υφής (Coloring and Texturing).....	65
5. Αποτελέσματα.....	68
5.1 Ποιοτική σύγκριση τρισδιάστατων μοντέλων	68
5.2 Αξιολόγηση ορθοφωτογραφιών	78
5.3 Αξιολόγηση ευθυγράμμισης νεφών σημείων στο Cloud Compare	83
6. Συμπεράσματα	87
Βιβλιογραφία.....	91
Παράρτημα Α: Σκαριφήματα και τοπογραφικό.....	97
Παράρτημα Β: Αναφορά σφάλματος Cyclone Register	100

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Τρισδιάστατο μοντέλο του φόρουμ της Πομπηίας. (Πηγή: «Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning», του F. Remondino, 2011, <i>Remote Sensing</i> , 3(6), σ. 1115)	6
Εικόνα 2. Η τεχνική Structure from Motion. (Πηγή: https://www.baeldung.com/cs/computer-vision-bundle-adjustment)	8
Εικόνα 3. Ροή εργασίας Incremental SfM (Πηγή: Bianco, S., Ciocca, G., & Marelli, D. (2018). Evaluating the performance of structure from motion pipelines. <i>ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing</i> , 136, 80–92.)	9
Εικόνα 4. Τεκμηρίωση της εκκλησίας της Παναγίας του Ασίνου στην Κύπρο με χρήση Drone και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου με εκτύπωση από 3D εκτυπωτή. (Πηγή: Themistocleous, Ioannides, Agariou & Hadjimitsis, 2015).	10
Εικόνα 5. Διαφορά λειτουργίας με μέτρηση χρόνου και μέτρηση φάσης. (Πηγή: https://www.survtechsolutions.com/how-does-laser-scanning-work)	12
Εικόνα 6. Πεδίο ορατότητας σαρωτών. Αριστερά: Κάμερας, Μέση: Υβριδικός, Δεξιά: Πανοραμικός (Πηγή: Abbas, Setan, Majid, Idris, Ariff, Chong & Lichti, 2014)	12
Εικόνα 7. Επίδραση της ατμοσφαιράς και της ανακλαστικότητας στην μέτρηση. (Πηγή: Jurek, Kuhlmann, & Holst, 2017).	13
Εικόνα 8. Η περιοχή του Düsseldorf με του κεντρικούς μεσημβρινούς και τις ζώνες UTM που σχηματίζονται. (Πηγή: www.Wuppertal.de)	15
Εικόνα 9. Η πόλη του Düsseldorf με τους τομείς και τις περιοχές της. Με κόκκινο χρώμα στα βόρεια η περιοχή Wittlaer. (Πηγή: https://www.duesseldorf.de/)	16
Εικόνα 10. Το Winkelhausen στην τωρινή του κατάσταση. (Πηγή: https://ratingen.adfc.de/artikel/kaiserswerth-krefeld-angermund)	17
Εικόνα 11. Θέσεις των μνημείων. (Πηγή: Χάρτης με επιμέλεια του συγγραφέα στο QGIS)	18
Εικόνα 12. Οικόσημο στην πύλη του Winkelhausen. (Πηγή: https://www.rheinruhronline.de/niederrhein/niederrheinteil1/stadt-duesseldorf/angermund-gross-winkelhausen.htm)	20
Εικόνα 13. Οικόσημο στη Hubertuskapelle. (Πηγή: https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder/)	20
Εικόνα 14. Άποψη της πύλης του οχυρού από το εσωτερικό της εκκλησίας. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)	21
Εικόνα 15. Αρχιτεκτονικό σκαρίφημα της εκκλησίας. (Πηγή: https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder)	22
Εικόνα 16. Άποψη της εκκλησίας από την νοτιοανατολική πλευρά. (Πηγή: https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder)	23
Εικόνα 17. Πρόσοψη της εκκλησίας. (Πηγή: https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder)	24
Εικόνα 18. Πλακέτα στην πρόσοψη της εκκλησίας με το έμβλημα της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας και την ένδειξη Μνημείο (Denkmal). (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)	27
Εικόνα 19. Σάρωση του εσωτερικού της εκκλησίας. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)	30
Εικόνα 20. Σάρωση της πρόσοψης. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)	31

Εικόνα 21. Σάρωση της πρόσοψης και της νότιας πλευράς. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα).....	31
Εικόνα 22. Σάρωση νότιας πλευράς. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα).....	32
Εικόνα 23. Κυκλικός στόχος στη δυτική πλευρά. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα) ..	32
Εικόνα 24. Σαρωτής και στόχος στη νότια πλευρά. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)	33
Εικόνα 25. Πρώτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	34
Εικόνα 26. Δεύτερη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	34
Εικόνα 27. Τρίτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	35
Εικόνα 28. Τέταρτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	35
Εικόνα 29. Φωτογραφία με Drone από μεγάλο ύψος. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	36
Εικόνα 30. Αποτύπωση της υγρασίας σε σκεπή και τοίχους.(Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα).....	36
Εικόνα 31. Αποτύπωση λεπτομερειών με Drone.(Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα).....	37
Εικόνα 32. Φθορά ξύλινων τμημάτων του καμπαναριού και υγρασία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	37
Εικόνα 33. Μέτρηση σταθερού σημείου με δέκτη GPS Trimble. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα).....	38
Εικόνα 34. Στάση ταχυμέτρου για την μέτρηση των σταθερών σημείων. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)	39
Εικόνα 35. Αριθμός στάσεων, συνενώσεων και συνολικών σημείων.(Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	41
Εικόνα 36. Δύο νέφη σημείων με διαφορετικό χρωματισμό μετά την επιλογή Visual Alignment (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register).....	42
Εικόνα 37. Διαδικασία οριζόντιας ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	43
Εικόνα 38. Διαδικασία κάθετης ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	43
Εικόνα 39. Οι τιμές του μέσου απόλυτου σφάλματος και του σφάλματος σύνδεσης, ώστε να γίνει αποδεκτή η συνένωση. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	44
Εικόνα 40. Το νέφος σημείων ολοκληρωμένο με τα σημεία των στάσεων του σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	45
Εικόνα 41. Τα σταθερά σημεία και οι συντεταγμένες τους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register).....	46
Εικόνα 42. Αναγνώριση και προσδιορισμός στόχου στο πρόγραμμα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	47
Εικόνα 43. Αναγνώριση και προσδιορισμός στόχου στο πρόγραμμα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	47
Εικόνα 44. Το γεωαναφερμένο μοντέλο με τα σταθερά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)	48
Εικόνα 45. Οι ρυθμίσεις ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan).....	49
Εικόνα 46. Το αραιό νέφος σημείων από τις αεροφωτογραφίες με τις θέσεις και τον προσανατολισμό των καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	50
Εικόνα 47. Αναφορά της ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	51
Εικόνα 48. Αναφορά της ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	51

Εικόνα 49. Το αραιό νέφος σημείων των επίγειων φωτογραφιών με τις θέσεις και τον προσανατολισμό των καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	52
Εικόνα 50. Αναφορά ευθυγράμμισης επίγειων και εναέριων εικόνων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	53
Εικόνα 51. Επίγειες και εναέριες εικόνες σε ένα μοντέλο. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	53
Εικόνα 52. Πλήθος ομόλογων σημείων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	53
Εικόνα 53. Το αραιό νέφος σημείων από εναέριες και επίγειες εικόνες. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	54
Εικόνα 54. Οι θέσεις επίγειων και εναέριων καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	54
Εικόνα 55. Αξιολόγηση Tie Points α) Πρόσοψη β) Νότια πλευρά γ) Βόρεια πλευρά δ) Κάτοψη. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	55
Εικόνα 56. Αξιολόγηση νέφους σημείων μέσω Point Cloud Uncertainty α) Πρόσοψη β) Κάτοψη γ) Νότια πλευρά δ) Βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	56
Εικόνα 57. Τα σημεία που το πρόγραμμα αντλαμβάνεται ως λανθασμένα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	57
Εικόνα 58. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων LiDAR. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	58
Εικόνα 59. Το νέφος που προέκυψε από την εισαγωγή του αρχείου LiDAR με τις θέσεις στάσεων του σαρωτή (δεξιά), τα 77 .lsp αρχεία που δημιουργήθηκαν. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	59
Εικόνα 60. Το ολοκληρωμένο νέφος σημείων LiDAR. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	59
Εικόνα 61. Μείωση του μοντέλου με την εντολή Set Reconstruction Region. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	61
Εικόνα 62. Αρχείο Mesh του σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	61
Εικόνα 63. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας, πρόσοψη και νότια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	62
Εικόνα 64. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας, δυτική και βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	62
Εικόνα 65. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας και σαρωτή, πρόσοψη και νότια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	63
Εικόνα 66. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας και σαρωτή, ανατολική και βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	63
Εικόνα 67. Έλεγχος ποιότητας στο 3D αρχείο φωτογραμμετρίας και σαρωτή σε όλες τις πλευρές τους α) Ανατολική β) Δυτική γ) Βόρεια δ) Νότια. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	64
Εικόνα 68. Παράμετροι Unwrap. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	66
Εικόνα 69. Απενεργοποίηση αρχείων lsp στην διαδικασία Texturing. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	66
Εικόνα 70. Τα τελικά τρισδιάστατα μοντέλα. α) αρχείο σαρωτή, β) αρχείο φωτογραμμετρίας, γ) αρχείο σαρωτή και φωτογραμμετρίας και δ) αρχείο σαρωτή και φωτογραμμετρίας με φωτογραφίες από σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	67
Εικόνα 71. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή και φωτογραμμετρίας χωρίς την χρήση εικόνων σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	68

Εικόνα 72. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή και φωτογραμμετρίας με την χρήση εικόνων σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	69
Εικόνα 73. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	69
Εικόνα 74. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	70
Εικόνα 75. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	71
Εικόνα 76. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	71
Εικόνα 77. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	72
Εικόνα 78. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	72
Εικόνα 79. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	73
Εικόνα 80. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	74
Εικόνα 81. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	74
Εικόνα 82. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	75
Εικόνα 83. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	76
Εικόνα 84. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	76
Εικόνα 85. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	77
Εικόνα 86. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	77
Εικόνα 87. Το αέτωμα της στέγης στην πρόσοψη της εκκλησίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	78
Εικόνα 88. Το ανατολικό αέτωμα με εμφανή τα σημάδια από την υγρασία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	79
Εικόνα 89. Η νότια πλευρά της σκεπής με τους πλάγιους τοίχους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	80
Εικόνα 90. Η βόρεια πλευρά της σκεπής με τους πλάγιους τοίχους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	80
Εικόνα 91. Το γείσο της πρόσοψης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	80
Εικόνα 92. Τεκμηρίωση φθοράς στα ξύλινα μέρη του καμπαναριού α) νότια πλευρά β) βόρεια πλευρά γ) ανατολική πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	81
Εικόνα 93. Άποψη της Αγίας Τράπεζας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	82
Εικόνα 94. Ορθοφωτογραφική κάτοψη του ναού. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)	83
Εικόνα 95. Το σφάλμα RMS και ο πίνακας μετασχηματισμού. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)	84

Εικόνα 96. Στατιστικά στοιχεία αποστάσεων Cloud-to-Cloud. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)	84
Εικόνα 97. Ο χρωματικός χάρτης των δύο νεφών σημείων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare).....	85
Εικόνα 98. Το ιστόγραμμα των αποστάσεων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)	86

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Συντεταγμένες σημείων GPS σε ETRS 89/UTM32	39
Πίνακας 2. Συντεταγμένες σταθερών σημείων για την γεωαναφορά	40

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΘΕ	Θεματική Ενότητα
ΠΕ	Πτυχιακή Εργασία
ΠΣ	Πρόγραμμα Σπουδών
ΣΥΝ	Συντονιστής/Συντονίστρια

1. Εισαγωγή

Η τεκμηρίωση και η διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι υψίστης σημασίας για τη διασφάλιση της μεταβίβασης των ιστορικών, αρχιτεκτονικών και αρχαιολογικών αξιών κάθε τόπου και λαού στις επόμενες γενιές και αποτελεί ένα από τα βασικά καθήκοντα και στόχους κάθε σύγχρονου κράτους. Στον σημερινό κόσμο, όπου ιστορικές τοποθεσίες, αρχαιολογικοί χώροι και μνημεία επηρεάζονται όλο και περισσότερο από διάφορους ανθρωπογενείς και φυσικούς παράγοντες, η τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς μπορεί να συμβάλει σημαντικά στις διαδικασίες παρακολούθησης, αποκατάστασης και συντήρησης τέτοιων δομών (Almagro Vidal, Tandon & Eppich, 2015).

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής και ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης και τεκμηρίωσης, έχει αλλάξει τον τρόπο καταγραφής και ανάλυσης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων μνημείων, αρχαιολογικών αντικειμένων και χώρων στην παρούσα τους κατάσταση, αποτελεί ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο για την γεωμετρική και οπτική καταγραφή τους, ώστε να μελετηθούν και να μεταβιβαστούν σε κοινό και επιστημονική κοινότητα καθώς η ψηφιακή καταγραφή τους παραμένει διαθέσιμη για μελλοντική χρήση. (Doneus & Neubauer, 2005)

Τις πλέον διαδεδομένες και αποτελεσματικές τεχνικές για την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πολιτιστικού ενδιαφέροντος και όχι μόνο, αποτελούν η χρήση επίγειου σαρωτή Laser (Terrestrial Laser Scanning), η φωτογραμμετρία και ειδικότερα η φωτογραμμετρία πολλαπλών εικόνων με τη μέθοδο Structure from Motion (SfM), καθώς και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), γνωστά και ως Drone, τα οποία αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την διαδικασία αποτύπωσης SfM.

Η τεχνολογία TLS είναι ικανή να συλλέγει εκατομμύρια τρισδιάστατα σημεία, δημιουργώντας πυκνά νέφη σημείων με πολύ μεγάλη ακρίβεια, τα οποία μπορούν να αποτυπώσουν με λεπτομέρεια τη γεωμετρία, την επιφάνεια και τα μέρη ενός μνημείου. (Unal, Yakar & Yildiz, 2004). Παράλληλα, η φωτογραμμετρία SfM, βασιζόμενη στις επικαλυπτόμενες εικόνες και αλγορίθμους υπολογιστικής όρασης, έχει εξελιχθεί σε μια ιδιαίτερα ευέλικτη και οικονομική μέθοδο για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων, ακόμη και με τη χρήση συμβατικών και εμπορικά διαθέσιμων ψηφιακών μηχανών και κινητών συσκευών. (Barbero-García, Lerma, Marqués-Mateu & Miranda, 2017).

Η χρήση UAV έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες αποτύπωσης, επιτρέποντας τη λήψη δεδομένων από αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης και την πρόσβαση σε δυσπρόσιτες περιοχές. Η συνδυαστική αξιοποίηση UAV φωτογραμμετρίας και δεδομένων από επίγειο σαρωτή Laser επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτύπωση τόσο των ανώτερων όσο και των επίγειων τμημάτων ενός μνημείου, ενώ η ενσωμάτωση με SfM τεχνικές συμβάλλει στην παραγωγή γεωμετρικά συνεπών και οπτικά ρεαλιστικών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων. (Themistocleous, Agapiou, King, King, & Hadjimitsis, 2014).

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη χρήση τεχνικών επίγειας σάρωσης Laser (TLS) και φωτογραμμετρίας SfM, αξιοποιώντας τόσο επίγειες όσο και εναέριες φωτογραφίες από μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV), με σκοπό την αποτύπωση και τεκμηρίωση της εκκλησίας του Αγίου Ουβέρτου (Sankt Hubertus Kapelle), μνημείου του 17ου αιώνα στην πόλη Düsseldorf της Γερμανίας. Στόχος είναι η δημιουργία ενός ακριβούς και λεπτομερούς τρισδιάστατου μοντέλου της εκκλησίας, καθώς και η παραγωγή ορθοφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης, τόσο του συνόλου όσο και επιμέρους τμημάτων της, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για σκοπούς ανάλυσης, τεκμηρίωσης, παρακολούθησης και ανάδειξης της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε επαγγελματικός εξοπλισμός, όπως σαρωτής Laser, ταχύμετρο και δέκτης GPS για τη γεωαναφορά του μνημείου, ενώ η φωτογραμμετρική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε με μη επανδρωμένο αεροσκάφος (Drone) και φωτογραφική μηχανή χαμηλού κόστους. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το Cyclone Register της Leica για τα νέφη σημείων και με το ελεύθερο λογισμικό φωτογραμμετρίας Reality Scan της Epic Games. Παράλληλα, πραγματοποιείται παρουσίαση και αξιολόγηση της ακρίβειας των παραγόμενων μοντέλων, συγκρίνοντας αποτελέσματα που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων, καθώς και από τη χρήση κάθε μεθόδου ξεχωριστά.

Απαντώνται ερωτήματα, όπως με ποια μέθοδο επιτυγχάνεται η καλύτερη γεωμετρική ακρίβεια των μοντέλων, ποια δίνει το πιο ρεαλιστικό οπτικό αποτέλεσμα, σε ποιο βαθμό βελτιώνει ο συνδυασμός των μεθόδων το τελικό μοντέλο και κατά πόσο διαφοροποιείται το τελικό αποτέλεσμα ανάλογα με την χρήση εικόνων από σαρωτή.

Η εργασία αναπτύσσεται στα ακόλουθα έξι κεφάλαια:

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της πολιτιστικής κληρονομιάς, η σημασία καταγραφής και τεκμηρίωσης της και οι μέθοδοι αποτύπωσης της. Δίνονται οι βασικές αρχές της φωτογραμμετρίας και κυρίως της τεχνικής Structure from Motion, όπως και οι αρχές λειτουργίας και οι κατηγορίες των επίγειων σαρωτών Laser. Επίσης, γίνεται αναφορά στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς στο οποίο εντάχθηκε το μοντέλο.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η εκκλησία του αγίου Ουβέρτου και δίνονται ιστορικά και γεωμετρικά στοιχεία για αυτή. Αναφέρονται λεπτομερώς οι διαδικασίες συλλογής των δεδομένων όπως η αποτύπωση με τον σαρωτή, η φωτογραμμετρική αποτύπωση με κάμερα και Drone καθώς και η ταχυμετρική με χρήση οργάνου και GPS για την ένταξη στο τοπικό δίκτυο.

Ακολουθεί το κεφάλαιο τέσσερα όπου αναλύεται η επεξεργασία των δεδομένων σαρωτή και φωτογραμμετρίας στα προγράμματα Cyclone Register και Reality Scan αντίστοιχα. Παρουσιάζεται ο συνδυασμός και η συγχώνευση των δεδομένων για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων καθώς και η διαδικασία παραγωγής τους και η ποιότητα τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται τα τρισδιάστατα μοντέλα και γίνεται η σύγκριση της ποιότητας τους με βάση τα δεδομένα από τα οποία δημιουργήθηκαν. Δεδομένα σαρωτή, δεδομένα φωτογραμμετρίας, δεδομένα με συνδυασμό και των δύο μεθόδων και γίνεται σύγκριση αυτών και των ορθοφωτογραφιών. Αναφέρονται περιορισμοί των μεθόδων και παράγοντες επηρεασμού της ακρίβειας ενώ γίνεται και τεκμηρίωση της φθοράς του μνημείου. Επίσης γίνεται η αξιολόγηση της ευθυγράμμισης των μοντέλων στο πρόγραμμα Cloud Compare.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας. Συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα, απαντώνται τα ερευνητικά ερωτήματα και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Πολιτιστική Κληρονομιά

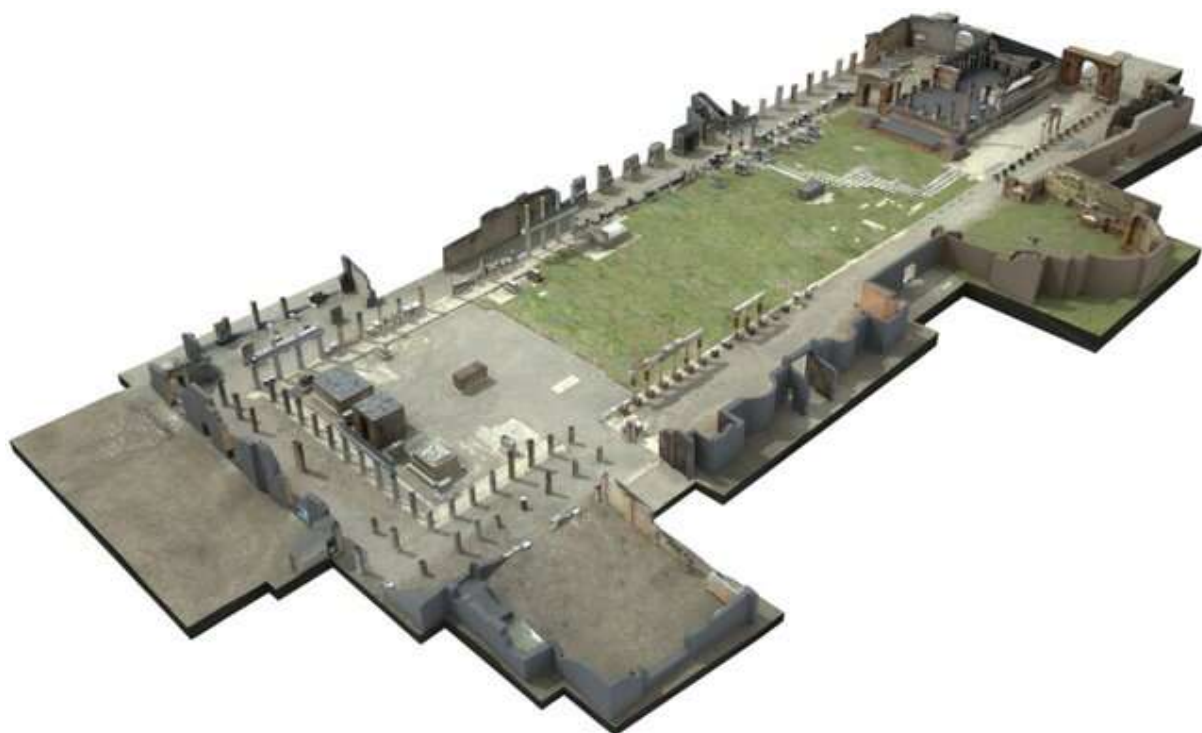
Ως πολιτιστική κληρονομιά νοούνται πολύτιμα υλικά και άυλα στοιχεία που μεταβιβάζονται από μια γενιά στις επόμενες, ενώ η UNESCO την ορίζει ως «το σύνολο των υλικών τεκμηρίων που μεταβιβάζονται από το παρελθόν σε κάθε πολιτισμό και, κατ' επέκταση, σε ολόκληρη την ανθρωπότητα» (Jokilehto, 2005). Τα μνημεία, κινητά και ακίνητα, αποτελούν ιστορικά τεκμήρια της παγκόσμιας ιστορίας και η διάσωση τους με σκοπό την μελέτη και τη προστασία τους αποτελεί πρωταρχικό στόχο όλου του πολιτισμένου κόσμου. Πολλοί οργανισμοί διεθνούς χαρακτήρα έχουν εκδώσει συμφωνίες και συμβάσεις σχετικά με την προστασία, διατήρηση και αποκατάσταση των μνημείων. Οι σημαντικότερες, που αποτέλεσαν οδηγό και για τις υπόλοιπες, είναι ο Χάρτης των Αθηνών (1931), η Σύμβαση της Χάγης (1954), ο Χάρτης της Βενετίας (1965) και η Σύμβαση της Γρανάδα (1985) (Stylianidis & Remondino, 2016).

Ήδη από το 1885 ο πολιτικός μηχανικός Albrecht Meydenbauer στη Γερμανία, ίδρυσε το *Βασιλικό Πρωσικό Ινστιτούτο Μετρητικών Εικόνων* και χρησιμοποίησε τη φωτογραμμετρία για τη δημιουργία αρχείου μνημείων. Περισσότερες από 100.000 γυάλινες πλάκες και αρνητικά σημαντικών κτισμάτων, σώζονται ακόμη και σήμερα και μπορούν να εξεταστούν στο *Κρατικό Γραφείο Διατήρησης Μνημείων του Βρανδεμβούργου* (Meyer, 1985). Λίγα χρόνια αργότερα, το 1912, στο βιβλίο του *Merkbuch zur Unterhaltung von Baudenkmalern* (*Εγχειρίδιο για την συντήρηση αρχιτεκτονικών μνημείων*) ο Hans Lutsch περιγράφει πόσο σημαντική είναι η αποτύπωση για τη διατήρηση και μελέτη ενός μνημείου, μέσω της τεκμηρίωσης της υφιστάμενης κατάστασης του με όψεις, κατόψεις και φωτογραφίες (Lutsch, 1912). Σήμερα οι δυνατότητες καταγραφής και τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς έχουν αλλάξει δραστικά με την εξέλιξη των καμερών, των οργάνων αποτύπωσης, της τεχνολογίας λέιζερ και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με τη συμβολή της τεχνολογίας επικρατεί η τάση της τρισδιάστατης αποτύπωσης αντικειμένων, η οποία βοηθά να γίνονται αντιληπτά και δεδομένα τα οποία δεν είναι ορατά με «γυμνό μάτι» (Reilly, 1992). Η UNESCO ορίζει ως γεωμετρική τεκμηρίωση ενός μνημείου την διαδικασία μέσω της οποίας αποκτώνται τα δεδομένα για την θέση, το μέγεθος, το σχήμα και τη μορφή ενός μνημείου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης η γεωμετρική

τεκμηρίωση καταγράφει την κατάσταση την οποία βρίσκεται το μνημείο όπως έχει διαμορφωθεί μέσα στον χρόνο και αποτελεί τη βάση για την μελέτη του παρελθόντος και την προστασία του (UNESCO, 1972).

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια μετατόπιση, όσον αφορά τις τοπογραφικές αποτυπώσεις, από τις κλασικές μεθόδους (ταχύμετρο, θεοδόλιχος) σε πιο σύγχρονες, οι οποίες και διαχωρίζονται στις λεγόμενες παθητικές και ενεργητικές μεθόδους αποτύπωσης. Παθητικές ονομάζονται οι τεχνικές που δεν εκπέμπουν ακτινοβολία (Τηλεπισκόπηση, Φωτογραμμετρία) ενώ οι ενεργητικές αυτές που εκπέμπουν κάποιο σήμα προς το αντικείμενο που καταγράφουν (Σαρωτές Laser, LiDAR, InSAR) (Σαββαΐδης, Δούκας, Υφαντής & Λακάκης, 2016). Για την αποτύπωση και τεκμηρίωση κάποιου μνημείου και ειδικότερα την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του, χρησιμοποιείται κάποια από τις δύο μεθόδους ή και ο συνδυασμός τους, με τις τέσσερις τεχνικές να διακρίνονται στις ακόλουθες:

- **Απόδοση βασισμένη σε εικόνες (Image-Based Rendering – IBR):** Αν και δεν δημιουργεί τρισδιάστατο μοντέλο, βασίζεται σε υπάρχουσες εικόνες για την δημιουργία νέων εικόνων ή διαφορετικών οπτικών γωνιών (Kang, 1999)
- **Μοντελοποίηση βασισμένη σε εικόνες (Image-Based Modeling – IBM):** Η πιο γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος για την γεωμετρική αναπαράσταση αρχιτεκτονικών και άλλων αντικειμένων με δεδομένα από εικόνες (Streilein, 1994).
- **Μοντελοποίηση βασισμένη σε δεδομένα αποστάσεων (Range-Based Modeling):** Με σαρωτές Laser προσδιορίζονται χιλιάδες σημεία τρισδιάστατων συντεταγμένων ενός αντικειμένου, είτε με μέτρηση χρόνου διάδοσης ακτινών είτε με μετρήσεις διαφοράς φάσεων προς αυτό. Υπολείπεται πληροφοριών υψής και χρώματος (Guidi, Beraldin, Ciofi & Atzeni 2003).
- **Συνδυασμός μοντελοποίησης βασισμένης σε εικόνες και δεδομένα αποστάσεων:** Για μεγαλύτερα και γεωμετρικά πολύπλοκα μνημεία και αρχιτεκτονικά κτίρια, καμία μέθοδος δεν είναι τελείως αποτελεσματική για αυτό ενδείκνυται ο συνδυασμός τεχνικών ώστε να αποδοθεί σωστά η γεωμετρία του μνημείου καθώς και η υφή και το χρώμα του (El-Hakim, Beraldin, Picard & Godin, 2004).



Εικόνα 1. Τρισδιάστατο μοντέλο του φόρουμ της Πομπηίας. (Πηγή: «Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning», του F. Remondino, 2011, *Remote Sensing*, 3(6), σ. 1115)

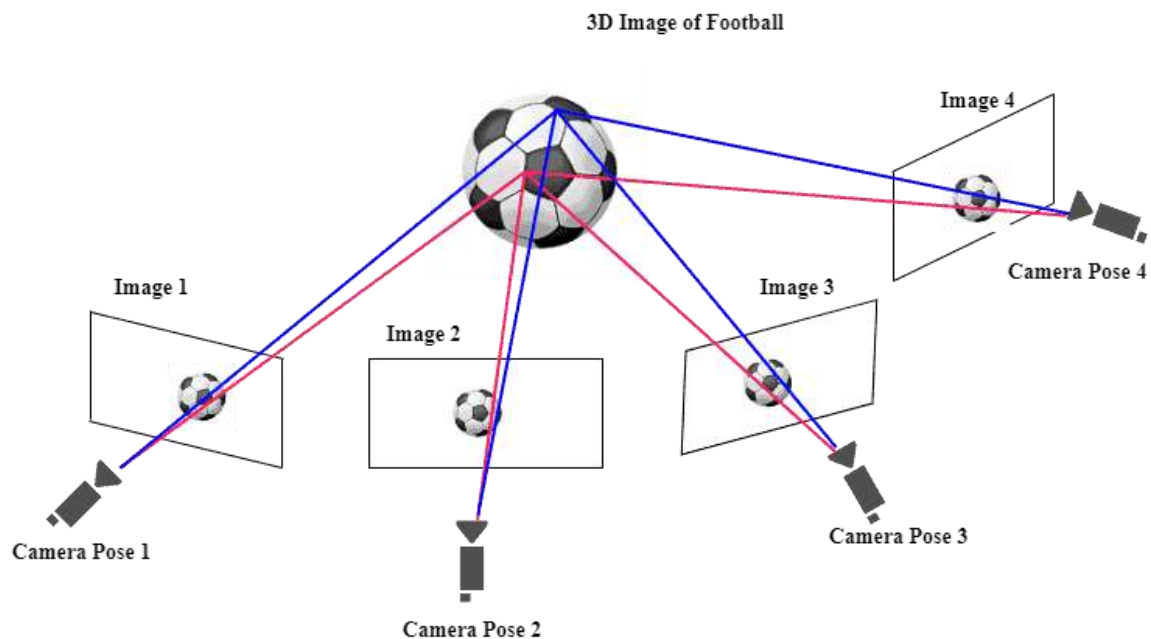
2.2 Φωτογραμμετρία

Φωτογραμμετρία ονομάζεται η επιστήμη, η οποία μέσω μαθηματικών μοντέλων και αλγορίθμων, επιτρέπει την εξαγωγή μετρικών πληροφοριών για αντικείμενα ενώ μπορεί να ανακατασκευάσει την τρισδιάστατη μορφή τους από φωτογραφίες. Βασίζεται στην εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από επικαλυπτόμενες εικόνες, ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι 3D συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου στον χώρο (Remondino, El-Hakim, 2006).

2.2.1 Structure from Motion (SfM)

Η τεχνική *Structure from Motion* βασίζεται στις ίδιες αρχές όπως και η στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, ότι η τρισδιάστατη θέση ενός σημείου ή αντικειμένου δύναται να προσδιοριστεί όταν αυτό εμφανίζεται σε δύο ή περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες. Διαφέρει ωστόσο σημαντικά στο ότι η θέση και ο προσανατολισμός των καμερών υπολογίζονται αυτόματα μέσω κοινών χαρακτηριστικών σημείων στις εικόνες, που εντοπίζονται και εξάγονται μέσω αλγορίθμων (Εικόνα 2) (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey & Reynolds, 2012). Ο όρος «*Structure-from-Motion*» προέρχεται από την επιστήμη της υπολογιστικής όρασης (computer vision) και συγκεκριμένα από τεχνικές παρακολούθησης σημείων σε ακολουθίες εικόνων που λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις (Szeliski & Kang, 1994). Η τεχνική υλοποιείται με διάφορες μεθόδους όπως η *Global* (ολική), στην οποία υπολογίζεται ταυτόχρονα η θέση όλων των καμερών, στην *Incremental* (σταδιακή), υπολογίζει αρχικά ένα ζεύγος και σταδιακά ενσωματώνει περισσότερες και στην *Hierarchical* (ιεραρχική), που είναι συνδυασμός και των δύο (Farenzena, Fusiello & Gherardi, 2009). Η γενική προσέγγιση ωστόσο παραμένει σε όλες τις κατηγορίες η ίδια, με τα κύρια στάδια της να είναι τα εξής:

- **Feature Extraction** (Εξαγωγή χαρακτηριστικών): Αρχικά εντοπίζονται χαρακτηριστικά σημεία σε κάθε εικόνα. Η εξαγωγή των σημείων αυτών είναι πολύ σημαντική καθώς έτσι επιτυγχάνεται η αντιστοίχιση με κοινά σημεία σε άλλες εικόνες. Η δημοφιλέστερη λύση σε αυτό είναι η αναγνώρισή χαρακτηριστικών ανεξαρτήτου κλίμακας *Scale Invariant Feature Transform – SIFT* (Lowe, 2004). Τα σημεία δηλαδή που εξάγονται είναι ανεξάρτητα από τη θέση της κάμερας, την κλίμακα και τον προσανατολισμό.

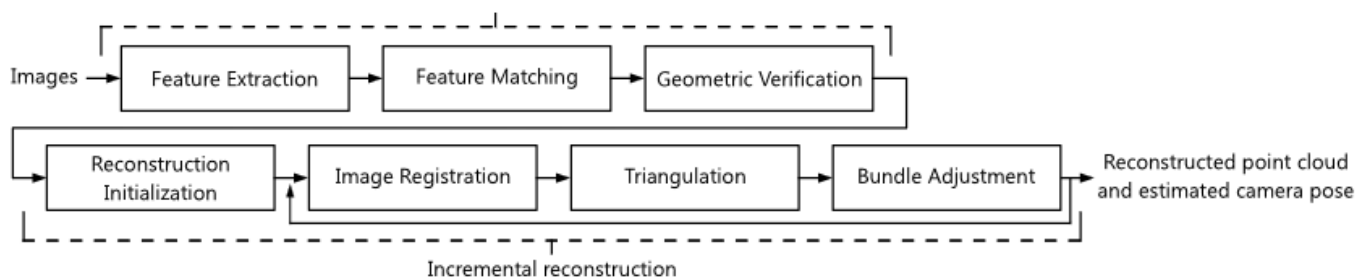


Εικόνα 2. Η τεχνική *Structure from Motion*. (Πηγή: <https://www.baeldung.com/cs/computer-vision-bundle-adjustment>)

- **Feature Matching (Αντιστοίχιση χαρακτηριστικών):** Μετά τον εντοπισμό των σημείων στις εικόνες, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αντιστοιχιών τους και στις υπόλοιπες εικόνες. Η διαδικασία είναι κρίσιμη καθώς τα χαρακτηριστικά που εξάγονται είναι χιλιάδες και από αυτό θα εξαρτηθεί η ποιότητα του τελικού μοντέλου (Huang, Guo, Wang, Sun & Yang, 2024). Βασικό ρόλο στο να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με τον όγκο των κοινών σημείων δίνει ο αλγόριθμος NN (Nearest Neighbour) που βρίσκει την μικρότερη απόσταση μεταξύ των σημείων (Arya, Mount, Netanyahu, Silverman, & Wu, 1998), όπως και ο k-dimensional trees (Bentley, 1975).
- **Geometric Verification (Γεωμετρική επαλήθευση):** Σε αυτό το βήμα ελέγχεται η γεωμετρία των χαρακτηριστικών καθώς οι προηγούμενες αντιστοιχίες ενδεχομένως να περιέχουν λάθη (outliers) (Hartley & Zisserman, 2004). Η δημοφιλέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται, καθώς είναι γρήγορη και ακριβής είναι αυτή των ελαχίστων τετραγώνων, RANSAC (Fischler & Bolles, 1981).
- **Image Registration (Καταχώρηση εικόνας):** Στο στάδιο αυτό προστίθεται μια νέα εικόνα στο μοντέλο και υπολογίζεται η θέση της κάμερας αντιστοιχίζοντας τα 3D σημεία με τις 2D προβολές τους (Schönberger & Frahm, 2016).

- Triangulation (Τριγωνισμός): Βασίζεται στην επιπολική γεωμετρία (Epipolar Constraint) χρησιμοποιώντας προβολές από δύο ή περισσότερες εικόνες για να υπολογιστούν οι νέες τρισδιάστατες θέσεις των σημείων (Hartley & Zisserman, 2004).
- Bundle Adjustment (Μέθοδος δέσμης): Είναι το τελικό στάδιο βελτιστοποίησης της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Μέσω τις ανοικοδόμησης των ακτινών φωτός μεταξύ των καμερών και των σημείων στον πραγματικό χώρο, προκύπτουν βέλτιστες εκτιμήσεις για την τρισδιάστατη γεωμετρική δομή και τις παραμέτρους θέασης, θέση και προσανατολισμό κάμερας (Triggs, McLauchlan, Hartley & Fitzgibbon, 2000).

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας προκύπτει ένα αραιό νέφος σημείων το οποίο πυκνώνεται μέσω τεχνικών *Multi-View Stereo (MVS)*. Η τεχνική αποτελεί το δεύτερο βήμα της διαδικασίας αφού ακολουθεί την *Structure from Motion*, η οποία βρίσκει τις θέσεις των καμερών, ενώ η MVS γεμίζει τα κενά καθώς υπολογίζει το βάθος για κάθε pixel από ένα σύνολο εικόνων γνωστών καμερών, δημιουργώντας ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο. (Furukawa & Ponce, 2010)

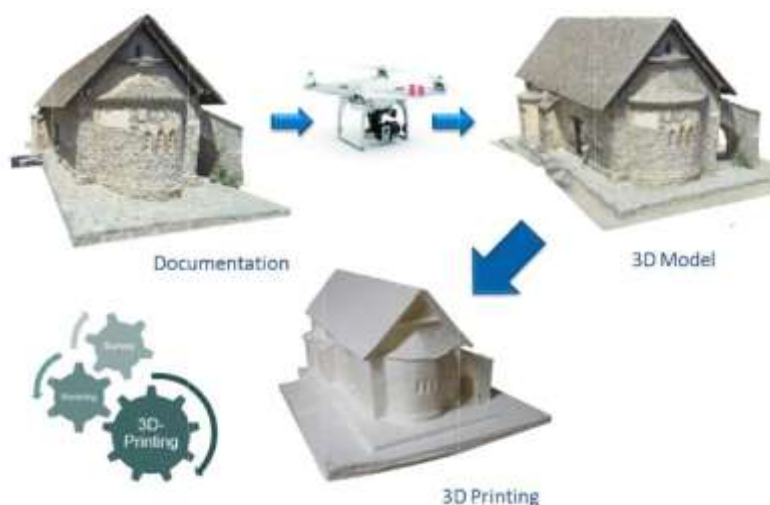


Εικόνα 3. Ροή εργασίας Incremental SfM (Πηγή: Bianco, S., Ciocca, G., & Marelli, D. (2018). Evaluating the performance of structure from motion pipelines. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 136, 80–92.)

2.2.2 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, στα αγγλικά Unmanned Aerial Vehicle, ή πιο γνωστά σαν Drone, είναι όλα τα αεροσκάφη τα οποία λειτουργούν αυτόνομα, δίχως ο χειριστής να βρίσκεται μέσα σε αυτά, ενώ ο χειρισμός τους μπορεί να γίνει και από απόσταση. Ο ορισμός περιλαμβάνει και τα τηλεχειριζόμενα μοντέλα που φέρουν στο σκάφος τους κάμερα, τόσο

επαγγελματικού όσο και ερασιτεχνικού χαρακτήρα (<https://hcaa.gov.gr/el/faq/ti-apotelei-drone-symfona-me-eyropaiko-kanonistiko-plaisio>). Η αρχική τους χρήση αφορούσε σκοπούς στρατιωτικού περιεχομένου, αλλά εδώ και πάνω από είκοσι χρόνια λόγω της απλότητας στην χρήση τους και του οικονομικού τους κόστους, βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως αυτός της αναψυχής ή της έρευνας (Colomina & Molina, 2014). Εκτός από το σχετικά χαμηλό κόστος και την ευκολία χρήσης τους, τα UAVs (Drones) είναι ιδιαίτερα ευέλικτα στη συλλογή δεδομένων, καθώς έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίζουν δύσβατες περιοχές ή σημεία σε μεγάλο ύψος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συλλογή δεδομένων από θέσεις που, με συμβατικές μεθόδους, θα ήταν αδύνατο να αποτυπωθούν. Επιπλέον, ακόμη και όταν δεν διαθέτουν κάμερες επαγγελματικής ποιότητας, μπορούν να παράγουν δεδομένα υψηλής γεωμετρικής ανάλυσης, καθώς συνδυάζουν τη δυνατότητα λήψης φωτογραφιών από πολλαπλές γωνίες (λοξές, κατακόρυφες και οριζόντιες) με την πτήση σε πολύ χαμηλά υψόμετρα (Jiang, Jiang, Huang & Yang, 2017).



Εικόνα 4. Τεκμηρίωση της εκκλησίας της Παναγίας του Ασίνου στην Κύπρο με χρήση Drone και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου με εκτύπωση από 3D εκτυπωτή. (Πηγή: Themistocleous, Ioannides, Agariou & Hadjimitsis, 2015).

Η τεχνολογία UAV δεν βοηθάει μόνο στη συλλογή δεδομένων με υψηλότερη χωρική ανάλυση, αλλά τα τελευταία χρόνια έχει βοηθήσει αρκετά και στην ανάπτυξη βελτιωμένων αλγορίθμων για φωτογραμμετρική επεξεργασία, όπως η μέθοδος *Structure from Motion (SfM)* και *Multi View Stereo (MVS)* (Remondino, Spera, Nocerino, Menna & Nex 2014). Η χρήση των UAV σε συνδυασμό με τεχνικές φωτογραμμετρίας SfM έχει εξελιχθεί σε ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την τεκμηρίωση μνημείων και την παραγωγή τρισδιάστατων

μοντέλων πολιτιστικής κληρονομιάς καθώς είναι μια μη επεμβατική μέθοδος χαμηλού κόστους, που μπορεί να αποδώσει αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας με μεγάλη πιστότητα (Εικόνα 4) (Pepe, Alfio & Costantino 2022).

2.3 Επίγειοι σαρωτές Laser (TLS)

Οι σαρωτές Laser, είναι συσκευές οι οποίες εκπέμπουν πολλαπλούς παλμούς Laser ανά δευτερόλεπτο. Μέσω αυτών των παλμών μετριοούνται γωνίες και αποστάσεις προς το σημείο ενδιαφέροντος, όπως την κλασική ταχυμετρία, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό χιλιάδων σημείων στο χώρο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Είναι μια τεχνική γρήγορη και αυτόματη η οποία χωρίς επαφή με την επιφάνεια καθορίζει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων της (Macher, Landes, & Grussenmeyer, 2016).

Οι επίγειοι σαρωτές Laser είναι μια ενεργητική μέθοδος αποτύπωσης καθώς παράγουν και λαμβάνουν πίσω δική τους ενέργεια. Οι σαρωτές δεν έχουν όλοι τις ίδιες δυνατότητες και υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ τους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους.

2.3.1 Κατηγορίες Επίγειων Σαρωτών

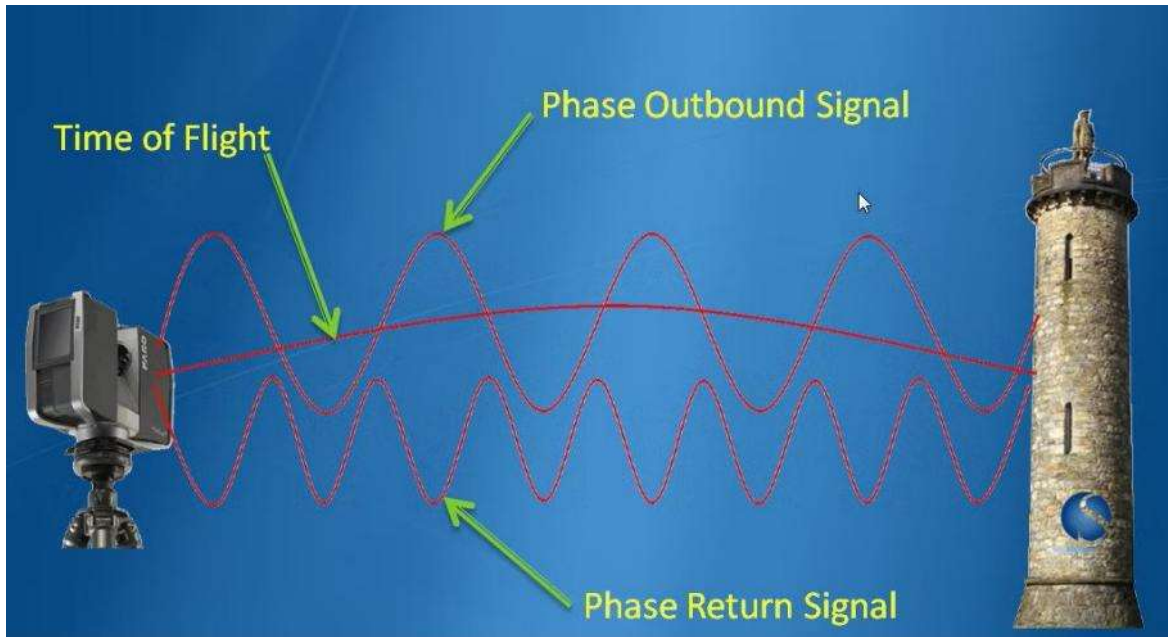
1) Αρχή λειτουργίας

- Time-of-flight (Μέτρηση χρόνου διάδοσης ακτινών): Οι συσκευές αυτές υπολογίζουν αποστάσεις με την μέτρηση του χρόνου από την στιγμή που θα εκπέμψουν την ακτινοβολία μέχρι να ανακλαστεί στο αντικείμενο και να επιστρέψει πίσω.
- Phase comparison (Μέτρηση με σύγκριση φάσης): Οι σαρωτές σύγκρισης φάσης μετράνε και αυτοί τον χρόνο αλλά συγκρίνοντας τη διαφορά φάσης του κύματος που εκπέμπουν με αυτό που λαμβάνουν (Εικόνα 5).
- Triangulation (Σαρωτές με μέθοδο τριγωνισμού): Η μέτρηση των σημείων από του σαρωτές γίνεται με τη μέθοδο του τριγωνισμού ανάμεσα σε πομπό, αντικείμενο μέτρησης και κάμερα (Wu, Yuan, Tang, & Tian, 2022).

2) Εμβέλεια μέτρησης

- Short-range (Μικρής εμβέλειας): Είναι κυρίως σαρωτές μέτρησης φάσης και σπανιότερα σαρωτές μέτρησης χρόνου. Έχουν μέγιστη εμβέλεια τα 100 μέτρα.
- Medium-range (Μεσαίας εμβέλειας): Είναι σαρωτές μέτρησης χρόνου και μετράνε αποστάσεις έως και 350 μέτρα.

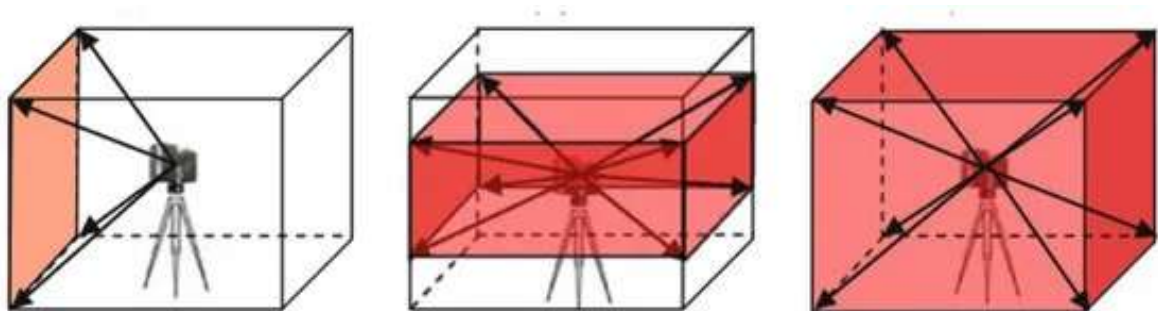
- Long-range (Μεγάλης εμβέλειας): Βασίζονται στην μέτρηση χρόνου και έχουν εμβέλεια ακόμα και πάνω από 500 μέτρα (Shan & Toth, 2018).



Εικόνα 5. Διαφορά λειτουργίας με μέτρηση χρόνου και μέτρηση φάσης.
(Πηγή: <https://www.survtechsolutions.com/how-does-laser-scanning-work>)

3) Πεδίο ορατότητας

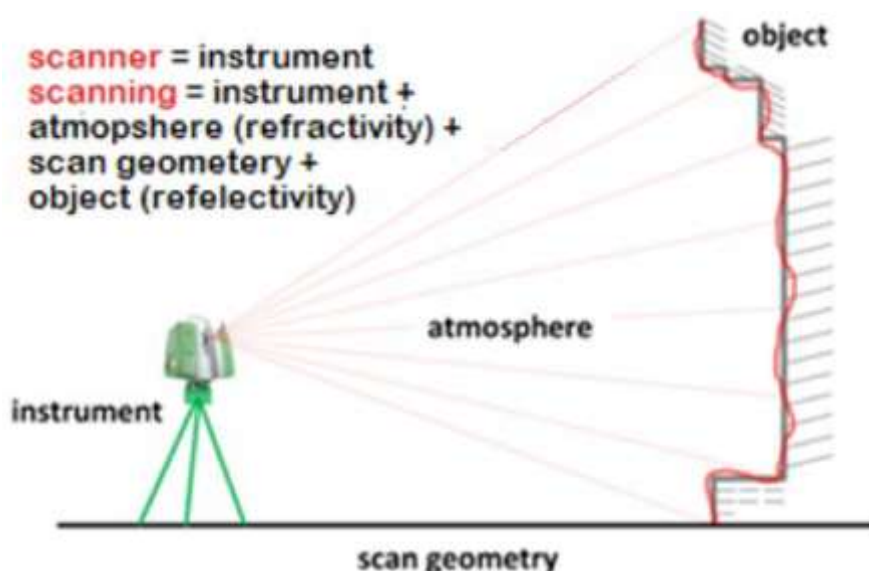
- Σαρωτής κάμερας: Το εύρος σάρωσης είναι περιορισμένο καθώς δεν έχουν δυνατότητα περιστροφής
- Υβριδικοί σαρωτές: Επιτρέπουν την κίνηση γύρω από τον οριζόντιο άξονα.
- Πανοραμικοί σαρωτές: Η περιστροφή είναι δυνατή και στους δύο άξονες με μεγάλη δυνατότητα αποτύπωσης, εκτός από το μέρος κάτω από τον τρίποδα (Εικόνα 6) (Σαββαΐδης, Δούκας, Υφαντής & Λακάκης, 2016).



Εικόνα 6. Πεδίο ορατότητας σαρωτών. Αριστερά: Κάμερας, Μέση: Υβριδικός, Δεξιά: Πανοραμικός (Πηγή: Abbas, Setan, Majid, Idris, Ariff, Chong & Lichti, 2014)

2.3.2 Σφάλματα

Ακόμη και όταν η δέσμη Laser είναι σωστά εστιασμένη, η ακτίνα του Laser πάνω στο αντικείμενο θα έχει ένα συγκεκριμένο μέγεθος. Όταν το σημείο προσπίπτει σε μια ακμή αντικειμένου, μόνο ένα μέρος του ανακλάται από αυτήν. Το υπόλοιπο μπορεί να ανακλαστεί από γειτονική επιφάνεια, από διαφορετική επιφάνεια πίσω από την ακμή ή και καθόλου. Αυτό είναι γνωστό σαν επίδραση ακμών (Edge effects). Επίσης πολλά σφάλματα έχουν να κάνουν με την επίδραση της ανακλαστικότητας της επιφάνειας όπως και τις περιβαλλοντικές συνθήκες την δεδομένη στιγμή όπως η θερμοκρασία, ατμόσφαιρα, παρεμβαλλόμενη ακτινοβολία (Εικόνα 7) (Boehler, Bordas Vicent & Marbs, 2003).



Εικόνα 7. Επίδραση της ατμοσφαιράς και της ανακλαστικότητας στην μέτρηση. (Πηγή: Jurek, Kuhlmann, & Holst, 2017).

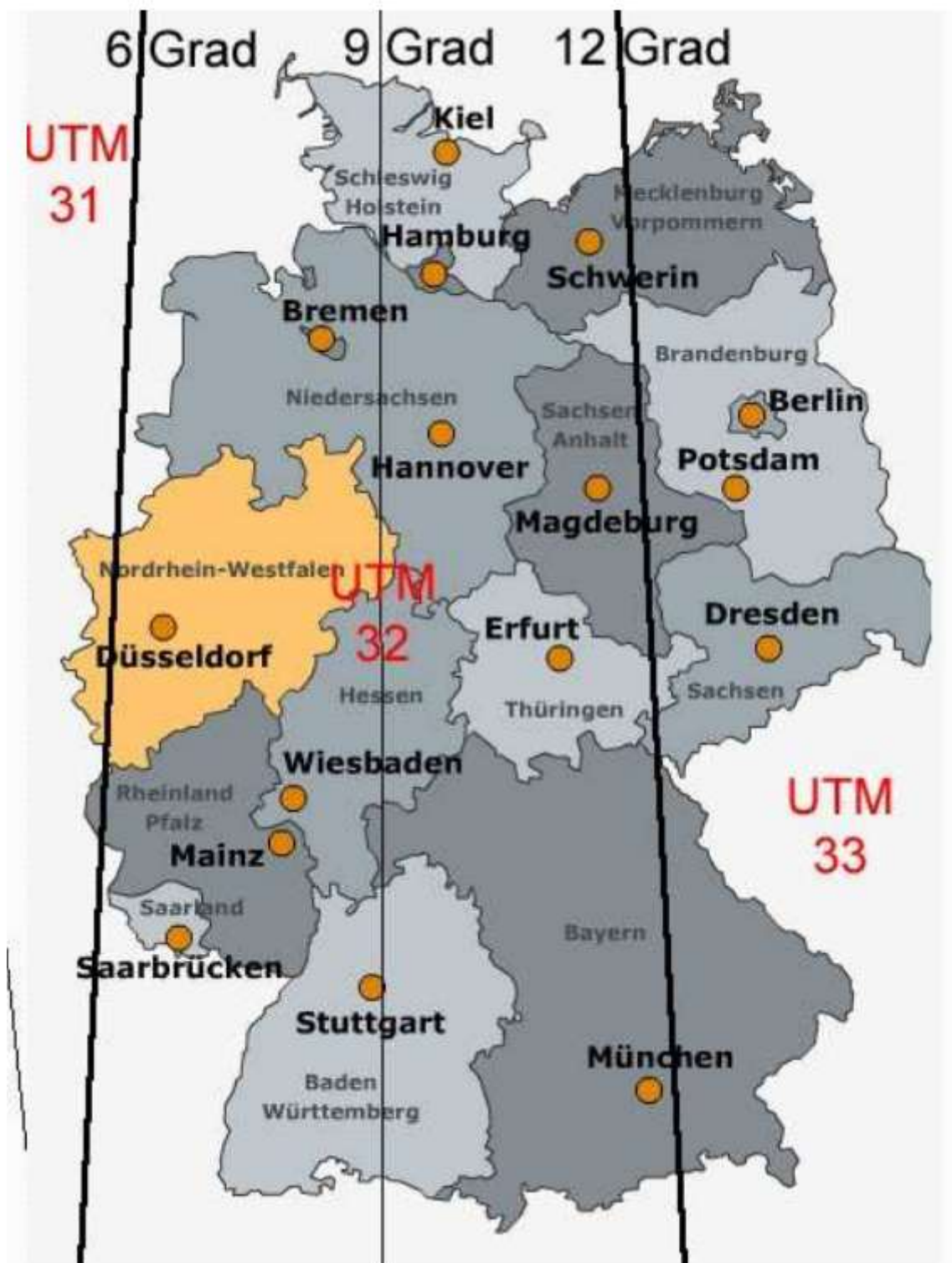
2.3.3 Ένωση νεφών

Συνήθως για να σαρωθεί ένα αντικείμενο ή κτίριο χρειάζονται περισσότερες από μια στάσεις του σαρωτή. Σε κάθε νέα σάρωση δημιουργείται ένα νέο νέφος σημείων. Για την ολοκληρωμένη σάρωση του αντικειμένου πρέπει τα νέφη σημείων να ενωθούν μεταξύ τους. Αυτό γίνεται με τους εξής τρόπους:

- I. Target-to-target registration (Ένωση στόχο με στόχο): Στο μέρος της σάρωσης τοποθετούνται στόχοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν κοινά σημεία για την ένωση των νεφών.
- II. Cloud-to-cloud registration (Ένωση νέφος με νέφος): Για να ενωθούν τα νέφη χρειάζονται κάποια κοινά σαρωμένα σημεία ή κοινές περιοχές. Η επικάλυψη των νεφών πρέπει να είναι τουλάχιστον στο 40%. (Ünal, Yakar & Yıldız, 2004).

2.4 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ETRS / UTM 32

Σύμφωνα με την UNESCO (UNESCO, 1972) για την ολοκληρωμένη καταγραφή ενός μνημείου, σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση που αυτό βρίσκεται. Για να προσδιοριστεί αυτή είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς και η ένταξη του σε αυτό. Στη Γερμανία, χώρα στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο μελέτης της εργασίας, το σύστημα αναφοράς είναι το ETRS 89 (Europäisches terrestrisches Referenzsystem 1989, Ευρωπαϊκό επίγειο σύστημα αναφοράς 1989) που βασίζεται στο ελλειψοειδές GRS80. Ως προβολικό σύστημα χρησιμοποιείται η εγκάρσια Μερκατορική Προβολή ή UTM (*Universales Transversales Mercatorprojektion*). Το σύστημα UTM χωρίζει την γη σε 60 μεσημβρινές ζώνες με αρίθμηση που ξεκινάει από το ένα, με αρχή τον μεσημβρινό 180° και κατεύθυνση προς την ανατολή. Η κάθε ζώνη έχει πλάτος 6° και οι κεντρικοί μεσημβρινοί ξεκινάνε με πλάτος 3°, 6°, 9° κ.ο.κ μέχρι τον μεσημβρινό 177°. Η Γερμανία βρίσκεται σε ένα πολύ μικρό μέρος στη ζώνη 31, στο μεγαλύτερο μέρος της στην ζώνη 32 (κεντρικός μεσημβρινός 9°) ενώ ανατολικά στη ζώνη 33 (Εικόνα 8). Η περιοχή της Βόρειας-Ρηνανίας Βεστφαλίας και συγκεκριμένα το Ντίσσελντορφ που είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος, ανήκουν στην ζώνη 32 για αυτό και το Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς τοπικά καλείται ETRS 89 / UTM 32 (Asbeck, Drüppel, Gärtner, Skindelines & Stein, 2019).



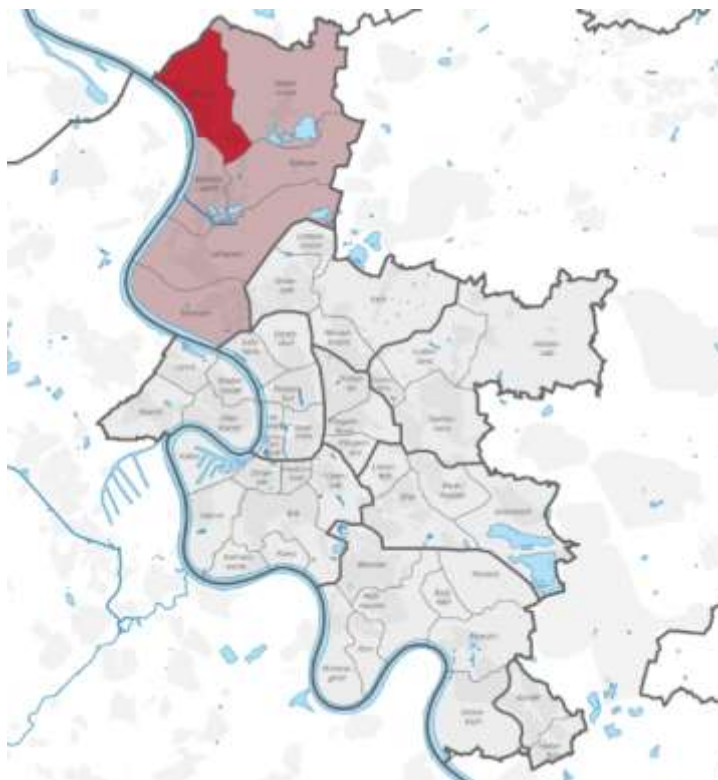
Εικόνα 8. Η περιοχή του Düsseldorf με του κεντρικούς μεσημβρινούς και τις ζώνες UTM που σχηματίζονται.
(Πηγή: www.Wuppertal.de)

3. Αντικείμενο μελέτης και συλλογή δεδομένων

3.1 Η εκκλησία του Αγίου Ουβέρτου (Hubertuskapelle)

3.1.1 Γενικά

Το παρεκκλήσι του αγίου Ουβέρτου (Hubertuskapelle) βρίσκεται στην περιοχή Βιτλάερ (Wittlaer) στην βόρεια πλευρά της πόλης του Ντύσσελντορφ (Düsseldorf), πολύ κοντά στα διοικητικά σύνορα με την πόλη του Ντούισμπουργκ (Duisburg) (Εικόνα 9). Η πόλη του Düsseldorf ιδρύθηκε στις 14.08.1288, όταν και απέκτησε τον χαρακτηρισμό της πόλης από τον κόμη φον Μπερκ (Graf von Berg). Το όνομα του είναι σύνθετο και προέρχεται από την λέξη Ντύσσελ (Düssel), έναν παραπόταμο του Ρήνου και την λέξη Ντορφ (Dorf) που σημαίνει χωριό, καθώς υπήρξε ένα μικρό χωριό κατοικούμενο από αγρότες και ψαράδες. Είναι χτισμένο σχεδόν εξ ολοκλήρου, στην ανατολική όχθη του ποταμού Ρήνου και από το 1945 αποτελεί την πρωτεύουσα του κρατιδίου της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας έχοντας πληθυσμό 600.000 κατοίκων. Βρίσκεται στη κεντροδυτική πλευρά της Γερμανίας πολύ κοντά στα σύνορα με Ολλανδία και Βέλγιο αποτελώντας σημαντικό εμπορικό, οικονομικό και διοικητικό κέντρο της περιοχής (<https://www.duesseldorf.de/>).



Εικόνα 9. Η πόλη του Düsseldorf με τους τομείς και τις περιοχές της. Με κόκκινο χρώμα στα βόρεια η περιοχή Wittlaer. (Πηγή: <https://www.duesseldorf.de/>)

3.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η ιστορία του ναού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ιστορία του μεσαιωνικού οχυρού Winkelhausen, του οποίου αποτελούσε παρεκκλήσι. Το οχυρό βρίσκεται λίγες δεκάδες μέτρα μακριά και σήμερα στεγάζει ιππικό όμιλο (Εικόνα 11). Το όνομα του οφείλεται στην θέση που είναι χτισμένο, σε μια στροφή του ποταμού Άνγκερ (Anger) καθώς η λέξη *Winkel* σημαίνει «γωνία» ή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, «στροφή», ενώ το *Hausen* αναφέρεται σε οχυρό. Για αιώνες αποτέλεσε την έδρα ιπποτών και αρχόντων της περιοχής, ενώ η πρώτη αναφορά σε αυτό γίνεται το 1271(Εικόνα 10) (<https://www.gut-sonnenhof.de/geschichte>).



Εικόνα 10. Το Winkelhausen στην τωρινή του κατάσταση.
(Πηγή:<https://ratingen.adfc.de/artikel/kaiserswerth-krefeld-angermund>)

Η ύπαρξη και η λειτουργία μικρών εκκλησιών έξω από οχυρά, κάστρα και κατοικίες ιπποτών στον μεσαίωνα ήταν κάτι το συνηθισμένο καθώς η ζωή μέσα αλλά και γύρω από αυτά, καθοριζόταν σε μεγάλο βαθμό από την θρησκεία. Εκτός από θρησκευτικούς σκοπούς συχνά είχαν και μνημειακό χαρακτήρα καθώς εκεί φυλάσσονταν λείψανα προγόνων και σημαντικών προσώπων, ενώ αποτελούσε απόδειξη κοινωνικού κύρους για τον εκάστοτε άρχοντα. Συνήθως η θέση τους ήταν μπροστά από την κύρια είσοδο ώστε να κρατάει μακριά οτιδήποτε κακό και να προστατεύει τον ιδιοκτήτη του και τους κατοίκους της περιοχής (<https://burgen-pfalz.com/bauelemente/burgkapellen/>).



Θέσεις των μνημείων

— "Hubertus Kapelle"

— "Winkelhausen"

Κλίμακα 1:1500

Σύστημα Αναφοράς: ETRS/UTM 32

Επιμέλεια χάρτη: Κολτσιδας Αργύρης
Πρόγραμμα: QGIS

Εικόνα 11. Θέσεις των μνημείων. (Πηγή: Χάρτης με επιμέλεια του συγγραφέα στο QGIS)

Η εκκλησία οφείλει το όνομα της στον Άγιο Ουβέρτο (Sankt Hubertus), προστάτη των κυνηγών, μιας και εκεί συγκεντρώνονταν κυνηγοί για την ευλογία του πριν από το κυνήγι. Στη θέση της σημερινής εκκλησίας υπήρξε αρχικά μια παλαιότερη για την οποία δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για το πότε χτίστηκε. Ωστόσο για πρώτη φορά γίνεται λόγος το 1436 από τον εφημέριο της περιοχής του Wittlaer καθώς σε αυτό κάνει στάση η λιτανεία του *Σώματος και Αίματος του Χριστού* που κάνει η ενορία στην περιοχή, ενώ το 1476 αναφέρεται σε επίσημα αρχεία της γειτονικής κοινότητας του Άνγκερμουντ (Angermund). Σημαντικότερη μαρτυρία της ιστορίας της, αποτελεί η καμπάνα που υπάρχει ακόμα και σήμερα στο καμπαναριό και είναι το μοναδικό κομμάτι που σώζεται από την παλαιότερη εκκλησία. Πάνω της είναι χαραγμένη η ημερομηνία 1560 και το όνομα Anna Kettler, συζύγου του τότε ιδιοκτήτη του οχυρού Johann von Winkelhausen.

Η ακριβής ημερομηνία ανέγερσης της σημερινής εκκλησίας, και αντικειμένου μελέτης αυτής της εργασίας, είναι και αυτή άγνωστη καθώς δεν υπάρχουν γραπτές μαρτυρίες να την τεκμηριώνουν. Παρόλο αυτά η μελέτη ιστορικών και αρχιτεκτονικών στοιχείων την τοποθετεί στο δεύτερο μισό του 17^{ου} αιώνα. Μετά το πέρας του Τριακονταετούς πολέμου (1618-1648) υπήρξε έντονη οικοδομική δραστηριότητα στην περιοχή της τότε Ρηνανίας αλλά και στο οχυρό Winkelhausen. Η ανακατασκευή της κεντρικής του πύλης ολοκληρώνεται το 1668 όπως μαρτυρά η χρονολογία που είναι χαραγμένη πάνω σε αυτή. Στην πύλη είναι επίσης χαραγμένο το συμμαχικό οικόσημο των οικογενειών von Winkelhausen και Waldbott von Bassenheim το οποίο απεικονίζει μια σιδερένια δάδα με φλόγα (Winkelhausen) και ένα εξάκτινο αστέρι (Waldbott) και το οποίο προήλθε από τον γάμο του Johan Heinrich von Winkelhausen, δούκα στην αυλή του Düsseldorf, και της Maria Agnes Waldbott von Bassenheim το 1634. Το ίδιο οικόσημο βρίσκεται και πάνω από την πύλη του παρεκκλησιού του Αγίου Ουβέρτου δείχνοντας την σχέση της οικογένειας μαζί του (Εικόνα 12 και 13). Ακόμα η θέση και ο προσανατολισμός που έχει το παρεκκλήσι δείχνει ένα ενιαίο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό καθώς είναι ευθυγραμμισμένο με την πύλη του οχυρού, έτσι ώστε η πρόσοψη και το καμπαναριό να φαίνονται σαν μέσα σε πλαίσιο όταν διασχίζει κάποιος την πύλη (Εικόνα 14) (<https://hubertuskapelle-angermund.de/geschichte/>).



Εικόνα 12. Οικόσημο στην πύλη του Winkelhausen.

(Πηγή: <https://www.rheinruhronline.de/niederrhein/niederrheinteil1/stadt-duesseldorf/angermund-gross-winkelhausen.htm>)



Εικόνα 13. Οικόσημο στη Hubertuskapelle. (Πηγή: <https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder/>)



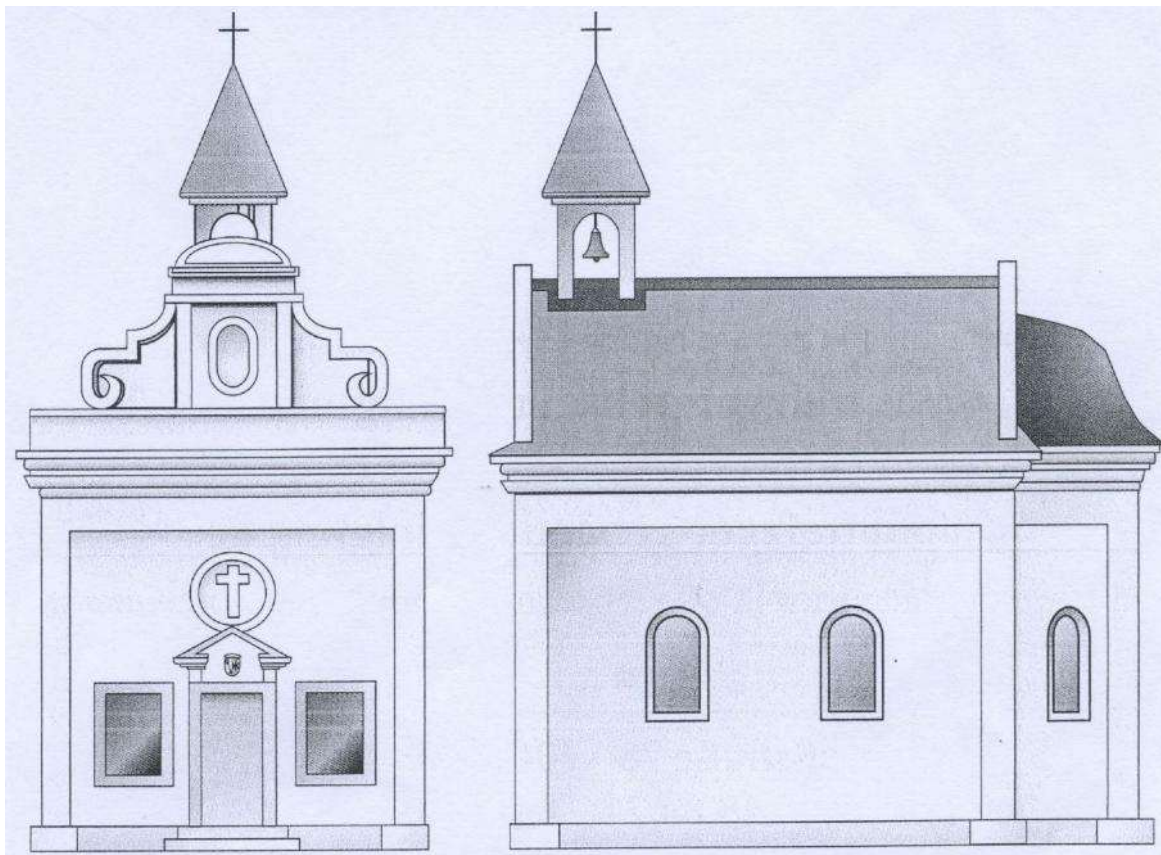
Εικόνα 14. Άποψη της πύλης του οχυρού από το εσωτερικό της εκκλησίας. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)

Η λιτανεία προς το παρεκκλήσι σταματάει το 1831 με απόφαση του αρχιεπισκόπου Κολωνίας. Στην διαταγή αναφέρεται ότι απαγορεύεται να τελούνται λιτανείες σε μέρη όπου κατά την συνάθροιση ατόμων, λαμβάνει χώρα αγοροπωλησία οينوπνευματωδών ποτών και αρχίζει η εγκατάλειψη και παραμέληση του κτίσματος. (https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/hubertuskapelle-ein-barocker-gruss-nach-duisburg_aid-26119835). Η δυναστεία των κόμηδων Winkelhausen και Waldbott von Bassenheim εξαλείφθηκε τον 18^ο αιώνα και έτσι το οχυρό με το παρεκκλήσι κληρονομήθηκαν από τον πρίγκιπα Albert von Hatzfeld-Wildenburg. Το 1906 όπως μαρτυρά και πινακίδα που βρίσκεται μέσα στον ναό, ο πρίγκιπας προχώρησε στην αποκατάσταση του προς τιμήν των προγόνων του και το 1907 κατόπιν αιτήματος του, η αρχιεπισκοπή της Κολωνίας έδωσε την άδεια για την τέλεση τριών λειτουργιών σε αυτό ετησίως. Την δεκαετία του 1940 αλλάζει και πάλι ιδιοκτησία λόγω κληροδότησης και περνάει στα του δούκα Hermann von Dönhoff. Με τους νέους ιδιοκτήτες το παρεκκλήσι παρακμάζει και φτάνει σε ερειπιώδη κατάσταση τόσο πολύ, που το 1967 ο εφημέριος της ενορίας αρνείται να τελήσει εκεί λειτουργία. Το 1981 ο δούκας von Dönhoff μη μπορώντας πλέον να συντηρήσει το κτίριο το δωρίζει στην πόλη του Düsseldorf, το συμβούλιο της οποίας κάνει δεκτή τη δωρεά του στις 16 Ιουλίου 1981. Ταυτόχρονα ιδρύεται σύλλογος στη περιοχή με σκοπό τη διατήρηση και τη προστασία του, πράγμα που οδηγεί στην

αποκατάσταση του το 1982 ενώ από στις 6 Δεκεμβρίου 1984 λαμβάνει τον χαρακτηρισμό και το καθεστώς προστασίας του μνημείου. Το 2004 ο δήμος του Düsseldorf αναλαμβάνει πλήρως την διατήρηση του παρεκκλησιού και διαλύεται ο σύλλογος. Παρόλο αυτά εξαιτίας νέας παραμέλησης που προκάλεσε σημαντικές φθορές στο κτίσμα, ιδρύεται νέος τοπικός σύλλογος προστασίας του με ενέργειες του οποίου προήλθε η τελευταία χρονικά ανακαίνιση με την συμμετοχή και του δήμου το 2017 (<https://hubertuskapelle-angermund.de/geschichte/>).

3.1.3 Αρχιτεκτονικά στοιχεία

Η ανέγερση του παρεκκλησιού του Αγίου Ουβέρτου τοποθετείται χρονικά την περίοδο που στην τέχνη και στην αρχιτεκτονική επικρατεί το Μπαρόκ (1600-1750). Είναι η εποχή της απολυταρχίας όπου μια σειρά από κοινωνικές και θρησκευτικές αλλαγές οδηγούν στην αναζωπύρωση της πίστης. Στην αρχιτεκτονική αυτό εκφράζεται με άξονες συμμετρίας και πομπώδες ύφος ενώ χρησιμοποιούνται στοιχεία όπως οι κίονες, το τόξο και το αέτωμα, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά (Εικόνα 15) (Λάββας, 2002).



Εικόνα 15. Αρχιτεκτονικό σκαρίφημα της εκκλησίας. (Πηγή: <https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder>)

Το παρεκκλήσι αποτελεί ένα απλό, λιτό, ορθογώνιο κτίσμα, χτισμένο από τούβλα με κυρτό αέτωμα στη δυτική πλευρά, θολωτή αψίδα και μικρό πυργίσκο με καμπάνα στη στέγη του, ενώ παραστάδες κοσμούν κάθε γωνία του. Δεξιά και αριστερά από την είσοδο υπάρχουν παράθυρα με υαλοπίνακες και κιγκλιδώματα. Η ύπαρξη λίθινων βαθμίδων μορφής μπαρόκ στο εξωτερικό τους, δείχνει ότι παλιότερα αποτέλεσαν «παράθυρα προσευχής» που επέτρεπαν στους πιστούς την θέαση στο εσωτερικό του ναού όταν αυτός δεν ήταν ανοιχτός καθώς δεν υπήρχαν υαλοπίνακες και παραθυρόφυλλα. Η βόρεια και η νότια πλευρά του κτίσματος διαθέτουν επίσης δύο τοξωτά παράθυρα η κάθε μία, όπως δυο παράθυρα υπάρχουν και στο δυτικό αέτωμα. Πάνω από την είσοδο υπήρξε ένα στρόγγυλο παράθυρο το οποίο έχει χτιστεί και το διακοσμεί ένας σταυρός ενώ περίοπτη θέση καταλαμβάνει το έμβλημα των οίκων Winkelhausen και Waldbott von Bassenheim (Εικόνα 16 και 17) (Baumann, 2014). Η πρόσοψη του κτίσματος είναι 7,13 μ. ενώ οι τοίχοι στη βόρεια και νότια πλευρά περίπου 9,20 μ. Οι πλάγιες πλευρές του αετώματος 2,53μ. η καθεμία και η ευθεία πλευρά του 2,83μ. δίνοντας του ένα εμβαδό περίπου 74 τετραγωνικά μέτρα.



Εικόνα 16. Άποψη της εκκλησίας από την νοτιοανατολική πλευρά. (Πηγή: <https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder>)



Εικόνα 17. Πρόσοψη της εκκλησίας. (Πηγή: <https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder>)

3.1.4 Ανακαίνισεις

Κατά την ανακαίνιση του 1982 επισκευάστηκε ο φέρων οργανισμός της στέγης καθώς έγινε αντικατάσταση των φθαρμένων δρύινων δοκών με δοκούς από έλατο, έγινε ενίσχυση της στέγης στο αέτωμα, στο δάπεδο τοποθετήθηκαν λίθινα πλακάκια και ανακατασκευάστηκε η βάση της καμπάνας και έγινε επανατοποθέτηση της. Στην τελευταία ανακαίνιση του 2016 έλαβαν χώρα σημαντικές εργασίες και επεμβάσεις στο μνημείο. Υπήρξε αποξήλωση της στέγης και αποσυναρμολόγηση της καμπάνας καθώς και καθαρισμός ολόκληρης της ξύλινης κατασκευής από υγρασία. Η ανακατασκευή της στέγης έγινε σε συνεργασία και υπό την επίβλεψη του κρατικού συντηρητή μνημείων και υπήρξε επικάλυψή της με σχιστόλιθο αντί για κεραμίδι που υπήρξε παλιότερα. Οι τοίχοι του αετώματος εξετάστηκαν από στατικό μηχανικό και εξασφαλίστηκε η στατικότητα τους. Έγινε καθαρισμός και βαφή όλων των εξωτερικών επιφανειών και τοίχων, της εσωτερικής τοιχοποιίας καθώς και καθαρισμός δαπέδων (Bauer, 2005).

3.1.5 Επιλογή μνημείου

Έχοντας μια ιστορία εφτακοσίων και πλέον χρόνων, το Düsseldorf είναι μια πόλη με μεγάλο αριθμό μνημείων καθώς σε αυτό υπάρχουν περίπου 1.800 αρχιτεκτονικά μνημεία, διατηρητέα κτίρια, αρχαιολογικοί χώροι και μεμονωμένα έργα τα οποία προστατεύονται από τον νόμο για την προστασία μνημείων. (<https://www.duesseldorf.de/denkmalschutz>).

Η επιλογή του συγκεκριμένου μνημείου (Εικόνα 18) για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας, έγινε για λόγους τεχνικούς, ιστορικούς, πρακτικούς και λαμβάνοντας υπ' όψη τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Καθώς η αποτύπωση του μνημείου έπρεπε να αποτελεί συνδυασμό φωτογραμμετρικών μεθόδων και επίγειου σαρωτή Laser το μέγεθος του κάθε μνημείου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην τελική επιλογή. Τα περισσότερα αρχιτεκτονικά μνημεία αποτελούν είτε επιβλητικά κτίρια διοικητικού χαρακτήρα, στεγάζοντας δημόσιες υπηρεσίες ή ιδιωτικά γραφεία, είτε κτίρια κατοικίας πολλών ορόφων καθιστώντας το μέγεθός τους απαγορευτικό για αποτύπωση με σαρωτή Laser εσωτερικών, κυρίως, χώρων όπως ο Leica BLK 360 που χρησιμοποιήθηκε. Ακόμα και οι φωτογραφίες από εναέρια και επίγεια φωτογραμμετρία τέτοιων κτιρίων θα καθιστούσαν τον όγκο και την επεξεργασία των δεδομένων ασύμφορα.

Σε προσωπική επικοινωνία με την υπηρεσία προστασίας μνημείων της πόλης του Düsseldorf και σε ερώτηση σχετικά με το αν θα ήταν απαραίτητη η έκδοση κάποιας άδειας

για την αποτύπωση μνημείου, γνωστοποιήθηκε ότι οι εργασίες της αποτύπωσης μπορούν να γίνουν ελεύθερα χωρίς ειδική άδεια. Ωστόσο, απαιτείται η άδεια του ιδιοκτήτη όταν το μνημείο ανήκει σε ιδιώτη, ενώ, στην περίπτωση δημόσιου μνημείου, όταν χρησιμοποιείται UAV (Drone) για φωτογράφιση σε κατοικημένη περιοχή, απαιτείται η ενημέρωση και η σύμφωνη γνώμη των κατοίκων της γειτονικής περιοχής. Τα δεδομένα αυτά ήταν αποτρεπτικά για μικρότερα κτίρια ιδιωτικού ή δημόσιου χαρακτήρα καθώς προϋποθέτει άδειες και συνεννόηση με πολλούς παράγοντες. Επίσης αποτρεπτικά σε πολλές περιπτώσεις λειτούργησε η ύπαρξη βλάστησης και κυρίως δέντρων γύρω από εκκλησίες και δημόσια κτίρια πράγμα που θα δυσχέραινε την πτήση Drone για τις εναέριες φωτογραφίες αλλά και την αποτύπωση του μνημείου με τον σαρωτή.

Η εκκλησία θεωρήθηκε αρκετά ενδιαφέρουσα καθώς διαθέτει μια ιστορία διακοσίων και πλέον χρόνων παραμένοντας στο ίδιο σημείο με αυτή την μορφή παρόλες τις ανακαινίσεις που υπέστη κατά καιρούς. Είναι συνδεδεμένη με το φρούριο του Winkelhausen το οποίο με την σειρά του συνδέεται με μια σειρά άλλων οχυρών και κάστρων που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή, δίνοντας μια εικόνα της κατάστασης και του μεσαιωνικού τρόπου ζωής, της αρχιτεκτονικής του μπαρόκ, και τον ρόλο που είχε η αριστοκρατία της εποχής στην ίδρυση και κατασκευή λατρευτικών χώρων. Το μέγεθος της κρίθηκε ιδανικό προς αποτύπωση καθώς ο διαθέσιμος σαρωτής δεν ενδείκνυται για αποτυπώσεις μεγάλων κτιρίων όμως είναι επαρκής για μεγέθη σαν και αυτό τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό τους, ενώ κατάλληλο θεωρήθηκε το μέγεθος και για τις φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις, επίγειες και εναέριες. Με τον συνδυασμό σαρωτή και επίγειων φωτογραφιών στα μέρη που υπήρχε δυνατότητα αλλά και εναέριων με τη χρήση Drone σε αυτά που δεν υπάρχει (σκεπή, καμπαναριό) εκπληρώνεται πλήρως και ο σκοπός της άσκησης.

Επίσης σημαντικό ρόλο έπαιξε η τοποθεσία του μνημείου και η πρόσβαση σε αυτό. Το παρεκκλήσι βρίσκεται σε αγροτική περιοχή, μακριά από τον αστικό ιστό που είναι όμως εύκολα προσβάσιμο καθώς βρίσκεται πλησίον της εθνικής οδού. Η κίνηση γύρω από αυτό είναι ελάχιστη καθώς λόγω της τοποθεσίας και του τοπίου συναντά κανείς κυρίως περιπατητές, ποδηλάτες ή αναβάτες από τον ιππικό όμιλο που βρίσκεται κοντά γεγονός που διευκόλυνε την επίγεια αποτύπωση ενώ και η εναέρια δεν αντιμετώπισε πρόβλημα καθώς τα δέντρα που βρίσκονται κοντά είναι σε απόσταση τέτοια ώστε η πτήση με Drone πάνω από την στέγη να γίνεται χωρίς κίνδυνο. Όσον αφορά την άδεια σχετικά με τις μετρήσεις, αν και το μνημείο ανήκει στην πόλη του Düsseldorf τα κλειδιά και την επιμέλεια του

διαθέτει ο ιδιοκτήτης του ιππικού ομίλου και πρόεδρος του συλλόγου για την προστασία της εκκλησίας κ. Cristoph Sonnen και ήταν απαραίτητη η συγκατάθεση του. Οι προσπάθειες για επαφή μαζί του τόσο τηλεφωνικώς αλλά και με την χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου απέβησαν άκαρπες. Ωστόσο όταν έγινε επαφή μαζί του επί τόπου και του εξηγήθηκε ο σκοπός της άσκησης και η διαδικασία αποτύπωσης, δέχθηκε ευχαρίστως να βοηθήσει και έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για το μελλοντικό αποτέλεσμα για την προστασία και την τεκμηρίωση του μνημείου.



Εικόνα 18. Πλακέτα στην πρόσοψη της εκκλησίας με το έμβλημα της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλία και την ένδειξη Μνημείο (Denkmal). (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)

3.2 Διαθέσιμος εξοπλισμός

Για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου της εκκλησίας μέσω νέφους σημείων από σαρωτή και φωτογραφίες καθώς και της γεωαναφοράς του στο τοπικό σύστημα αναφοράς, ήταν απαραίτητη η χρήση ειδικού εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός ανήκε εξ ολοκλήρου στο τεχνικό γραφείο *Thorsten Spelter ObVI*, στο Hilden, και παραχωρήθηκε με σκοπό την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Για την αποτύπωση του μνημείου χρησιμοποιήθηκαν ένας σαρωτής Laser, ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος (Drone), φωτογραφική μηχανή, ταχύμετρο και δέκτης GPS.

3.2.1 Επίγειος σαρωτής Laser

Ο σαρωτής Laser (Laser scanner) που χρησιμοποιήθηκε είναι ο BLK 360 G1 της εταιρίας Leica. Αποτελεί ένα επίγειο μικρό σαρωτή, ο οποίος προσδιορίζει την ακριβή θέση των σημείων στο χώρο στέλνοντας παλμούς φωτός, λειτουργία Time-of-Flight (TOF). Ο BLK 360 ολοκληρώνει μια πλήρη σάρωση σε 20 δευτερόλεπτα στην λειτουργία αραιής (χαμηλής πυκνότητας) σάρωσης, καταγράφοντας έως και 680.000 σημεία το δευτερόλεπτο με κάλυψη 360°. Διαθέτει εμβέλεια περίπου 45m. με σφάλμα που ορίζεται στα $\pm 4\text{mm}$ στα 10m, γεγονός που τον κάνει ακατάλληλο για αποτυπώσεις μεγάλων κτιρίων. Έχει τέσσερις κάμερες των 13 MP και απεικόνιση HDR (High Dynamic Range) ενώ χρησιμοποιεί τεχνολογία VIS (Visual Inertial System) που συνενώνει τις λήψεις με μεγάλη επικάλυψη μεταξύ τους, χωρίς να χρειάζεται το κάνει ο χρήστης χειροκίνητα (<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-blk360>).

3.2.2 Μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV)

Για την φωτογραφική αποτύπωση της σκεπής, του καμπαναριού, δυσπρόσιτων σημείων που δεν ήταν δυνατόν να αποτυπωθούν από τον σαρωτή και τις επίγειες φωτογραφίες αλλά και του περιβάλλοντος χώρου του μνημείου, χρησιμοποιήθηκε μη επανδρωμένο αεροσκάφος, Drone. Η λήψεις γίνανε με Drone της εταιρίας DJI και συγκεκριμένα το μοντέλο Mini 2 με μοντέλο κάμερας FC7303. Η ανάλυση της φωτογραφίας είναι στα 4000 x 3000px δηλαδή φωτογραφίες 12MP. Διαθέτει φακό εστιακής απόστασης 4.49mm, ισοδύναμο 35mm:~ 24mm, με μέγιστο άνοιγμα διαφράγματος $f / 2.8$ και ISO~ 100 (<https://www.dji.com/de/mini-2-se/specs>).

3.2.3 Γεωδαιτικός σταθμός

Για την γεωαναφορά του μνημείου ήταν απαραίτητη η χρήση γεωδαιτικού σταθμού ώστε να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν σαν σημεία αναφοράς του νέφους από τον σαρωτή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο TS 15 της εταιρίας Leica ακρίβειας 2". Το όργανο διαθέτει την λειτουργία ATR (Automatic Target Recognition), που του δίνει την δυνατότητα να ακολουθεί το πρίσμα και να μπορεί να χειρίζεται από απόσταση. Έτσι η ταχυμετρικές εργασίες πραγματοποιήθηκαν μόνο από τον συγγραφέα (<https://leica-geosystems.com/products/total-stations>).

3.2.4 Δέκτης GPS

Για την μέτρηση των σταθερών σημείων από τα οποία έγινε η εξάρτηση των ταχυμετρικών μετρήσεων έγινε η χρήση GPS της εταιρίας Trimble και του μοντέλου της R8. Οι εργασίες με την μέθοδο RTK (Real-Time Kinematic) στην οποία η οριζόντια ακρίβεια του μοντέλου ανέρχεται στα $\pm 3 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$ και η κατακόρυφη στα $\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$ (<https://ts-geosystems.com/product/trimble-r8-rtk-gps/>).

3.2.5 Φωτογραφική μηχανή

Η επίγεια φωτογραμμετρική αποτύπωση εκπονήθηκε με την κάμερα Ricoh WG-80 Special Edition Orange, μια απλή ψηφιακή μηχανή εμπορίου με αισθητήρα 16 MP τύπου BSI CMOS 1/2.3", σε συνδυασμό με φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης 5–25 mm (ισοδύναμο εύρος 28–140 mm σε φορμά 35 mm) και εύρος μέγιστου διαφράγματος από f/3.5 στα 28 mm έως f/5.5 στα 140 mm. Οι διαστάσεις κάθε φωτογραφίας είναι 4608×3456 pixels, γεγονός που αντιστοιχεί σε μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel size) περίπου 1,34 μm , και οθόνη LCD 2,7" (<https://ricoh-imaging.eu/products/ricoh-wg-80>).

3.3 Σάρωση με σαρωτή Laser

Στις επίγειες αποτυπώσεις με σαρωτή Laser η επιλογή των σημείων, των κατάλληλων θέσεων δηλαδή, που θα τοποθετεί ο σαρωτής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο γιατί από αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ακρίβεια και η ποιότητα των μετρήσεων (Yakar, Yilmaz & Mutluoglu, 2014). Για αυτό είναι απαραίτητο πριν ξεκινήσει η διαδικασία να γίνεται ένας σχεδιασμός της σάρωσης και να λαμβάνονται υπ' όψιν το σχήμα και το μέγεθος του αντικειμένου καθώς και η εμβέλεια με το οπτικό πεδίο του σαρωτή. Στόχος πρέπει να είναι η καλύτερη δυνατή επικάλυψη μεταξύ των σαρώσεων από πολλές θέσεις (multi-scan

approach) που εξασφαλίζει καλύτερη συνένωση των νεφών σημείων και μεγαλύτερη ακρίβεια (Ioannides, Fink, Brumana, Patias, Doulamis, Martins & Wallace, 2018). Στην αποτύπωση της Hubertuskapelle εφαρμόστηκε η μέθοδος multi-scan και έγινε σάρωση του μνημείου από δεκαπέντε συνολικά διαφορετικές θέσεις, αριθμός που με τον επί τόπου έλεγχο στο πρόγραμμα κρίθηκε ικανοποιητικός. Τα σημεία που στήθηκε το όργανο αποφασίστηκαν με βάση τη γεωμετρία της εκκλησίας, τις επιφάνειες αλλά και τις δυνατότητες του διαθέσιμου σαρωτή, οποίος δεν είναι κατάλληλος για μεγάλα κτίρια. Από τον συνολικό αριθμό στάσεων, οι τέσσερις έγιναν στο εσωτερικό της εκκλησίας για την καταγραφή της εσωτερικής της γεωμετρίας (Εικόνα 19). Από τις υπόλοιπες, τέσσερα σημεία στάσεων έγιναν μπροστά από την πρόσοψη καθώς αποτελεί το τμήμα με τις περισσότερες λεπτομέρειες (Εικόνα 20 και 21). Στόχος ήταν η αποτύπωση των χαρακτηριστικότερων σημείων όπως τα παράθυρα, το πλαίσιο της πόρτας με το έμβλημα του οίκου, το σκαλοπάτι που δημιουργείται μπροστά από την είσοδο καθώς και η επιφάνειά των κυβόλιθων. Για την ολοκλήρωση της σάρωσης ολόκληρου του μνημείου, το όργανο τοποθετήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή επικάλυψη κοινών σημείων, όπως γωνίες ή ακμές παραθύρων, καθώς και η βέλτιστη κάλυψη σε ύψος για την αποτύπωση χαρακτηριστικών στα άνω τμήματα των τοίχων και της στέγης με στόχο την ευκολότερη και ακριβέστερη συνένωση των νεφών (Εικόνα 22).



Εικόνα 19. Σάρωση του εσωτερικού της εκκλησίας. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)



Εικόνα 20. Σάρωση της πρόσοψης. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)



Εικόνα 21. Σάρωση της πρόσοψης και της νότιας πλευράς. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)



Εικόνα 22. Σάρωση νότιας πλευράς. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)

Για την γεωαναφορά του μνημείου ήταν απαραίτητη η χρήση χαρακτηριστικών σημείων και συγκεκριμένα στόχων, οι οποίοι αργότερα κατά την επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό, θα αποτελέσουν τα σταθερά σημεία ώστε μέσω του κατάλληλου μετασχηματισμού να συνδεθεί το νέφος σημείων με το τοπικό γεωδαιτικό σύστημα. Λόγω της υφής της επιφάνειας της εκκλησίας και για να μην προκριθεί κάποια αποκόλληση υλικού, δεν τοποθετήθηκαν μεγάλοι τετράγωνοι στόχοι στους τοίχους της, αλλά μικρότεροι στρόγγυλοι σε σημεία που επιλέχθηκαν. Έτσι υλοποιήθηκαν στο έδαφος έξι σημεία, τα οποία κατανεμήθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιβάλλουν περιμετρικά το μνημείο και από κάθε σημείο στάσης του σαρωτή να είναι ορατοί τουλάχιστον δύο χαρακτηριστικοί στόχοι. Οι στόχοι αποτυπώθηκαν ταχυμετρικά ώστε να αποκτήσουνε συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς (Εικόνα 23 και 24).



Εικόνα 23. Κυκλικός στόχος στη δυτική πλευρά. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)



Εικόνα 24. Σαρωτής και στόχος στη νότια πλευρά. (Πηγή: Φωτογραφία του συγγραφέα)

3.4 Φωτογραμμετρική αποτύπωση

Η φωτογραμμετρική μέθοδος *Structure from Motion*, είναι μια διαδικασία που εντοπίζει και αντιστοιχεί κοινά χαρακτηριστικά σημεία σε εικόνες, τα οποία μέσω αλγορίθμων οδηγούν στη δημιουργία αραίου νέφους σημείων και στη συνέχεια στη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του αντικειμένου με υφή και χρώμα. Η ποιότητα των φωτογραφιών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα για αυτό θα πρέπει να γίνεται εκ των προτέρων σχεδιασμός της αποτύπωσης. Το αντικείμενο πρέπει να καταγράφεται πρώτα στο σύνολο του και μετά οι λεπτομέρειες, κάθε σημείο να εμφανίζεται σε τουλάχιστον τρεις εικόνες, ο φωτισμός και η κάμερα να είναι σταθερά ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται ομοιογενείς, διάφανες και ανακλαστικές επιφάνειες (Micheletti, Chandler & Lane, 2014).

Με γνώμονα τις παραπάνω κατευθύνσεις έγινε η φωτογραφική αποτύπωση του μνημείου. Αρχικά η επίγεια με την διαθέσιμη κάμερα Ricoh WG-80 Special Edition και εν συνεχεία η εναέρια με το Drone DJI Mini 2. Οι επίγειες φωτογραφίες ανέρχονται σε 179 οι εξωτερικές και 49 οι εσωτερικές. Η εκκλησία φωτογραφήθηκε από απόσταση ώστε να καταγραφεί γενικά το σχήμα και η μορφή της και ακολούθησαν πιο κοντινές φωτογραφίες σε σημεία λεπτομερειών. Έγινε προσπάθεια για απεικόνιση όσον το δυνατόν περισσότερων χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων όπως γωνίες, ακμές και παράθυρα, ενώ

φωτογραφήθηκε και το μέγιστο δυνατό μέρος της σκεπής με σκοπό να αποτελέσει σημείο ένωσης με τις εναέριες φωτογραφίες στην δημιουργία του μοντέλου. Ακολουθήθηκε περιμετρική φορά, ενώ σε κάθε σημείο καταγραφής λήφθηκαν τουλάχιστον τέσσερις φωτογραφίες στην κάθετη διεύθυνση (Εικόνα 25,26,27,28). Ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στις λεπτομέρειες στις βάσεις των τοιχίων όπως και στις λεπτομέρειες του μπροστινού μέρους που είναι το σκαλί και η επιφάνεια με τους κυβόλιθους. Η αποτύπωση έγινε πρωινές ώρες με αρκετή ηλιοφάνεια με αποτέλεσμα η δυτική και η βόρεια πλευρά του κτίσματος να είναι αρκετά σκιερές ενώ η νότια και ανατολική πολύ φωτεινότερες με αποτέλεσμα ο φωτισμός να είναι ανομοιόμορφος. Για να διατηρηθεί η ίδια ποιότητα σε όλες τις εικόνες, επιλέχθηκαν στην κάμερα οι αυτόματες ρυθμίσεις και αποφεύχθηκε η χρήση εστίασης (Shortis, Bellman, Robson, Johnston & Johnson, 2006).



Εικόνα 25.Πρώτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 26.Δεύτερη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 27. Τρίτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 28. Τέταρτη φωτογραφία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)

Με το ίδιο σκεπτικό πραγματοποιήθηκαν και οι εναέριες λήψεις με το Drone της DJI. Αρχικά πέταξε σε μεγαλύτερο ύψος ώστε να ληφθούν κάθετες εικόνες του μνημείου και του περιβάλλοντος χώρου (Εικόνα 29). Στη συνέχεια, ακολουθώντας κυκλική διαδρομή κάλυψε ολόκληρη την εκκλησία δίνοντας σημασία στα χαρακτηριστικά σημεία και την επικάλυψη των εικόνων, ενώ οι λήψεις έγιναν από μεγάλο αλλά και μικρότερο ύψος, ώστε να δημιουργηθούν ομόλογα σημεία με τις επίγειες φωτογραφίες. Λεπτομέρειες σημαντικές για την κατάσταση του κτιρίου όπως η κατάσταση της σκεπής, η υγρασία στο πάνω μέρος των τοίχων, το καμπαναριό αλλά και η φθορά στα ξύλινα μέρη του, φωτογραφήθηκαν από πολύ κοντινή απόσταση (Εικόνες 30,31,32), όπως και οι λεπτομέρειες στην πρόσοψη του

ναού (σταυρός, οικόσημα). Κύριο αντικείμενο της εναέριας αποτύπωσης, όπως είναι φυσικό, ήταν τα σημεία που δεν μπορούσαν να καλυφθούν από τις επίγειες εικόνες όπως σκεπή, άνω μέρη των τοιχίων και το καμπαναριό. Η γωνία λήψης δεν ήταν μόνο οριζόντια ή κάθετη αλλά και λοξή καθώς ο συνδυασμός κατακόρυφων και λοξών εικόνων βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια και την ποιότητα του μοντέλου (Rossi, Mancini, Dubbini, Mazzone & Capra, 2017).



Εικόνα 29. Φωτογραφία με Drone από μεγάλο ύψος. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 30. Αποτύπωση της υγρασίας σε σκεπή και τοίχους. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 31. Αποτύπωση λεπτομερειών με Drone. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)



Εικόνα 32. Φθορά ξύλινων τμημάτων του καμπαναριού και υγρασία. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)

3.5 Γεωαναφορά

Για την ένταξη του μνημείου στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς αλλά και για την αύξηση της γεωμετρικής του ακρίβειας, ήταν απαραίτητη η χρήση σημείων αναφοράς με γνωστές συντεταγμένες. Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν στο έδαφος γύρω από την εκκλησία έξι τοπογραφικά καρφιά σήμανσης, πάνω στα οποία θα τοποθετούταν οι ασπρόμαυροι στόχοι ώστε να είναι ορατοί κατά την διαδικασία της σάρωσης και τα οποία αποτέλεσαν τα σημεία αναφοράς της μέτρησης. Λόγω της έλλειψης γνωστών τοπογραφικών σημείων στην περιοχή, αποφασίστηκε η εξάρτηση να γίνει από σημεία που μετρήθηκαν με GPS της εταιρίας Trimble και δημιουργήθηκαν τέσσερα σημεία σε μακρινότερη απόσταση (Εικόνα 33) . Κάθε σημείο μετρήθηκε με τη μέθοδο RTK (Real-Time Kinematic) μέσω δύο ανεξάρτητων στατικών μετρήσεων διάρκειας 30 δευτερολέπτων η καθεμία, ενώ οι τελικές συντεταγμένες υπολογίστηκαν ως ο μέσος όρος των δύο παρατηρήσεων. Στα σημεία δόθηκε η αρίθμηση από 10001 μέχρι 10004 ώστε να μην συγχέονται με αυτά των στάσεων του οργάνου και των σημείων αναφοράς (Πίνακας 1). Η χρήση RTK επιτρέπει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο, ενώ η επανάληψη παρατηρήσεων και ο υπολογισμός μέσου όρου χρησιμοποιούνται για τη μείωση τυχαίων σφαλμάτων (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle, 2008).



Εικόνα 33. Μέτρηση σταθερού σημείου με δέκτη GPS Trimble. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)

Σημείο	Y (m)	X (m)
10001	32343537.689	5690972.276
10002	32343503.845	5690943.576
10003	32343539.319	5690926.575
10004	32343558.975	5690939.165

Πίνακας 1. Συντεταγμένες σημείων GPS σε ETRS 89/UTM32

Στη συνέχεια για τον προσδιορισμό των έξι σημείων αναφοράς, στήθηκε το ταχύμετρο TS 15 της Leica σε τυχαίο σημείο (Εικόνα 34) και με την μέθοδο της οπισθοτομίας (Ντίνης, 2009) μετρήθηκαν τρία από τα γνωστά πλέον σημεία GPS και στη συνέχεια αποτυπώθηκαν τρία από τα σημεία αναφοράς. Η ίδια ακριβώς διαδικασία έγινε από δεύτερο τυχαίο σημείο και για τα υπόλοιπα τρία σημεία αναφοράς από την άλλη πλευρά της εκκλησίας και με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν οι συντεταγμένες και των έξι σημείων στο σύστημα ETRS 89/UTM 32 τα οποία έλαβαν τιμές από 501 έως 506 (Πίνακας 2). Η όλη εργασία έγινε ρομποτικά από τον γράφοντα με την τεχνική ATR (Automatic Target Recognition) που διαθέτει το όργανο, ενώ ταυτόχρονα έγινε και τοπογραφική αποτύπωση του μνημείου.



Εικόνα 34. Στάση ταχυμέτρου για την μέτρηση των σταθερών σημείων. (Πηγή: Φωτογραφία συγγραφέα)

Σημείο	Y (m)	X (m)
501	32343535.270	5690944.378
502	32343534.134	5690934.076
503	32343538.499	5690931.989
504	32343550.303	5690932.565
505	32343549.515	5690941.239
506	32343543.073	5690944.145

Πίνακας 2. Συντεταγμένες σταθερών σημείων για την γεωαναφορά

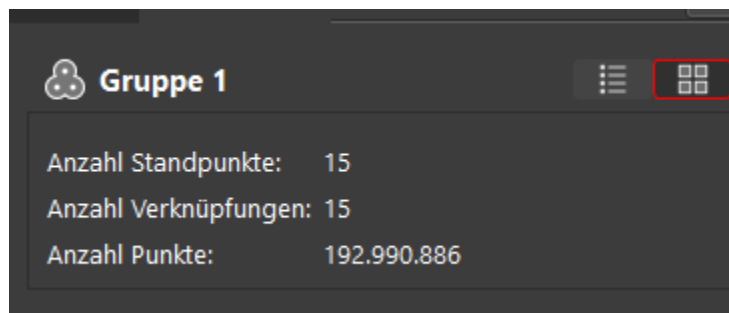
Τα σκαριφήματα της αποτύπωσης και το τοπογραφικό διάγραμμα με τις ακριβείς θέσεις των σταθερών σημείων, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α'.

4. Επεξεργασία δεδομένων

Μετά την συλλογή των δεδομένων στο πεδίο, ακολουθεί το σημαντικό στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων. Για τα δεδομένα του σαρωτή και την επεξεργασία του νέφους σημείων χρησιμοποιήθηκε το Leica Cyclone Register, το οποίο όπως και ο τοπογραφικός εξοπλισμός, παραχωρήθηκε από το τεχνικό γραφείο *Thorsten Spelter ObVI*. Όσον αφορά τα φωτογραμμετρικά δεδομένα, αυτά επεξεργάστηκαν στο ελεύθερο λογισμικό φωτογραμμετρίας Reality Scan 2.0.1 της Epic Games. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος έγινε λόγω της χρήσης του από τον συγγραφέα κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών και για το ότι είναι ελεύθερα προσβάσιμο για απεριόριστο χρόνο σε σχέση με άλλα παρόμοια λογισμικά. Στο Reality Scan εισάχθηκε και το τελικό νέφος σημείων από τον σαρωτή, ώστε να γίνει ο συνδυασμός τους για την παρασκευή των τελικών μοντέλων σαρωτή και φωτογραμμετρίας.

4.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή

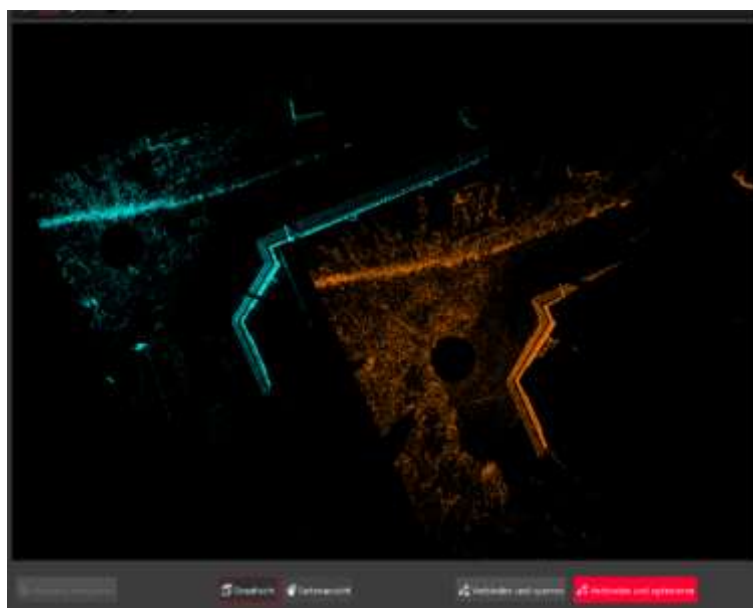
Όπως αναφέρθηκε για τη δημιουργία του ενιαίου νέφους σημείων από τον σαρωτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Cyclone Register. Έγινε η εισαγωγή των μετρήσεων στο πρόγραμμα όπου αναγνωρίστηκαν δεκαπέντε στάσεις του σαρωτή (Set Ups) και συνολικά 192.990.886 σημεία (Εικόνα 35). Σκοπός ήταν η ένωση όλων των νεφών σε ένα, η οποία επιτευχθεί με δύο τρόπους. Αρχικά κατά την εισαγωγή των δεδομένων έγινε η επιλογή της εντολής *Auto Cloud*, μια εντολή που δίνει τη δυνατότητα στο



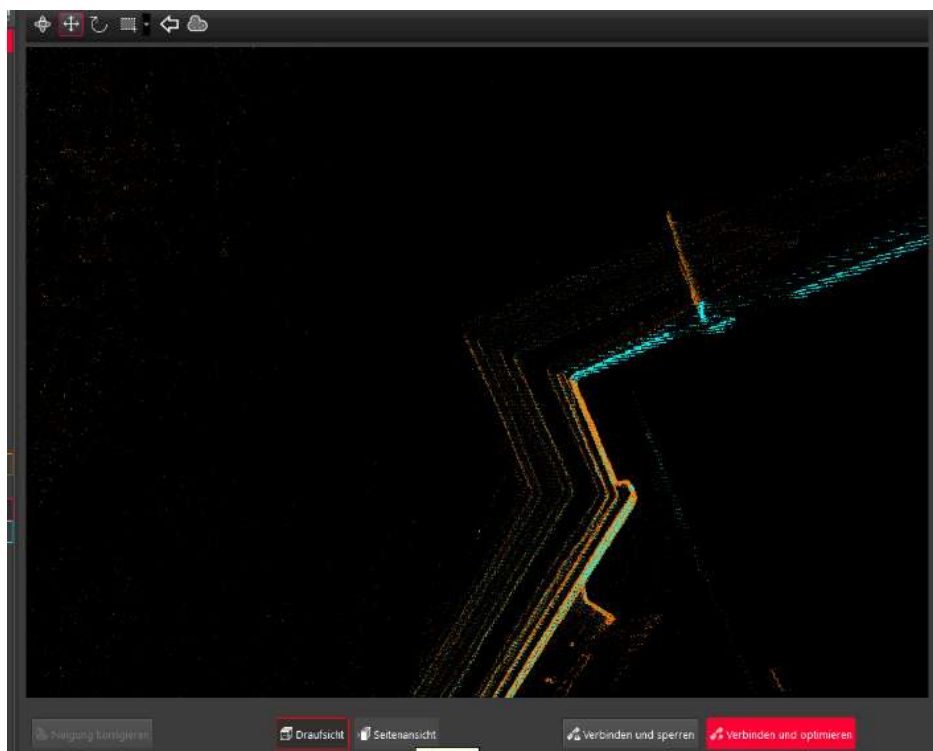
Εικόνα 35. Αριθμός στάσεων, συνενώσεων και συνολικών σημείων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)

πρόγραμμα να συνενώνει αυτόματα διαφορετικά σημεία σάρωσης με μεγάλο ποσοστό επικάλυψης. Το κάθε σημείο σάρωσης αποτελεί ένα δικό του σύστημα συντεταγμένων. Το Cyclone Register εντοπίζει κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των νεφών (γωνίες, ακμές, τοίχους) και εφαρμόζει αλγόριθμο τύπου Iterative Closest Point - ICP (Besl & McKay, 1992). Για κάθε σημείο στο νέφος A βρίσκει το πιο κοντινό στο νέφος B, υπολογίζει τον μετασχηματισμό (rotation & translation), ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των νεφών και επαναλαμβάνει μέχρι το βέλτιστο αποτέλεσμα ενώ υπολογίζει και το μέσο τετραγωνικό

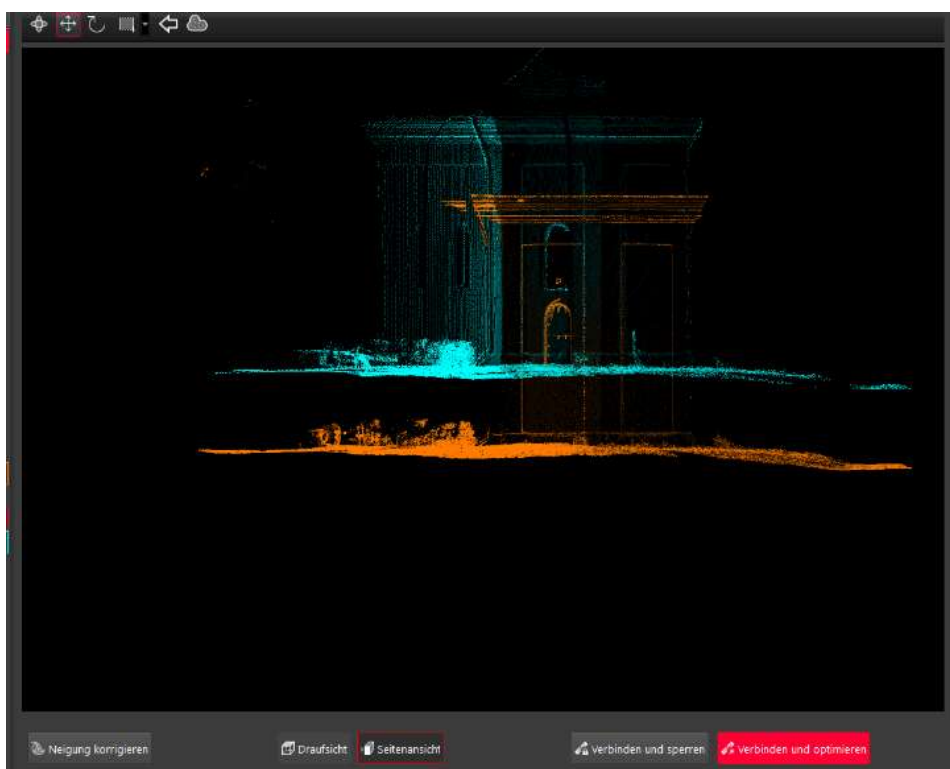
σφάλμα RMS (γερμανικά Globaler Fehler). Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιήθηκαν οι τέσσερις πρώτες συνενώσεις των εσωτερικών σαρώσεων, καθώς και η πρώτη συνένωση μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών σαρώσεων, αφού όλες διέθεταν ποσοστό επικάλυψης άνω του 80%. Όσον αφορά τις υπόλοιπες σαρώσεις, η ευθυγράμμιση τους πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα με την λειτουργία *Visual Alignment*. Κατά τη διαδικασία επιλέγονται κάθε φορά δύο νέφη σημείων, με κριτήριο αφενός τη γεωμετρική τους ομοιότητα και αφετέρου τον αύξοντα αριθμό που είχε αποδοθεί σε κάθε νέφος και είχε καταγραφεί σε σκαρίφημα κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου, διευκολύνοντας έτσι την αντιστοίχισή τους στο λογισμικό. (Παράρτημα Α'). Η διαδικασία βασίζεται στον αλγόριθμο ICP. Τα δύο νέφη που επιλέγονται έχουν διαφορετικό χρωματισμό, με το ένα από αυτά παραμένει σταθερό, ενώ το δεύτερο μετακινείται (Εικόνα 36). Μέσω επιλογών μεταφοράς και περιστροφής (*Drag + Rotate*) τοποθετείται έτσι ώστε να ταυτιστεί με το άλλο ενώ περιστρέφεται και μεταφέρεται τόσες φορές ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα. Η ευθυγράμμιση των νεφών πρέπει να γίνει τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο (Εικόνα 37 και 38), ενώ μόνο όταν η ακρίβεια της θεωρηθεί ικανοποιητική γίνεται αποδεκτή από το λογισμικό (Εικόνα 39). Οι ίδιες ενέργειες πραγματοποιήθηκαν για όλες τις υπόλοιπες έντεκα σαρώσεις με τα σφάλματα ευθυγράμμισης να είναι ικανοποιητικά, καθώς οι τιμές τους ανέρχονται σε λίγα χιλιοστά. Αναλυτικός πίνακας με τα σφάλματα και τα ποσοστά επικάλυψης παρατίθεται στο Παράρτημα Β'.



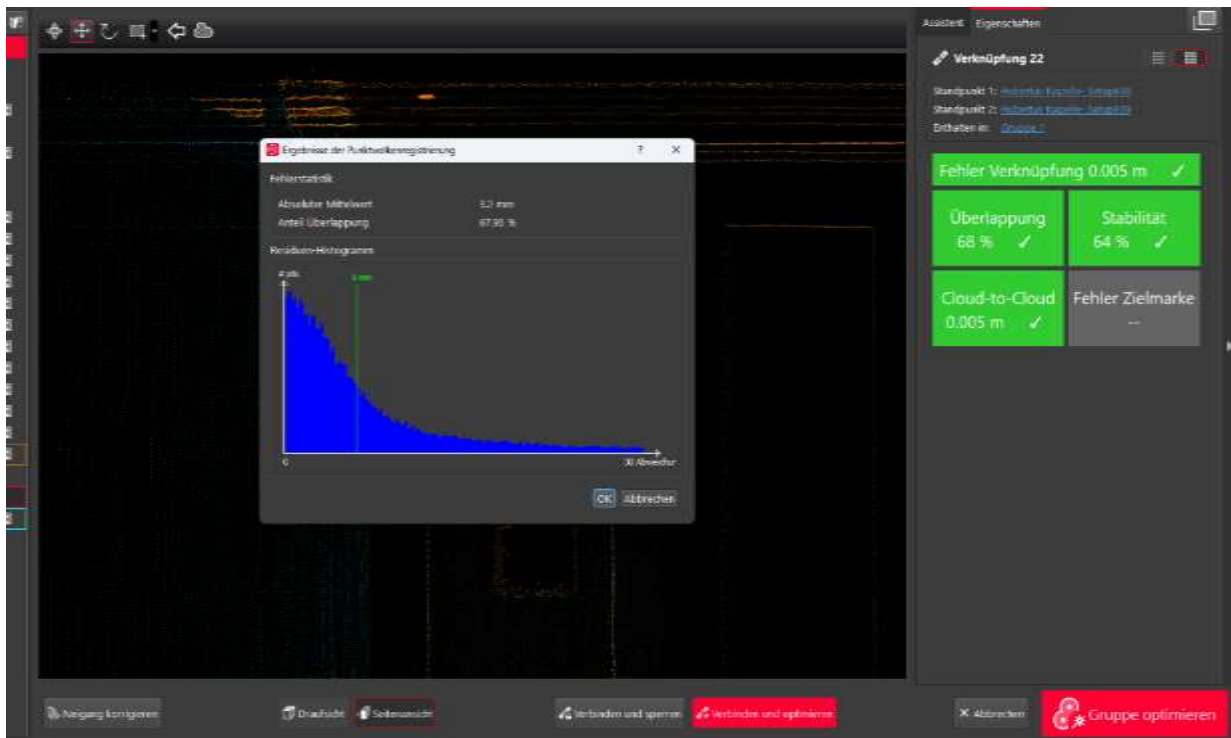
Εικόνα 36. Δύο νέφη σημείων με διαφορετικό χρωματισμό μετά την επιλογή *Visual Alignment* (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register).



Εικόνα 37. Διαδικασία οριζόντιας ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)



Εικόνα 38. Διαδικασία κάθετης ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)



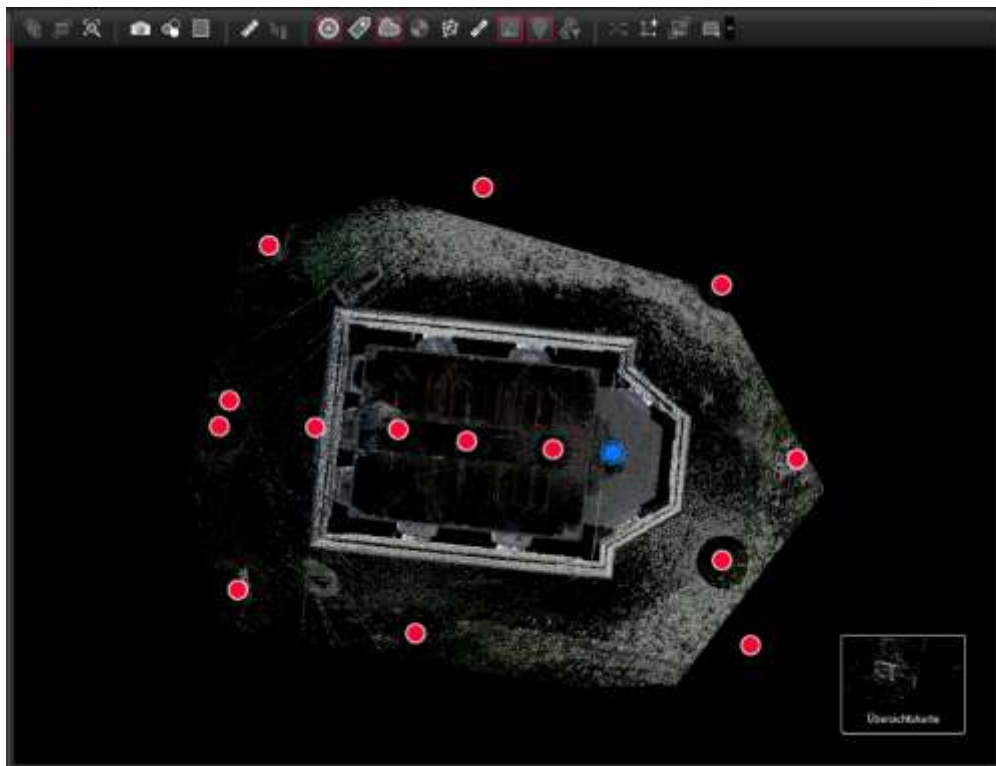
Εικόνα 39. Οι τιμές του μέσου απόλυτου σφάλματος και του σφάλματος σύνδεσης, ώστε να γίνει αποδεκτή η συνένωση. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)

Στην συνέχεια, αφού όλα τα σημεία σάρωσης έχουν ενωθεί σε ένα ενιαίο νέφος σημείων γίνεται η βελτιστοποίηση της συνολικής ευθυγράμμισης του μέσω της μεθόδου δέσμης (Bundle adjustment), η οποία χρησιμοποιεί όλες τις συνδέσεις μεταξύ των νεφών για τον ταυτόχρονο υπολογισμό των μετασχηματισμών (rotation και translation), κατανέμει τα σφάλματα σε ολόκληρο το μοντέλο και ελαχιστοποιεί το συνολικό σφάλμα (global RMS / Globaler Fehler). (<https://rcdocs.leica-geosystems.com/cyclone-register-360/latest/optimize>)

4.1.1 Γεωαναφορά νέφους σημείων

Μετά την ευθυγράμμιση όλων των νεφών σημείων, είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα με Iterative Closest Point, δημιουργήθηκε ένα νέφος σημείων για ολόκληρη την εκκλησία (Εικόνα 40). Το νέφος αυτό όμως συνεχίζει να είναι σε έναν τοπικό σύστημα συντεταγμένων, αυτό του σαρωτή. Για να ενταχθεί στο τοπικό σύστημα (ETRS'89), είναι απαραίτητη η γεωαναφορά του. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση χαρακτηριστικών στόχων των οποίων είναι γνωστές οι συντεταγμένες. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3 κατά την σάρωση στο πεδίο, έξι κυκλικοί ασπρόμαυροι στόχοι τοποθετήθηκαν πάνω σε σημεία τα οποία μετρήθηκαν ταχυμετρικά. Το Cyclone Register έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει

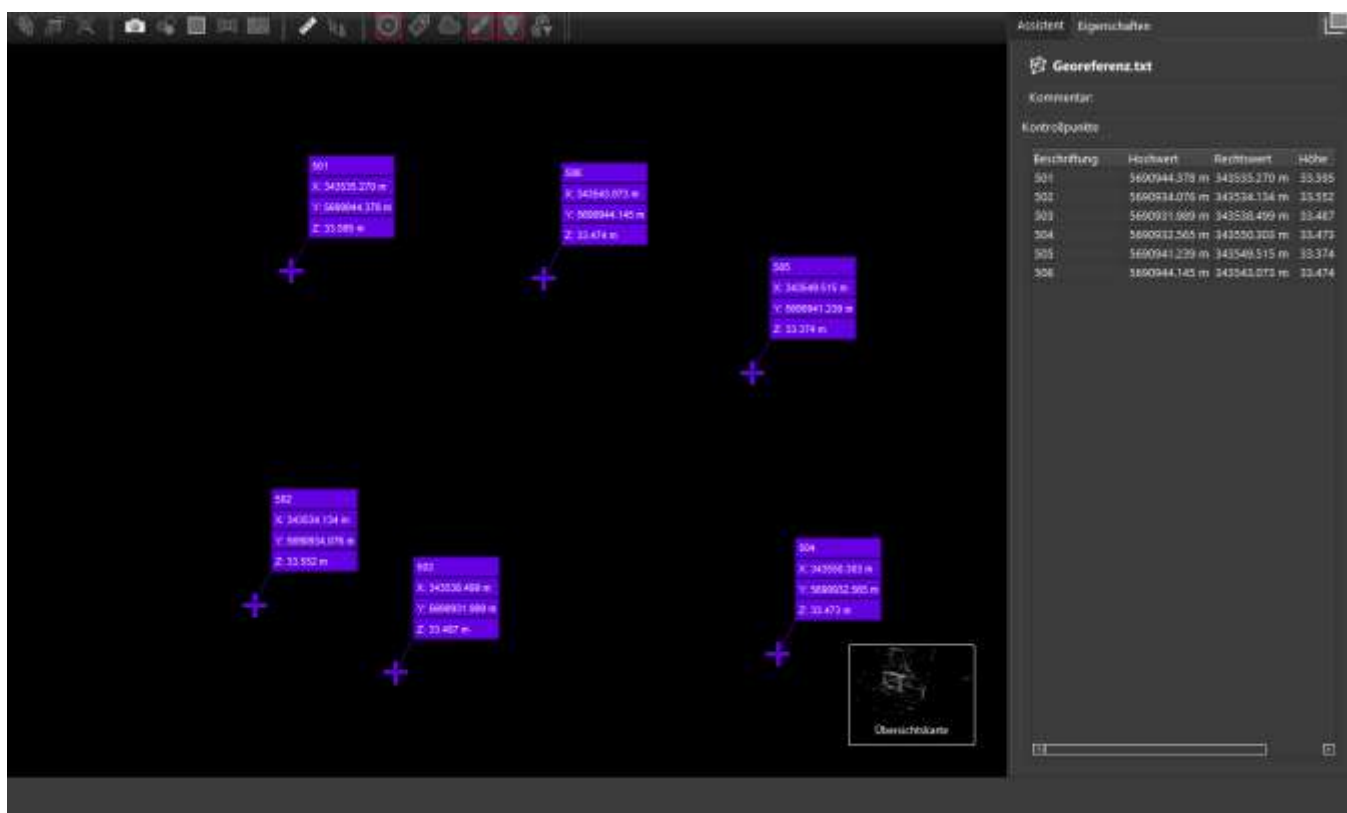
αυτόματα τους στόχους κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Παρόλα αυτά, προτιμήθηκε η επιλογή των στόχων να γίνει χειροκίνητα για τον καλύτερο προσδιορισμό του κέντρου τους, καθώς το μέγεθος τους ήταν αρκετά μικρό. Επιπλέον το πρόγραμμα αποδίδει στους στόχους μια δική του αρίθμηση που δεν αντιστοιχεί σε αυτή των σημείων συντεταγμένων.



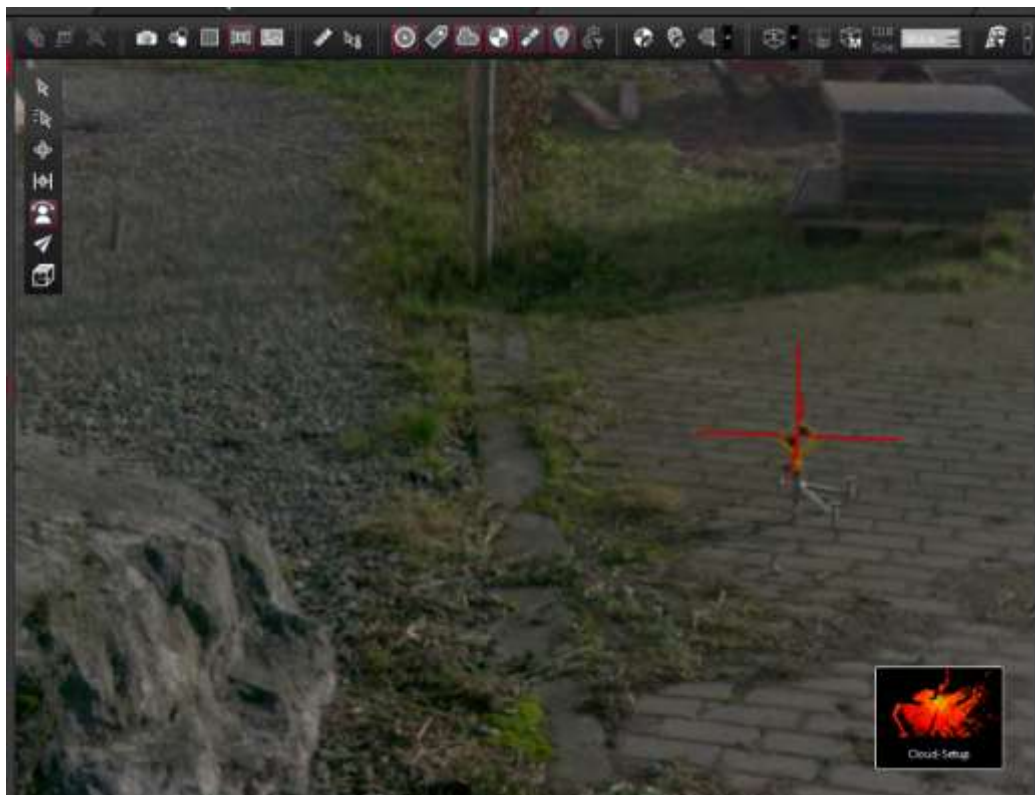
Εικόνα 40. Το νέφος σημείων ολοκληρωμένο με τα σημεία των στάσεων του σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)

Ως πρώτο βήμα, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των έξι γνωστών σημείων συντεταγμένων μέσω απλού αρχείου κειμένου ως σημεία ελέγχου, ενώ το λογισμικό αναγνώρισε και απεικόνισε αυτόματα τόσο τις θέσεις όσο και την αρίθμηση τους. (Εικόνα 41). Στη συνέχεια έγινε η αναγνώριση των στόχων στις φωτογραφίες, όπου επιλέχθηκε το κέντρο του στόχου και έγινε η αντιστοίχιση τους με τα σημεία, αλλάζοντας την αρίθμηση του λογισμικού με την αντίστοιχη αρίθμηση του γνωστού σημείου (Εικόνα 42 και 43). Από τους έξι συνολικά στόχους μπορέσαν να αναγνωριστούν οι τέσσερις, κάτι που είναι αποδεκτό για την ακρίβεια της διαδικασίας μιας και είναι περισσότεροι από τρεις και η κατανομή τους στο χώρο είναι ικανοποιητική (Εικόνα 44). Για του υπόλοιπους δύο, δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστεί με ακρίβεια το κέντρο τους, λόγω του μικρού τους μεγέθους και της απόστασης από τον σαρωτή, και προτιμήθηκε να μην χρησιμοποιηθούν καθώς θα επηρέαζαν αρνητικά το αποτέλεσμα.

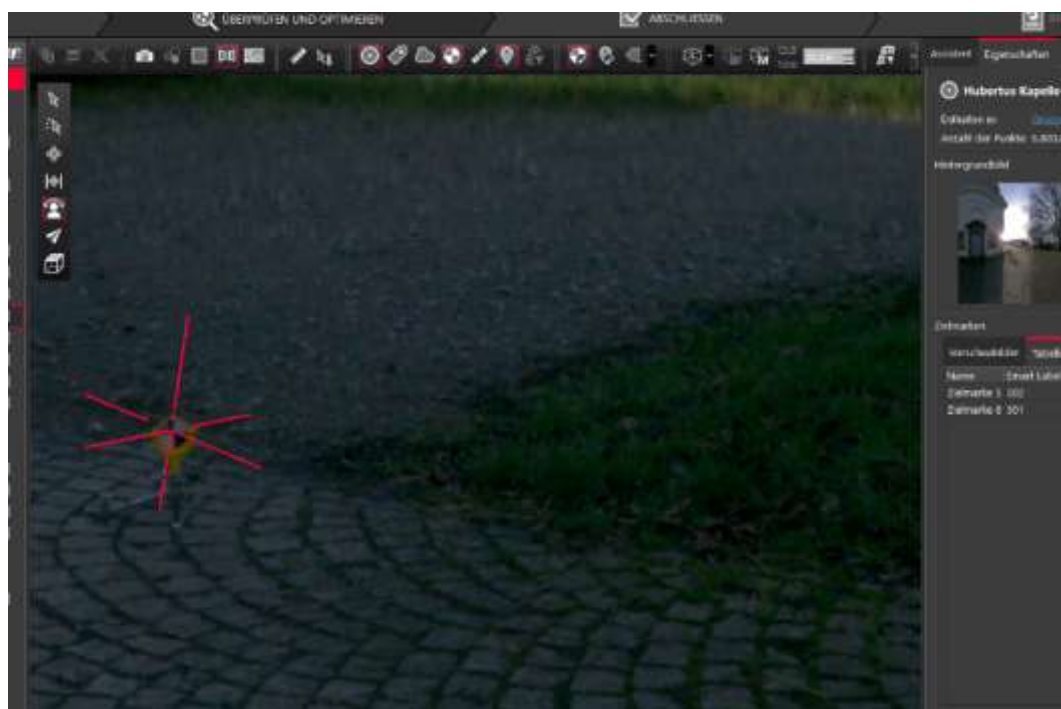
Αφού έγινε η ταύτιση των σημείων με τους στόχους έγινε η επιλογή από το πρόγραμμα της εντολής *Kontrolle anwenden*, δηλαδή εφαρμογή σημείων ελέγχου, με την οποία έγινε η γεωαναφορά του μοντέλου. Αυτό επιτευχθεί με την χρήση της Rigid Transformation, (Horn,1987) με την περιστροφή και μετάθεση του αρχικού νέφους σημείων σε σχέση με τα σημεία ελέγχου. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργήθηκαν ενώσεις ανάμεσα στα σημεία στάσεων του σαρωτή με τα σημεία συντεταγμένων. Οι συνενώσεις μεταξύ των νεφών σημείων «κλείδωσαν» και πλέον είναι αδύνατη η οποιαδήποτε χειροκίνητη μεταφορά ενός σημείου σάρωσης, ενώ υπολογίστηκε και το μέσο απόλυτο σφάλμα του συνολικού, γεωαναφερμένου πλέον μοντέλου (Absoluter mittlerer Fehler / Mean Absolute Error (MAE)) που ανέρχεται στα 0.006 m (Παράρτημα Β') (<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>). Ως τελευταίο βήμα ακολούθησε ο καθαρισμός του θορύβου του νέφους ώστε να αφαιρεθούν περιττές πληροφορίες που θα δυσχέραιναν την επεξεργασία του και θα αυξάναν το μέγεθος του.



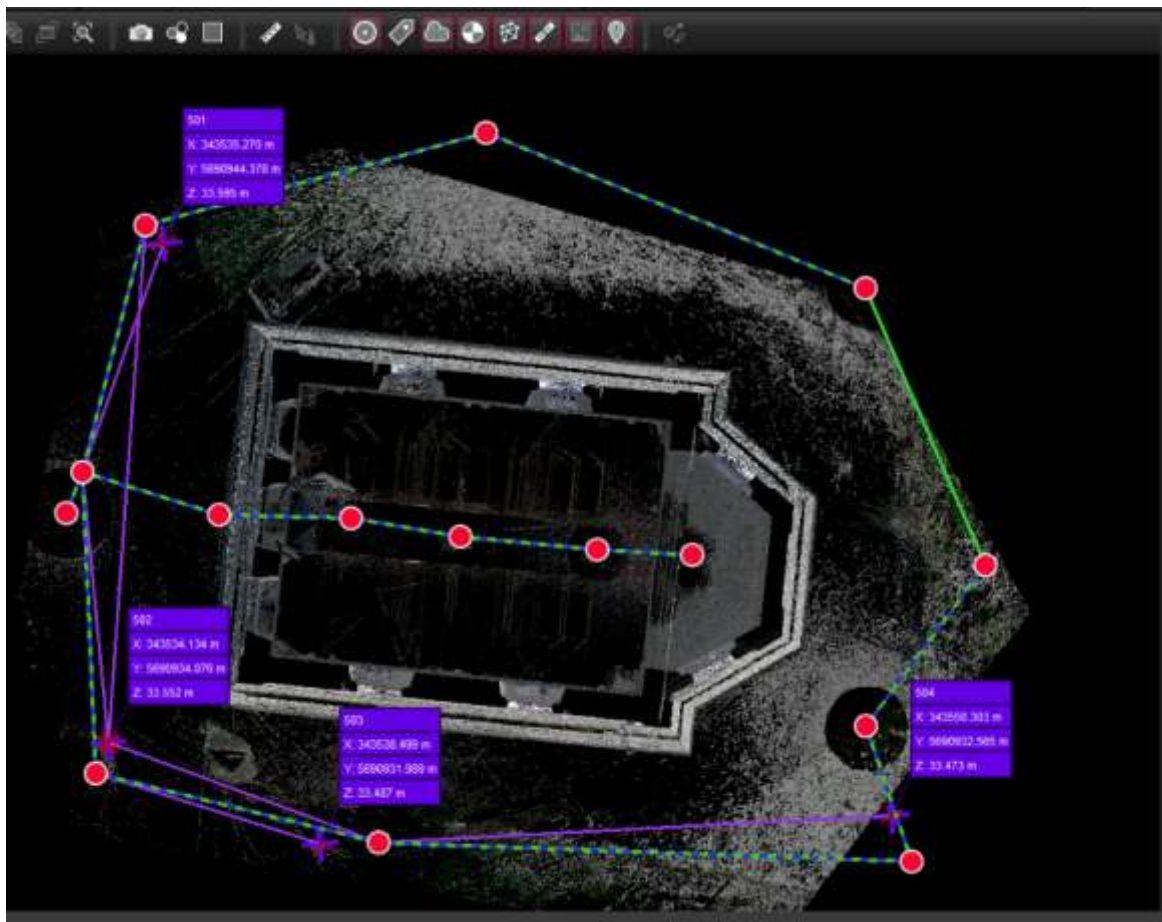
Εικόνα 41. Τα σταθερά σημεία και οι συντεταγμένες τους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)



Εικόνα 42.Αναγνώριση και προσδιορισμός στόχου στο πρόγραμμα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)



Εικόνα 43.Αναγνώριση και προσδιορισμός στόχου στο πρόγραμμα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)



Εικόνα 44. Το γεωαναφερμένο μοντέλο με τα σταθερά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cyclone Register)

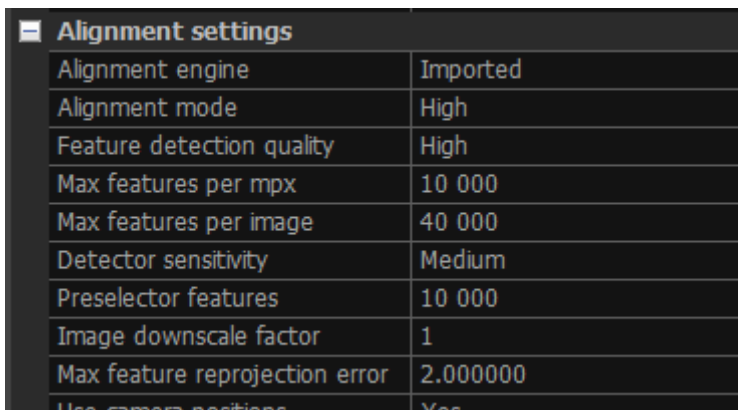
4.2 Επεξεργασία δεδομένων φωτογραμμετρίας

Η επεξεργασία των φωτογραμμετρικών δεδομένων καθώς και η παραγωγή των τελικών τρισδιάστατων μοντέλων της εκκλησίας πραγματοποιήθηκε στο ελεύθερο πρόγραμμα Reality Scan. Η διαδικασία ευθυγράμμισης (Alignment) των εικόνων στο πρόγραμμα βασίζεται στη φωτογραμμετρική μέθοδο *Structure from Motion (SfM)*. Αν και δεν υπάρχει επίσημη αναφορά από την εταιρία ή το λογισμικό, βιβλιογραφικές αναφορές παρουσιάζουν την δομή του Reality Scan σαν *Incremental SfM* (Bianco, Ciocca, Marelli, 2018). Αρχικά, σε κάθε εικόνα πραγματοποιείται ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων, όπως γωνίες και υφές, με αλγορίθμους τύπου SIFT (Lowe, 2004), οι οποίοι είναι ανθεκτικοί σε μεταβολές κλίμακας, περιστροφής και φωτισμού. Στη συνέχεια, τα χαρακτηριστικά αυτά αντιστοιχίζονται μεταξύ ζευγών εικόνων μέσω διαδικασιών όπως ο αλγόριθμος Nearest Neighbour (Arya, et al., 1998) δημιουργώντας ένα σύνολο πιθανών αντιστοιχιών που συνδέουν κοινά σημεία της σκηνής. Επειδή δεν είναι όλες οι αντιστοιχίσεις αξιόπιστες,

εφαρμόζονται γεωμετρικοί περιορισμοί όπως ο RANSAC (Fischler & Bolles, 1981) για την απόρριψη λανθασμένων αντιστοιχίσεων. Ακολούθως, υλοποιείται ο αρχικός προσανατολισμός μέσω *Incremental SfM*, όπου το σύστημα ξεκινά από ένα κατάλληλο ζεύγος εικόνων και προσθέτει σταδιακά νέες λήψεις, υπολογίζοντας επαναληπτικά τις θέσεις και τους προσανατολισμούς των καμερών (Hartley & Zisserman, 2004). Η διαδικασία αυτή βελτιστοποιείται περαιτέρω με την μέθοδο δέσμης, μιας μεθόδου βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί το σφάλμα επαναπροβολής, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονη προσαρμογή των παραμέτρων των καμερών και των τρισδιάστατων σημείων (Triggs, McLauchlan, Hartley & Fitzgibbon, 2000). Το τελικό αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης είναι η δημιουργία ενός αραιού νέφους σημείων, το οποίο αποτελεί τη βάση για τα επόμενα στάδια πυκνής ανακατασκευής και παραγωγής τρισδιάστατου μοντέλου.

4.2.1 Ευθυγράμμιση εναέριων φωτογραφιών

Σαν πρώτη ενέργεια έγινε η εισαγωγή στο πρόγραμμα των εναέριων φωτογραφιών που προήλθαν από το Drone. Συνολικά λήφθηκαν 395 φωτογραφίες από διαφορετικά ύψη, θέσεις και γωνίες (Εικόνα 46). Επειδή ο κώδικας του προγράμματος δεν είναι ανοιχτός δεν είναι γνωστές οι ακριβείς διαδικασίες, η ευθυγράμμιση όμως των φωτογραφιών επιτυγχάνεται με ανίχνευση και ταύτιση χαρακτηριστικών με αυτόματες διαδικασίες χωρίς την συμβολή του χρήστη απαραίτητα. Το πρόγραμμα ευθυγράμμισε και τις 395 εικόνες με την επιλογή *Align Images* σε ένα μόνο Component που σαν πρώτη ένδειξη δείχνει ότι η γεωμετρία και η επικάλυψη των εικόνων είναι ικανοποιητική. Σε αντίθετη περίπτωση δημιουργούνται περισσότερα του ενός αραιά νέφη σημείων και είναι απαραίτητο να βρεθούν από τον χρήστη ομόλογα σημεία (control points) μεταξύ των δύο νεφών ώστε να γίνει με επιτυχία η ευθυγράμμιση. Στο Reality Scan προσφέρονται μια σειρά ρυθμίσεων για καλύτερη ευθυγράμμιση όπως την *Ποιότητα ανίχνευσης χαρακτηριστικών* (*Feature detection quality*), για το επίπεδο της ποιότητας που



Alignment settings	
Alignment engine	Imported
Alignment mode	High
Feature detection quality	High
Max features per mpx	10 000
Max features per image	40 000
Detector sensitivity	Medium
Preselector features	10 000
Image downscale factor	1
Max feature reprojection error	2.000000
Use camera positions	Yes

Εικόνα 45. Οι ρυθμίσεις ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

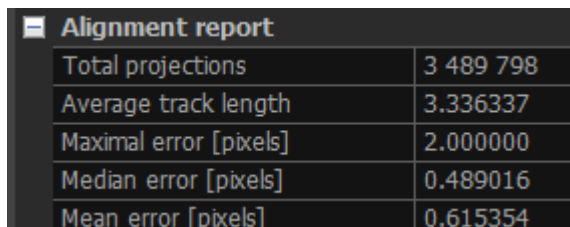
επιλέχθηκε το *υψηλό (High)*, *Μέγιστος αριθμός χαρακτηριστικών ανά MPx (Max features per mpx)* και *Μέγιστος αριθμός χαρακτηριστικών ανά εικόνα (Max features per image)* τα οποία παρέμειναν στις τιμές που δίνονται από το πρόγραμμα, ο *Συντελεστής υποδειγματοληψίας εικόνας (Image downscale factor)* που ορίστηκε στη μονάδα για την πλήρη ανάλυση της εικόνας, και το *Μέγιστο σφάλμα επαναπροβολής χαρακτηριστικών (Max feature reprojection error)* το οποίο έμεινε και αυτό όπως προτείνεται (Εικόνα 45). (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/appbasics/alignsettings.htm>)



Εικόνα 46. Το αραιό νέφος σημείων από τις αεροφωτογραφίες με τις θέσεις και τον προσανατολισμό των καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Οι τιμές που προκύπτουν από την διαδικασία ευθυγράμμισης παρουσιάζονται στην αναφορά της (*Alignment report*) και περιέχουν ενδείξεις για την ποιότητα της όπως τις *Συνολικές προβολές (Total projections)* που δείχνουν πόσες φορές τα 3D σημεία εμφανίζονται στις εικόνες, το *Μέγιστο σφάλμα (Maximal error - pixels)*, το μεγαλύτερο σφάλμα προβολής ενός σημείου, το *Διάμεσο σφάλμα (Median error - pixels)* όλων των σημείων, με τις μικρότερες τιμές να είναι οι ακριβέστερες και ιδανικά κάτω από 0.5px. και τέλος το *Μέσο σφάλμα (Mean error - pixels)*, ιδανικά κάτω από 0.5px. Όπως φαίνεται από

την Εικόνα 47, η ευθυγράμμιση των εναέριων φωτογραφιών είναι καλής ποιότητας σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές του προγράμματος (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/alignquality.htm>). Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι οι εικόνες από το Drone περιέχουν ενσωματωμένες γεωχωρικές πληροφορίες λόγω του ενσωματωμένου GNSS, που οδήγησαν στην αυτόματη γεωαναφορά τους. Με την ολοκλήρωση της ευθυγράμμισης και τον γενικό έλεγχο της ποιότητας της, το νέφος σημείων αποθηκεύτηκε σαν αρχείο *.rsaling* του προγράμματος ώστε να συνωθεί αργότερα με αυτό των επίγειων φωτογραφιών.

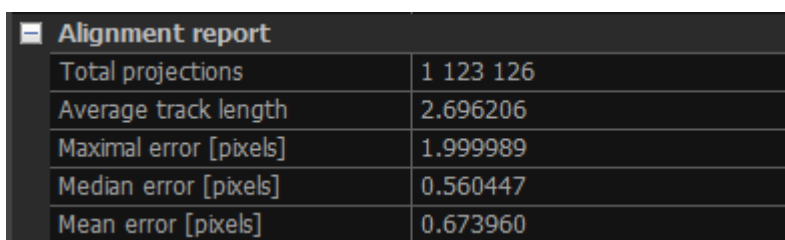


Alignment report	
Total projections	3 489 798
Average track length	3.336337
Maximal error [pixels]	2.000000
Median error [pixels]	0.489016
Mean error [pixels]	0.615354

Εικόνα 47. Αναφορά της ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.2.2 Ευθυγράμμιση επίγειων φωτογραφιών

Αφού δημιουργήθηκε και αποθηκεύτηκε το νέφος σημείων των εναέριων εικόνων, με την μέθοδο *Drag and Drop* εισήχθησαν στο πρόγραμμα και οι επίγειες φωτογραφίες. Σε αυτή την περίπτωση οι εικόνες χωρίστηκαν σε εσωτερικές και εξωτερικές και επεξεργάστηκαν ξεχωριστά. Ο αριθμός των εξωτερικών εικόνων ανήλθε σε 179, από όλες τις πλευρές και διαφορετικές αποστάσεις (Εικόνα 49), οι οποίες κατά την διαδικασία ευθυγράμμισης τους από το πρόγραμμα, δημιούργησαν ένα ενιαίο Component χωρίς να ζητηθεί η χρήση κοινών σημείων, γεγονός που δείχνει αρχικά μια καλή επικάλυψη μεταξύ των εικόνων, που επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του *Alignment report*, ενώ οι ρυθμίσεις της ευθυγράμμισης ορίστηκαν όπως αυτές των εναέριων εικόνων (Εικόνα 48). Στην περίπτωση αυτή η δημιουργία κοινού μοντέλου δεν αποτέλεσε στόχο μιας και θα χρειαζόταν πολύ μεγάλος αριθμός εικόνων εσωτερικά για την συνένωση των

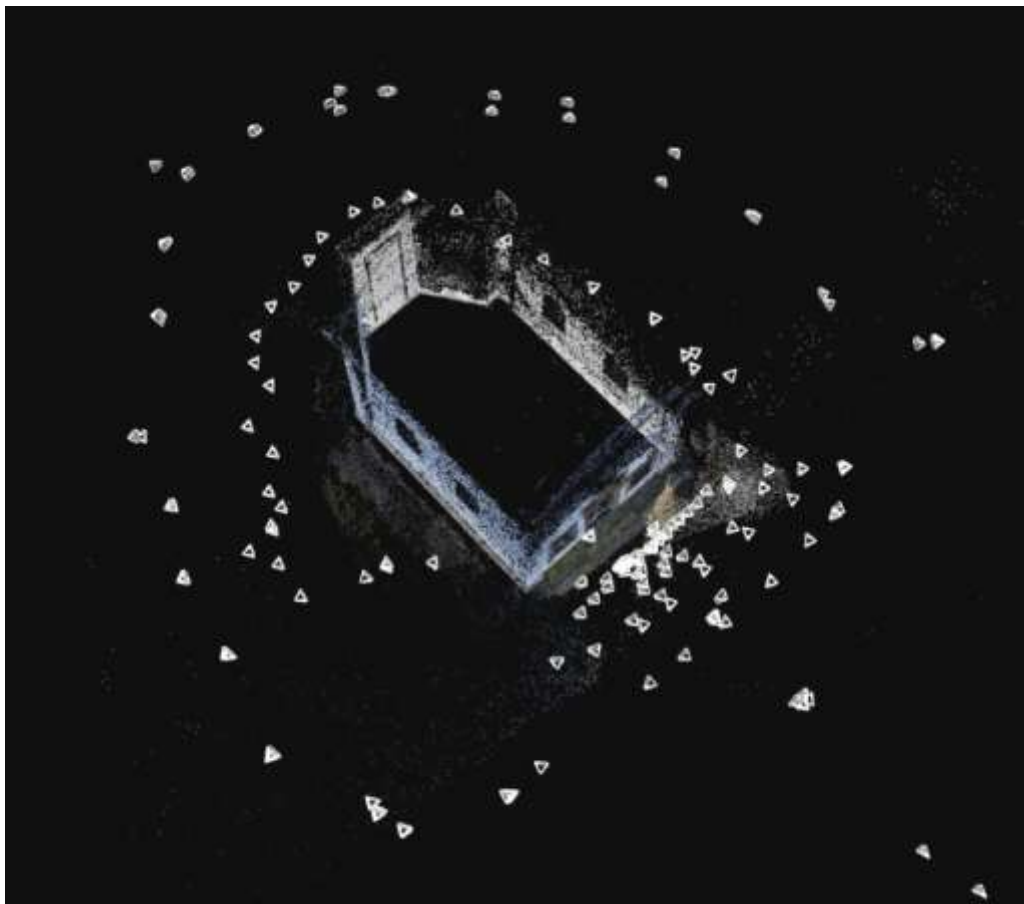


Alignment report	
Total projections	1 123 126
Average track length	2.696206
Maximal error [pixels]	1.999989
Median error [pixels]	0.560447
Mean error [pixels]	0.673960

Εικόνα 48. Αναφορά της ευθυγράμμισης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

φωτογραφιών. Οι 49 εσωτερικές εικόνες λήφθηκαν με το σκεπτικό της οπτικής ενίσχυσης αργότερα των δεδομένων σαρωτή από το εσωτερικό του ναού, για αυτό τον λόγο έγινε ευθυγράμμιση μόνο με αυτές. Όπως και στις άλλες περιπτώσεις, με την επιλογή *Align Images* η αυτόματη ευθυγράμμιση προχώρησε στην κατασκευή ενός μόνο Component, η

ποιότητα του οποίου αν και στα αποδεκτά όρια, υπολείπεται τόσο των εναέριων όσο και εξωτερικών επίγειων φωτογραφιών. Μετά την επιτυχή ευθυγράμμιση, και τα δυο μοντέλα αποθηκεύτηκαν σαν ξεχωριστά νέφη σημείων για μετέπειτα επεξεργασία.



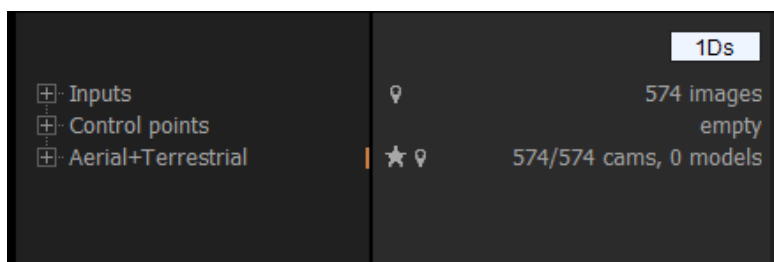
Εικόνα 49. Το αραιό νέφος σημείων των επίγειων φωτογραφιών με τις θέσεις και τον προσανατολισμό των καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.2.3 Συνένωση Components (Merging Components)

Ένα Component αποτελεί μια ομάδα εικόνων που έχουν ευθυγραμμιστεί μεταξύ τους. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ενδέχεται να προκύψουν περισσότερα από ένα Components. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η επικάλυψη μεταξύ των εικόνων είναι μικρή, όταν ο αριθμός των εικόνων δεν είναι επαρκής, όταν η υφή του αντικειμένου είναι φτωχή ή όταν η αλλαγή της οπτικής γωνίας είναι μεγάλη με αποτέλεσμα το λογισμικό να μην μπορεί να πραγματοποιήσει την αυτόματη ευθυγράμμιση των εικόνων. Το πρόγραμμα προσφέρει διάφορες επιλογές συνένωσης των νεφών σημείων όπως με τα *Σημεία ελέγχου (Control Points)*, με την *Επαναληπτική εκτέλεση Ευθυγράμμισης (Run Alignment again)* ή με *Προσθήκη επιπλέον εικόνων (Adding More Images)*. Στην περίπτωση των δύο έτοιμων αρχείων των εναέριων και επίγειων εικόνων που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα

βήματα, επιλέχθηκε η συνένωσή τους να γίνει με την επιλογή *Merge Components*, η οποία συγχωνεύει υπάρχοντα νέφη χωρίς να προσθέτει νέες εικόνες (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/mergecomponents.htm>).

Μετά την εισαγωγή των δύο Components και την επιλογή της εντολής, ακολούθησε η αυτόματη συνένωση τους. Από τις συνολικά 574 φωτογραφίες (179 επίγειες και 395 εναέριας), το Reality Scan δημιούργησε ένα ενιαίο αραιό νέφος σημείων ευθυγραμμίζοντας και τις 574 μεταξύ τους (Εικόνα 51). Το 574/574 με όλες τις εικόνες να εντάσσονται στο μοντέλο είναι ικανοποιητικό με την χρήση ομόλογων σημείων να μην είναι απαραίτητη, όπως ικανοποιητικές είναι και οι τιμές του *Alignment Report*

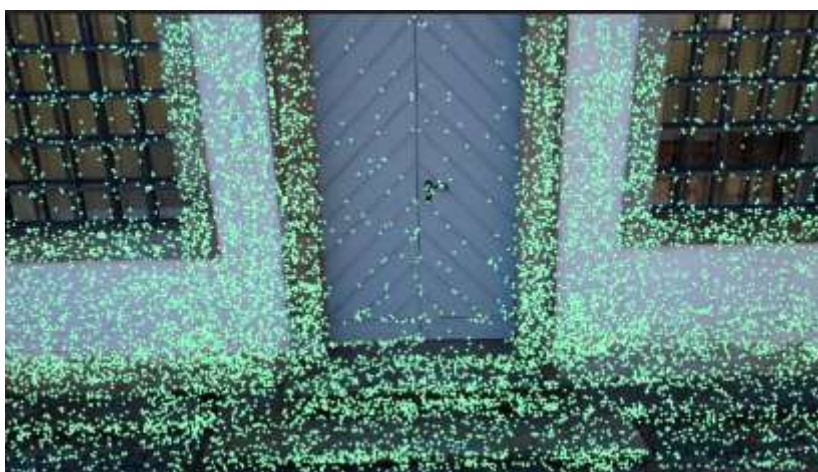


Εικόνα 51. Επίγειες και εναέριας εικόνες σε ένα μοντέλο. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

(Εικόνα 50). Η Εικόνα 52 δείχνει στη 2D φωτογραφία τα σημεία σύνδεσης (*tie points*) μεταξύ των εικόνων, ενώ οι Εικόνες 53 και 54 παρουσιάζουν το ενωμένο πλέον νέφος σημείων καθώς και τις θέσεις των καμερών κατά την διαδικασία της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης. Το ενιαίο πλέον αραιό νέφος σημείων είναι η βάση για την κατασκευή του τρισδιάστατου φωτογραμμετρικού μοντέλου καθώς και αυτό που θα συνενωθεί με τον νέφος σημείων του σαρωτή.

Alignment report	
Total projections	4 459 137
Average track length	3.158228
Maximal error [pixels]	1.999975
Median error [pixels]	0.509011
Mean error [pixels]	0.632066

Εικόνα 50. Αναφορά ευθυγράμμισης επίγειων και εναέριων εικόνων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 52. Πλήθος ομόλογων σημείων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 53. Το αραιό νέφος σημείων από εναέριες και επίγειες εικόνες. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 54. Οι θέσεις επίγειων και εναέριων καμερών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.2.4 Έλεγχος ποιότητας αραιού νέφους σημείου

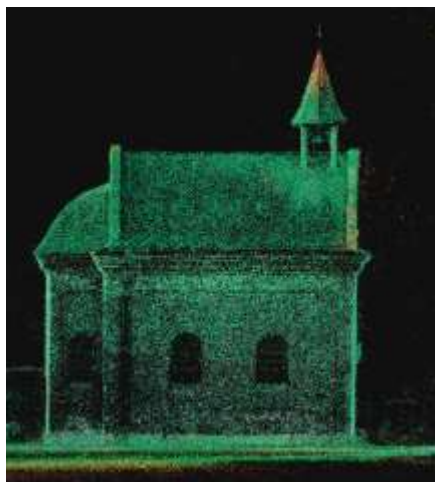
Στο Reality Scan δεν προσφέρεται η δυνατότητα υπολογισμού του σφάλματος RMS (Root Mean Square Error) για τον έλεγχο ποιότητας του αραιού νέφους σημείων. Παρ' όλα αυτά ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποιες άλλες ενδείξεις εκτός αυτών του *Alignment Report*, όπως είναι η επιλογή *Tie Points Quality* (Ποιότητα ομόλογων σημείων), κατά την οποία υπολογίζεται η ποιότητα των κοινών χαρακτηριστικών σημείων στο νέφος και αξιολογείται η κάλυψη των καμερών για αυτά. Το εύρος της χρωματικής αξιολόγησης ξεκινάει από κόκκινο (κακή ποιότητα) και καταλήγει στο πράσινο όταν η ποιότητα είναι καλή. Εξαιρουμένων κάποιων θέσεων στο ανώτερο επίπεδο της πρόσοψης και του καμπαναριού, η ακρίβεια του μοντέλου με βάση τον χρωματισμό του φαίνεται επαρκής (Εικόνα 55) (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/qualityanalysis.htm>).



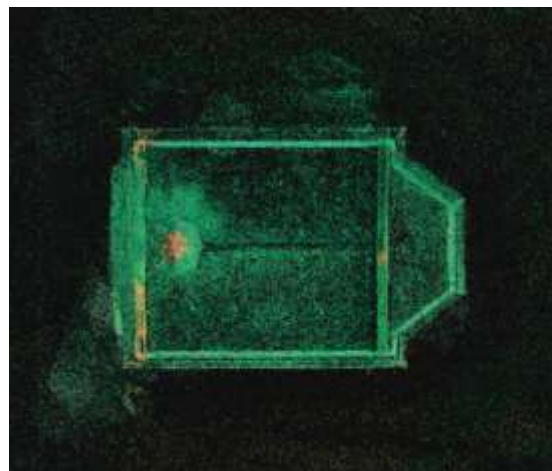
α)



β)



γ)



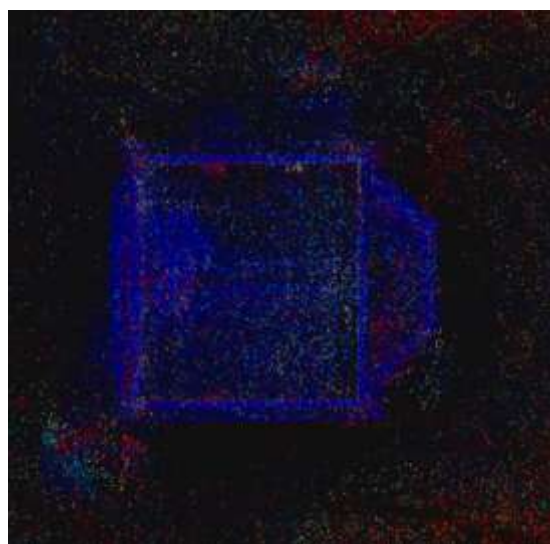
δ)

Εικόνα 55. Αξιολόγηση *Tie Points* α) Πρόσοψη β) Νότια πλευρά γ) Βόρεια πλευρά δ) κάτοψη. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Για περαιτέρω ανάλυση της ποιότητας υπάρχουν οι επιλογές *Point Cloud Uncertainty* (Αβεβαιότητα νέφους σημείων) και *Misalignment Detection* (Ανίχνευση κακής ευθυγράμμισης). Στην *Point Cloud Uncertainty* αναλύεται η ακρίβεια των σημείων σύνδεσης. Καθώς το νέφος σημείων δεν είναι γεωαναφερμένο επιλέχθηκε η *Σχετική (Relative) μέθοδος*. Η τιμή *Reference uncertainty region percentile* (Ποσοστό περιοχής αναφοράς αβεβαιότητας), είναι προκαθορισμένη στο 70% που δηλώνει ότι αυτό το ποσοστό των *Tie Points* θεωρείται αξιόπιστο και με βάση αυτό γίνεται η αξιολόγηση των υπολοίπων. Η χρωματική παλέτα ορίστηκε στα τρία χρώματα με το μπλε να δηλώνει υψηλή ακρίβεια και το κόκκινο χαμηλή (Εικόνα 56).



α)



β)



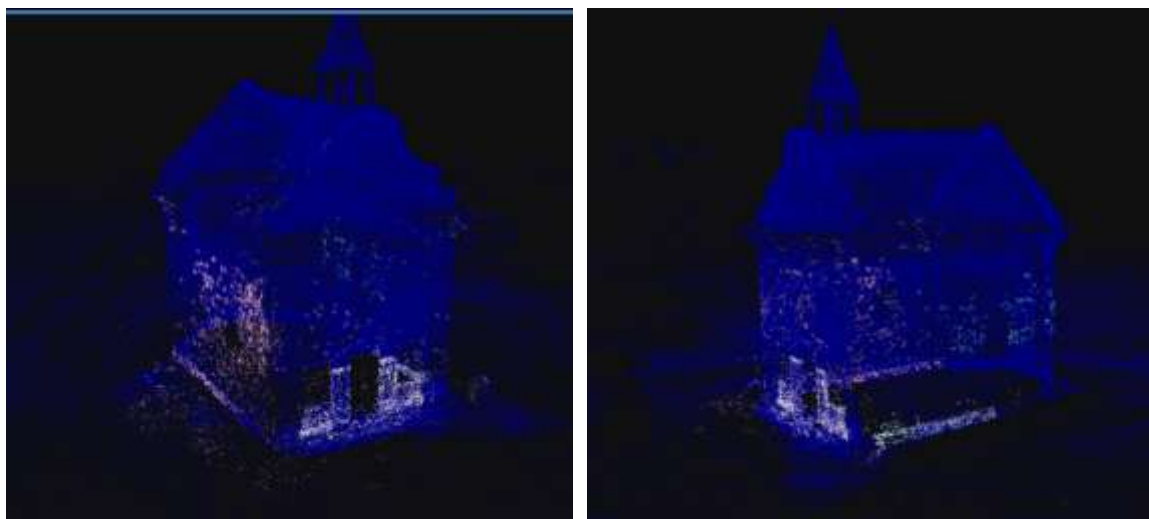
γ)



δ)

Εικόνα 56. Αξιολόγηση νέφους σημείων μέσω *Point Cloud Uncertainty* α) Πρόσοψη β) Κάτοψη γ) Νότια πλευρά δ) Βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία *Reality Scan*)

Μετά την ενεργοποίηση της επιλογής *Misalignment detection* (Ανίχνευση κακής ευθυγράμμισης), τα σημεία στο αραιό νέφος σημείων εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα. Τα μπλε σημεία αντιπροσωπεύουν τα σωστά ευθυγραμμισμένα δεδομένα, ενώ τα κόκκινα ή άλλα χρώματα πέραν του μπλε υποδηλώνουν σημεία που έχουν χαρακτηριστεί από το λογισμικό ως λανθασμένα ευθυγραμμισμένα. Στις περιοχές εμφάνισης των σημείων, είτε η επικάλυψη των εικόνων δεν είναι επαρκής, είτε η γεωμετρική πληροφορία. Για τα πεδία *Misaligned points threshold* (Κατώφλι λανθασμένων σημείων) και *Misaligned camera pairs threshold* (Κατώφλι ζευγών καμερών με κακή ευθυγράμμιση) επιλέχθηκε η τιμή 70% που προτείνεται από το πρόγραμμα και αντιπροσωπεύει το κατώφλι ευαισθησίας, ενώ για την *Misalignment detector sensitivity* (Ευαισθησία ανιχνευτή κακής ευθυγράμμισης) παρέμεινε η επιλογή *Medium* (Εικόνα 57). (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/inspection.htm>)

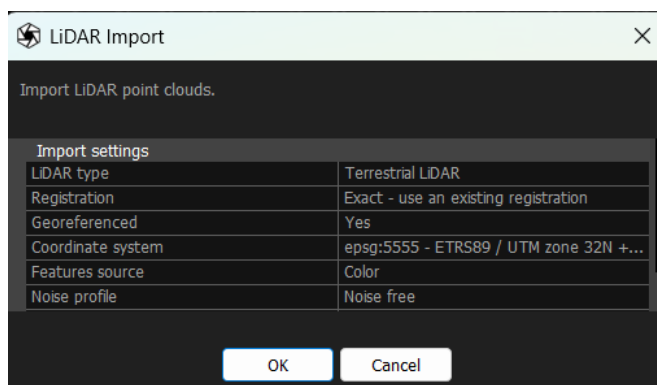


Εικόνα 57. Τα σημεία που το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ως λανθασμένα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.3 Εισαγωγή δεδομένων σαρωτή στο Reality Scan

Για να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο με συνδυασμό δεδομένων σαρωτή και φωτογραμμετρίας, έγινε η εισαγωγή του νέφους σημείων του σαρωτή στο Reality Scan. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει και επεξεργάζεται αρχεία *.ptx*, *.ply* και *.e57*, που όπως έχει αναφερθεί, αποτελεί και τη μορφή του αρχείου της άσκησης. Όταν εισάγεται το αρχείο εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο γίνεται η επιλογή των απαραίτητων ρυθμίσεων. Στο τύπο του σαρωτή επιλέχθηκε το *Terrestrial LiDAR*, για το *Registration* έγινε η επιλογή

Exact που δηλώνει ότι το νέφος εισάγεται ήδη ευθυγραμμισμένο από άλλο πρόγραμμα, ενώ στο πεδίο *Georeferenced* επιλέχθηκε το *Yes*, καθώς είναι γεωαναφερμένο και σαν *Coordinate System* το *epsg:5555*, το οποίο είναι ένα σύνθετο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων που συνδυάζει το ETRS89/UTM32 με το



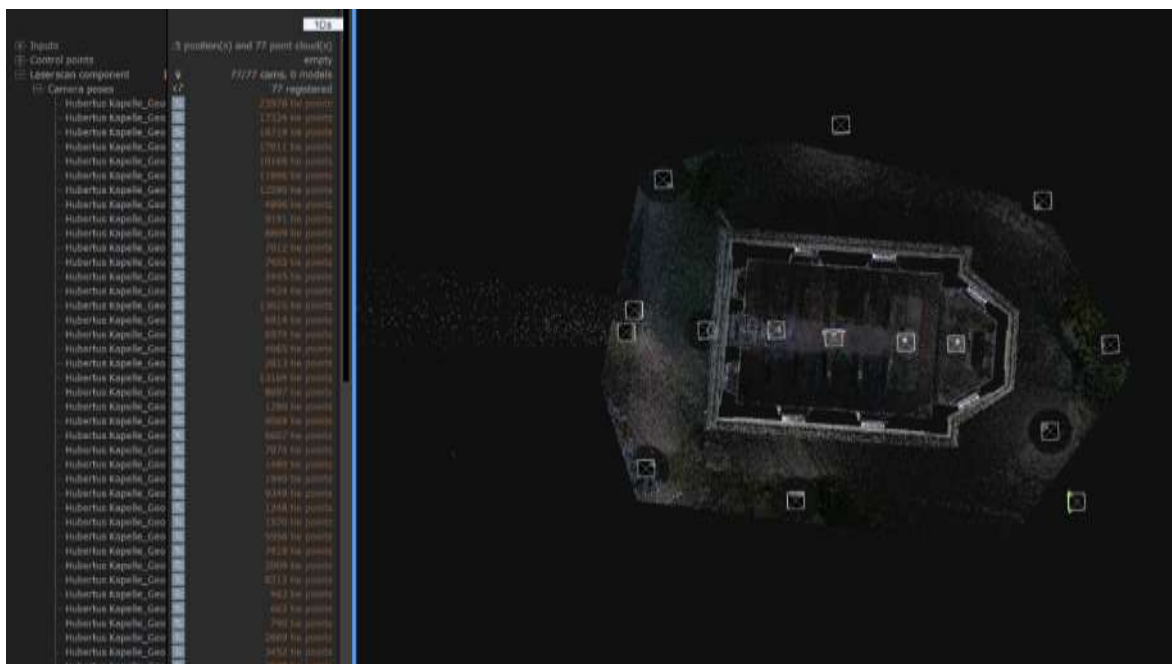
Εικόνα 58. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων LiDAR. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

κατακόρυφο σύστημα υψομέτρων DHHN92 (Deutsches Haupthöhennetz 1992/ Βασικό Γερμανικό Υψομετρικό Δίκτυο 1992) (Εικόνα 58) (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/importlaser.htm>).

Αυτό που κάνει ιδιαίτερη την διαδικασία στο Reality Scan, είναι ότι σε αντίθεση με άλλα λογισμικά φωτογραμμετρίας δεν επεξεργάζεται απευθείας τα νέφη σημείων από σαρωτές. Όταν εισαχθεί ένα τέτοιο αρχείο, το πρόγραμμα το μετατρέπει σε αρχεία *.lsp*. Τα αρχεία *.lsp* (*Laser Scanner Projection*) είναι στην ουσία αρχεία που δημιουργούνται ως εσωτερική μορφή για να μπορέσει το πρόγραμμα να τα διαχειριστεί γρηγορότερα και πιο αποτελεσματικά στο δικό του περιβάλλον και να είναι συμβατά με την διαδικασία ευθυγράμμισης. Από την μετατροπή τους και μετά τα αρχεία αντιμετωπίζονται σαν εικόνες/προβολές του νέφους και μπορούν να εισαχθούν ανεξάρτητα και να χρησιμοποιούνται κανονικά σαν εικόνες για ευθυγράμμιση, υφή, χρωματισμό (https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/importlaser_2.htm).

Παρατηρείται ότι τα αρχεία *.lsp* που προέκυψαν (σύνολο 77), είναι σαφώς περισσότερα από τις σαρώσεις (σύνολο 15). Αυτό συμβαίνει γιατί το αρχείο *.e57* μπορεί να περιέχει 3D σημεία και πολλές εικόνες από διαφορετικές θέσεις σάρωσης, Metadata (θέσεις, κλίμακα) και διάφορες άλλες πληροφορίες (Intensity, mesh). Το *Reality Scan* διαβάζει την πληροφορία σάρωσης και την χωρίζει σε εσωτερικές δομές (Εικόνα 59). (<https://webapp.atiss.cloud/support/de/article/13>)

Στο *Alignment Report* όλες οι τιμές είναι μηδενικές καθώς έχει εισαχθεί ήδη ευθυγραμμισμένο ενώ και στον έλεγχο ποιότητας μέσω *Quality Analysis* δεν προέκυψε κανένα αποτέλεσμα. Το αρχείο αποθηκεύτηκε σαν αρχείο *.rsalign* και σαν αρχείο εικόνων μπορεί πλέον αν ευθυγραμμιστεί με τα δεδομένα της φωτογραμμετρίας (Εικόνα 60).



Εικόνα 59. Το νέφος που προέκυψε από την εισαγωγή του αρχείου LiDAR με τις θέσεις στάσεων του σαρωτή (δεξιά), τα 77 .lsp αρχεία που δημιουργήθηκαν. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 60. Το ολοκληρωμένο νέφος σημείων LiDAR. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.4 Δημιουργία αρχείων πλέγματος (Mesh)

Η δημιουργία των αρχείων πλέγματος (*Mesh*) αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο το λογισμικό μετατρέπει το αραιό νέφος σημείων που προκύπτει από την φωτογραμμετρική ανασκευή, σε μια επιφάνεια από συνεχή τρίγωνα. Αρχικά, το σύστημα εκτιμά τη τοπική γεωμετρία της επιφάνειας γύρω από τα σημεία, προσδιορίζοντας τις γειτονικές σχέσεις μεταξύ τους. Στη συνέχεια εφαρμόζονται αλγόριθμοι τριγωνοποίησης, οι οποίοι συνδέουν τα σημεία μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί ένα συνεχές πλέγμα τριγώνων που αναπαριστά κατά προσέγγιση την πραγματική επιφάνεια. Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται επίσης φιλτράρισμα θορύβου και απομάκρυνση ασυνεπειών, ώστε να αποφεύγονται παραμορφώσεις στο τελικό μοντέλο. Το αποτέλεσμα είναι ένα τρισδιάστατο mesh αρχείο του μνημείου, το οποίο αποτελεί τη βάση για τα επόμενα στάδια, όπως το texturing και coloring (υφή και χρώμα) για την τελική απόδοση του μοντέλου (Levoy & Curless, 1999).

Για τις ανάγκες της άσκησης δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά mesh αρχεία, ένα για κάθε νέφος σημείων, (φωτογραμμετρία, laser scanner, συνδυασμός και των δύο) ώστε μετά την επεξεργασία τους με υφή και χρώμα, να προκύψουν τα αντίστοιχα τελικά τρισδιάστατα μοντέλα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια σε κάθε περίπτωση. Πριν την έναρξη της, τα νέφη σημείων επεξεργάστηκαν για την απαραίτητη μείωση του θορύβου, καθώς περιείχαν μεγάλο όγκο πληροφορίας που δεν χρειαζόμαστε και θα επιβάρυνε σημαντικά το μοντέλο και την όλη διαδικασία. Κυρίως στα μοντέλα που περιείχαν φωτογραμμετρικά δεδομένα, καθώς το μοντέλο από τον σαρωτή είχε ήδη μειωθεί σημαντικά πριν την εισαγωγή του στο Reality Scan. Από την εντολή *Set Reconstruction Region* δημιουργήθηκε ένα πλαίσιο μέσω του οποίου περιορίστηκε το νέφος σημείων μόνο στο σύνολο του μνημείου (Εικόνα 61) και ακολούθησε η κατασκευή του σε *Normal Detail*. Μετά την κατασκευή των αρχείων πλέγματος ακολουθεί ο καθαρισμός τους από τρίγωνα τα οποία δημιουργεί το λογισμικό κατά την διαδικασία τριγωνοποίησης αλλά δεν είναι μέρος του αντικειμένου ενδιαφέροντος. Τα περιττά αυτά τρίγωνα απομακρύνονται από το μοντέλο μέσω της εντολής *Advanced, Select Marginal Triangles* και άλλων επιλογών ώστε να μην υπάρχει υποβάθμιση στην ποιότητα και μεγαλύτερος όγκος δεδομένων (Εικόνες 62-66) (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/appbasics/reconselection.htm>). Τα παραγόμενα μοντέλα ήταν αρκετά μεγάλα με αυτό του σαρωτή να αποτελείται από 81.2 εκατομμύρια τρίγωνα και χρόνο δημιουργίας τα εννιά λεπτά. Το αρχείο φωτογραμμετρίας χρειάστηκε 48 λεπτά για 134.7 εκατομμύρια τρίγωνα ενώ το υβριδικό TLS και

φωτογραμμετρίας αποτελείται από 194. 7 εκατομμύρια τρίγωνα με χρόνο κατασκευής μία ώρα και δεκαέξι λεπτά.



α)



β)

Εικόνα 61. Μείωση του μοντέλου με την εντολή *Set Reconstruction Region*. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία *Reality Scan*)



Εικόνα 62. Αρχείο *Mesh* του σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία *Reality Scan*)



Εικόνα 63. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας, πρόσοψη και νότια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 64. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας, δυτική και βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 65. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας και σαρωτή, πρόσοψη και νότια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



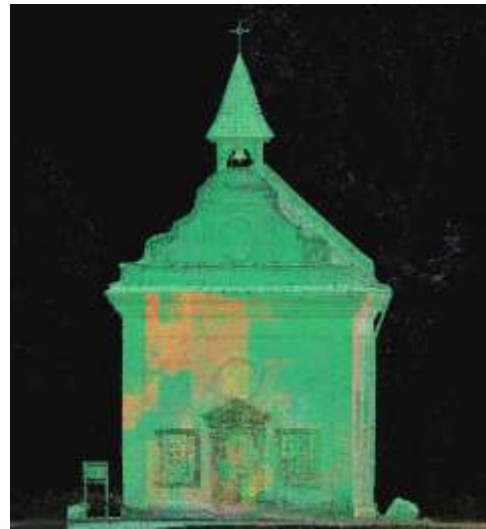
Εικόνα 66. Αρχείο Mesh φωτογραμμετρίας και σαρωτή, ανατολική και βόρεια πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

4.4.1 Έλεγχος ποιότητας αρχείων πλέγματος (Mesh)

Πριν αρχίσει η επεξεργασία των μοντέλων για απόκτηση υφής και χρώματος έγινε ο έλεγχος της ποιότητας των αρχείων πλέγματος από τις επιλογές *Quality Analysis*, *Mesh quality*. Η λειτουργία αυτή υπολογίζει την ποιότητα του αρχείου αξιολογώντας την κάλυψη των καμερών για κάθε τρίγωνο. Η ποιότητα απεικονίζεται στην 3D προβολή με χρωματική κλίμακα από πράσινο (υψηλή ποιότητα) έως κόκκινο (χαμηλή ποιότητα) (Εικόνα 67).



α)



β)



γ)



δ)

Εικόνα 67. Έλεγχος ποιότητας στο 3D αρχείο φωτογραμμετρίας και σαρωτή σε όλες τις πλευρές τους α) Ανατολική β) Δυτική γ) Βόρεια δ) Νότια. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

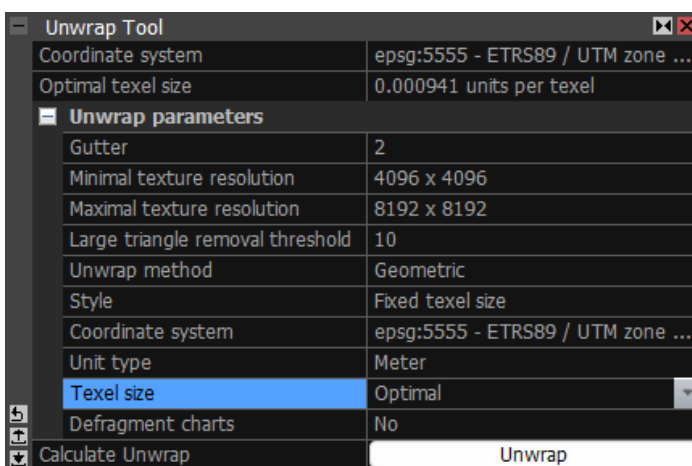
Ο έλεγχος των μοντέλων έδειξε ότι η ποιότητα τους στο μεγαλύτερο μέρος τους ήταν αποδεκτή καθώς κυριαρχούσε σχεδόν στο σύνολο των επιφανειών τους η πράσινη απόχρωση, σε ορισμένες θέσεις η πορτοκαλή, που υποδηλώνει ότι η κάλυψη των καμερών θα μπορούσε να είναι καλύτερη, ενώ σε κανένα από αυτά δεν εμφανίστηκε τμήμα της επιφάνειας με κόκκινο χρώμα. Με βάση την παραπάνω αξιολόγηση ακολούθησε η διαδικασία δημιουργίας υφής και χρωματισμού (Texturing και Coloring).

4.5 Δημιουργία Χρώματος και Υφής (Coloring and Texturing)

Η δημιουργία χρώματος και υφής είναι το τελικό βήμα για την κατασκευή του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου. Το Reality Scan προσφέρει δύο μεθόδους απόδοσης χρώματος στο μοντέλο, την επιλογή *Coloring* (χρωματισμός) και την επιλογή *Texturing* (υφή). Κατά την διαδικασία του χρωματισμού, αποκτούν χρωματική πληροφορία μόνο οι κορυφές (*Vertices*) του τρισδιάστατου μοντέλου χωρίς να δημιουργείται καμία επιπλέον γεωμετρία. Κατά την μέθοδο αυτή παράγονται μικρότερα αρχεία με περιορισμένη λεπτομέρεια. Αντίθετα, η δημιουργία υφής αποτελεί μια πιο σύνθετη διαδικασία που βασίζεται σε δύο στάδια: το *Unwrap* του μοντέλου και τον υπολογισμό των εικόνων υφής. Σε αυτή τη μέθοδο, οι επιφάνειες του μοντέλου αντιστοιχίζονται σε δισδιάστατες εικόνες, οι οποίες αποθηκεύουν λεπτομερή πληροφορία χρώματος. Το αποτέλεσμα είναι πιο ρεαλιστικό και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε σχέση με τον χρωματισμό, αλλά απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χώρο αποθήκευσης. Για τον λόγο αυτό, το *Texturing* χρησιμοποιείται όταν απαιτείται υψηλή οπτική πιστότητα του τελικού μοντέλου (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/texturing.htm>). Η δημιουργία υφής και η ποιότητά του εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι χάρτες *UV* κατά την διαδικασία του *Unwrap* και στο Reality Scan διενεργείται είτε με ρυθμίσεις που επιβάλλει ο χρήστης είτε αυτόματα (<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/unwrap.htm>).

Μετά την ολοκλήρωση των αρχείων *Mesh* και πριν την εφαρμογή των *Coloring* και *Texturing*, επιλέχθηκε χρήση του *UV Unwrapping* να γίνει σύμφωνα με τις προτάσεις του ίδιου του λογισμικού κατά τις οποίες στο πεδίο *Style* επιλέχθηκε το *Fixed Texel Size*, δηλαδή μέθοδος σταθερού μεγέθους εικονοστοιχείου, και σαν *Texel Size* η επιλογή *Optimal*, που σημαίνει ότι το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τη μέγιστη δυνατή ανάλυση που μπορούν

να αποδώσουν οι φωτογραφίες και σαν *Maximal Texture Resolution* το 8K (Capturing Reality, 2021) (Εικόνα 68). Αφού επιλέχθηκαν οι ίδιες παράμετροι σε όλα τα μοντέλα ακολούθησε η διαδικασία χρωματισμού και υφής για κάθε ένα από αυτά (σαρωτή, φωτογραμμετρίας και

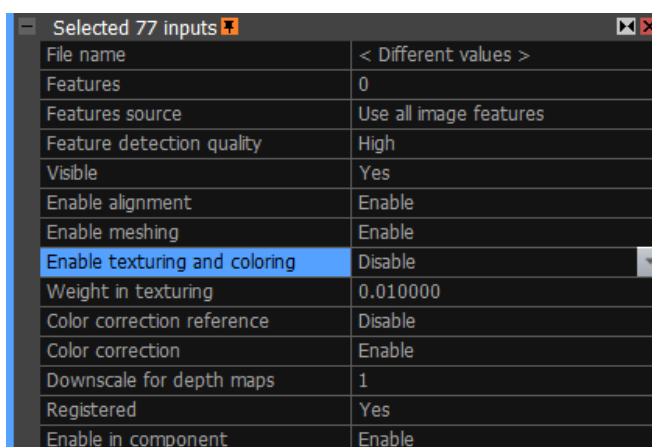


συνδυασμού τους) (Εικόνα 70) , η οποία διήρκτησε περισσότερο από μια

Εικόνα 68. Παράμετροι Unwrap. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

ώρα σε κάθε περίπτωση, με σκοπό την παραγωγή ορθοφωτογραφιών από το πρόγραμμα (https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/texturing_part2.htm).

Στα τρία αυτά τελικά μοντέλα προστέθηκε και ένα τέταρτο το οποίο συνδυάζει και αυτό δεδομένα σαρωτή και φωτογραμμετρίας, η διαδικασία παραγωγής της υφής και του χρώματος ωστόσο διαφέρει. Σύμφωνα με διαδικασίες που προτείνει ο οργανισμός CyArk (CyArk, 2020) , ένας οργανισμός που έχει σαν στόχο την ψηφιακή διατήρηση και τεκμηρίωση, κυρίως απειλούμενων, μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς παγκοσμίως (<https://www.cyark.org/>) αλλά και κατευθύνσεις που προέρχονται από το ίδιο το πρόγραμμα (Capturing Reality, 2020), προτείνεται η απενεργοποίηση των δεδομένων του σαρωτή στις διαδικασίες υφής και χρώματος, ώστε να μην επηρεάζεται αρνητικά το τελικό αποτέλεσμα από την ποιότητα των φωτογραφιών του. Έτσι, πριν την επιλογή δημιουργίας υφής, επιλέχθηκαν όλα τα *.lsp* αρχεία και από τις παραμέτρους *Enable texturing and coloring* (Ενεργοποίηση υφής και χρωματισμού) επιλέχθηκε η απενεργοποίηση των εικόνων του σαρωτή (επιλογή *Disable*)(Εικόνα 69), και με αυτόν το τρόπο δημιουργήθηκε και τελευταίο μοντέλο.



Εικόνα 69. Απενεργοποίηση αρχείων *lsp* στην διαδικασία Texturing. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



α)



β)



γ)



δ)

Εικόνα 70. Τα τελικά τρισδιάστατα μοντέλα. α) αρχείο σαρωτή, β) αρχείο φωτογραμμετρίας, γ) αρχείο σαρωτή και φωτογραμμετρίας και δ) αρχείο σαρωτή και φωτογραμμετρίας με φωτογραφίες από σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

5. Αποτελέσματα

5.1 Ποιοτική σύγκριση τρισδιάστατων μοντέλων

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας παραγωγής των τρισδιάστατων μοντέλων και την εξαγωγή των αντίστοιχων ορθοφωτογραφιών, ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η διερεύνηση των διαφορών που προκύπτουν μεταξύ των ορθοφωτογραφιών οι οποίες παράχθηκαν από τα διαφορετικά μοντέλα, δηλαδή από το μοντέλο που βασίστηκε αποκλειστικά σε δεδομένα TLS, από το φωτογραμμετρικό μοντέλο και από τα μοντέλα που προέκυψαν από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων, είτε με χρήση των εικόνων από τον σαρωτή στη δημιουργία υφής είτε όχι.

Η σύγκριση πραγματοποιείται, παρατηρώντας την γεωμετρική πιστότητα, την αποτύπωση των λεπτομερειών και την οπτική ποιότητα των παραγόμενων ορθοφωτογραφιών. Μέσω της ανάλυσης αυτής επιδιώκεται η αξιολόγηση της συμβολής κάθε μεθόδου στην τελική αποτύπωση, καθώς και η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών που παρουσιάζουν οι διαφορετικές προσεγγίσεις. Η σύγκριση γίνεται στο κάτω μέρος της εκκλησίας καθώς στο ανώτερο μέρος, αυτό της σκεπής, υπάρχουν μόνο δεδομένα φωτογραμμετρίας.



Εικόνα 71. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή και φωτογραμμετρίας χωρίς την χρήση εικόνων σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 72. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή και φωτογραμμετρίας με την χρήση εικόνων σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 73. Άποψη της πρόσοψης. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 74. Αποψη της πρόσοψης. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Παρατηρείται ότι στις εικόνες 71 έως 73, που προέρχονται από δεδομένα φωτογραμμετρίας και σε αυτές που προέρχονται από τον συνδυασμό φωτογραμμετρίας και σαρωτή (με ή χωρίς την χρήση των φωτογραφιών του) δεν εντοπίζονται διαφορές στο χρώμα και στην υφή του μοντέλου και το οπτικό αποτέλεσμα να είναι ακριβώς το ίδιο. Σε αντίθεση, το μοντέλο του σαρωτή στην εικόνα 74, είναι αρκετά σκοτεινό με σημεία της επιφάνειας να παρουσιάζονται παραμορφωμένα, καθώς υπάρχουν κενά δεδομένων λόγω της απόκρυψης σημείων της από άλλα τμήματα του μνημείου που εξέχουν, όπως τα σημεία πάνω από την είσοδο και πάνω από τον σταυρό, που οφείλονται στην αδυναμία των ακτινών του σαρωτή να φτάσουν σε συγκεκριμένα μέρη λόγω της θέσης του. Επίσης είναι ορατές και περιοχές σκίασης για τον ίδιο λόγο.

Διαφορές παρατηρούνται και στην απεικόνιση μεγαλύτερων επιφανειών του μνημείου όπως την πρόσοψη, το πίσω μέρος του ναού και την νότια πλευρά με τα παράθυρά της (Εικόνες 75 έως 86).



Εικόνα 75. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 76. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 77. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 78. Η πρόσοψη του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Η ορθοφωτογραφία του μοντέλου TLS στην εικόνα 78 παρουσιάζεται και πάλι σκοτεινή με τις ίδιες παραμορφώσεις και σκιάσεις που αναφέρθηκαν και παρόλο που γεωμετρικά είναι σωστή, το οπτικό αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό. Αντιθέτως η εικόνα 77 παρουσιάζει ένα οπτικά πολύ καλό αποτέλεσμα. Αναγνωρίζονται με σαφήνεια η επιφάνεια της πρόσοψης, τα λίθινα πλαίσια των παραθύρων και της εισόδου, ενώ επιτυγχάνεται σε υψηλό βαθμό η απόδοση της υφής και του χρώματος της πόρτας, καθιστώντας το, το μοναδικό μοντέλο στο οποίο παρατηρείται το συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Επίσης κατανοητή είναι και η ύπαρξη υαλοπινάκων στα παράθυρα παρόλο που αποδίδονται με παραμόρφωση. Στο συνδυαστικό μοντέλο (Εικόνα 75) είναι φανερή η έλλειψη απεικόνισης της πόρτας. Παρόλο που υπήρξαν σαρώσεις με την πόρτα κλειστή, οι περισσότερες πραγματοποιήθηκαν με ανοιχτή ώστε να είναι δυνατή η συνένωση εσωτερικών και εξωτερικών σαρώσεων. Ως αποτέλεσμα, η περιοχή δεν υποστηριζόταν επαρκώς από τα δεδομένα του σαρωτή με το πρόγραμμα να μην προχωρά στη κατασκευή της κατά την διαδικασία συνδυασμού των δεδομένων καθώς η γεωμετρία που προέρχεται από τις φωτογραφίες δεν θεωρήθηκε ισχυρή. Η ενσωμάτωση των εικόνων που λήφθηκαν από την κάμερα του σαρωτή οδήγησε σε μερική βελτίωση της ανακατασκευής καθώς αποδόθηκε τμήμα της επιφάνειας της πόρτας, στοιχείο που δείχνει μια πρώτη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων με τη χρήση εικόνων από σαρωτή σε σύγκριση με την απουσία τους (Εικόνα 76). Συνεχίζοντας, παρουσιάζεται η νότια πλευρά του ναού καθώς κατά την αποτύπωση υπήρξε αυτή με τον καλύτερο φωτισμό λόγω προσανατολισμού και ώρας.



Εικόνα 79. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 80. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 81. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 82. Η νότια πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Και στην απεικόνιση της νότιας πλευράς τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, με το μοντέλο του σαρωτή (Εικόνα 79) να εμφανίζει τα ίδια μειονεκτήματα σχετικά με το οπτικό αποτέλεσμα. Τα συνδυαστικά μοντέλα (Εικόνες 80 και 81) δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους, καθώς η χρήση ή μη εικόνων από τον σαρωτή στην απόδοση λείων και επίπεδων επιφανειών αποκλειστικά λευκού χρώματος δεν φαίνεται να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα ενώ εμφανής είναι, όπως και στις προηγούμενες ορθοφωτογραφίες, η αποτυχία απόδοσης της υφής των παραθύρων καθώς η ακτίνες Laser διαπερνούν τις διαφανείς επιφάνειες. Αντιθέτως στο μοντέλο φωτογραμμετρίας (Εικόνα 82), η υφή των παραθύρων γίνεται κατανοητή αν και με κάποια παραμόρφωση, κυρίως στο παράθυρο που απεικονίζεται πλάγια στη δεξιά πλευρά. Λεπτομέρειες όπως η υδρορροή ή η βάση των τοίχων χαμηλά, αποδίδονται καλύτερα στα συνδυαστικά μοντέλα.

Η δυτική πλευρά στο πίσω μέρος της εκκλησίας, αποτελεί και το τελευταίο μέρος μελέτης των διαφορετικών αρχείων που δημιουργήθηκαν (Εικόνες 83 έως 86).



Εικόνα 83. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα σαρωτή. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 84. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 85. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή χωρίς την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 86. Η δυτική πλευρά του ναού. Δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή με την χρήση εικόνων του. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Στη δυτική πλευρά το μοντέλο σαρωτή (Εικόνα 83) παρουσιάζει την ίδια εικόνα όπως και στις υπόλοιπες ενώ τα μοντέλα σαρωτών και φωτογραφιών δίνουν ένα καλό αποτέλεσμα και πάλι χωρίς διαφορές μεταξύ τους (Εικόνες 85 και 86). Σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις το φωτογραμμετρικό μοντέλο παρουσιάζει ανωμαλίες στην απόδοση της επιφάνειας (Εικόνα 84), γεγονός που οφείλεται στην μην επαρκή επικάλυψη συγκεκριμένης της θέσης από τον απαραίτητο αριθμό φωτογραφιών ώστε να προκύψει η σωστή γεωμετρία του μνημείου, κάτι που δεν συμβαίνει στα αρχεία με δεδομένα σαρωτή.

5.2 Αξιολόγηση ορθοφωτογραφιών

Εκτός από τη σύγκριση των παραγόμενων μοντέλων και των μεθόδων που αυτά δημιουργήθηκαν, εξετάζεται επίσης κατά πόσο οι ορθοφωτογραφίες που παράγονται συμβάλλουν στην τεκμηρίωση του μνημείου, όπως και στη μελέτη της παθολογίας και της φθοράς του. Οι εικόνες που εξετάζονται προήλθαν από το συνδυαστικό μοντέλο με δεδομένα φωτογραμμετρίας και σαρωτή καθώς προσφέρει ισχυρή γεωμετρία και το επιθυμητό οπτικό αποτέλεσμα και αφορά κυρίως το τμήμα της σκεπής και το άνω μέρος του ναού, καθώς εικόνες των τοίχων και της πρόσοψης έχουν ήδη παρουσιαστεί. Σαν πρώτη εικόνα παρουσιάζεται το αέτωμα της στέγης (Εικόνα 87).



Εικόνα 87. Το αέτωμα της στέγης στην πρόσοψη της εκκλησίας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Στην ορθοφωτογραφία διακρίνονται με σαφήνεια όλες οι αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες με τα μορφολογικά και διακοσμητικά της στοιχεία, με τις εξοχές και τα σχήματα που υπάρχουν. Επίσης ευδιάκριτη είναι και η φθορά που υπάρχει σε όλα τα μέρη που εξέχουν του τοίχου, με την παρουσία υγρασίας σχεδόν σε κάθε επιφάνεια. Παρατηρείται ότι η νότια πλευρά (δεξιά) παρουσιάζει μια πιο θολή εικόνα από τη βόρεια (αριστερά), γεγονός που οφείλεται στη επίδραση του ήλιου και την φωτεινότητα του η οποία ήταν έντονη τη χρονική στιγμή της αποτύπωσης. Εκτεταμένα ίχνη υγρασίας και οι φθορές που οφείλονται σε αυτή παρατηρούνται επίσης στο ανατολικό αέτωμα και σε συγκεκριμένη θέση στη σκεπή μπροστά από αυτό (Εικόνα 88), στη νότια πλευρά της στέγης με τα πλάγια μέρη του αετώματος (Εικόνα 89), καθώς και στη βόρεια πλευρά της στέγης με τους τοίχους της (Εικόνα 90). Λεπτομέρειες που αφορούν το γείσο της πρόσοψης και την κατάσταση του παρουσιάζονται στην εικόνα 91.



Εικόνα 88. Το ανατολικό αέτωμα με εμφανή τα σημάδια από την υγρασία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 89. Η νότια πλευρά της σκεπής με τους πλάγιους τοίχους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 90. Η βόρεια πλευρά της σκεπής με τους πλάγιους τοίχους. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)



Εικόνα 91. Το γέισο της πρόσοψης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Ένα ακόμα μέρος στο οποίο γίνεται τεκμηρίωση φθοράς μέσω του μοντέλου είναι και τα ξύλινα μέρη του καμπαναριού (Εικόνα 92).



α)



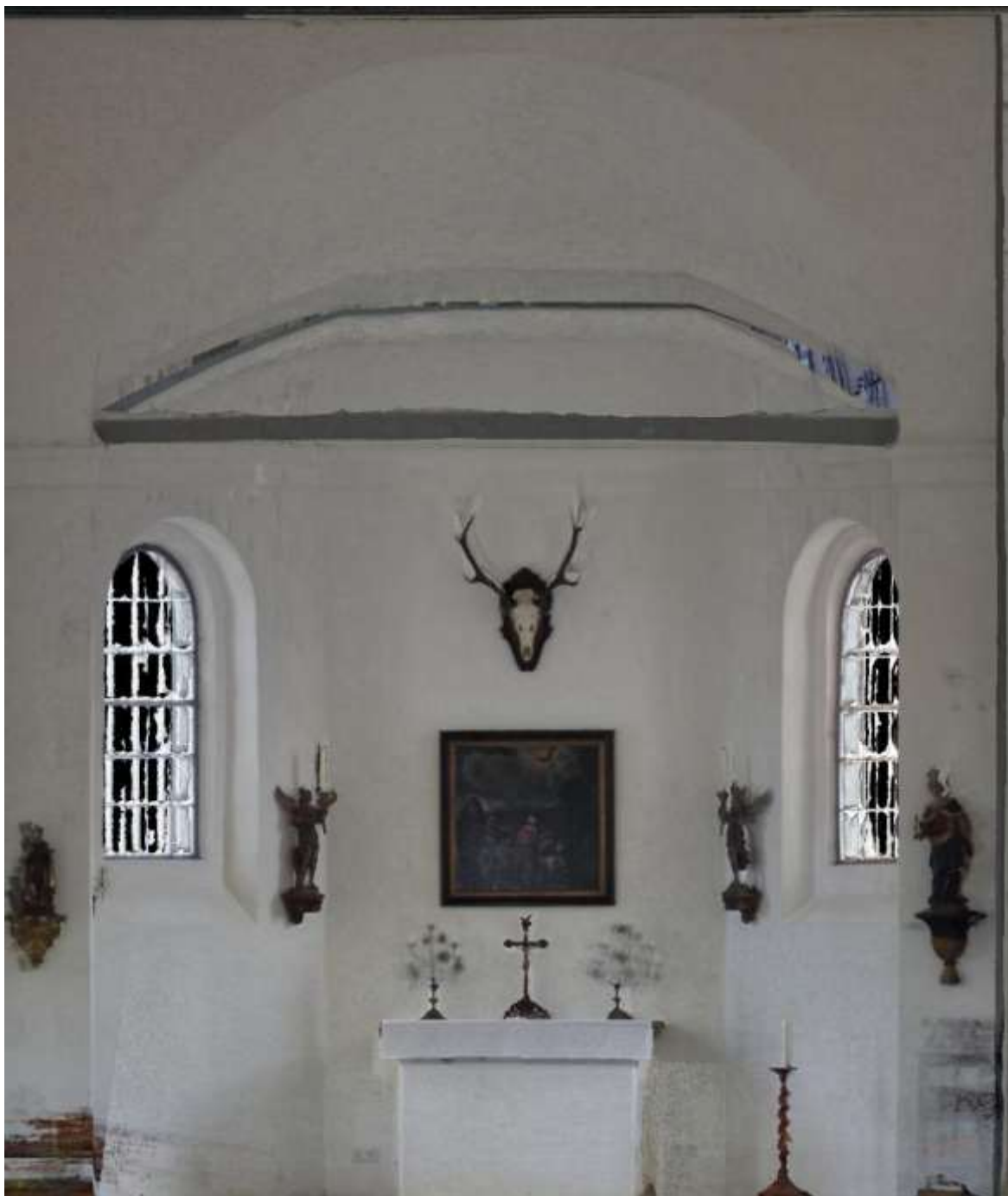
β)



γ)

Εικόνα 92. Τεκμηρίωση φθοράς στα ξύλινα μέρη του καμπαναριού α) νότια πλευρά β) βόρεια πλευρά γ) ανατολική πλευρά. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

Εκτός του εξωτερικού χώρου, έγινε πλήρης αποτύπωση και του εσωτερικού του ναού τόσο φωτογραμμετρικά όσο και με την χρήση σαρωτή. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα δεν ήταν τα επιθυμητά. Στον χώρο υπάρχουν αρκετές σειρές με στασίδια για τις ανάγκες των πιστών, γεγονός που οδηγεί στην ύπαρξη θορύβου στα μοντέλα, με αποτέλεσμα πολλές παραμορφωμένες θέσεις καθώς επίσης και την αδυναμία αποτύπωσης σημαντικών παραμέτρων όπως το πλακόστρωτο δάπεδο της εκκλησίας. Καλύτερη απεικόνιση αν και με αδυναμία ανάδειξης των πολλών λεπτομερειών επιτευχθεί στον χώρο της Αγίας Τράπεζας του ναού (Εικόνες 93). Τέλος, για την τεκμηρίωση του μνημείου, παρατίθεται μια ορθοφωτογραφική κάτοψη, προερχόμενη από την εναέρια φωτογραμμετρική αποτύπωση (Εικόνα 94).



Εικόνα 93. Άποψη της Αγίας Τράπεζας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

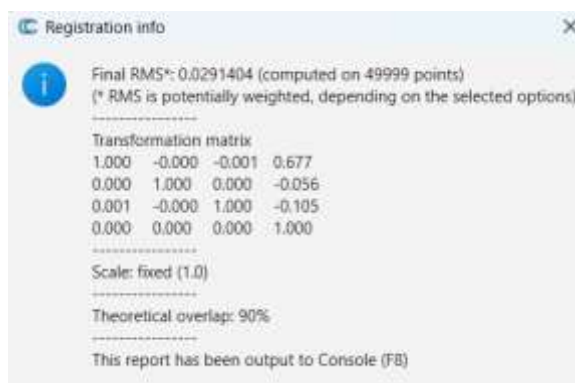


Εικόνα 94. Ορθοφωτογραφική κάτοψη του ναού. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Reality Scan)

5.3 Αξιολόγηση ευθυγράμμισης νεφών σημείων στο Cloud Compare

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφάλαιο 4.2.4) το Reality Scan δεν προσφέρει την δυνατότητα υπολογισμού του σφάλματος RMS. Γι' αυτόν τον λόγο, η αξιολόγηση της ποιότητας της ευθυγράμμισης των δύο νεφών σημείων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Cloud Compare, με εφαρμογή του αλγορίθμου Iterative Closest Point (ICP) (Besl & McKay, 1992) και, στη συνέχεια, με υπολογισμό των αποστάσεων Cloud-to-Cloud (C2C) (Lague, Brodu & Leroux, 2013). Στόχος της διαδικασίας ήταν η ποσοτική εκτίμηση της γεωμετρικής συμφωνίας μεταξύ του νέφους αναφοράς του σαρωτή Laser και του νέφους που προέκυψε από τη φωτογραμμετρική επεξεργασία. Η διαδικασία επιλέχθηκε να γίνει στη πρόσοψη της εκκλησίας και όχι στον σύνολό της, καθώς αποτελεί την επιφάνεια με την μεγαλύτερη επικάλυψη δεδομένων των δύο μεθόδων και αυτήν με τις περισσότερες λεπτομέρειες αποτύπωσης.

Η διαδικασία ICP κατέληξε σε τελικό RMS σφάλμα 0,0291 m, το οποίο υπολογίστηκε σε περίπου 50.000 σημεία, ενώ η θεωρητική επικάλυψη των δύο νεφών ανήλθε στο 90%. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ιδιαίτερα επιτυχή ευθυγράμμιση, καθώς η μέση απόκλιση μεταξύ των αντίστοιχων σημείων είναι περίπου 3 cm (Εικόνα 95).



Εικόνα 95. Το σφάλμα RMS και ο πίνακας μετασχηματισμού. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)

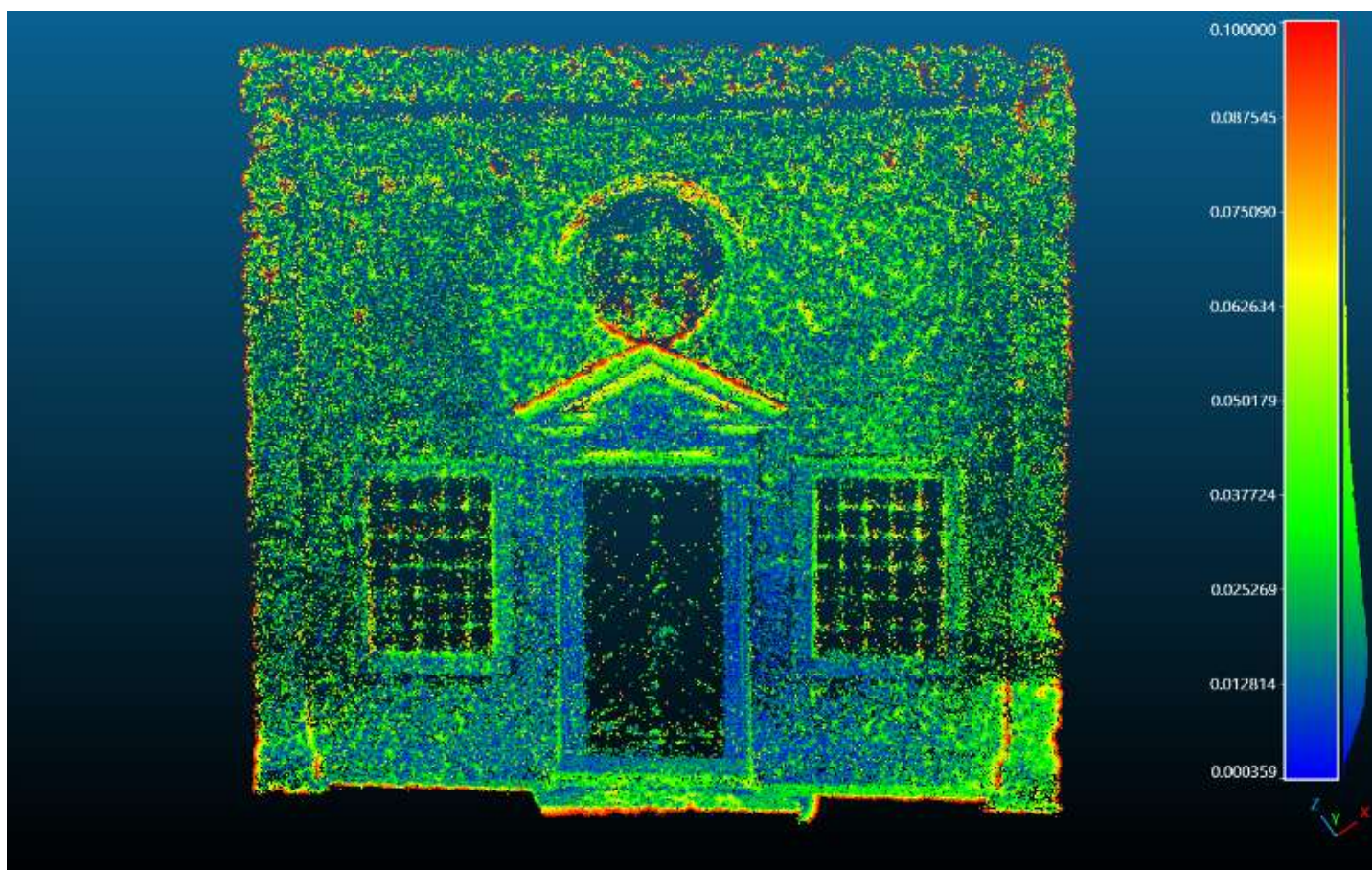
Ακολούθως πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των αποστάσεων Cloud-to-Cloud (C2C), οι οποίες αποτελούν μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους ποσοτικής σύγκρισης δύο νεφών σημείων. Από τα στατιστικά στοιχεία προέκυψε μέση απόσταση (Average Distance) 0,0232 m, ενώ η τυπική απόκλιση (σ) ήταν 0,0402 m. Η μέγιστη απόσταση υπερβαίνει τα 0,50 m, ωστόσο πρόκειται για περιορισμένο αριθμό σημείων που αντιστοιχούν κυρίως σε περιοχές χωρίς πλήρη επικάλυψη, σε θόρυβο ή σε σημεία που βρίσκονται στα όρια του νέφους. Οι τιμές αυτές δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τη συνολική αξιολόγηση της ποιότητας (Εικόνα 96).

1	Min dist.	0
2	Max dist.	0.525147
3	Avg dist.	0.0232263
4	Sigma	0.0402362
5	Max error	0.0357317

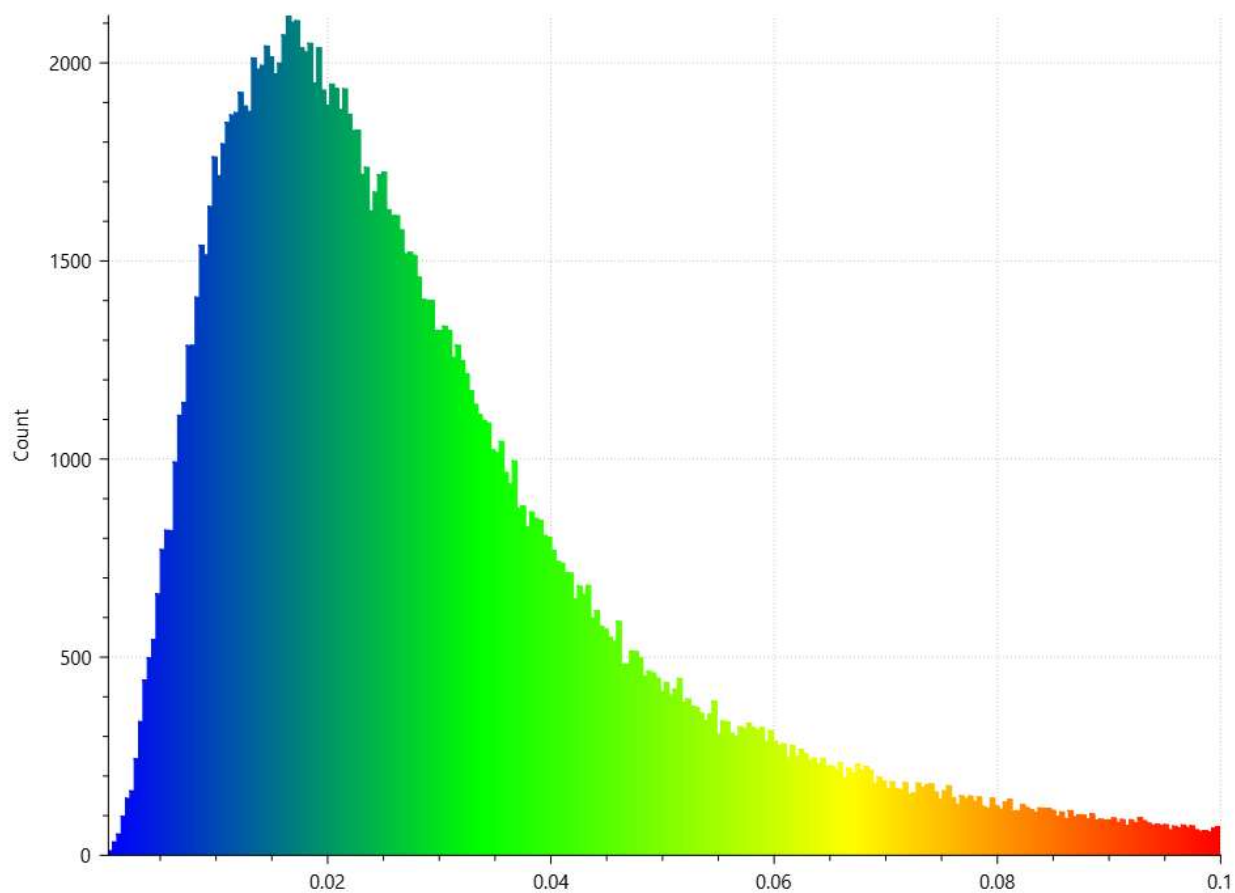
Εικόνα 96. Στατιστικά στοιχεία αποστάσεων Cloud-to-Cloud. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)

Όπως παρουσιάζεται και στον χρωματικό χάρτη (Εικόνα 97), το μεγαλύτερο μέρος της πρόσοψης εμφανίζεται σε αποχρώσεις του μπλε και του πράσινου, οι οποίες αντιστοιχούν σε αποκλίσεις μικρότερες των 5 cm περίπου, γεγονός που υποδηλώνει ικανοποιητική γεωμετρική συμφωνία μεταξύ των δύο νεφών σημείων. Αντίθετα, αυξημένες αποκλίσεις (κίτρινες έως κόκκινες αποχρώσεις) παρατηρούνται κυρίως στις γωνίες του κτιρίου, στις περιοχές κάτω από την στέγη, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα με τον σταυρό, καθώς και στα περιγράμματα των παραθύρων και της εισόδου. Οι αποκλίσεις αυτές είναι αναμενόμενες, καθώς οι συγκεκριμένες περιοχές χαρακτηρίζονται από αλλαγές της γεωμετρίας, από φαινόμενα απόκρυψης και διαφορετικές γωνίες λήψης μεταξύ της επίγειας σάρωσης laser και της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης.

Το ιστόγραμμα των αποστάσεων (Εικόνα 98) παρουσιάζει έντονη συγκέντρωση τιμών μεταξύ περίπου 0,01 m και 0,03 m, με κορυφή γύρω στα 0,02 m, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι τα περισσότερα σημεία εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις. Παράλληλα, παρατηρείται σταδιακή μείωση της συχνότητας προς μεγαλύτερες αποστάσεις, σχηματίζοντας μια δεξιά ουρά, η οποία αντιστοιχεί σε περιορισμένο αριθμό σημείων με μεγάλες αποκλίσεις. Οι τιμές αυτές αφορούν κυρίως περιοχές περιορισμένης επικάλυψης ή με πολύπλοκη γεωμετρία και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική ακρίβεια της ευθυγράμμισης. Συνολικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ότι η διαδικασία ευθυγράμμισης ήταν επιτυχής και ότι τα δύο νέφη σημείων παρουσιάζουν υψηλό βαθμό γεωμετρικής συμφωνίας.



Εικόνα 97. Ο χρωματικός χάρτης των δύο νεφών σημείων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)



Εικόνα 98. Το ιστόγραμμα των αποστάσεων. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία Cloud Compare)

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την τρισδιάστατη αποτύπωση της Hubertuskapelle, ενός παρεκκλησίου του 17ου αιώνα στο Düsseldorf της Γερμανίας, μέσω της αξιοποίησης σύγχρονων τεχνολογιών καταγραφής και τεκμηρίωσης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν η φωτογραμμετρία με τη μέθοδο Structure from Motion (SfM), η επίγεια σάρωση laser (Terrestrial Laser Scanning – TLS), καθώς και ο συνδυασμός των δύο μεθόδων με δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στόχος της έρευνας ήταν η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με την αξιοποίηση των προαναφερθεισών τεχνικών, καθώς και η αξιολόγηση της ποιότητας και της αποτελεσματικότητάς τους μέσω της ανάλυσης των ορθοφωτογραφιών που παρήχθησαν από κάθε τεχνική ξεχωριστά. Παράλληλα, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες που προσφέρει η ενοποίηση διαφορετικών τύπων δεδομένων για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου πολιτιστικής κληρονομιάς, το οποίο μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης ενός μνημείου, καθώς και στον εντοπισμό και την καταγραφή πιθανών φθορών ή αλλοιώσεων που έχει υποστεί με την πάροδο του χρόνου.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά τρισδιάστατα μοντέλα: ένα μοντέλο βασισμένο αποκλειστικά σε δεδομένα TLS, ένα φωτογραμμετρικό μοντέλο από επίγειες και εναέριες λήψεις, ένα υβριδικό μοντέλο που προέκυψε από τη συνένωση των δεδομένων TLS και SfM με χρήση φωτογραφικών υφών και ένα δεύτερο υβριδικό μοντέλο στο οποίο αξιοποιήθηκαν επιπλέον οι εικόνες που παρήγαγε ο σαρωτής laser κατά τη διαδικασία δημιουργίας της υφής (texturing). Η δημιουργία και η σύγκριση των τεσσάρων αυτών μοντέλων επέτρεψε την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε προσέγγισης.

Η εφαρμογή της μεθόδου Structure from Motion (SfM) απέδειξε ότι η φωτογραμμετρία αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο για την ψηφιακή τεκμηρίωση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσω της επεξεργασίας μεγάλου αριθμού επικαλυπτόμενων εικόνων, κατέστη δυνατή αρχικά η παραγωγή πυκνού νέφους σημείων και στη συνέχεια ενός τρισδιάστατου μοντέλου μέσω του προγράμματος. Το φωτογραμμετρικό μοντέλο απέδωσε με μεγάλη πιστότητα τα χρωματικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του μνημείου, προσφέροντας ένα ιδιαίτερα ρεαλιστικό οπτικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος

επιτρέπει την συλλογή δεδομένων με εξοπλισμό χαμηλού κόστους, όπως η κάμερα και το Drone που χρησιμοποιήθηκαν, καθιστώντας την διαδικασία αρκετά ευέλικτη και προσιτή ακόμα και σε χρήστες χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις φωτογραμμετρίας. Επίσης, η ύπαρξη αρκετών ελευθέρων λογισμικών φωτογραμμετρικού περιεχομένου και η πλήρης αυτοματοποίηση της επεξεργασίας δεδομένων και δημιουργίας 3D μοντέλων μέσω της SfM, διευκολύνει την παραγωγή οπτικά αποδεκτών μοντέλων από μη εξειδικευμένους χρήστες. Η χρήση του εξοπλισμού ωστόσο από μη ειδικούς, μπορεί ευκολά να οδηγήσει σε λανθασμένα ή μη επαρκή δεδομένα (συνθήκες φωτισμού, έλλειψη καλής επικάλυψης), γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα ανακατασκευής του μοντέλου. Επίσης, η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας στο ελεύθερο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε (Reality Scan), ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα που οφείλονται στον οπτικό, κατά κύριο λόγο, έλεγχο του μοντέλου. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η παρέμβαση του χρήστη και η χρήση ομόλογων σημείων. Ακόμα, δεν προσφέρει τη δυνατότητα αξιόπιστου ελέγχου της γεωμετρίας του μοντέλου, η οποία ορίζεται από την μελέτη συνδυασμού άλλων παραμέτρων, καθώς δεν δίνεται το μέγεθος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS). Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση άλλου προγράμματος και συγκεκριμένα του Cloud Compare, στο οποίο έγινε και η αξιολόγηση ευθυγράμμισης των νεφών σημείων.

Αντίθετα, η αποτύπωση με τον επίγειο σαρωτή Laser παρείχε ένα ιδιαίτερα ακριβές γεωμετρικό υπόβαθρο, με υψηλή πυκνότητα και ομοιομορφία σημείων καθώς χρησιμοποιήθηκε το επαγγελματικό λογισμικό Cyclone Register. Η μέθοδος αποδείχθηκε αξιόπιστη στην καταγραφή της μορφής του μνημείου, η οποία ωστόσο δεν παρουσίαζε κάποιες αρχιτεκτονικές ιδιαιτερότητες και δυσκολίες. Το παραγόμενο μοντέλο χαρακτηρίστηκε από υψηλή ακρίβεια και πληρότητα ως προς τη γεωμετρική πληροφορία. Η παραγωγή ορθοφωτογραφιών ωστόσο αποκλειστικά από σαρωτή δεν απέδωσε σε καμία περίπτωση μια εικόνα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη φθοράς ή την τεκμηρίωση του μνημείου. Επιπλέον, η ανάγκη πραγματοποίησης πολλαπλών θέσεων σάρωσης για την αντιμετώπιση των αποκρύψεων αυξάνει τον χρόνο εργασίας στο πεδίο. Με τον διαθέσιμο επίγειο σαρωτή κατέστη αδύνατη η αποτύπωση ολόκληρου του μνημείου καθώς τα σημεία ενδιαφέροντος σε μεγάλο ύψος δεν καταγράφηκαν. Παρά τα πλεονεκτήματα, η χρήση της τεχνολογίας TLS προϋποθέτει εξειδικευμένες γνώσεις τόσο κατά την διαδικασία αποτύπωσης στο πεδίο και την χρήση του σαρωτή, όσο και κατά την

επεξεργασία των δεδομένων στο αντίστοιχο πρόγραμμα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το υψηλό κόστος του απαραίτητου εξοπλισμού, το οποίο καθιστά την εφαρμογή της λιγότερο προσιτή σε μη επαγγελματίες χρήστες.

Η συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων φωτογραμμετρίας SfM και σαρωτή ανέδειξε τη συμπληρωματικότητα των δύο τεχνολογιών. Η φωτογραμμετρία υπερείχε στην απόδοση της χρωματικής πληροφορίας και στη δημιουργία ρεαλιστικών μοντέλων, ενώ ο επίγειος σαρωτής Laser παρείχε υψηλότερη γεωμετρική ακρίβεια και αξιοπιστία στις μετρήσεις. Η ενοποίηση των δύο συνόλων δεδομένων οδήγησε στη δημιουργία υβριδικών μοντέλων που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων, αξιοποιώντας την ακρίβεια του νέφους σημείων TLS ως γεωμετρική βάση και την πλούσια οπτική πληροφορία της φωτογραμμετρίας για την απόδοση λεπτομερών και ρεαλιστικών υφών. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η συνδυαστική χρήση των δύο τεχνολογιών αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική προσέγγιση για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η σύγκριση των δύο συνδυαστικών μοντέλων σαρωτή και φωτογραμμετρίας SfM ως προς τη διαδικασία απόδοσης υφής και την επίδραση που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα η ένταξη σε αυτό ή όχι των εικόνων του σαρωτή. Παρόλο που από σημαντικούς φορείς προτείνεται η αποφυγή της χρήσης τους λόγω υποβάθμισης της υφής και των χρωμάτων, στο συγκεκριμένο μνημείο δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο στο σύνολο του, ενδεχομένως λόγω του λευκού χρώματος, της μη εναλλαγής χρωματισμού και της ομοιομορφίας των τοίχων του. Η μόνη θέση που παρουσίασε διαφορές ήταν αυτή της πόρτας του ναού, στην οποία ενισχύθηκε η γεωμετρία των φωτογραφιών, αλλά δεν απέδωσε ολοκληρωμένα αποτελέσματα.

Συνολικά, η έρευνα κατέδειξε ότι η συνδυαστική αξιοποίηση TLS και SfM αποτελεί μία ιδιαίτερα αποτελεσματική προσέγγιση για την τρισδιάστατη τεκμηρίωση ιστορικών μνημείων. Τα υβριδικά μοντέλα παρουσίασαν αυξημένη πληρότητα, βελτιωμένη γεωμετρική ακρίβεια και υψηλή οπτική ποιότητα σε σχέση με τα μοντέλα που βασίζονται αποκλειστικά σε μία μόνο τεχνολογία. Από την αξιολόγηση των παραγόμενων ορθοφωτογραφιών έγινε δυνατή η μελέτη τόσο των αρχιτεκτονικών του λεπτομερειών όσο και των φθορών που έχουν επέλθει στο μνημείο. Ως εκ τούτου, η συνδυασμένη χρήση των δύο μεθόδων και χρήση τεχνολογίας Drone για δυσπρόσιτες θέσεις, κρίνεται ιδιαίτερα

κατάλληλη για εφαρμογές τεκμηρίωσης, συντήρησης, αποκατάστασης, αρχειοθέτησης και ψηφιακής ανάδειξης της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Η παρούσα εργασία περιορίστηκε στην εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μνημείο απλής γεωμετρίας και περιορισμένου μεγέθους, χωρίς ιδιαίτερες χρωματικές και αρχιτεκτονικές ιδιαιτερότητες, με εξοπλισμό περιορισμένων δυνατοτήτων, γεγονός που επηρέασε τη δυνατότητα γενίκευσης των συμπερασμάτων. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά με βάση την μελέτη των ορθοφωτογραφιών και δύνανται να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές όπως εικονικές περιηγήσεις, τεκμηρίωση κατάστασης, εξαγωγή χωρικών πληροφοριών, καθώς και σε τομείς όπως η εκπαίδευση. Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μεγαλύτερα και γεωμετρικά πιο πολύπλοκα μνημεία, καθώς και η περαιτέρω διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς της ως βέλτιστης προσέγγισης για την τρισδιάστατη αποτύπωση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Επιπλέον, η βελτίωση του βαθμού αυτοματοποίησης των ελεύθερων λογισμικών και η ανάπτυξη πιο αξιόπιστων διαδικασιών ελέγχου σφαλμάτων αναμένεται να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Abbas, M. A., Setan, H., Majid, Z., Idris, K. M., Ariff, M. F. M., Chong, A. K., & Lichti, D. D. (2014, June 16–21). *The effect of datum constraints for terrestrial laser scanner self-calibration*. In *FIG Congress 2014: Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance* (Paper 6909), Kuala Lumpur, Malaysia.

Almagro Vidal, A., Tandon, A., & Eppich, R. (2015). First aid to cultural heritage: Training initiatives on rapid documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W7, 13–19. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-13-2015>

Arya, S., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Silverman, R., & Wu, A. Y. (1998). An optimal algorithm for approximate nearest neighbour searching in fixed dimensions. *Journal of the ACM*, 45(6), 891–923. <https://doi.org/10.1145/293347.293348>

Asbeck, M., Drüppel, S., Gärtner, M., Skindelines, K., & Stein, M. (2019). *Vermessung und Geoinformation: Fachbuch für Vermessungstechniker und Geomatiker* (14. Aufl.). Selbstverlag Michael Gärtner.

Barbero-García, I., Lerma, J. L., Marqués-Mateu, Á., & Miranda, P. (2017). Low-cost smartphone-based photogrammetry for the analysis of cranial deformation in infants. *World Neurosurgery*, 102, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.03.015>

Bauer, B. (2005). Ein architektonisches Juwel in ländlicher Umgebung: Bürgersinn rettete die Hubertuskapelle in Winkelhausen vor dem Verfall – Förderkreis hat seine Aufgabe erfüllt. *Heimat-Jahrbuch Wittlaer*, 26, 18–22.

Baumann, R. (2014). Das Rittergut Großwinkelhausen und die St.-Hubertus-Kapelle in Wittlaer. *Die Quecke: Ratering und Angerländer Heimatblätter*, 84, 183–194.

Bentley, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18(9), 509–517.

Besl, P., & McKay, N. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256.

Bianco, S., Ciocca, G., & Marelli, D. (2018). Evaluating the performance of structure from motion pipelines. *Journal of Imaging*, 4(8), 98. <https://doi.org/10.3390/jimaging4080098>

Boehler, W., Bordas Vicent, M., & Marbs, A. (2003). *Investigating laser scanner accuracy*. Institute for Spatial Information and Surveying Technology, University of Applied Sciences Mainz.

- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Doneus, M., & Neubauer, W. (2005). 3D laser scanners on archaeological excavations. In *Proceedings of the CIPA 2005 XX International Symposium* (pp. 226–231). Torino, Italy.
- El-Hakim, S., Beraldin, J.-A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3), 21–29.
- Farenzena, M., Fusiello, A., & Gherardi, R. (2009). Structure-and-motion pipeline on a hierarchical cluster tree. In *Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops* (pp. 1489–1496). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICCVW.2009.5457630>
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362–1376.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Guidi, G., Beraldin, J.-A., Ciofi, S., & Atzeni, C. (2003). Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3D models metric accuracy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 33(4), 667–676.
- Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple view geometry in computer vision* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS: Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer.
- Horn, B. K. P. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4), 629–642.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000629>
- Huang, Q., Guo, X., Wang, Y., Sun, H., & Yang, L. (2024). A survey of feature matching methods. *IET Image Processing*. <https://doi.org/10.1049/ipr2.13032>
- Ioannides, M., Fink, E., Brumana, R., Patias, P., Doulamis, A., Martins, J., & Wallace, M. (2018). *Digital heritage: Progress in cultural heritage—Documentation, preservation, and protection*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0>
- Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., & Yang, L. (2017). UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, 9(3), 278. <https://doi.org/10.3390/rs9030278>

- Jokilehto, J. (2005). *Definition of cultural heritage: Reference to documents in history*. ICCROM.
- Jurek, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2017). Impact of spatial correlations on the surface estimation based on terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 11(3), 143–155. <https://doi.org/10.1515/jag-2017-0006>
- Kang, S. B. (1999). *Image-based rendering*. Springer.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (New Zealand). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Levoy, M., & Curless, B. (1999). Surface reconstruction from unorganized point clouds. In *SIGGRAPH '99 Proceedings* (pp. 71–78). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/311535.311576>
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant key points. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Lutsch, H. (1912). *Merkbuch zur Unterhaltung von Baudenkmälern*. Heymanns Verlag.
- Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2016). Validation of point clouds segmentation algorithms through their application to several case studies for indoor building modelling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 667–674. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-667-2016>
- Meyer, R. (Ed.). (1985). *Albrecht Meydenbauer: Baukunst in historischen Fotografien*. VEB Fotokinoverlag.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 473–486. <https://doi.org/10.1002/esp.3648>
- Pepe, M., Alfio, V. S., & Costantino, D. (2022). UAV platforms and the SfM-MVS approach in the 3D surveys and modelling: A review in the cultural heritage field. *Applied Sciences*, 12(24), 12886. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Reilly, P. (1992). Three-dimensional modelling and primary archaeological data. In P. Reilly & S. Rahtz (Eds.), *Archaeology and the information age* (pp. 149–173). Routledge.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>

- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144–166. <https://doi.org/10.1111/phor.12063>
- Rizzi, A., Voltolini, F., Girardi, S., Gonzo, L., & Remondino, F. (2007). Digital documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range sensors. In A. Georgopoulos (Ed.), *Anticipating the Future of the Cultural Past: 21st CIPA Symposium* (pp. 631–636).
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., & Capra, A. (2017). Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography. *European Journal of Remote Sensing*, 50, 211–221.
- Schönberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4104–4113). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing* (2nd ed.). CRC Press.
- Shortis, M. R., Bellman, C. J., Robson, S., Johnston, G. J., & Johnson, G. W. (2006). Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 285–290.
- Streilein, A. (1994). Towards automation in architectural photogrammetry: CAD-based 3D-feature extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(5), 4–15.
- Stylianidis, E., & Remondino, F. (2016). *3D recording, documentation and management of cultural heritage*. Whittles Publishing.
- Szeliski, R., & Kang, S. B. (1994). Shape ambiguities in structure from motion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(5), 506–512. <https://doi.org/10.1109/34.291440>
- Themistocleous, K., Agapiou, A., King, H. M., King, N., & Hadjimitsis, D. G. (2014). More than a flight: The extensive contributions of UAV flights to archaeological research. In *EuroMed 2014 Conference Proceedings* (pp. 396–409).
- Themistocleous, K., Ioannides, M., Agapiou, A., & Hadjimitsis, D. G. (2015). The methodology of documenting cultural heritage sites using photogrammetry, UAV and 3D printing techniques. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment*. <https://doi.org/10.1117/12.2195626>

Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (2000). Bundle adjustment—A modern synthesis. In B. Triggs et al. (Eds.), *Vision algorithms: Theory and practice* (pp. 298–372). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21

UNESCO. (1972). *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage*.

Ünal, M., Yakar, M., & Yıldız, F. (2004). Discontinuity surface roughness measurement techniques and the evaluation of digital photogrammetric method. In *Proceedings of the XXth ISPRS Congress* (Vol. XXXV, Part B5, pp. 1103–1108).

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2022). Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction industry. *Sensors*, 22(1), 265.
<https://doi.org/10.3390/s22010265>

Yakar, M., Yilmaz, H. M., & Mutluoglu, O. (2014). Performance of photogrammetric and terrestrial laser scanning methods in volume computing of excavation and filling areas. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(1), 387–394.

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Λάββας, Γ. Π. (2002). *Επίτομη ιστορία της αρχιτεκτονικής: Με έμφαση στον 19ο και 20ό αιώνα*. University Studio Press.

Ντίνης, Ο. Θ. (2009). *Τοπογραφικές εφαρμογές*. Εκδόσεις Ζήτη.

Σαββαΐδης, Π., Δούκας, Ι., Υφαντής, Ι., & Λακάκης, Κ. (2016). *Τοπογραφία και χαρτογραφία για αρχιτέκτονες και για αρχαιολόγους*. Εκδόσεις Κυριακίδη.

Ιστότοποι

<https://www.baedlung.com/cs/computer-vision-bundle-adjustment>

<https://burgen-pfalz.com/bauelemente/burgkapellen/>

<https://www.cyark.org/>

<https://www.dji.com/de/mini-2-se/specs>

<https://www.duesseldorf.de/>

<https://www.duesseldorf.de/denkmalschutz>

<https://www.gut-sonnenhof.de/geschichte>

<https://hcaa.gov.gr/el/faq/ti-apotelei-drone-symfona-me-eyropaiko-kanonistiko-plaisio>

<https://hubertuskapelle-angermund.de/bilder>

<https://hubertuskapelle-angermund.de/geschichte/>

<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-blk360>

<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>

<https://leica-geosystems.com/products/total-stations>

<https://ratingen.adfc.de/artikel/kaiserswerth-krefeld-angermund>

<https://rcdocs.leica-geosystems.com/cyclone-register-360/latest/optimize>

<https://ricoh-imaging.eu/products/ricoh-wg-80>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/appbasics/alignsettings.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/appbasics/reconselection.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/alignquality.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/inspection.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/mergecomponents.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/qualityanalysis.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/texturing.htm>

https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/texturing_part2.htm

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/unwrap.htm>

<https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/importlaser.htm>

https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/importlaser_2.htm

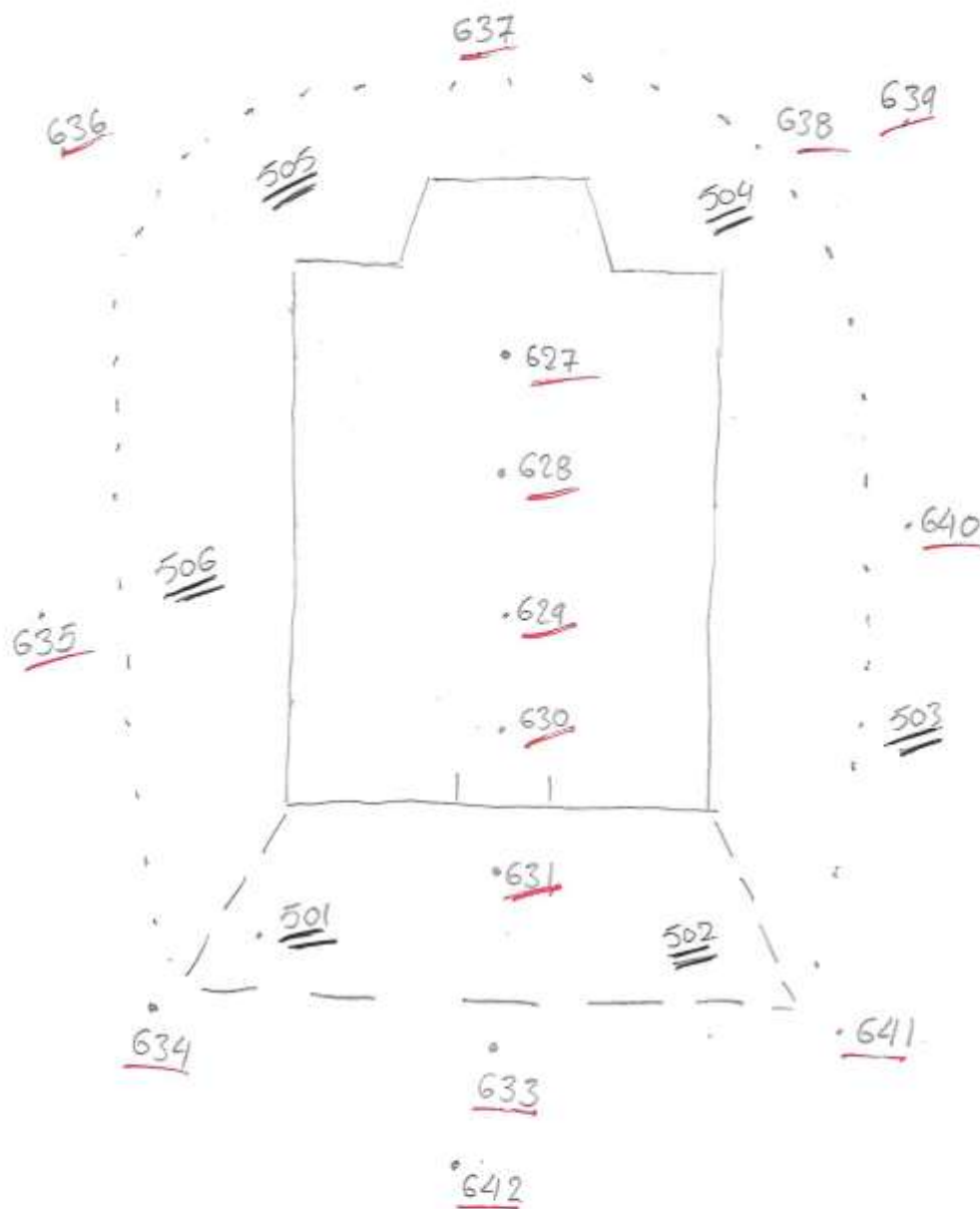
<https://ts-geosystems.com/product/trimble-r8-rtk-gps/>

<https://webapp.atis.cloud/support/de/article/13>

<https://www.wuppertal.de/>

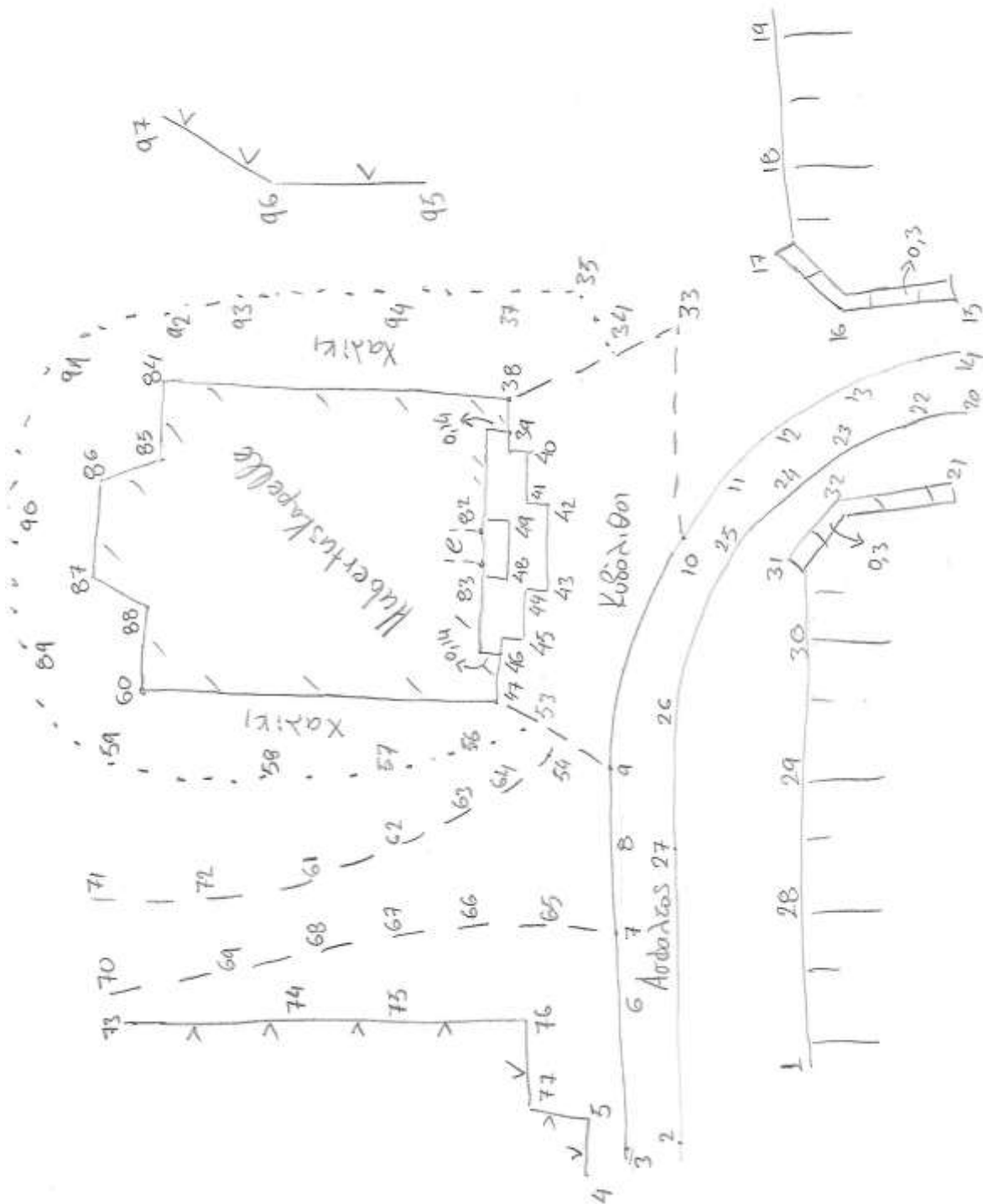
https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/hubertuskapelle-ein-barocker-gruss-nach-duisburg_aid-26119835

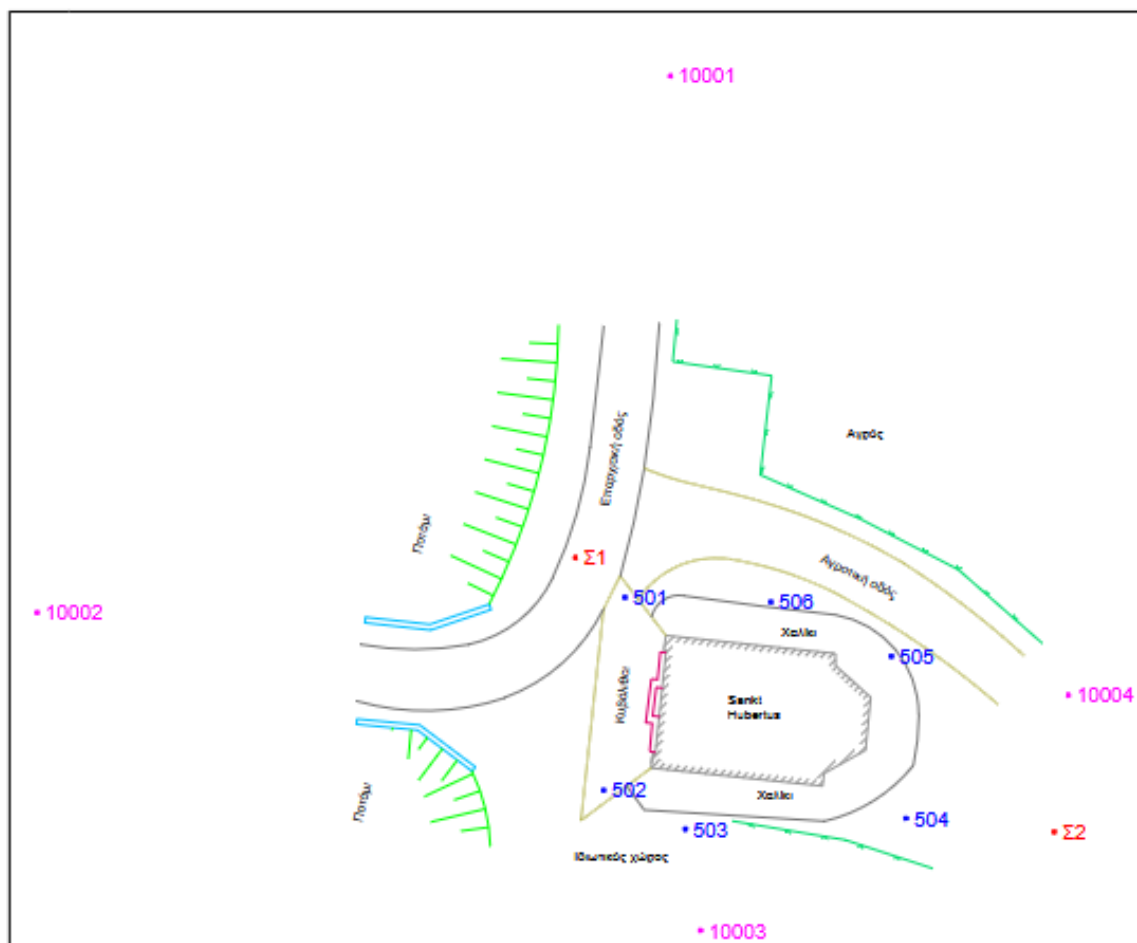
Παράρτημα Α: Σκαριφήματα και τοπογραφικό



Koltsidas
01.02.2026

Koltsidas
01.02.2026





Τοπογραφικό Διάγραμμα

Η εκκλησία του Αγίου Ουβέρτου και τα σημεία γεωαναφοράς

Σύστημα αναφοράς ETRS89/UTM 32

Χωρίς κλίμακα

Συντάκτης:
Κολτσίδας Αργύρης

Düsseldorf
Μάιος 2026



Εκκλησία
Στάσεις οργάνου
Σημεία GPS
Σημεία ελέγχου / Στόχοι

Παράρτημα Β: Αναφορά σφάλματων Cyclone Register

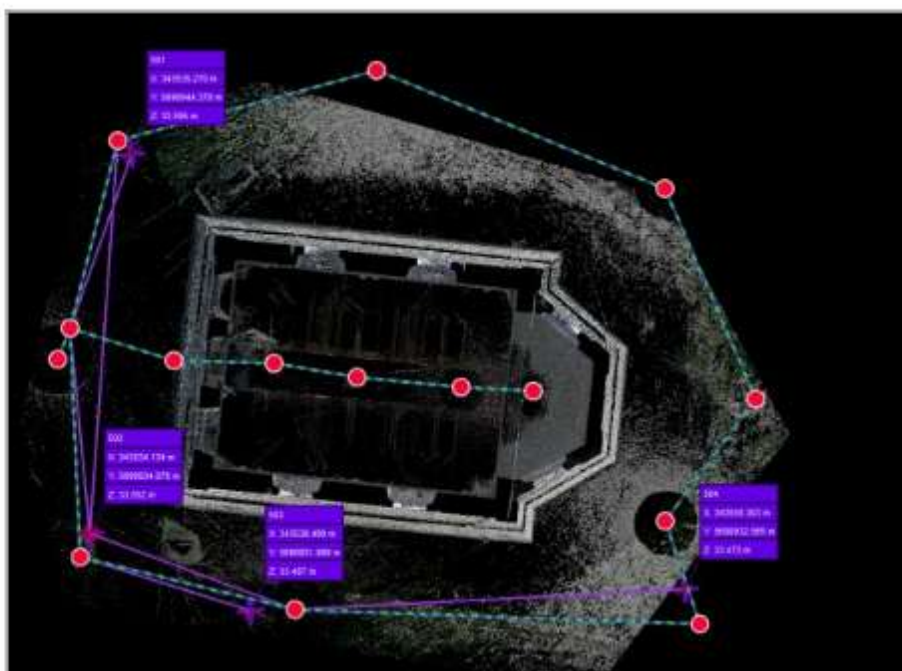


Feb 6, 2026

Erstellt von:

Koltsidas

Kapelle_Georef



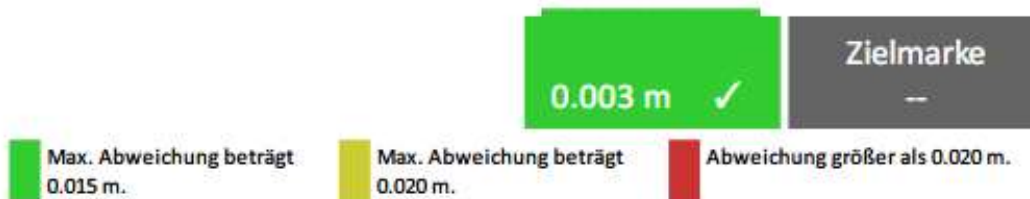
Hubertus Kapelle-1

Qualität insgesamt

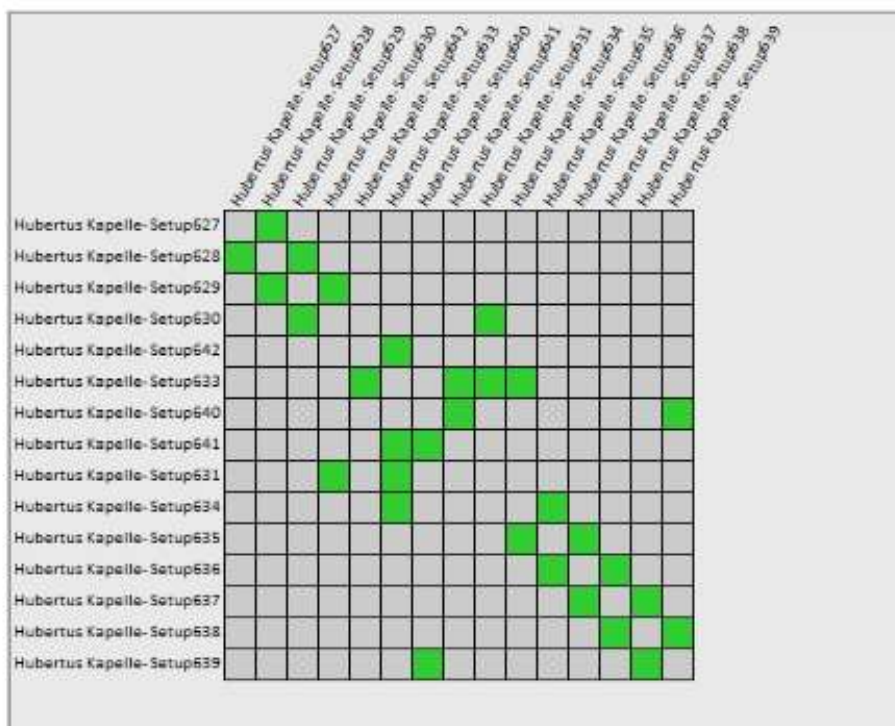
Ergebnisse der Abweichungen für Gruppe 1

Anzahl Standpunkte: 15
Anzahl Verknüpfungen: 15
Stabilität: 63 %
Überlappung: 73 %

Fehler Gruppe 0.003 m ✓	
Überlappung 73 % ✓	Stabilität 63 % ✓
Cloud-to-Cloud	Fehler



Qualitätsmatrix Verknüpfung (1 von 1) -



Vermessungsbericht

Abs. mittlerer Fehler von Kontrolle zu 'Gruppe 1': 0.006 m

Gruppen-Name	Standpunkt	Beschriftung	Fehler
Gruppe 1	Hubertus Kapelle-Setup633	501	0.003 m
	Hubertus Kapelle-Setup633	502	0.006 m
	Hubertus Kapelle-Setup634	502	0.009 m
	Hubertus Kapelle-Setup640	502	0.004 m
	Hubertus Kapelle-Setup641	503	0.008 m
	Hubertus Kapelle-Setup640	504	0.004 m

Ergebnisse Abweichungen bei Verknüpfungen

1 Übersicht

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 1	Hubertus Kapelle-Setup627	Hubertus Kapelle-Setup628	95 %	0.001 m
Verknüpfung 2	Hubertus Kapelle-Setup628	Hubertus Kapelle-Setup629	86 %	0.001 m
Verknüpfung 5	Hubertus Kapelle-Setup629	Hubertus Kapelle-Setup630	87 %	0.001 m
Verknüpfung 6	Hubertus Kapelle-Setup642	Hubertus Kapelle-Setup633	83 %	0.004 m
Verknüpfung 9	Hubertus Kapelle-Setup640	Hubertus Kapelle-Setup641	73 %	0.003 m
Verknüpfung 10	Hubertus Kapelle-Setup631	Hubertus Kapelle-Setup633	70 %	0.002 m
Verknüpfung 12	Hubertus Kapelle-Setup633	Hubertus Kapelle-Setup634	83 %	0.004 m
Verknüpfung 13	Hubertus Kapelle-Setup641	Hubertus Kapelle-Setup633	74 %	0.004 m
Verknüpfung 17	Hubertus Kapelle-Setup630	Hubertus Kapelle-Setup631	52 %	0.001 m
Verknüpfung 18	Hubertus Kapelle-Setup634	Hubertus Kapelle-Setup635	76 %	0.006 m
Verknüpfung 19	Hubertus Kapelle-Setup636	Hubertus Kapelle-Setup637	66 %	0.010 m
Verknüpfung 21	Hubertus Kapelle-Setup638	Hubertus Kapelle-Setup637	64 %	0.004 m
Verknüpfung 22	Hubertus Kapelle-Setup638	Hubertus Kapelle-Setup639	68 %	0.005 m
Verknüpfung 23	Hubertus Kapelle-Setup639	Hubertus Kapelle-Setup640	41 %	0.005 m
Verknüpfung 24	Hubertus Kapelle-Setup635	Hubertus Kapelle-Setup636	78 %	0.006 m

2 Details

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 1	Hubertus Kapelle-Setup627	Hubertus Kapelle-Setup628	95 %	0.001 m
		Cloud to Cloud		0.001 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 2	Hubertus Kapelle-Setup628	Hubertus Kapelle-Setup629	86 %	0.001 m
		Cloud to Cloud		0.001 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 5	Hubertus Kapelle-Setup629	Hubertus Kapelle-Setup630	87 %	0.001 m
		Cloud to Cloud		0.001 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 6	Hubertus Kapelle-Setup642	Hubertus Kapelle-Setup633	83 %	0.004 m
		Cloud to Cloud		0.004 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 9	Hubertus Kapelle-Setup640	Hubertus Kapelle-Setup641	73 %	0.003 m
		Cloud to Cloud		0.003 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 10	Hubertus Kapelle-Setup631	Hubertus Kapelle-Setup633	70 %	0.002 m
		Cloud to Cloud		0.002 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 12	Hubertus Kapelle-Setup633	Hubertus Kapelle-Setup634	83 %	0.004 m
		Cloud to Cloud		0.004 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 13	Hubertus Kapelle-Setup641	Hubertus Kapelle-Setup633	74 %	0.004 m
		Cloud to Cloud		0.004 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 17	Hubertus Kapelle-Setup630	Hubertus Kapelle-Setup631	52 %	0.001 m
		Cloud to Cloud		0.001 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 18	Hubertus Kapelle-Setup634	Hubertus Kapelle-Setup635	76 %	0.006 m
		Cloud to Cloud		0.006 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 19	Hubertus Kapelle-Setup636	Hubertus Kapelle-Setup637	66 %	0.010 m
		Cloud to Cloud		0.010 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 21	Hubertus Kapelle-Setup638	Hubertus Kapelle-Setup637	64 %	0.004 m
		Cloud to Cloud		0.004 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 22	Hubertus Kapelle-Setup638	Hubertus Kapelle-Setup639	68 %	0.005 m
		Cloud to Cloud		0.005 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 23	Hubertus Kapelle-Setup639	Hubertus Kapelle-Setup640	41 %	0.005 m
		Cloud to Cloud		0.005 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Name der Verknüpfung	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Überlappung	Absoluter mittlerer Fehler
Verknüpfung 24	Hubertus Kapelle-Setup635	Hubertus Kapelle-Setup636	78 %	0.006 m
		Cloud to Cloud		0.006 m
		Zielmarke	Mittlere Abweichung der Zielmarken:	--

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα: Αργύρη Κολτσίδα

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.