

«Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού»

«Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Αρχαιολογικών Χώρων και
Μνημείων»

Διπλωματική Εργασία

«Συγκριτική μελέτη γεωμετρικής ανακατασκευής τεχνουργημάτων
μέσω εφαρμογών για κινητές συσκευές (smart phones ή iPhones)
και 3Δ φορητού σαρωτή δομημένου φωτός»

«Μαρίνα Ευθυμίου»

Επιβλέπων καθηγητής: «Φίλιππος Αζαριάδης - Τοπάλογλου»

Αθήνα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας «Μαρίνας Ευθυμίου» 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.

«Συγκριτική μελέτη γεωμετρικής ανακατασκευής τεχνουργημάτων
μέσω εφαρμογών για κινητές συσκευές (smart phones ή iPhones)
και 3Δ φορητού σαρωτή δομημένου φωτός»

«Μαρίνα Ευθυμίου»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Φίλιππος Αζαριάδης - Τοπάλογλου»

Μέλος ΔΕΠ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής

Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Λάζαρος Γραμματικόπουλος»

Μέλος ΣΕΠ

Τμήμα Εφαρμοσμένων Τεχνών και
Βιώσιμου Σχεδιασμού

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Αθήνα, Ιούνιος 2026

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Φίλιππο Αζαριάδη-Τοπάλογλου για την άμεση ανταπόκριση και την ουσιαστική καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και τον συνεπιβλέποντα κ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο για τη συμβολή του. Ευχαριστώ επίσης την κα. Χρύσα Αλέπη για την παραχώρηση αντικειμένων που εμπλούτισαν το ερευνητικό υλικό της εργασίας.

Στον Μάνο και τον Νίκο, για την αγάπη και την υπομονή τους.

Στη μνήμη του Ορφέα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιεί συγκριτική μελέτη της γεωμετρικής ανακατασκευής τεχνουργημάτων πολιτιστικής κληρονομιάς μέσω εφαρμογών κινητών συσκευών και επαγγελματικού σαρωτή δομημένου φωτός. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν τρεις εφαρμογές (RealityScan, Polycam και KIRI Engine) κυρίως στο iPhone 17 Pro, ενώ σε δύο περιπτώσεις (λόγω ενημέρωσης λογισμικού της Apple που απενεργοποίησε προσωρινά ορισμένες λειτουργίες) χρησιμοποιήθηκε και iPhone 15 Pro. Οι μέθοδοι σάρωσης που δοκιμάστηκαν ήταν η κλασική φωτογραμμετρία (SfM), το LiDAR και το 3D Gaussian Splatting. Ως μοντέλο αναφοράς υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιήθηκε ο φορητός σαρωτής Shining3D EinScan H2.

Επιλέχθηκαν έξι αντιπροσωπευτικά τεχνουργήματα με ποικιλία υλικών και γεωμετρικών προκλήσεων: αντίγραφο Δίσκου Φαιστού, ειδώλιο αλόγου, μπρούτζινο γουδί, ακροκέραμο, κεραμική μάσκα και τηλέφωνο Ericsson Cobra. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 52 σαρώσεις. Η επεξεργασία των μοντέλων έγινε κυρίως με τα λογισμικά CloudCompare και Blender, ενώ το Agisoft Metashape χρησιμοποιήθηκε επιλεκτικά.

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πέντε κριτήρια: γεωμετρική ακρίβεια (Cloud-to-Mesh), ποιότητα υφής, λεπτομέρεια, χρόνος επεξεργασίας και ευκολία χρήσης. Εξετάστηκε επίσης η δυνατότητα χρήσης των μοντέλων για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εφαρμογές κινητών συσκευών παράγουν αξιόπιστα μοντέλα για μη μετρικές εφαρμογές, όπως εικονικές εκθέσεις, εκπαίδευση και 3D εκτύπωση. Το RealityScan SfM και το KIRI SfM παρουσίασαν τις καλύτερες επιδόσεις σε γεωμετρική ακρίβεια, ενώ το 3D Gaussian Splatting (κυρίως σε KIRI Engine και Polycam) ξεχώρισε για τον οπτικό ρεαλισμό. Ο Shining3D EinScan H2 παρέμεινε ανώτερος σε λεπτομέρεια και σε ανακλαστικά υλικά. Η εργασία καταλήγει σε πρακτικές συστάσεις για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλογα με τον σκοπό και προτείνει υβριδικές προσεγγίσεις.

Λέξεις – Κλειδιά

3D σάρωση, φωτογραμμετρία, LiDAR, 3D Gaussian Splatting, πολιτιστική κληρονομιά, δομημένο φως, CloudCompare

«Comparative Study of Geometric Reconstruction of Artifacts Using Mobile Device Applications (Smartphones / iPhones) and a 3D Portable Structured Light Scanner»

«Marina Efthymiou»

Abstract

This diploma thesis conducts a comparative study on the geometric reconstruction of cultural heritage artefacts using mobile applications and a professional structured light 3D scanner. Specifically, three applications (RealityScan, Polycam, and KIRI Engine) were tested primarily on the iPhone 17 Pro, while in two cases the iPhone 15 Pro was also used due to a software update from Apple that temporarily disabled certain functions. The scanning methods evaluated were classic photogrammetry (SfM), LiDAR, and 3D Gaussian Splatting. The Shining3D EinScan H2 served as the high-accuracy reference scanner.

Six representative artefacts with varying materials and geometric challenges were selected: a replica of the Phaistos Disc, ceramic horse figurine, bronze mortar, acroterion, ceramic mask, and Ericsson Cobra telephone. A total of 52 scans were performed. Model processing was carried out mainly in CloudCompare and Blender, with Agisoft Metashape used selectively.

Evaluation was based on five criteria: geometric accuracy (Cloud-to-Mesh), texture quality, level of detail, processing time, and ease of use. The suitability of the models for 3D printing was also examined.

The results showed that mobile applications can produce reliable 3D models for non-metric applications such as virtual exhibitions, education, and conceptual 3D printing. RealityScan SfM and KIRI SfM demonstrated the best performance in geometric accuracy, while 3D Gaussian Splatting (mainly in KIRI Engine and Polycam) excelled in visual realism and photorealistic rendering. The Shining3D EinScan H2 remained superior in fine detail and

on reflective materials. The thesis concludes with practical recommendations for selecting the appropriate method according to the intended purpose and suggests hybrid approaches.

Keywords

3D scanning, photogrammetry, LiDAR, 3D Gaussian Splatting, cultural heritage, structured light scanner, CloudCompare

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	11
Κατάλογος Πινάκων	20
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	21
Εισαγωγή.....	22
Ψηφιακή Τεκμηρίωση Πολιτιστικής Κληρονομιάς	22
Ρόλος της Τρισδιάστατης Αποτύπωσης.....	23
Νέες Τεχνολογίες για την Τρισδιάστατη Αποτύπωση	24
Σκοπός Εργασίας.....	25
Ερευνητικά Ερωτήματα	25
1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	26
1.1 Τρισδιάστατη Ψηφιοποίηση Πολιτιστικών Αντικειμένων.....	26
1.2 Μέθοδοι Σάρωσης μέσω Κινητών Συσκευών.....	27
1.2.1 Φωτογραμμετρία και Structure from Motion.....	27
1.2.2 LiDAR σε Κινητές Συσκευές.....	29
1.2.3 3D Gaussian Splatting.....	31
1.3 Σάρωση Δομημένου Φωτός	33
1.3.1 Αρχή Λειτουργίας	33
1.3.2 Επιδόσεις και Εφαρμογές σε Πολιτιστική Κληρονομιά	33
1.3.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί.....	34
1.4 Αντίστροφη Μηχανική.....	35
2. Εξοπλισμός και Λογισμικό	38
2.1 Εφαρμογές Κινητών Συσκευών για iPhone	38
2.1.1 Polycam.....	38
2.1.2 RealityScan	39
2.1.3 KIRI Engine	40
2.2 Shining3D EinScan H2	41
2.3 Λογισμικά Επεξεργασίας	42
2.3.1 Agisoft Metashape	42
2.3.2 Blender	43
2.3.3 CloudCompare	43
3. Επιλογή Αντικειμένων και Μεθοδολογία Σάρωσης	45
3.1 Επιλογή Αντικειμένων	45
3.2 Πρωτόκολλο Σάρωσης.....	48
3.2.1 Συνθήκες Σάρωσης.....	48
3.2.2 Πρωτόκολλο Shining3D EinScan H2	50
3.2.3 Πρωτόκολλο Εφαρμογών κινητών συσκευών	52
3.2.4 Ειδικές Περιπτώσεις και Αποκλίσεις Πρωτοκόλλου	53
3.2.4.1 Κατάργηση LiDAR Object Mode στο Polycam	53

3.2.4.2 Μεταφορά σαρώσεων LiDAR του KIRI Engine σε iPhone 15 Pro.....	54
3.2.4.3 Διπλή σάρωση ακροκέραμου	54
3.2.4.4 Επεξεργασία μέσω Agisoft Metashape	54
3.3 Επεξεργασία Μοντέλων	58
3.3.1 Καταγραφή Σαρώσεων ανά Αντικείμενο.....	58
3.3.2 Εξαγωγή, Προεπεξεργασία και Επεξεργασία στο Blender	64
3.3.3 Σύγκριση στο CloudCompare	65
4. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	66
4.1 Γεωμετρική ακρίβεια	67
4.1.1 Ακροκέραμο - Αποτελέσματα C2M	69
4.1.2 Κεραμική Μάσκα - Αποτελέσματα C2M	71
4.1.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού - Αποτελέσματα C2M.....	73
4.1.4 Ειδώλιο Αλόγου - Αποτελέσματα C2M.....	75
4.1.5 Μπρούτζινο Γουδί - Αποτελέσματα C2M	77
4.1.6 Τηλέφωνο - C2M	79
4.2 Οπτική Αξιολόγηση μοντέλων.....	80
4.2.1 Γεωμετρική Ποιότητα	80
4.2.1.1 Ακροκέραμο	81
4.2.1.2 Κεραμική Μάσκα.....	82
4.2.1.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού.....	83
4.2.1.4 Ειδώλιο Αλόγου	84
4.2.1.5 Μπρούτζινο Γουδί.....	85
4.2.1.6 Τηλέφωνο	86
4.2.2 Ποιότητα Υφής.....	87
4.2.2.1 Ακροκέραμο	88
4.2.2.2 Κεραμική Μάσκα.....	89
4.2.2.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού.....	90
4.2.2.4 Ειδώλιο Αλόγου	91
4.2.2.5 Μπρούτζινο Γουδί.....	92
4.2.2.6 Τηλέφωνο	93
4.3 Ακρίβεια Κλίμακας Εφαρμογών Κινητών Συσκευών	94
4.4 Χρόνοι Σάρωσης και Επεξεργασίας.....	97
4.5 Καταλληλότητα για 3Δ Εκτύπωση	99
4.5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων	102
5. Συμπεράσματα	105
5.1 Γενικά Συμπεράσματα	105
5.2 Ευρήματα ανά Κριτήριο Αξιολόγησης	105
5.2.1 Γεωμετρική Ακρίβεια.....	105
5.2.2 Ακρίβεια Κλίμακας	106
5.2.3 Ποιότητα Υφής.....	106
5.2.4 Χρόνοι Επεξεργασίας και Ευκολία Χρήσης	107
5.2.5 Καταλληλότητα για Τρισδιάστατη Εκτύπωση.....	107
5.3 Απαντήσεις στα Ερευνητικά Ερωτήματα	107

5.4 Πρακτικές Συστάσεις	108
5.5 Περιορισμοί της Έρευνας	109
5.6 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	109
5.7 Επίλογος.....	110
Βιβλιογραφικές Αναφορές	111
Παράρτημα Α: «Φωτογραφίες διαδικασία σάρωσης»	118
Παράρτημα Β: «Πλήρη αποτελέσματα Cloud-to-Mesh ανά αντικείμενο»	121
B1 Ακροκέραμο	121
B2 Κεραμική Μάσκα	123
B3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού	126
B4 Ειδώλιο Αλόγου.....	129
B5 Μπρούτζινο Γουδί	132
Παράρτημα Γ: «Γεωμετρική ποιότητα (Solid View)»	135
Γ1 Ακροκέραμο.....	135
Γ2 Κεραμική Μάσκα.....	136
Γ3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού	137
Γ4 Ειδώλιο Αλόγου.....	138
Γ5 Μπρούτζινο Γουδί.....	139
Παράρτημα Δ: «Ποιότητα Υφής (Texture View)»	140
Δ1 Ακροκέραμο	140
Δ2 Κεραμική Μάσκα	141
Δ3 Δίσκος Φαιστού	142
Δ4 Ειδώλιο Αλόγου.....	143
Δ5 Μπρούτζινο Γουδί	144
Δ6 Τηλέφωνο	145

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Πυρκαγιά στο Εθνικό Μουσείο της Βραζιλίας (2018). Πηγή:Wikimedia Commons, φωτογραφία Felipe Milanez.	22
Εικόνα 2: Γενική ροή εργασίας τρισδιάστατης ψηφιοποίησης	26
Εικόνα 3: Από τη φωτογραφία στο νέφος σημείων: η ροή εργασίας SfM. Πηγή: Westoby et al. (2012), Fig. 3.....	28
Εικόνα 4: Οι κάμερες του iPhone 17 Pro. Ο μαύρος κύκλος (κάτω δεξιά) αντιστοιχεί στον αισθητήρα LiDAR. Πηγή: Apple Inc.	30
Εικόνα 5: Σύγκριση αποδόσεων ειδικού αλγόριθμου — 3D Gaussian Splatting (αριστερά) και μοντέλο mesh (δεξιά). Πηγή: προσωπικό αρχείο	32
Εικόνα 6: Αρχή λειτουργίας δομημένου φωτός — προβολέας, κάμερα και αντικείμενο. Πηγή: Geng (2011), Fig. 1.....	33
Εικόνα 7: Ο σαρωτής δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2. Πηγή: https://www.einscan.com	41
Εικόνα 8: Σάρωση κεραμικής μάσκας με την εφαρμογή RealityScan. Πηγή: προσωπικό αρχείο	48
Εικόνα 9: Σάρωση ακροκέραμου με την εφαρμογή KIRI Engine LiDAR Scan. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	48
Εικόνα 10: Ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του ακροκέραμου και στη βάση σάρωσης. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	50
Εικόνα 11: Ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του ακροκέραμου και στη βάση σάρωσης. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	50
Εικόνα 12:Σάρωση αντικειμένου με Shining3D EinScan H2 σε λειτουργία handheld. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	51
Εικόνα 13: Γουδί - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του RealityScan στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	55
Εικόνα 14: Τηλέφωνο - Αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του RealityScan στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	55
Εικόνα 15: Γουδί - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του Polycam στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	56
Εικόνα 16: Τηλέφωνο - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του Polycam στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	56
Εικόνα 17: Συνολική ροή εργασίας	57
Εικόνα 18: CloudCompare χάρτης Ακροκέραμο, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	69
Εικόνα 19: Ιστόγραμμα, Ακροκέραμο, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	69
Εικόνα 20: CloudCompare χάρτης Ακροκέραμο, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	70
Εικόνα 21: Ιστόγραμμα, Ακροκέραμο Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο	70
Εικόνα 22: CloudCompare χάρτης Κεραμική Μάσκα, RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	71

Εικόνα 23: Ιστόγραμμα, Κεραμική Μάσκα, RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο...	71
Εικόνα 24: CloudCompare χάρτης Κεραμική Μάσκα, KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	72
Εικόνα 25: Ιστόγραμμα, Κεραμική Μάσκα, KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο. ..	72
Εικόνα 26: CloudCompare χάρτης Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	74
Εικόνα 27: Ιστόγραμμα Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	74
Εικόνα 28: CloudCompare χάρτης Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	74
Εικόνα 29: Ιστόγραμμα Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	74
Εικόνα 30: CloudCompare χάρτης Ειδώλιο Αλόγου Polycam 3DGS . Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	75
Εικόνα 31: Ιστόγραμμα Ειδώλιο Αλόγου Polycam 3DGS . Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	75
Εικόνα 32: CloudCompare χάρτης Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	76
Εικόνα 33: Ιστόγραμμα Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	76
Εικόνα 34: CloudCompare χάρτης Μπρούτζινο Γουδί, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	77
Εικόνα 35: Ιστόγραμμα Μπρούτζινο Γουδί, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	77
Εικόνα 36: CloudCompare χάρτης Μπρούτζινο Γουδί, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	78
Εικόνα 37: Ιστόγραμμα Μπρούτζινο Γουδί, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	78
Εικόνα 38: Ακροέραμο Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	81
Εικόνα 39: Ακροέραμο KIRI Engine SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	81
Εικόνα 40: Κεραμική Μάσκα Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	82
Εικόνα 41: Κεραμική Μάσκα Polycam SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο... ..	82
Εικόνα 42: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	83
Εικόνα 43: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού Polycam SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	83
Εικόνα 44: Ειδώλιο Αλόγου Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	84
Εικόνα 45: Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	84
Εικόνα 46: Μπρούτζινο Γουδί Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	85
Εικόνα 47: Μπρούτζινο Γουδί KIRI Engine LiDAR λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	85
Εικόνα 48: Τηλέφωνο Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	86

Εικόνα 49: Ακροκέραμο ποιότητα υψής KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	88
Εικόνα 50: Ακροκέραμο ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	88
Εικόνα 51: Κεραμική Μάσκα ποιότητα υψής KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	89
Εικόνα 52: Κεραμική Μάσκα ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	89
Εικόνα 53: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού ποιότητα υψής KIRI Engine 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	90
Εικόνα 54: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	90
Εικόνα 55: Ειδώλιο Αλόγου ποιότητα υψής RealityScan SfM . Πηγή: προσωπικό αρχείο.	91
Εικόνα 56 : Ειδώλιο Αλόγου ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	91
Εικόνα 57: Μπρούτζινο Γουδί ποιότητα υψής KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	92
Εικόνα 58 : Μπρούτζινο Γουδί ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	92
Εικόνα 59: Τηλέφωνο ποιότητα υψής KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	93
Εικόνα 60: Τηλέφωνο ποιότητα υψής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	93
Εικόνα 61: Σάρωση ακροκέραμου με Shining3D EinScan H2. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες.	118
Εικόνα 62: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro κατά τη σάρωση ακροκέραμου σε White Light Mode (In Progress). Πηγή: προσωπικό αρχείο.	118
Εικόνα 63: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ευθυγράμμιση δύο sessions σάρωσης ακροκέραμου (Fixed/Floated alignment). Διακρίνονται οι δείκτες στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	118
Εικόνα 64: Σάρωση ακροκέραμου με Shining3D EinScan H2. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	119
Εικόνα 65: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ανίχνευση δεικτών στην επιφάνεια του τηλεφώνου κατά τη σάρωση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	119
Εικόνα 66: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ανίχνευση δεικτών στην επιφάνεια του ειδωλίου αλόγου κατά τη σάρωση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	119
Εικόνα 67: Στιγμιότυπο εφαρμογής KIRI Engine LiDAR — ορισμός περιοχής σάρωσης (bounding box) για ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	120
Εικόνα 68: Στιγμιότυπο εφαρμογής RealityScan — επεξεργασία εικόνων για αντίγραφο Δίσκου Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	120
Εικόνα 69: Στιγμιότυπο εφαρμογής KIRI Engine LiDAR — σάρωση σε εξέλιξη για ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	120
Εικόνα 70: Στιγμιότυπο εφαρμογής Polycam — κυκλική διάταξη θέσεων λήψης γύρω από κεραμική μάσκα (SfM mode, Analyzing Images 27%). Πηγή: προσωπικό αρχείο.	120
Εικόνα 71: C2M ακροκέραμου, Polycam SfM (1η κατάταξη, Mean: +0.054 mm, SD: 0.752 mm). Κλίμακα ±2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	121

Εικόνα 72: C2M ακροκέραμου — KIRI Engine LiDAR (2η κατάταξη, Mean: +0.272 mm, SD: 1.234 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.»	121
Εικόνα 73: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	121
Εικόνα 74: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.»	121
Εικόνα 75: C2M ακροκέραμου — KIRI Engine SfM (3η κατάταξη, Mean: -0.267 mm, SD: 1.360 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	122
Εικόνα 76: C2M ακροκέραμου — Polycam 3DGS (4η κατάταξη, Mean: +0.053 mm, SD: 1.511 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	122
Εικόνα 77: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	122
Εικόνα 78: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	122
Εικόνα 79: C2M κεραμικής μάσκας — RealityScan SfM (1η κατάταξη, Mean: -0.018 mm, SD: 0.400 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	123
Εικόνα 80: : C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine LiDAR (2η κατάταξη, Mean: -0.058 mm, SD: 0.517 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	123
Εικόνα 81: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	123
Εικόνα 82: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	123
Εικόνα 83: C2M κεραμικής μάσκας — Polycam 3DGS (3η κατάταξη, Mean: -0.092 mm, SD: 0.343 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	124
Εικόνα 84: C2M κεραμικής μάσκας — Polycam SfM (4η κατάταξη, Mean: -0.209mm, SD: 0.497 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	124
Εικόνα 85: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	124
Εικόνα 86: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	124
Εικόνα 87: C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine 3DGS (5η κατάταξη, Mean: +0.539 mm, SD: 0.763 mm). Κλίμακα ± 2 mm.	125
Εικόνα 88: C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine SfM (6η κατάταξη, Mean: +0.658 mm, SD: 1.245 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	125
Εικόνα 89: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	125
Εικόνα 90: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	125
Εικόνα 91: C2M Δίσκου Φαιστού — RealityScan SfM (1η κατάταξη, Mean: -0.045	126
Εικόνα 92: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine 3DGS (2η κατάταξη, Mean: -0.054	126
Εικόνα 93: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	126

Εικόνα 94: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	126
Εικόνα 95: C2M Δίσκου Φαιστού — Polycam 3DGS (3η κατάταξη, Mean: -0.056 mm, SD:)	127
Εικόνα 96: C2M Δίσκου Φαιστού — Polycam SfM (4η κατάταξη, Mean: -0.126 mm, SD: 0.500 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	127
Εικόνα 97: : Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	127
Εικόνα 98: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	127
Εικόνα 99: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine SfM (5η κατάταξη, Mean: -0.153 mm, SD: 0.482 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο	128
Εικόνα 100: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine LiDAR (6η κατάταξη, Mean: -0.291 mm, SD: 0.758 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	128
Εικόνα 101: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	128
Εικόνα 102: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	128
Εικόνα 103: C2M ειδωλίου αλόγου — Polycam 3DGS (1η κατάταξη, Mean: +0.016 mm, SD: 0.464 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	129
Εικόνα 104: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine 3DGS (2η κατάταξη, Mean: -0.574 mm, SD: 0.475 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	129
Εικόνα 105: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	129
Εικόνα 106: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	129
Εικόνα 107: C2M ειδωλίου αλόγου — Polycam SfM (3η κατάταξη, Mean: +0.447 mm, SD: 0.671 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	130
Εικόνα 108: : C2M ειδωλίου αλόγου — RealityScan SfM (4η κατάταξη, Mean: +0.458 mm, SD: 0.792 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	130
Εικόνα 109: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	130
Εικόνα 110: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	130
Εικόνα 111: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine SfM (5η κατάταξη, Mean: +0.460 mm, SD: 0.705 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	131
Εικόνα 112: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	131
Εικόνα 113: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine LiDAR (6η κατάταξη, Mean: +0.673..	131
Εικόνα 114: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, ειδωλίο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	131
Εικόνα 115: C2M γουδιού — Polycam SfM (1η κατάταξη, Mean: +0.024 mm, SD: 1.031 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	132

Εικόνα 116: C2M γουδιού — KIRI Engine SfM	132
Εικόνα 117: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	132
Εικόνα 118: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	132
Εικόνα 119 C2M γουδιού — KIRI Engine LiDAR (3η κατάταξη, Mean: -0.134 mm, SD: 1.102 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	133
Εικόνα 120: C2M γουδιού — KIRI Engine 3DGS (4η κατάταξη, Mean: -0.533 mm, SD: 1.212 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	133
Εικόνα 121: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	133
Εικόνα 122: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	133
Εικόνα 123: C2M γουδιού — Polycam 3DGS (5η κατάταξη, Mean: -0.569 mm, SD: 1.340 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	134
Εικόνα 124: C2M γουδιού — RealityScan SfM (εξαιρέθηκε λόγω ανεπαρκούς γεωμετρίας). Πηγή: προσωπικό αρχείο.	134
Εικόνα 125: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	134
Εικόνα 126: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	134
Εικόνα 127:: Ακροκέραμο — EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	135
Εικόνα 128: Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	135
Εικόνα 129: KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	135
Εικόνα 130: Ακροκέραμο — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	135
Εικόνα 131: RealityScan SfM, solid view Blender. Εκτεταμένες ελλείψεις στην εσωτερική κοιλότητα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	135
Εικόνα 132: Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	135
Εικόνα 133: KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	135
Εικόνα 134: EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	136
Εικόνα 135: Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	136
Εικόνα 136: RealityScan SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	136
Εικόνα 137: KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	136
Εικόνα 138: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine SfM, ...	136
Εικόνα 139: Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	136
Εικόνα 140: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	136
Εικόνα 141: Δίσκος Φαιστού — EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	137
Εικόνα 142: Δίσκος Φαιστού — RealityScan SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	137

Εικόνα 143: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine	137
Εικόνα 144: Δίσκος Φαιστού — Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	137
Εικόνα 145: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	137
Εικόνα 146: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	137
Εικόνα 147: Δίσκος Φαιστού — Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	137
Εικόνα 148: Ειδώλιο αλόγου — EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 149: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Ελλείψεις κάτω από την κοιλιά. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 150: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 151: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 152: Ειδώλιο αλόγου — Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 153: Ειδώλιο αλόγου — RealityScan SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 154: Ειδώλιο αλόγου — Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	138
Εικόνα 155: Μπρούτζινο γουδί — EinScan H2 (IR mode), solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 156: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 157: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 158: Μπρούτζινο γουδί — RealityScan SfM, solid view Blender. Ανεπαρκής γεωμετρική ανακατασκευή. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 159: Μπρούτζινο γουδί — Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 160: Μπρούτζινο γουδί — Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	139
Εικόνα 161: Ακροκέραμο — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πλουσιότερη απόδοση τερακότητας. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 162: Ακροκέραμο — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 163: Ακροκέραμο — EinScan H2, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 164: Ακροκέραμο — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140

Εικόνα 165: Ακροκέραμο — Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 166: Ακροκέραμο — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 167: Ακροκέραμο — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	140
Εικόνα 168: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender. Πιστή απόδοση πολυχρωμίας. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	141
Εικόνα 169: Κεραμική μάσκα — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	141
Εικόνα 170: Κεραμική μάσκα — EinScan H2,.....	141
Εικόνα 171: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	141
Εικόνα 172: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό	141
Εικόνα 173: Κεραμική μάσκα — Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	141
Εικόνα 174: Κεραμική μάσκα — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	141
Εικόνα 175: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Φωτορεαλιστική απόδοση ιερογλυφικών. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	142
Εικόνα 176: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 177: Δίσκος Φαιστού — EinScan H2, render με υφή Blender., Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 178: Δίσκος Φαιστού — Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 179: Δίσκος Φαιστού — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 180: Δίσκος Φαιστού — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 181: Δίσκος Φαιστού — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	142
Εικόνα 182: Ειδώλιο αλόγου — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πλουσιότερη απόδοση σκούρου χρώματος και διακοσμητικών μοτίβων. Πηγή: προσωπικό αρχείο...	143
Εικόνα 183: Ειδώλιο αλόγου — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	143
Εικόνα 184: Ειδώλιο αλόγου — EinScan H2, render με υφή Blender. Αχνή χρωματική απόδοση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	143
Εικόνα 185: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	143
Εικόνα 186: Ειδώλιο αλόγου — Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	143

Εικόνα 187: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	143
Εικόνα 188: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	143
Εικόνα 189: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender.. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 190: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 191: Μπρούτζινο γουδί — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 192: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 193: Μπρούτζινο γουδί — EinScan H2 (IR mode), render με υφή Blender. Αχνότερη χρωματική απόδοση λόγω ανακλαστικής επιφάνειας. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	144
Εικόνα 194: Μπρούτζινο γουδί — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 195: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	144
Εικόνα 196: Τηλέφωνο— KIRI Engine LiDAR (iPhone 15 Pro), render με υφή Blender. Αποδίδεται το κόκκινο χρώμα με μειωμένη ανάλυση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	145
Εικόνα 197: Τηλέφωνο— Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	145
Εικόνα 198: Τηλέφωνο— EinScan H2 (IR mode), render με υφή Blender. Φωτεινή πορτοκαλί απόχρωση αντί πραγματικού βαθύ κόκκινου, λόγω ανακλαστικής επιφάνειας. Πηγή: προσωπικό αρχείο.	145
Εικόνα 199: Τηλέφωνο— Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	145
Εικόνα 200: Τηλέφωνο— KIRI Engine 3DGS ., render με υφή Blender. Αναγνωρίσιμη γεωμετρία. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	145
Εικόνα 201: Τηλέφωνο— KIRI Engine SfM ., render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.....	145

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αντικείμενα μελέτης και κύριες προκλήσεις σάρωσης.....	47
Πίνακας 2: Καταγραφή σαρώσεων Ακροκέραμου.....	59
Πίνακας 3: Καταγραφή σαρώσεων Κεραμικής Μάσκας.....	60
Πίνακας 4: Καταγραφή σαρώσεων Αντίγραφου Δίσκου Φαιστού.....	61
Πίνακας 5: Καταγραφή σαρώσεων Ειδωλίου Αλόγου.....	62
Πίνακας 6: Καταγραφή σαρώσεων Μπρούτζινου Γουδιού.....	63
Πίνακας 7: Καταγραφή σαρώσεων Τηλεφώνου.....	64
Πίνακας 8 Αποτελέσματα C2M – Ακροκέραμο.....	69
Πίνακας 9: Αποτελέσματα C2M – Κεραμική Μάσκα.....	71
Πίνακας 10 : Αποτελέσματα C2M – Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού.....	73
Πίνακας 11: Αποτελέσματα C2M – Ειδώλιο Αλόγου.....	75
Πίνακας 12: Αποτελέσματα C2M – Μπρούτζινο Γουδί.....	77
Πίνακας 13: Σχετική απόκλιση ύψους.....	94
Πίνακας 14: Μέσοι χρόνοι ανά μέθοδο.....	97
Πίνακας 15: Αποτελέσματα ελέγχου εκτυπωσιμότητας.....	100

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΠΕ	Πτυχιακή Εργασία
ΠΣ	Πρόγραμμα Σπουδών
ΣΥΝ	Συντονιστής/Συντονίστρια
3DGS	3D Gaussian Splatting
NeRF	Neural Radiance Fields
TLS	Terrestrial Laser Scanner
AR	Augmented Reality
C2M	Cloud-to-Mesh
CAD	Computer-Aided Design
ICP	Iterative Closest Point
LiDAR	Light Detection and Ranging
MVS	Multi-View Stereo
OBJ	Wavefront Object
PLY	Polygon File Format
SfM	Structure from Motion
SLA	Stereolithography
STL	Standard Tessellation Language
VR	Virtual Reality

Εισαγωγή

Ψηφιακή Τεκμηρίωση Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Τα ιστορικά αντικείμενα και τα μνημεία που μας έχουν κληροδοτήσει οι προηγούμενες γενιές αποτελούν πολύτιμη κληρονομιά για ολόκληρη την ανθρωπότητα. Ωστόσο, ο χρόνος, οι φυσικές καταστροφές αλλά και η ανθρώπινη αμέλεια μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες απώλειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πυρκαγιά του 2018 στο Εθνικό Μουσείο της Βραζιλίας (Εικόνα 1), κατά την οποία καταστράφηκαν περισσότερα από 20 εκατομμύρια αντικείμενα (*UNESCO Emergency Mission to Rio de Janeiro Helps Guide Global Efforts*, n.d.). Αντίστοιχα, το Εθνικό Μουσείο του Ιράκ στη Βαγδάτη λεηλατήθηκε το 2003, με αποτέλεσμα την απώλεια χιλιάδων αρχαιοτήτων σημαντικής ιστορικής αξίας (UNESCO, 2003). Παράλληλα, η καταστροφή των αγαλμάτων του Βούδα του Μπαμιγιάν στο Αφγανιστάν το 2001 ανέδειξε τη σημασία της τεκμηρίωσης και της ψηφιακής διατήρησης μνημείων που πλήττονται από πολεμικές συγκρούσεις (UNESCO, 2003).



Εικόνα 1: Πυρκαγιά στο Εθνικό Μουσείο της Βραζιλίας (2018). Πηγή: Wikimedia Commons, φωτογραφία Felipe Milanez.

Παρόμοια παραδείγματα, από την καταστροφή αρχαίων μνημείων ως τις φθορές σε μεσαιωνικά κάστρα και ναούς σε ολόκληρη την Ευρώπη, δείχνουν πόσο εύθραυστη είναι η πολιτιστική κληρονομιά. Στο πλαίσιο αυτό διεθνείς οργανισμοί όπως η UNESCO και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχουν εντάξει την ψηφιακή τεκμηρίωση στις επίσημες στρατηγικές τους για την προστασία της παγκόσμιας κληρονομιάς (European Commission, 2020). Στο ίδιο πλαίσιο, ο Χάρτης του Λονδίνου για την Υπολογιστική Οπτικοποίηση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς (London Charter, 2009) θέτει διεθνώς αναγνωρισμένες αρχές για την ποιότητα και τη διαφάνεια των ψηφιακών αναπαραστάσεων αντικειμένων και μνημείων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών ψηφιακής τεκμηρίωσης δεν περιορίζεται μόνο σε μεγάλης κλίμακας μνημεία. Οι Bruno et al.(2010) παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα εικονικής έκθεσης αρχαιολογικών ευρημάτων μικρής κλίμακας από την Καλαβρία της Ιταλίας, αξιοποιώντας σαρωτή δομημένου φωτός και φωτογραμμετρία για την ανακατασκευή 25 αντικειμένων από διάφορα υλικά όπως χαλκό, γυαλί, πηλό και ασήμι. Η εργασία αυτή έδειξε ότι ακόμη και δύσκολα υλικά, όπως οι ανακλαστικές μεταλλικές επιφάνειες, μπορούν να αντιμετωπιστούν με συνδυασμό τεχνικών σάρωσης.

Ρόλος της Τρισδιάστατης Αποτύπωσης

Από όλες τις μεθόδους ψηφιακής τεκμηρίωσης, η τρισδιάστατη (3Δ) αποτύπωση κατέχει ιδιαίτερα σημαντική θέση, καθώς επιτρέπει την πλήρη καταγραφή της γεωμετρίας ενός αντικειμένου. Μια φωτογραφία χάνει το βάθος, μια ανάγλυφη διακόσμηση ή μια ακριβής καμπύλη δεν αποτυπώνονται σε δύο διαστάσεις. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο αποτυπώνει τη γεωμετρία, τις διαστάσεις και την επιφανειακή υφή ενός αντικειμένου (Remondino, 2011). Μπορεί να μετρηθεί, να αναλυθεί και να αναπαραχθεί χωρίς να αγγιχθεί το πρωτότυπο. Χρησιμοποιείται για εικονικές εκθέσεις, επιστημονική ανάλυση, εκπαίδευση καθώς και για την τρισδιάστατη εκτύπωση αντιγράφων (Bruno et al., 2010; Kantaros et al., 2023).

Νέες Τεχνολογίες για την Τρισδιάστατης Αποτύπωση

Παραδοσιακά, η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων βασιζόταν σε εξειδικευμένες τεχνολογίες, όπως οι σαρωτές δομημένου φωτός, οι οποίοι προσφέρουν υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και δυνατότητα αποτύπωσης λεπτομερειών μικρής κλίμακας (Geng, 2011). Ωστόσο, το κόστος αυτών των συστημάτων περιορίζει τη χρήση τους, καθιστώντας τα απρόσιτα για μικρούς φορείς και αρχαιολογικές αποστολές πεδίου.

Η εξέλιξη των έξυπνων τηλεφώνων έχει εισαγάγει νέες δυνατότητες στον τομέα της τρισδιάστατης αποτύπωσης. Εφαρμογές που βασίζονται στη φωτογραμμετρία επιτρέπουν τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με χρήση απλών φωτογραφιών, αξιοποιώντας μεθόδους όπως η Structure from Motion (SfM)¹ (Westoby et al., 2012). Παράλληλα, η ενσωμάτωση αισθητήρων με δέσμη λέιζερ (Light Detection and Ranging, LiDAR)² σε σύγχρονες συσκευές επιτρέπει τη συλλογή πληροφορίας βάθους σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της γεωμετρικής αποτύπωσης (Luetzenburg et al., 2021). Επιπλέον, νέες τεχνικές όπως το 3D Gaussian Splatting (3DGS)³ προτείνουν εναλλακτικούς τρόπους αναπαράστασης τρισδιάστατων σκηνών, προσφέροντας υψηλό επίπεδο οπτικού ρεαλισμού, αν και η γεωμετρική τους ακρίβεια εξακολουθεί να διερευνάται (Kerbl et al., 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, οι Montusiewicz et al. (2026) δημοσίευσαν μελέτη που συγκρίνει απευθείας την αποτύπωση μουσειακών αντικειμένων με χρήση iPhone LiDAR και σαρωτή δομημένου φωτός, σε τρία αντικείμενα από τη συλλογή Δρόμου του Μεταξίου του μουσείου του Samarkand State University. Χρησιμοποίησαν iPhone 16 Pro Max με την εφαρμογή Scaniverse και κατέληξαν ότι τα μοντέλα LiDAR από κινητό συσκευή είναι ελλιπή και ακατάλληλα για αρχειακή τεκμηρίωση, παραμένουν όμως κατάλληλα για εφαρμογές προβολής και ψηφιακού τουρισμού, χάρη στην ταχύτητα παραγωγής τους. Στην

¹ Structure from Motion (SfM): Φωτογραμμετρική τεχνική ανακατασκευής που βασίζεται στην ανίχνευση και αντιστοίχιση κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ πολλαπλών εικόνων για την παραγωγή τρισδιάστατης γεωμετρίας.

² LiDAR (Light Detection and Ranging): Τεχνολογία αποτύπωσης που χρησιμοποιεί παλμούς λέιζερ για τον υπολογισμό αποστάσεων και τη δημιουργία τρισδιάστατης πληροφορίας βάθους.

³ 3D Gaussian Splatting (3DGS): Μέθοδος αναπαράστασης τρισδιάστατων σκηνών που χρησιμοποιεί Gaussian primitives για φωτορεαλιστική απόδοση και γρήγορη οπτικοποίηση.

παρούσα εργασία αξιοποιείται η συσκευή iPhone 17 Pro, δοκιμάζοντας τρεις εφαρμογές ταυτόχρονα και εισάγοντας το 3DGS ως τρίτη μέθοδο αξιολόγησης.

Σκοπός Εργασίας

Σκοπός είναι η συγκριτική μελέτη γεωμετρικής ανακατασκευής τεχνουργημάτων μέσω τριών εφαρμογών για iPhone 17 Pro και φορητού σαρωτή δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2. Οι εφαρμογές δοκιμάζονται με τις διαθέσιμες ανά εφαρμογή μεθόδους: SfM, LiDAR και 3DGS. Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει 52 σαρώσεις με κινητή συσκευή και 6 με τον EinScan H2. Στόχος δεν είναι να αποδειχθεί η υπεροχή μιας μεθόδου, αλλά να δοθούν τεκμηριωμένες κατευθύνσεις ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περίπτωσης.

Ερευνητικά Ερωτήματα

Πρώτον, σε ποιο βαθμό οι εφαρμογές για iPhone 17 Pro μπορούν να παράγουν αξιόπιστα τρισδιάστατα μοντέλα.

Δεύτερον, ποιες είναι οι ουσιαστικές διαφορές ως προς τη γεωμετρική ακρίβεια, την ποιότητα υφής και τη λεπτομέρεια μεταξύ εφαρμογών κινητών συσκευών και του σαρωτή δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2.

Τρίτον, σε ποιο βαθμό τα παραγόμενα μοντέλα είναι κατάλληλα για τρισδιάστατη εκτύπωση και αντίστροφη μηχανική.

1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Τρισδιάστατη Ψηφιοποίηση Πολιτιστικών Αντικειμένων

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί τη διαδικασία μετατροπής ενός φυσικού αντικειμένου σε ψηφιακό μοντέλο, με στόχο την ακριβή καταγραφή της γεωμετρίας, των διαστάσεων και της πληροφορίας του. Το αποτέλεσμα είναι ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί, να υποστεί επεξεργασία, να αναλυθεί αλλά και να αναπαραχθεί.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, η διαδικασία ακολουθεί συνήθως τα ίδια βήματα. Αρχικά δημιουργείται ένα νέφος σημείων (point cloud)⁴, το οποίο περιγράφει την επιφάνεια του αντικειμένου μέσω συντεταγμένων (X,Y,Z). Στη συνέχεια δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα (mesh)⁵ και τέλος εφαρμόζεται η χρωματική πληροφορία (texture mapping)⁶. Κάθε βήμα επηρεάζει την τελική ποιότητα (Remondino, 2011) (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Γενική ροή εργασίας τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες σε βιομηχανικές εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής καθώς και στην ιατρική. Αυτό που άλλαξε τα τελευταία χρόνια είναι η εφαρμογή της σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, ένα πεδίο που παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις.

Στη βιομηχανία τα αντικείμενα είναι συνήθως νέα, ομοιόμορφα και κατασκευασμένα με ακρίβεια. Αντίθετα, τα αρχαία τεχνουργήματα είναι συχνά ανομοιόμορφα, φθαρμένα και

⁴ Νέφος σημείων (point cloud): Σύνολο τρισδιάστατων σημείων με συντεταγμένες X, Y, Z που περιγράφουν τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός αντικειμένου.

⁵ Mesh: Δομή πολυγώνων, που συνδέει τα σημεία του point cloud και δημιουργεί μια επιφάνεια.

⁶ Texture mapping: Διαδικασία εφαρμογής χρωματικής πληροφορίας πάνω στο τρισδιάστατο πλέγμα.

ευαίσθητα. Πολλά δεν επιτρέπουν μετακίνηση ή άγγιγμα, καθιστώντας τη σάρωση πλήρως μη επεμβατική. Οι ιδιαιτερότητες αυτές καθιστούν κρίσιμη την επιλογή της μεθόδου.

Οι κύριες εφαρμογές στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: α) τεκμηρίωση και αρχειοθέτηση μέσω δημιουργίας ψηφιακού αντιγράφου για μελλοντική αναφορά και αποκατάσταση, β) παρουσίαση και εκπαίδευση μέσω εικονικών εκθέσεων και διαδραστικών εφαρμογών που επιτρέπουν πρόσβαση σε αντικείμενα που δεν μπορούν να εκτεθούν (Bruno et al., 2010) και γ) παραγωγή φυσικών αντιγράφων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τα τελευταία χρόνια τόσο για εκθεσιακούς όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς (Kantaros et al., 2023).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή λογισμικού επεξεργασίας παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο με την επιλογή συσκευής σάρωσης. Συγκριτικές μελέτες δείχνουν σημαντικές διαφορές ποιότητας μεταξύ λογισμικών φωτογραμμετρίας, ακόμα και για τα ίδια δεδομένα εισόδου (Kingsland, 2020). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν το Agisoft Metashape, CloudCompare και Blender, τρία συμπληρωματικά εργαλεία που καλύπτουν διαφορετικά στάδια της ροής επεξεργασίας.

1.2 Μέθοδοι Σάρωσης μέσω Κινητών Συσκευών

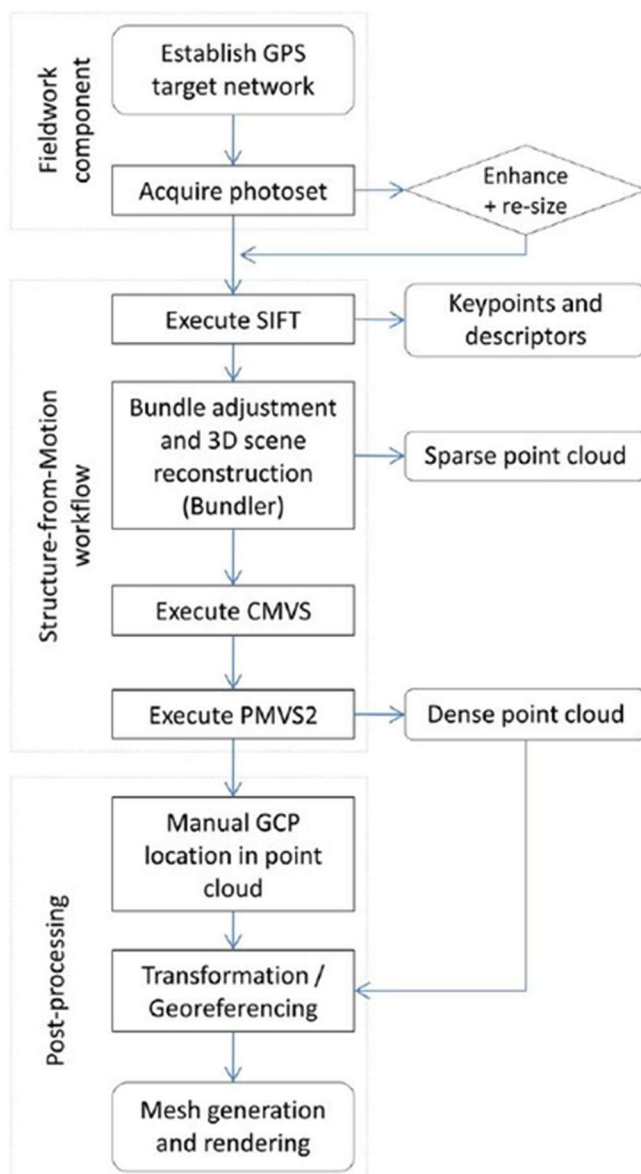
Η γρήγορη ανάπτυξη των κινητών συσκευών έφερε την τρισδιάστατη αποτύπωση σε ευρύ κοινό. Στις σύγχρονες κινητές συσκευές είναι διαθέσιμες τρεις τεχνολογίες: SfM, το LiDAR και το 3DGS.

1.2.1 Φωτογραμμετρία και Structure from Motion

Η φωτογραμμετρία⁷ είναι η παλαιότερη αλλά εξακολουθεί να είναι ισχυρή τεχνολογία. Στη σύγχρονη μορφή της, βασίζεται σε έναν αλγόριθμο γνωστό ως Structure from Motion (SfM), ο οποίος αναλύει σειρά επικαλυπτόμενων φωτογραφιών και υπολογίζει ταυτόχρονα τη θέση κάθε κάμερας και τη τρισδιάστατη γεωμετρία του αντικειμένου. Το δεύτερο στάδιο

⁷ Φωτογραμμετρία: Τεχνική εξαγωγής γεωμετρικής πληροφορίας από φωτογραφίες.

είναι το Multi View Stereo (MVS)⁸, το οποίο πυκνώνει το αρχικό νέφος σημείων (Westoby et al., 2012). Ο Rahaman (2021) περιγράφει τη φωτογραμμετρία ως μια από τις πιο προσιτές και ευρέως εφαρμόσιμες τεχνολογίες ψηφιοποίησης στην πολιτιστική κληρονομιά, υπογραμμίζοντας ότι η ευκολία χρήσης της από μη ειδικούς αποτελεί βασικό της πλεονέκτημα.



Εικόνα 3: Από τη φωτογραφία στο νέφος σημείων: η ροή εργασίας SfM. Πηγή: Westoby et al. (2012), Fig. 3.

⁸ Multi View Stereo (MVS): μέθοδος πυκνής ανακατασκευής που παράγει λεπτομερές νέφος σημείων από πολλαπλές εικόνες.

Ο χρήστης φωτογραφίζει ένα αντικείμενο από πολλές γωνίες λήψης και το λογισμικό πραγματοποιεί την ανακατασκευή. Δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ή ελεγχόμενο περιβάλλον, γεγονός που την καθιστά ιδανική για πεδίο και μικρούς φορείς. Ωστόσο, η ποιότητα εξαρτάται από τον αριθμό και την κατανομή των φωτογραφιών, τον φωτισμό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Αντικείμενα με ομοιόμορφο χρώμα ή λεία ανακλαστική επιφάνεια δυσκολεύουν τον αλγόριθμο να εντοπίσει αρκετά χαρακτηριστικά σημεία για αξιόπιστη ανακατασκευή (Remondino, 2011). Αυτός είναι και ένας σημαντικός περιορισμός για ορισμένες κατηγορίες αρχαιολογικών αντικειμένων, όπως μεταλλικά εργαλεία ή γυαλισμένη κεραμική.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτογραμμετρία παρέχει γενικά ανώτερη ποιότητα υφής (texture) σε σχέση με άλλες μεθόδους, αφού βασίζεται εξ ολοκλήρου σε φωτογραφικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για αντικείμενα με πλούσια χρωματική πληροφορία.

1.2.2 LiDAR σε Κινητές Συσκευές

Με την ενσωμάτωση αισθητήρα LiDAR στο iPhone 12 Pro το 2020 για πρώτη φορά, μια κινητή συσκευή απέκτησε τη δυνατότητα απευθείας μέτρησης αποστάσεων ανεξάρτητα από τα οπτικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Ο αισθητήρας LiDAR δεν αντικαθιστά τη φωτογραμμετρία αλλά λειτουργεί συμπληρωματικά. Η φωτογραμμετρία παρέχει πλούσια χρωματική πληροφορία ενώ ο LiDAR παρέχει γεωμετρική δομή ακόμα και σε δύσκολες επιφάνειες για φωτογραμμετρία.

Η αξιολόγηση του iPhone 12 Pro LiDAR έδειξε ακρίβεια ± 1 cm για μικρά αντικείμενα σε συνθήκες ελεγχόμενου εργαστηρίου, αρκετά καλύτερη από ό,τι αναμενόταν από μια καταναλωτική συσκευή (Luetzenburg et al., 2021).

Οι Ulvi & Hamal(2025), έδειξαν ότι η συνύπαρξη LiDAR με SfM δίνει σταθερά καλύτερα αποτελέσματα από οποιαδήποτε μέθοδο μόνη της για τεκμηρίωση πολιτιστικής κληρονομιάς, αξιοποιώντας έτσι τα πλεονεκτήματα κάθε τεχνολογίας και αντισταθμίζοντας τους περιορισμούς της. Αυτό ακριβώς κάνει η λειτουργία LiDAR των εφαρμογών κινητών συσκευών: συνδυάζει γεωμετρικά δεδομένα βάθους με φωτογραφική πληροφορία υφής.

Αντίστοιχα ευρήματα αποδεκτής ακρίβειας για μικρής κλίμακας αντικείμενα επιβεβαιώνονται και από τους Darisa et al.(2025). Ομοίως, οι Abdel-Majeed et al.(2024) συνέκριναν τον αισθητήρα LiDAR του iPhone με επαγγελματικό επίγειο σαρωτή laser (TLS) σε εσωτερικούς χώρους, διαπιστώνοντας αποδεκτή ακρίβεια σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, εύρημα που επιβεβαιώνει ότι το LiDAR του iPhone είναι κατάλληλο για μικρά αντικείμενα όπως αυτά της παρούσας μελέτης. Ο Paukkonen (2023) έδειξε ότι το iPhone 12 Pro αποτελεί πρακτικό εργαλείο αρχαιολογικής τεκμηρίωσης ακόμα και χωρίς τεχνική εξειδίκευση.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με iPhone 17 Pro⁹. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία βασίζεται σε δοκιμές με iPhone 12 Pro και iPhone 13 Pro στις οποίες εισήχθη και εδραιώθηκε η χρήση της τεχνολογίας LiDAR (Εικόνα 4) σε καταναλωτικές συσκευές (Apple Introduces iPhone 12 Pro and iPhone 12 Pro Max with 5G, n.d.). Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στη μέτρηση αποστάσεων για την παραγωγή δεδομένων βάθους, τα οποία σε συνδυασμό με



Εικόνα 4: Οι κάμερες του iPhone 17 Pro. Ο μαύρος κύκλος (κάτω δεξιά) αντιστοιχεί στον αισθητήρα LiDAR. Πηγή: Apple Inc.

δεδομένα εικόνας οδηγούν στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με γεωμετρία και υφή (Luetzenburg et al., 2021). Αν και δεν τεκμηριώνεται ουσιώδης διαφοροποίηση στο υλικό του αισθητήρα, οι νεότερες συσκευές διαθέτουν ισχυρότερους επεξεργαστές και βελτιωμένους αλγόριθμους επεξεργασίας βάθους και συνδυασμού δεδομένων εικόνας και LiDAR (Apple Inc, n.d.).

⁹ Η συσκευή δεν έχει ακόμη αξιολογηθεί στη βιβλιογραφία.

1.2.3 3D Gaussian Splatting

Το 3DGS είναι η νεότερη και πιο εντυπωσιακή τεχνολογία που εξετάζεται. Εισήχθη το 2023 από τους Kerbl et al.(2023) και αντιπροσωπεύει μια ριζική αλλαγή στον τρόπο αναπαράστασης τρισδιάστατων σκηνών. Αντί για παραδοσιακό επιφανειακό πλέγμα από τρίγωνα, το 3DGS αναπαριστά τη σκηνή ως σύνολο εκατομμυρίων γκαουσιανών κατανομών (Gaussian primitives) που έχουν θέση, μέγεθος, σχήμα, χρώμα και διαφάνεια. Κάθε γκαουσιανή αντιστοιχεί περίπου σε ένα μικρό κομμάτι επιφάνειας αντικειμένου.

Η διαδικασία δημιουργίας 3DGS μοντέλου ξεκινά από νέφος σημείων SfM και βελτιστοποιεί επαναληπτικά τις παραμέτρους κάθε γκαουσιανής ώστε οι αποδόσεις από διαφορετικές οπτικές γωνίες να ταιριάζουν με τις πραγματικές φωτογραφίες εισόδου. Το αποτέλεσμα είναι ρεαλιστικές αποδόσεις σε πραγματικό χρόνο ($\geq 30\text{fps}$ σε 1080p) επίδοση ανταγωνιστική σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα με επιφανειακό πλέγμα (Kerbl et al., 2023). Η υπεροχή αυτή στην οπτική ποιότητα καθιστά το 3DGS ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές παρουσίασης και εικονικών εκθέσεων.

Η πρώτη εφαρμογή 3DGS σε αντικείμενο πολιτιστικής κληρονομιάς, ένα κατεστραμμένο αιγυπτιακό άγαλμα Πτολεμαϊκής βασίλισσας, έδωσε αποτελέσματα με συγκρίσιμη γεωμετρική ακρίβεια σε σχέση με την παραδοσιακή φωτογραμμετρία, αλλά με σαφή υπεροχή στην οπτική ποιότητα για διαδικτυακές εφαρμογές (Khedr et al., 2025). Πρόσφατες μελέτες επιβεβαιώνουν την αξία του 3DGS για την πολιτιστική κληρονομιά: οι Lee et al. (2025) απέδειξαν ενισχυμένη τεκμηρίωση αντικειμένων με εντυπωσιακή οπτική λεπτομέρεια. Οι Carmeliti & Marziali (2026) συνέκριναν φωτογραμμετρία, NeRF και 3DGS σε εφαρμογές αποκατάστασης πολιτιστικής κληρονομιάς, διαπιστώνοντας ότι το 3DGS υπερέχει οπτικά, ενώ η φωτογραμμετρία παραμένει η πιο αξιόπιστη για γεωμετρικές μετρήσεις. Ωστόσο, η τεχνολογία έχει και περιορισμούς. Η γεωμετρική ακρίβεια σε μικρές

λεπτομέρειες όπως εγχαραγμένα σύμβολα και η ανάγλυφη διακόσμηση, δεν έχει μελετηθεί εξαντλητικά για αρχαιολογικές εφαρμογές.



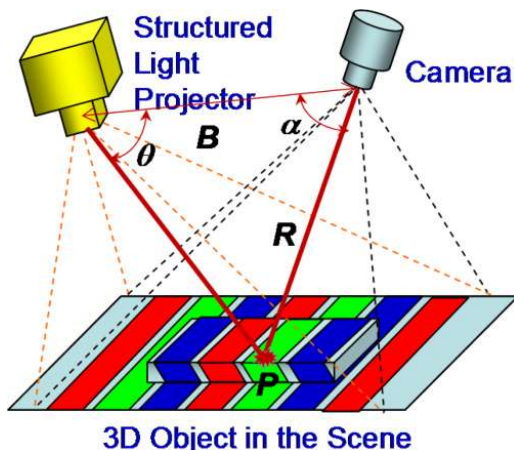
Εικόνα 5: Σύγκριση αποδόσεων ειδωλίου αλόγου — 3D Gaussian Splatting (αριστερά) και μοντέλο mesh (δεξιά). Πηγή: προσωπικό αρχείο

Το 3DGS τείνει να εξομαλύνει λεπτές λεπτομέρειες που δεν αναπαρίστανται επαρκώς στις φωτογραφίες εισόδου (Εικόνα 5). Επιπλέον, το αρχείο 3DGS δεν είναι πλέγμα και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τρισδιάστατη εκτύπωση, απαιτώντας μετατροπή. Η παρούσα εργασία αναμένεται να αξιολογήσει αυτούς τους περιορισμούς εμπειρικά.

1.3 Σάρωση Δομημένου Φωτός

1.3.1 Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας ενός σαρωτή δομημένου φωτός (structured light)¹⁰ βασίζεται στην προβολή γνωστών φωτεινών μοτίβων στην επιφάνεια ενός αντικειμένου και στην καταγραφή της παραμόρφωσής τους από κάμερα, μέσω της οποίας υπολογίζεται η



Εικόνα 6: Αρχή λειτουργίας δομημένου φωτός — προβολέας, κάμερα και αντικείμενο. Πηγή: Geng (2011), Fig. 1

τρισδιάστατη γεωμετρία της επιφάνειας με υψηλή ακρίβεια (Zhou et al., 2024).

Ο Geng (2011) παρουσιάζει αναλυτικά τα διαφορετικά μοτίβα δομημένου φωτός: δυαδικά μοτίβα (binary patterns), Κώδικας Gray (Gray code), ημιτονοειδής προβολή fringe (sinusoidal fringe projection) και τυχαία στίγματα (random speckle). Κάθε τύπος έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ακρίβειας, ταχύτητας και ανθεκτικότητας σε θόρυβο.

1.3.2 Επιδόσεις και Εφαρμογές σε Πολιτιστική Κληρονομιά

Η μέθοδος δομημένου φωτός έχει τεκμηριωμένη εφαρμογή σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Μελέτη σε ιστορικές ενδυμασίες του 19^{ου} αιώνα αξιοποίησε σάρωση δομημένου φωτός για να καταγράψει λεπτομέρειες υφάσματος της τάξης του χιλιοστού, λεπτομέρειες που είναι αδύνατο να καταγραφούν με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο (Montusiewicz et al., 2021). Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αποδεικνύει ότι για αντικείμενα με ιδιαίτερα λεπτή ανάγλυφη υφή, μόνο ένας επαγγελματικός σαρωτής μπορεί να παρέχει πλήρη αποτύπωση.

Η πιο άμεσα συναφής μελέτη με την παρούσα έρευνα είναι αυτή των Melendreras Ruiz et al. (2021), οι οποίοι συνέκριναν φωτογραμμετρία, TLS και σαρωτή δομημένου φωτός

¹⁰ Structured light: Τεχνολογία τρισδιάστατης σάρωσης που βασίζεται στην προβολή φωτεινών μοτίβων πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου και στην ανάλυση της παραμόρφωσής τους για τον υπολογισμό της γεωμετρίας του.

(Artec Eva) σε ισπανικό μπαρόκ άγαλμα. Ο σαρωτής δομημένου φωτός παρείχε τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια και τη χαμηλότερη γεωμετρική απόκλιση, αν και απαιτούσε τον μεγαλύτερο χρόνο και εμπειρία. Αντίθετα, η φωτογραμμετρία ήταν ευκολότερη στη χρήση. Αυτή η συγκριτική αξιολόγηση είναι ακριβώς το ερώτημα που εξετάζει και η παρούσα εργασία, με τη διαφορά ότι εδώ συμπεριλαμβάνεται και τρίτη τεχνολογία, το 3DGS.

Ο Diara (2023) πραγματοποίησε λεπτομερή μετρολογική ανάλυση σαρωτών δομημένου φωτός (Artec Micro & Space Spider) σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, με αποτέλεσμα ακρίβειας 0,05 – 0,1 mm. Η επιλογή του κατάλληλου σαρωτή ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου αποδείχθηκε καθοριστική παράμετρος.

Σημαντική αναφορά για την παρούσα εργασία αποτελεί η μελέτη των Montusiewicz et al. (2026), οι οποίοι δημοσίευσαν στο περιοδικό Applied Sciences μια σύγκριση μεταξύ iPhone 16 Pro Max (με εφαρμογή Scaniverse) και σαρωτή δομημένου φωτός σε μουσειακά αντικείμενα. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι τα μοντέλα LiDAR των κινητών συσκευών είναι ελλιπή και ακατάλληλα για αρχειακή τεκμηρίωση και είναι κατάλληλα μόνο για σκοπούς προβολής και εικονικές εκθέσεις. Η παρούσα εργασία επεκτείνει αυτή τη γνώση χρησιμοποιώντας iPhone 17 Pro, τρεις εφαρμογές και την προσθήκη 3DGS.

1.3.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Τα πλεονεκτήματα των σαρωτών δομημένου φωτός είναι σαφή: ακρίβεια 0,05 – 0,1 mm σημαντικά υψηλότερη από αυτή που επιτυγχάνουν οι κινητές συσκευές στη βιβλιογραφία, σταθερά αποτελέσματα ανεξάρτητα από τον χρήστη, και ολοκληρωμένη ροή εργασίας από τη σάρωση έως το τελικό μοντέλο μέσω του λογισμικού EXScan για το EinScan H2. Ο σαρωτής επιστρέφει ήδη επεξεργασμένο νέφος σημείων, όπου έχει αφαιρεθεί εσωτερικά ο θόρυβος, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο μετα-επεξεργασίας (“Hybrid LED & Infrared Light Handheld 3D Scanner EinScan H2,” 2024).

Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις: η εξάρτηση από συνθήκες φωτισμού, η ευαισθησία σε ανακλαστικά ή σκούρα υλικά και η ανάγκη εξειδικευμένης εκπαίδευσης αποτελούν εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση, ιδιαίτερα από μικρούς φορείς με περιορισμένους πόρους (Iakovaki et al., 2026).

Επιπλέον, το κόστος αγοράς (αρκετές χιλιάδες ευρώ) έρχεται σε αντίθεση με τις δωρεάν ή χαμηλού κόστους εφαρμογές κινητών συσκευών. Η ευαισθησία σε ανακλαστικές (μεταλλικά αντικείμενα), διαφανείς (γυαλί, κρύσταλλος) και πολύ σκούρες επιφάνειες, υλικά που συναντώνται συχνά σε αρχαία τεχνουργήματα, αποτελεί επίσης σοβαρό μειονέκτημα. Τέλος, ο σαρωτής δεν είναι κατάλληλος για εξωτερικό περιβάλλον, όπως αρχαιολογικά πεδία, χωρίς τις κατάλληλες υποδομές.

Οι Williams et al.(2024) πρότειναν μια οργανωμένη μεθοδολογία για τρισδιάστατη σάρωση αρχαιολογικών αντικειμένων με σαρωτή δομημένου φωτός, καλύπτοντας τα βασικά βήματα από την προετοιμασία του αντικειμένου και του φωτισμού έως την επεξεργασία, τη συγχώνευση και την εξαγωγή του μοντέλου. Οι Iakovaki et al.(2026) εντόπισαν τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ψηφιοποίηση με σαρωτή δομημένου φωτός: ανακλαστικές επιφάνειες, σκούρα υλικά, σύνθετη γεωμετρία και συνθήκες φωτισμού. Για τις ανακλαστικές επιφάνειες μπορεί να γίνει χρήση ειδικού σπρέι σάρωσης. Οι Boehler et al. (2003) κατέδειξαν ότι ένα λεπτό ματ στρώμα σπρέι σάρωσης εξαλείφει αποτελεσματικά τις ανακλάσεις χωρίς μετρήσιμη επίδραση στη γεωμετρική ακρίβεια, εφόσον παραμένει ομοιόμορφο και λεπτότερο των 5 μm .

1.4 Αντίστροφη Μηχανική

Φανταστείτε ένα αγγείο του 5^{ου} αιώνα π.Χ. με σπασμένο χείλος. Στόχος είναι η ανακατασκευή του τμήματος που λείπει, όχι μέσω υποθετικής σχεδίασης αλλά μέσω αξιοποίησης της υπάρχουσας γεωμετρίας του. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη σάρωση της επιφάνειας, την παραγωγή νέφους σημείων και την μετατροπή του σε ψηφιακό μοντέλο CAD, από το οποίο μπορεί να εξαχθεί η μορφή του τμήματος που λείπει μέσω της συμμετρίας ή της γεωμετρικής προσαρμογής (Αζαριάδης-Τοπάλογλου et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή ορίζεται ως αντίστροφη μηχανική, δηλαδή η ανακατασκευή του σχεδιασμού ενός αντικειμένου με αφετηρία το ίδιο το αντικείμενο.

Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής από δεδομένα τρισδιάστατης αποτύπωσης περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας. Το αρχικό νέφος σημείων περιέχει θόρυβο, ασυνέχειες και σφάλματα μέτρησης, τα οποία απαιτούν φιλτράρισμα και εξομάλυνση. Στη

συνέχεια πραγματοποιείται ευθυγράμμιση πολλαπλών λήψεων (registration)¹¹ και κατασκευή επιφανειακού πλέγματος (mesh reconstruction)¹², ενώ στο τελικό στάδιο το πλέγμα μετατρέπεται σε επιφάνειες τανυστικού γινομένου τύπου B-Splines ή NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), ώστε να είναι δυνατή η γεωμετρική ανάλυση και παραγωγή νέων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και περιλαμβάνει επιλογές που επηρεάζουν την ακρίβεια του τελικού μοντέλου (Αζαριάδης-Τοπάλογλου et al., 2023).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αντίστροφη μηχανική δεν αποτελεί πρωταρχικό στόχο της ανάλυσης, ούτε τα αντικείμενα της μελέτης επιλέχθηκαν με γνώμονα την εφαρμογή της. Ωστόσο, χρησιμοποιείται ως κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας των παραγόμενων μοντέλων. Ένα μοντέλο που διαθέτει την απαιτούμενη γεωμετρική ακρίβεια για εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής μπορεί να θεωρηθεί επαρκές, υπό προϋποθέσεις, και για άλλες χρήσεις, όπως η εκπαίδευση, η ψηφιακή προβολή ή η τρισδιάστατη εκτύπωση (Remondino, 2011). Αντίθετα, μοντέλα που είναι οπτικά ρεαλιστικά δεν εγγυώνται απαραίτητα τη γεωμετρική τους αξιοπιστία.

Η εφαρμογή αυτού του κριτηρίου αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε αντικείμενα με λεπτομερή μορφολογικά χαρακτηριστικά, για τα οποία απαιτείται υψηλή ανάλυση και ακρίβεια αποτύπωσης. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η ικανότητα καταγραφής λεπτομερειών μικρής κλίμακας εξαρτάται άμεσα από την τεχνολογία αποτύπωσης (Remondino, 2011), ενώ η ακρίβεια σε μικρής κλίμακας χαρακτηριστικά έχει αναλυθεί ειδικότερα σε συνδυαστικές μεθόδους σάρωσης (Ioannidis et al., 2019). Συνεπώς, η αξιολόγηση των μοντέλων με βάση αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα όρια και τις δυνατότητες κάθε μεθόδου.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η συνδυαστική χρήση διαφορετικών τεχνικών αποτύπωσης. Ο συνδυασμός σαρωτών λέιζερ και φωτογραμμετρίας μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα, καθώς κάθε μέθοδος καλύπτει διαφορετικές πτυχές της πληροφορίας, όπως η γεωμετρία και η επιφανειακή υφή (Ioannidis et al., 2019). Η προσέγγιση αυτή θεωρείται

¹¹ Registration: Διαδικασία χωρικής ευθυγράμμισης πολλαπλών σαρώσεων ή νεφών σημείων σε κοινό σύστημα συντεταγμένων.

¹² Mesh reconstruction: Διαδικασία μετατροπής νέφους σημείων σε επιφανειακό πλέγμα πολυγώνων.

ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομιάς, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και πληρότητα δεδομένων.

2. Εξοπλισμός και Λογισμικό

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών κάθε εργαλείου είναι απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τις εφαρμογές κινητών συσκευών, ο σαρωτής δομημένου φωτός, καθώς και τα λογισμικά επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν, με έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

2.1 Εφαρμογές Κινητών Συσκευών για iPhone

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με σύγχρονη συσκευή iPhone με ενσωματωμένο αισθητήρα LiDAR (*iPhone 17 Pro and 17 Pro Max - Technical Specifications*, n.d.). Η διαθέσιμη βιβλιογραφία βασίζεται κυρίως σε παλαιότερες γενιές συσκευών (Luetzenburg et al., 2021), συνεπώς τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις λόγω τεχνολογικών βελτιώσεων στο υλικό και στο λογισμικό.

Στην έρευνα αξιολογούνται τρεις εφαρμογές που βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις: εφαρμογές φωτογραμμετρίας, εφαρμογές που αξιοποιούν δεδομένα LiDAR, καθώς και εφαρμογές που υποστηρίζουν νεότερες μεθόδους τρισδιάστατης αναπαράστασης όπως το 3DGS. Η παράλληλη αξιολόγηση των εφαρμογών αυτών επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση των δυνατοτήτων και περιορισμών κάθε προσέγγισης, σε σύγκριση με τη χρήση μίας μόνο εφαρμογής.

2.1.1 Polycam

Το Polycam αποτελεί την εφαρμογή με την ισχυρότερη ακαδημαϊκή τεκμηρίωση. Σε συγκριτική μελέτη τεσσάρων εφαρμογών LiDAR σε iPhone 13 Pro, το Polycam πέτυχε μέση απόκλιση 5 cm από το σαρωτή αναφοράς, ενώ η εφαρμογή Scaniverse κατέγραψε 44 cm (Askar & Sternberg, 2023). Η σημαντική αυτή διαφορά, παρότι αφορά το ίδιο υλικό καταγραφής, υποδεικνύει ότι η επιλογή εφαρμογής μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

Η αποτελεσματικότητα του Polycam επιβεβαιώθηκε επίσης σε μελέτη πέντε αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς διαφορετικής κλίμακας, όπου παρήγαγε σταθερά αξιόλογες ανακατασκευές (Vacca, 2023).

Σημαντικό πρακτικό της πλεονέκτημα εφαρμογής αποτελεί η δυνατότητα εξαγωγής των αρχικών φωτογραφιών, γεγονός που επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία τους στο λογισμικό Metashape, ειδικά για την αξιολόγηση της φωτογραμμετρικής λειτουργίας.

Η εφαρμογή προσφέρει τρεις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας οι οποίοι εξετάζονται χωριστά στην παρούσα έρευνα. Στη λειτουργία φωτογραμμετρικής λήψης (Photo Mode), ο χρήστης καταγράφει ελεύθερα το αντικείμενο μέσω διαδοχικών φωτογραφιών και η νεφοϋπολογιστική επεξεργασία SfM και MVS επιστρέφει το μοντέλο σε λίγα λεπτά.

Στο LiDAR (Space/Floorplan), η εφαρμογή αξιοποιεί δεδομένα LiDAR, αλλά αποκλειστικά για σάρωση χώρων (Space) και κατόψεων (Floorplan). Η δυνατότητα σάρωσης αντικειμένων μέσω LiDAR δεν υποστηρίζεται στην τρέχουσα έκδοση της εφαρμογής. Συνεπώς, για την σάρωση αντικειμένων, χρησιμοποιεί αποκλειστικά φωτογραμμετρία και 3DGS.

Στη λειτουργία Gaussian Splatting, η εφαρμογή μετατρέπει βίντεο λήψης γύρω από το αντικείμενο σε τρισδιάστατο μοντέλο υψηλής οπτικής ποιότητας. Ωστόσο το παραγόμενο μοντέλο δεν είναι άμεσα κατάλληλο για 3Δ εκτύπωση, καθώς απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία για τη μετατροπή του σε εκτυπώσιμη γεωμετρία.

2.1.2 RealityScan

Το RealityScan κυκλοφόρησε από την Capturing Reality η οποία πλέον ανήκει στην Epic Games/Unreal Engine, και είναι γνωστή για το επαγγελματικό λογισμικό RealityCapture. Η εφαρμογή βασίζεται αποκλειστικά στη φωτογραμμετρία, χωρίς να υποστηρίζει τεχνολογίες LiDAR ή 3DGS.

Στην πράξη, το RealityScan εμφανίζει ιδιαίτερα καλή απόδοση σε μοντέλα με σύνθετη γεωμετρία. Συγκριτική ανάλυση με το KIRI Engine δείχνει ότι υπερέχει σε τέτοιες περιπτώσεις, καθώς ο αλγόριθμος RealityCapture αξιοποιεί μεγαλύτερο αριθμό σημείων

αντιστοίχισης κατά τη διαδικασία ανακατασκευής (Engine KiRi, n.d.). Το τελικό μοντέλο εξάγεται σε μορφή OBJ με χρωματική πληροφορία.

2.1.3 KIRI Engine

Το KIRI Engine διατίθεται δωρεάν και υποστηρίζει τρεις διαφορετικές μεθόδους τρισδιάστατης αποτύπωσης: φωτογραμμετρία, LiDAR και 3DGS. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι, μεταξύ των εφαρμογών που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, το KIRI Engine αποτελεί την μοναδική εφαρμογή που υποστηρίζει σάρωση αντικειμένων μέσω LiDAR.

Η εταιρεία δημοσιεύει επίσης τεχνική ανάλυση για τη σύγκριση 3DGS, φωτογραμμετρίας και LiDAR, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τις βέλτιστες συνθήκες εφαρμογής κάθε μεθόδου (KiRi, n.d.).

2.2 Shining3D EinScan H2

Αν οι εφαρμογές κινητών συσκευών αντιπροσωπεύουν την ευρεία προσβασιμότητα της 3Δ σάρωσης, ο Shining3D EinScan H2 αντιπροσωπεύει τις δυνατότητες ενός επαγγελματικού σαρωτή, όταν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι και εξειδικευμένος εξοπλισμός. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς (ground truth) για τη συγκριτική αξιολόγηση.

Ο Shining3D EinScan H2 (“Hybrid LED & Infrared Light Handheld 3D Scanner EinScan H2,” 2024) είναι φορητός σαρωτής δομημένου φωτός υβριδικής τεχνολογίας (Εικόνα 7). Η συνδυαστική χρήση LED και υπέρυθρης πηγής επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία κατά τη σάρωση. Η πηγή LED προσφέρει γρήγορη αποτύπωση σε μεγαλύτερο εύρος (700 × 700 mm), ενώ η υπέρυθρη πηγή, με ακρίβεια 0,05 mm, επιτρέπει λεπτομερή σάρωση μικρότερων αντικειμένων με μειωμένη εξάρτηση από τις συνθήκες εξωτερικού φωτισμού. Ο συνδυασμός αυτός θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλος για τα αντικείμενα της μελέτης, καθώς αυτά παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το μέγεθος και τη γεωμετρία.



Εικόνα 7: Ο σαρωτής δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2. Πηγή: <https://www.einscan.com>

Η χρήση σαρωτών της σειράς EinScan σε εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομιάς έχει ήδη τεκμηριωθεί βιβλιογραφικά, με αποτελέσματα μέγιστης απόκλισης μικρότερης του 1 mm έναντι φωτογραμμετρίας σε μουσειακά αντικείμενα της Ισπανίας (Morena et al., 2019). Το στοιχείο αυτό δικαιολογεί τη χρήση του ως συστήματος αναφοράς στην παρούσα έρευνα.

Δύο λειτουργίες ευθυγράμμισης είναι διαθέσιμες. Η λειτουργία Markers χρησιμοποιεί ανακλαστικούς δείκτες αναφοράς (markers) και προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα ευθυγράμμισης, ιδιαίτερα σε αντικείμενα με ομοιόμορφη επιφάνεια. Αντίθετα η λειτουργία Features βασίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ίδιου του αντικειμένου και είναι καταλληλότερη για μορφές με σύνθετη γεωμετρία.

Σημαντικό πρακτικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα αφαίρεσης θορύβου στο λογισμικό EXScan κατά τη φάση συγχώνευσης (fusion), με αποτέλεσμα την παραγωγή ήδη καθαρού νέφους σημείων. Αυτό μειώνει αισθητά τον χρόνο μετα-επεξεργασίας σε σύγκριση με τα δεδομένα από κινητές συσκευές, τα οποία συχνά απαιτούν εκτεταμένο καθαρισμό.

Η βασική αδυναμία του σαρωτή είναι η δυσκολία διαχείρισης ανακλαστικών επιφανειών. Για τον λόγο αυτό, η χρήση σπρέι σάρωσης, αποτελεί αποδεκτή και μη καταστρεπτική πρακτική (Boehler & Marbs, 2003).

2.3 Λογισμικά Επεξεργασίας

Η σάρωση αποτελεί μόνο το πρώτο στάδιο της διαδικασίας. Η επεξεργασία των νεφών σημείων και η παραγωγή συγκρίσιμων μοντέλων απαιτούν τη χρήση συμπληρωματικών λογισμικών, καθένα από τα οποία επιτελεί διαφορετικό ρόλο.

2.3.1 Agisoft Metashape

Το Metashape (*Agisoft Metashape: Agisoft Metashape, n.d.*) εξετάστηκε ως πιθανό εργαλείο επεξεργασίας των φωτογραμμετρικών δεδομένων του Polycam και του RealityScan, λόγω της δυνατότητας εξαγωγής των αρχικών φωτογραφιών.

Το Metashape χρησιμοποιείται συχνά στη σχετική βιβλιογραφία, μεταξύ άλλων από τους Khedr et al.(2025) και Melendreras Ruiz et al. (2021), παρέχοντας υψηλό επίπεδο ελέγχου στη φωτογραμμετρική ανακατασκευή και επιτρέποντας συγκρισιμότητα με προηγούμενες έρευνες.

Σε περίπτωση χρήσης του Metashape, η ροή εργασίας ακολουθεί τα στάδια: ευθυγράμμιση φωτογραφιών, δημιουργία νέφους σημείων, δημιουργία πυκνού νέφους (dense cloud), κατασκευή επιφανειακού πλέγματος και δημιουργία υφής.

2.3.2 Blender

Το Blender (Blender Foundation, n.d.) αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ροής εργασίας, μεταξύ σάρωσης και της συγκριτικής αξιολόγησης. Τα μοντέλα που εξάγονται από τις εφαρμογές συχνά περιέχουν θόρυβο, οπές και ασυνέχειες επιφανειών. Το Blender χρησιμοποιείται για τη μετατροπή τους σε μορφή κατάλληλη τόσο για σύγκριση όσο και 3Δ εκτύπωση.

Οι βασικές εργασίες επισκευή οπών, αφαίρεση ανεπιθύμητης αιωρούμενης γεωμετρίας και τοπική εξομάλυνση των επιφανειών. Επιπλέον χρησιμοποιείται για τον έλεγχο εκτυπωσιμότητας μέσω του εργαλείου 3D Print Toolbox, καθώς και την δημιουργία εικόνων σύγκρισης από κοινές γωνίες λήψης.

Το επίπεδο επεξεργασίας που απαιτεί κάθε μοντέλο αποτελεί και το ίδιο κριτήριο αξιολόγησης. Ένα μοντέλο που απαιτεί εκτεταμένη επισκευή θεωρείται λιγότερο λειτουργικό σε σχέση με ένα μοντέλο που είναι σχεδόν άμεσα αξιοποιήσιμο.

2.3.3 CloudCompare

Αφού ολοκληρωθεί η προεργασία στο Blender, το CloudCompare (n.d.) χρησιμοποιείται για την ποσοτική σύγκριση των μοντέλων. Το λογισμικό επιτρέπει τη σύγκριση κάθε μοντέλου που προέρχεται από κινητή συσκευή με το αντίστοιχο μοντέλο του EinScan H2, το οποίο λειτουργεί ως σύστημα αναφοράς.

Ο αλγόριθμος Cloud to Mesh (C2M) υπολογίζει για κάθε σημείο την απόσταση από την πλησιέστερη επιφάνεια του αναφορικού μοντέλου, παράγοντας χρωματικό χάρτη αποκλίσεων και στατιστικές τιμές RMSE (Root Mean Square Error), μέση απόσταση και τυπική απόκλιση. Με αυτόν τον τρόπο η αξιολόγηση βασίζεται σε μετρήσιμα γεωμετρικά δεδομένα και όχι σε υποκειμενικές εκτιμήσεις.

Το CloudCompare επιλέχθηκε επίσης επειδή χρησιμοποιείται στις μελέτες των Askar & Sternbenrg (2023), Vacca (2023) και Khedr et al. (2025), γεγονός που επιτρέπει άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τη σχετική βιβλιογραφία.

Εκτός από τη συγκριτική αξιολόγηση, το CloudCompare χρησιμοποιείται και για πρόσθετη επεξεργασία νέφους σημείων, όπως στατιστικό καθαρισμό ακραίων σημείων (Statistical Outlier Removal), ευθυγράμμιση μέσω του αλγόριθμου ICP (Iterative Closest Point) και συγχώνευση επιμέρους σαρώσεων.

3. Επιλογή Αντικειμένων και Μεθοδολογία Σάρωσης

3.1 Επιλογή Αντικειμένων

Τα έξι αντικείμενα της παρούσας μελέτης επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα γεωμετρικών χαρακτηριστικών, υλικών και τεχνικών προκλήσεων που σχετίζονται με την τρισδιάστατη σάρωση. Στόχος ήταν η αξιολόγηση των διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης σε συνθήκες που αντιπροσωπεύουν τόσο απλές όσο και απαιτητικές περιπτώσεις σάρωσης. Η επιλογή των αντικειμένων βασίστηκε σε τέσσερα κριτήρια: α) τη γεωμετρική πολυπλοκότητα, β) την επιφανειακή υφή, γ) τον βαθμό ανακλαστικότητας του υλικού και δ) τις απαιτήσεις μετα-επεξεργασίας μετά τη σάρωση.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε αντικείμενο λειτουργεί ως διαφορετικό σενάριο αξιολόγησης, αναδεικνύοντας συγκεκριμένους περιορισμούς και πλεονεκτήματα των εξεταζόμενων τεχνολογιών.

Ακροκέραμο (~25 cm ύψος, κεραμικό).

Το ακροκέραμο παρουσιάζει σχετικά μεγάλη και ομοιόμορφη επιφάνεια με συνδυασμό κυρτών και κοίλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Επιλέχθηκε επειδή επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων σάρωσης σε επιφάνειες με διαφορετική καμπυλότητα, καθώς και την ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων ή σφαλμάτων στην αποτύπωση.

Κεραμική Μάσκα (~ 28 cm ύψος, κεραμικό).

Η κεραμική μάσκα συνδυάζει κυρτή και κοίλη γεωμετρία, παρουσιάζοντας κοιλότητες και επιφάνειες με περιορισμένη ορατότητα. Η αποτύπωσή της σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτεί δύο επιμέρους σαρώσεις και μεταγενέστερη ευθυγράμμιση των νεφών σημείων, γεγονός που την καθιστά χρήσιμο παράδειγμα για την αξιολόγηση σύνθετων μορφών.

Αντίγραφο Δίσκου της Φαιστού (~ 17 cm διάμετρος, γύψινο).

Το αντικείμενο αυτό χαρακτηρίζεται από σχετικά επίπεδη γεωμετρία και εγχάρακτα σύμβολα βάθους λίγων χιλιοστών. Επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της ικανότητας κάθε μεθόδου να καταγράφει λεπτή ανάγλυφη πληροφορία και μορφολογικές λεπτομέρειες μικρής κλίμακας.

Ειδώλιο αλόγου (~ 8 cm ύψος, κεραμικό).

Το ειδώλιο παρουσιάζει σύνθετη τρισδιάστατη γεωμετρία με λεπτά άκρα, στενά κενά μεταξύ των ποδιών και έντονες καμπύλες επιφάνειες. Επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της πληρότητας της γεωμετρικής αποτύπωσης σε μικρής κλίμακας αντικείμενα με αυξημένη μορφολογική πολυπλοκότητα.

Μπρούτζινο γουδί (~ 11,5 cm ύψος).

Η έντονα ανακλαστική μεταλλική επιφάνεια του γουδιού αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις για όλα τα συστήματα οπτικής σάρωσης. Επιλέχθηκε για τη διερεύνηση των ορίων κάθε μεθόδου σε συνθήκες αυξημένων ανακλάσεων και περιορισμένης σταθερότητας καταγραφής.

Τηλέφωνο Ericsson Cobra (~21,5 cm ύψος, γυαλιστερό πλαστικό).

Το αντικείμενο παρουσιάζει συμμετρικές καμπύλες επιφάνειες από γυαλιστερό πλαστικό υλικό και περιορισμένη επιφανειακή υφή. Οι έντονες ανακλάσεις και η ομοιότητα, σε συνδυασμό με τη συμμετρική γεωμετρία και την έλλειψη έντονων χαρακτηριστικών σημείων, δημιουργούν αυξημένες δυσκολίες τόσο για φωτογραμμετρικές μεθόδους όσο και για σάρωση LiDAR, ιδιαίτερα ως προς τη σταθερότητα της ανακατασκευής.

Πίνακας 1: Αντικείμενα μελέτης και κύριες προκλήσεις σάρωσης.

Αντικείμενο	Εικόνα	Υλικό	Ύψος	Κύρια Πρόκληση Σάρωσης
Ακροκέραμο		Κεραμικό	~25 cm	Μεγάλη ομοιόμορφη επιφάνεια
Κεραμική Μάσκα		Κεραμικό	~28 cm	Διπλή σάρωση / κοιλότητες επιφάνειας
Αντίγραφο Δίσκου της Φαιστού		Γύψος	~17 cm	Ανάγλυφη λεπτομέρεια μικρής κλίμακας
Ειδώλιο αλόγου		Κεραμικό	~8 cm	Σύνθετη γεωμετρία / λεπτά στοιχεία
Γουδί		Μπρούτζος	~11,5 cm	Ανακλαστική επιφάνεια
Τηλέφωνο		Γυαλιστερό πλαστικό	~21,5 cm	Ανακλάσεις / συμμετρική γεωμετρία

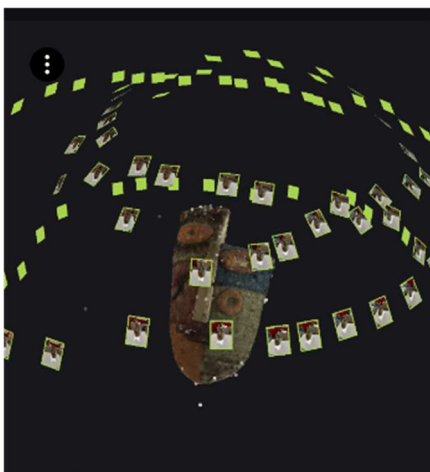
3.2 Πρωτόκολλο Σάρωσης

3.2.1 Συνθήκες Σάρωσης

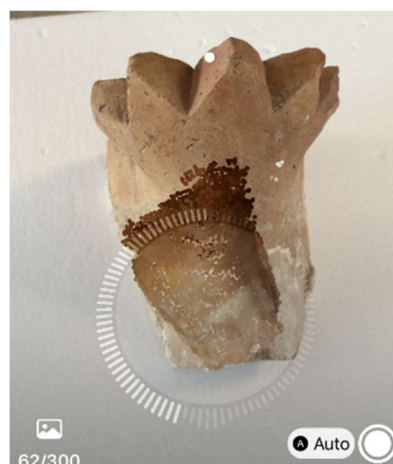
Όλες οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν σε εσωτερικό χώρο υπό παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες, ώστε να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συνέπεια μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης. Ο φωτισμός προερχόταν από τον διαθέσιμο φωτισμό του χώρου, χωρίς χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού φωτισμού. Η επιλογή αυτή ήταν σκόπιμη, ώστε η πειραματική διαδικασία να προσεγγίζει περισσότερο πραγματικές συνθήκες φορητών εφαρμογών τρισδιάστατης σάρωσης.

Για τις φωτογραμμετρικές σαρώσεις πραγματοποιήθηκε κυκλική λήψη εικόνων γύρω από κάθε αντικείμενο, με επαρκή επικάλυψη (>70%) μεταξύ διαδοχικών λήψεων. Η υψηλή επικάλυψη είναι κρίσιμη για τη φωτογραμμετρική ανακατασκευή, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό κοινών χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων και βελτιώνει τη σταθερότητα της ευθυγράμμισης. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν από διαφορετικά ύψη και γωνίες, ώστε να καταγράφεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό των ορατών επιφανειών και των γεωμετρικών λεπτομερειών. Ο συνολικός αριθμός εικόνων διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τη μορφολογική πολυπλοκότητα κάθε αντικειμένου.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα της διαδικασίας σάρωσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 8 και 9.



Εικόνα 8: Σάρωση κεραμικής μάσκας με την εφαρμογή RealityScan. Πηγή: προσωπικό αρχείο



Εικόνα 9: Σάρωση ακροκέραμου με την εφαρμογή KIRI Engine LiDAR Scan. Πηγή: προσωπικό αρχείο

Για τις σαρώσεις LiDAR ακολουθήθηκε αργή και συνεχής κίνηση γύρω από το αντικείμενο, με στόχο τη διατήρηση σταθερής παρακολούθησης της γεωμετρίας και τον περιορισμό πιθανών σφαλμάτων καταγραφής. Η ομαλή κίνηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς απότομες μεταβολές στην ταχύτητα ή στην απόσταση σάρωσης μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια παρακολούθησης ή σε τοπικές γεωμετρικές αστοχίες.

Αντίστοιχα, για την παραγωγή μοντέλων 3DGS πραγματοποιήθηκε συνεχής καταγραφή βίντεο γύρω από τα αντικείμενα, με ομαλή κίνηση της κάμερας και επαρκή κάλυψη όλων των ορατών επιφανειών. Η ποιότητα του παραγόμενου μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνέπεια της κίνησης και την πληρότητα της οπτικής κάλυψης.

Οι σαρώσεις αναφοράς πραγματοποιήθηκαν με τον σαρωτή δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2, χρησιμοποιώντας τόσο τη λειτουργία υπέρυθρης σάρωσης (Infrared Mode) όσο και τη λειτουργία λευκού δομημένου φωτός (White Light Mode), ανάλογα με τα υλικά και τις απαιτήσεις του κάθε αντικειμένου. Η βαθμονόμηση του σαρωτή πραγματοποιήθηκε μία φορά πριν από την έναρξη των σαρώσεων.

Σε όλες τις σαρώσεις χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία Markers Mode, με ανακλαστικούς δείκτες αναφοράς, ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητα της σάρωσης και η ακρίβεια της ευθυγράμμισης. Οι δείκτες αυτοί λειτουργούν ως σταθερά σημεία αναφοράς, επιτρέποντας στο λογισμικό να συσχετίζει με μεγαλύτερη αξιοπιστία τις διαδοχικές λήψεις.

Λόγω της γεωμετρίας και της αδυναμίας πλήρους καταγραφής όλων των επιφανειών σε μια μόνο σάρωση, όλα τα αντικείμενα με εξαίρεση το τηλέφωνο Ericsson Cobra, σαρώθηκαν σε δυο διαφορετικές θέσεις με τον Shining3D EinScan H2. Η ευθυγράμμιση και συγχώνευση των επιμέρους σαρώσεων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό EXScan.

Για το ακροκέραμο απαιτήθηκε ξεχωριστή σάρωση της εξωτερικής και της εσωτερικής επιφάνειας τόσο με τον Shining3D EinScan H2 όσο και με τις εφαρμογές κινητών συσκευών, λόγω της γεωμετρίας και του μεγέθους του αντικειμένου. Στην περίπτωση των εφαρμογών κινητών συσκευών, οι επιμέρους σαρώσεις ευθυγραμμίστηκαν μεταγενέστερα στο CloudCompare μέσω του αλγόριθμου ICP.

Για την κεραμική μάσκα στις σαρώσεις με εφαρμογές κινητών συσκευών χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδια βάση στήριξης, ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση της κύριας γεωμετρίας του αντικειμένου. Το τμήμα της επιφάνειας που παρέμεινε μη ορατό λόγω επαφής με τη βάση αποκαταστάθηκε στο Blender μέσω διαδικασίας συμπλήρωσης πλέγματος (mesh filling).

3.2.2 Πρωτόκολλο Shining3D EinScan H2

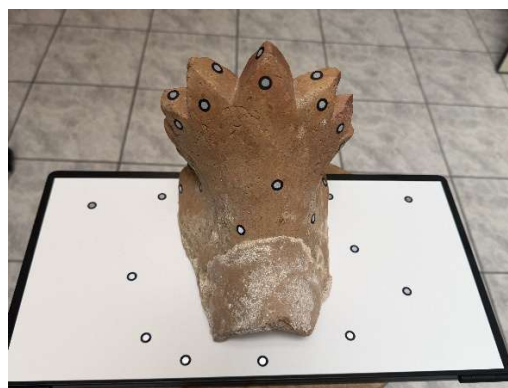
Ο Shining3D EinScan H2 χρησιμοποιήθηκε ως ο σαρωτής αναφοράς στην παρούσα έρευνα.

Η επιλογή του βασίστηκε στην υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και σταθερότητα που προσφέρει, επιτρέποντας τη χρήση του ως σημείου αναφοράς για τη συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων που παρήχθησαν από τις εφαρμογές κινητών συσκευών.

Η σάρωση πραγματοποιήθηκε σε λειτουργία χειρός (handheld), με τον χρήστη να κινείται ελεύθερα γύρω από κάθε αντικείμενο. Η απόσταση σάρωσης διατηρήθηκε μεταξύ 5 και 20 cm, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής πυκνότητα δεδομένων και αξιόπιστη καταγραφή γεωμετρίας. Για κάθε αντικείμενο πραγματοποιήθηκαν δύο επιμέρους σαρώσεις, οι οποίες συγχωνεύθηκαν στο λογισμικό EXScan Pro.



Εικόνα 10: Ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του ακροκέραμου και στη βάση σάρωσης. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 11: Ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του ακροκέραμου και στη βάση σάρωσης. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Κεντρικό στοιχείο του πρωτόκολλου Shining3D EinScan H2 ήταν η χρήση ανακλαστικών δεικτών αναφοράς σε όλα τα αντικείμενα (Εικόνα 10 & 11). Οι δείκτες τοποθετήθηκαν τόσο

στις επιφάνειες των αντικειμένων όσο και στη βάση σάρωσης, παρέχοντας σταθερά σημεία αναφοράς για την ευθυγράμμιση των διαδοχικών λήψεων.

Η χρήση δεικτών αποτελεί βασική διαφορά του πρωτοκόλλου του σαρωτή δομημένου φωτός σε σχέση με τις εφαρμογές κινητών συσκευών: ενώ ο EinScan H2 στηρίζεται σε εξωτερικούς δείκτες για τη συνένωση των επιμέρους σαρώσεων, οι εφαρμογές κινητών συσκευών πραγματοποιούν την ευθυγράμμιση αποκλειστικά μέσω οπτικών/γεωμετρικών χαρακτηριστικών, χωρίς φυσικούς στόχους.

Η χρήση δεικτών αναφοράς βελτίωσε σημαντικά τη σταθερότητα της σάρωσης, επιτρέποντας στο λογισμικό να καταχωρεί με μεγαλύτερη ακρίβεια όλες τις λήψεις στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Χωρίς τη χρήση τους, η σάρωση σε λειτουργία χειρός θα βασιζόταν αποκλειστικά στην αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αντικειμένου, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα σφαλμάτων ή απώλειας παρακολούθησης, ιδιαίτερα σε επιφάνειες με περιορισμένη υφή ή υψηλή ανακλαστικότητα. (Εικόνα 12).

Η επιλογή λειτουργίας σάρωσης προσαρμόστηκε στα οπτικά χαρακτηριστικά κάθε αντικειμένου.



Εικόνα 12: Σάρωση αντικειμένου με Shining3D EinScan H2 σε λειτουργία handheld. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές λειτουργίες: η λειτουργία λευκού δομημένου φωτός (White Light Mode) και η λειτουργία υπέρυθρης σάρωσης (Infrared Mode).

Τέσσερα αντικείμενα, το ακροκέραμο, η κεραμική μάσκα, το αντίγραφο του Δίσκου της Φαιστού και το ειδώλιο αλόγου, σαρώθηκαν σε λειτουργία λευκού δομημένου φωτός, καθώς η συγκεκριμένη

λειτουργία προσφέρει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια σε ματ και αδιαφανείς επιφάνειες. Για το μπρούτζινο γουδί και το τηλέφωνο επιλέχθηκε η λειτουργία υπέρυθρης σάρωσης, λόγω της αυξημένης ανακλαστικότητας των επιφανειών τους. Η λειτουργία αυτή είναι

γενικά πιο ανεκτική σε δύσκολες οπτικές συνθήκες και συχνά αποδίδει καλύτερα σε γυαλιστερές ή ανακλαστικές επιφάνειες.

Παρά την επιλογή της λειτουργίας υπέρυθρης σάρωσης για το μπρούτζινο γουδί, η έντονη μεταλλική ανακλαστικότητα της επιφάνειάς του οδήγησε σε αυξημένο θόρυβο στο νέφος σημείων. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι οι ανακλαστικές μεταλλικές επιφάνειες εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό περιορισμό ακόμη και για επαγγελματικούς σαρωτές δομημένου φωτός.

Επισημαίνεται ότι σε κανένα αντικείμενο δεν χρησιμοποιήθηκε σπρέι σάρωσης. Παρότι η εφαρμογή μας σπρέι αποτελεί τεκμηριωμένη και μη καταστρεπτική πρακτική για ανακλαστικές επιφάνειες (Boehler & Marbs, 2003), επιλέχθηκε η αποφυγή του, ώστε τα αποτελέσματα να αντανakλούν την απόδοση των μεθόδων υπό τις πραγματικές συνθήκες των αντικειμένων, χωρίς πρόσθετη προετοιμασία της επιφάνειας.

3.2.3 Πρωτόκολλο Εφαρμογών κινητών συσκευών

Και οι τρεις εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν με iPhone 17 Pro, το οποίο διαθέτει ενσωματωμένο αισθητήρα LiDAR, τριπλό σύστημα κάμερας και επεξεργαστή Apple Silicon.

Η σάρωση πραγματοποιήθηκε με αργή και συνεχόμενη κίνηση γύρω από κάθε αντικείμενο, διατηρώντας απόσταση 20-40 cm. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πλήρη κάλυψη των αντικειμένων από πολλαπλές γωνίες λήψης, συμπεριλαμβανομένων λήψεων από ανώτερες και κατώτερες γωνίες, ώστε να καταγραφεί το μεγαλύτερο ποσοστό της γεωμετρίας.

Σε όλες τις εφαρμογές και σε όλες τις διαθέσιμες μεθόδους επιλέχθηκε η υψηλότερη διαθέσιμη ρύθμιση ποιότητας, με στόχο την εξασφάλιση της βέλτιστης δυνατής εξόδου από κάθε εφαρμογή και τη διατήρηση συγκρίσιμων συνθηκών αξιολόγησης.

Κάθε εφαρμογή εξετάστηκε με όλες τις διαθέσιμες μεθόδους που υποστηρίζει. Συγκεκριμένα, το RealityScan χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά με φωτογραμμετρική ανακατασκευή, το Polycam με φωτογραμμετρία και 3DGS, ενώ το KIRI Engine αξιολογήθηκε με φωτογραμμετρία, LiDAR και 3DGS. Εξαίρεση αποτέλεσαν δύο σαρώσεις LiDAR του KIRI Engine, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε iPhone 15 Pro λόγω τεχνικού

περιορισμού που αναλύεται στην Ενότητα 3.2.4.2. Ο αριθμός εικόνων ανά σάρωση κυμάνθηκε μεταξύ 67 και 151, ανάλογα με τη μορφολογική πολυπλοκότητα του αντικειμένου και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Η μέθοδος 3DGS δεν παράγει απευθείας επιφανειακό πλέγμα, αλλά αναπαράσταση από γκαουσιανά στοιχεία. Για τη συγκριτική αξιολόγηση αξιοποιήθηκε η δυνατότητα εξαγωγής πλέγματος που προσφέρουν οι εφαρμογές: το Polycam εξήγαγε αρχείο OBJ και το KIRI Engine αρχείο PLY, αμφότερα σε μορφή πλέγματος με επιφάνειες. Τα πλέγματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση C2M και τον έλεγχο εκτυπωσιμότητας, όπως και τα μοντέλα των υπόλοιπων μεθόδων.

3.2.4 Ειδικές Περιπτώσεις και Αποκλίσεις Πρωτοκόλλου

Κατά τη διάρκεια της έρευνας προέκυψαν τέσσερις αποκλίσεις από το αρχικό πρωτόκολλο σάρωσης. Οι αποκλίσεις αυτές δεν αντιμετωπίζονται ως αδυναμίες της μελέτης, αλλά ως ευρήματα που αντανακλούν τις πραγματικές συνθήκες χρήσης εμπορικών εφαρμογών σάρωσης με κινητές συσκευές. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι δυνατότητες και οι διαθέσιμες λειτουργίες των εφαρμογών μεταβάλλονται συχνά μέσω ενημερώσεων λογισμικού, επηρεάζοντας άμεσα τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

3.2.4.1 Κατάργηση LiDAR Object Mode στο Polycam

Πριν από την έναρξη των σαρώσεων, το Polycam είχε ήδη καταργήσει τη λειτουργία σάρωσης αντικειμένων με LiDAR. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές σαρώσεις σε λειτουργία σάρωσης χώρων, στην κεραμική μάσκα και στο αντίγραφο του Δίσκου της Φαιστού, τα οποία δεν παρήγαγαν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

Στην τρέχουσα έκδοση, το Polycam υποστηρίζει χρήση LiDAR αποκλειστικά για σάρωση χώρων και δημιουργία κατόψεων. Συνεπώς, για τη σάρωση αντικειμένων, το Polycam περιορίζεται στη φωτογραμμετρική ανακατασκευή και στο 3DGS.

3.2.4.2 Μεταφορά σαρώσεων LiDAR του KIRI Engine σε iPhone 15 Pro

Κατά τη διάρκεια των σαρώσεων, ενημέρωση του iOS απενεργοποίησε τη λειτουργία σάρωσης αντικειμένων του KIRI Engine στο iPhone 17 Pro. Προκειμένου να ολοκληρωθεί το πρωτόκολλο χωρίς διακοπή, οι σαρώσεις LiDAR του KIRI Engine για το μπρούτζινο γουδί και το τηλέφωνο Ericsson Cobra πραγματοποιήθηκαν τελικά με iPhone 15 Pro. Η απόκλιση αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά τη ερμηνεία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων, καθώς οι δύο συγκεκριμένες σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με διαφορετική συσκευή από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

3.2.4.3 Διπλή σάρωση ακροκέραμου

Λόγω του μεγέθους και της γεωμετρίας του ακροκέραμου, η πλήρης σάρωση με τις εφαρμογές δεν κατέστη εφικτή σε μία μόνο συνεδρία για τις περισσότερες μεθόδους. Για τον λόγο αυτό απαιτήθηκαν δύο επιμέρους σαρώσεις, που αντιστοιχούσαν στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια του αντικειμένου.

Για τα μοντέλα φωτογραμμετρίας Polycam και KIRI Engine, καθώς και τα μοντέλο Polycam 3DGS η χειροκίνητη ευθυγράμμισή τους στο Blender δεν παρήγαγε ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, η ευθυγράμμιση επαναλήφθηκε στο CloudCompare μέσω ICP, αξιοποιώντας ως κοινή αναφορά τις εξωτερικές επιφάνειες των μοντέλων.

Αντίθετα τα μοντέλα φωτογραμμετρίας RealityScan και KIRI Engine 3DGS παρουσίασαν εκτεταμένες ελλείψεις στην εσωτερική κοιλότητα του αντικειμένου. Δεδομένου ότι οι ελλείψεις αυτές επηρέαζαν κρίσιμα τη γεωμετρική πληρότητα του μοντέλου, δεν επιχειρήθηκε περαιτέρω επισκευή. Ως αποτέλεσμα, τα συγκεκριμένα μοντέλα εξαιρέθηκαν από την ποσοτική σύγκριση C2M.

3.2.4.4 Επεξεργασία μέσω Agisoft Metashape

Για τα δύο αντικείμενα με έντονη ανακλαστική επιφάνεια, δηλαδή το μπρούτζινο γουδί και το τηλέφωνο, επιχειρήθηκε εναλλακτική επεξεργασία των φωτογραφικών δεδομένων μέσω Agisoft Metashape.

Η επιλογή αυτή βασίστηκε στη δυνατότητα εξαγωγής των αρχικών φωτογραφιών, η οποία παρέχεται από το Polycam στη λειτουργία φωτογραμμετρίας και από το RealityScan. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τέσσερις απόπειρες επεξεργασίας: φωτογραμμετρία Polycam και RealityScan για καθένα από τα δύο αντικείμενα.

Και οι τέσσερις απόπειρες κρίθηκαν μη αξιοποιήσιμες, αν και με διαφορετικό βαθμό αποτυχίας.

Στην περίπτωση του τηλεφώνου, και με τις δύο εφαρμογές, το Metashape παράγαγε έντονα παραμορφωμένη γεωμετρία, σε βαθμό που η μορφή του αντικειμένου δεν ήταν πλέον αναγνωρίσιμη. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στην ανεπαρκή ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων, εξαιτίας της έντονης ανακλαστικότητας και της περιορισμένης επιφανειακής υφής.

Η επεξεργασία των δεδομένων του RealityScan (Εικόνες 13 και 14) οδήγησε σε εκτεταμένες ελλείψεις και αποσπασμένα τμήματα πλέγματος. Αντίστοιχα, η επεξεργασία των δεδομένων του Polycam (Εικόνες 15 και 16) παράγαγε μερικώς αναγνωρίσιμο σχήμα, με εμφανείς παραμορφώσεις στη βάση και σημαντικές ελλείψεις στο χείλος.



Εικόνα 13: Γουδί - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του RealityScan στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 14: Τηλέφωνο - Αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του RealityScan στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 15: Γουδί - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του Polycam στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



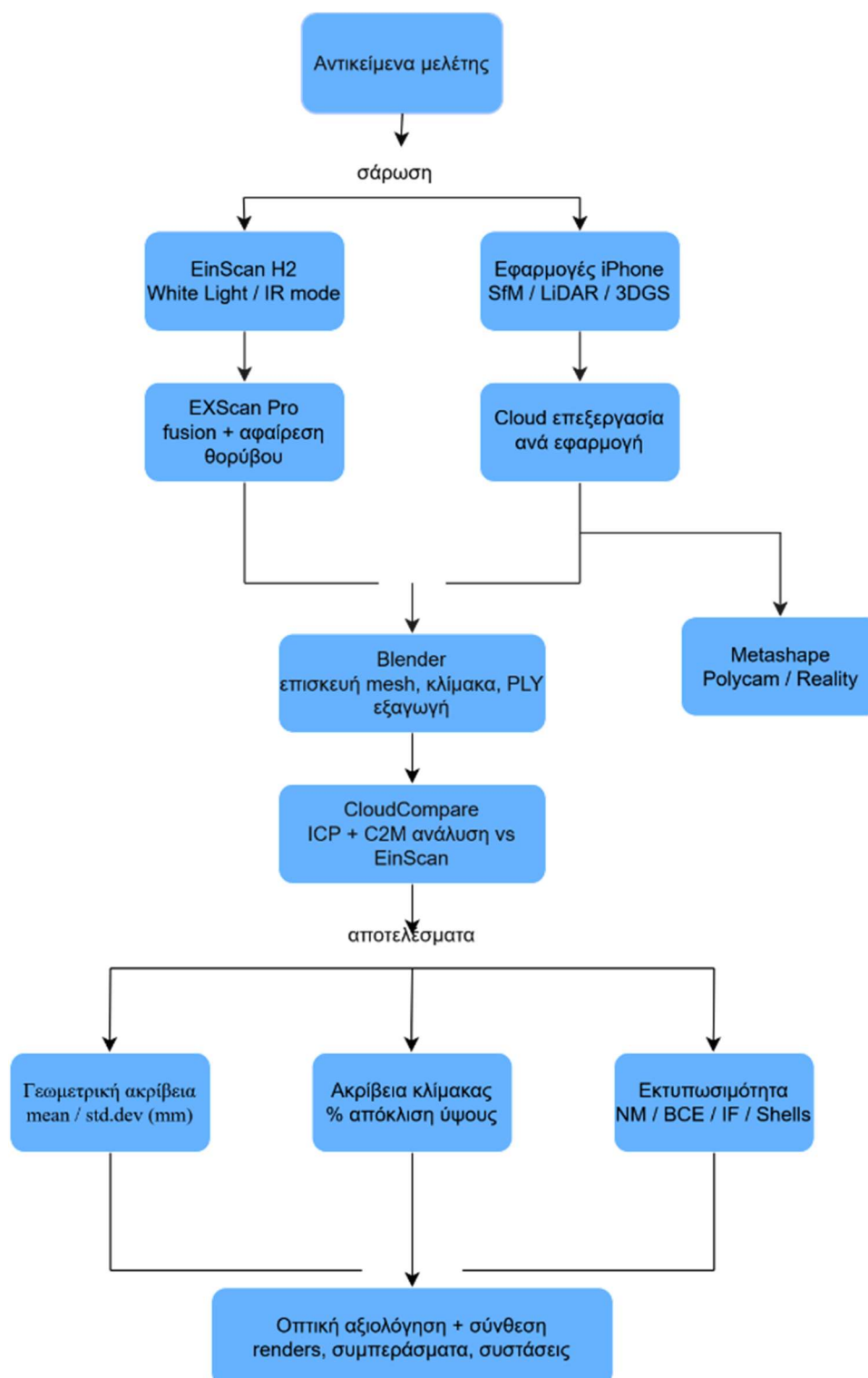
Εικόνα 16: Τηλέφωνο - αποτέλεσμα επεξεργασίας των δεδομένων του Polycam στο Metashape. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Παρότι το αποτέλεσμα του Polycam ήταν οριακά καλύτερο από εκείνο του RealityScan, παρέμεινε μη αξιοποιήσιμο τόσο για ποσοτική σύγκριση όσο και για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι η αποτυχία δεν οφείλεται στις παραμέτρους επεξεργασίας των εφαρμογών ή του Metashape, αλλά κυρίως στην ποιότητα των αρχικών φωτογραφικών δεδομένων. Η έντονα ανακλαστική επιφάνεια αποτρέπει την αξιόπιστη ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων, ανεξάρτητα από το λογισμικό επεξεργασίας που χρησιμοποιείται.

Για τον λόγο αυτό, οι συγκεκριμένες σαρώσεις εξαιρέθηκαν από την ποσοτική σύγκριση του Κεφαλαίου 4.

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει συνοπτικά τη συνολική ροή εργασίας από τη σάρωση έως την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένης της αποτυχημένης απόπειρας επεξεργασίας μέσω Metashape.



Εικόνα 17: Συνολική ροή εργασίας

3.3 Επεξεργασία Μοντέλων

3.3.1 Καταγραφή Σαρώσεων ανά Αντικείμενο

Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν αναλυτικά τις παραμέτρους κάθε σάρωσης για όλα τα αντικείμενα της μελέτης. Για κάθε περίπτωση καταγράφονται η εφαρμογή, η μέθοδος σάρωσης, ο αριθμός εικόνων (όπου εφαρμόζεται), ο αριθμός συνεδριών σάρωσης, ο χρόνος σάρωσης, ο χρόνος επεξεργασίας στην εφαρμογή ή στο λογισμικό EXScan για τον σαρωτή Shining3D EinScan H2, καθώς και ο χρόνος πρόσθετης επεξεργασίας στο λογισμικό Blender.

Η καταγραφή αυτή επιτρέπει όχι μόνο τη σύγκριση της γεωμετρικής ακρίβειας των τελικών μοντέλων, αλλά και την αξιολόγηση της πρακτικής αποδοτικότητας κάθε μεθόδου ως προς τον απαιτούμενο χρόνο σάρωσης και μετα-επεξεργασίας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο χρόνος επεξεργασίας στο Blender, καθώς λειτουργεί ως έμμεσος δείκτης ποιότητας του αρχικού μοντέλου. Μεγαλύτερος χρόνος επεξεργασίας συνδέεται συνήθως με αυξημένες ανάγκες καθαρισμού, επισκευής γεωμετρίας και αποκατάστασης ελλείψεων.

Οι σαρώσεις που χαρακτηρίζονται ως αποτυχία, εξαιρούνται από την ποσοτική σύγκριση του κεφαλαίου 4.

Πίνακας 2: Καταγραφή σαρώσεων Ακροκέραμου.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	157	2	7'	22'	35'	Ελλιπής καταγραφή εσωτερικής κοιλότητας με εκτεταμένα κενά.
Polycam	SfM	169	2	8'	30'	40'	
KIRI Engine	SfM	133	2	7'	10'	30'	
KIRI Engine	LiDAR	80	1	6'	3'	5'	
Polycam	3DGS	115	2	6'	40'	30'	
KIRI Engine	3DGS	121	2	7'	45'	25'	Ελλιπής καταγραφή εσωτερικής κοιλότητας με εκτεταμένα κενά.
Shining3D EinScan H2	White Light	-	2	10'	10'	2'	

Το ακροκέραμο αποτέλεσε ένα από τα πιο απαιτητικά αντικείμενα της μελέτης λόγω του μεγέθους του και της σύνθετης γεωμετρίας του, καθώς απαιτήθηκε διπλή σάρωση στις περισσότερες μεθόδους. Οι μεγαλύτερες δυσκολίες εντοπίστηκαν στην αποτύπωση της εσωτερικής κοιλότητας, όπου αρκετές εφαρμογές παρουσίασαν σημαντικές ελλείψεις.

Πίνακας 3: Καταγραφή σαρώσεων Κεραμικής Μάσκας.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	116	1	4'	5'	10'	
Polycam	SfM	112	1	3'	7'	10'	
KIRI Engine	SfM	114	1	4'	8'	10'	
KIRI Engine	LiDAR	91	1	5'	3'	10'	
Polycam	3DGS	115	1	3'	35'	25'	
KIRI Engine	3DGS	104	1	5'	35'	20'	
Shining3D EinScan H2	White Light	-	2	10'	10'	2'	

Η κεραμική μάσκα παρουσίασε σχετικά ομαλή συμπεριφορά σε όλες τις μεθόδους σάρωσης, με μικρές αποκλίσεις στους χρόνους σάρωσης και επεξεργασίας. Η γεωμετρία της, αν και περιλαμβάνει κοιλότητες, αποτυπώθηκε ικανοποιητικά από το σύνολο των εφαρμογών.

Πίνακας 4: Καταγραφή σαρώσεων Αντίγραφου Δίσκου Φαιστού.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	110	1	3'	12'	15'	
Polycam	SfM	103	1	3'	8'	15'	
KIRI Engine	SfM	151	1	3'	15'	15'	
KIRI Engine	LiDAR	76	1	3'	5'	15'	
Polycam	3DGS	101	1	4'	38'	15'	
KIRI Engine	3DGS	119	1	3'	30'	15'	
Shining3D EinScan H2	White Light	-	2	10'	10'	3'	

Το αντίγραφο του Δίσκου της Φαιστού λειτούργησε ως αντικείμενο ελέγχου για την αξιολόγηση της καταγραφής λεπτής ανάγλυφης πληροφορίας. Παρότι όλες οι μέθοδοι παρήγαγαν αξιοποιήσιμα μοντέλα, η ουσιαστική διαφοροποίηση εντοπίζεται στην ποιότητα αποτύπωσης της επιφανειακής λεπτομέρειας.

Πίνακας 5: Καταγραφή σαρώσεων Ειδωλίου Αλόγου.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	98	1	3'	15'	15'	
Polycam	SfM	67	1	3'	5'	10'	
KIRI Engine	SfM	103	1	2'	10'	20'	
KIRI Engine	LiDAR	94	1	3'	5'	20'	
Polycam	3DGS	-	1	3'	35'	30'	
KIRI Engine	3DGS	-	1	2'	40'	30'	
Shining3D EinScan H2	White Light	-	2	15'	10'	5'	

Το ειδώλιο αλόγου αποτέλεσε απαιτητική περίπτωση λόγω της σύνθετης γεωμετρίας, των λεπτών στοιχείων και των δυσπρόσιτων κοιλοτήτων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του. Οι δυσκολίες αυτές επηρέασαν κυρίως την πληρότητα της γεωμετρικής αποτύπωσης και αύξησαν τον απαιτούμενο χρόνο μετα-επεξεργασίας.

Πίνακας 6: Καταγραφή σαρώσεων Μπρούτζινου Γουδιού.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	101	1	2'	5'	10'	
Polycam	SfM	103	1	3'	7'	10'	
KIRI Engine	SfM	93	1	2'	5'	5'	
KIRI Engine	LiDAR	80	1	3'	15'	20'	Σάρωση με iPhone 15 Pro
Polycam	3DGS	108	1	3'	25'	10'	
KIRI Engine	3DGS	110	1	2'	30'	10'	
Shining3D EinScan H2	White Light	-	2	10'	8'	5'	

Το μπρούτζινο γουδί αποτέλεσε μία από τις δυσκολότερες περιπτώσεις της μελέτης λόγω της έντονα ανακλαστικής μεταλλικής επιφάνειας. Η ανακλαστικότητα επηρέασε αρνητικά τόσο τις φωτογραμμετρικές μεθόδους όσο και τις σαρώσεις LiDAR, οδηγώντας σε αυξημένες ανάγκες επεξεργασίας.

Πίνακας 7: Καταγραφή σαρώσεων Τηλεφώνου.

Εφαρμογή	Μέθοδος	Αριθμός Εικόνων	Συνεδρίες Σάρωσης	Χρόνος Σάρωσης	Χρόνος Επεξεργασίας		Παρατηρήσεις
					Cloud/ EXScan	Blender	
RealityScan	SfM	125	1	4'	5'	10'	
Polycam	SfM	94	1	4'	5'	10'	
KIRI Engine	SfM	106	1	4'	15'	10'	
KIRI Engine	LiDAR	85	1	3'	10'	5'	Σάρωση με iPhone 15 Pro
Polycam	3DGS	-	1	4'	40'	10'	
KIRI Engine	3DGS	116	1	3'	30'	10'	
Shining3D EinScan H2	White Light	-	1	5'	5'	3'	

Το τηλέφωνο παρουσίασε σημαντικές δυσκολίες λόγω της γυαλιστερής επιφάνειας, της συμμετρικής γεωμετρίας και της περιορισμένης επιφανειακής υφής. Τα χαρακτηριστικά αυτά δυσχέραναν την αξιόπιστη ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και επηρέασαν τη σταθερότητα της ανακατασκευής.

3.3.2 Εξαγωγή, Προεπεξεργασία και Επεξεργασία στο Blender

Μετά την ολοκλήρωση κάθε σάρωσης τόσο από τις εφαρμογές όσο και από τον Shining3D EinScan H2, κάθε μοντέλο εξήχθη σε μορφές OBJ και PLY. Στη συνέχεια ακολούθησε επεξεργασία στο λογισμικό Blender, την προετοιμασία των μοντέλων για αξιόπιστη σύγκριση. Τα μοντέλα που προήλθαν από τις εφαρμογές κινητών συσκευών παρουσίαζαν συχνότερα ελλείψεις και αυξημένο γεωμετρικό θόρυβο. Στα περισσότερα μοντέλα ήταν απαραίτητος ο καθαρισμός ανεπιθύμητων γεωμετρικών στοιχείων, καθώς και η ακριβής αποκοπή στο σημείο επαφής με την επιφάνεια στήριξης.

Η διαδικασία επεξεργασίας στο λογισμικό Blender ακολούθησε τα εξής στάδια: α) επισκευή του πλέγματος επιφανειών, β) έλεγχο και διόρθωση της κλίμακας βάσει πραγματικών μετρήσεων, και γ) τελική εξαγωγή σε μορφή PLY για τη σύγκριση στο CloudCompare.

Αντίθετα, τα μοντέλα του Shining3D EinScan H2 απαιτούσαν περιορισμένη επεξεργασία.

3.3.3 Σύγκριση στο CloudCompare

Για την ποσοτική αξιολόγηση της γεωμετρικής ακρίβειας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CloudCompare. Κάθε μοντέλο που προέκυψε από τις εφαρμογές των κινητών συσκευών συγκρίθηκε με το αντίστοιχο μοντέλο αναφοράς του Shining3D EinScan H2 μέσω της μεθόδου C2M.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε ζεύγος μοντέλων περιλάμβανε αρχικά φόρτωση και προ-ευθυγράμμιση, χειροκίνητα όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος λεπτομερούς ευθυγράμμισης ICP και τέλος πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των υπογεγραμμένων αποστάσεων.

Από κάθε ανάλυση εξήχθη η μέση απόσταση (Mean Distance) και η τυπική απόκλιση (Standard Deviation), εκφραζόμενα σε χιλιοστά. Παράλληλα δημιουργήθηκαν χρωματικοί χάρτες αποκλίσεων με σταθερό εύρος $\pm 2\text{mm}$ ώστε να είναι δυνατή η άμεση οπτική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων και μεθόδων σάρωσης. Μοντέλα που δεν κατέστη δυνατό να ευθυγραμμιστούν αξιόπιστα ή παρουσίαζαν σοβαρά γεωμετρικά προβλήματα, όπως εκτεταμένα κενά ή σημαντικές αστοχίες στην ανακατασκευή, αποκλείστηκαν από την ποσοτική ανάλυση και αξιολογήθηκαν μόνο ποιοτικά.

4. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με συνδυασμό ποσοτικών και ποιοτικών μεθόδων ανάλυσης, ώστε να προκύψει μια συνολική αποτίμηση της απόδοσης κάθε μεθόδου σάρωσης. Η προσέγγιση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η ποιότητα ενός τρισδιάστατου μοντέλου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρική του ακρίβεια, αλλά και από πρακτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοποίησή του στην τεκμηρίωση, την ανάλυση και την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πέντε κύρια κριτήρια: γεωμετρική ακρίβεια, ποιότητα υφής, επίπεδο λεπτομέρειας, χρόνος σάρωσης και επεξεργασίας, καθώς και ευκολία χρήσης.

Η γεωμετρική ακρίβεια αξιολογήθηκε ποσοτικά μέσω σύγκρισης με τα μοντέλα αναφοράς του σαρωτή Shining3D EinScan H2, χρησιμοποιώντας το λογισμικό CloudCompare και τη μέθοδο Cloud-to-Mesh (C2M). Η ανάλυση περιλάμβανε τον υπολογισμό μέσης απόκλισης και τυπικής απόκλισης, καθώς και τη δημιουργία χρωματικών χαρτών αποκλίσεων.

Η ποιότητα υφής και το επίπεδο λεπτομέρειας αξιολογήθηκαν ποιοτικά, μέσω οπτικής παρατήρησης των παραγόμενων μοντέλων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πιστότητα απόδοσης λεπτών μορφολογικών χαρακτηριστικών, στην ευκρίνεια της επιφανειακής πληροφορίας και στην οπτική συνοχή του τελικού μοντέλου.

Ο χρόνος σάρωσης και επεξεργασίας εξετάστηκε ως πρακτικός δείκτης αποδοτικότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα τη λειτουργικότητα κάθε μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Παράλληλα, η ευκολία χρήσης αξιολογήθηκε με βάση την πολυπλοκότητα της διαδικασίας, την ανάγκη τεχνικής παρέμβασης και τον βαθμό μετα-επεξεργασίας που απαιτήθηκε μέχρι την παραγωγή αξιοποιήσιμου μοντέλου.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τόσο τα ποσοτικά αποτελέσματα όσο και τις ποιοτικές παρατηρήσεις που προέκυψαν από τη συγκριτική ανάλυση των επιμέρους μεθόδων.

4.1 Γεωμετρική ακρίβεια

Η γεωμετρική ακρίβεια κάθε μοντέλου αξιολογήθηκε ποσοτικά μέσω της μεθόδου C2M, με σημείο αναφοράς τα μοντέλα του Shining3D EinScan H2, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως μοντέλα αναφοράς.

Η μέση απόσταση εκφράζει τη μέση υπογεγραμμένη απόσταση μεταξύ του εξεταζόμενου μοντέλου και του μοντέλου αναφοράς. Αρνητικές τιμές υποδηλώνουν γεωμετρική συρρίκνωση, ενώ θετικές τιμές γεωμετρική διόγκωση. Η τυπική απόκλιση εκφράζει τη διασπορά των αποστάσεων γύρω από τη μέση τιμή και λειτουργεί ως δείκτης γεωμετρικής σταθερότητας. Χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη γεωμετρική συνέπεια σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς.

Από το σύνολο των 52 σαρώσεων, ορισμένα μοντέλα αποκλείστηκαν από την ποσοτική σύγκριση λόγω σοβαρών γεωμετρικών προβλημάτων, όπως εκτεταμένες ελλείψεις, αδυναμία αξιόπιστης ευθυγράμμισης ή σημαντικές παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα, αποκλείστηκαν όλες οι σαρώσεις του τηλεφώνου, το μπρούτζινο γουδί από τη φωτογραμμετρική μέθοδο RealityScan, καθώς και το ακροκέραμο από τις μεθόδους KIRI Engine 3DGS και RealityScan.

Στις υποενότητες που ακολουθούν, για κάθε αντικείμενο παρουσιάζεται ο πλήρης πίνακας κατάταξης όλων των μεθόδων με βάση τη μέση απόσταση και την τυπική απόκλιση, καθώς και αναλυτική παρουσίαση της καλύτερης και της χειρότερης μεθόδου μέσω χαρτών αποκλίσεων και ιστογραμμάτων. Η κατάταξη των μεθόδων σε κάθε πίνακα προκύπτει από συνδυαστική αξιολόγηση της μέσης απόκλισης και της τυπικής απόκλισης, ώστε να αποτυπώνεται τόσο η εγγύτητα προς το μοντέλο αναφοράς όσο και η σταθερότητα της κατανομής των αποκλίσεων, σε περιπτώσεις όπου μια μέθοδος υπερτερεί σε έναν μόνο από τους δύο δείκτες, λαμβάνεται υπόψη η συνολική γεωμετρική συμπεριφορά.

Σημειώνεται ότι η γεωμετρική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών μεθόδων εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του εικονοστοιχείου στον χώρο (ground sampling distance, GSD), το οποίο καθορίζεται από την απόσταση λήψης (Remondino, 2011). Στην παρούσα έρευνα οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν σε αποστάσεις 20–40 cm από τα αντικείμενα, κοντινότερες αποστάσεις λήψης θα απέδιδαν υψηλότερη ανάλυση και, σε μικρά αντικείμενα,

ενδεχομένως γεωμετρική ακρίβεια συγκρίσιμη ή και ανώτερη του σαρωτή δομημένου φωτός. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν τις συγκεκριμένες συνθήκες λήψης. Η πλήρης απεικόνιση όλων των μεθόδων για κάθε αντικείμενο παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

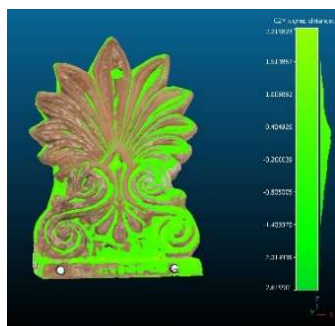
4.1.1 Ακροκέραμο - Αποτελέσματα C2M

Το ακροκέραμο παρουσίασε τις περισσότερες μεθοδολογικές πολυπλοκότητες. Δύο μέθοδοι αποκλείστηκαν από την ποσοτική σύγκριση λόγω εκτεταμένων ελλείψεων στην εσωτερική κοιλότητα: το KIRI Engine 3DGS και το RealityScan SfM. Η φωτογραμμετρική μέθοδος Polycam κατέγραψε καλύτερη επίδοση (Mean: +0.054 mm, std.dev: 0.752 mm). Το αντικείμενο αυτό ανέδειξε ότι μεγάλα αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία απαιτούν πρωτόκολλο πολλαπλών σαρώσεων με επαρκείς ζώνες επικάλυψης για αξιόπιστη ευθυγράμμιση.

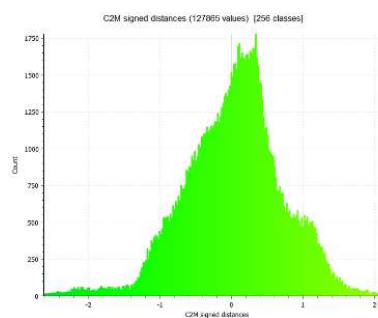
Πίνακας 8 Αποτελέσματα C2M – Ακροκέραμο.

Κατ.	Μέθοδος	Mean (mm)	Std.Dev (mm)
1 ^η	Polycam SfM	+0.054	0.752
2 ^η	KIRI Engine LiDAR	+0.272	1.234
3 ^η	KIRI Engine SfM	-0.267	1.360
4 ^η	Polycam 3DGS	+0.053	1.511
5 ^η	KIRI Engine 3DGS	-	-
6 ^η	RealityScan SfM	-	-

Η μέθοδος Polycam SfM παρουσίασε τη μικρότερη συνολική απόκλιση και σχετικά χαμηλή τυπική απόκλιση. Αξιοσημείωτο είναι ότι, παρά την πολυπλοκότητα της διπλής σάρωσης και της ICP ευθυγράμμισης, η Polycam SfM παρήγαγε το πλουσιότερο σύνολο χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εφαρμογών, επιτρέποντας αξιόπιστη ευθυγράμμιση ακόμη και σε μεγάλες επιφάνειες. Αυτό υποδηλώνει ότι η φωτογραμμετρία αποδίδει επαρκή πυκνότητα χαρακτηριστικών εφόσον εξασφαλιστεί ικανοποιητική επικάλυψη μεταξύ σαρώσεων.



Εικόνα 18: CloudCompare χάρτης
Ακροκέραμο, Polycam SfM. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.

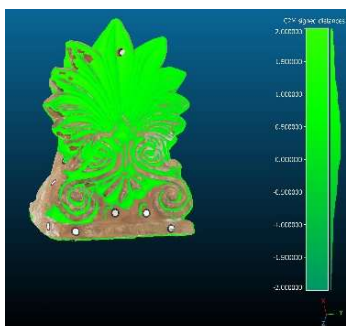


Εικόνα 19: Ιστογράμμο, Ακροκέραμο,
Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο

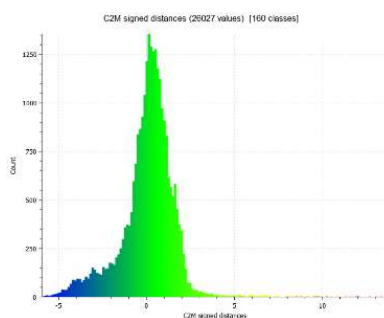
Το KIRI Engine LiDAR εμφάνισε υψηλότερη τυπική απόκλιση (1.234 mm), πιθανώς λόγω της περιορισμένης ευκρίνειας του LiDAR κινητής συσκευής σε μεγάλες και καμπύλες επιφάνειες. Στον χάρτη αποκλίσεων του CloudCompare (Εικόνα 18) παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας βρίσκεται εντός αποδεκτού εύρους αποκλίσεων, με τοπικές αποκλίσεις κυρίως στην περιοχή της εσωτερικής κοιλότητας.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 19 επιβεβαιώνει τη σχετικά ομαλή κατανομή των αποκλίσεων, με συγκέντρωση τιμών κοντά στο μηδέν. Η κατανομή αυτή υποδηλώνει καλή συνολική γεωμετρική συμφωνία με το μοντέλο αναφοράς.

Αντίθετα, το μοντέλο του Polycam με 3D Gaussian Splatting παρουσίασε μεγαλύτερη διασπορά αποκλίσεων. Στον αντίστοιχο χάρτη αποκλίσεων (Εικόνα 20) διακρίνονται περισσότερες τοπικές αποκλίσεις, ιδιαίτερα στις περιοχές αυξημένης γεωμετρικής πολυπλοκότητας.



Εικόνα 20: CloudCompare χάρτης Ακροκέραμο, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 21: Ιστόγραμμα, Ακροκέραμο Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 21 εμφανίζει ευρύτερη κατανομή τιμών σε σχέση με το φωτογραμμετρικό μοντέλο του Polycam, γεγονός που επιβεβαιώνει χαμηλότερη γεωμετρική σταθερότητα.

Πλήρης σύγκριση όλων των μεθόδων παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

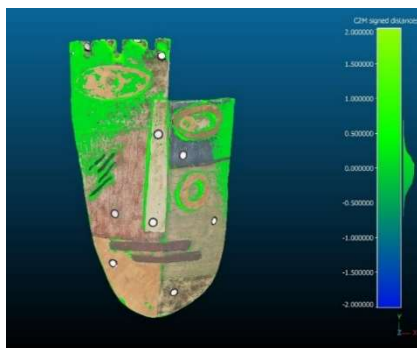
4.1.2 Κεραμική Μάσκα - Αποτελέσματα C2M

Η κεραμική μάσκα παρουσίασε τη μεγαλύτερη διακύμανση αποτελεσμάτων μεταξύ όλων των αντικειμένων, με εύρος μέσης απόκλισης από -0.018 έως $+0.658$ mm. Το καλύτερο αποτέλεσμα καταγράφηκε από το φωτογραμμετρικό μοντέλο του RealityScan (μέση απόσταση: -0.018 mm, τυπική απόκλιση: 0.400 mm), ενώ το ασθενέστερο από το φωτογραμμετρικό μοντέλο του KIRI Engine (μέση απόσταση: $+0.658$ mm, τυπική απόκλιση: 1.245 mm). Η μεγάλη απόκλιση μεταξύ των μεθόδων υποδηλώνει ότι η σύνθετη γεωμετρία του αντικειμένου, με συνδυασμό κυρτών και κοίλων επιφανειών, επηρέασε σημαντικά τη σταθερότητα της ανακατασκευής.

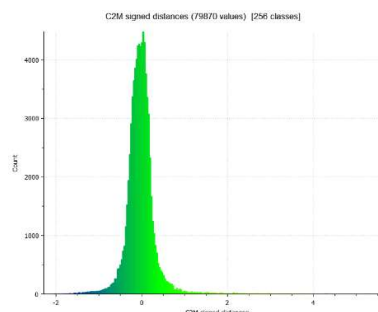
Πίνακας 9: Αποτελέσματα C2M – Κεραμική Μάσκα.

Κατ.	Μέθοδος	Mean (mm)	Std. Dev. (mm)
1 ^η	RealityScan SfM	-0.018	0.400
2 ^η	KIRI Engine LiDAR	-0.058	0.517
3 ^η	Polycam 3DGS	-0.092	0.343
4 ^η	Polycam SfM	-0.209	0.497
5 ^η	KIRI Engine 3DGS	+0.539	0.763
6 ^η	KIRI Engine SfM	+0.658	1.245

Το φωτογραμμετρικό μοντέλο του RealityScan παρουσίασε την καλύτερη συνολική γεωμετρική συμπεριφορά. Στον χάρτη αποκλίσεων του CloudCompare (Εικόνα 22) παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας παραμένει εντός αποδεκτού εύρους αποκλίσεων, με περιορισμένες τοπικές αποκλίσεις κυρίως στις κοιλότητες και στα λεπτότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά



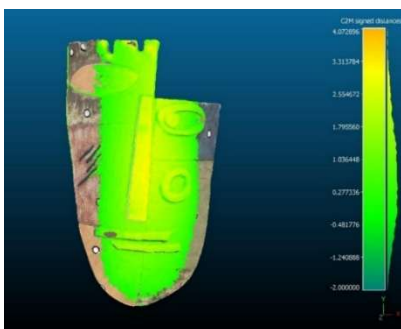
Εικόνα 22: CloudCompare χάρτης Κεραμική Μάσκα, RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



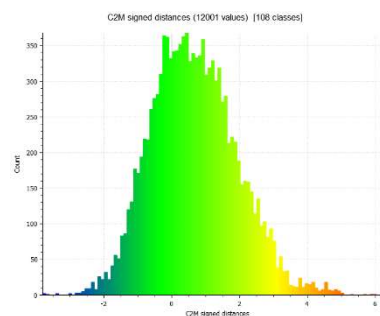
Εικόνα 23: Ιστόγραμμα, Κεραμική Μάσκα, RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 23 εμφανίζει έντονη συγκέντρωση τιμών κοντά στο μηδέν, γεγονός που επιβεβαιώνει υψηλή γεωμετρική συμφωνία με το μοντέλο αναφοράς.

Αντίθετα, το φωτογραμμετρικό μοντέλο του KIRI Engine παρουσίασε τη μεγαλύτερη απόκλιση και τη χαμηλότερη γεωμετρική σταθερότητα. Στον χάρτη αποκλίσεων του CloudCompare (Εικόνα 24) διακρίνεται εμφανής κλίση του μοντέλου και εκτεταμένες αποκλίσεις σε μεγάλες επιφάνειες, γεγονός που δυσχέρανε την αξιόπιστη ευθυγράμμιση.



Εικόνα 24: CloudCompare χάρτης Κεραμική Μάσκα, KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 25: Ιστόγραμμα, Κεραμική Μάσκα, KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 25 παρουσιάζει σημαντικά ευρύτερη κατανομή τιμών σε σχέση με το RealityScan, επιβεβαιώνοντας αυξημένη διασπορά αποκλίσεων και χαμηλότερη γεωμετρική συνέπεια.

Βλ. Παράρτημα Β για πλήρη σύγκριση όλων των μεθόδων.

4.1.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού - Αποτελέσματα C2M

Το αντίγραφο του Δίσκου της Φαιστού παρουσίασε συνολικά καλύτερα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα, παρά την απαίτηση καταγραφής λεπτής ανάγλυφης πληροφορίας. Η σχετικά επίπεδη γεωμετρία του αντικειμένου φαίνεται ότι ευνόησε τις περισσότερες μεθόδους σάρωσης.

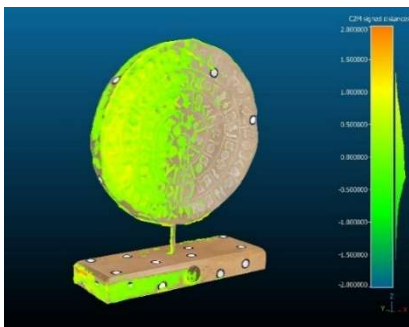
Το καλύτερο αποτέλεσμα καταγράφηκε με το RealityScan μέσω φωτογραμμετρίας (μέση απόσταση: -0.045 mm, τυπική απόκλιση: 0.607 mm). Πολύ κοντινές επιδόσεις παρουσίασαν και τα δύο μοντέλα 3DGS, του KIRI Engine (μέση απόσταση: -0.054 mm, τυπική απόκλιση: 0.634 mm) και του Polycam (μέση απόσταση: -0.056 mm, τυπική απόκλιση: 0.629 mm), γεγονός που υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία ευνοεί ιδιαίτερα τη μέθοδο 3DGS.

Αντίθετα, η μέθοδος LiDAR του KIRI Engine παρουσίασε τη χαμηλότερη επίδοση (μέση απόσταση: -0.291 mm, τυπική απόκλιση: 0.758 mm), υποδεικνύοντας ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία δυσκολεύεται περισσότερο στην αποτύπωση λεπτών ανάγλυφων χαρακτηριστικών μικρής κλίμακας. Τα εγχάρακτα σύμβολα του Δίσκου Φαιστού έχουν βάθος της τάξης των 1–2 mm, που βρίσκεται εντός των ορίων ανάλυσης του αισθητήρα LiDAR κινητής συσκευής, εξηγώντας την αυξημένη απόκλιση σε σχέση με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους. Η εξαιρετικά καλή επίδοση των μεθόδων 3DGS αποδίδεται στη σχετικά επίπεδη γεωμετρία και τη μεγάλη ορατή επιφάνεια του αντικειμένου, που διευκολύνουν τη σταθεροποίηση της γκαουσιανής αναπαράστασης. Σε αντίθεση με αντικείμενα σύνθετης γεωμετρίας, εδώ οι Gaussian splats τοποθετούνται σταθερά κοντά στην πραγματική επιφάνεια.

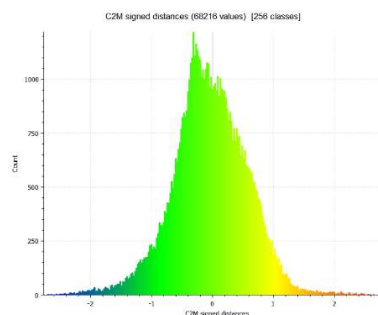
Πίνακας 10 : Αποτελέσματα C2M – Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού.

Κατ.	Μέθοδος	Mean (mm)	Std. Dev. (mm)
1 ^η	RealityScan SfM	-0.045	0.607
2 ^η	KIRI Engine 3DGS	-0.054	0.634
3 ^η	Polycam 3DGS	-0.056	0.629
4 ^η	Polycam SfM	-0.126	0.500
5 ^η	KIRI Engine SfM	-0.153	0.482
6 ^η	KIRI Engine LiDAR	-0.291	0.758

Το μοντέλο του RealityScan μέσω φωτογραμμετρίας παρουσίασε την καλύτερη συνολική γεωμετρική συμφωνία με το μοντέλο αναφοράς. Στον χάρτη αποκλίσεων του CloudCompare (Εικόνα 26) παρατηρείται σχετικά ομοιόμορφη κατανομή αποκλίσεων στην επιφάνεια του δίσκου, με περιορισμένες τοπικές αποκλίσεις κυρίως στις περιοχές των εγχάρακτων συμβόλων.



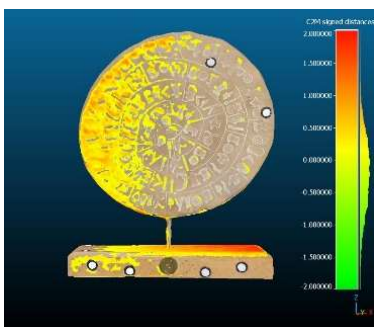
Εικόνα 26: CloudCompare χάρτης Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



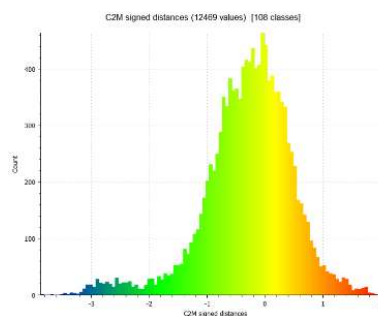
Εικόνα 27: Ιστόγραμμα Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 27 επιβεβαιώνει τη συγκέντρωση των περισσότερων τιμών κοντά στο μηδέν, στοιχείο που υποδηλώνει καλή συνολική γεωμετρική συνέπεια.

Αντίθετα, το μοντέλο του KIRI Engine με LiDAR παρουσίασε μεγαλύτερες αποκλίσεις. Στον χάρτη αποκλίσεων (Εικόνα 28) διακρίνονται εκτενέστερες περιοχές απόκλισης, ιδιαίτερα στις περιοχές λεπτομερούς αναγλύφου.



Εικόνα 28: CloudCompare χάρτης Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 29: Ιστόγραμμα Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 29 εμφανίζει ευρύτερη διασπορά τιμών σε σύγκριση με το RealityScan, επιβεβαιώνοντας χαμηλότερη γεωμετρική σταθερότητα.

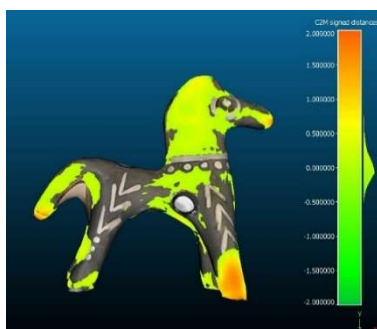
4.1.4 Ειδώλιο Αλόγου - Αποτελέσματα C2M

Το ειδώλιο αλόγου ανέδειξε τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων, λόγω της σύνθετης γεωμετρίας, των λεπτών άκρων και των κοιλιοτήτων μεταξύ των ποδιών. Η καλύτερη επίδοση καταγράφηκε από το Polycam 3DGS, ενώ η χαμηλότερη από το KIRI Engine με LiDAR. Κοινό πρόβλημα όλων των μεθόδων αποτέλεσε η ατελής αποτύπωση των λεπτών άκρων. Πλήρης σύγκριση παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

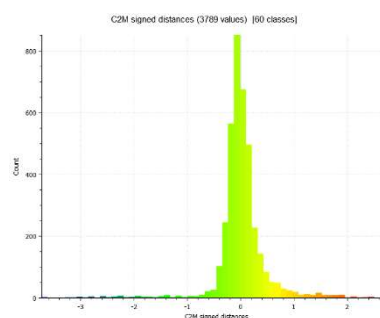
Πίνακας 11: Αποτελέσματα C2M – Ειδώλιο Αλόγου

Κατ.	Μέθοδος	Mean (mm)	Std. Dev (mm)
1 ^η	Polycam 3DGS	+0.016	0.464
2 ^η	KIRI Engine 3DGS	-0.574	0.475
3 ^η	Polycam SfM	+0.447	0.671
4 ^η	RealityScan SfM	+0.458	0.792
5 ^η	KIRI Engine SfM	+0.460	0.705
6 ^η	KIRI Engine LiDAR	+0.673	0.770

Στον χάρτη αποκλίσεων του Polycam 3DGS (Εικόνα 30) παρατηρείται γενικά ομοιόμορφη κατανομή αποκλίσεων, με περιορισμένες αποκλίσεις κυρίως στις περιοχές υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Το ιστόγραμμα της Εικόνας 31 δείχνει συγκέντρωση τιμών κοντά στο μηδέν, επιβεβαιώνοντας τη σχετικά υψηλή γεωμετρική σταθερότητα του μοντέλου.

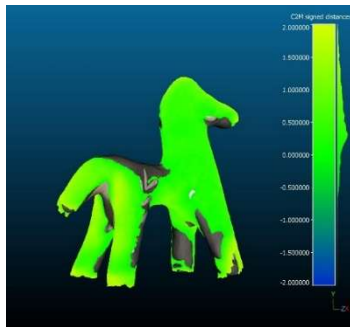


Εικόνα 30: CloudCompare χάρτης Ειδώλιο Αλόγου Polycam 3DGS . Πηγή: προσωπικό αρχείο.

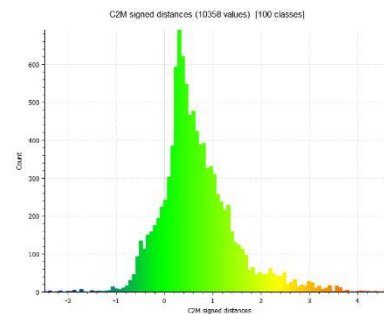


Εικόνα 31: Ιστόγραμμα Ειδώλιο Αλόγου Polycam 3DGS . Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Αντίθετα, στο μοντέλο KIRI Engine με LiDAR εμφανίζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις, κυρίως στην κάτω περιοχή του αντικειμένου και μεταξύ των ποδιών (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: CloudCompare χάρτης Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 33: Ιστόγραμμα Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 33 παρουσιάζει ευρύτερη διασπορά τιμών, επιβεβαιώνοντας χαμηλότερη γεωμετρική σταθερότητα. Αξίζει να σημειωθεί η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων 3DGS: η Polycam 3DGS κατέγραψε μέση απόκλιση $+0.016$ mm ενώ η KIRI 3DGS -0.574 mm. Η διαφορά αυτή υποδηλώνει συστηματική συρρίκνωση του μοντέλου KIRI 3DGS, πιθανώς λόγω διαφορετικής στρατηγικής βελτιστοποίησης των Gaussian splats στις λεπτές γεωμετρίες, όπως τα άκρα και τα πόδια του ειδωλίου. Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι εμφάνισαν παρόμοιες τιμές μεταξύ τους ($+0.447$ έως $+0.460$ mm), υποδηλώνοντας συστηματική ελαφρά διόγκωση που πιθανώς σχετίζεται με την εξομάλυνση επιφάνειας κατά την ανακατασκευή πλέγματος.

4.1.5 Μπρούτζινο Γουδί - Αποτελέσματα C2M

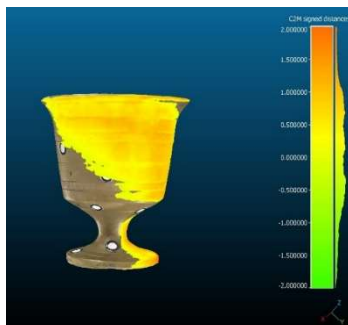
Το μπρούτζινο γουδί αποτέλεσε το πιο απαιτητικό αντικείμενο της έρευνας, καθώς όλες οι μέθοδοι παρουσίασαν τυπική απόκλιση μεγαλύτερη από 1 mm. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι οι έντονα ανακλαστικές μεταλλικές επιφάνειες δυσκολεύουν συστηματικά τις οπτικές μεθόδους σάρωσης.

Το καλύτερο αποτέλεσμα καταγράφηκε από το Polycam μέσω φωτογραμμετρίας (μέση απόσταση: +0.024 mm, τυπική απόκλιση: 1.031 mm), με πολύ μικρή διαφορά από το KIRI Engine μέσω φωτογραμμετρίας (μέση απόσταση: -0.022 mm, τυπική απόκλιση: 1.097 mm). Αντίθετα, το RealityScan αποκλείστηκε από την ποσοτική σύγκριση λόγω σοβαρών γεωμετρικών προβλημάτων. Επιπλέον, η κυλινδρική συμμετρία του αντικειμένου δυσχέρανε την αυτόματη ICP ευθυγράμμιση, απαιτώντας χειροκίνητη προ-ευθυγράμμιση.

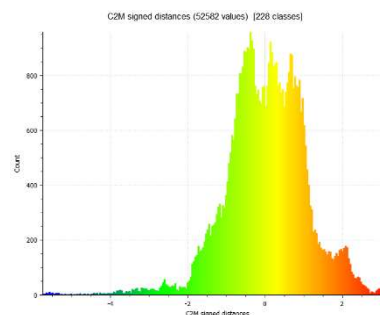
Πίνακας 12: Αποτελέσματα C2M – Μπρούτζινο Γουδί.

Κατ.	Μέθοδος	Mean (mm)	Std. Dev. (mm)
1 ^η	Polycam SfM	+0.024	1.031
2 ^η	KIRI Engine SfM	-0.022	1.097
3 ^η	KIRI Engine LiDAR	-0.134	1.102
4 ^η	KIRI Engine 3DGS	-0.533	1.212
5 ^η	Polycam 3DGS	-0.569	1.340
6 ^η	RealityScan SfM	-	-

Στον χάρτη αποκλίσεων του Polycam SfM (Εικόνα 34) παρατηρείται σχετικά ομοιόμορφη κατανομή αποκλίσεων στην κύρια επιφάνεια του αντικειμένου, με τοπικές αποκλίσεις κυρίως στη βάση και στο χείλος.



Εικόνα 34: CloudCompare χάρτης Μπρούτζινο Γουδί, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



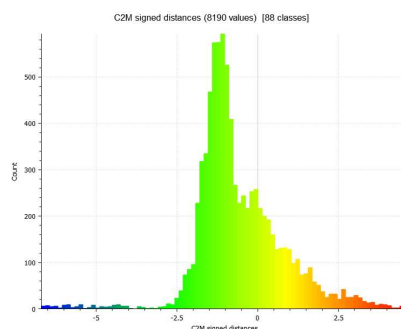
Εικόνα 35: Ιστόγραμμα Μπρούτζινο Γουδί, Polycam SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 35 δείχνει συγκέντρωση των περισσότερων τιμών κοντά στο μηδέν, επιβεβαιώνοντας τη σχετικά καλύτερη γεωμετρική σταθερότητα της μεθόδου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες.

Αντίθετα, το μοντέλο του Polycam 3DGS παρουσίασε μεγαλύτερες αποκλίσεις. Στον χάρτη αποκλίσεων (Εικόνα 36) διακρίνονται εκτενέστερες περιοχές απόκλισης, ιδιαίτερα στο χείλος και στις περιοχές υψηλής ανακλαστικότητας.



Εικόνα 36: CloudCompare χάρτης Μπρούτζινο Γουδί, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 37: Ιστόγραμμα Μπρούτζινο Γουδί, Polycam 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το ιστόγραμμα της Εικόνας 37 εμφανίζει ευρύτερη διασπορά τιμών, γεγονός που υποδηλώνει χαμηλότερη γεωμετρική σταθερότητα σε σχέση με τη φωτογραμμετρική μέθοδο. Αντίθετα από τον Δίσκο Φαιστού, όπου το 3DGS ευνοήθηκε από την επίπεδη γεωμετρία, στο γουδί οι μέθοδοι 3DGS κατέλαβαν τις χαμηλότερες θέσεις (Mean: -0.533 και -0.569 mm). Η κυλινδρική συμμετρία χωρίς διακριτά επιφανειακά χαρακτηριστικά δυσχεραίνει τη σταθεροποίηση των Gaussian splats, με αποτέλεσμα συστηματική υποεκτίμηση της γεωμετρίας. Επιπλέον, η ανακλαστικότητα της μεταλλικής επιφάνειας εισάγει αβεβαιότητα στη φωτομετρική πληροφορία που χρησιμοποιεί το 3DGS ως είσοδο, επιδεινώνοντας την ακρίβεια της ανακατασκευής. Πλήρης σύγκριση όλων των μεθόδων παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

4.1.6 Τηλέφωνο - C2M

Το τηλέφωνο αποκλείστηκε από την ποσοτική σύγκριση C2M, καθώς καμία εφαρμογή κινητής συσκευής δεν παρήγαγε μοντέλο επαρκούς γεωμετρικής ποιότητας για αξιόπιστη ευθυγράμμιση με το μοντέλο αναφοράς. Η γυαλιστερή πλαστική επιφάνεια, σε συνδυασμό με τη συμμετρική γεωμετρία και τη χαμηλή επιφανειακή υφή, δυσχέρανε σημαντικά την ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων τόσο στις φωτογραμμετρικές μεθόδους όσο και στις σαρώσεις LiDAR. Ως αποτέλεσμα, όλα τα παραγόμενα μοντέλα παρουσίασαν έντονα σφάλματα, παραμορφώσεις και αστάθεια στη γεωμετρική ανακατασκευή.

Το KIRI Engine LiDAR, με χρήση iPhone 15 Pro, παρήγαγε το πιο αναγνωρίσιμο αποτέλεσμα, ωστόσο και αυτό περιλάμβανε εμφανή γεωμετρικά σφάλματα και δεν κρίθηκε κατάλληλο για ποσοτική ανάλυση.

Το συγκεκριμένο αντικείμενο ανέδειξε με σαφήνεια ένα βασικό όριο των εφαρμογών κινητών συσκευών: οι έντονα ανακλαστικές και συμμετρικές επιφάνειες παραμένουν ιδιαίτερα προβληματικές για αξιόπιστη τρισδιάστατη αποτύπωση. Για απαιτήσεις υψηλής γεωμετρικής πιστότητας, όπως εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής ή ακριβούς τεκμηρίωσης, μόνο ο Shining3D EinScan H2 παρήγαγε αξιοποιήσιμο μοντέλο.

4.2 Οπτική Αξιολόγηση μοντέλων

4.2.1 Γεωμετρική Ποιότητα

Η ποιοτική αξιολόγηση της γεωμετρίας βασίστηκε στην οπτική παρατήρηση των μοντέλων σε λειτουργία στερεής απεικόνισης (Solid mode) του Blender. Η συγκεκριμένη προβολή επιτρέπει την αξιολόγηση της πραγματικής γεωμετρικής ποιότητας κάθε μοντέλου, αναδεικνύοντας την ομαλότητα, την τραχύτητα, τις επιφανειακές ασυνέχειες και τα τοπικά σφάλματα, ανεξάρτητα από τις πληροφορίες χρώματος ή υφής.

Η προσέγγιση αυτή κρίθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την άμεση αναγνώριση γεωμετρικών προβλημάτων που δεν είναι πάντοτε εμφανή σε μοντέλα με ενεργοποιημένη υφή, όπως επιφανειακός θόρυβος, παραμορφώσεις, οπές και σφάλματα ανακατασκευής.

Για κάθε αντικείμενο παρουσιάζεται το μοντέλο αναφοράς του Shining3D EinScan H2 και το καλύτερο μοντέλο που παρήχθη από τις εφαρμογές κινητών συσκευών, ώστε να αναδειχθούν με σαφήνεια οι διαφορές ως προς τη γεωμετρική πιστότητα και την πληρότητα αποτύπωσης.

Σημειώνεται ότι η οπτική αξιολόγηση ενδέχεται να αναδεικνύει ως καλύτερη διαφορετική μέθοδο σε σχέση με την ποσοτική ανάλυση C2M, καθώς εστιάζει στην αντιληπτή γεωμετρική ποιότητα και όχι στην αριθμητική απόκλιση από το μοντέλο αναφοράς. Η πλήρης συγκριτική παρουσίαση όλων των μεθόδων σάρωσης ανά αντικείμενο περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Γ.

4.2.1.1 Ακροκέραμο

Το ακροκέραμο αποτελεί απαιτητικό αντικείμενο λόγω της σύνθετης γεωμετρίας, των καμπύλων επιφανειών και της εσωτερικής κοιλότητας. Το μοντέλο αναφοράς του Shining3D EinScan H2 αποδίδει με υψηλή ακρίβεια τόσο τη συνολική μορφή όσο και τις λεπτομέρειες της διακόσμησης, με ομαλές επιφάνειες και σαφή απόδοση των γεωμετρικών μεταβάσεων (Εικόνα 38).



Εικόνα 38: Ακροκέραμο Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

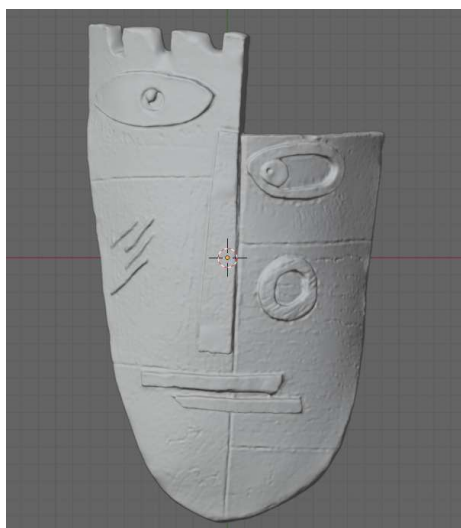


Εικόνα 39: Ακροκέραμο KIRI Engine SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Το καλύτερο αποτέλεσμα από τις εφαρμογές κινητών συσκευών προήλθε από το KIRI Engine μέσω φωτογραμμετρίας. Το μοντέλο αποτυπώνει ικανοποιητικά τους κύριους όγκους, ωστόσο παρατηρείται απώλεια λεπτομέρειας στις απότομες μεταβάσεις και μειωμένη ακρίβεια στην εσωτερική κοιλότητα (Εικόνα 39). Συνολικά, το αντικείμενο ανέδειξε τη δυσκολία αποτύπωσης σύνθετων γεωμετριών μεγάλου μεγέθους με φορητές εφαρμογές.

4.2.1.2 Κεραμική Μάσκα

Στη σάρωση αναφοράς του Shining3D EinScan H2, η γεωμετρία της κεραμικής μάσκας αποτυπώνεται με σαφήνεια στα ανάγλυφα χαρακτηριστικά, τις καμπυλότητες και τις κοιλότητες της επιφάνειας. Ιδιαίτερα καθαρή εμφανίζεται η μετάβαση μεταξύ κυρτών και κοίλων επιφανειών, χωρίς εμφανή γεωμετρικό θόρυβο ή ασυνέχειες (Εικόνα 40). Το μοντέλο του Polycam με φωτογραμμετρία παρουσίασε την καλύτερη συνολική απόδοση μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών, με γεωμετρία που προσεγγίζει ικανοποιητικά το μοντέλο αναφοράς. Η συνολική μορφή της μάσκας διατηρείται με καλή πιστότητα και οι κύριοι όγκοι αποδίδονται ομαλά (Εικόνα 41).



Εικόνα 40: Κεραμική Μάσκα Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

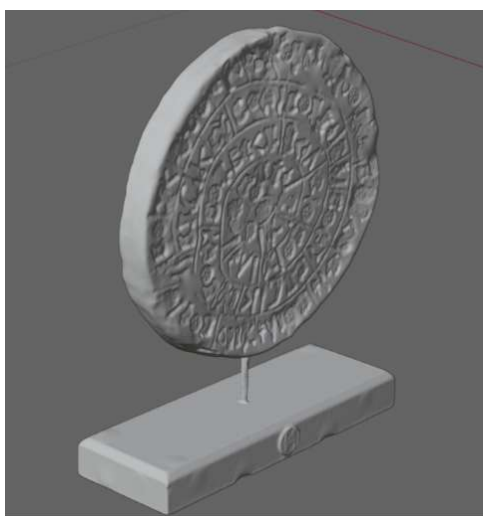


Εικόνα 41: Κεραμική Μάσκα Polycam SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Ωστόσο, παρατηρούνται μικρές απώλειες λεπτομέρειας στις περιοχές αυξημένης γεωμετρικής πολυπλοκότητας και ελαφρά εξομάλυνση σε ορισμένα ανάγλυφα χαρακτηριστικά. Η σύγκριση δείχνει ότι η φωτογραμμετρία μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία, με περιορισμένες απώλειες στη λεπτομέρεια.

4.2.1.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού

Για τον Δίσκο της Φαιστού, το μοντέλο αναφοράς του Shining3D EinScan H2 αποδίδει με υψηλή πιστότητα την γεωμετρία του αντικειμένου και ιδιαίτερα την ανάγλυφη λεπτομέρεια των εγχάρακτων συμβόλων. Τα σύμβολα εμφανίζονται σαφή, με καθαρά περιγράμματα και ομοιόμορφη επιφανειακή απόδοση (Εικόνα 42). Το μοντέλο του Polycam με φωτογραμμετρία παρήγαγε ικανοποιητικό αποτέλεσμα, αποδίδοντας με σχετική ακρίβεια τη συνολική μορφή και μεγάλο μέρος της επιφανειακής λεπτομέρειας (Εικόνα 43).



Εικόνα 42: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

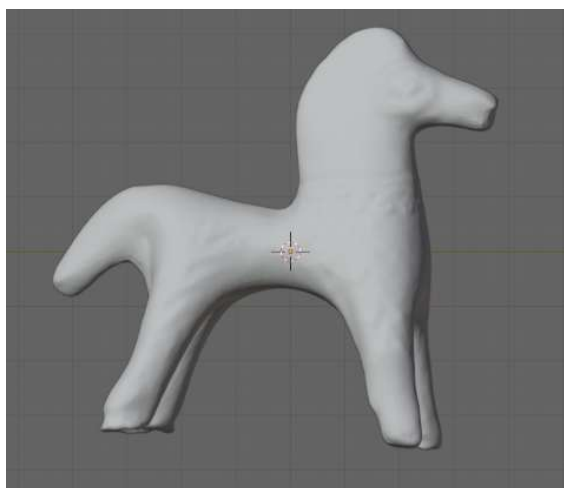


Εικόνα 43: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού Polycam SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Παρά τη γενικά καλή απόδοση, παρατηρείται ελαφρά εξομάλυνση στα λεπτότερα ανάγλυφα στοιχεία και μικρή απώλεια οξύτητας στα περιγράμματα των συμβόλων. Η σύγκριση δείχνει ότι αντικείμενα με επίπεδη αλλά πλούσια ανάγλυφη επιφάνεια μπορούν να αποτυπωθούν αποτελεσματικά και με εφαρμογές κινητών συσκευών.

4.2.1.4 Ειδώλιο Αλόγου

Ο Shining3D EinScan H2 κατέγραψε το ειδώλιο με ομαλή και λεπτομερή γεωμετρία, καταγράφοντας με ακρίβεια τις καμπυλότητες και τις λεπτές μεταβάσεις του σώματος και των ποδιών. Η μορφή του σώματος και των ποδιών εμφανίζεται καθαρή και γεωμετρικά συνεπής (Εικόνα 44). Το μοντέλο του KIRI Engine με φωτογραμμετρία παρουσίασε την καλύτερη απόδοση μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών, με ικανοποιητική αποτύπωση της συνολικής μορφής του αντικειμένου (Εικόνα 45).



Εικόνα 44: Ειδώλιο Αλόγου Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 45: Ειδώλιο Αλόγου KIRI Engine SfM λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Παρόλα αυτά, παρατηρούνται ελλείψεις στα λεπτά άκρα και στις δυσπρόσιτες περιοχές μεταξύ των ποδιών, όπου η γεωμετρική πολυπλοκότητα είναι μεγαλύτερη. Η σύγκριση επιβεβαιώνει ότι οι εφαρμογές κινητών συσκευών μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά τον κύριο όγκο του αντικειμένου, αλλά δυσκολεύονται σε μικρά και λεπτά μορφολογικά στοιχεία.

4.2.1.5 Μπρούτζινο Γουδί

Στο μοντέλο αναφοράς, η κυλινδρική μορφολογία και η συνολική δομή του γουδιού αποδίδονται με ακρίβεια, με ομαλές επιφάνειες και καθαρά όρια. Οι επιφάνειες εμφανίζονται ομαλές, με καθαρά όρια και χωρίς εμφανείς γεωμετρικές ασυνέχειες (Εικόνα 46). Το μοντέλο του KIRI Engine με LiDAR παρήγαγε την καλύτερη γεωμετρία μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών, αποδίδοντας ικανοποιητικά τη βασική μορφή και την κλίμακα του αντικειμένου (Εικόνα 47).



Εικόνα 46: Μπρούτζινο Γουδί Shining3D EinScan H2 λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 47: Μπρούτζινο Γουδί KIRI Engine LiDAR λειτουργία Solid. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Ωστόσο, παρατηρείται αυξημένος επιφανειακός θόρυβος, μικρές γεωμετρικές ασυνέχειες και τοπικές παραμορφώσεις, κυρίως στις περιοχές έντονων ανακλάσεων. Η σύγκριση επιβεβαιώνει ότι οι ανακλαστικές μεταλλικές επιφάνειες εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική πρόκληση ακόμη και για LiDAR σε κινητές συσκευές.

4.2.1.6 Τηλέφωνο

Για το τηλέφωνο δεν κατέστη δυνατή η παραγωγή αξιοποιήσιμου μοντέλου από καμία εφαρμογή κινητών συσκευών, λόγω της έντονα ανακλαστικής επιφάνειας και της περιορισμένης επιφανειακής υφής. Οι σαρώσεις παρουσίασαν σοβαρές παραμορφώσεις, γεωμετρικά κατάλοιπα και αδυναμία αξιόπιστης ανακατασκευής. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται μόνο το μοντέλο αναφοράς του Shining3D EinScan H2, το οποίο αποδίδει με ακρίβεια τη συνολική μορφολογία και τις χαρακτηριστικές καμπύλες επιφάνειες του αντικειμένου (Εικόνα 48). Η περίπτωση αυτή αναδεικνύει με σαφήνεια τα όρια των εφαρμογών κινητών συσκευών σε αντικείμενα με υψηλή ανακλαστικότητα και περιορισμένα διακριτά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 48: Τηλέφωνο Shining3D
EinScan H2 λειτουργία Solid.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

4.2.2 Ποιότητα Υφής

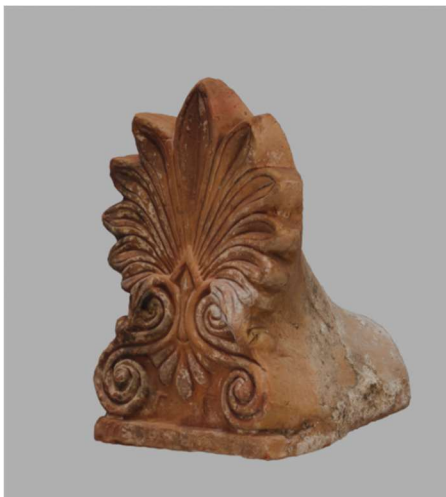
Πέρα από τη γεωμετρική αξιολόγηση σε λειτουργία στερεής απεικόνισης του Blender, εξετάστηκε και η ποιότητα της υφής κάθε μοντέλου μέσω αποδόσεων εικόνας με εφαρμοσμένη τη χρωματική πληροφορία. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά με ποιοτικά και οπτικά κριτήρια, καθώς η ποσοτική σύγκριση χρωματικής ακρίβειας θα απαιτούσε χρήση βαθμονομημένων χρωματικών προτύπων (colour checkers), κάτι που δεν εντάσσεται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης ήταν η φυσικότητα των χρωμάτων, η ευκρίνεια των επιφανειακών λεπτομερειών, η ομοιομορφία της υφής και η παρουσία οπτικών σφαλμάτων ή παραμορφώσεων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ποιότητα της υφής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη μέθοδο σάρωσης ή το λογισμικό επεξεργασίας, αλλά επηρεάζεται και από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι συνθήκες φωτισμού, η ανακλαστικότητα του αντικειμένου και οι ρυθμίσεις έκθεσης κατά τη λήψη, οι οποίοι δεν εξετάστηκαν συστηματικά στην παρούσα έρευνα. Ιδιαίτερη αναφορά απαιτείται στη συστηματική αχνή χρωματική απόδοση που παρατηρήθηκε σε όλα τα μοντέλα του Shining3D EinScan H2. Η απόδοση αυτή σχετίζεται σε ένα βαθμό με το γεγονός πως κατά τη χρήση του σαρωτή δεν πραγματοποιήθηκαν ρυθμίσεις φωτεινότητας με βάση το περιβάλλον σάρωσης και ακολουθήθηκαν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις. Δεδομένου ότι οι σαρωτές δομημένου φωτός βελτιστοποιούνται κατά κύριο λόγο για τη γεωμετρική ακρίβεια, η χρωματική πληροφορία αποδίδεται δευτερευόντως. Αντίθετα, οι εφαρμογές κινητών συσκευών αξιοποιούν την κύρια κάμερα του iPhone, η οποία είναι φωτομετρικά βαθμονομημένη και βελτιστοποιημένη για φωτογραφική ποιότητα. Το εύρημα αυτό είναι συνεπές με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η γεωμετρική ακρίβεια και η χρωματική πιστότητα δεν ταυτίζονται απαραίτητα, ιδίως κατά τη σύγκριση σαρωτικών και φωτογραμμετρικών μεθόδων (Remondino, 2011).

Η πλήρης συγκριτική παρουσίαση όλων των μεθόδων περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Δ.

4.2.2.1 Ακροκέραμο

Το ακροκέραμο παρουσίασε γενικά ικανοποιητική απόδοση υφής από τις περισσότερες μεθόδους, καθώς η ματ επιφάνειά του και η σχετικά σταθερή χρωματική συμπεριφορά του υλικού διευκόλυναν τη φωτογραφική καταγραφή. Οι φυσικές φθορές και οι επιφανειακές διαφοροποιήσεις του αντικειμένου αποτέλεσαν χρήσιμα οπτικά χαρακτηριστικά για την καλύτερη ανακατασκευή της υφής. Το KIRI Engine LiDAR απέδωσε πλούσια χρωματική πληροφορία, με ορατές επιφανειακές διαφοροποιήσεις και φυσική χρωματική απόδοση (Εικόνα 49).



Εικόνα 49: Ακροκέραμο ποιότητα υφής KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 50: Ακροκέραμο ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι απέδωσαν επίσης υψηλή ποιότητα υφής, με ικανοποιητική διατήρηση της χρωματικής συνέχειας. Αντίθετα, οι μέθοδοι 3DGS εμφάνισαν πιο ομοιόμορφη επιφανειακή απόδοση, με ελαφρώς χαμηλότερη τοπική λεπτομέρεια. Το μοντέλο του Shining3D EinScan H2 παρουσίασε αισθητά πιο αχνή χρωματική απόδοση, με περιορισμένη ένταση στις αποχρώσεις της (Εικόνα 50).

4.2.2.2 Κεραμική Μάσκα

Η κεραμική μάσκα αποτέλεσε απαιτητικό αντικείμενο λόγω της έντονης πολυχρωμίας της, των πολλαπλών χρωματικών ζωνών και των ανάγλυφων επιφανειακών χαρακτηριστικών. Οι εναλλαγές μεταξύ φωτεινών και σκοτεινών τμημάτων λειτούργησαν ως καλό κριτήριο για την αξιολόγηση της πιστότητας της υφής. Το KIRI Engine με φωτογραμμετρία απέδωσε με ιδιαίτερη πιστότητα τις χρωματικές μεταβάσεις και τις επιφανειακές διαφοροποιήσεις (Εικόνα 51).



Εικόνα 51: Κεραμική Μάσκα ποιότητα υφής KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 52: Κεραμική Μάσκα ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Αξιοσημείωτο εύρημα ήταν ότι και οι δύο μέθοδοι 3DGS παρήγαγαν υψηλή οπτική ποιότητα υφής, διατηρώντας ικανοποιητικά τις χρωματικές μεταβάσεις. Η RealityScan παρήγαγε πιο σκούρα απόδοση, γεγονός που πιθανόν σχετίζεται με τις συνθήκες φωτισμού ή τις ρυθμίσεις έκθεσης κατά τη λήψη. Το μοντέλο του Shining3D EinScan H2, αν και γεωμετρικά ιδιαίτερα ακριβές, εμφάνισε πιο αχνή και λιγότερο κορεσμένη χρωματική απόδοση (Εικόνα 52).

4.2.2.3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού

Το KIRI Engine με 3DS παρήγαγε την πιο πλούσια και φωτορεαλιστική υφή, αποδίδοντας με ιδιαίτερη σαφήνεια τα ιερογλυφικά σύμβολα και τις μικρές επιφανειακές διαφοροποιήσεις. Παρατηρείται υψηλή αντίθεση μεταξύ των εγχάρακτων περιοχών και της βάσης, γεγονός που ενισχύει την αναγνωσιμότητα των συμβόλων. Στην Εικόνα 53 διακρίνεται η υψηλή ευκρίνεια της υφής και η καθαρή χρωματική απόδοση του μοντέλου KIRI Engine 3DGS. Αντίθετα, το μοντέλο του Shining3D EinScan H2 παρουσίασε πολύ περιορισμένη χρωματική πληροφορία, με αποτέλεσμα η υφή να εμφανίζεται σχεδόν αχνή και να μην αναδεικνύει επαρκώς τα επιφανειακά χαρακτηριστικά. Η Εικόνα 54 αποτυπώνει τη σημαντικά υποδεέστερη χρωματική απόδοση του EinScan H2 σε σύγκριση με τις εφαρμογές κινητών συσκευών.



Εικόνα 53: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού ποιότητα υφής KIRI Engine 3DGS. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 54: Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

4.2.2.4 Ειδώλιο Αλόγου

Το ειδώλιο αλόγου αποτέλεσε ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση για την αξιολόγηση της ποιότητας υφής, λόγω της έντονης χρωματικής αντίθεσης μεταξύ του σκούρου σώματος και των λευκών διακοσμητικών μοτίβων. Η αντίθεση αυτή λειτούργησε ως καλός δείκτης για την αξιολόγηση της χρωματικής πιστότητας και της ευκρίνειας των λεπτομερειών. Το RealityScan παρήγαγε την καλύτερη συνολική απόδοση υφής, με πλούσιο χρωματικό εύρος και καθαρή απόδοση των διακοσμητικών στοιχείων (Εικόνα 55). Τα λευκά μοτίβα αποδίδονται με σαφήνεια, ενώ η σκούρα βάση διατηρεί επαρκές βάθος και φυσικότητα. Το μοντέλο του Shining3D EinScan H2 (Εικόνα 56) εμφανίζει αχνή χρωματική απόδοση, με αποτέλεσμα η χρωματική αντίθεση μεταξύ σκούρου σώματος και λευκών μοτίβων να εμφανίζεται μειωμένη σε σχέση με την πραγματική.



Εικόνα 55: Ειδώλιο Αλόγου ποιότητα υφής RealityScan SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 56 : Ειδώλιο Αλόγου ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

4.2.2.5 Μπρούτζινο Γουδί

Το μπρούτζινο γουδί αποτέλεσε απαιτητικό αντικείμενο λόγω της μεταλλικής και ανακλαστικής επιφάνειάς του, η οποία δυσχέρανε σημαντικά την αξιόπιστη αποτύπωση της υφής. Το KIRI Engine με φωτογραμμετρία απέδωσε τη φυσικότερη χρωματική αναπαράσταση, διατηρώντας τη χαρακτηριστική χάλκινη απόχρωση και αναδεικνύοντας ικανοποιητικά τα ίχνη χρήσης (Εικόνα 57).



Εικόνα 57: Μπρούτζινο Γουδί ποιότητα υφής KIRI Engine SfM. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

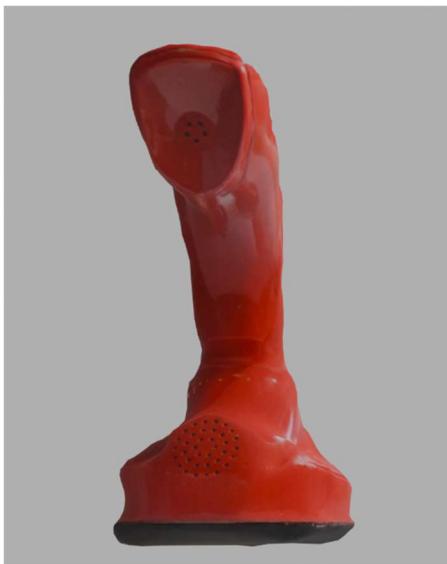


Εικόνα 58 : Μπρούτζινο Γουδί ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

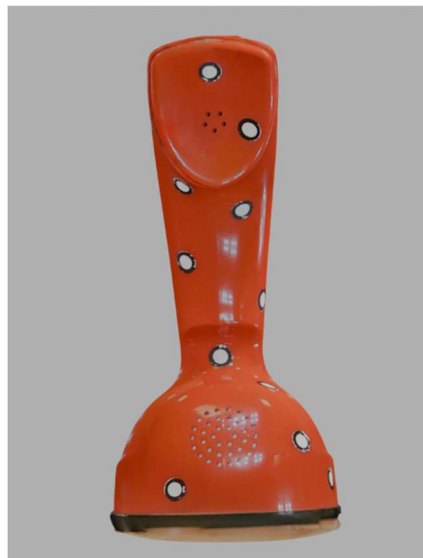
Η RealityScan απέτυχε να παράγει αξιοποιήσιμο μοντέλο. Το μοντέλο του Shining3D EinScan H2 παρουσίασε και εδώ αχνότερη χρωματική απόδοση, με περιορισμένη τονική διαφοροποίηση της μεταλλικής επιφάνειας (Εικόνα 58).

4.2.2.6 Τηλέφωνο

Η ανακλαστική κόκκινη επιφάνεια κατέστησε αδύνατη την αξιόπιστη αποτύπωση υφής, με αποτέλεσμα οι περισσότερες εφαρμογές να αποτύχουν να παράγουν αξιοποιήσιμο μοντέλο. Μόνο το KIRI Engine LiDAR (iPhone 15 Pro) απέδωσε αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα, αποδίδοντας το κόκκινο χρώμα με μειωμένη ανάλυση λόγω ανακλαστικότητας (Εικόνα 59). Το Shining3D EinScan H2 (IR mode) εμφάνισε φωτεινή πορτοκαλί απόχρωση, αποκλίνοντας από το πραγματικό βαθύ κόκκινο του αντικειμένου (Εικόνα 60).



Εικόνα 59: Τηλέφωνο ποιότητα υφής KIRI Engine LiDAR. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 60: Τηλέφωνο ποιότητα υφής Shining3D EinScan H2. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

4.3 Ακρίβεια Κλίμακας Εφαρμογών Κινητών Συσκευών

Πέραν της γεωμετρικής ακρίβειας, ένα σημαντικό ζήτημα για την αρχαιολογική τεκμηρίωση αποτελεί η ακρίβεια κλίμακας: η ικανότητα κάθε εφαρμογής να αποδώσει τις πραγματικές διαστάσεις του αντικειμένου χωρίς τη χρήση εξωτερικής αναφοράς. Για την αξιολόγηση αυτή, καταγράφηκε το ύψος κάθε μοντέλου όπως εξήχθη από κάθε εφαρμογή και συγκρίθηκε με το πραγματικό ύψος του αντικειμένου (Πίνακας 13).

Πίνακας 13: Σχετική απόκλιση ύψους.

Αντικείμε- νο	Πραγμα- τικό ύψος (cm)	Reality Scan SfM (cm)	Polycam Sfm (cm)	KIRI Engine SfM (cm)	KIRI Engine LiDAR (cm)	Polycam 3DGS (cm)	KIRI 3DGS (cm)
Ακροκέρα- μο	25	24 (-4%)	75.5 (+202%)	55.4 (+122%)	23 (-8%)	76.5 (+206%)	354 (+1316%)
Κεραμική Μάσκα	28	30.25 (+8%)	74.3 (+165%)	25.1 (-10%)	28.4 (+1%)	65.4 (+134%)	26.6 (-5%)
Δίσκος Φαιστού	21.5	22.7 (+6%)	68.8 (+220%)	67.5 (+214%)	21 (-2%)	65.9 (+207%)	65.9 (+207%)
Ειδώλιο Αλόγου	8	15.7 (+96%)	7.38 (-8%)	25.9 (+224%)	7.54 (-6%)	7.85 (-2%)	14.5 (+81%)
Γουδί	11.5	17.2 (+50%)	36.8 (+220%)	29 (+152%)	13.5 (+17%)	40.3 (+250%)	45 (+291%)
Τηλέφωνο	21.5	-	19.5 (-9%)	43.9 (+104%)	12.6 (-40%)	55.4 (+158%)	191 (+788%)

Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν έντονη διαφοροποίηση στην ικανότητα εκτίμησης κλίμακας μεταξύ των μεθόδων, η οποία δεν είναι τυχαία αλλά αντανακλά τον θεμελιώδη τρόπο λειτουργίας κάθε τεχνολογίας. Η μέθοδος KIRI Engine LiDAR παρουσίασε τη χαμηλότερη συστηματική απόκλιση με αποκλίσεις -8% (ακροκέραμο), +1% (μάσκα), -2% (Δίσκος Φαιστού) και -6% (ειδώλιο αλόγου). Επίσης το RealityScan SfM απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για ορισμένα αντικείμενα +8% (μάσκα) και +6% (Δίσκος Φαιστού).

Αντίθετα, οι μέθοδοι φωτογραμμετρίας του Polycam και οι μέθοδοι 3DGS αμοφτέρων των εφαρμογών παρουσίασαν πολύ υψηλές αποκλίσεις κλίμακας, συχνά υπερβαίνοντας το 200%. Χαρακτηριστικά, το Polycam σε λειτουργία φωτογραμμετρίας εκτίμησε το ύψος του ακροκέραμου σε 75,5 cm αντί των πραγματικών 25 cm (+202%), ενώ το KIRI Engine 3DGS το εκτίμησε σε 354 cm (+1.316%). Για το γουδί, το KIRI Engine 3DGS απέδωσε 45 cm (+291%), ενώ για το τηλέφωνο το εκτίμησε 191 cm αντί 21,5 cm (+788%). Οι αποκλίσεις αυτές αποτελούν γνωστό χαρακτηριστικό των μεθόδων ανακατασκευής από εικόνες: όταν δεν υπάρχουν εξωτερικές μετρικές αναφορές, η ανακατασκευή προκύπτει με σχετική και όχι απόλυτη κλίμακα, καθώς η μέθοδος φωτογραμμετρίας επιλύει ταυτόχρονα τη θέση της κάμερας και τη γεωμετρία της σκηνής έως έναν άγνωστο συντελεστή κλίμακας (Westoby et al., 2012). Η κλίμακα αυτή διορθώνεται πλήρως με τη χρήση ράβδου κλίμακας (scale bar) ή οποιουδήποτε γνωστού μήκους αναφοράς εντός του πεδίου σάρωσης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις προσεγγίσεις 3DGS, οι οποίες στηρίζονται επίσης σε δεδομένα εικόνας και, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, εμφανίζουν την ίδια αδυναμία απόδοσης απόλυτης κλίμακας.

Η αναντιστοιχία κλίμακας αποτέλεσε εμπόδιο κατά τη διαδικασία C2M ανάλυσης στο CloudCompare, καθώς απαιτήθηκε χειροκίνητη διόρθωση κλίμακας πριν από κάθε ευθυγράμμιση, ώστε τα μοντέλα των εφαρμογών να φέρονται στις πραγματικές διαστάσεις του μοντέλου αναφοράς.

Αξιοσημείωτη εξαίρεση αποτελεί το KIRI Engine LiDAR για το τηλέφωνο, όπου η απόκλιση ανήλθε σε -40% (12,6 cm αντί 21,5cm). Η σάρωση αυτή πραγματοποιήθηκε με iPhone 15 Pro (λόγω τεχνικού ζητήματος στο iPhone 17 Pro), γεγονός που ενδέχεται να επηρέασε την ακρίβεια κλίμακας, καθώς οι δύο συσκευές ενδέχεται να διαφέρουν στα χαρακτηριστικά του αισθητήρα LiDAR.

Η πρακτική της φωτογραμμετρίας προσφέρει μια τεκμηριωμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος, η οποία θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε μελλοντικό πρωτόκολλο σάρωσης με εφαρμογές κινητών συσκευών: τη χρήση ράβδων κλίμακας (scale bars) με στόχους γνωστής βαθμονομημένης απόστασης. Οι ράβδοι τοποθετούνται γύρω από το αντικείμενο και αποτελούν μέρος του πεδίου σάρωσης, ώστε οι στόχοι τους να είναι ορατοί σε πολλαπλές αλληλεπικαλυπτόμενες λήψεις. Κατά την επεξεργασία, το λογισμικό

εντοπίζει τα κέντρα των στόχων και, με βάση τη γνωστή απόσταση μεταξύ τους, αποδίδει απόλυτη κλίμακα σε ολόκληρο το μοντέλο. Βασική προϋπόθεση είναι η ράβδος να παραμένει ακίνητη καθ' όλη τη διάρκεια της λήψης. Εναλλακτικά, αρκεί η τοποθέτηση ενός αντικειμένου γνωστών διαστάσεων εντός του πεδίου, ώστε να υπάρχει τουλάχιστον μία γνωστή απόσταση αναφοράς για την κλιμάκωση του μοντέλου (Westoby et al., 2012). Η ενσωμάτωση τέτοιας αναφοράς στο πρωτόκολλο λήψης θα αποτελούσε σημαντική βελτίωση για μελλοντικές εφαρμογές όπου η μετρική ακρίβεια είναι κρίσιμη.

4.4 Χρόνοι Σάρωσης και Επεξεργασίας

Πέρα από την ποιότητα του τελικού μοντέλου, καθοριστικό κριτήριο για την πρακτική εφαρμογή κάθε μεθόδου σε συνθήκες αρχαιολογικής τεκμηρίωσης αποτελεί ο απαιτούμενος χρόνος. Για τον λόγο αυτό, καταγράφηκε ο χρόνος κάθε σάρωσης σε τρία διακριτά στάδια: α) ο χρόνος σάρωσης, δηλαδή η λήψη των δεδομένων στο πεδίο, β) ο χρόνος επεξεργασίας στο νέφος, δηλαδή η αυτόματη ανακατασκευή του μοντέλου από κάθε εφαρμογή, και γ) ο χρόνος επεξεργασίας στο Blender, που περιλαμβάνει τον καθαρισμό, την ευθυγράμμιση και την προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση. Οι παρακάτω τιμές αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές ανά μέθοδο και αποτυπώνουν εύρη, καθώς ο χρόνος επηρεάστηκε από τη γεωμετρική πολυπλοκότητα και το μέγεθος κάθε αντικειμένου.

Πίνακας 14: Μέσοι χρόνοι ανά μέθοδο

Εφαρμογή	Μέθοδος	Σάρωση (λεπτ.)	Επεξεργασία σε cloud / λογισμικό (λεπτ.)	Επεξεργασία στο Blender (λεπτ.)	Σύνολο (λεπτ.)
RealityScan	SfM	3-4	5-15	10-15	~30
Polycam	SfM	3-5	5-20	10-15	~35
KIRI Engine	SfM	2-6	5-15	10-20	~35
KIRI Engine	LiDAR	3-6	3-15	3-20	~25
Polycam	3DGS	3-4	20-40	10-30	~60
KIRI Engine	3DGS	2-5	25-40	10-30	~60
EinScan H2	White/IR	5-15	5-10	2-5	~25

Ως προς τον χρόνο σάρωσης, οι εφαρμογές κινητών συσκευών παρουσίασαν συγκρίσιμες επιδόσεις, με εύρη από 2 έως 6 λεπτά. Αντίθετα, ο Shining3D EinScan H2 απαίτησε τον μεγαλύτερο χρόνο σάρωσης (5 έως 15 λεπτά), γεγονός που οφείλεται στη μέθοδο χειρός

(handheld), στην ανάγκη κάλυψης του αντικειμένου από πολλαπλές γωνίες και στην προετοιμασία με ανακλαστικούς δείκτες. Το αυξημένο αυτό κόστος χρόνου στη λήψη αντισταθμίζεται, ωστόσο, από την υψηλότερη γεωμετρική ακρίβεια του τελικού μοντέλου.

Ως προς τον χρόνο επεξεργασίας στο νέφος, παρατηρείται η σαφέστερη διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων. Οι μέθοδοι φωτογραμμετρίας και LiDAR ολοκλήρωσαν την ανακατασκευή σε σχετικά σύντομο χρόνο (3 έως 20 λεπτά), ενώ οι μέθοδοι 3DGS απαιτήσαν σημαντικά περισσότερο χρόνο (20 έως 40 λεπτά). Η διαφορά αυτή εξηγείται από τον υπολογιστικά εντατικό χαρακτήρα του 3DGS, το οποίο απαιτεί επαναληπτική βελτιστοποίηση μεγάλου αριθμού γκαουσιανών στοιχείων για την αναπαράσταση της σκηνής. Ο Shining3D EinScan H2, αντίθετα, ολοκλήρωσε την επεξεργασία ταχύτατα (5 έως 10 λεπτά), καθώς το λογισμικό EXScan Pro είναι βελτιστοποιημένο για τον συγκεκριμένο σαρωτή.

Ως προς τον χρόνο επεξεργασίας στο Blender, οι περισσότερες μέθοδοι κινήθηκαν σε παρόμοια εύρη (10 έως 30 λεπτά), ανάλογα με την ποσότητα θορύβου και τις ατέλειες που έπρεπε να διορθωθούν. Ο Shining3D EinScan H2 απαίτησε τον λιγότερο χρόνο σε αυτό το στάδιο (2 έως 5 λεπτά), διότι τα μοντέλα του ήταν εξ αρχής καθαρότερα και απαιτούσαν ελάχιστη χειροκίνητη επέμβαση.

Συνυπολογίζοντας και τα τρία στάδια, η μέθοδος KIRI Engine LiDAR αναδείχθηκε ως η ταχύτερη συνολικά (περίπου 25 λεπτά), επίδοση συγκρίσιμη με εκείνη του EinScan H2 (περίπου 25 λεπτά). Στον αντίποδα, οι μέθοδοι 3DGS αποδείχθηκαν οι πλέον χρονοβόρες (περίπου 60 λεπτά), σχεδόν διπλάσιες σε σχέση με τις μεθόδους φωτογραμμετρίας (περίπου 30 έως 35 λεπτά).

Συμπερασματικά, η μέθοδος LiDAR προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό ταχύτητας τόσο στη σάρωση όσο και στην επεξεργασία, καθιστώντας την ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές πεδίου όπου ο χρόνος είναι περιορισμένος. Ο Shining3D EinScan H2, αν και απαιτεί περισσότερο χρόνο στη φάση της σάρωσης, αντισταθμίζει το κόστος αυτό με ταχύτατη και ελάχιστη μετα-επεξεργασία, χάρη στην καθαρότητα των μοντέλων του. Αντίθετα, οι μέθοδοι 3DGS, παρά την υψηλή οπτική ποιότητα της υφής που παράγουν, επιβαρύνονται από σημαντικά υψηλότερο υπολογιστικό κόστος, το οποίο πρέπει να συνεκτιμάται κατά την επιλογή μεθόδου ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου.

4.5 Καταλληλότητα για 3Δ Εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές της τρισδιάστατης σάρωσης στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς επιτρέπει την παραγωγή φυσικών αντιγράφων για σκοπούς εκπαίδευσης, έρευνας, έκθεσης και κατασκευής αντιγράφων (Kantaros et al., 2023). Προϋπόθεση για την εκτύπωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου είναι το επιφανειακό πλέγμα να αποτελεί κλειστή και συνεχή γεωμετρία, να είναι άρτιο χωρίς αυτοτεννόμενες επιφάνειες και τοπολογικές ασυνέπειες που ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα κατά τη διαδικασία τεμαχισμού σε στρώσεις (slicing) πριν την εκτύπωση (Kantaros et al., 2023).

Η αξιολόγηση της εκτυπωσιμότητας πραγματοποιήθηκε μέσω του εργαλείου ελέγχου εκτύπωσης (3D Print Toolbox) του λογισμικού Blender 4.5.3 LTS. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό γεωμετρικών και τοπολογικών προβλημάτων που επηρεάζουν την καταλληλότητα ενός πλέγματος για τρισδιάστατη εκτύπωση (Blender Foundation, n.d.).

Οι κύριοι δείκτες που εξετάστηκαν ήταν: α) μη άρτιες ακμές (Non-manifold Edges, NM): ακμές με ανοιχτή ή ασαφή τοπολογία, β) εσφαλμένα προσανατολισμένες ακμές (Bad Contiguous Edges, BCE): ακμές με ασυνέπειες στον προσανατολισμό των κανονικών γειτονικών επιφανειών, γ) αυτοτεννόμενες επιφάνειες (Intersect Faces, IF): επιφάνειες που τέμνονται μεταξύ τους και δημιουργούν γεωμετρικές ασυνέπειες, δ) κελύφη (Shells): ο αριθμός ανεξάρτητων κλειστών επιφανειών του πλέγματος, ε) λεπτές επιφάνειες και αιχμηρές ακμές (Thin Faces, TF/ Sharp Edges, SE): πολύ λεπτά ή έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, καθώς και χαρακτηριστικά αιχμηρών ακμών που ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα εκτύπωσης.

Τα κριτήρια αξιολόγησης της παρούσας έρευνας δεν βασίζονται σε διεθνές πρότυπο, αλλά ορίστηκαν επιχειρησιακά για τις ανάγκες της συγκριτικής ανάλυσης των παραγόμενων πλεγμάτων. Η ταξινόμηση στηρίχθηκε στις απαιτήσεις γεωμετρικής και δομικής καταλληλότητας για τρισδιάστατη εκτύπωση και στην κατανομή των τιμών του δείγματος. Τα όρια αυτά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παρούσα μελέτη και δεν αποτελούν γενικό πρότυπο εκτυπωσιμότητας.

Με βάση αυτά τα κριτήρια, μοντέλα χωρίς σφάλματα ($NM = 0$, $BCE = 0$, $IF = 0$) και με ενιαίο κέλυφος ($Shells = 1$) θεωρήθηκαν άμεσα εκτυπώσιμα. Μοντέλα με λίγα σφάλματα (<20) χαρακτηρίστηκαν εκτυπώσιμα με μικρές διορθώσεις, ενώ υψηλότερες τιμές απαιτούν αυξημένη επέμβαση. Μοντέλα με τιμές άνω των 500 σφαλμάτων θεωρήθηκαν ακατάλληλα για άμεση 3Δ εκτύπωση.

Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μετά το κλείσιμο οπών και το βασικό καθαρισμό των πλεγμάτων, όπως περιγράφεται στη διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα ελέγχου εκτυπωσιμότητας

Αντικείμενο	Μέθοδος	NM	BCE	IF	Shells	TF	SE	Αξιολόγηση
Ακροκέραμο	EinScan H2	0	0	0	1	162	1	Άμεσα εκτυπώσιμο
	KIRI Engine LiDAR	0	0	0	1	0	0	Άμεσα εκτυπώσιμο
	RealityScan SfM	1.233	0	11	15	293	2	Ακατάλληλο
	Polycam 3DGS	576	64	126	5	300	10	Ακατάλληλο
	KIRI Engine SfM	683	0	2.486	18	9.303	8	Ακατάλληλο
	KIRI Engine 3DGS	1.231	0	28.522	13	368	12.765	Ακατάλληλο
	Polycam SfM	25.538	1	3.619	522	725	2	Ακατάλληλο
Κεραμική Μάσκα	EinScan H2	0	0	0	3	761	0	Εκτυπώσιμο
	KIRI Engine LiDAR	0	0	0	1	10	0	Άμεσα εκτυπώσιμο
	KIRI Engine SfM	7	0	0	2	2	0	Μικρή επισκευή
	RealityScan SfM	15	0	5	1	239	2	Σοβαρή επισκευή

Αντικείμενο	Μέθοδος	NM	BCE	IF	Shells	TF	SE	Αξιολόγηση
Κεραμική Μάσκα	KIRI Engine 3DGS	1.549	11	90	1	21	1	Ακατάλληλο
	Polycam SfM	28.898	0	3.374	648	101	0	Ακατάλληλο
Δίσκος Φαιστού	EinScan H2	0	0	0	1	0	1	Άμεσα εκτυπώσιμο
	KIRI Engine SfM	0	377	13	1	212	153	Σοβαρή επισκευή
	RealityScan SfM	40	0	32	3	1.394	0	Σοβαρή επισκευή
	KIRI Engine LiDAR	15	0	10	1	110	11	Σοβαρή επισκευή
	Polycam SfM	10.464	10	1.696	205	755	70	Ακατάλληλο
	KIRI Engine 3DGS	2.644	18	435	45	206	0	Ακατάλληλο
	Polycam 3DGS	2.699	15	394	43	219	2	Ακατάλληλο
Ειδώλιο αλόγου Ειδώλιο αλόγου	EinScan H2	0	0	0	1	35	0	Άμεσα εκτυπώσιμο
	KIRI Engine SfM	0	0	2	1	753	76	Μικρή επισκευή
	RealityScan SfM	6	0	0	1	801	2	Μικρή επισκευή
	KIRI Engine LiDAR	25	6	0	1	336	3	Σοβαρή επισκευή
	Polycam SfM	2.557	7	394	68	116	1	Ακατάλληλο
	KIRI Engine 3DGS	131	157	15.313	1	1.173	5.969	Ακατάλληλο
	Polycam 3DGS	1.374	2	202	34	150	0	Ακατάλληλο

Αντικείμενο	Μέθοδος	NM	BCE	IF	Shells	TF	SE	Αξιολόγηση
Μπρούτζινο Γουδί	EinScan H2	0	0	0	1	87	0	Άμεσα εκτυπώσιμο
	KIRI Engine SfM	0	0	33	1	805	4	Σοβαρή επισκευή
	KIRI Engine LiDAR	50	0	8	1	170	0	Σοβαρή επισκευή
	RealityScan SfM	23	2	172	1	3.054	30	Ακατάλληλο
	Polycam SfM	13.968	1	2.039	327	1.081	45	Ακατάλληλο
	Polycam 3DGS	1.423	0	228	21	258	15	Ακατάλληλο
	KIRI Engine 3DGS	—	—	—	—	—	—	Δεν εξετάστηκε
Τηλέφωνο	EinScan H2	0	0	0	2	24	0	Εκτυπώσιμο

4.5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Ο Shining3D EinScan H2 παρουσιάζει σταθερά τα καλύτερα αποτελέσματα σε όλα τα αντικείμενα που εξετάστηκαν. Σε όλες τις περιπτώσεις καταγράφονται μηδενικές τιμές στους δείκτες μη άρτιων ακμών, εσφαλμένα προσανατολισμένων ακμών και αυτοτεμνόμενων επιφανειών, ενώ η γεωμετρία αποδίδεται ως ενιαίο κέλυφος, με εξαίρεση την κεραμική μάσκα και το τηλέφωνο. Η ύπαρξη τριών κελυφών στην κεραμική μάσκα και δύο κελυφών στο τηλέφωνο δεν οφείλεται σε αστοχία της σάρωσης, αλλά σε επεμβάσεις καθαρισμού και κλεισίματος του πλέγματος μετά τη σάρωση. Συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία αφαιρέθηκαν τμήματα της γεωμετρίας που λειτουργούσαν ως επιφάνειες στήριξης των αντικειμένων κατά τη σάρωση, διαδικασία που ενδέχεται να δημιουργήσει επιπλέον κελύφη χωρίς ωστόσο να επηρεάζει ουσιαστικά την εκτυπωσιμότητα. Συνεπώς, ο Shining3D EinScan H2 παράγει σταθερά τα πλέον κατάλληλα μοντέλα για άμεση τρισδιάστατη εκτύπωση.

Αξιοσημείωτη εξαίρεση μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών αποτελεί το KIRI Engine LiDAR. Στην κεραμική μάσκα και στο ακροκέραμο παρήγαγε άμεσα εκτυπώσιμα μοντέλα με μηδενικές τιμές στους βασικούς δείκτες τοπολογικών σφαλμάτων, επιτυγχάνοντας ποιότητα συγκρίσιμη με εκείνη του Shining3D EinScan H2. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει το KIRI Engine LiDAR ως την πλέον αξιόπιστη εφαρμογή κινητών συσκευών ως προς την τοπολογική αρτιότητα των παραγόμενων πλεγμάτων.

Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι παρουσιάζουν διαφοροποιημένη συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρία του αντικειμένου. Τα KIRI Engine και RealityScan αυτής της μεθόδου παράγουν γενικά εκτυπώσιμα αποτελέσματα σε αντικείμενα απλούστερης μορφής, ενώ η απόδοσή τους μειώνεται αισθητά σε πιο σύνθετες γεωμετρίες, όπως το ακροκέραμο. Αντίθετα, το Polycam εμφανίζει συστηματικά μεγάλο αριθμό κελυφών και αυξημένα γεωμετρικά σφάλματα, με αποτέλεσμα όλα τα παραγόμενα μοντέλα να κρίνονται ακατάλληλα για άμεση τρισδιάστατη εκτύπωση.

Οι μέθοδοι 3DGS παρουσιάζουν συνολικά τα λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την εκτυπωσιμότητα. Τόσο το KIRI Engine 3DGS όσο και το Polycam 3DGS παράγουν πλέγματα με υψηλές τιμές γεωμετρικών σφαλμάτων, γεγονός που καθιστά αναγκαία εκτεταμένη μεταγενέστερη επεξεργασία πριν από οποιαδήποτε χρήση σε τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η γεωμετρία του αντικειμένου επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των παραγόμενων πλεγμάτων. Ο Δίσκος της Φαιστού παρουσίασε τα καλύτερα συνολικά αποτελέσματα λόγω της σχετικά απλής μορφής του, ενώ το ακροκέραμο αναδείχθηκε ως το πλέον απαιτητικό αντικείμενο της έρευνας, καθώς μόνο ο Shining3D EinScan H2 και το KIRI Engine LiDAR παρήγαγαν άμεσα εκτυπώσιμα μοντέλα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η τοπολογική ποιότητα και η εκτυπωσιμότητα των παραγόμενων πλεγμάτων εξαρτώνται τόσο από τη μέθοδο καταγραφής όσο και από τη γεωμετρία του αντικειμένου. Ο Shining3D EinScan H2 εμφανίζει τη μεγαλύτερη συνέπεια και αξιοπιστία, ενώ μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών το KIRI Engine LiDAR παρουσιάζει την καλύτερη συνολική απόδοση. Ταυτόχρονα, τα ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι ο έλεγχος εκτυπωσιμότητας αποτελεί

αναγκαίο στάδιο της ροής εργασίας ψηφιακής τεκμηρίωσης, ανεξαρτήτως της χρησιμοποιούμενης μεθόδου σάρωσης (Kantaros et al., 2023).

5. Συμπεράσματα

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποίησε συγκριτική μελέτη τριών εφαρμογών κινητών συσκευών (RealityScan, Polycam, KIRI Engine) έναντι του επαγγελματικού σαρωτή δομημένου φωτός Shining3D EinScan H2, σε έξι αντικείμενα με διαφορετικά υλικά, μεγέθη και γεωμετρική πολυπλοκότητα. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πέντε κριτήρια: γεωμετρική ακρίβεια (C2M), ποιότητα υφής, ακρίβεια κλίμακας, χρόνο επεξεργασίας και καταλληλότητα για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το χάσμα μεταξύ επαγγελματικής και καταναλωτικής σάρωσης έχει στενέψει σημαντικά, χωρίς ωστόσο να έχει κλείσει. Οι εφαρμογές κινητών συσκευών παράγουν αξιόπιστα μοντέλα για συγκεκριμένες κατηγορίες αντικειμένων και χρήσεων, ενώ ο Shining3D EinScan H2 παραμένει ανώτερος σε γεωμετρική λεπτομέρεια, συνέπεια αποτελεσμάτων και καταλληλότητα για μετρικές εφαρμογές, για αντικείμενα του μεγέθους και των αποστάσεων λήψης που εξετάστηκαν (20–40 cm). Το κεντρικό συμπέρασμα της εργασίας δεν είναι ότι κάποια μέθοδος υπερέχει απόλυτα, αλλά ότι η επιλογή εργαλείου πρέπει να καθορίζεται από τον σκοπό της τεκμηρίωσης, τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και τους διαθέσιμους πόρους.

5.2 Ευρήματα ανά Κριτήριο Αξιολόγησης

5.2.1 Γεωμετρική Ακρίβεια

Η ανάλυση Cloud-to-Mesh σε 52 σαρώσεις ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις τόσο μεταξύ μεθόδων όσο και μεταξύ αντικειμένων. Το RealityScan SfM εμφάνισε τα καλύτερα αποτελέσματα σε αντικείμενα με κεραμικής επιφάνειας (μάσκα, δίσκος), με μέση απόσταση κοντά στο μηδέν και τυπική απόκλιση κάτω από 0,4–0,6 mm, ενώ το KIRI Engine LiDAR ακολούθησε με συγκρίσιμη ακρίβεια. Το Polycam SfM επίσης κατέγραψε ικανοποιητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα στο ακροκέραμο και το γουδί.

Αξιοσημείωτη είναι η απόδοση του Polycam 3DGS στο ειδώλιο αλόγου (μέση απόσταση: +0.016 mm), αποτέλεσμα εντυπωσιακό για μέθοδο που δεν παράγει παραδοσιακό πλέγμα.

Ωστόσο, η μέθοδος 3DGS εμφάνισε αστάθεια ανάλογα με το αντικείμενο: στον Δίσκο Φαιστού τα δύο 3DGS μοντέλα ήταν σχεδόν ισοδύναμα με τις SfM μεθόδους, ενώ στο ακροκέραμο το KIRI Engine 3DGS αποκλείστηκε εντελώς λόγω ελλείψεων.

Το γουδί και το τηλέφωνο αποτέλεσαν τα πιο απαιτητικά αντικείμενα: στο γουδί όλες οι μέθοδοι κατέγραψαν τυπική απόκλιση $> 1 \text{ mm}$, αντανακλώντας τα όρια της οπτικής σάρωσης σε ανακλαστικές μεταλλικές επιφάνειες. Το τηλέφωνο αποκλείστηκε από κάθε ποσοτική σύγκριση για τις εφαρμογές κινητών συσκευών, με μόνο τον Shining3D EinScan H2 να παράγει αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα.

5.2.2 Ακρίβεια Κλίμακας

Η ακρίβεια κλίμακας αποδείχθηκε ένα από τα πιο διαχωριστικά κριτήρια μεταξύ των μεθόδων. Το KIRI Engine LiDAR παρουσίασε συστηματικά τις χαμηλότερες αποκλίσεις (από -8% έως $+1\%$ στα τέσσερα αντικείμενα που αξιολογήθηκαν), αποδεικνύοντας ότι ο ενσωματωμένος αισθητήρας LiDAR παρέχει αξιόπιστη πληροφορία κλίμακας χωρίς εξωτερική αναφορά. Αντίθετα, οι μέθοδοι φωτογραμμετρίας και 3DGS χωρίς γνωστή απόσταση αναφοράς εμφάνισαν ακραίες αποκλίσεις, ενίοτε υπερβαίνοντας το 200% . Το εύρημα αυτό καταδεικνύει ότι, για απαιτήσεις τεκμηρίωσης όπου η μετρική ακρίβεια είναι κρίσιμη, η αξιόπιστη απόδοση κλίμακας προϋποθέτει είτε τη χρήση μεθόδου LiDAR είτε την ενσωμάτωση εξωτερικής αναφοράς κλίμακας κατά τη λήψη.

5.2.3 Ποιότητα Υφής

Ως προς την ποιότητα υφής, τα αποτελέσματα αντέστρεψαν μερικώς την κατάταξη της γεωμετρικής ακρίβειας: οι εφαρμογές κινητών συσκευών υπερείχαν συστηματικά του Shining3D EinScan H2, ο οποίος παρήγαγε αχνές, αποχρωματισμένες υφές σε όλα τα αντικείμενα. Το KIRI Engine LiDAR, το KIRI Engine SfM και το RealityScan SfM αποτύπωσαν πλουσιότερα χρώματα και επιφανειακή διακύμανση. Οι 3DGS μέθοδοι παρήγαγαν εντυπωσιακή οπτική ποιότητα σε απλούστερες γεωμετρίες (Δίσκος Φαιστού), ενισχύοντας έτσι την καταλληλότητα τους για εφαρμογές παρουσίασης.

5.2.4 Χρόνοι Επεξεργασίας και Ευκολία Χρήσης

Ο Shining3D EinScan H2 απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο σάρωσης (5–15 λεπτά) αλλά ελάχιστο χρόνο μετα-επεξεργασίας (2–5 λεπτά στο Blender), καθώς παραδίδει ήδη καθαρό νέφος σημείων. Οι εφαρμογές LiDAR είναι οι γρηγορότερες συνολικά (~25 λεπτά), ενώ οι 3DGS μέθοδοι η πιο χρονοβόρες λόγω επεξεργασίας στο νέφος (20–40 λεπτά). Η ευκολία χρήσης των εφαρμογών κινητών συσκευών είναι σαφώς ανώτερη γιατί δεν απαιτούν βαθμονόμηση, εξειδίκευση ή ανακλαστικούς δείκτες, και το αποτέλεσμα είναι άμεσα διαθέσιμο μέσω κινητού.

5.2.5 Καταλληλότητα για Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Ο Shining3D EinScan H2 παρήγαγε σταθερά άμεσα εκτυπώσιμα μοντέλα ($NM = 0$, $BCE = 0$, $IF = 0$) σε όλα τα αντικείμενα. Εξαίρεση μεταξύ των εφαρμογών κινητών συσκευών αποτέλεσε το KIRI Engine LiDAR, που παρήγαγε άμεσα εκτυπώσιμα μοντέλα στο ακροκέραμο και την κεραμική μάσκα, επιτυγχάνοντας ποιότητα συγκρίσιμη με τον επαγγελματικό σαρωτή. Το Polycam SfM και οι 3DGS μέθοδοι εμφάνισαν συστηματικά υψηλά γεωμετρικά σφάλματα, καθιστώντας τα μοντέλα ακατάλληλα για άμεση εκτύπωση.

5.3 Απαντήσεις στα Ερευνητικά Ερωτήματα

Οι εφαρμογές παράγουν αξιόπιστα μοντέλα για μη μετρικές εφαρμογές (εικονικές εκθέσεις και εκπαίδευση) σε αντικείμενα με κεραμικής ή γύψινης επιφάνειας. Αποτυγχάνουν συστηματικά σε ανακλαστικές επιφάνειες (μέταλλο, γυαλιστερό πλαστικό) και σε μεγάλα αντικείμενα με σύνθετη εσωτερική γεωμετρία όταν απαιτείται πρωτόκολλο πολλαπλών σαρώσεων. Η επιλογή της εφαρμογής συμβάλλει στο αποτέλεσμα εξίσου με τον εξοπλισμό, εύρημα που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των Askar & Sternberg (2023).

Ο Shining3D EinScan H2 υπερέχει σε γεωμετρική λεπτομέρεια, συνέπεια αποτελεσμάτων και ικανότητα χειρισμού ανακλαστικών επιφανειών (μέσω IR mode), στις συγκεκριμένες αποστάσεις λήψης. Οι εφαρμογές κινητών συσκευών υπερέχουν σε ποιότητα χρωματικής υφής. Η γεωμετρική ακρίβεια των καλύτερων SfM μεθόδων (μέση απόσταση $< 0,1$ mm) πλησιάζει τα όρια του αποδεκτού για πολλές εφαρμογές τεκμηρίωσης, αλλά η αυθαίρετη

κλίμακα, που απαιτεί εξωτερική αναφορά για διόρθωση και η εξάρτηση από την πολυπλοκότητα του αντικειμένου αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς. Οι εφαρμογές κινητών συσκευών υπερέχουν σε ποιότητα χρωματικής υφής. Η γεωμετρική ακρίβεια των καλύτερων SfM μεθόδων (μέση απόσταση $< 0,1 \text{ mm}$) πλησιάζει τα όρια του αποδεκτού για πολλές εφαρμογές τεκμηρίωσης, αλλά η αυθαίρετη κλίμακα (που απαιτεί εξωτερική αναφορά για διόρθωση) και η εξάρτηση από την πολυπλοκότητα του αντικειμένου αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς.

Για την τρισδιάστατη εκτύπωση, μόνο ο Shining3D EinScan H2 και το KIRI Engine LiDAR παρήγαγαν αξιόπιστα εκτυπώσιμα μοντέλα χωρίς εκτεταμένη επισκευή. Για αντίστροφη μηχανική, μόνο ο EinScan H2 παρέχει την απαιτούμενη γεωμετρική ακρίβεια και σταθερότητα κλίμακας.

5.4 Πρακτικές Συστάσεις

Με βάση τα ευρήματα, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για την επιλογή μεθόδου ανάλογα με τον σκοπό και τους διαθέσιμους πόρους:

Για ψηφιακή αρχειοθέτηση και μετρικές εφαρμογές (αντίστροφη μηχανική, CAD ανακατασκευή, συντήρηση), ο EinScan H2 ή ισοδύναμος επαγγελματικός σαρωτής δομημένου φωτός παραμένει η μοναδική αξιόπιστη επιλογή. Η επένδυση σε εξοπλισμό και εκπαίδευση δικαιολογείται από τη μοναδική του ικανότητα σε λεπτομέρεια και συνέπεια.

Για εικονικές εκθέσεις, εκπαίδευση και διαδικτυακή παρουσίαση, το KIRI Engine SfM και το RealityScan SfM αποτελούν ισχυρές και οικονομικές επιλογές για ματ κεραμικά αντικείμενα. Το 3DGS (KIRI Engine ή Polycam) προσφέρει εντυπωσιακό οπτικό αποτέλεσμα για απλούστερες γεωμετρίες και εφαρμογές διαδικτυακής ροής.

Για τρισδιάστατη εκτύπωση αντιγράφων σε περιβάλλον περιορισμένου προϋπολογισμού, το KIRI Engine LiDAR αποτελεί αξιόπιστη εναλλακτική για ματ αντικείμενα απλής έως μέτριας γεωμετρικής πολυπλοκότητας, επιτυγχάνοντας εκτυπώσιμα μοντέλα χωρίς εκτεταμένη επισκευή.

Για ανακλαστικά ή γυαλιστερά αντικείμενα, η τεκμηρίωση με εφαρμογές κινητών συσκευών πρέπει να προσεγγίζεται με επιφύλαξη. Η χρήση σπρίντ σάρωσης (εφόσον επιτρέπεται από τους κανόνες συντήρησης) ή η στροφή σε IR mode επαγγελματικού σαρωτή αποτελούν αξιόπιστες λύσεις.

Τέλος, η υβριδική προσέγγιση, συνδυασμός φωτογραμμετρίας κινητών συσκευών για υφή και EinScan H2 για γεωμετρία, αποτελεί πιθανή βέλτιστη στρατηγική για ιδρύματα που διαθέτουν και τις δύο τεχνολογίες, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου και αντισταθμίζοντας τους περιορισμούς της, σύμφωνα με τη βιβλιογραφική τάση (Ulvi & Hamal, 2025).

5.5 Περιορισμοί της Έρευνας

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Πρώτον, το δείγμα έξι αντικειμένων παρέχει ενδεικτικά αλλά όχι στατιστικά γενικεύσιμα αποτελέσματα. Δεύτερον, η μεταφορά των σαρώσεων KIRI Engine LiDAR για το γουδί και το τηλέφωνο σε iPhone 15 Pro (λόγω τεχνικού ζητήματος) εισάγει μεταβλητή συσκευής που δεν ήταν δυνατό να ελεγχθεί. Τρίτον, η αξιολόγηση υφής παρέμεινε αποκλειστικά ποιοτική, καθώς η ποσοτική χρωματική σύγκριση θα απαιτούσε βαθμονομημένες χρωματικά πρότυπα εκτός του πεδίου της παρούσας έρευνας. Τέταρτον, οι εφαρμογές κινητών συσκευών ενημερώνονται συνεχώς, και τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν την κατάσταση κατά τη χρονική περίοδο των σαρώσεων. Πέμπτον, τα γεωμετρικά αποτελέσματα των φωτογραμμετρικών μεθόδων αφορούν αποστάσεις λήψης 20–40 cm, καθώς η ανάλυση εξαρτάται από το μέγεθος του GSD, κοντινότερες λήψεις, ιδίως σε μικρά αντικείμενα, θα μπορούσαν να αποδώσουν γεωμετρική ακρίβεια ανώτερη από την παρούσα, ζήτημα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης

5.6 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας ανοίγουν αρκετές κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Πρώτον, η επανάληψη της μελέτης με μεγαλύτερο και πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα αντικειμένων, συμπεριλαμβάνοντας αντικείμενα από διαφανή υλικά, πέτρα και οστό θα επέτρεπε πιο ισχυρά στατιστικά συμπεράσματα.

Δεύτερον, η ποσοτική αξιολόγηση της χρωματικής ακρίβειας μέσω βαθμονομημένων colour checkers θα συμπλήρωνε την ποιοτική αξιολόγηση υφής που πραγματοποιήθηκε εδώ.

Τρίτον, η αξιολόγηση νεότερων μοντέλων κινητών συσκευών με ενισχυμένους αισθητήρες LiDAR, καθώς και νεότερων εκδόσεων των εφαρμογών, θα παρείχε ενημερωμένα δεδομένα σε έναν τομέα που εξελίσσεται με ταχύτατο ρυθμό.

Τέλος, η εφαρμογή των μεθόδων σε αντικείμενα in situ σε αρχαιολογικό πεδίο, όπου οι συνθήκες φωτισμού και ο χώρος δεν ελέγχονται, θα αποκαλύψει πρόσθετες διαφορές απόδοσης που δεν αναδύθηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες.

5.7 Επίλογος

Η τρισδιάστατη σάρωση δεν είναι πλέον προνόμιο εξειδικευμένων εργαστηρίων. Οι κινητές συσκευές έχουν εξελιχθεί σε αξιόπιστα εργαλεία ψηφιακής τεκμηρίωσης, εφόσον ο χρήστης γνωρίζει τα όρια και τις δυνατότητές τους. Η παρούσα εργασία δείχνει ότι αυτές οι δυνατότητες είναι ταυτόχρονα πιο ισχυρές και πιο περιορισμένες από ό,τι η εμπορική τους παρουσίαση υποδηλώνει: ισχυρότερες για ματ αντικείμενα απλής γεωμετρίας, περιορισμένες για ανακλαστικές επιφάνειες, σύνθετες γεωμετρίες και μετρικές εφαρμογές.

Η ψηφιακή τεκμηρίωση πολιτιστικής κληρονομιάς δεν απαιτεί πλέον επιλογή μεταξύ ακρίβειας και προσβασιμότητας, απαιτεί κατανόηση των ορίων κάθε εργαλείου και τεκμηριωμένη επιλογή ανάλογα με τον σκοπό. Αυτή η κατανόηση είναι ακριβώς αυτό που η παρούσα εργασία επιδίωξε να προσφέρει.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

Abdel-Majeed, H. M., Shaker, I. F., Abdel-Wahab, A. M., & Awad, A. A. D. I. (2024). Indoor mapping accuracy comparison between the apple devices' LiDAR sensor and terrestrial laser Scanner. *HBRC Journal*, 20(1), 915–931.

<https://doi.org/10.1080/16874048.2024.2408839>

Agisoft Metashape: Agisoft Metashape. (n.d.). Retrieved May 21, 2026, from

<https://www.agisoft.com/>

Apple Inc. (n.d.). *ARKit 6—Augmented Reality*. Apple Developer. Retrieved April 11, 2026, from <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/>

Apple introduces iPhone 12 Pro and iPhone 12 Pro Max with 5G. (n.d.). Apple Newsroom.

Retrieved April 11, 2026, from

<https://www.apple.com/newsroom/2020/10/apple-introduces-iphone-12-pro-and-iphone-12-pro-max-with-5g/>

Askar, C., & Sternberg, H. (2023). Use of Smartphone Lidar Technology for Low-Cost 3D Building Documentation with iPhone 13 Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications. *Geomatics*, 3, 563–579.

<https://doi.org/10.3390/geomatics3040030>

Blender Foundation. (n.d.). *3D Print Toolbox*. Blender Extensions. Retrieved June 10, 2026, from <https://extensions.blender.org/add-ons/print3d-toolbox/>

Blender Foundation. (n.d.). *Blender—The Free and Open Source 3D Creation Software—Blender.org*. Blender. Retrieved April 6, 2026, from <https://www.blender.org/>

- Boehler, W., & Marbs, A. (2003). *Investigating Laser Scanner Accuracy*.
- Bruno, F., Bruno, S., Giovanna De, S., Luchi, M.-L., Stefania Mancuso, & Muzzupappa, M. (2010). From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), 42–49.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.02.006>
- Carmeliti, M., & Marziali, S. (2026). A comparative evaluation of 3D reconstruction with photogrammetry, NeRFs and 3D Gaussian Splatting in Cultura Heritage Restoration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W12-2026, 89–96.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W12-2026-89-2026>
- CloudCompare—Open Source project. (n.d.). Retrieved April 6, 2026, from
<https://www.cloudcompare.org/>
- Darisa, N. A. G., Suharjanto, G., & Kwee, N. G. (2025). Comparative Study on the Accuracy of Mobile LiDAR Applications in Object-Level Architectural Digitization. *Procedia Computer Science, The 10th International Conference on Computer Science and Computational Intelligence 2025*, 269, 696–707.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.013>
- Diara, F. (2023). Structured-Light Scanning and Metrological Analysis for Archaeology: Quality Assessment of Artec 3D Solutions for Cuneiform Tablets. *Heritage*, 6(9), 6016–6034. <https://doi.org/10.3390/heritage6090317>

Engine KiRi. (n.d.). *KIRI Engine vs. Reality Scan—KIRI Engine*. KIRI Engine: 3D Scanner App.

Retrieved April 6, 2026, from <https://www.kiriengine.app/blog/comparison/kiri-engine-vs-reality-scan>

European Commission. (2020). *Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage | Shaping Europe's digital future*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>

Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: A tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>

Hybrid LED & Infrared Light Handheld 3D Scanner EinScan H2. (2024, August 14). *EinScan*. <https://www.einscan.com/handheld-3d-scanner/einscan-h/>

Iakovaki, E., Konstantakis, M., Giaourtsakis, I., Rentoumi, E., Protopapas, D., Psarras, C., & Koskeridou, E. (2026). When Reality Meets Practice: Challenges and Pitfalls in 3D Digitization Using Structured Light Scanning and Photogrammetry in Cultural Heritage. *Information*, 17(3), 237. <https://doi.org/10.3390/info17030237>

Ioannidis, C., Piniotis, G., Soile, S., Bourexis, F., Boutsis, A.-M., Chliverou, R., & Tsakiri, M. (2019). LASER AND MULTI-IMAGE REVERSE ENGINEERING SYSTEMS FOR ACCURATE 3D MODELLING OF COMPLEX CULTURAL ARTEFACTS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W11, 623–629. GEORES 2019
2nd International Conference of Geomatics and Restoration (Volume XLII-2/W11) - 8–10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-623-2019>

- iPhone 17 Pro and 17 Pro Max—Technical Specifications*. (n.d.). Apple. Retrieved April 6, 2026, from <https://www.apple.com/iphone-17-pro/specs/>
- Kantaros, A., Ganetsos, T., & Petrescu, F. I. T. (2023). Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage. *Applied Sciences*, 13(8), 4777. <https://doi.org/10.3390/app13084777>
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkuehler, T., & Drettakis, G. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Trans. Graph.*, 42(4), 139:1-139:14. <https://doi.org/10.1145/3592433>
- Khedr, M., Metawie, M., Eldin, A., Hamdy, A., El-Shihy, A., Azab, S., Abdelaty, A., & Marzouk, M. (2025). 3D visualization of damaged statues using Gaussian splatting and web interface integration. *Npj Heritage Science*, 13. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-02063-5>
- Kingsland, K. (2020). Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 18, e00157. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>
- KiRi, E. (n.d.). *3D Gaussian Splatting vs Photogrammetry vs LiDAR: A Practical Decision Guide - KIRI Engine*. KIRI Engine: 3D Scanner App. Retrieved April 6, 2026, from <https://www.kiriengine.app/blog/3DGSvsPhotogrammetryvsLiDAR>
- Lee, J., Park, S., Min, J., & Choi, J. (2025). 3D Gaussian Splatting for Enhanced Documentation of Cultural Artifacts. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-M-2–2025, 215–222. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-215-2025>

- London Charter. (2009). *Introduction*. <https://londoncharter.org/introduction.html>
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*, 11(1), 22221. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- Montusiewicz, J., Miłosz, M., Kęsik, J., & Żyła, K. (2021). Structured-light 3D scanning of exhibited historical clothing—A first-ever methodical trial and its results. *Heritage Science*, 9(1), 74. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00544-x>
- Montusiewicz, J., Milosz, M., Sarnowski, W., & Kayumov, R. (2026). Quality Assessment of Digital 3D Models of Museum Artefacts from the Mobile LiDAR iPhone and Structured Light Scanners. *Applied Sciences*, 16(4), 2100. <https://doi.org/10.3390/app16042100>
- Morena, S., Barba, S., & Álvaro-Tordesillas, A. (2019). SHINING 3D EINSKAN-PRO, APPLICATION AND VALIDATION IN THE FIELD OF CULTURAL HERITAGE, FROM THE CHILLIDA-LEKU MUSEUM TO THE ARCHAEOLOGICAL MUSEUM OF SARNO. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W18, 135–142. ISPRS TC II
Optical 3D Metrology (Volume XLII-2/W18) - 2–3 December 2019, Strasbourg, France. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-135-2019>
- Paukkonen, N. (2023). Towards a Mobile 3D Documentation Solution. Video-Based Photogrammetry and iPhone 12 Pro as Fieldwork Documentation Tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6, 143–154. <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>

- Rafael Melendreras Ruiz, & Allegue, P. S. (2021). Comparative Analysis Between the Main 3D Scanning Techniques: Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanner, and Structured Light Scanner in Religious Imagery: The Case of The Holy Christ of the Blood. *J. Comput. Cult. Herit.*, 15(1), 18:1-18:23. <https://doi.org/10.1145/3469126>
- Rahaman, H. (2021). Photogrammetry: What, How, and Where. In E. M. Champion (Ed.), *Virtual Heritage: A Concise Guide* (pp. 25–37). Ubiquity Press. <https://doi.org/10.5334/bck.d>
- 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>
- Ulvi, A., & Hamal, S. N. (2025). Fusion of IPAD Pro LiDAR and SfM-Based Photogrammetry for 3D Documentation of Cultural Heritage. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01936-w>
- UNESCO emergency mission to Rio de Janeiro helps guide global efforts. (n.d.). Retrieved April 1, 2026, from <https://www.unesco.org/en/articles/unesco-emergency-mission-rio-de-janeiro-helps-guide-global-efforts-restore-brazils-national-museum>
- UNESCO, U. W. H. (2003). *Cultural Landscape and Archaeological Remains of the Bamiyan Valley*. UNESCO World Heritage Centre. <https://whc.unesco.org/en/list/208/>

- Vacca, G. (2023). 3D Survey with Apple LiDAR Sensor—Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage. *Heritage*, 6(2), 1476–1501.
<https://doi.org/10.3390/heritage6020080>
- 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>
- Williams, R., Thompson, T., Orr, C., & Taylor, G. (2024). Developing a 3D strategy: Pipelines and recommendations for 3D structured light scanning of archaeological artefacts. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 33, e00338.
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00338>
- Zhou, L., Wu, G., Zuo, Y., Chen, X., & Hu, H. (2024). A Comprehensive Review of Vision-Based 3D Reconstruction Methods. *Sensors*, 24(7), 2314.
<https://doi.org/10.3390/s24072314>
- Αζαριάδης-Τοπάλογλου, Φ., Azariadis-Topaloglou, F., Κυρατζή, Σ., & Kyratzi, S. (2023). Τριδιάστατη Ψηφιακή Ανακατασκευή Επιφανειών (Αντίστροφη Μηχανική).
<http://repository.kallipos.gr/handle/11419/9896>

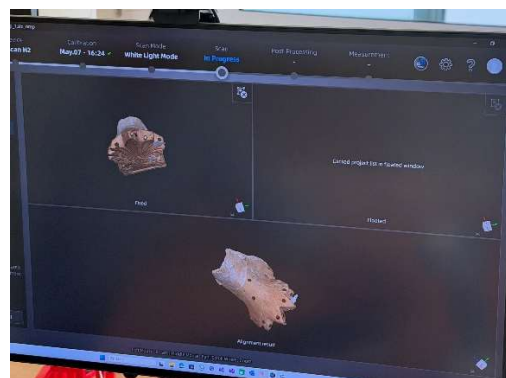
Παράρτημα Α: «Φωτογραφίες διαδικασία σάρωσης»



Εικόνα 61: Σάρωση ακροκέραμου με Shining3D EinScan H2. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 62: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro κατά τη σάρωση ακροκέραμου σε White Light Mode (In Progress). Πηγή: προσωπικό αρχείο.



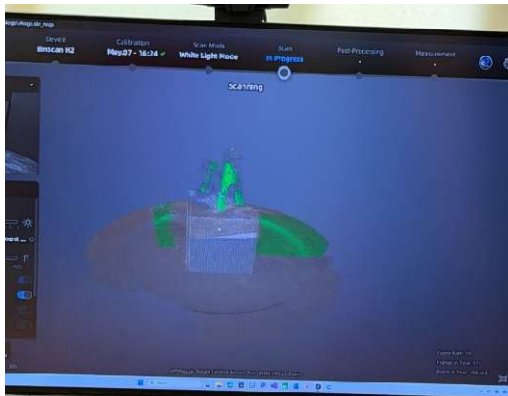
Εικόνα 63: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ευθυγράμμιση δύο sessions σάρωσης ακροκέραμου (Fixed/Floated alignment). Διακρίνονται οι δείκτες στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 64: Σάρωση ακροκέραμου με Shining3D EinScan H2. Διακρίνονται οι ανακλαστικοί δείκτες τοποθετημένοι στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 65: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ανίχνευση δεικτών στην επιφάνεια του τηλεφώνου κατά τη σάρωση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



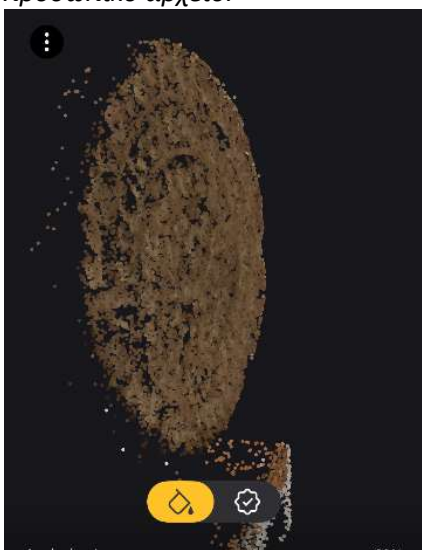
Εικόνα 66: Στιγμιότυπο λογισμικού EXScan Pro — ανίχνευση δεικτών στην επιφάνεια του ειδωλίου αλόγου κατά τη σάρωση. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



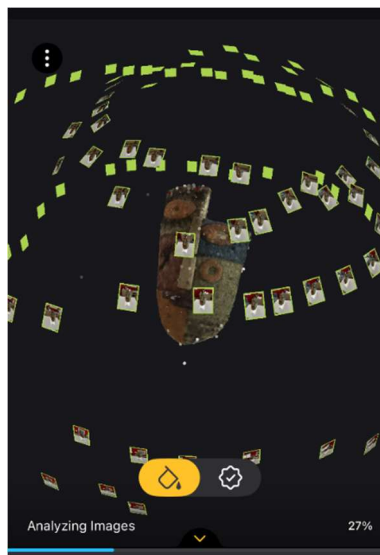
Εικόνα 67: Στιγμιότυπο εφαρμογής KIRI Engine LiDAR — ορισμός περιοχής σάρωσης (bounding box) για ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 69: Στιγμιότυπο εφαρμογής KIRI Engine LiDAR — σάρωση σε εξέλιξη για ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 68: Στιγμιότυπο εφαρμογής RealityScan — επεξεργασία εικόνων για αντίγραφο Δίσκου Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

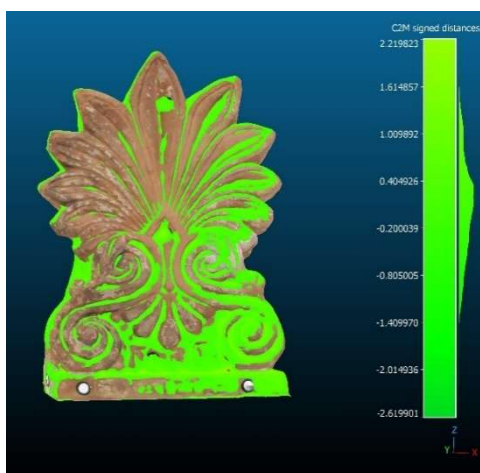


Εικόνα 70: Στιγμιότυπο εφαρμογής Polycam — κυκλική διάταξη θέσεων λήψης γύρω από κεραμική μάσκα (SfM mode, Analyzing Images 27%). Πηγή: προσωπικό αρχείο.

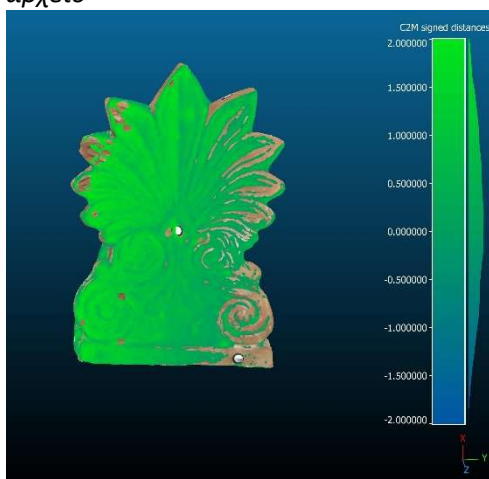
Παράρτημα Β: «Πλήρη αποτελέσματα Cloud-to-Mesh ανά αντικείμενο»

Όλες οι μέθοδοι από καλύτερη προς χειρότερη κατάταξη (βάσει Mean distance). Κλίμακα ± 2 mm σε όλες τις εικόνες. Το χρωματισμένο mesh είναι πάντα το μοντέλο αναφοράς EinScan H2.

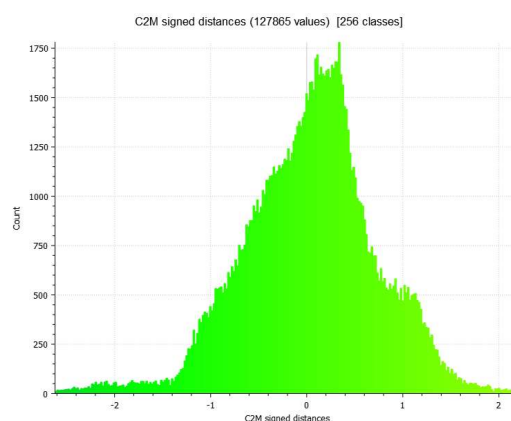
B1 Ακροκέραμο



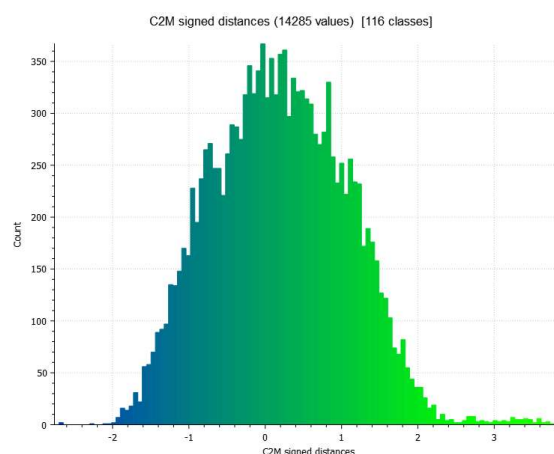
Εικόνα 71: C2M ακροκέραμου, Polycam SfM (1η κατάταξη, Mean: +0.054 mm, SD: 0.752 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο



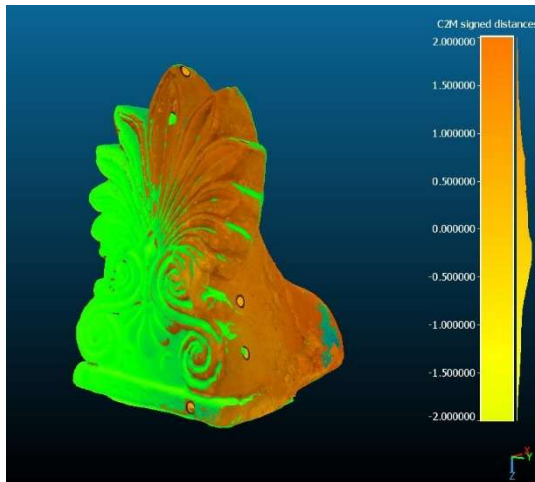
Εικόνα 72: C2M ακροκέραμου — KIRI Engine LiDAR (2η κατάταξη, Mean: +0.272 mm, SD: 1.234 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.»



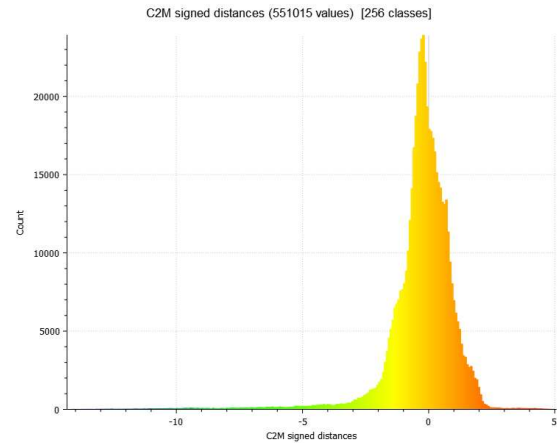
Εικόνα 73: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



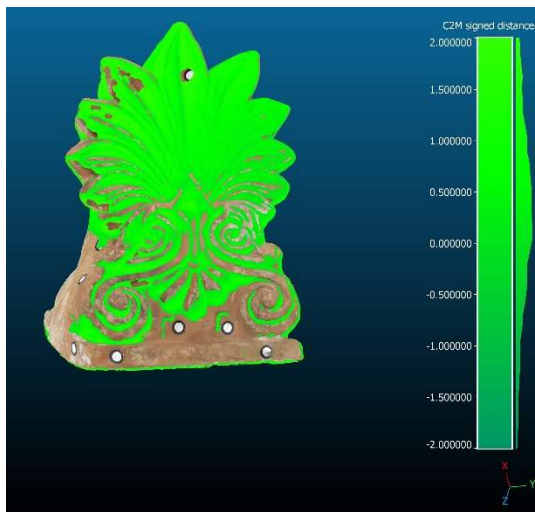
Εικόνα 74: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.»



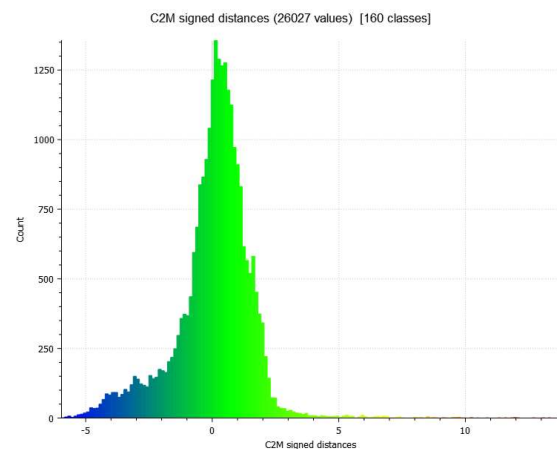
Εικόνα 75: C2M ακροκέραμου — KIRI Engine SfM (3η κατάταξη, Mean: -0.267 mm , SD: 1.360 mm). Κλίμακα $\pm 2\text{ mm}$. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 77: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

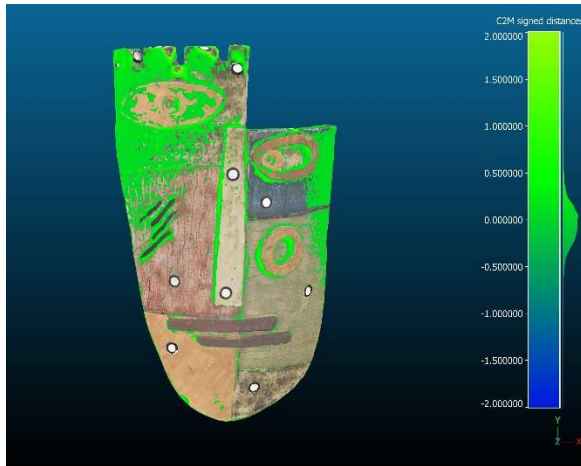


Εικόνα 76: C2M ακροκέραμου — Polycam 3DGS (4η κατάταξη, Mean: $+0.053\text{ mm}$, SD: 1.511 mm). Κλίμακα $\pm 2\text{ mm}$. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

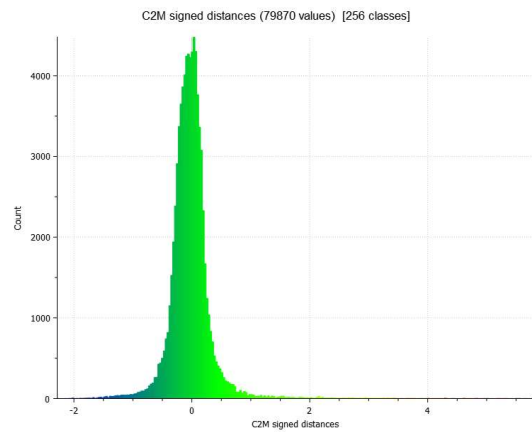


Εικόνα 78: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, ακροκέραμο. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

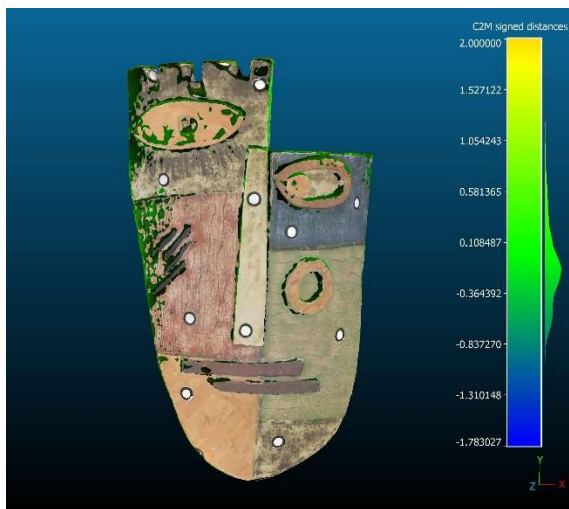
B2 Κεραμική Μάσκα



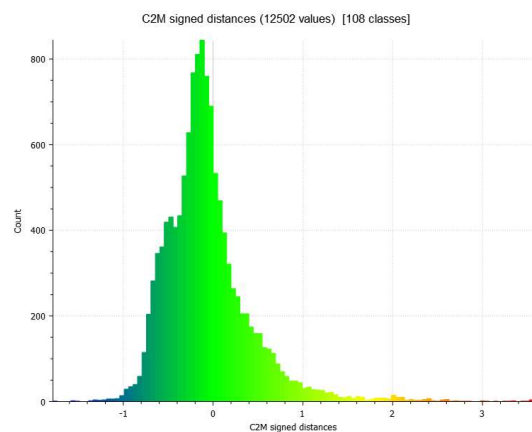
Εικόνα 79: C2M κεραμικής μάσκας — RealityScan SfM (1η κατάταξη, Mean: -0.018 mm, SD: 0.400 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



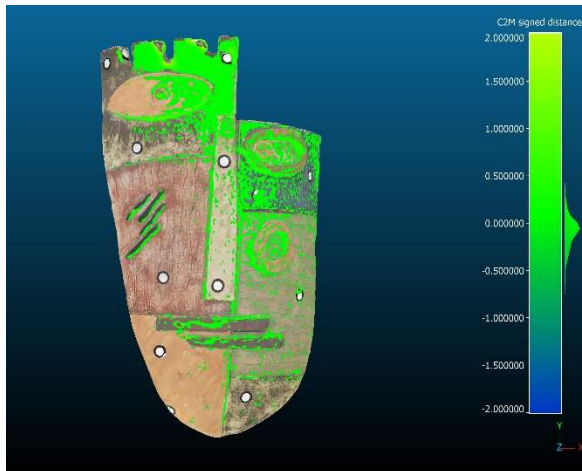
Εικόνα 81: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



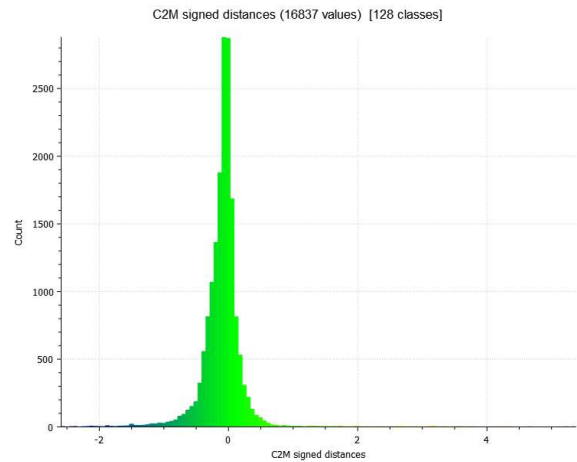
Εικόνα 80: : C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine LiDAR (2η κατάταξη, Mean: -0.058 mm, SD: 0.517 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



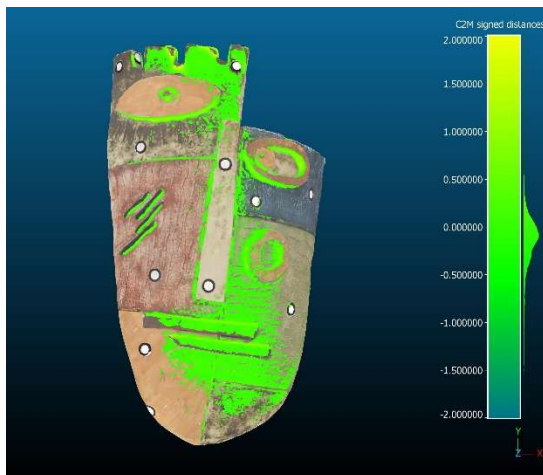
Εικόνα 82: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



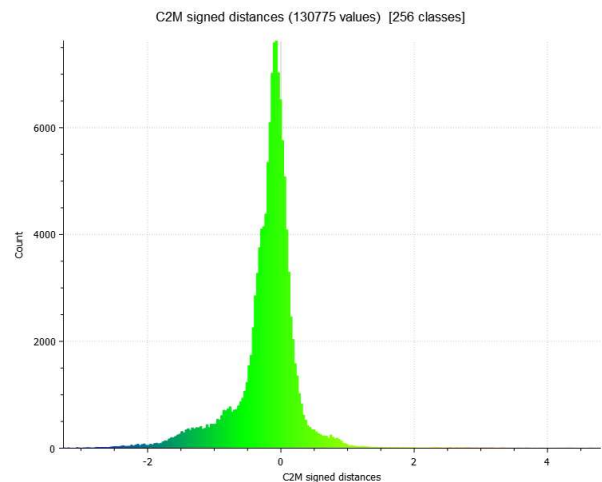
Εικόνα 83: C2M κεραμικής μάσκας —
Polycam 3DGS (3η κατάταξη, Mean: -0.092
mm, SD: 0.343 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



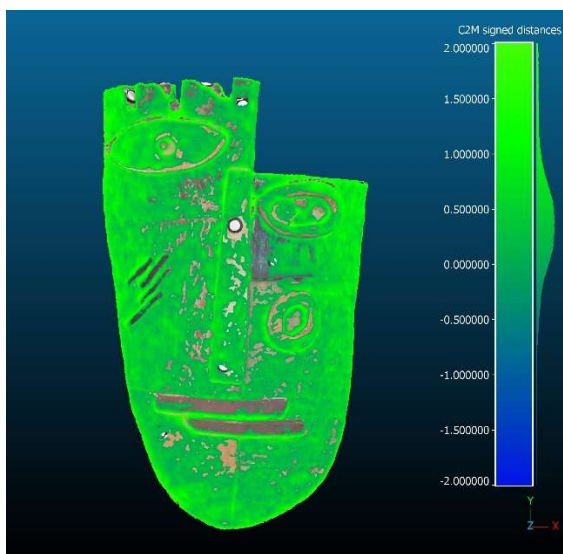
Εικόνα 85: Ιστόγραμμα C2M — Polycam
3DGS vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 84: C2M κεραμικής μάσκας —
Polycam SfM (4η κατάταξη, Mean: -
0.209mm, SD: 0.497 mm). Κλίμακα ± 2 mm.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

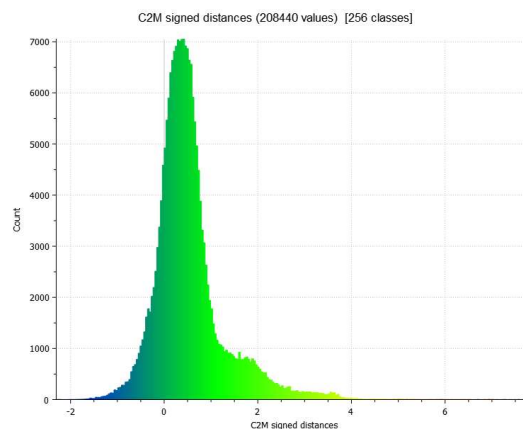


Εικόνα 86: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM
vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.

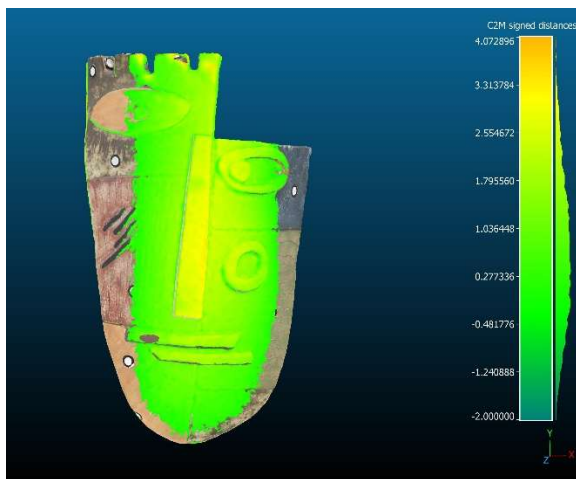


Εικόνα 87: C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine 3DGS (5η κατάταξη, Mean: +0.539 mm, SD: 0.763 mm). Κλίμακα ± 2 mm.

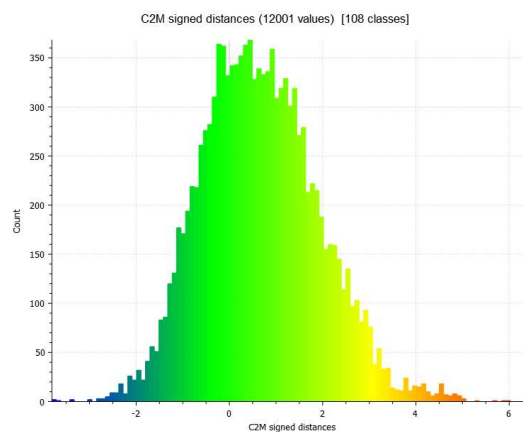
Πηγή: προσωπικό αρχείο.»



Εικόνα 89: Ιστογράμμο C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

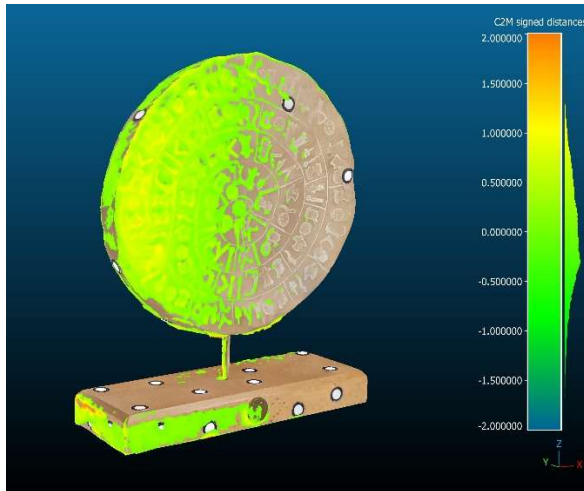


Εικόνα 88: C2M κεραμικής μάσκας — KIRI Engine SfM (6η κατάταξη, Mean: +0.658 mm, SD: 1.245 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

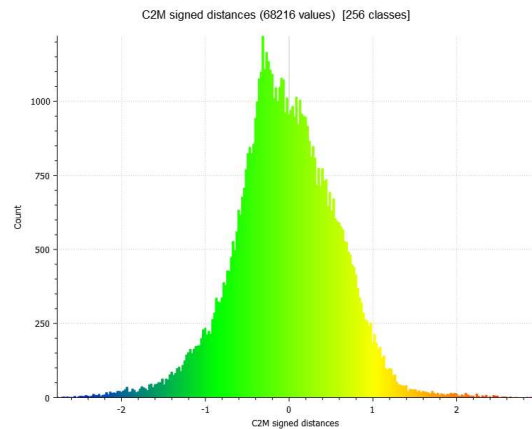


Εικόνα 90: Ιστογράμμο C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, κεραμική μάσκα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

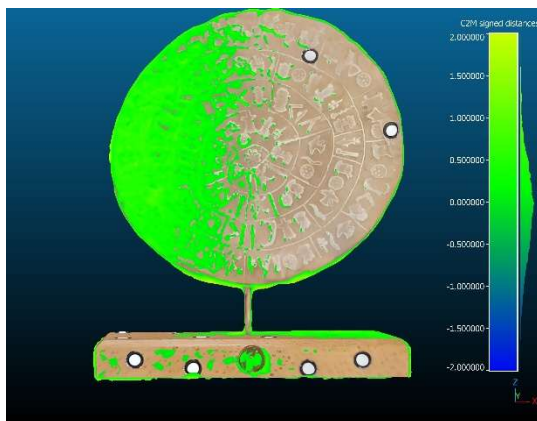
B3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού



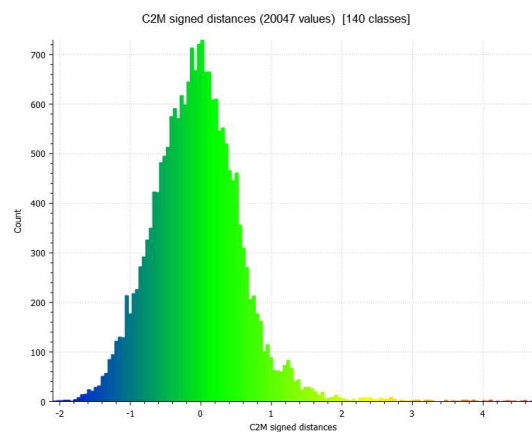
Εικόνα 91: C2M Δίσκου Φαιστού — RealityScan SfM (1η κατάταξη, Mean: -0.045 mm, SD: 0.607 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



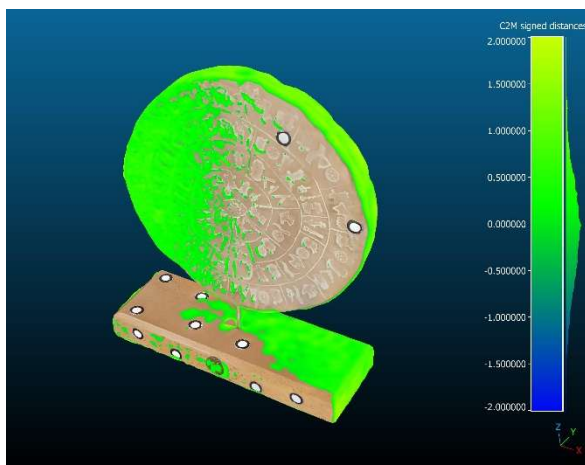
Εικόνα 93: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



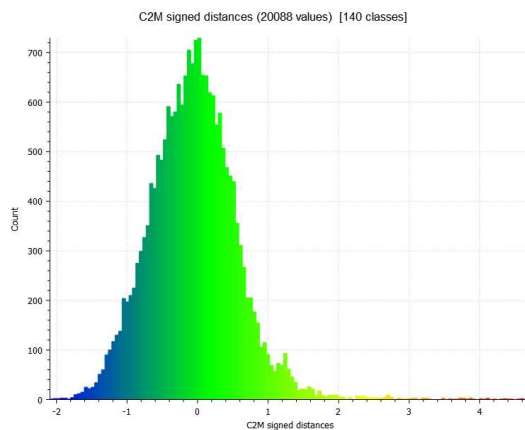
Εικόνα 92: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine 3DGS (2η κατάταξη, Mean: -0.054 mm, SD: 0.634 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



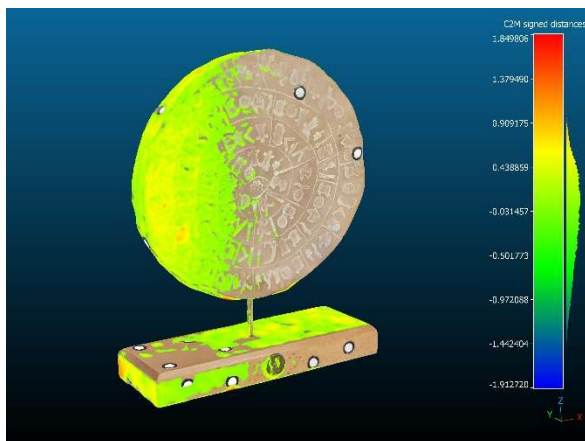
Εικόνα 94: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



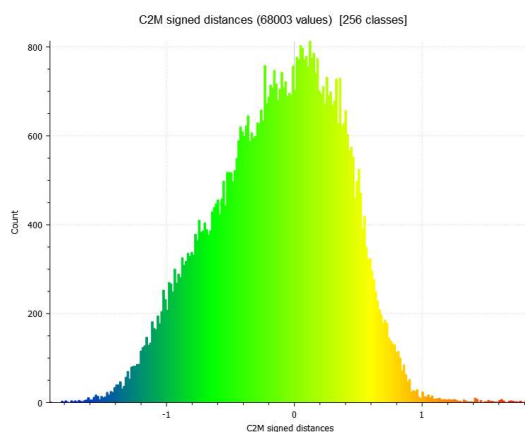
Εικόνα 95: C2M Δίσκου Φαιστού — Polycam 3DGS (3η κατάταξη, Mean: -0.056 mm, SD: 0.629 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο



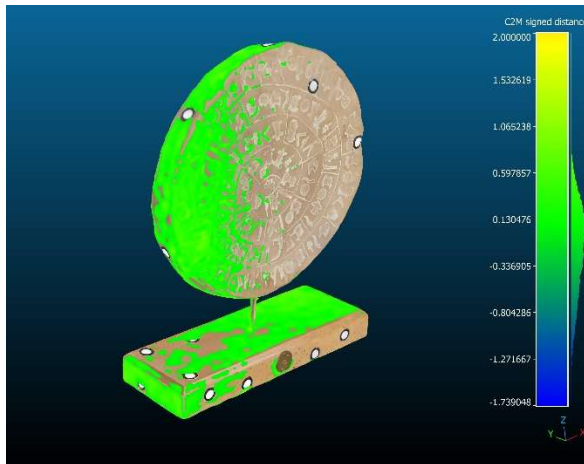
Εικόνα 97: : Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



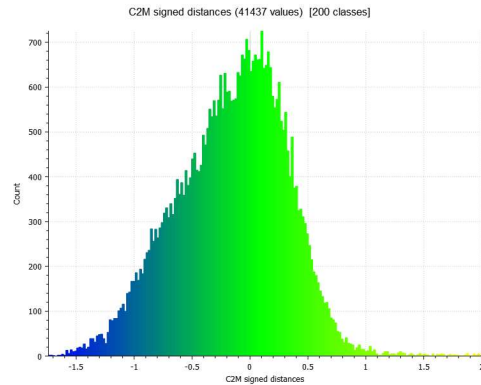
Εικόνα 96: C2M Δίσκου Φαιστού — Polycam SfM (4η κατάταξη, Mean: -0.126 mm, SD: 0.500 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



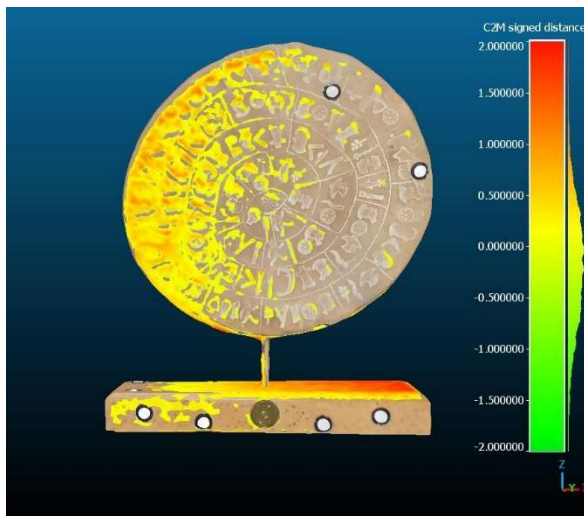
Εικόνα 98: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



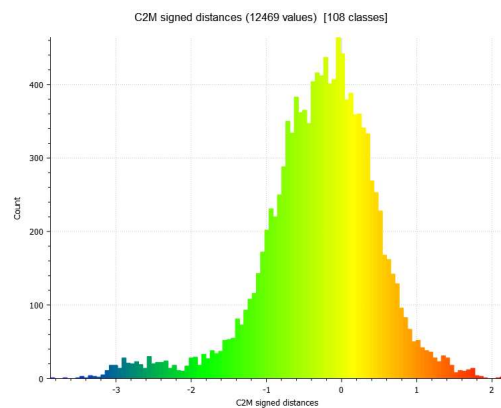
Εικόνα 99: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine SfM (5η κατάταξη, Mean: -0.153 mm, SD: 0.482 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο



Εικόνα 101: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο

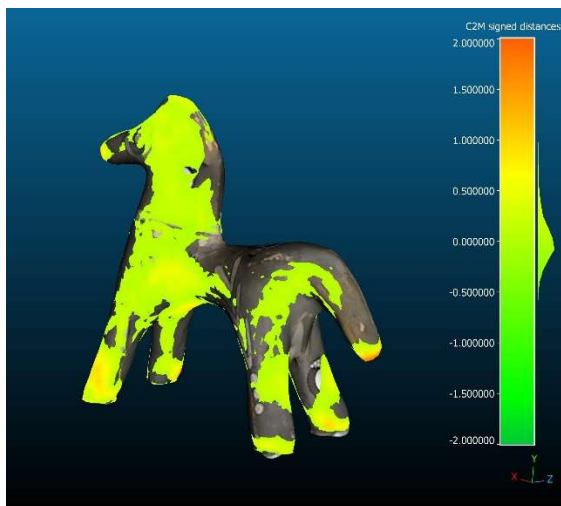


Εικόνα 100: C2M Δίσκου Φαιστού — KIRI Engine LiDAR (6η κατάταξη, Mean: -0.291 mm, SD: 0.758 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

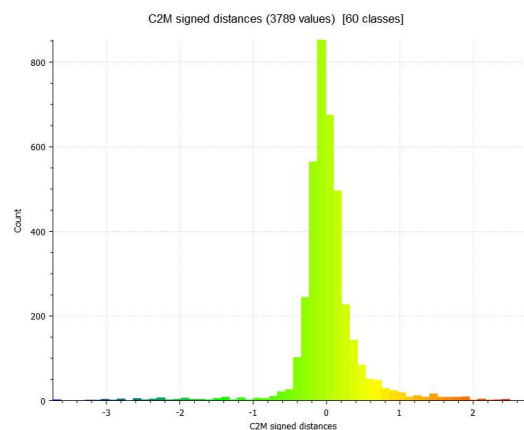


Εικόνα 102: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, Δίσκος Φαιστού. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

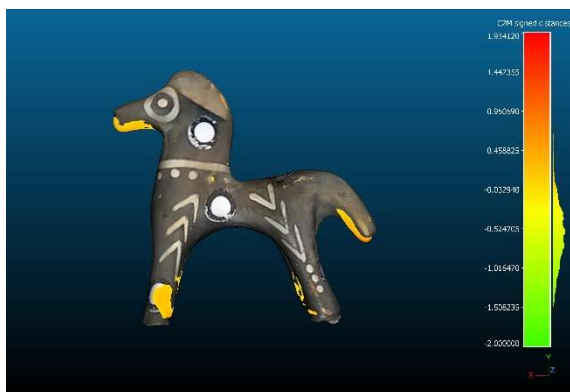
B4 Ειδώλιο Αλόγου



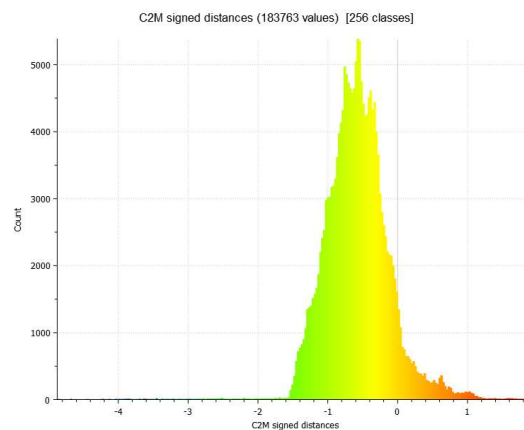
Εικόνα 103: C2M ειδωλίου αλόγου — Polycam 3DGS (1η κατάταξη, Mean: +0.016 mm, SD: 0.464 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



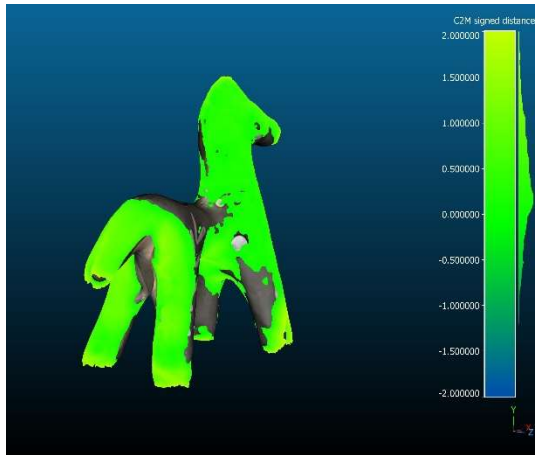
Εικόνα 105: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



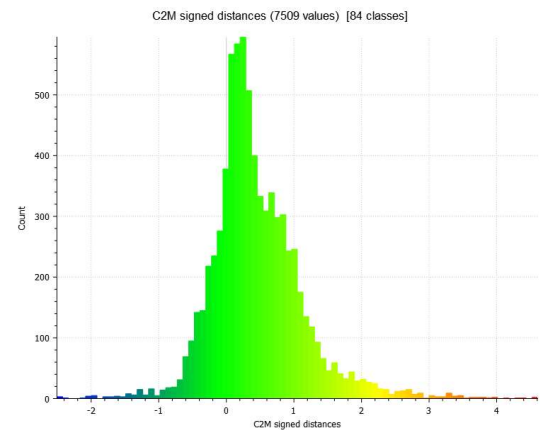
Εικόνα 104: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine 3DGS (2η κατάταξη, Mean: -0.574 mm, SD: 0.475 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



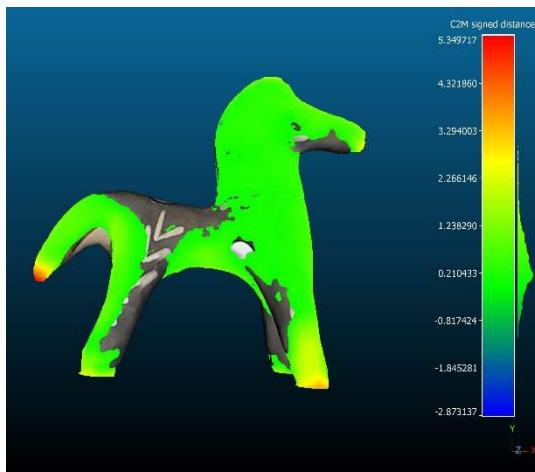
Εικόνα 106: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine 3DGS vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



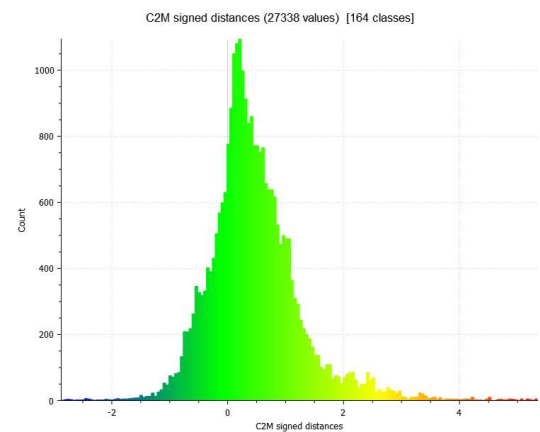
Εικόνα 107: C2M ειδωλίου αλόγου —
Polycam SfM (3η κατάταξη, Mean: +0.447
mm, SD: 0.671 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



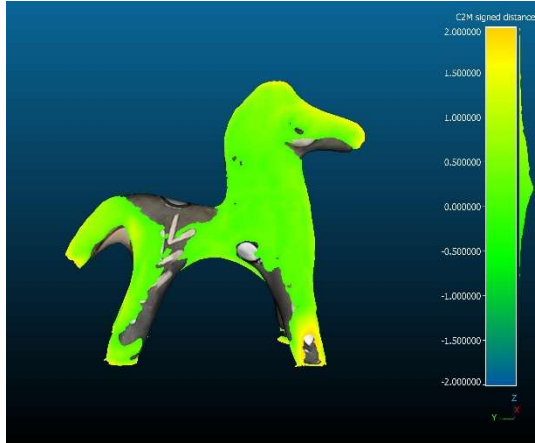
Εικόνα 109: Ιστόγραμμα C2M — Polycam
SfM vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



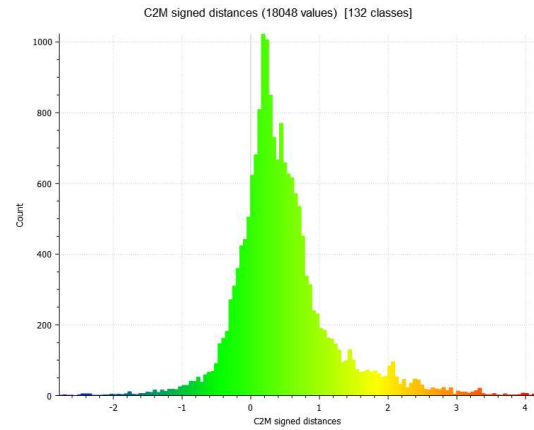
Εικόνα 108: : C2M ειδωλίου αλόγου —
RealityScan SfM (4η κατάταξη, Mean: +0.458
mm, SD: 0.792 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



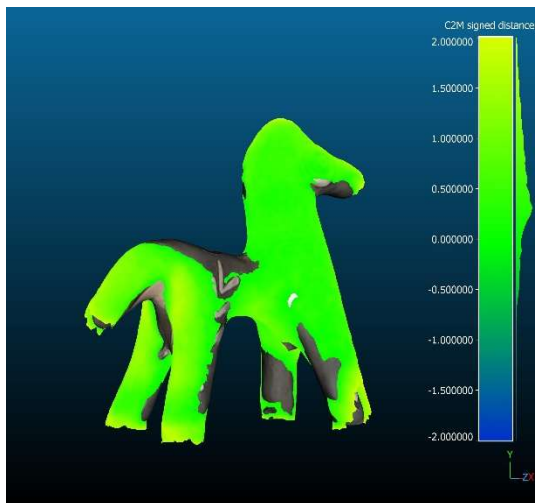
Εικόνα 110: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan
SfM vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



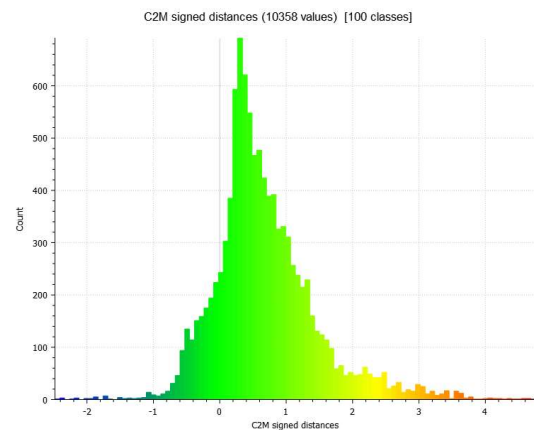
Εικόνα 111: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine SfM (5η κατάταξη, Mean: +0.460 mm, SD: 0.705 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 112: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



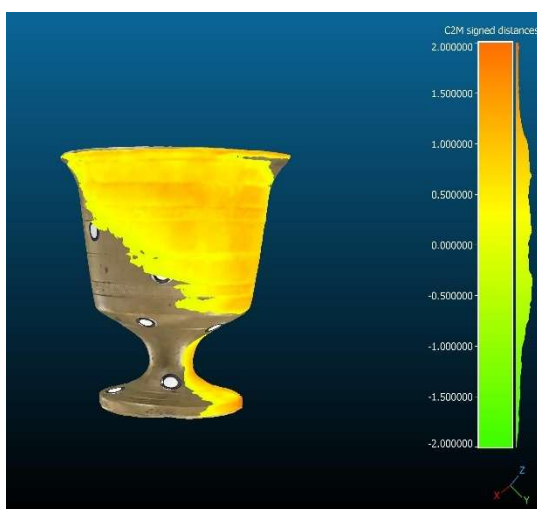
Εικόνα 113: C2M ειδωλίου αλόγου — KIRI Engine LiDAR (6η κατάταξη, Mean: +0.673 mm, SD: 0.770 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



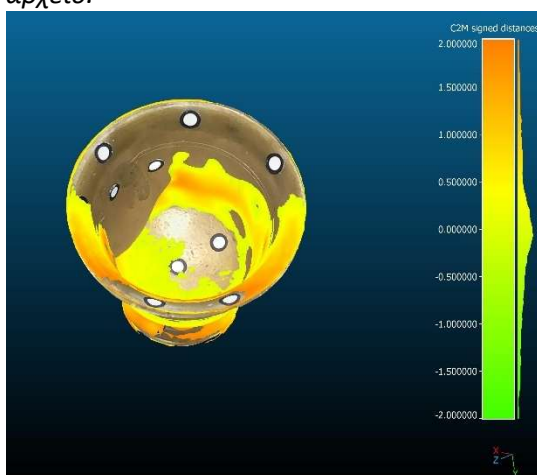
Εικόνα 114: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine LiDAR vs EinScan H2, ειδώλιο αλόγου. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

B5 Μπρούτζινο Γουδί

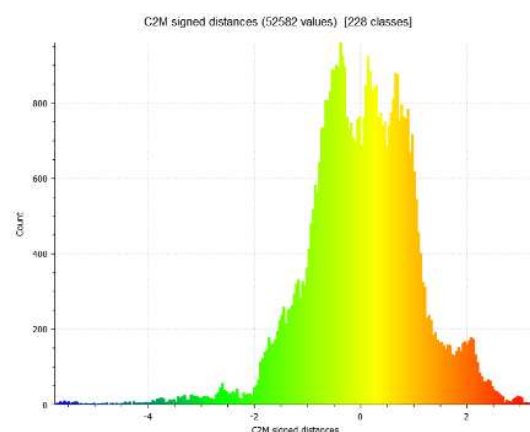
Σημείωση: Αυξημένο SD σε όλες τις μεθόδους λόγω θορύβου στο μοντέλο αναφοράς EinScan H2



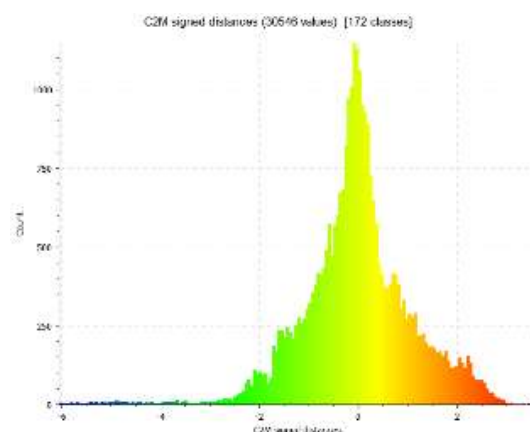
Εικόνα 115: C2M γουδιού — Polycam SfM (1η κατάταξη, Mean: +0.024 mm, SD: 1.031 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



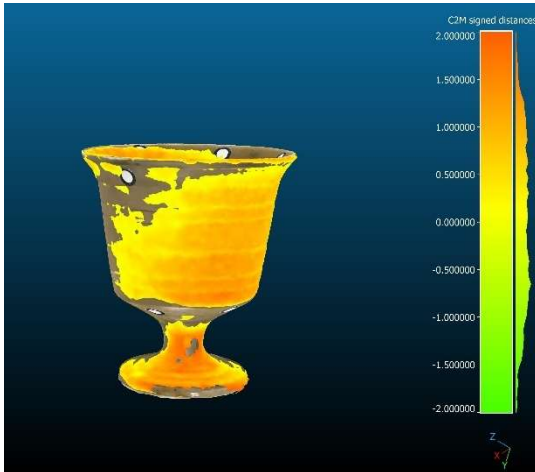
Εικόνα 116: C2M γουδιού — KIRI Engine SfM (2η κατάταξη, Mean: -0.022 mm, SD: 1.097 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



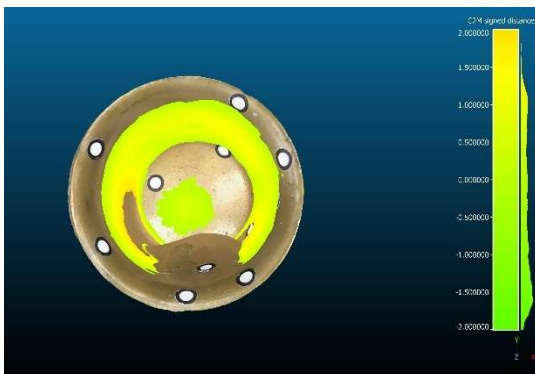
Εικόνα 117: Ιστόγραμμα C2M — Polycam SfM vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



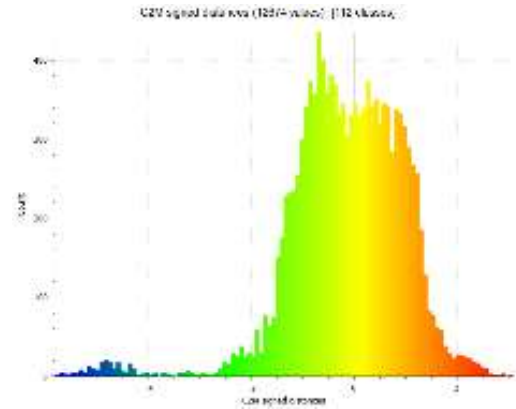
Εικόνα 118: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine SfM vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



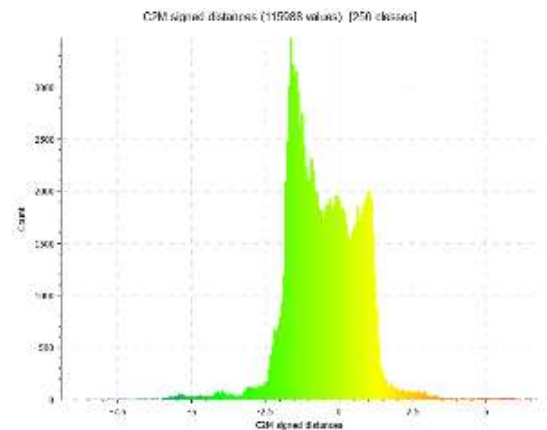
Εικόνα 119 C2M γουδιού — KIRI Engine
LiDAR (3η κατάταξη, Mean: -0.134 mm, SD:
1.102 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 120: C2M γουδιού — KIRI Engine
3DGS (4η κατάταξη, Mean: -0.533 mm, SD:
1.212 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



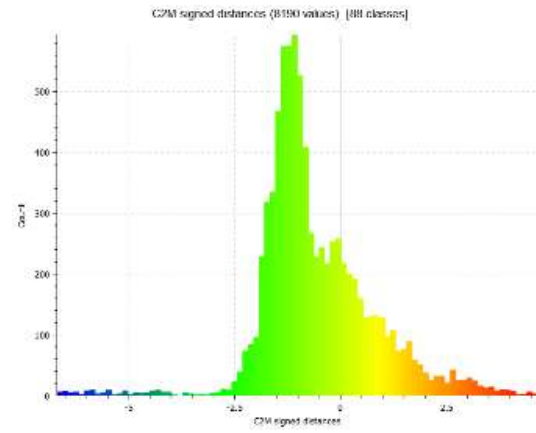
Εικόνα 121: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine
LiDAR vs EinScan H2, γουδί. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



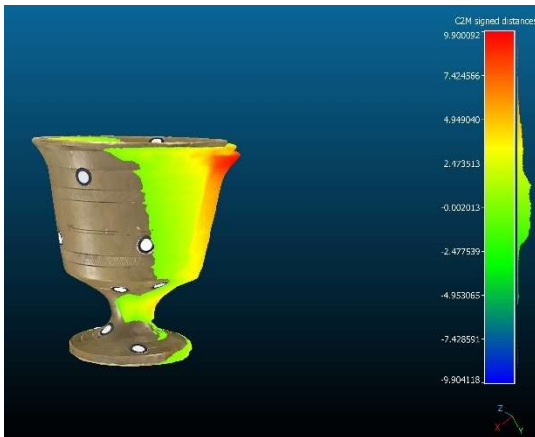
Εικόνα 122: Ιστόγραμμα C2M — KIRI Engine
3DGS vs EinScan H2, γουδί. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



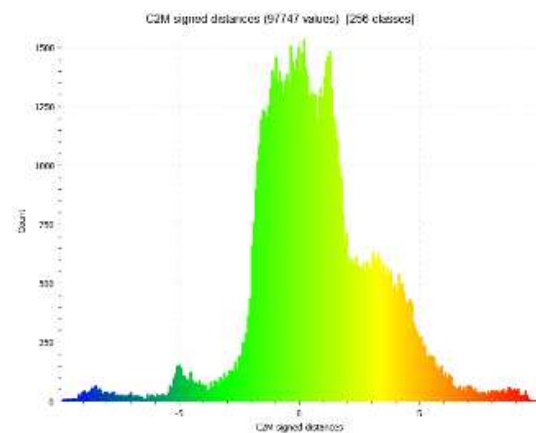
Εικόνα 123: C2M γουδιού — Polycam 3DGS (5η κατάταξη, Mean: -0.569 mm, SD: 1.340 mm). Κλίμακα ± 2 mm. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 125: Ιστόγραμμα C2M — Polycam 3DGS vs EinScan H2, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 124: C2M γουδιού — RealityScan SfM (εξαιρέθηκε λόγω ανεπαρκούς γεωμετρίας). Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 126: Ιστόγραμμα C2M — RealityScan SfM, γουδί. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Παράρτημα Γ: «Γεωμετρική ποιότητα (Solid View)»

Ο EinScan H2 πρώτος ως μοντέλο αναφοράς, ακολουθούν οι εφαρμογές από καλύτερη προς χειρότερη γεωμετρική ποιότητα. Blender solid view, χωρίς υφή.

Γ1 Ακροκέραμο



Εικόνα 127:: Ακροκέραμο — EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 130: Ακροκέραμο — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 132: Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 128: Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 131: RealityScan SfM, solid view Blender. Εκτεταμένες ελλείψεις στην εσωτερική κοιλότητα. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

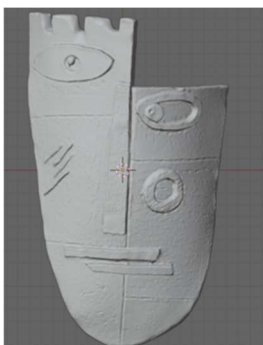


Εικόνα 133: KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 129: KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Γ2 Κεραμική Μάσκα



Εικόνα 134: EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 135: Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 136: RealityScan SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

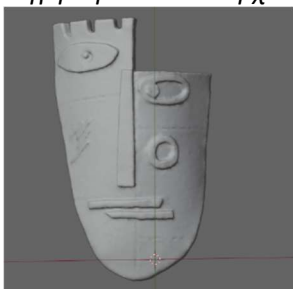


Εικόνα 137: KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 139: Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

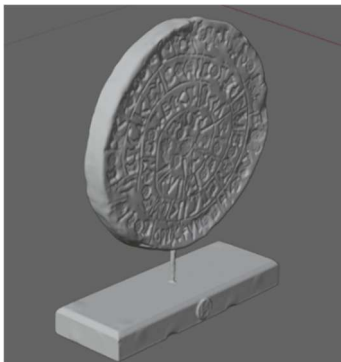


Εικόνα 138: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 140: Κεραμική μάσκα — KIRI Engine 3DGS,

Γ3 Αντίγραφο Δίσκου Φαιστού



Εικόνα 141: Δίσκος
Φαιστού — EinScan H2,
solid view Blender.
Μοντέλο αναφοράς. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 144: Δίσκος
Φαιστού — Polycam SfM,
solid view Blender. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 146: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
SfM, solid view Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 142: Δίσκος
Φαιστού — RealityScan
SfM, solid view Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 145: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
3DGS, solid view Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 147: Δίσκος
Φαιστού — Polycam 3DGS,
solid view Blender. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 143: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
LiDAR, solid view Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Γ4 Ειδώλιο Αλόγου



Εικόνα 148: Ειδώλιο αλόγου — EinScan H2, solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 151: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 153: Ειδώλιο αλόγου — RealityScan SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 149: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Ελλείψεις κάτω από την κοιλιά. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 152: Ειδώλιο αλόγου — Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 154: Ειδώλιο αλόγου — Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 150: Ειδώλιο αλόγου — KIRI Engine 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Γ5 Μπρούτζινο Γουδί

Σημείωση: Το μοντέλο αναφοράς EinScan H2 (IR mode) παρουσιάζει αυξημένο θόρυβο επιφάνειας λόγω μεταλλικής ανακλαστικότητας.



Εικόνα 155: Μπρούτζινο γουδί — EinScan H2 (IR mode), solid view Blender. Μοντέλο αναφοράς. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



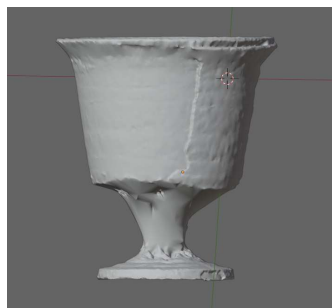
Εικόνα 157: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine LiDAR, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 159: Μπρούτζινο γουδί — Polycam SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 156: : Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine SfM, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 158: Μπρούτζινο γουδί — RealityScan SfM, solid view Blender. Ανεπαρκής γεωμετρική ανακατασκευή. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 160: Μπρούτζινο γουδί — Polycam 3DGS, solid view Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Παράρτημα Δ: «Ποιότητα Υφής (Texture View)»

Παρουσιάζεται οι εφαρμογές κινητών συσκευών από καλύτερη προς χειρότερη χρωματική απόδοση.

Δ1 Ακροκέραμο



Εικόνα 161: Ακροκέραμο — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender. Πλουσιότερη απόδοση τερακότας. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 164: Ακροκέραμο — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 166: Ακροκέραμο — RealityScan SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 162: Ακροκέραμο — Polycam SfM, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 165: Ακροκέραμο — Polycam 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 167: Ακροκέραμο — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 163: Ακροκέραμο — EinScan H2, render με υφή Blender. Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Δ2 Κεραμική Μάσκα



Εικόνα 168: Κεραμική
μάσκα — KIRI Engine SfM,
render με υφή Blender.
Πιστή απόδοση
πολυχρωμίας. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 171: Κεραμική
μάσκα — KIRI Engine
3DGS, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 173: Κεραμική
μάσκα — Polycam 3DGS,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 169: Κεραμική
μάσκα — Polycam SfM,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 172: Κεραμική
μάσκα — KIRI Engine
LiDAR, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 174: Κεραμική
μάσκα — RealityScan SfM,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 170: Κεραμική
μάσκα — EinScan H2,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Δ3 Δίσκος Φαιστού



Εικόνα 175: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
3DGS, render με υφή
Blender. Φωτορεαλιστική
απόδοση ιερογλυφικών.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 178: Δίσκος
Φαιστού — Polycam 3DGS,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 180: Δίσκος
Φαιστού — RealityScan
SfM, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 176: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
SfM, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 179: Δίσκος
Φαιστού — Polycam SfM,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 181: Δίσκος
Φαιστού — KIRI Engine
LiDAR, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο



Εικόνα 177: Δίσκος
Φαιστού — EinScan H2,
render με υφή Blender.,
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Δ4 Ειδώλιο Αλόγου



Εικόνα 182: Ειδώλιο
αλόγου — RealityScan
SfM, render με υφή
Blender. Πλουσιότερη
απόδοση σκούρου
χρώματος και
διακοσμητικών μοτίβων.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 185: Ειδώλιο
αλόγου — KIRI Engine SfM,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 187: Ειδώλιο
αλόγου — KIRI Engine
LiDAR, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 183: Ειδώλιο
αλόγου — Polycam SfM,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 186: Ειδώλιο
αλόγου — Polycam 3DGS,
render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 188: Ειδώλιο
αλόγου — KIRI Engine
3DGS, render με υφή
Blender. Πηγή: προσωπικό
αρχείο.



Εικόνα 184: Ειδώλιο
αλόγου — EinScan H2,
render με υφή Blender.
Αχνή χρωματική απόδοση.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Δ5 Μπρούτζινο Γουδί

Σημείωση: Το μοντέλο EinScan H2 (IR mode) παρουσιάζει ιδιαίτερα αποχρωματισμένη υφή λόγω μεταλλικής ανακλαστικότητας.



Εικόνα 189: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine SfM, render με υφή Blender..
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 192: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine LiDAR, render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 194: Μπρούτζινο γουδί — Polycam SfM, render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 190: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο



Εικόνα 193: Μπρούτζινο γουδί — EinScan H2 (IR mode), render με υφή Blender. Αχνότερη χρωματική απόδοση λόγω ανακλαστικής επιφάνειας.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 195: Μπρούτζινο γουδί — KIRI Engine 3DGS, render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 191: Μπρούτζινο γουδί — RealityScan SfM, render με υφή Blender.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.

Δ6 Τηλέφωνο



Εικόνα 196: Τηλέφωνο—
KIRI Engine LiDAR (iPhone
15 Pro), render με υφή
Blender. Αποδίδεται το
κόκκινο χρώμα με
μειωμένη ανάλυση. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 198: Τηλέφωνο—
EinScan H2 (IR mode),
render με υφή Blender.
Φωτεινή πορτοκαλί
απόχρωση αντί
πραγματικού βαθύ
κόκκινου, λόγω
ανακλαστικής επιφάνειας.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



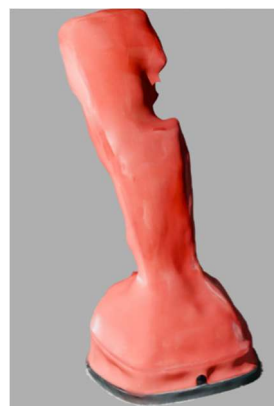
Εικόνα 200: Τηλέφωνο—
KIRI Engine 3DGS ., render
με υφή Blender.
Αναγνωρίσιμη γεωμετρία.
Πηγή: προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 197: Τηλέφωνο—
Polycam SfM, render με
υφή Blender. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 199: Τηλέφωνο—
Polycam 3DGS, render με
υφή Blender. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 201: Τηλέφωνο—
KIRI Engine SfM ., render
με υφή Blender. Πηγή:
προσωπικό αρχείο.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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