

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών
και Βιώσιμου Σχεδιασμού
ΠΜΣ Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων

Διπλωματική Εργασία

Χρήση Drone και Φωτογραμμετρίας για τη Ψηφιακή Τεκμηρίωση Αρχαιολογικών Χώρων.
Φωτογραμμετρική αποτύπωση δύο αρχαίων «μεγαρικών υπογείων» σε οικόπεδο ιδιώτη στα
Μέγαρα Αττικής.



ΔΑΛΑΚΟΥΡΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιβλέπων καθηγητής:
ΣΩΤΗΡΗΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας ΔΑΛΑΚΟΥΡΑ ΓΕΩΡΓΙΑ που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης η συγγραφέας 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. Η συγγραφέας διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Χρήση Drone και Φωτογραμμετρίας για τη Ψηφιακή Τεκμηρίωση Αρχαιολογικών Χώρων.
Φωτογραμμετρική αποτύπωση δύο αρχαίων «μεγαρικών υπογείων» σε οικόπεδο ιδιώτη στα
Μέγαρα Αττικής.

ΔΑΛΑΚΟΥΡΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

ΣΩΤΗΡΗΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

Μέλος ΣΕΠ

Τμήμα Εφαρμοσμένων Τεχνών και

Βιώσιμου Σχεδιασμού

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

ΛΑΖΑΡΟΣ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Μέλος ΣΕΠ

Τμήμα Εφαρμοσμένων Τεχνών και

Βιώσιμου Σχεδιασμού

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα, ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί το τέλος μιας απαιτητικής, αλλά εξαιρετικά δημιουργικής διετούς πορείας. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίησή της. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Σωτήρη Λυκουργιώτη, για την επιστημονική καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και τον κ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο για την ουσιαστική συνεισφορά του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου και κυρίως στο σύζυγό μου, για την αμέριστη υπομονή και τη στήριξή του σε κάθε μου βήμα. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την υπεύθυνη αρχαιολόγο Μεγάρων, κ. Χ. Καζαζάκη, για την αμέριστη συμπαράστασή της και την ευγενική παραχώρηση του ψηφιακού ανασκαφικού υλικού, καθώς και το Γραφείο Μελετών Τοπολογία και συγκεκριμένα στον τοπογράφο κ. Ξ. Λίτσα για την ευγενική παραχώρηση της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης.

«Για να πατάς στέρεα στη γη, πρέπει το ένα πόδι σου να είναι έξω από τη γη»

Οδυσσέας Ελύτης, Μαρία Νεφέλη

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της χρήσης Συστημάτων Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) και φωτογραμμετρικών μεθόδων στη ψηφιακή τεκμηρίωση αρχαιολογικών ανασκαφών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση εξασφαλίζει ταχεία, μη επεμβατική εναέρια αποτύπωση και επιτρέπει την παραγωγή ορθοφωτοχαρτών υψηλής ανάλυσης, καθώς και 2D/3D ψηφιακών μοντέλων, εκσυγχρονίζοντας τις συμβατικές σχεδιαστικές μεθόδους.

Τα αποτελέσματα της έρευνας εστιάζουν στη δημιουργία ενός λεπτομερούς ορθοφωτοχάρτη και ενός ακριβούς τρισδιάστατου μοντέλου της υπό μελέτη ανασκαφής, σε συνδυασμό με την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της αξιοπιστίας των δεδομένων βάσει ποιοτικών κριτηρίων. Στο πλαίσιο αυτό, η φωτογραμμετρία δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως μέσο καταγραφής, αλλά ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και διατήρησης της αρχαιολογικής πληροφορίας, το οποίο εξασφαλίζει την εύκολη αποθήκευση, ανάκτηση και μελλοντική επαναχρησιμοποίηση των δεδομένων. Παράλληλα, η ψηφιακή σχεδίαση σε περιβάλλον CAD προσφέρει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, οργανωμένη δομή και ευελιξία στις τροποποιήσεις.

Η πρωτοτυπία της παρούσας διπλωματικής έγκειται στην εφαρμογή και αξιολόγηση των σύγχρονων τεχνολογικών μεθόδων σε ιδιαίτερα περιορισμένους, υπόγειους και γεωμετρικά σύνθετους χώρους, προσφέροντας μια εξειδικευμένη ροή εργασίας για ανάλογες απαιτητικές αρχαιολογικές περιπτώσεις. Η προσωπική μου ενασχόληση με ολόκληρη τη διαδικασία του ψηφιακού σχεδιασμού, της επεξεργασίας και της τελικής τεκμηρίωσης των δύο υπογείων αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τη βαθιά κατανόηση και τη στενή παρακολούθηση του έργου, διασφαλίζοντας την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Συμπερασματικά, σε περιπτώσεις φθοράς ή αναπόφευκτης αλλοίωσης του πεδίου λόγω της ανασκαφικής διαδικασίας, η προτεινόμενη μεθοδολογία λειτουργεί ως ένα έγκυρο ψηφιακό αρχείο, διασώζοντας πληροφορίες που διαφορετικά θα είχαν χαθεί. Η εργασία ολοκληρώνεται με μια συγκριτική αποτίμηση μεταξύ των σύγχρονων και των παραδοσιακών τεχνικών, με γνώμονα το χρόνο υλοποίησης, την αποδοτικότητα και το κόστος.

Λέξεις-Κλειδιά:

Τεκμηρίωση,

UAV και Φωτογραμμετρία,

Ορθοφωτοχάρτης,

3D μοντέλο,

Ψηφιακή σχεδίαση,

Ψηφιακό αρχείο

"Use of UAVs and Photogrammetry for the Digital Documentation of Archaeological Sites:
Photogrammetric survey of two ancient Megarian underground structures in a private plot
in Megara, Attica"

GEORGIA DALAKOURA

Abstract

The subject of the present paper is the investigation of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and photogrammetric methods in the digital documentation of archaeological excavations. This approach ensures rapid, non-invasive aerial mapping and enables the production of high-resolution orthophotomaps, as well as 2D/3D digital models, modernizing conventional drawing methods.

The research results focus on the creation of a detailed orthophotomap and an accurate three-dimensional model of the excavation under study, combined with a documented evaluation of data reliability based on quality criteria. Within this framework, photogrammetry is not treated merely as a recording tool, but as an integrated system for managing and preserving archaeological information, which ensures easy storage, retrieval, and future reuse of data. What is more, digital drawing in a CAD environment offers high geometric accuracy, organized structure, and flexibility in modifications.

The originality of this paper lies in the application and evaluation of modern technological methods in highly confined, underground, and geometrically complex spaces, offering a specialized workflow for similarly demanding archaeological cases. My personal involvement throughout the entire process of digital drafting, processing, and final documentation of the two underground spaces has been a significant factor in providing a deep understanding and close monitoring which ensured the accuracy of the final outputs.

In conclusion, in cases of damage or inevitable alteration of the site due to the excavation process, the proposed methodology functions as a valid digital archive, preserving information that would otherwise have been lost. The paper concludes with a comparative evaluation of modern and traditional techniques, taking into consideration the implementation time, efficiency, and cost.

Keywords:

Documentation,

UAV and Photogrammetry,

Orthophotomap,

3D model,

Digital drawing,

Digital archive

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη.....	vi
Abstract	viii
Περιεχόμενα	x
Κατάλογος Εικόνων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xvi
Κατάλογος Σχημάτων	xvii
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xviii
Εισαγωγή.....	1

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο Πρώτο - Πολιτιστική Κληρονομιά και Τεκμηρίωση.	4
1.1 Πολιτιστική κληρονομιά.	4
1.2 Η σημασία της τεκμηρίωσης στην Πολιτιστική Κληρονομιά.	5
1.3 Μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.	5
1.3.1 Παραδοσιακές μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης.	6
1.3.1. 1. Εμπειρική ή τοπομετρική τεχνική.	6
1.3.1. 2. Τοπογραφική αποτύπωση.	6
1.3.1. 3. Περιορισμοί παραδοσιακών μεθόδων.	7
1.4 Νέες τεχνολογίες στην τεκμηρίωση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς	8
1.4.1 GIS (Geographic Information Systems).....	8
1.4.2 UAV (Drones)	9
1.4.3 Φωτογραμμετρία.	10
1.4.4 Laser Scanning (LiDAR)	11
1.4.5 3D Modeling & Visualization	12
1.5 Πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεκμηρίωσης - Προκλήσεις και περιορισμοί.....	13
Κεφάλαιο Δεύτερο – Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV / Drones).	14
2.1 Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη.....	14
2.2 Κατηγορίες και τύποι UAV / Drones.....	16
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης.	17
2.4 Νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα και την ΕΕ.....	18

2.5 Σύγχρονες Εφαρμογές των UAV/Drones.	21
Κεφάλαιο Τρίτο – Φωτογραμμετρία.	23
3.1 Εισαγωγή και Εννοιολογικό Πλαίσιο.	23
3.2 Κατηγορίες φωτογραμμετρίας.	25
3.3 Βασικές αρχές φωτογραμμετρίας.	27
3.4 Structure from Motion (SfM).	33
3.5 Η διαδικασία της πυκνής αντιστοίχισης εικόνων (Dense Matching) και η δημιουργία νέφους σημείων (Point Cloud).	38
3.6 Παράγωγα της Φωτογραμμετρίας.	42
3.7 Εφαρμογές της Φωτογραμμετρίας.	45
Κεφάλαιο Τέταρτο – Συνδυασμός Drone και Φωτογραμμετρίας - Μεθοδολογία και Εφαρμογές στην Αρχαιολογία.	47
4.1 Workflow δεδομένων.	48
4.1.1 Σχεδιασμός Πτήσης.	49
4.1.2 Λήψη Εικόνων.	50
4.1.3 Επεξεργασία δεδομένων.	51
4.2 Το λογισμικό Agisoft Metashape.	52
4.3 Ακρίβεια και σφάλματα.	54
4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα.	56
4.5 Εφαρμογές στην αποτύπωση ανασκαφικών χώρων.	58
Πρακτικό μέρος	
Κεφάλαιο Πέμπτο - Φωτογραμμετρική αποτύπωση των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων σε ιδιωτικό οικόπεδο στα Μέγαρα Αττικής.	60
5.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης. Η ιστορική πορεία των Μεγάρων, η λατρεία της Δήμητρας και τα μεγαρικά υπόγεια.	60
5.1.1 Η σωστική ανασκαφή σε οικόπεδο ιδιώτη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών (Ο.Τ. 285) στην πόλη των Μεγάρων.	61
5.1.2 Η φωτογραμμετρική αποτύπωση της ανασκαφής.	62
5.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.	63
5.3 Σχεδιασμός αποστολής πτήσης.	64
5.4 Συλλογή φωτογραφικών δεδομένων.	66
5.5 Γεωαναφορά μέσω σημείων ελέγχου.	67

5.6 Φωτογραμμετρική επεξεργασία.....	69
5.7 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας.	72
Κεφάλαιο Έκτο – Αποτελέσματα φωτογραμμετρικής αποτύπωσης των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων.....	74
6.1 Παρουσίαση παραγόμενων προϊόντων.	74
6.1.1 Ορθοφωτοχάρτης.	74
6.1.2 3D μοντέλα.....	75
6.2 Αξιολόγηση ακρίβειας.	76
6.3 Αξιολόγηση ποιότητας.....	77
6.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.	78
6.5 Συνολική αποτίμηση - Πλεονεκτήματα της μεθόδου.	79
Κεφάλαιο Έβδομο – Συμπεράσματα φωτογραμμετρικής αποτύπωσης των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων.....	80
7.1 Συνοπτική αποτίμηση της μεθοδολογίας.	80
7.2 Βασικά αποτελέσματα της έρευνας.	80
7.3 Τεχνολογική και πρακτική σημασία.	81
7.4 Πρακτικές εφαρμογές στην ψηφιακή αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων. Η Εφαρμογή ορθοφωτοχαρτών και 3D μοντέλων στην αρχαιολογική σχεδίαση.	81
7.5 Αξιολόγηση Σύγχρονων και Παραδοσιακών Τεχνικών Αποτύπωσης: Χρόνος Εφαρμογής και Οικονομική Αποδοτικότητα.	85
7.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.	86
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90
Παράρτημα Α: Γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Αττικής. Χορήγηση άδειας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής.....	101
Παράρτημα Β: Processing Report φωτογραμμετρικής αποτύπωσης.....	104
Παράρτημα Γ: Γραφείο Μελετών Topologia. Άδεια χρήσης φωτογραμμετρικής αποτύπωσης σε οικόπεδο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στα Μέγαρα.....	114

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα Εξώφυλλου: Αεροφωτογραφία των δύο μεγαρικών υπογείων. Πηγή: Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 1. Σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) η διαχείριση των διάφορων στοιχείων του πραγματικού κόσμου γίνεται μέσω των επιπέδων πληροφορίας. Πηγή: Ευελπίδου, Τζουξανιώτη & Κarkάνη, 2023, σ. 26.

Εικ. 2. Εργασίες αεροφωτογράφισης μέσω drone του συνόλου του αρχαιολογικού χώρου Δελφών (23/07/2021). Πηγή:
<https://3d4delphi.gr/%ce%b5%ce%b9%ce%ba%cf%8c%ce%bd%ce%b5%cf%82/>
(5/6/2026).

Εικ. 3. Φωτογραμμετρία. Διαφορετικά στάδια επεξεργασίας των δεδομένων. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 986.

Εικ. 4. Δίον. Επεξεργασία σάρωσης στο ιερό της Ίσιδας. Πηγή: Iliodromitis, Tsilimantou, Kopelou, Anastasiou, Koulidou, Spanodimos, Chrysostomou, Dimou, Pagounis, 2025, σ. 14.

Εικ. 5. Μερικές εφαρμογές γεωμοντελοποίησης. Πηγή: Royer, 2004, σ. 3.

Εικ. 6. Η ιστορία των UAV κατά τη διάρκεια των διαφόρων πολέμων. Πηγή: Radoglou-Grammatikis, Sarigiannidis, Lagkas, Moscholios, 2020, σ. 5.

Εικ. 7. Επισκόπηση διαφόρων συστημάτων UAV. Πηγή: Eisenbeiss, 2009, σ. 33.

Εικ. 8. Ετήσια Επισκόπηση της Ασφάλειας του EASA: διερεύνηση του παρελθόντος για τη διατήρηση υψηλού επιπέδου ασφάλειας στην αεροπορία. Πηγή:
<https://www.easa.europa.eu/el/light/topics/easas-annual-safety-review-looking-past-maintain-high-level-safety-aviation> (5/6/2026).

Εικ. 9. Η υπάρχουσα φωτογραφία από drone (μικρή στα δεξιά) επικαλύπτεται με ένα τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργώντας αυτήν την απλή αλλά αποτελεσματική φωτογραφική αντιστοίχιση του νέου δρόμου. Πηγή: Tal & Altschuld, 2021, σ. 29.

Εικ. 10. Η ποιότητα των αισθητήρων των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών σε συνδυασμό με την προσβασιμότητα των drones μας επιτρέπει να βλέπουμε το περιβάλλον μας με νέους τρόπους. Πηγή: Tal & Altschuld, 2021, σ. 12.

Εικ. 11. Στρατιωτικός αεροφωτογράφος κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου & Κάθετη αεροφωτογραφία χαρακωμάτων το 1916. Πηγή: Χατζηφώτη, 2016, σ. 4.

Εικ. 12. Αρχή της φωτογραμμετρικής μέτρησης. Πηγή: Luhmann, et al., 2020, σ. 8.

Εικ. 13. Παράδειγμα μικρής 1:20.000 (αριστερά) και μεγάλης 1:1.000 (δεξιά) κλίμακας αεροφωτογραφίας. Πηγή: Μουσιάδης, 2015, σ. 27.

Εικ. 14. Η εξαγωγή χαρακτηριστικών εικόνας με τον αλγόριθμο SIFT. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 43.

Εικ. 15. Προοπτικές όψεις του λόφου Constitution. (α) Πανόραμα της περιοχής έρευνας με καθαρά ορατά GCP.), (β) αραιά σημειακά νέφη και (γ) πυκνά σημειακά νέφη. Πηγή: Westoby et al., 2012, σ. 305.

Εικ. 16. Παραδείγματα διαφορετικών τύπων στόχων ή φωτοσταθερών που χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου εδάφους. Πηγή: Carrivick et al., 2016, σ. 75.

Εικ. 17. DSM (αριστερά) και ορθομωσαϊκό (δεξιά) του αρχαιολογικού χώρου της Αίγινας Κολώνας. Πηγή: Ioannidis, Verykokou, Soile, Potsiou, 2025, σ. 9.

Εικ. 18. Τα Σημειακά Νέφη μετά την καταχώρηση. Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 318.

Εικ. 19. Πυκνή ανακατασκευή επιφανειών τοίχων με προοπτική παραμόρφωση χρησιμοποιώντας SGM με οκτώ προσανατολισμούς (α) εικόνα RGB, (β) εικόνα ύψους με ραβδώσεις έγκυρων pixel. Πηγή: Frommholz, 2020, σ. 148.

Εικ. 20. Ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα τρισδιάστατης ανακατασκευής αρχαιολογικού χώρου : (α) αραιό νέφος σημείων και προσανατολισμένες εικόνες, (β) παραδείγματα χαρτών βάθους και των εικόνων από τις οποίες προέκυψαν, (γ) (δ) πυκνό νέφος σημείων, (ε) (ζ) τρισδιάστατη τριγωνική επιφάνεια χωρίς υφή και με υφή, καθώς και (η) λεπτομέρειες αυτών. Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 169.

Εικ. 21. Δίον. Ορθοφωτογραφία του Ρωμαϊκού Ωδείου και των Μεγάλων Θερμών. Πηγή: Iliodromitis, Tsilimantou, Kopelou, Anastasiou, Koulidou, Spanodimos, Chrysostomou, Dimou, Pagounis, 2025, σ. 17.

Εικ. 22. Φωτομωσαϊκό πρόσοψης μνημείου που δημιουργείται από συνένωση φωτογραφιών. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 23.

Εικ. 23. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (αριστερά) και ορθοφωτογραφία (δεξιά) τμήματος της ευρύτερης περιοχής των Μετεώρων. Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 164.

Εικ. 24. Τρισδιάστατο μοντέλο με υφή τμήματος του Αρχαιολογικού Χώρου των Μετεώρων. Πηγή: Ioannidis, Verykokou, Soile, Potsiou, 2025, σ. 10.

Εικ. 25. Τρισδιάστατη Σάρωση. Ψηφιακά μοντέλα ειδωλίων. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 985.

Εικ. 26. Ορθομωσαϊκά της κάτοψης της ΒΔ γωνίας του Παρθενώνα, πριν και μετά την αποκατάσταση. Πηγή: Ελευθερίου, Καλησπεράκης, Μαυρομάτη, Χριστοδουλοπούλου, 2017, σ. 15.

Εικ. 27. Τρόποι λήψης εικόνων. Πηγή: Γράβαλος, Μακρής, 2024, σ. 504.

Εικ. 28. Λογισμικό Σταθμού Ελέγχου Εδάφους (GCS) Μενού αυτοματοποιημένης εναέριας έρευνας, οι κόκκινες κουκκίδες και οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την έκταση της περιοχής που θα καλυφθεί, οι κίτρινες γραμμές είναι οι γραμμές πτήσης και οι πράσινες κουκκίδες είναι τα σημεία στροφής του UAS. Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 319.

Εικ. 29. Εισαγωγή εικόνων με δεξί κλικ> Add > Add Photos. Πηγή: *Η Φωτογραμμετρική διαδικασία, χρησιμοποιώντας το Agisoft PhotoScan/MetaShape*, <http://bit.ly/4o0vpCf>. (5/6/2026).

Εικ. 30. Ακόμα και αν το drone πετάει οριζόντια, η λεπτομέρεια (GSD) των εικόνων μπορεί να αλλάζει. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος έχει ανωμαλίες και η κάμερα αλλάζει ελαφρώς γωνία. Εφόσον ο χάρτης (ορθομωσαϊκό) συνδυάζει τις θέσεις της κάμερας και ένα τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους, το λογισμικό υπολογίζει και χρησιμοποιεί μια μέση τιμή ανάλυσης για όλο το έργο. Πηγή: *Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry*, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809> (5/6/2026).

Εικ. 31. Φωτογραμμετρία. Το τελικό αποτέλεσμα για το Κτήριο 1 σε αντιπαραβολή με το σχέδιο και τη φωτογραφία. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 986.

Εικ. 32. Σχεδιασμός πτήσης, θέσεις λήψης καμερών και χάρτης επικαλύψεων εικόνων (Image Overlap). Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 2.

Εικ. 33. Αεροφωτογραφία του ανασκαφικού χώρου (άποψη από βόρεια προς νότια). Πηγή: Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 34. Αεροφωτογραφία του ανασκαφικού χώρου (άποψη από νότια προς βόρεια). Πηγή: Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 35. Διάγραμμα χωρικής κατανομής των Σημείων Ελέγχου (Control Points) και του Σημείου Ελέγχου Ακρίβειας (Check Point) στο χώρο της ανασκαφής. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 5.

Εικ. 36. Διάγραμμα υπολειμματικών σφαλμάτων (residuals) και βαθμονόμησης του φακού της κάμερας. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 3.

Εικ. 37. Το παραχθέν Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM) της ανασκαφής. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 7.

Εικ. 38. Ο ορθοφωτοχάρτης της ανασκαφής. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 1.

Εικ. 39. Τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο (3D model) της ανασκαφής. Παραγωγή μέσω φωτογραμμετρικής αποτύπωσης από την Topologia.gr. Πηγή: Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 40. . Θέσεις κάμερας και εκτιμήσεις σφάλματος. Το σφάλμα Z αναπαρίσταται από το χρώμα της έλλειψης. Τα σφάλματα X,Y αναπαρίστανται από το σχήμα της έλλειψης. Οι εκτιμώμενες θέσεις των καμερών σημειώνονται με μια μαύρη κουκκίδα. . Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 4.

Εικ. 41. Εισαγωγή του Point Cloud σε περιβάλλον CAD. Πηγή: Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 42. Ψηφιακή αποτύπωση της ανασκαφής σε περιβάλλον CAD. Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 43. Δημιουργία τομής από 3D Μοντέλο. Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Εικ. 44. Δημιουργία ψηφιακής τομής σε περιβάλλον CAD. Ψηφιακό αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Κατάλογος Πινάκων

Πίν. 1. Ταξινόμηση των μη επανδρωμένων οχημάτων. Πηγή: Γράβαλος & Μακρής, 2024, σ. 462

Πίν. 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων τύπων UAV. Πηγή: Eisenbeiss, 2009, σ. 35.

Πίν. 3. Λεπτομερής κατηγοριοποίηση της φωτογραμμετρίας ανά θέση κάμερας και μέγεθος θέματος. Πηγή: Χατζηφώτη, 2016, σ. 10.

Πίν. 4. Πρακτική διάκριση της φωτογραμμετρίας βασιζόμενη στην ποσότητα των εικόνων που χρησιμοποιούνται για τη φωτογραμμετρική επεξεργασία. Πηγή: Χατζηφώτη, 2016, σ. 11.

Πίν. 5. Παράμετροι πτήσης για τον σχεδιασμό αποστολών φωτογραμμετρικών εναέριων πτήσεων. Πηγή: Eisenbeiss, 2009, σ. 63.

Πίν. 6. Τεχνικά χαρακτηριστικά και εσωτερικά στοιχεία του αισθητήρα της κάμερας FC7203. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 2.

Πίν. 7. Συνοπτικά στοιχεία και παράμετροι της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 2.

Πίν. 8. Σημεία ελέγχου. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 6.

Πίν. 9. Σημείο Ελέγχου Ακρίβειας. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 6.

Πίν. 10. Συντελεστές βαθμονόμησης και πίνακας συσχέτισης. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 3.

Πίν. 11. Σφάλμα Σημείων Ελέγχου (Control Points RMSE). Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 5.

Πίν. 12. Σφάλμα Σημείου Ελέγχου Ακρίβειας (Check Point RMSE). Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 5.

Πίν. 13. Μέσο σφάλμα θέσης κάμερας. X - Ανατολικά, Y - Βόρεια, Z - Υψόμετρο. Πηγή: Processing Report, 2025, σ. 4.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1. Διάγραμμα διαδικασιών τρισδιάστατης ψηφιοποίησης για την αποκατάσταση και τη συντήρηση. Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 312.

Σχ. 2. Σχέση φωτογραμμετρίας, τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ (GIS). Πηγή: Schenk, 2005, σ. 3.

Σχ. 3. Η φωτογραμμετρική διαδικασία από το αντικείμενο έως το μοντέλο του αντικειμένου. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 13.

Σχ. 4. Σχέση μεταξύ της στερεοσκοπικής αντίληψης του βάθους και της γωνίας σύγκλισης. Πηγή: Μουσιάδης, 2015, σ. 30.

Σχ. 5. Κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη στερεοζεύγους. Πηγή: Μουσιάδης, 2015, σ. 31.

Σχ. 6. Για κάθε σημείο P ορίζεται ένα σημείο p στην εικόνα, ώστε τα σημεία P, p και O, που είναι το κέντρο προβολής, να είναι συνευθειακά (συγγραμικά). Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 17.

Σχ. 7. Το σημείο P (X, Y, Z) στο έδαφος απεικονίζεται ως σημείο p στην εικόνα. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 63.

Σχ. 8. Η τεχνική Structure from Motion (SfM). Αντί για ένα μόνο στερεοσκοπικό ζεύγος, η τεχνική SfM απαιτεί πολλαπλές, επικαλυπτόμενες φωτογραφίες ως είσοδο για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και τους αλγόριθμους τρισδιάστατης ανακατασκευής. Πηγή: Westoby et al., 2012, σ. 301.

Σχ. 9. Δημιουργία επιφάνειας μέσω της μεθόδου ανακατασκευής Poisson: (α) νέφος σημείων για τμήμα κίονα, (β-δ) η επιφάνεια του κίονα με τιμές του βάθους της δομής οκταδικών δέντρων 6, 8 και 12 (από αριστερά προς τα δεξιά). Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 132.

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ελληνόγλωσσες

ΑΠΑ: Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας

ΕΓΣΑ87: Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987

ΕΦΑΔΑ: Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής

ΥΠΑ: Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας

Ξενόγλωσσες

3D: Three-Dimensional - Τρισδιάστατο

3D Modeling & Visualization: Η Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση και Οπτικοποίηση

CA: Civil Aviation - Πολιτική Αεροπορία

CIPA: International Committee of Architectural Photogrammetry - Διεθνής Επιτροπή Αρχιτεκτονικής Φωτογραμμετρίας

CPU: Central Processing Unit - Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

DEM: Digital Elevation Model - Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου

DGPS: Differential GPS - Διαφορικό GPS (Μια βελτιωμένη μορφή του GNSS/GPS)

DSM: Digital Surface Model - Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας

DTM: Digital Terrain Model - Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

EASA: European Union Aviation Safety Agency - Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ασφάλειας της Αεροπορίας

GCPs: Ground Control Points - Φωτοσταθερά Σημεία Ελέγχου

GDPR: General Data Protection Regulation - Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων

GGRS87 / Greek Grid (EPSG::2100): ΕΓΣΑ87 - Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987

GNSS: Global Navigation Satellite System - Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης

GPS: Global Positioning System - Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης

GPU: Graphics Processing Unit - Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών

GSD: Ground Sample Distance - Εδαφικό Μέγεθος Δείγματος

LIDAR: Light Detection and Ranging - Ανίχνευση Φωτός και Προσδιορισμός Εμβέλειας

RMSE: Root Mean Square Error - Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος

RTK GNSS: Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System - Τεχνολογία δορυφορικού εντοπισμού που προσφέρει ακρίβεια χιλιοστού ή εκατοστού σε πραγματικό χρόνο.

SIFT: Scale-Invariant Feature Transform - Θεμελιώδης αλγόριθμος στην όραση υπολογιστών

UAS: Unmanned Aircraft System - Μη Επανδρωμένο Αεροπορικό Σύστημα

UAV: Unmanned Aerial Vehicles - Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

WGS84: World Geodetic System 1984 - Παγκόσμιο Πρότυπο Γεωδαιτικό Σύστημα 1984

Εισαγωγή

Η πολιτιστική κληρονομιά, ως το σύνολο των υλικών και άυλων στοιχείων που μας κληροδοτήθηκαν από το παρελθόν, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεκμήρια της ιστορικής μνήμης και της συλλογικής μας ταυτότητας. Ως εκ τούτου, η διάσωση, η συντήρηση και η συστηματική τεκμηρίωσή της αναδεικνύονται σε ζητήματα πρωταρχικής σημασίας για την αρχαιολογική επιστήμη και τη διεθνή πολιτιστική διαχείριση. Στον ελληνικό χώρο, η διαφύλαξη αυτή θεσμοθετείται από τον Νόμο 4858/2021 («Κύρωση Κώδικα νομοθεσίας για την προστασία των αρχαιοτήτων και εν γένει της πολιτιστικής κληρονομιάς»), ο οποίος οργανώνει το νομικό πλαίσιο για τον εντοπισμό, την καταγραφή και την ανάδειξη των κινητών και ακίνητων μνημείων. Παράλληλα, τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών έχει επιφέρει δομικές αλλαγές στην καταγραφή των αρχαιολογικών δεδομένων, εισάγοντας μεθόδους υψηλής ακρίβειας, ταχύτητας και μη επεμβατικής γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

Στο πλαίσιο αυτό, η συνδυαστική χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV/drone) και ψηφιακής φωτογραμμετρίας, ιδίως μέσω της μεθόδου Structure from Motion (SfM), αναδείχθηκε σε ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό εργαλείο αποτύπωσης. Η εναέρια φωτογραμμετρία επιτρέπει τη βιώσιμη και χαμηλού κόστους συλλογή μεγάλου όγκου γεωχωρικών δεδομένων, τα οποία, μέσω εξειδικευμένων λογισμικών επεξεργασίας, όπως το Agisoft Metashape, μετατρέπονται σε πυκνό νέφος σημείων, τρισδιάστατο (3D) μοντέλο, Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και ορθοφωτοχάρτη υψηλής ανάλυσης. Τα προϊόντα αυτά διασφαλίζουν την πιστή γεωμετρική καταγραφή, ανάλυση και διαχρονική παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης μνημείων και ανασκαφικών χώρων, δημιουργώντας παράλληλα ένα πολύτιμο ψηφιακό αρχείο για τη μελλοντική έρευνα.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση αυτής της μεθοδολογίας με πεδίο εφαρμογής την αποτύπωση δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων που εντοπίστηκαν σε ιδιωτικό οικόπεδο στα Μέγαρα Αττικής. Τα συγκεκριμένα κατάλοιπα αποτελούν κρίσιμα τεκμήρια της τοπικής αρχιτεκτονικής παράδοσης της Κλασικής και Ελληνιστικής περιόδου, καθιστώντας επιτακτική τη ψηφιακή τους διάσωση, ενώ η επιλογή τους ως μελέτη περίπτωσης προσφέρεται για τη δοκιμή σύγχρονων τεχνολογικών μεθόδων σε περιορισμένους και σύνθετους χώρους.

Κύριος σκοπός της έρευνας είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της εναέριας φωτογραμμετρίας στη διαχείριση αρχαιολογικών δεδομένων, μέσω της παραγωγής ορθοφωτοχαρτών και 3D μοντέλων, και η αποτίμηση της αξιοπιστίας τους βάσει ποιοτικών κριτηρίων. Επιπλέον, εξετάζεται η συμβολή της μεθόδου στη διαφύλαξη της επιστημονικής πληροφορίας σε περιπτώσεις όπου τα κατάλοιπα υφίστανται φθορά ή κατάχωση μετά την ανασκαφή, ενώ παράλληλα επιχειρείται μια συγκριτική αξιολόγηση των σύγχρονων ψηφιακών μεθόδων έναντι των παραδοσιακών τεχνικών ως προς τον χρόνο, το κόστος και τη γεωμετρική πιστότητα.

Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων, η εργασία διαρθρώνεται σε επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναλύει το θεωρητικό υπόβαθρο της πολιτιστικής κληρονομιάς και της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, αντιπαραβάλλοντας τις παραδοσιακές μεθόδους με τεχνολογίες αιχμής, όπως τα UAVs, η φωτογραμμετρία, το LiDAR και η 3D μοντελοποίηση. Το δεύτερο κεφάλαιο εξετάζει την ιστορική εξέλιξη, τις κατηγορίες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το εθνικό και ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο των UAV, ενώ το τρίτο εστιάζει στη θεωρία της φωτογραμμετρίας και στους αλγορίθμους SfM και Dense Image Matching. Το τέταρτο κεφάλαιο εξειδικεύει τη χρήση των drones στην αρχαιολογία, αναλύοντας τις τεχνικές λήψης, τη λειτουργία του Agisoft Metashape και τους παράγοντες που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια.

Η πρακτική εφαρμογή παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο, όπου περιγράφεται βήμα προς βήμα η αποτύπωση των μεγαρικών υπογείων, όπως ο εξοπλισμός, οι πτήσεις, η γεωαναφορά με GCPs και επεξεργασία, ενώ το έκτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση και ποιοτική αξιολόγηση των παραγόμενων ορθοφωτοχαρτών και μοντέλων. Το έβδομο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα, αποτιμά τη μεθοδολογία και προτείνει νέες αρχαιολογικές εφαρμογές. Τέλος, παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα από ολόκληρη την ερευνητική διαδικασία.

Η θεωρητική και μεθοδολογική πλαισίωση της διπλωματικής βασίζεται στη συνδυαστική αξιοποίηση πρωτογενούς και δευτερογενούς υλικού. Το πρωτογενές υλικό συλλέγεται από τη σωστική ανασκαφή στα Μέγαρα και περιλαμβάνει την τρισδιάστατη φωτογραμμετρική αποτύπωση, τα ψηφιακά σχέδια, καθώς και το σχετικό φωτογραφικό αρχείο. Σημειώνεται ότι για τη μελέτη και χρήση των εν λόγω δεδομένων έχει χορηγηθεί επίσημη άδεια από το Υπουργείο Πολιτισμού (ΑΔΑ: 9ΖΥΤ46ΝΚΟΤ-7ΓΙ), καθώς δεν έχει γίνει καμία δημοσίευση από την ανασκαφεία. Ιδιαίτερα σημαντική και πρωτότυπη Διπλωματική Εργασία

συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής συνιστά η προσωπική δημιουργία και παραγωγή των αναλυτικών ψηφιακών σχεδίων των δύο υπογείων. Τα ψηφιακά σχέδια μου δημιουργήθηκαν, τα οποία βασίστηκαν στα ακριβή δεδομένα που προέκυψαν από τα τρισδιάστατα μοντέλα, μετατρέπουν την ακατέργαστη χωρική πληροφορία σε έγκυρα αρχαιολογικά και αρχιτεκτονικά τεκμήρια, όπως κατόψεις, τομές και όψεις, παρέχοντας ένα αξιόπιστο υπόβαθρο για την τεκμηρίωση, ανάλυση και ερμηνεία των υπόγειων χώρων.

Παράλληλα, η δευτερογενής έρευνα περιλαμβάνει την ανασκόπηση ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας, επιστημονικών άρθρων, καθώς και δημοσιευμάτων στον έντυπο και ηλεκτρονικό τύπο. Η βιβλιογραφική αυτή επισκόπηση επικεντρώθηκε στους τομείς της Πολιτιστικής Κληρονομιάς, της Αρχαιολογίας, της Φωτογραμμετρίας και της χρήσης Συστημάτων Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV/drones), συμβάλλοντας καθοριστικά στη συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων, την τεκμηρίωση της εργασίας και τη διαμόρφωση των τελικών συμπερασμάτων

Κεφάλαιο Πρώτο - Πολιτιστική Κληρονομιά και Τεκμηρίωση.

1.1 Πολιτιστική κληρονομιά.

Ο όρος πολιτιστική κληρονομιά ορίζει ένα δυναμικό και πολυδιάστατο πεδίο που περικλείει όλες τις μεταβαλλόμενες αντιλήψεις των κοινωνιών για τους παρελθόντες χρόνους. Η αφετηρία της ανάγεται στην έννοια του «μνημείου», η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διατήρηση της μνήμης, καθώς αναφέρεται σε χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικά δημιουργήματα που ξεχωρίζουν για την αυθεντικότητα και το βαθιά συμβολικό τους χαρακτήρα. Από τις αρχές του 20ού αιώνα το θεωρητικό πλαίσιο επεκτάθηκε, συμπεριλαμβάνοντας πλέον, πέρα από τα μνημεία υψηλής αρχιτεκτονικής, ολόκληρες πόλεις, ιστορικά κέντρα και απλά κτίρια, που αποτυπώνουν την αυθεντικότητα των παραδοσιακών πολιτισμών. Η διευρυμένη αυτή αντίληψη αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση της σύγχρονης έννοιας της πολιτιστικής κληρονομιάς, η οποία ορίζεται ως ένα πολυεπίπεδο σύνολο ανθρωπογενών και φυσικών στοιχείων που συγκροτούν ένα παγκόσμιο σύστημα αξιών, αποτελώντας κοινό αγαθό για το σύνολο των ανθρώπων (Πατιάς, 2008, σσ. 69-70, Μαλλούχου Tufano, 2016, σσ. 11-14, Stylianidis, 2019, σ. 7).

Η τεκμηρίωση και προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς αποτελεί ένα δυναμικό πεδίο, το οποίο διαμορφώνει ένα αξιακό σύστημα που προάγει τη συνανάπτυξη και την κατανόηση μεταξύ των πολιτισμών, συνδέοντας άρρηκτα την ιδιαίτερη εθνотική ταυτότητα με την οικουμενική πολιτιστική ποικιλομορφία (Jokilehto, 2008, Stylianidis, 2019, UNESCO, 1972). Ως πυρήνας της συλλογικής μας ταυτότητας, η πολιτιστική κληρονομιά (υλική και άυλη) υπερβαίνει τα γεωγραφικά και μορφικά όρια. Η συστηματική της μελέτη είναι μια πολυδιάστατη διαδικασία που απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση. Η αξιοποίηση της ψηφιακής τεχνολογίας ενισχύει την τεκμηρίωσή της, καθιστώντας τα πολιτιστικά στοιχεία διαχρονικά και προσβάσιμα, με καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ιστορίας και στη διαμόρφωση του μέλλοντος (Τοκμακίδης, 2021, σ. 70, UNESCO, 2021, σσ. 5-7).

1.2 Η σημασία της τεκμηρίωσης στην Πολιτιστική Κληρονομιά.

Στην εποχή μας, η τεκμηρίωση αποτελεί τον πυλώνα της διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς διασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη διατήρηση, προστασία και ερμηνεία των μνημείων. Η σύσταση εθνικών και διεθνών οργανισμών με αντικείμενο τη διαφύλαξη των μνημείων τονίζει τον καθοριστικό ρόλο της επιστημονικής τεκμηρίωσης ως βασική προϋπόθεση για κάθε παρέμβαση. Κάθε σύγχρονη προσπάθεια διατήρησης μνημείων εδράζεται σε ένα διεπιστημονικό πλαίσιο τεκμηρίωσης και μεθοδολογικών εργαλείων που επιτρέπουν την ολοκληρωμένη τους προσέγγιση και τη μακροπρόθεσμη προστασία τους (Stylianidis, 2019, Τοκμακίδης, 2021). Σύμφωνα με τη Χάρτα της Βενετίας (1964), καμία επέμβαση δεν επιτρέπεται χωρίς την προηγούμενη τεκμηρίωση του μνημείου. Πρόκειται για μια διαδικασία ιδιαίτερα αυστηρή αφού απαιτεί τη λεπτομερή καταγραφή της γεωμετρίας και της σύστασης των υλικών του, δεδομένα που είναι θεμελιώδη για την επακόλουθη φυσική ή ψηφιακή ανακατασκευή του (Ioannides & Patias, 2023, σ. 2, Stylianidis, 2019, σσ. 7-9, Τοκμακίδης, 2021, σ. 70, Hassani, 2015, σσ. 207-208).

Όπως αναφέρουν οι Ioannidis et al. (2017), η συστηματική τεκμηρίωση συνιστά θεμελιώδη στρατηγική για τη διαφύλαξη της πολιτιστικής κληρονομιάς. Απέναντι στις σύνθετες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, την αστική ανάπτυξη και την ανθρωπογενή φθορά, η δημιουργία ολοκληρωμένων αρχείων, ψηφιακών ή φυσικών, καθίσταται μονόδρομος. Λειτουργεί ως εχέγγυο για την τεχνικά άρτια ανακατασκευή των μνημείων ή, σε ακραίες περιπτώσεις απώλειας, για τη διάσωση της ιστορικής τους ταυτότητας στη συλλογική μνήμη (Ioannides & Patias, 2023, σ. 2, Ioannidis et al., 2017, σ. 8, Stylianidis, 2019, σ. 7, Τοκμακίδης, 2021, σσ. 71,79, Hassani, 2015, σ. 20).

1.3 Μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων συνιστά έναν σύνθετο επιστημονικό κλάδο που μετουσιώνει την ιστορική υπόσταση τους σε μετρικά δεδομένα, δημιουργώντας μια ασπίδα προστασίας από φυσικές και ανθρωπογενείς φθορές. Η μεθοδολογία της στηρίζεται

σε τρεις βασικούς άξονες, την εμπειρική ή τοπομετρική τεκμηρίωση, την τοπογραφική τεκμηρίωση και τις σύγχρονες μεθόδους τηλεπισκόπησης. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του μνημείου, το βαθμό ακρίβειας που απαιτείται, την προσβασιμότητα του και το σκοπό της μελέτης του (Ioannides & Patias, 2023, σ. 3).

1.3.1 Παραδοσιακές μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

1.3.1. 1. Εμπειρική ή τοπομετρική τεχνική.

Η εμπειρική ή τοπομετρική τεχνική παραμένει η βάση της αρχαιολογικής αποτύπωσης, παρά την εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας. Αποτελεί μια διαδικασία άμεσης επαφής με το μνημείο, που προσφέρει μια βαθύτερη κατανόηση της δομής του. Πρόκειται για μια απλή και εμπειρική μέθοδο, χαμηλού κόστους, βασιζόμενη σε μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων, οι οποίες στηρίζονται σε ένα αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων. Οι βασικοί τύποι σχεδίων που αποδίδει είναι κατόψεις, όψεις και τομές και ενδείκνυται, συνήθως, για μνημεία με απλό γεωμετρικό σχήμα. Η εν λόγω μέθοδος υστερεί σημαντικά, καθώς απαιτεί διαρκή επιτόπια παρουσία και εμφανίζει μειωμένη ακρίβεια λόγω της αθροιστικής συσσώρευσης των σφαλμάτων. Συνεπώς, η τεκμηρίωση των μετρήσεων πρέπει πάντα να πλαισιώνεται από λεπτομερή σκαριφήματα (Παυλίδης κ.ά., 2014, σ. 67, Pavlidis et al., 2007, σ. 96, Πορτελάνος, 1987, σ. 61).

1.3.1. 2. Τοπογραφική αποτύπωση.

Σύμφωνα με τον Τοκμακίδη (2021), η επιστημονική τεκμηρίωση ενός μνημείου βασίζεται ουσιαστικά στη λεπτομερή γεωμετρική του καταγραφή. Η συνοχή και αξιοπιστία των δεδομένων εξασφαλίζεται μέσω ενός αυστηρού δικτύου ελέγχου. Παρά την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας GPS, ο γεωδαιτικός σταθμός κρίνεται απολύτως απαραίτητος σε περιοχές με περιορισμένη δορυφορική λήψη, καθώς καθορίζει τη θέση των σημείων μέσω ενός τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (x, y, z). Η τοπογραφική τεκμηρίωση βασίζεται κυρίως στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων και των εμπροσθοτομιών. Παράλληλα, η ύπαρξη ενός άρτιου τριγωνομετρικού δικτύου κρίνεται καθοριστική για τη διασφάλιση υψηλής ακρίβειας και την ορθή γεωχωρική ένταξη του

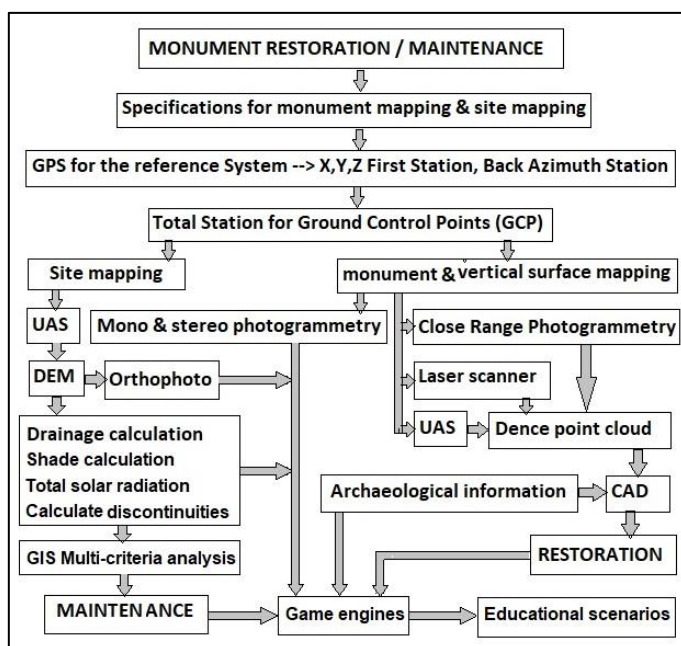
μνημείου στο εθνικό δίκτυο συντεταγμένων (Pavlidis et al., 2007, σ. 96, Τοκμακίδης, 2021, σ. 72, Πορτελάνος, 1987, σ. 62).

1.3.1. 3. Περιορισμοί παραδοσιακών μεθόδων.

Παρόλο που η τοπογραφική μέθοδος διασφαλίζει υψηλή ακρίβεια και μετρική συνέπεια, περιορίζεται, ωστόσο, στην απόδοση μετρικών πληροφοριών, παραλείποντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η υφή και η λεπτομέρεια του μνημείου. Σύμφωνα με τους Παυλίδης κ.ά. (2014), πρόκειται για μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί παρατεταμένη παραμονή στο πεδίο για τις απαραίτητες μετρήσεις, ενώ βασική προϋπόθεση αποτελεί η απευθείας οπτική επαφή του σταθμού με το στοχοθετημένο σημείο. Κάθε φυσική ή τεχνητή παρεμβολή καθιστά τη μέθοδο ανεφάρμοστη, ενώ η ακρίβειά της εξαρτάται από τη σωστή βαθμονόμηση των οργάνων και την εμπειρία του χειριστή (Hassani, 2015, σ. 209, Pavlidis et al., 2007, σ. 96, Παυλίδης κ.ά., 2014, σ. 67).

1.4 Νέες τεχνολογίες στην τεκμηρίωση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.

Στις μέρες μας, οι σύγχρονες τεχνολογίες παρέχουν πρωτοποριακά εργαλεία (Σχ. 1) που αλλάζουν ριζικά τον τρόπο τεκμηρίωσης και ανάδειξης της πολιτιστικής κληρονομιάς και η χρήση τους αναδιαμορφώνει όχι μόνο τη σχέση μας με το παρελθόν, αλλά διασφαλίζει τη διατήρησή τους για τις επόμενες γενιές (Μπούνια, Καταπότη, 2021, σ. 15).



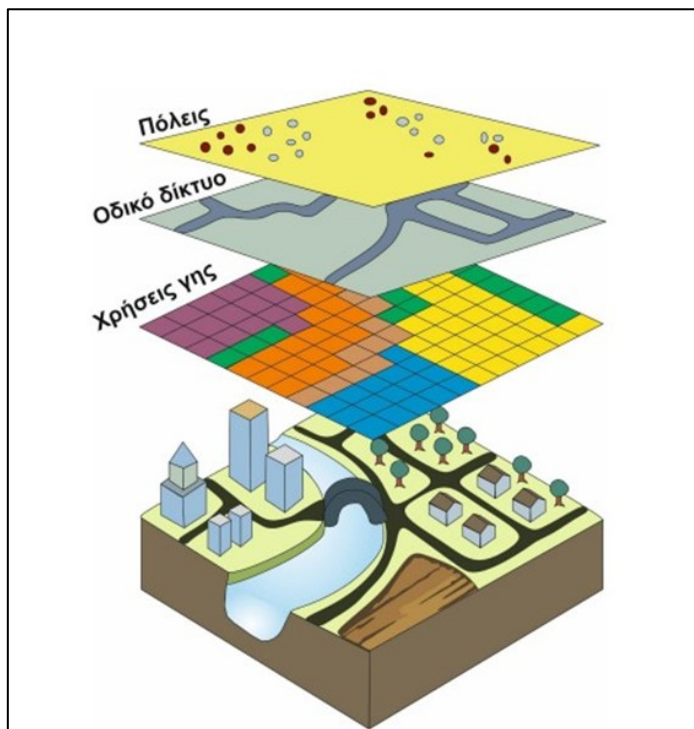
Σχ. 1. Διάγραμμα διαδικασιών τρισδιάστατης ψηφιοποίησης για την αποκατάσταση και τη συντήρηση.

Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 312.

1.4.1 GIS (Geographic Information Systems).

Βασικό εργαλείο στη σύγχρονη τεκμηρίωση μνημείων αποτελεί το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (Geographic Information Systems - GIS), που επιτρέπει την οργάνωση και επεξεργασία χωρικών δεδομένων σε ψηφιακό περιβάλλον (Εικ. 1). Κατά το Stylianidi (2019), η γεωμετρική πληροφορία που παρέχει το GIS καθιστά δυνατή την ολοκληρωμένη κατανόηση της χωρικής διάστασης ενός μνημείου. Η ενσωμάτωση δεδομένων από άλλες τεχνολογίες, όπως τα συστήματα GNSS και η φωτογραμμετρία, προσφέρουν ένα σύνολο δεδομένων που μπορούν να προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τη φυσική του κατάσταση. Η διασύνδεση του GIS με τρισδιάστατα μοντέλα μπορεί να

παράγει δυναμικά χωρικά περιβάλλοντα, τα οποία συνδυάζουν αρμονικά δεδομένα δύο και τριών διαστάσεων (Stylianidis, 2019, σσ. 9-10).



Εικ. 1. Σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) η διαχείριση των διάφορων στοιχείων του πραγματικού κόσμου γίνεται μέσω των επιπέδων πληροφορίας. Πηγή: Ευελπίδου, Τζουξανιώτη & Καρκάνη, 2023, σ. 26.

1.4.2 UAV (Drones)

Τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV ή Drones) είναι συστήματα που λειτουργούν χωρίς τη φυσική παρουσία χειριστή και, στις μέρες μας, αποτελούν σημαντικά εργαλεία τόσο για την τοπογραφία όσο και για την αρχαιολογία (Εικ. 2). Σύμφωνα με τους Eisenbeiss & Sauerbier (2011), προσφέρουν γρήγορες, οικονομικές και υψηλής ανάλυσης μεθόδους τεκμηρίωσης, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων από διάφορες οπτικές γωνίες και ύψη. Μέσω πτήσεων χαμηλού ύψους, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), μπορούν να συλλέγουν δεδομένα για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής ακρίβειας, όπως τα ψηφιακά μοντέλα επιφανείας (DSM), ορθοφωτοχάρτες, πανοραμικές απεικονίσεις, καθώς και λεπτομερή 3D μοντέλα με πλήθος πληροφοριών για την υφή της επιφάνειας.



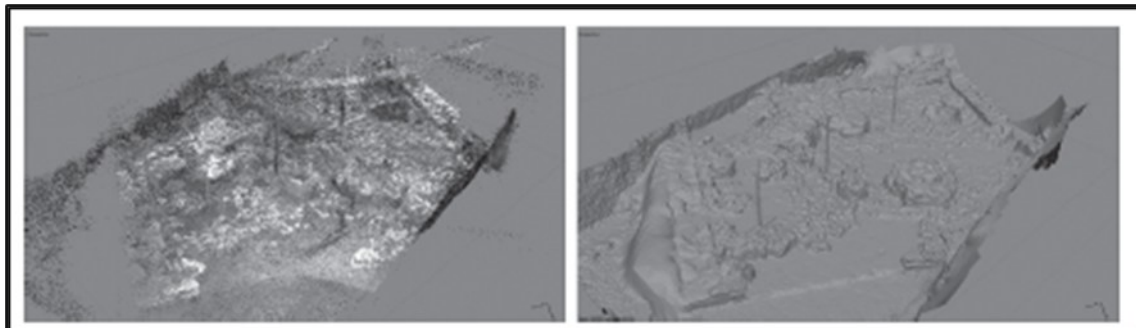
Εικ. 2. Εργασίες αεροφωτογράφισης μέσω drone του συνόλου του αρχαιολογικού χώρου Δελφών (23/07/2021). Πηγή: <https://3d4delphi.gr/%ce%b5%ce%b9%ce%ba%cf%8c%ce%bd%ce%b5%cf%82/> (5/6/2026).

Δεδομένου ότι η αρχαιολογική ανασκαφή αποτελεί μία καταστροφική στην ουσία διαδικασία που αλλοιώνει το αρχικό περιβάλλον, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) αποτελούν ένα πολύτιμο τεχνολογικό εργαλείο, το οποίο παρέχει μια αξιόπιστη εναλλακτική έναντι των συμβατικών μεθόδων, επιτρέποντας την άμεση τρισδιάστατη τεκμηρίωση των μεταβολών που συντελούνται σε ελάχιστες ώρες (Eisenbeiss & Sauerbier, 2011, σσ. 400-401, Hassani, 2015, σσ. 208-209).

1.4.3 Φωτογραμμετρία.

Σήμερα η φωτογραμμετρία αποτελεί την κορυφαία επιστημονική μέθοδο για τη γεωμετρική τεκμηρίωση και την ακριβή τρισδιάστατη αποτύπωση των μνημείων (Εικ. 3) με την αναγωγή δισδιάστατων εικόνων σε μετρικά δεδομένα. Πρόκειται για μια μη παρεμβατική τεχνική αποτύπωσης, που βασίζεται σε ανέπαφες μεθόδους, καθιστώντας την ιδανική για εύθραυστα ιστορικά σύνολα ή αρχιτεκτονήματα με εξαιρετικά δυσπρόσιτες λεπτομέρειες. Η Hassani (2015) αναφέρει πως αποτελείται από την πανοραμική, τη φωτογραμμετρία μικρής εμβέλειας και την τριγωνομέτρηση, τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ορθοφωτογραφιών και τρισδιάστατων (3D) μοντέλων. Το εύρος των εφαρμογών της είναι τεράστιο, καθώς εκτείνεται από την αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, τη ψηφιακή ανασύσταση κατεστραμμένων αντικειμένων, μέχρι και τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της κατάστασής τους στο

χρόνο (Hassani, 2015, σσ. 208-209, Ioannides & Patias, 2023, σ. 3, Moysiadis, 2014, σ. 2, Πατιάς, 2008, σ. 72, Παυλίδης κ.ά., 2014, σ. 68).



Εικ. 3. Φωτογραμμετρία. Διαφορετικά στάδια επεξεργασίας των δεδομένων. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 986.

1.4.4 Laser Scanning (LiDAR)

Η τρισδιάστατη σάρωση λέιζερ (Εικ. 4) είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία αποτύπωσης που καταγράφει ψηφιακά τις τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός μνημείου ή χώρου με εξαιρετικά ταχείς ρυθμούς, χωρίς φυσική επαφή, και η οποία παράγει με ακρίβεια το τρισδιάστατο ψηφιακό νέφος σημείων της επιφάνειάς τους. Όπως επισημαίνει η Hassani (2015), λειτουργεί ως ένας προηγμένος γεωδαιτικός σταθμός, καταγράφοντας πολύ γρήγορα συντεταγμένες με βάση αποστάσεις και γωνίες. Βασική προϋπόθεση στη χρήση της είναι το καθαρό οπτικό πεδίο και η προσεκτική διαχείριση των αντανakλάσεων και απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, υψηλό προϋπολογισμό και χρονοβόρα επεξεργασία (Hassani, 2015, σ. 210, Historic England, 2018, σσ. 4-6).

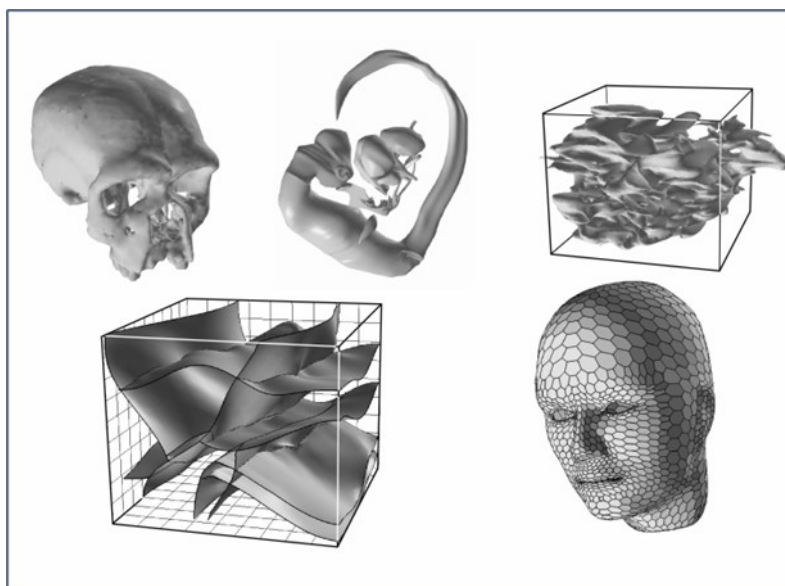
Το σύστημα LIDAR (Light Detection and Ranging) είναι μια καινοτόμος μέθοδος για την ταχεία και ακριβή δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Επιφάνειας (DSM) που χρησιμοποιεί τις δέσμες λέιζερ που εκπέμπονται από εναέριες πλατφόρμες για τον υπολογισμό της θέσης ενός μνημείου στο χώρο. Για την επιστήμη της αρχαιολογίας, η χρήση του εναέριου LIDAR είναι σημαντική, καθώς μπορεί να διαπερνά την πυκνή βλάστηση, καταγράφοντας διαδοχικές ανακλάσεις, και να αποκαλύπτει κρυμμένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Hassani, 2015, σ. 210, Hernandez, 2026, σ. 6).



Εικ. 4. Δίον. Επεξεργασία σάρωσης στο ιερό της Ίσιδας. Πηγή: Iliodromitis, Tsilimantou, Kopelou, Anastasiou, Koulidou, Spanodimos, Chrysostomou, Dimou, Pagounis, 2025, σ. 14.

1.4.5 3D Modeling & Visualization

Σύμφωνα με το Stylianidi (2019), η τρισδιάστατη Μοντελοποίηση και Οπτικοποίηση (3D Modeling & Visualization) αποτελεί το τελικό και καθοριστικό στάδιο της ψηφιακής τεκμηρίωσης ενός μνημείου, καθώς μετατρέπει τα πρωτογενή δεδομένα αποτύπωσης σε οργανωμένες και επεξεργάσιμες πληροφορίες (Εικ. 5), οι οποίες λειτουργούν ως ψηφιακά εργαλεία υποστήριξης της έρευνας και της διατήρησής του (Stylianidis, 2019, Ioannides & Patias, 2023). Παράλληλα, η εξέλιξη των τεχνικών οπτικοποίησης τα τελευταία χρόνια έχει διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών τους, με χαρακτηριστικά παραδείγματα την εικονική (VR) και την επαυξημένη πραγματικότητα (AR), τεχνολογίες που παρέχουν διαδραστικές εμπειρίες, επιτρέποντας τη ψηφιακή αναπαράσταση μνημείων που είναι δυσπρόσιτα ή έχουν υποστεί καταστροφές, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνουν την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων και το σχεδιασμό επεμβάσεων με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια (Τοκμακίδης, 2021, σ. 79).



Εικ. 5. Μερικές εφαρμογές γεωμοντελοποίησης. Πηγή: Royer, 2004, σ. 3.

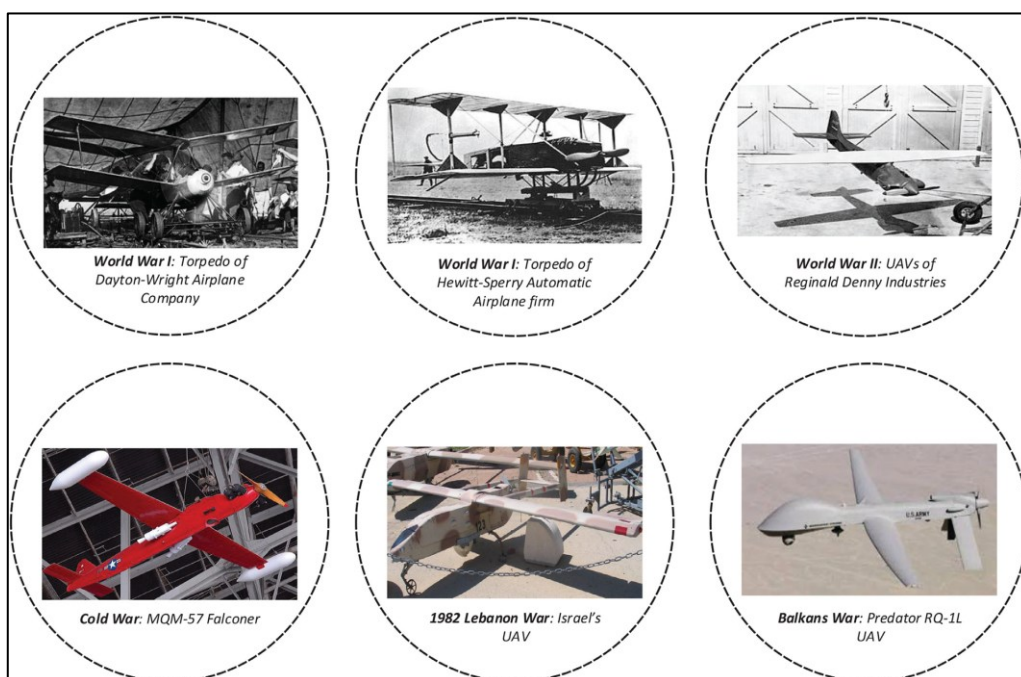
1.5 Πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεκμηρίωσης - Προκλήσεις και περιορισμοί.

Η ψηφιακή αποτύπωση των μνημείων αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία για τη διαφύλαξη της πολιτιστικής μας κληρονομιάς, εξασφαλίζοντας ένα ακριβές αρχείο πληροφοριών για τις επόμενες γενιές. Βασικός σκοπός της τεκμηρίωσης είναι η βαθύτερη ανάλυση της ιστορικής, επιστημονικής και κοινωνικής αξίας κάθε χώρου ή μνημείου. Κατά τους Ioannides & Patias (2023), η επιλογή των κατάλληλων μέσων για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση τους απαιτεί την προσεκτική μελέτη πολλών παραγόντων, με σκοπό την παραγωγή ενός αξιόπιστου ψηφιακού αντίγραφου ικανό να αξιοποιηθεί στην αποκατάσταση και ερμηνεία τους. Ωστόσο, παρά τα οφέλη της στην προσβασιμότητα και την ευκολία στη διαχείριση, η ψηφιακή τεκμηρίωση συνοδεύεται από σημαντικά εμπόδια. Οι βασικότερες δυσκολίες εντοπίζονται στο υψηλό κόστος προμήθειας του εξοπλισμού και του λογισμικού, στην απαίτηση για υψηλού επιπέδου τεχνογνωσία, στη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων και στους κινδύνους ασφαλείας. Επιπλέον, κρίσιμη προϋπόθεση αποτελεί η δημιουργία ενιαίων ψηφιακών προτύπων (Ioannides & Patias, 2023, σ. 2, Stylianidis, 2019, σσ. 9-10).

Κεφάλαιο Δεύτερο – Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV / Drones).

2.1 Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη.

Τα Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAS - Unmanned Aircraft System) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές καινοτομίες του 21ου αιώνα. Ο διεθνής αεροπορικός κλάδος προτιμά τον όρο αυτό έναντι του UAV (Drone), καθώς υποδηλώνει ένα πλήρως ολοκληρωμένο σύστημα, δηλαδή το ίδιο το ιπτάμενο μέσο, το σταθμό εδάφους και το δίκτυο ζεύξης δεδομένων που τα συνδέει. Σύμφωνα με τους Tal & Altschuld (2021), οι ρίζες της τεχνολογίας αυτής δεν είναι πρόσφατες, καθώς εντοπίζονται στα επανδρωμένα αερόστατα του 19ου αιώνα έως τις πρώτες πειραματικές πτήσεις χωρίς πιλότο στις αρχές του 20ού αιώνα (Γράβαλος & Μακρής, 2024, σ. 461, Fahlstrom και Gleason, 2012, σ. 17, Stöcker et al., 2017, σ. 461, Tal & Altschuld, 2021, σ. 11).



Εικ. 6. Η ιστορία των UAV κατά τη διάρκεια των διαφόρων πολέμων. Πηγή: Radoglou-Grammatikis, Sarigiannidis, Lagkas, Moscholios, 2020, σ. 5.

Αρχικά, η τεχνολογική πρόοδος των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones) ωθήθηκε από τις ανάγκες της πολεμικής αεροπορίας και των πολεμικών συγκρούσεων σε παγκόσμιο επίπεδο (Εικ. 6). Η μετατροπή τους από στρατιωτικές σε εμπορικές εφαρμογές επιταχύνθηκε θεαματικά μετά τη δεκαετία του 1980, καθώς η τεχνολογία τους συνδυάστηκε με την άνοδο της ψηφιακής φωτογραφίας (Valavanis & Vachtsevanos, 2015). Η σύμπραξη αυτή είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή ελαφρύτερων, οικονομικότερων και ανθεκτικότερων συσκευών, μετατρέποντας τα drones σε πολύτιμα εργαλεία για πολλαπλούς επιστημονικούς κλάδους (Fahlstrom & Gleason, 2012, σ. 18, Tal & Altschuld, 2021, σ. 11).



Εικ. 7. Επισκόπηση διαφόρων συστημάτων UAV. Πηγή: Eisenbeiss, 2009, σ. 33.

Οι Fahlstrom & Gleason (2012) επισημαίνουν ότι σήμερα τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV) συνιστούν έναν από τους ταχύτερα εξελισσόμενους τομείς στην αεροναυπηγική και τον αυτοματισμό. Πρόκειται για αυτόνομα εναέρια συστήματα (Εικ. 7) που βασίζονται σε εξελιγμένους αισθητήρες, στην τεχνητή νοημοσύνη και σε επίγειους σταθμούς ελέγχου για την πλοήγησή τους. Το βασικό τους πλεονέκτημά είναι η εκτέλεση αποστολών με χαμηλό κόστος και μηδενικό κίνδυνο. Η ραγδαία ανάπτυξη τους έχει φέρει ριζικές αλλαγές στον κλάδο της γεωπληροφορικής, καθώς αποτελούν βασικά εργαλεία για

Διπλωματική Εργασία

τη συλλογή γεωχωρικών δεδομένων, τη φωτογραμμετρία και την 3D μοντελοποίηση (Colomina & Molina, 2014, σσ. 81-82, Γράβαλος & Μακρής, 2024, σ. 461, Fahlstrom & Gleason, 2012, σ. 18, Hassanalain & Abdelkefi, 2017, σσ. 100-102).

2.2 Κατηγορίες και τύποι UAV / Drones.

Η ταξινόμηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) σε επιμέρους κατηγορίες (Πίν. 1), βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, αποτελεί το βασικό μεθοδολογικό εργαλείο για την αξιολόγηση των τεχνικών τους προδιαγραφών και των επιχειρησιακών τους περιορισμών. Κατά τον Eisenbeiss (2009), ο διαχωρισμός τους γίνεται με βάση το μέγεθος, (Micro, Mini, Small, Medium, Large), το βάρος (Micro, Light, Medium, Heavy), την εμβέλεια (κοντινής, μεσαίας, μεγάλης) και το σκοπό της αποστολής τους (πολιτική, εμπορική, στρατιωτική). Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς ορίζει το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο λειτουργίας τους, αλλά και τις τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής τους. Ακόμη, η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη δημιουργεί συνεχώς νέους τύπους UAV, μετατρέποντας την κατηγοριοποίηση σε μια διαρκώς ανανεούμενη ερευνητική διαδικασία (Γράβαλος & Μακρής, 2024, σ. 462, Eisenbeiss, 2009, σ. 34, Fahlstrom & Gleason, 2012, σσ. 18-24, Hassanalain & Abdelkefi, 2017, σσ. 100-105, Nex & Remondino, 2014, σσ. 1-4).

UAV	Μάζα (kg)	Μέγεθος (m)	Υψόμετρο (m)	Εμβέλεια (km)	Αυτονομία (h)
Micro	<0,25	≤0,1	<30,48	0,1-0,5	≤1
Mini	0,25-0,91	0,1-0,3	<152,4	0,5-1	≤1
Πολύ μικρό	0,91-2,27	0,3-0,5	<304,8	1-5	1-3
Μικρό	2,27-24,95	0,5-2	304,8-1524	10-100	0,5-2
Μεσαίο	24,95-453,59	5-10	3048-4572	500-2.000	3-10
Μεγάλο	4.535,9-13.607,7	20-50	6.096-12.192	1.000-5.000	10-20
Tactical	453,59-9.071,85	10-30	3.048-9.144	500-2.000	5-12
MALE	453,59-4.535,9	15-40	4.572-9.144	20.000-40.000	20-40
HALE	>2.267,96	20-50	15.240-21.336	20.000-40.000	30-50
Τετρακόπτερο	2,27-45,36	0,1-1	<152,4	0,1-2	0,33-1
Ελικόπτερο	0,00045-90,72	0,013 -2	<152,4	0,2-5	0,16-2

Πίν. 1. Ταξινόμηση των μη επανδρωμένων οχημάτων Πηγή: Γράβαλος & Μακρής, 2024, σ. 462

Όπως αναφέρεται από τους Chamola et al. (2021), τυπολογικά, τα UAV διαφοροποιούνται κυρίως με βάση τον τρόπο παραγωγής άντωσης, δηλαδή της δύναμης Διπλωματική Εργασία

που τα διατηρεί στον αέρα, καθώς και τον αεροδυναμικό τους σχεδιασμό (Hassanalian & Abdelkefi, 2017, Radoglou-Grammatikis, et al., 2020). Διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τα UAV σταθερής πτέρυγας, που λειτουργούν παρόμοια με τα συμβατικά αεροσκάφη και χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή απόδοση και μεγάλη αυτονομία πτήσης, τα περιστροφικών πτερύγων (πολυκόπτερα), που προσφέρουν υψηλή ευελιξία και δυνατότητα αιώρησης, χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ιδανικά για αποτυπώσεις μικρής κλίμακας και τα υβριδικά συστήματα, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών, επιτρέποντας κάθετη απογείωση και προσγείωση, χωρίς την ανάγκη διαδρόμου, παράλληλα με αποδοτική πτήση μεγάλης διάρκειας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου UAV εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε αποστολής, όπως η διάρκεια πτήσης, η απαιτούμενη ακρίβεια των δεδομένων και το περιβάλλον λειτουργίας, ενώ η αξιοποίησή τους σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές επιτρέπει τη δημιουργία ορθοφωτοχαρτών και ιδιαίτερα λεπτομερών τρισδιάστατων (3D) μοντέλων (Colomina & Molina, 2014, σ. 84, Murtiyoso et al., 2014, σ. 309).

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης.

Τα τελευταία χρόνια, η αξιοποίηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) έχει γνωρίσει αλματώδη άνοδο. Η ραγδαία ανάπτυξή τους οφείλεται στις πολλαπλές εφαρμογές τους, με κυριότερη την ικανότητα συλλογής δεδομένων σε δυσπρόσιτες και επικίνδυνες ζώνες, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρουσία στο πεδίο (Chamola et al., 2021). Όπως αναφέρεται και από τους Hassanalian & Abdelkefi (2017), συμβάλλουν ταυτόχρονα στον ουσιαστικό περιορισμό του κόστους λειτουργίας σε σύγκριση με τα επανδρωμένα μέσα, ενώ, παράλληλα, εγγυώνται υψηλή ακρίβεια και λεπτομερή χωρική ανάλυση δεδομένων, αξιοποιώντας εξελιγμένους αισθητήρες και συστήματα απεικόνισης (Πίν. 2). Επιπρόσθετα, επιτρέπουν την ταχεία συλλογή δεδομένων πεδίου, γεγονός που ενισχύει την αποδοτικότητα και την επιχειρησιακή ευελιξία τους. Επίσης, η ευκολία ανάπτυξης και η προσαρμοστικότητα τους σε διαφορετικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα (Colomina & Molina, 2014, σσ. 80, 85, Eisenbeiss, 2009, σ. 35, Hassanalian & Abdelkefi, 2017, σ. 115).

Type of aircraft	Range	Endurance	Weather and wind dependency	Maneuverability
Balloon	0	++	0	0
Airship	++	++	0	+
Gliders/Kites	+	0	0	0
Fixed wing gliders	++	+	+	+
Propeller & Jet engines	++	++	+	+
Rotor-kite	++	+	0	+
Single rotor (helicopter)	+	+	+	++
Coaxial	+	++	+	++
Quadrotors	0	0	0	++
Multi-copters	+	+	+	++

Πίν. 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων τύπων UAV. Πηγή: Eisenbeiss, 2009, σ. 35.

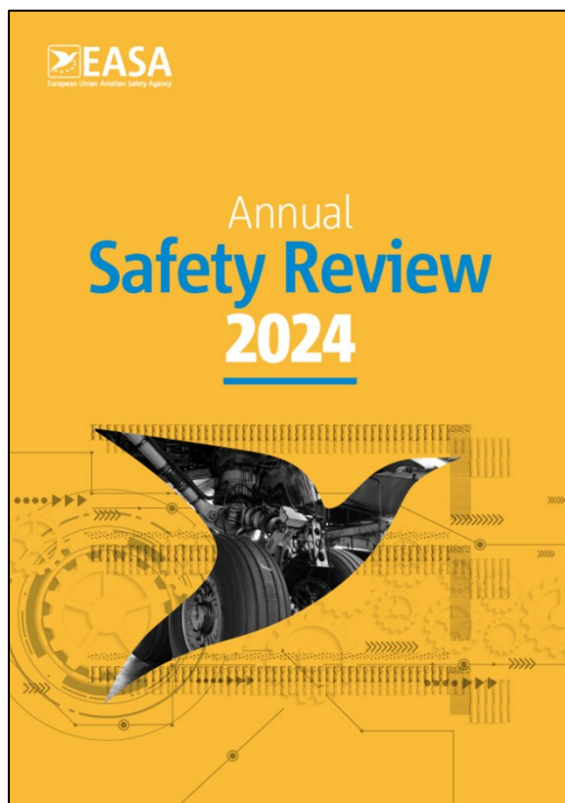
Ωστόσο, παρά τα σημαντικά οφέλη τους, τα UAV παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η διάρκεια πτήσης τους παραμένει περιορισμένη λόγω των ενεργειακών περιορισμών των μπαταριών, γεγονός που επηρεάζει την επιχειρησιακή τους απόδοση και αυτονομία (Hassanalian & Abdelkefi, 2017). Ακόμη, οι καιρικές συνθήκες, όπως οι ισχυροί άνεμοι και η βροχή, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους. Τέλος, όπως τονίζουν οι Stöcker et al. (2017), ζητήματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας, αποτελούν σημαντικό πεδίο προβληματισμού, καθώς η χρήση UAV ενδέχεται να οδηγήσει σε παραβίαση προσωπικών δεδομένων ή σε κατάχρηση της τεχνολογίας. Οι περιορισμοί αυτοί, επηρεάζουν αισθητά την επιχειρησιακή αξιοποίηση των UAV και αποτελούν αντικείμενο συνεχούς ερευνητικής δραστηριότητας.

2.4 Νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα και την ΕΕ.

Η ραγδαία εξέλιξη και η ευρεία εμπορική διάδοση των (UAV/UAS) κατέστησαν αναγκαία τη διαμόρφωση αυστηρού κανονιστικού πλαισίου για τη ρύθμιση της λειτουργίας τους, ιδιαίτερα σε ζητήματα εναέριας ασφάλειας, επιχειρησιακής αξιοπιστίας και προστασίας προσωπικών δεδομένων (Colomina & Molina, 2014). Η χρήση UAV σε εφαρμογές αποτύπωσης και τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς απαιτεί την πλήρη συμμόρφωση με τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς πτήσεων, την ορθή διαχείριση των

παραγόμενων γεωχωρικών δεδομένων και την εκπόνηση αξιολόγησης κινδύνου πριν από κάθε επιχειρησιακή δραστηριότητα (Murtiyoso et al., 2014, σ. 310).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ασφάλειας της Αεροπορίας (EASA) έχει θεσπίσει το βασικό ρυθμιστικό πλαίσιο (Εικ. 8) μέσω των Κανονισμών 2019/947 και 2019/945, οι οποίοι εισάγουν μια προσέγγιση βασισμένη στην αξιολόγηση κινδύνου (EASA, 2020). Σύμφωνα με το πλαίσιο αυτό, οι πτήσεις UAV διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, την ανοικτή, την ειδική και την πιστοποιημένη. Η ανοικτή κατηγορία αφορά δραστηριότητες χαμηλού κινδύνου, χωρίς απαίτηση προηγούμενης άδειας, υπό την προϋπόθεση συμμόρφωσης με περιορισμούς, όπως το μέγιστο ύψος πτήσης των 120 μέτρων και τη διατήρηση οπτικής επαφής με το drone. Η ειδική κατηγορία περιλαμβάνει επιχειρήσεις μέσου κινδύνου που απαιτούν αξιολόγηση κινδύνου και επιχειρησιακή άδεια, ενώ η πιστοποιημένη, αφορά επιχειρήσεις υψηλού κινδύνου, όπως η μεταφορά επιβατών ή επικίνδυνων φορτίων (European Commission, 2019a, Άρθρα 4-6).



Εικ. 8. Ετήσια Επισκόπηση της Ασφάλειας του EASA: διερεύνηση του παρελθόντος για τη διατήρηση υψηλού επιπέδου ασφάλειας στην αεροπορία. Πηγή: <https://www.easa.europa.eu/el/light/topics/easas-annual-safety-review-looking-past-maintain-high-level-safety-aviation> (5/6/2026).

Στην Ελλάδα, το κανονιστικό πλαίσιο για τα UAV εναρμονίζεται με το ευρωπαϊκό δίκαιο και εφαρμόζεται σύμφωνα με τις διατάξεις της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) και της Αρχής Πολιτικής Αεροπορίας (ΑΠΑ). Η πρώτη ολοκληρωμένη ρύθμιση θεσπίστηκε με το ΦΕΚ 3152/Β/2016, το οποίο καθόρισε τις βασικές προϋποθέσεις καταγραφής UAV και αδειοδότησης χειριστών (ΥΠΑ, 2016). Ακολούθως, ο Νόμος 4757/2020 ενίσχυσε την εποπτεία και προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού πλαισίου. Σημαντικές διατάξεις αφορούν την υποχρεωτική εγγραφή σε μητρώα των χειριστών και των UAV, την πιστοποίηση εκπαίδευσης σε διαβαθμιζόμενες κατηγορίες (Α1, Α3 και Α2), καθώς και την ασφάλιση αστικής ευθύνης για επαγγελματικές δραστηριότητες (ΑΠΑ, 2021).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται, επίσης, στον καθορισμό γεωγραφικών ζωνών περιορισμού πτήσεων, όπως οι αρχαιολογικοί χώροι, τα αεροδρόμια, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις και οι προστατευόμενες περιοχές Natura 2000 (ΥΠΑ, 2016, Άρθρο 18). Παράλληλα, σύμφωνα με τους Stöcker et al. (2017), η συμμόρφωση με τον κανονισμό προστασίας προσωπικών δεδομένων (GDPR) αποτελεί βασική προϋπόθεση, καθώς η χρήση UAV για συλλογή εικόνων και δεδομένων ενδέχεται να επηρεάσει την ιδιωτικότητα των πολιτών. Για το λόγο αυτό, η Αρχή Προστασίας Δεδομένων Προσωπικού Χαρακτήρα (ΑΠΔΠΧ) έχει εκδώσει σχετικές κατευθυντήριες οδηγίες, τονίζοντας ότι η λήψη εικόνων προσώπων ή ιδιωτικών χώρων χωρίς συγκατάθεση μπορεί να επιφέρει αυστηρές διοικητικές και ποινικές κυρώσεις σχετικά με τη νόμιμη επεξεργασία δεδομένων μέσω UAV (Stöcker et al., 2017, σ. 468, Tal & Altschuld, 2021, σ. 17).

2.5 Σύγχρονες Εφαρμογές των UAV/Drones.



Εικ. 9. Η υπάρχουσα φωτογραφία από drone (μικρή στα δεξιά) επικαλύπτεται με ένα τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργώντας αυτήν την απλή αλλά αποτελεσματική φωτογραφική αντιστοίχιση του νέου δρόμου. Πηγή: Tal & Altschuld, 2021, σ. 29.

Τα UAV, ευρύτερα γνωστά και ως drones, αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές καινοτομίες των τελευταίων δεκαετιών. Η ραγδαία ανάπτυξή τους στους τομείς της αεροναυπηγικής, των τηλεπικοινωνιών, της τεχνητής νοημοσύνης και των αισθητήρων συνέβαλε ουσιαστικά στη διεύρυνση των εφαρμογών τους, καλύπτοντας πλέον ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών, εμπορικών και αμυντικών δραστηριοτήτων. Σήμερα, τα UAV/drones χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε τομέα της οικονομίας και της επιστήμης, λειτουργώντας τόσο ως κινητές πλατφόρμες συλλογής δεδομένων όσο και ως εργαλεία υποστήριξης καθημερινών λειτουργιών (Tal & Altschuld, 2021, σ. 13).

Όπως αναφέρουν οι Tal & Altschuld (2021), οι εφαρμογές τους εκτείνονται στον τομέα της αρχιτεκτονικής και των κατασκευών (Εικ. 9), όπου η χρήση τους προσφέρει μια νέα οπτική προσέγγιση μέσω εναέριων εικόνων υψηλής ανάλυσης, διευκολύνοντας την παρακολούθηση εργοταξίων και την τρισδιάστατη μοντελοποίηση κατασκευών. Επιπλέον, στον τομέα της έρευνας και της περιβαλλοντικής προστασίας (Εικ. 10) συμβάλλουν καθοριστικά στην παρακολούθηση οικοσυστημάτων, στην άμεση συλλογή πληροφοριών, στην ανίχνευση φυσικών καταστροφών και στη μελέτη της κλιματικής αλλαγής (Hassanalain & Abdelkefi, 2017, Nex & Remondino, 2014). Τέλος, στον τομέα της αρχαιολογίας, η αξιοποίηση αισθητήρων LiDAR επιτρέπει την αποκάλυψη αρχαίων

πόλεων που βρίσκονται κάτω από πυκνή βλάστηση, συμβάλλοντας σημαντικά στην αρχαιολογική έρευνα και τη χαρτογράφηση (Tal & Altschuld, 2021, σσ. 12-15).



Εικ. 10. Η ποιότητα των αισθητήρων των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών σε συνδυασμό με την προσβασιμότητα των drones μας επιτρέπει να βλέπουμε το περιβάλλον μας με νέους τρόπους. Πηγή: Tal & Altschuld, 2021, σ. 12.

Κεφάλαιο Τρίτο – Φωτογραμμετρία.

3.1 Εισαγωγή και Εννοιολογικό Πλαίσιο.

Η φωτογραμμετρία αποτελεί έναν εξειδικευμένο κλάδο της επιστήμης και της τεχνολογίας, ο οποίος αξιοποιεί τις αρχές της γεωμετρίας και της τριγωνομετρίας για την εξαγωγή αξιόπιστων χωρικών και μετρητικών πληροφοριών από εικόνες. Μέσω της ανάλυσης ψηφιακών εικόνων, επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό του μεγέθους, της θέσης και της μορφής αντικειμένων σε έναν τρισδιάστατο χώρο (Kraus, 2007, Luhmann et al. 2020). Ετυμολογικά, ο όρος προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «φως», «γραμμή» και «μέτρηση» και αποδίδει με σαφήνεια τη σύνδεση της επιστήμης με την οπτική καταγραφή. Στη σύγχρονη πρακτική, η δισδιάστατη φωτογραφία μετατρέπεται σε ψηφιακή εικόνα και, μέσω ειδικών αλγοριθμικών διαδικασιών, παράγονται τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ακρίβειας για σκοπούς τεκμηρίωσης, αποτύπωσης και ψηφιακής αναπαράστασης (Douglass et al., 2015, σ. 138, Μουσιιάδης, 2015, σ. 1, Ράγια, 2024, σ. 9).

Όπως αναφέρει η Ράγια (2024), οι απαρχές της φωτογραμμετρίας ανάγονται στην αρχαιότητα, όταν το 350 π.Χ., ο Αριστοτέλης μελέτησε τη λειτουργία του σκοτεινού θαλάμου, θέτοντας τις βάσεις της προβολικής γεωμετρίας. Κατά την Αναγέννηση, ο Λεονάρντο ντα Βίντσι εμβάθυνε σημαντικά στις αρχές της προοπτικής απεικόνισης και στις μεθόδους γραφικής επίλυσης. Το 1851 σηματοδοτεί την πρώτη ουσιαστική εφαρμογή της φωτογραμμετρίας χάρη στον Aimé Laussedat. Αναγνωρισμένος ως ο «πατέρας» της φωτογραμμετρίας χρησιμοποίησε κατακόρυφες και πλάγιες φωτογραφικές λήψεις για τοπογραφικές αποτυπώσεις. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1867, ο Albrecht Meydenbauer καθιέρωσε τον όρο «φωτογραμμετρία» και ίδρυσε το πρώτο σχετικό ινστιτούτο τεκμηρίωσης μνημείων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Πατιάς, 1993, σσ. 5-7, Πατιάς, 2008, σ. 71, Χατζηφώτη, 2016, σ. 21).

Η ιστορική εξέλιξη της φωτογραμμετρίας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια:

α. τη φωτογραμμετρία επίπεδου τραπεζιού, η οποία κυριάρχησε έως περίπου το 1930 (Εικ. 11) και βασιζόταν κυρίως σε γραφικές μεθόδους εκτίμησης,

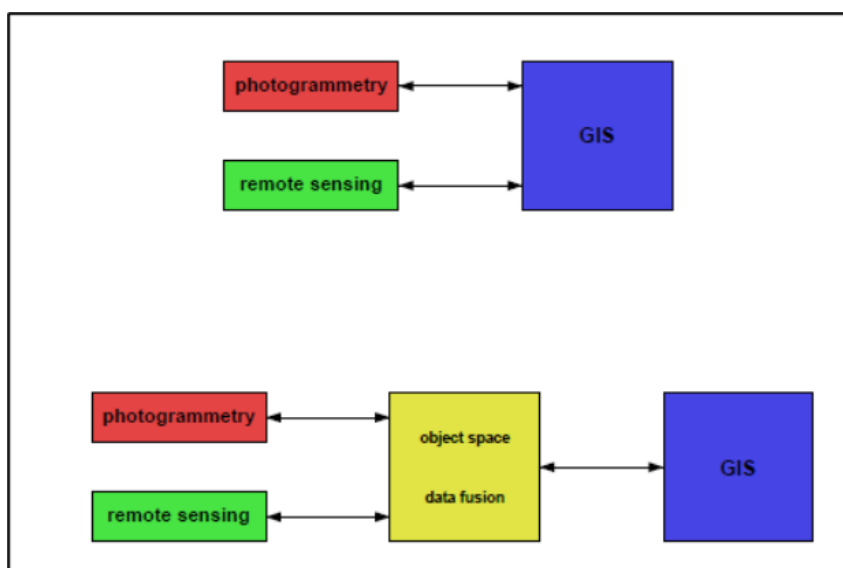
β. την αναλογική φωτογραμμετρία, η οποία στηριζόταν στη χρήση αναλογικών οργάνων για την ανακατασκευή των ακτίνων προβολής.

γ. την αναλυτική φωτογραμμετρία, όπου οι αναλογικές φωτογραφίες συνδυάστηκαν με ηλεκτρονικούς υπολογιστές και μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αντικατέστησαν σταδιακά τους μηχανικούς υπολογισμούς μέσω αναλυτικών σχέσεων, και



Εικ. 11. Στρατιωτικός αεροφωτογράφος κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου & Κάθετη αεροφωτογραφία χαρακωμάτων το 1916. Πηγή: Χατζηφώτη, 2016, σ. 4.

δ. τη σύγχρονη ψηφιακή φωτογραμμετρία η οποία σήμερα αποτελεί την πλέον εξελιγμένη μορφή της επιστήμης, καθώς όλη η διαδικασία, από τη λήψη και την επεξεργασία των εικόνων έως την εξαγωγή μετρήσεων και τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου σε ψηφιακό περιβάλλον (Kraus, 2007, σ. 2, Linder, 2016, σ. 6, Πατιάς, 1993, σσ. 7-8, Ράγια, 2024, σσ. 11-12).



Σχ. 2. Σχέση φωτογραμμετρίας, τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ (GIS). Πηγή: Schenk, 2005, σ. 3.

Η φωτογραμμετρία σήμερα θεωρείται μία από τις πιο ακριβείς μεθόδους τρισδιάστατης καταγραφής, καθώς προσφέρει αντικειμενική και λεπτομερή αποτύπωση αντικειμένων και χώρων, δημιουργώντας ολοκληρωμένα αρχεία δεδομένων. Όπως υποστηρίζει ο Πατιάς (1993), σε αντίθεση με την παραδοσιακή τοπογραφία, η οποία βασίζεται κυρίως σε άμεσες επιτόπιες μετρήσεις, η φωτογραμμετρία χρησιμοποιεί έμμεσες μεθόδους, όπου οι πληροφορίες προκύπτουν από την ανάλυση φωτογραφικών δεδομένων (Σχ. 2). Η σημασία της επιστήμης επιβεβαιώθηκε περαιτέρω με την ίδρυση, το 1969, της Διεθνούς Επιτροπής Αρχιτεκτονικής Φωτογραμμετρίας (CIPA), η οποία συνέβαλε στο συντονισμό της συνεργασίας μεταξύ τοπογράφων, αρχιτεκτόνων και αρχαιολόγων για την εφαρμογή φωτογραμμετρικών πρακτικών στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Πατιάς, 2008, σ. 71, Ράγια, 2024, σ. 9-10).

3.2 Κατηγορίες φωτογραμμετρίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η φωτογραμμετρία ορίζεται ως η επιστήμη που περιλαμβάνει μεθόδους μέτρησης και ερμηνείας εικόνων με σκοπό την εξαγωγή του σχήματος και της θέσης ενός αντικειμένου μέσα από μία ή περισσότερες φωτογραφίες του. Σε αντίθεση με μια απλή φωτογραφία, που κυρίως αναπαριστά ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως το χρώμα, η υφή ή η μορφή ενός αντικειμένου, η φωτογραμμετρία αξιοποιεί μαθηματικές και γεωμετρικές αρχές για τον ακριβή υπολογισμό των διαστάσεων, της θέσης και του σχήματος αντικειμένων και χώρων στον τρισδιάστατο χώρο. Η δυνατότητα αυτή έχει καταστήσει τη φωτογραμμετρία βασικό εργαλείο σε επιστημονικά πεδία όπως η τοπογραφία, η αρχιτεκτονική, η αρχαιολογία, η γεωλογία και η διαχείριση πολιτιστικής κληρονομιάς (Linder, 2016, σ. 1, Luhmann et al., 2020, σσ. 2-3).

Σύμφωνα με τους Luhmann et al. (2020), βασικοί παράγοντες ταξινόμησης της φωτογραμμετρίας (Πίν. 3) αποτελούν το σημείο λήψης της κάμερας και ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων, με τις κυριότερες κατηγορίες να είναι η επίγεια, η εναέρια και η δορυφορική. Η επίγεια φωτογραμμετρία πραγματοποιείται με λήψεις από το έδαφος και χρησιμοποιείται κυρίως για την αποτύπωση κτηρίων, αρχαιολογικών χώρων και αντικειμένων μικρής κλίμακας.

Satellite photogrammetry	processing of satellite images, $h > \text{ca. } 200\text{km}$
Aerial photogrammetry	processing of aerial photographs, $h > \text{ca. } 300\text{m}$
Terrestrial photogrammetry	measurements from a fixed terrestrial location
Close range photogrammetry	imaging distance $h < \text{ca. } 300\text{m}$
Macro photogrammetry	image scale > 1 (microscope imaging)

Πίν. 3. Λεπτομερής κατηγοριοποίηση της φωτογραμμετρίας ανά θέση κάμερας και μέγεθος θέματος. Πηγή:
Χατζηφώτη, 2016, σ. 10.

Η εναέρια φωτογραμμετρία βασίζεται σε εικόνες που λαμβάνονται από αεροσκάφη ή μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV ή drones), παρέχοντας τη δυνατότητα χαρτογράφησης εκτεταμένων περιοχών και παραγωγής ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Στον αντίποδα, η δορυφορική φωτογραμμετρία αξιοποιεί δορυφορικές εικόνες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως η παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών και η γεωγραφική ανάλυση περιοχών (Luhmann et al., 2020, σ. 6, Πατιάς, 1993, σ. 7, Ράγια, 2024, σ. 10-11).

Αντίστοιχα, με την υψομετρική θέση της κάμερας και την απόστασή της από το αντικείμενο φωτογράφισης, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένες κατηγορίες φωτογραμμετρίας. Η φωτογραμμετρία με UAV αποτελεί σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές, καθώς τα drones προσφέρουν χαμηλό κόστος, υψηλή ευελιξία και μεγάλη ακρίβεια στην αποτύπωση. Επιπλέον, η υποβρύχια φωτογραμμετρία χρησιμοποιείται για την τεκμηρίωση ναυαγίων και θαλάσσιων αρχαιολογικών χώρων, ενώ η macro φωτογραμμετρία εφαρμόζεται στην καταγραφή πολύ μικρών αντικειμένων με υψηλή λεπτομέρεια, όπως ευρήματα. Παράλληλα, η τηλεπισκόπηση συνδέεται στενά με τη φωτογραμμετρία, καθώς αξιοποιεί αισθητήρες και δορυφορικά δεδομένα για την εξαγωγή γεωχωρικών πληροφοριών μεγάλης κλίμακας (Kraus, 2007, σσ. 2-3, Luhmann et al., 2020, σσ. 6-7, Ράγια, 2024, σσ. 10-11, Χατζηφώτη, 2016, σ. 10).

Σύμφωνα με τη Χατζηφώτη (2016), ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας διαφοροποίησης της φωτογραμμετρίας αφορά την ποσότητα των φωτογραφιών που επιλέγονται για επεξεργασία (Πίν. 4). Η μονοεικονική φωτογραμμετρία βασίζεται σε μία μόνο εικόνα και χρησιμοποιείται κυρίως για απλές μετρητικές εφαρμογές, σε αντίθεση με τη στερεοφωτογραμμετρία που αξιοποιεί δύο επικαλυπτόμενες εικόνες, επιτρέποντας τη στερεοσκοπική αντίληψη και την εξαγωγή τρισδιάστατων πληροφοριών. Αντίθετα, η πολυεικονική φωτογραμμετρία χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό εικόνων από διαφορετικές

Διπλωματική Εργασία

γωνίες λήψης, με αποτέλεσμα την παραγωγή ιδιαίτερα ακριβών και λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων (Luhmann, et al., 2020, σσ. 6-7, Πατιάς, 1993, σσ. 7, Ράγια, 2024, σσ. 10-11, Χατζηφώτη, 2016, σ. 11).

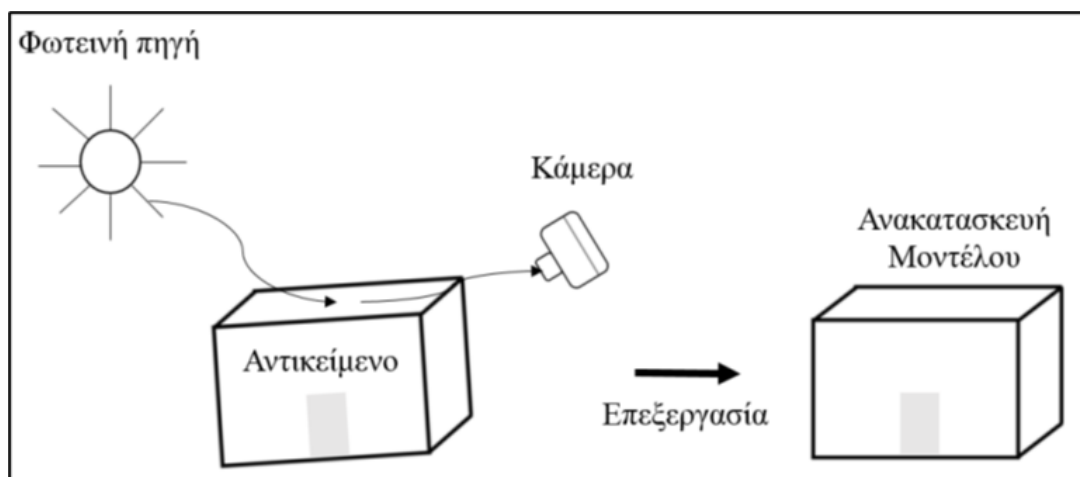
Single image photogrammetry	single image processing, mono-plotting, rectification, orthophotographs
Stereophotogrammetry	dual image processing, stereoscopic measurement
Multi-image photogrammetry	n images where $n > 2$, bundle triangulation

Πίν. 4. Πρακτική διάκριση της φωτογραμμετρίας βασισμένη στην ποσότητα των εικόνων που χρησιμοποιούνται για τη φωτογραμμετρική επεξεργασία. Πηγή: Χατζηφώτη, 2016, σ. 11.

Η τεχνολογική εξέλιξη συνέβαλε ουσιαστικά στη διαμόρφωση τριών βασικών φάσεων εξέλιξης της φωτογραμμετρίας, της αναλογικής, έως το 1980, της αναλυτικής και της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Σύμφωνα με τους Douglass et al. (2015), η ψηφιακή φωτογραμμετρία αποτελεί την κυρίαρχη μορφή εφαρμογής, καθώς επιτρέπει την αυτοματοποιημένη διαχείριση και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, αξιοποιώντας προηγμένους αλγορίθμους υπολογιστικής όρασης για τη χωρική αποτύπωση και την τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση αντικειμένων και επιφανειών εδάφους (Douglass et al., 2015, σ. 138, Kraus, 2007, σ. 2, Linder, 2016, σσ. 6-7, Ράγια, 2024, σσ. 11-12, Χατζηφώτη, 2016, σσ. 23-25).

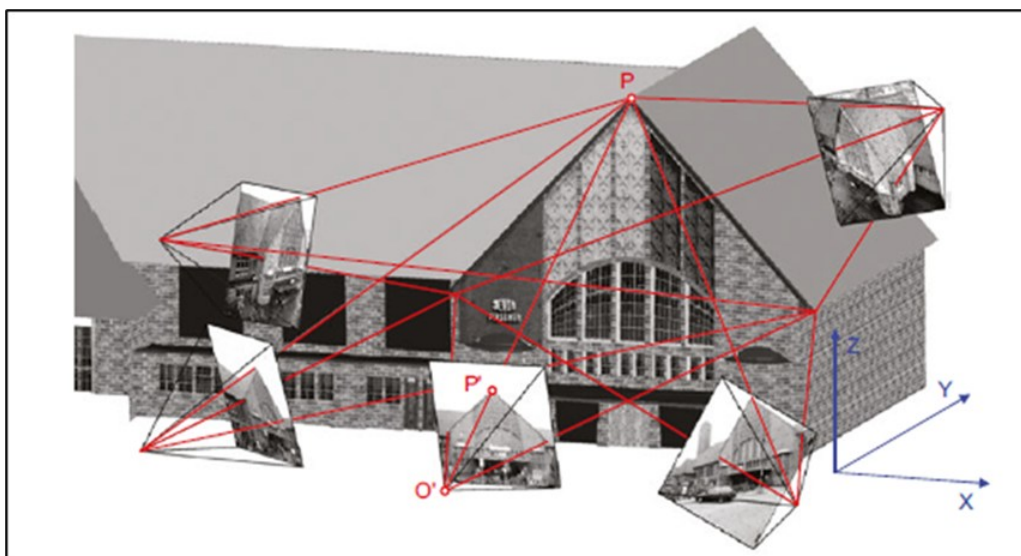
3.3 Βασικές αρχές φωτογραμμετρίας.

Η φωτογραμμετρία είναι μια τρισδιάστατη τεχνική μέτρησης που η θεωρητική και μαθηματική της βάση στηρίζεται εξολοκλήρου στη γεωμετρία της κεντρικής προβολής, η οποία αποτελεί το βασικό μαθηματικό μοντέλο της όλης διαδικασίας. Σύμφωνα με τις αρχές της κεντρικής προβολής, κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου προβάλλεται στο επίπεδο της εικόνας μέσω ευθειών ακτίνων που διέρχονται υποχρεωτικά από το κέντρο προβολής της κάμερας (Luhmann et al., 2020, σ. 7, Ράγια, 2024, σ. 13).



Σχ. 3. Η φωτογραμμετρική διαδικασία από το αντικείμενο έως το μοντέλο του αντικειμένου. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 13.

Βασική προϋπόθεση της φωτογραμμετρικής διαδικασίας είναι η κατανόηση της γεωμετρίας λήψης. Σύμφωνα με τη Ράγια (2024), κεντρική έννοια της αποτελεί η κεντρική προβολή (Σχ. 3), όπου όλες οι ακτίνες προβολής διέρχονται από ένα κοινό σημείο, το κέντρο προβολής της κάμερας. Κάθε σημείο εικόνας μαζί με το αντίστοιχο κέντρο προβολής ορίζει μια χωρική ακτίνα, μέσω της οποίας μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του σημείου στο χώρο (Εικ. 12). Ακόμη, η προοπτική απεικόνιση διαφοροποιεί τη φωτογραφία από έναν χάρτη. Ενώ ο χάρτης αποτελεί ορθή προβολή με σταθερή κλίμακα, η φωτογραφία είναι αποτέλεσμα κεντρικής προβολής και, συνεπώς, η κλίμακα μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου από την κάμερα και το ανάγλυφο της περιοχής. Η κοντινή απόσταση λήψης μεγεθύνει τις στρεβλώσεις της προοπτικής, όταν η λήψη πραγματοποιείται από μικρή απόσταση με ευρυγώνιο φακό, ενώ όταν η απόσταση μεγαλώνει και χρησιμοποιείται τηλεφακός, οι ακτίνες προβολής τείνουν να γίνουν σχεδόν παράλληλες, μειώνοντας τις παραμορφώσεις (Luhmann et al., 2020, σσ. 7-8, Linder, 2016, σσ. 8-9, Ράγια, 2024, σ. 13).



Εικ. 12. Αρχή της φωτογραμμετρικής μέτρησης. Πηγή: Luhmann, et al., 2020, σ. 8.

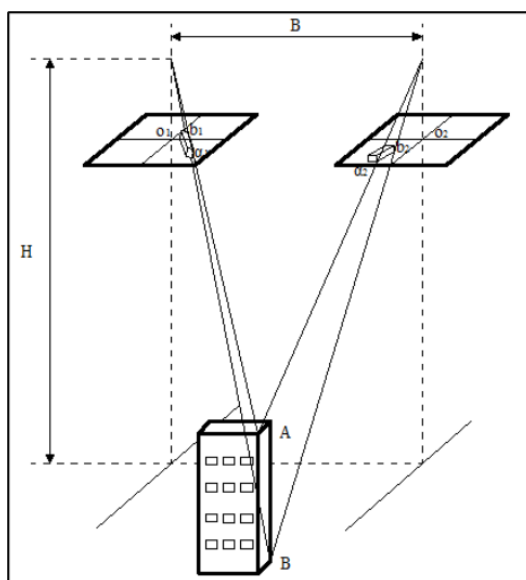
Η φωτογραφική κλίμακα αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο της φωτογραμμετρικής ανάλυσης. Ως κλίμακα ορίζεται η σχέση μεταξύ μιας απόστασης στην εικόνα και της αντίστοιχης πραγματικής απόστασης στο έδαφος. Όπως αναφέρει ο Μουσιιάδης (2015), στη φωτογραμμετρία η κλίμακα θεωρείται σημειακή και όχι σταθερή σε ολόκληρη την εικόνα, λόγω της κεντρικής προβολής και του αναγλύφου, ενώ η μέση φωτογραφική κλίμακα υπολογίζεται από τη σχέση μεταξύ της εστιακής απόστασης και του ύψους λήψης (Εικ. 13). Ακόμη, η κλίμακα επηρεάζει άμεσα τόσο την ανάλυση της εικόνας όσο και την ακρίβεια των φωτογραμμετρικών μετρήσεων, καθώς τα σφάλματα μέτρησης στην εικόνα μεταφέρονται στο χώρο του αντικειμένου πολλαπλασιασμένα με το συντελεστή κλίμακας (Luhmann et al., 2020, σ. 8, Μουσιιάδης, 2015, σ. 26).



Εικ. 13. Παράδειγμα μικρής 1:20.000 (αριστερά) και μεγάλης 1:1.000 (δεξιά) κλίμακας αεροφωτογραφίας.

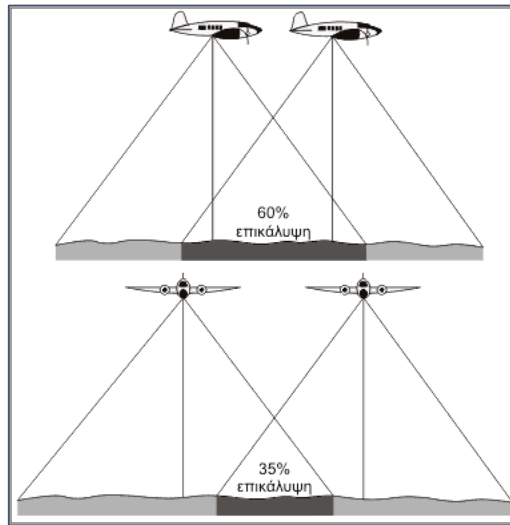
Πηγή: Μουσιιάδης, 2015, σ. 27.

Όπως αναφέρει ο Kraus (2007), μία από τις σημαντικότερες αρχές της φωτογραμμετρίας, που επιτρέπει την τρισδιάστατη αντίληψη και ανακατασκευή του χώρου, είναι η στερεοσκοπία. Η διαδικασία της βασίζεται στη χρήση δύο επικαλυπτόμενων εικόνων, που λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις λήψης (Σχ. 4).



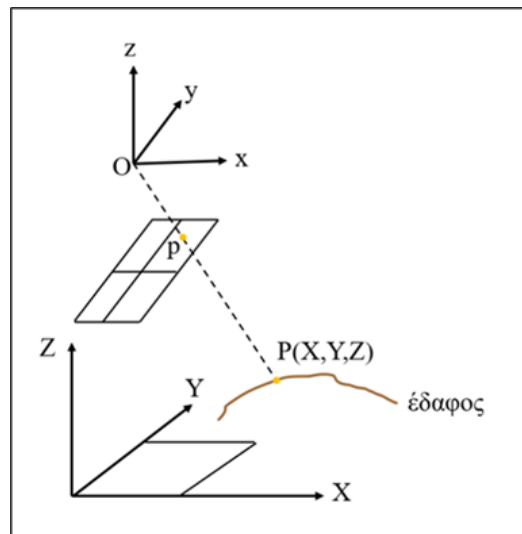
Σχ. 4. Σχέση μεταξύ της στερεοσκοπικής αντίληψης του βάθους και της γωνίας σύγκλισης. Πηγή: Μουσιάδης, 2015, σ. 30.

Μέσω της παράλλαξης, δηλαδή της μετατόπισης της θέσης της σημείου μεταξύ δύο εικόνων, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του βάθους και των τρισδιάστατων συντεταγμένων του σημείου. Για την αποτελεσματική φωτογραμμετρική αποτύπωση, οι διαδοχικές λήψεις πρέπει να εξασφαλίζουν το επιθυμητό ποσοστό επικάλυψης, καθώς απαιτείται, συνήθως, διαμήκης επικάλυψη κατά τη φορά της πτήσης περίπου 60%, ενώ η εγκάρσια επικάλυψη μεταξύ των παράλληλων λωρίδων ορίζεται στο 20%, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη στερεοσκοπική όραση (Σχ. 5). Η ακρίβεια του υπολογισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γωνία τομής των ακτίνων προβολής. Όσο μικρότερη είναι η γωνία αυτή, τόσο μεγαλύτερο γίνεται το σφάλμα υπολογισμού. Για το λόγο αυτό, στη φωτογραμμετρία προτιμώνται συχνά ευρυγώνιες κάμερες, καθώς αυξάνουν τη γεωμετρική ισχύ του στερεοσκοπικού μοντέλου (Kraus, 2007, σσ. 286-288, Linder, 2016, σ. 11, Ράγια, 2024, σ. 15).



Σχ. 5. Κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη στερεοζεύγους. Πηγή: Μουσιάδης, 2015, σ. 31.

Η μαθηματική θεμελίωση της φωτογραμμετρίας εκφράζεται μέσω των εξισώσεων φωτογραμμετρίας, οι οποίες περιγράφουν τη σχέση μεταξύ του χώρου εικόνας και του χώρου αντικειμένου (Σχ. 6).

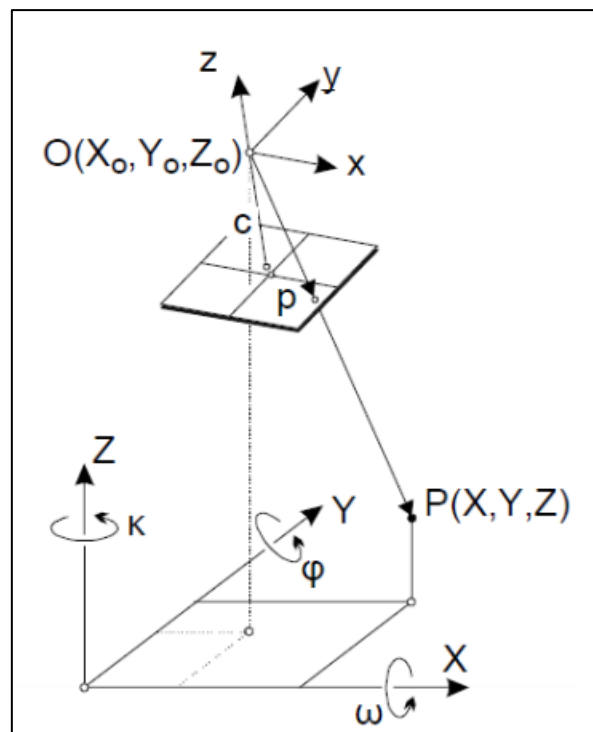


Σχ. 6. Για κάθε σημείο P ορίζεται ένα σημείο p στην εικόνα, ώστε τα σημεία P, p και O, που είναι το κέντρο προβολής, να είναι συνευθειακά (συγγραμικά). Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 17.

Σύμφωνα με τη Ράγια (2024), οι βασικότερες από αυτές είναι οι εξισώσεις συγγραμμικότητας, οι οποίες στηρίζονται στην αρχή ότι το σημείο του αντικειμένου, το αντίστοιχο σημείο εικόνας και το κέντρο προβολής βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Οι

εξισώσεις αυτές αποτελούν τη βάση όλων των φωτογραμμετρικών υπολογισμών και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τόσο των συντεταγμένων των σημείων, όσο και των παραμέτρων προσανατολισμού της κάμερας. Οι εξισώσεις αυτές επιτρέπουν τη μαθηματική σύνδεση μεταξύ του χώρου εικόνας και του χώρου αντικειμένου και αποτελούν τη βάση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας (Μουσιάδης, 2015, σ. 33, Ράγια, 2024, σσ. 12-13).

Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη φωτογραμμετρία διαδραματίζουν οι προσανατολισμοί της κάμερας, οι οποίοι διακρίνονται σε εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό. Ο εσωτερικός προσανατολισμός περιγράφει τη γεωμετρία της κάμερας και περιλαμβάνει την εστιακή απόσταση, το κύριο σημείο και τις παραμορφώσεις του φακού, ενώ ο εξωτερικός προσανατολισμός αφορά τη θέση και τη στάση της κάμερας στο χώρο και καθορίζεται από τρεις συντεταγμένες μεταφοράς και τρεις γωνίες περιστροφής. Η γνώση αυτών των έξι παραμέτρων, σε συνδυασμό με την εστιακή απόσταση, επιτρέπει τον πλήρη γεωμετρικό προσδιορισμό της εικόνας στο χώρο (Σχ. 7) (Kraus, 2007, σσ. 47-55, Linder, 2016, σσ. 9-11, Μουσιάδης, 2015, σσ. 32-33, Χατζηφώτη, 2016, σσ. 40-48).



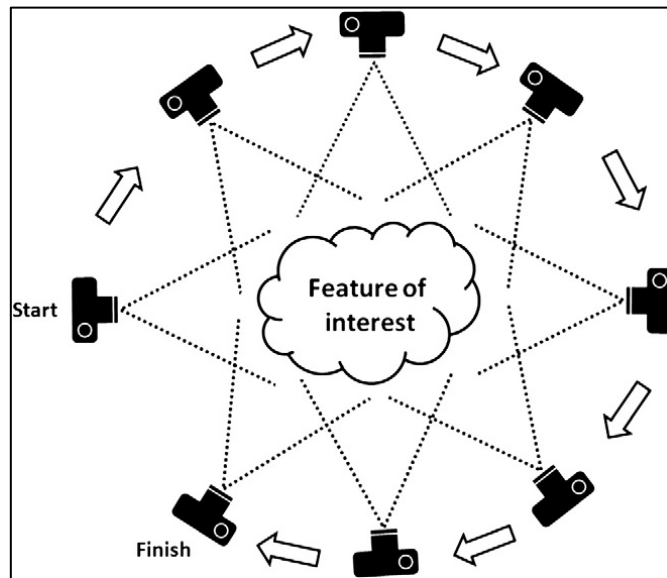
Σχ. 7. Το σημείο $P(X, Y, Z)$ στο έδαφος απεικονίζεται ως σημείο p στην εικόνα. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 63.

Τέλος, οι μετασχηματισμοί συντεταγμένων αποτελούν απαραίτητο στοιχείο της φωτογραμμετρικής διαδικασίας, καθώς επιτρέπουν τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων αναφοράς. Στη φωτογραμμετρία χρησιμοποιούνται το σύστημα συντεταγμένων εικόνας, το σύστημα pixel και το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του αντικειμένου ή του χώρου. Οι μετασχηματισμοί αυτοί βασίζονται σε πίνακες περιστροφής και διανύσματα μεταφοράς και επιτρέπουν τη γεωαναφορά των φωτογραμμετρικών δεδομένων σε συστήματα όπως το WGS84 και το ΕΓΣΑ87. Παράλληλα, μέσω της διαδικασίας της ρύθμισης δεσμίδων επιτυγχάνεται ο ταυτόχρονος υπολογισμός των παραμέτρων προσανατολισμού και των τρισδιάστατων σημείων με υψηλή ακρίβεια (Kraus, 2007, σσ. 55-58, Linder, 2016, σσ. 9-11, Luhmann et al., 2020, σ. 8, Ράγια, 2024, σ. 14).

3.4 Structure from Motion (SfM).

Η τεχνική Structure from Motion (SfM) αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση στο πεδίο της σύγχρονης ψηφιακής φωτογραμμετρίας και της υπολογιστικής όρασης, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από δισδιάστατες εικόνες. Η αφετηρία της εντοπίζεται στη δεκαετία του 1980, μια περίοδο που συνδέθηκε άμεσα με την πρόοδο των αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας και των λογισμικών με γραφικό περιβάλλον. Σύμφωνα με τους Douglass et al. (2015), αντιπροσωπεύει μια αναδυόμενη, χαμηλού κόστους φωτογραμμετρική μέθοδο για τοπογραφική ανακατασκευή υψηλής ανάλυσης, η οποία είναι ιδανικά κατάλληλη για έρευνα και εφαρμογές χαμηλού προϋπολογισμού, ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές. Ως τεχνική της φωτογραμμετρίας, η SfM έχει εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων, όπως οι γεωεπιστήμες, η αρχαιολογία και η τεκμηρίωση πολιτιστικής κληρονομιάς, λόγω της ευελιξίας και του χαμηλού κόστους εφαρμογής της (Carrivick et al., 2016, σ. 5, Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σσ. 40-41, Westoby et al., 2012, σσ. 300-301).

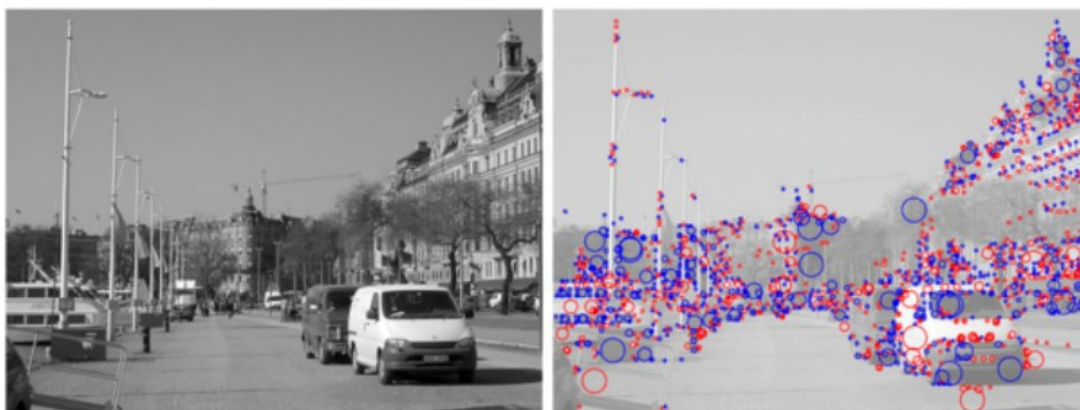
Σύμφωνα με τους Westoby et al. (2012), η βασική αρχή της SfM στηρίζεται στη χρήση πολλαπλών επικαλυπτόμενων εικόνων (Σχ. 8) που έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις και γωνίες λήψης. Μέσω της ανάλυσης των κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων, η μέθοδος μπορεί να ανακατασκευάσει την τρισδιάστατη δομή ενός αντικειμένου ή ενός χώρου.



Σχ. 8. Η τεχνική Structure from Motion (SfM). Αντί για ένα μόνο στερεοσκοπικό ζεύγος, η τεχνική SfM απαιτεί πολλαπλές, επικαλυπτόμενες φωτογραφίες ως είσοδο για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και τους αλγόριθμους τρισδιάστατης ανακατασκευής. Πηγή: Westoby et al., 2012, σ. 301.

Αν και λειτουργεί με βάση τις ίδιες θεμελιώδεις αρχές με τη στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, ότι δηλαδή η τρισδιάστατη δομή μπορεί να αναλυθεί από μια σειρά επικαλυπτόμενων και μετατοπισμένων εικόνων, ωστόσο, διαφοροποιείται θεμελιωδώς από αυτήν, επειδή η γεωμετρία της σκηνής, η θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας υπολογίζονται αυτόματα, χωρίς να απαιτείται εκ των προτέρων δίκτυο στόχων γνωστών τρισδιάστατων συντεταγμένων. Επιπλέον, η SfM εκτελεί τη βαθμονόμηση της κάμερας χρησιμοποιώντας τις ίδιες τις εικόνες που λήφθηκαν για το αντικείμενο, επωφελούμενη από προσεγγιστικές πληροφορίες τοποθεσίας, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση ερασιτεχνικών καμερών (Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σσ. 41,45, Westoby et al., 2012, σσ. 300-303).

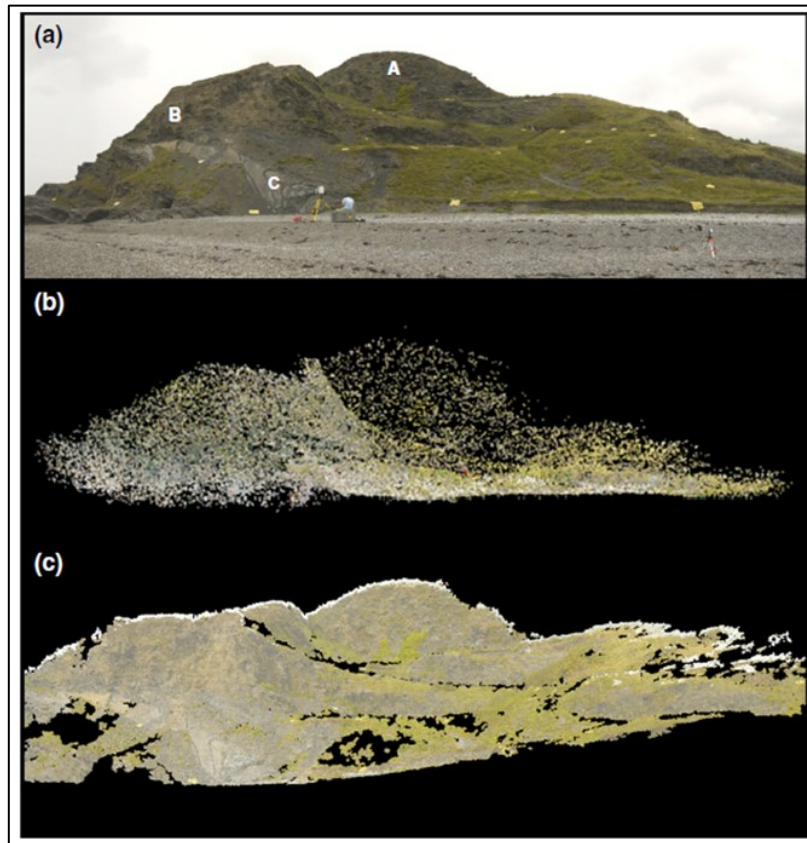
Όπως αναφέρουν οι Douglass, et al. (2015), η διαδικασία της SfM είναι αυτοματοποιημένη και βασίζεται στην ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ εικόνων (Εικ. 14). Η μέθοδος εντοπίζει και συσχετίζει περιορισμένο αριθμό κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ πολλαπλών εικόνων και στη συνέχεια υπολογίζει τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό των φωτογραφιών. Το αντικείμενο φωτογραφίζεται επανειλημμένα από διαφορετικές πλευρές, διαδικασία που είναι γνωστή ως φωτογραμμετρία πολλαπλών εικόνων.



Εικ. 14. Η εξαγωγή χαρακτηριστικών εικόνας με τον αλγόριθμο SIFT. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 43.

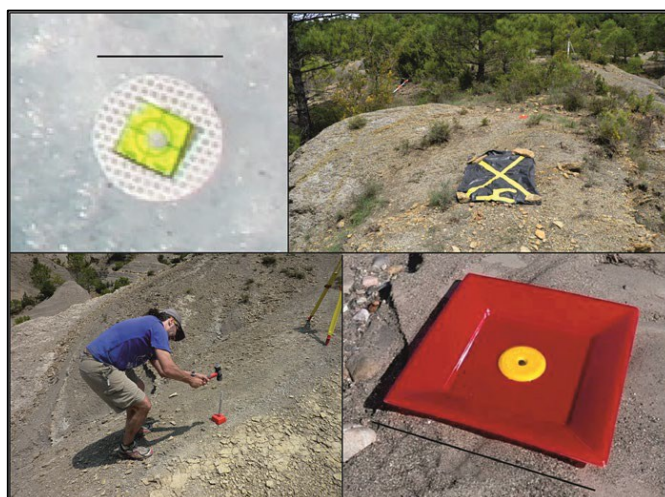
Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι ο αλγόριθμος SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), που ανιχνεύει και περιγράφει χαρακτηριστικά σημεία ανεξάρτητα από αλλαγές στην κλίμακα, την περιστροφή, τη φωτεινότητα ή τη θέση της κάμερας. Σύμφωνα με τη Ράγια (2024), ο SIFT παρουσιάζει σημαντική ανθεκτικότητα σε αλλαγές προσανατολισμού και κλίμακας, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Μέσω αυτής της διαδικασίας δημιουργείται ένα χρωματικά κωδικοποιημένο νέφος σημείων, το οποίο αναπαριστά την τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου (Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σσ. 43-45, Szeliski, 2010, σσ. 417-420, Westoby et al., 2012, σσ. 300-303).

Όπως αναφέρεται και στους Westoby et al. (2012), μετά την εξαγωγή χαρακτηριστικών ακολουθεί η διαδικασία αντιστοίχισης των σημείων μεταξύ των εικόνων. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς από κάθε εικόνα εξάγονται χιλιάδες χαρακτηριστικά σημεία, και για την αποτελεσματική αντιστοίχισή τους χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που επιτρέπουν την εύρεση των πλησιέστερων αντιστοιχιών μεταξύ τους. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία αντιστοίχισης, η SfM προχωρά στον ταυτόχρονο υπολογισμό της τρισδιάστατης δομής του αντικειμένου και της θέσης της κάμερας. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία προσαρμογής δέσμης, η οποία βελτιστοποιεί τις παραμέτρους της κάμερας και τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων. Σύμφωνα με τους Carrivick et al. (2016), το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι ένα αραιό νέφος σημείων (Εικ. 15), το οποίο αναπαριστά τη βασική γεωμετρία του αντικειμένου ή χώρου (Carrivick et al., 2016, σ. 6, Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σ. 44-45, Szeliski, 2010, σσ. 417-420, Westoby et al., 2012, σσ. 301-305).



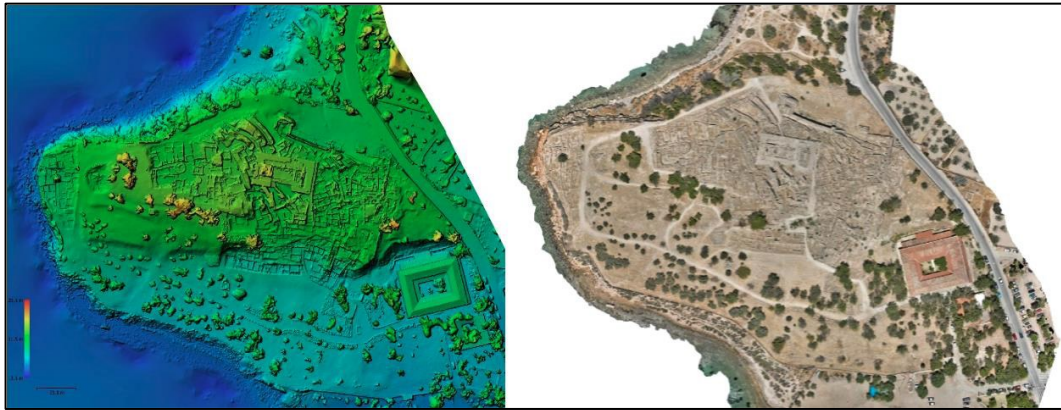
Εικ. 15. Προοπτικές όψεις του λόφου Constitution: (α) Πανόραμα της περιοχής έρευνας με καθαρά ορατά GCP), (β) αραιά σημειακά νέφη και (γ) πυκνά σημειακά νέφη. Πηγή: Westoby et al., 2012, σ. 305.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνικής SfM είναι ότι δεν απαιτεί αυστηρά γνωστές παραμέτρους βαθμονόμησης της κάμερας, καθώς η SfM εκτελεί τη βαθμονόμηση της κάμερας χρησιμοποιώντας τις ίδιες τις εικόνες που λαμβάνονται για την αποτύπωση του αντικειμένου. Επιπλέον, μπορεί να αξιοποιήσει προσεγγιστικές πληροφορίες θέσης από ενσωματωμένους αισθητήρες GPS, όπως αυτούς που διαθέτουν οι σύγχρονες ψηφιακές κάμερες και τα κινητά τηλέφωνα, επιτρέποντας ακόμη και τη χρήση ερασιτεχνικών καμερών για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων. Ακόμη, όπως επισημαίνουν και οι Carrivick et al. 2016, για τη γεωαναφορά των μοντέλων χρησιμοποιούνται φωτοσταθερά σημεία ελέγχου (Ground Control Points – GCPs) (Εικ. 16), των οποίων οι συντεταγμένες μετρώνται με γεωδαιτικές μεθόδους ή με συστήματα GNSS. Μέσω αυτών των σημείων καθίσταται δυνατή η ένταξη των μοντέλων σε κρατικά συστήματα αναφοράς και η εξαγωγή ακριβών μετρήσεων αποστάσεων, επιφανειών και όγκων (Carrivick et al., 2016, σ. 75, Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σσ. 41,43, Χατζηφώτη, 2016, σ. 96).



Εικ. 16. Παραδείγματα διαφορετικών τύπων στόχων ή φωτοσταθερών που χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου εδάφους. Πηγή: Carrivick et al., 2016, σ. 75.

Σύμφωνα με τη Ράγια (2024), η τεχνική SfM παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες φωτογραμμετρικές και τοπογραφικές μεθόδους, καθώς χαρακτηρίζεται από οικονομία σε απαιτήσεις υλικού και λογισμικού, καθώς και από υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας. Επιπλέον, η ροή εργασίας της SfM είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη χωρική κλίμακα εφαρμογής. Όπως αναφέρεται και στους Carrivick et al. (2016), τα παραγόμενα νέφη σημείων και οι επιφάνειες μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε ορθοφωτογραφίες και ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM). Σύμφωνα με τους τους Ioannidis, Verykokou, Soile, Potsiou (2025), λόγω αυτών των προτερημάτων, η SfM εφαρμόζεται ευρέως στη διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς, στην αρχαιολογία για την τεκμηρίωση χώρων και υλικών (Εικ. 17), καθώς και στη μηχανική. Παρά τη ραγδαία ανάπτυξή της, η τεχνική θεωρείται ακόμη σχετικά νέα στις γεωεπιστήμες, με τους ερευνητές να επισημαίνουν ότι απαιτούνται περισσότερες ποσοτικές αξιολογήσεις για την πλήρη κατανόηση της ποιότητας και της ακρίβειας των παραγόμενων δεδομένων εδάφους (Carrivick et al., 2016, σ. 6, Douglass et al., 2015, σ. 138, Ράγια, 2024, σ. 43, Westoby et al., 2012, σσ. 301,305).



Εικ. 17. DSM (αριστερά) και ορθομωσαϊκό (δεξιά) του αρχαιολογικού χώρου της Αίγινας Κολώνας.

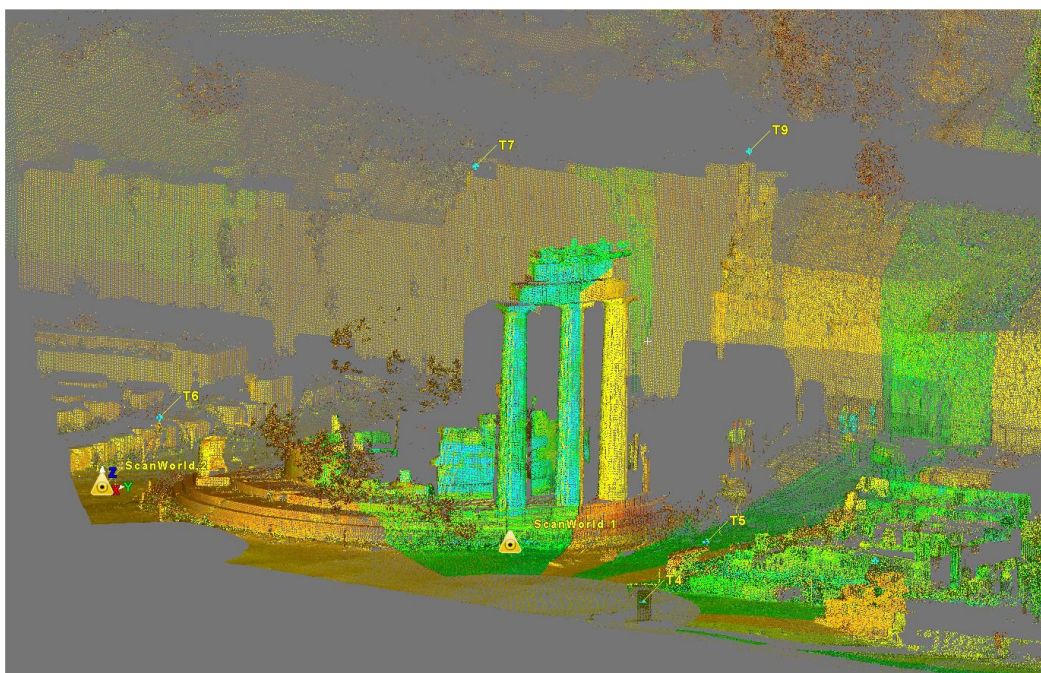
Πηγή: Ioannidis, Verykokou, Soile, Potsiou, 2025, σ. 9.

3.5 Η διαδικασία της πυκνής αντιστοίχισης εικόνων (Dense Matching) και η δημιουργία νέφους σημείων (Point Cloud).

Η διαδικασία της πυκνής αντιστοίχισης εικόνων (Dense Image Matching) και η συνεπακόλουθη δημιουργία νέφους σημείων (Point Cloud) αποτελούν τον πυρήνα της σύγχρονης ψηφιακής φωτογραμμετρίας και της υπολογιστικής όρασης, καθώς επιτρέπουν την αυτόματη παραγωγή πυκνών τρισδιάστατων νεφών σημείων μέσω της επεξεργασίας πολλαπλών επικαλυπτόμενων εικόνων. Σύμφωνα με τους Remondino et al. (2014), η διαδικασία βασίζεται στη δημιουργία αντιστοιχιών μεταξύ χαρακτηριστικών ή εικονοστοιχείων διαφορετικών εικόνων, με σκοπό τον υπολογισμό της παράλλαξης και τελικά των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων στο χώρο του αντικειμένου. Η εξέλιξη της μεθόδου συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της φωτογραμμετρίας και της υπολογιστικής όρασης, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές, όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση και η αρχαιολογική τεκμηρίωση (Bruno et al., 2022, σ. 1, Remondino et al., 2014, σσ. 146-147, Stentoumis et al., 2013, σελ. 1).

Κατά τον Szeliski (2011), η ιστορική εξέλιξη της αντιστοίχισης εικόνων ξεκίνησε ήδη από τη δεκαετία του 1950, όταν αναπτύχθηκαν οι πρώτοι αλγόριθμοι για φωτογραμμετρικές εφαρμογές και επίλυση προβλημάτων τοπογραφικής χαρτογράφησης. Στη συνέχεια, τη δεκαετία του 1970, η εισαγωγή της επιπολικής γεωμετρίας και των τεχνικών διασταυρούμενης συσχέτισης βελτίωσε σημαντικά την ακρίβεια των αντιστοιχίσεων, ενώ με την ανάπτυξη της ψηφιακής φωτογραμμετρίας η έρευνα επικεντρώθηκε σε Διπλωματική Εργασία

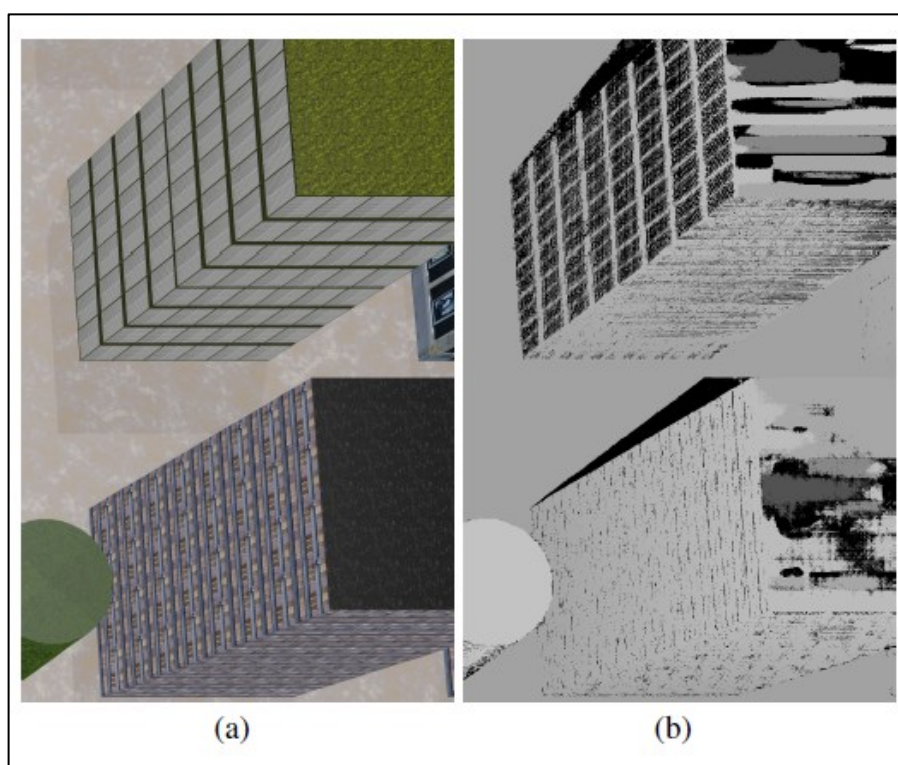
αυτοματοποιημένες διαδικασίες αντιστοίχισης ανά pixel για την παραγωγή πυκνών σημειακών νεφών (Εικ. 18) (Förstner, 2009, Remondino et al., 2014). Ακόμη, στην υπολογιστική όραση αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για την ευθυγράμμιση εικόνων και την εκτίμηση της πυκνής κίνησης σε ακολουθίες βίντεο, ενώ οι συνεχείς εξελίξεις στην πληροφορική και η ανάπτυξη αλγορίθμων SfM και πυκνής αντιστοίχισης, επιτρέπουν πλέον την παραγωγή πυκνών σημειακών νεφών με εξαιρετικά υψηλά επίπεδα αυτοματισμού (Bruno et al., 2022, σ. 2, Szeliski, 2011, σ. 383).



Εικ. 18. Τα Σημειακά Νέφη μετά την καταχώρηση. Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 318.

Η διαδικασία της πυκνής στερεοσκοπικής αντιστοίχισης περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια, τον υπολογισμό του κόστους αντιστοίχισης, τη συγκέντρωση κόστους, τη βελτιστοποίηση της ανισότητας και τη μεταγενέστερη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Κατά τον υπολογισμό του κόστους αντιστοίχισης αποδίδεται σε κάθε πιθανή αντιστοιχία pixel μία τιμή ομοιότητας, ενώ στη φάση της συγκέντρωσης το κόστος αθροίζεται σε γειτονικές περιοχές υποστήριξης ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία της διαδικασίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η επιλογή της βέλτιστης παράλλαξης μέσω τοπικών ή καθολικών μεθόδων βελτιστοποίησης, ενώ στο τελικό στάδιο εφαρμόζονται τεχνικές φιλτραρίσματος

και διόρθωσης σφαλμάτων για τη διαχείριση αποκρύψεων και λανθασμένων αντιστοιχίσεων. Όπως αναφέρει και ο Haala (2011), με τον αλγόριθμο πυκνής αντιστοίχισης Semi-Global Matching (SGM) ελαχιστοποιείται το κόστος αντιστοίχισης, συγκεντρώνοντάς το κατά μήκος ενός αριθμού μονοδιάστατων κατευθύνσεων διαδρομής (Εικ. 19). Με τον τρόπο αυτό, η προσέγγιση SGM παρέχει μια πυκνή κατανομή σημείων ανά pixel, εξασφαλίζοντας παράλληλα λογικό χρόνο εκτέλεσης σε μεγάλες εικόνες (Haala, 2011, σσ. 2-4, Stentoumis et al., 2013, σ. 1-2).

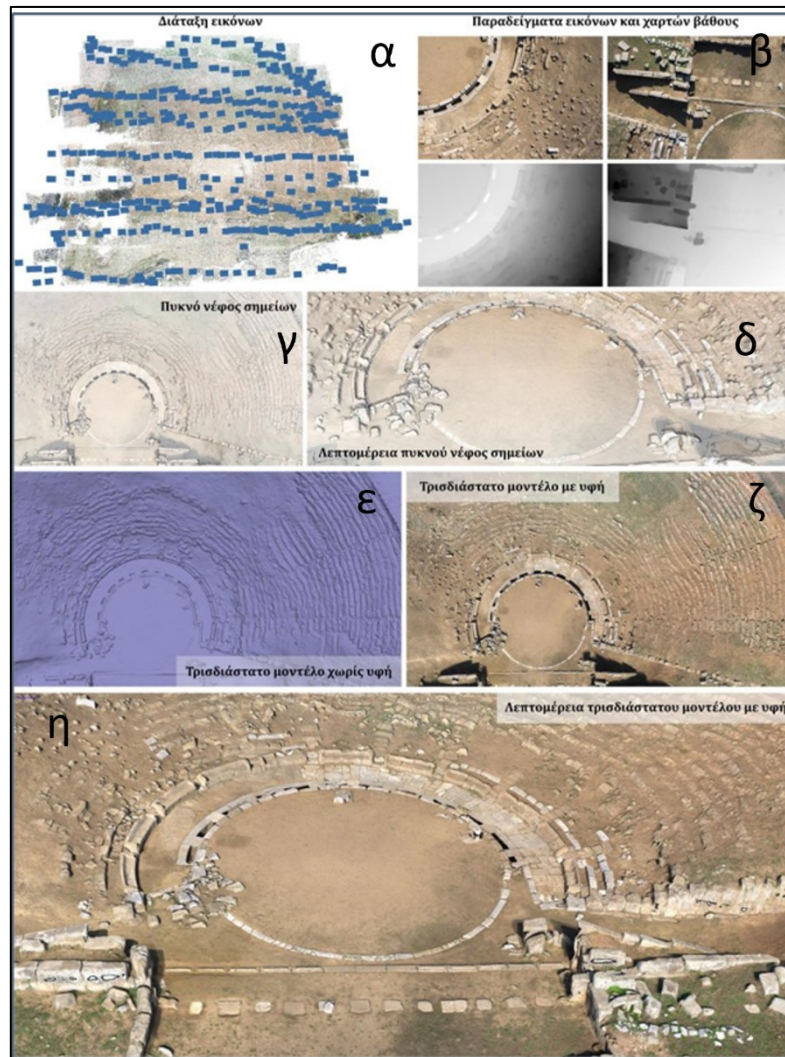


Εικ. 19. Πυκνή ανακατασκευή επιφανειών τοίχων με προοπτική παραμόρφωση χρησιμοποιώντας SGM με οκτώ προσανατολισμούς (α) εικόνα RGB, (β) εικόνα ύψους με ραβδώσεις έγκυρων pixel. Πηγή:

Frommholz, 2020, σ. 148.

Η ποιότητα του παραγόμενου νέφους εξαρτάται από τη γεωμετρία λήψης των εικόνων, το μήκος βάσης μεταξύ των λήψεων, την επικάλυψη των εικόνων και τις συνθήκες φωτισμού (Εικ. 20), καθώς οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Περιοχές με χαμηλή υφή ή ομοιογενείς επιφάνειες παρουσιάζουν αυξημένη αβεβαιότητα. Το νέφος σημείων αποτελεί τη βάση για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας (DSM), εδάφους (DTM) ή υψομέτρου (DEM)

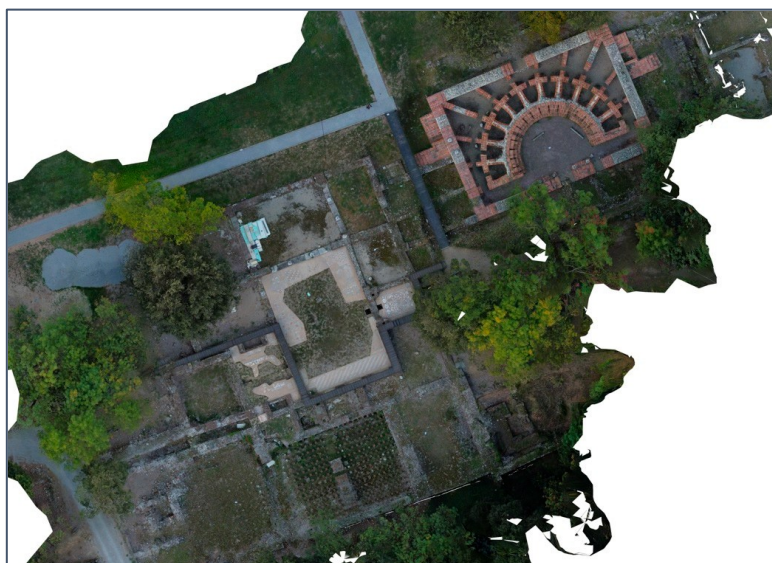
για περαιτέρω ανάλυση. Επίσης, η παρουσία θορύβου και λανθασμένων αντιστοιχίσεων μπορεί να αλλοιώσει τα υψομετρικά δεδομένα, γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον καθαρισμό και το φιλτράρισμα του νέφους σημείων πριν από τη δημιουργία των τελικών μοντέλων επιφάνειας (Bruno et al., 2022, σ. 2, Carrivick et al., 2016, σ. 88-89, Ράγια, 2024, σ. 45-46)



Εικ. 20. Ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα τρισδιάστατης ανακατασκευής αρχαιολογικού χώρου : (α) αραιό νέφος σημείων και προσανατολισμένες εικόνες, (β) παραδείγματα χαρτών βάθους και των εικόνων από τις οποίες προέκυψαν, (γ) (δ) πυκνό νέφος σημείων, (ε) (ζ) τρισδιάστατη τριγωνική επιφάνεια χωρίς υψή και με υψή, καθώς και (η) λεπτομέρειες αυτών. Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 169.

3.6 Παράγωγα της Φωτογραμμετρίας.

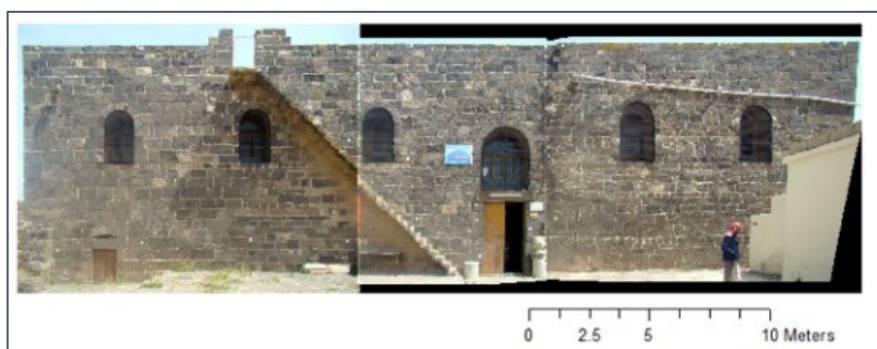
Η σύγχρονη ψηφιακή φωτογραμμετρία, μέσω της επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων, οδηγεί στην παραγωγή πολλαπλών προϊόντων υψηλής ακρίβειας που καλύπτουν κάθε ανάγκη γεωμετρικής και χωρικής τεκμηρίωσης. Το πρωτογενές υλικό της μεθόδου είναι οι ίδιες οι φωτογραμμετρικές εικόνες, οι οποίες αποτελούν ένα αυτόνομο αρχείο τεκμηρίωσης. Σύμφωνα με τον Πατιά (2008), μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας παράγονται εξειδικευμένοι χάρτες, οι οποίοι απεικονίζουν διάφορα γεωγραφικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Ένα κλασικό παράδειγμα αποτελεί η συνδυαστική χρήση ζευγών αεροφωτογραφιών με τοπογραφικά διαγράμματα που αποτελούνται από ισοϋψείς καμπύλες. Επιπλέον, η φωτογραμμετρία επιτρέπει τη δημιουργία κλασικών διαγραμμάτων τεκμηρίωσης, όπως είναι οι όψεις, οι κατόψεις και οι τομές μνημείων, τα οποία πλέον δύνανται να έχουν πλήρως τρισδιάστατη δομή (Πατιάς, 2008, σσ. 74-75, Ράγια, 2024, σσ. 21-22).



Εικ. 21. Δίον. Ορθοφωτογραφία του Ρωμαϊκού Ωδείου και των Μεγάλων Θερμών. Πηγή: Iliodromitis, Tsilimantou, Kopelou, Anastasiou, Koulidou, Spanodimos, Chrysostomou, Dimou, Pagounis, 2025, σ. 17.

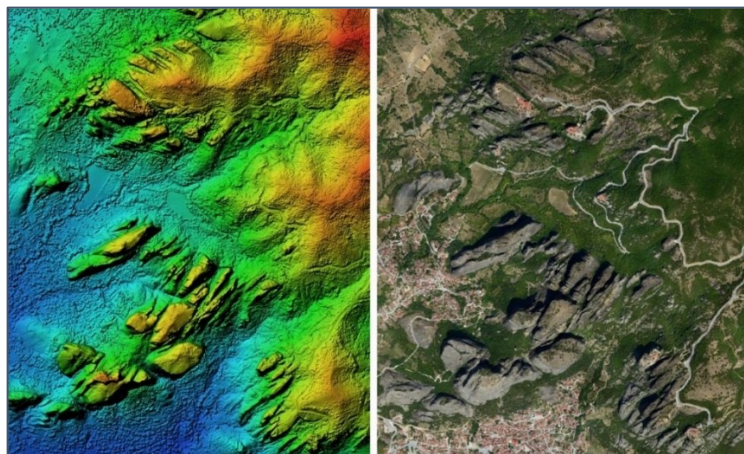
Ένα από τα πιο σημαντικά παράγωγα της φωτογραμμετρίας είναι οι ορθοφωτοχάρτες (Εικ. 21) οι οποίοι προκύπτουν από τη διαδικασία της ορθοαναγωγής. Κατά τη διαδικασία αυτή, αφαιρούνται συστηματικά όλες οι γεωμετρικές παραμορφώσεις της αρχικής εικόνας

που οφείλονται στις κλίσεις λήψης ή στο ανάγλυφο του εδάφους. Όπως αναφέρει η Ράγια (2024), το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα με απόλυτα ομοιόμορφη και ενιαία κλίμακα σε όλη της την έκταση, η οποία διατηρεί παράλληλα όλη την οπτική πληροφορία των αρχικών εικόνων. Οι ορθοφωτογραφίες συνδυάζουν τη μετρική ποιότητα και την ακρίβεια ενός τοπογραφικού διαγράμματος, επιτρέποντας στο χρήστη να μετρήσει αληθινές αποστάσεις, εμβαδά και συντεταγμένες υπό κλίμακα. Όταν χρησιμοποιούνται διαδοχικά ζεύγη φωτογραφιών, τα οποία έχουν διορθωθεί γεωμετρικά για την εξάλειψη των αποκλίσεων, παράγεται μέσω συνένωσης το φωτομωσαϊκό (Εικ. 22) (Luhmann et al., 2014, σσ. 450-455, Πατιάς, 2008, σ. 74, Ράγια, 2024, σσ. 22-23)



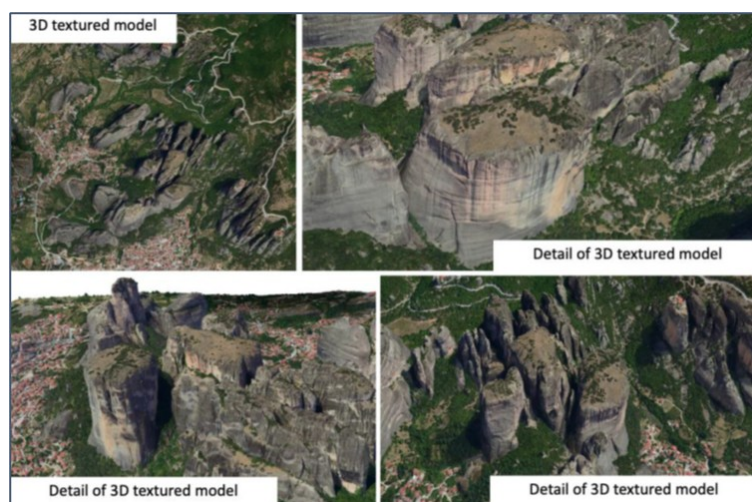
Εικ. 22. Φωτομωσαϊκό πρόσοψης μνημείου που δημιουργείται από συνένωση φωτογραφιών. Πηγή: Ράγια, 2024, σ. 23.

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM/DSM) αναπαριστούν τη μορφολογία του μνημείου ή χώρου (Εικ. 23). Τα DEM αναπαριστούν αποκλειστικά το γυμνό έδαφος, ενώ τα DSM περιλαμβάνουν το σύνολο των επιφανειακών αντικειμένων, όπως κτίρια ή βλάστηση. Σύμφωνα με τον Pratt, (2007), η δημιουργία τους βασίζεται στην επεξεργασία του πυκνού νέφους σημείων (Dense Point Cloud) και στην παρεμβολή των δεδομένων, ενώ η παραγωγή των μοντέλων γίνεται μέσω εξειδικευμένου λογισμικού, που βασίζεται σε μια σύνθετη στρατηγική αντιστοίχισης (matching strategy) (Ράγια, 2024, σ. 21, Pratt, 2007, σ. 24, Roncella et al., 2021, σσ. 3-6).



Εικ. 23. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (αριστερά) και ορθοφωτογραφία (δεξιά) τμήματος της ευρύτερης περιοχής των Μετεώρων. Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 164.

Τα τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα αποτελούν την τελική φάση της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας και παράγονται από την απόκτηση πολλών διαδοχικών φωτογραφιών με επικάλυψη από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Όπως αναφέρουν οι Remondino & Campana (2014), το αρχικό νέφος σημείων μετατρέπεται σε πολυγωνικό πλέγμα και εμπλουτίζεται με υφές, προσφέροντας μια εξαιρετικά ρεαλιστική αναπαράσταση (Εικ. 24). Αυτά τα μοντέλα αξιοποιούνται ευρέως στη ψηφιακή πολιτιστική κληρονομιά, στη μοντελοποίηση και στη διαχείριση φυσικών κινδύνων (Luhmann et al., 2014, σσ. 450-455, Ράγια, 2024, σσ. 21-24, Remondino & Campana, 2014, σσ. 80-85, Roncella et al., 2021, σσ. 3-6).



Εικ. 24. Τρισδιάστατο μοντέλο με υφή τμήματος του Αρχαιολογικού Χώρου των Μετεώρων. Πηγή: Ioannidis, Verykokou, Soile, Potsiou, 2025, σ. 10.

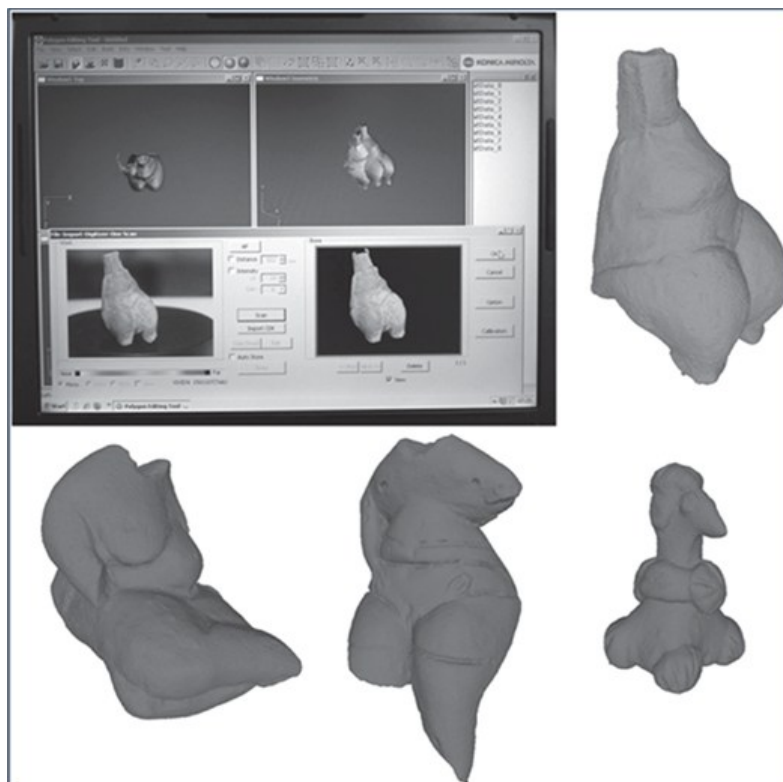
Μια ιδιαίτερη και απαιτητική εφαρμογή της φωτογραμμετρίας είναι η υποβρύχια αποτύπωση σε περιβάλλοντα με ισχυρά ρεύματα και περιορισμένη ορατότητα. Η χρήση συστημάτων με διπλές κάμερες, αισθητήρες πίεσης βάθους, αισθητήρες κλίσης, μαγνητικές πυξίδες και επιτρέπει την ταχύτατη απόκτηση τρισδιάστατων ψηφιακών αναπαραστάσεων υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων και μνημείων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να ενταχθούν σε ολοκληρωμένα συστήματα GIS, συνδυάζοντας τη γεωμετρική πληροφορία με ιστορικές ή περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων (Πατιάς, 2008, σ. 75, Ράγια, 2024, σσ. 24-25).

3.7 Εφαρμογές της Φωτογραμμετρίας.

Η Φωτογραμμετρία αποτελεί ένα σύγχρονο πολυεργαλείο με διεπιστημονικό χαρακτήρα, καθώς οι εφαρμογές της εκτείνονται σε δεκάδες επιστημονικούς και πρακτικούς τομείς. Ιστορικά, οι πρώτες και πλέον διαδεδομένες εφαρμογές της εντοπίζονται στην τοπογραφική χαρτογράφηση, η οποία σήμερα υλοποιείται σχεδόν καθολικά με φωτογραμμετρικές μεθόδους τόσο από δημόσιους φορείς όσο και από ιδιωτικές εταιρείες για το σχεδιασμό έργων υποδομής. Ειδικότερα, στο πεδίο της τοπογραφίας, της χαρτογραφίας και του κτηματολογίου, η μέθοδος είναι αναντικατάστατη για την παραγωγή βασικών διαγραμμάτων και κτηματολογικών χαρτών. Όπως υποστηρίζουν οι Wolf et al. (2014), η σύγχρονη χρήση της ψηφιακής εικόνας επέτρεψε τη συνδυαστική αξιοποίηση των ορθοφωτογραφιών και των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρου (DEM), τα οποία αντικαθιστούν τους παραδοσιακούς χάρτες και τροφοδοτούν με πολύτιμα χωρικά δεδομένα τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) για τη διαχείριση του περιβάλλοντος (Kraus 2007, σ. 3, Πατιάς, 1993, σ. 9, Ράγια, 2024, σ. 10, Wolf et al., 2014, σ. 27).

Η φωτογραμμετρία κοντινού εύρους αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο, το οποίο επιφέρει καθοριστικά πλεονεκτήματα στους τομείς της Αρχιτεκτονικής και της Αρχαιολογίας, προσφέρει γεωμετρική τεκμηρίωση, αποτύπωση χώρων και ιστορικών μνημείων, αλλά και τρισδιάστατη χαρτογράφηση κινητών ευρημάτων (Εικ. 25) και ανασκαφών. Ακόμη, η παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και η διαχείριση Φυσικών Καταστροφών αποτελούν έναν ακόμη κρίσιμο άξονα. Η φωτογραμμετρία επιτρέπει τη μελέτη των υδάτινων πόρων, του εδάφους και της ατμόσφαιρας, καθώς και την αποτίμηση

ζημιών από σεισμούς, πλημμύρες και πυρκαγιές. Στη Γεωλογία, στη Δασολογία και στη Γεωπονική συνεισφέρει, αντίστοιχα, σε γεωμορφολογικές μελέτες, στον υπολογισμό όγκων σε εξορύξεις και μεταλλεία και στην ανίχνευση ασθενειών σε καλλιέργειες. Η διαρκής εξέλιξη των αλγορίθμων καθιστά τη μέθοδο πιο προσβάσιμη και ισχυρή από ποτέ (Kraus 2007, σ. 3, Πατιάς, 1993, σ. 9, Ράγια, 2024, σσ. 9-10, Χατζηφώτη, 2016, σσ. 15-16).



Εικ. 25. Τρισδιάστατη Σάρωση. Ψηφιακά μοντέλα ειδωλίων. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 985.

Κεφάλαιο Τέταρτο – Συνδυασμός Drone και Φωτογραμμετρίας - Μεθοδολογία και Εφαρμογές στην Αρχαιολογία.

Κατά τους Condorelli & Bonetto (2022), η χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAVs) σε συνδυασμό με τεχνικές ψηφιακής φωτογραμμετρίας και ειδικότερα με τη μέθοδο Structure from Motion (SfM), έχει εξελιχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της σύγχρονης αρχαιολογικής έρευνας. Παραδοσιακά, η πλήρης αποτύπωση και η επισκόπηση μεγάλων αρχαιολογικών τοπίων ή σύνθετων ανασκαφικών θέσεων αποτελούσε μια εξαιρετικά επίπονη διαδικασία, με δυσανάλογο κόστος σε χρόνο, οικονομικούς πόρους και ανθρώπινο δυναμικό. Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), μέσω της τεχνολογίας SfM καθίσταται δυνατή η παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων, ψηφιακών μοντέλων εδάφους και ορθοφωτοχαρτών υψηλής ακρίβειας (Εικ. 26), με σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος και μικρό χρόνο επεξεργασίας. Έτσι, οι ανακαλύψεις διατηρούνται δομημένα και τα ρεαλιστικά τρισδιάστατα μοντέλα ενισχύουν την ερμηνεία των δεδομένων αυτών, καθιστώντας τους αρχαιολογικούς χώρους προσβάσιμους στο ευρύ κοινό και στους ερευνητές (Condorelli & Bonetto, 2022, σ. 51, Over et al. 2021, σσ. 1-2, Reese & Field, 2021, σ. 1).



Εικ. 26. Ορθομωσαϊκά της κάτοψης της ΒΔ γωνίας του Παρθενώνα, πριν και μετά την αποκατάσταση.

Πηγή: Ελευθερίου, Καλησπεράκης, Μαυρομάτη, Χριστοδουλοπούλου, 2017, σ. 15.

Η εφαρμογή των UAV επιτρέπει την αποτύπωση ανασκαφικών χώρων, μνημείων και αρχιτεκτονικών καταλοίπων με μεγάλη λεπτομέρεια, ενώ παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα επαναλαμβανόμενων λήψεων για τη διαχρονική παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των μνημείων. Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στην πολιτιστική κληρονομιά, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να αντικαταστήσουν ακριβότερες τεχνικές, όπως το Laser scanning. Παράλληλα, η ραγδαία ανάπτυξη των τρισδιάστατων ψηφιακών τεχνολογιών έχει μετασχηματίσει ριζικά την αρχαιολογική έρευνα πεδίου, προσφέροντας μη καταστροφικές και υψηλής ακρίβειας μεθόδους τεκμηρίωσης και ψηφιακής διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς (Over et al. 2021, σ. 1-2, Tsiafakis & Michailidou, 2015, σ. 37, Χατζησταμάτης κ.ά. 2023, σ. 2).

4.1 Workflow δεδομένων.

Η φωτογραμμετρική διαδικασία με τη χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) αποτελεί μια σύγχρονη και ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδο συλλογής γεωχωρικών δεδομένων στην αρχαιολογική έρευνα. Σύμφωνα με τον Eisenbeiss (2009), η μεθοδολογία αυτή βασίζεται σε μια αυστηρά οργανωμένη ροή εργασίας, η οποία περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια, το σχεδιασμό της πτήσης, τη λήψη των εικόνων στο πεδίο και την επεξεργασία των δεδομένων σε ψηφιακό περιβάλλον (Πίν. 5). Όπως παρατηρούν οι Westoby et al. (2012), η τελική ακρίβεια και η ποιότητα των παραγόμενων τρισδιάστατων προϊόντων εξαρτώνται άμεσα από τη σωστή εκτέλεση κάθε επιμέρους σταδίου της διαδικασίας. Πρόκειται για μια γραμμική αλλά ταυτόχρονα επαναληπτική μεθοδολογική αλυσίδα, που διασφαλίζει τη γεωμετρική ακρίβεια και τη χωρική εγκυρότητα των τελικών ψηφιακών δεδομένων, στοιχεία απαραίτητα για την επιστημονική τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ταχεία και μη καταστροφική καταγραφή αρχαιολογικών χώρων και συμβάλλει σημαντικά στη σύγχρονη ψηφιακή διαχείριση και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Eisenbeiss, 2009, σ. 63, Kostrzewa et al. 2025, σ. 1, Over et al. 2021, σ. 1, Westoby et al. 2012, σσ. 300-301).

Description	Parameter
Image scale factor	m_b
Focal length	f
Flight height	H_g
Dimension of the analog image and sensor size for digital cameras	$s' (x,y)$
Scanning resolution for analogue images and the pixel size for digital cameras	p_x and p_y
Sensor diagonal	d
Ground distance of the image	$S (X,Y)$
Along and across track overlap	p and q
Baseline in image and object space	b and B
Distance between the flight lines	a
Length and width of area to be covered	L_p and L_q
Model area (Stereo coverage)	F_m
Position of the Area	$P_{1..4} (X, Y)$
Average terrain height	H_T
Accuracy in planimetry and height	s_x and s_z
Measurements accuracy (Pixel)	$s_x (Mes)$
Ground velocity	V_g
Velocities of the UAV (Translation and angular velocity)	$V_{X,Y,Z}$ and $V_{\psi, \theta, \phi}$
Image motion	w
Shutter speed	Δt
Time between two acquisition points	dT
Field of view	FOV
Image acquisition point	$P (X, Y, Z)$

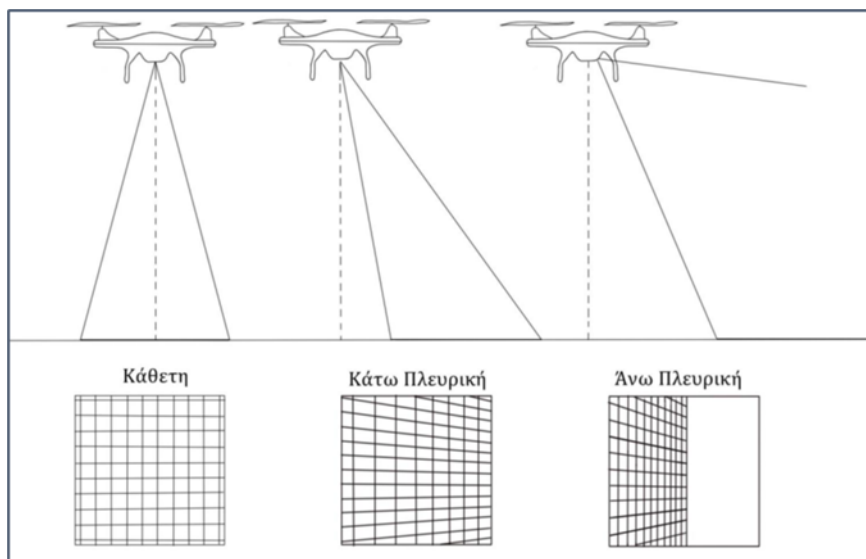
Πίν. 5. Παράμετροι πτήσης για τον σχεδιασμό αποστολών φωτογραμμετρικών εναέριων πτήσεων. Πηγή:
Eisenbeiss, 2009, σ. 63.

4.1.1 Σχεδιασμός Πτήσης.

Ο σχεδιασμός της πτήσης αποτελεί το πιο κρίσιμο στάδιο για την επιτυχία της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης, καθώς καθορίζει εκ των προτέρων την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων. Πριν από την απογείωση, ο ερευνητής οφείλει να καθορίσει τις παραμέτρους της πτήσης μέσω ειδικού λογισμικού αυτόματης πλοήγησης. Τα κύρια στοιχεία που ελέγχονται είναι το ύψος πτήσης, η ταχύτητα του UAV, η ανάλυση των εικόνων και το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των φωτογραφιών. Όπως επισημαίνουν οι Nex & Remondino (2014), το ύψος πτήσης σχετίζεται άμεσα με το Ground Sampling Distance (GSD), δηλαδή τη χωρική διακριτική ικανότητα του εδάφους ανά pixel. Χαμηλότερο ύψος

Διπλωματική Εργασία

πτήσης εξασφαλίζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια, μικρότερο GSD, αλλά αυξάνει τον συνολικό αριθμό των λήψεων, τον απαιτούμενο χρόνο πτήσης και την κατανάλωση μπαταρίας (Nex & Remondino, 2014, σ. 3).



Εικ. 27. Τρόποι λήψης εικόνων. Πηγή: Γράβαλος, Μακρής, 2024, σ. 504.

Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), η επικάλυψη εικόνων πρέπει να είναι υψηλή ($\geq 80\%$ εμπρόσθια και $\geq 60-70\%$ πλευρική) (Εικ. 27), ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη αντιστοίχιση σημείων. Ανεπαρκής επικάλυψη οδηγεί σε κενά στο νέφος σημείων, γεωμετρικές παραμορφώσεις ή και πλήρη αποτυχία της ανακατασκευής. Επιπλέον, η γεωμετρία λήψης, η ταχύτητα του UAV και η σταθερότητα των παραμέτρων της κάμερας επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Συνήθως, επιλέγεται κατακόρυφη λήψη για επίπεδους αρχαιολογικούς χώρους και πλάγια λήψη για την ορθή αποτύπωση κατακόρυφων δομών, όπως τοίχοι και υπόγεια. Εσφαλμένος σχεδιασμός μπορεί να οδηγήσει σε ελλείψεις δεδομένων ή γεωμετρικές παραμορφώσεις (Agisoft, 2021, σ. 12, Nex & Remondino, 2014, σ. 3, Over et al. 2021, σσ. 5,8, Reese & Field, 2021, σ. 2, Wright, 2023, σσ. 1,3).

4.1.2 Λήψη Εικόνων.

Η συλλογή εικόνων πραγματοποιείται είτε αυτόνομα μέσω προκαθορισμένων διαδρομών είτε χειροκίνητα από το χειριστή του drone. Οι φωτογραφίες πρέπει να είναι υψηλής ανάλυσης και να διαθέτουν σταθερή εστίαση, ώστε να διευκολύνεται η αναγνώριση

χαρακτηριστικών σημείων από το λογισμικό, ειδικότερα σε περιοχές με ομοιόμορφη επιφανειακή υφή (Over et al. 2021, James & Robson, 2012, Westoby et al. 2012). Σύμφωνα με τους Fonstad et al. (2013) για τη βελτίωση της γεωμετρικής ακρίβειας, τη γεωαναφορά και την κλιμάκωση του μοντέλου στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, είναι απαραίτητη η χρήση επίγειων οροσήμεων, γνωστών ως φωτοσταθερά ή Σημεία Εδάφους (Ground Control Points - GCPs). Τα φωτοσταθερά τοποθετούνται στρατηγικά στο χώρο πριν από την πτήση, χρησιμοποιώντας ειδικούς στόχους υψηλής αντίθεσης, και οι συντεταγμένες τους μετρούνται με γεωδαιτικούς σταθμούς ή συστήματα υψηλής ακρίβειας (Εικ. 28). Η καταγραφή των φωτοσταθερών επιτρέπει τη μετέπειτα γεωαναφορά, την κλιμάκωση και το σωστό προσανατολισμό του τρισδιάστατου μοντέλου στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Για αποτελέσματα υψηλής ποιότητας, προτείνεται η ομοιόμορφη κατανομή τουλάχιστον δέκα σημείων φωτοσταθερών στον χώρο (Fonstad et al. 2013, σσ. 69-70, Over et al. 2021, σ. 8, Ράγια, 2024, σ. 15, Wright, 2023, σ. 1).



Εικ. 28. Λογισμικό Σταθμού Ελέγχου Εδάφους (GCS). Μενού αυτοματοποιημένης εναέριας έρευνας: οι κόκκινες κουκκίδες και οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την έκταση της περιοχής που θα καλυφθεί, οι κίτρινες γραμμές είναι οι γραμμές πτήσης και οι πράσινες κουκκίδες είναι τα σημεία στροφής του UAS.

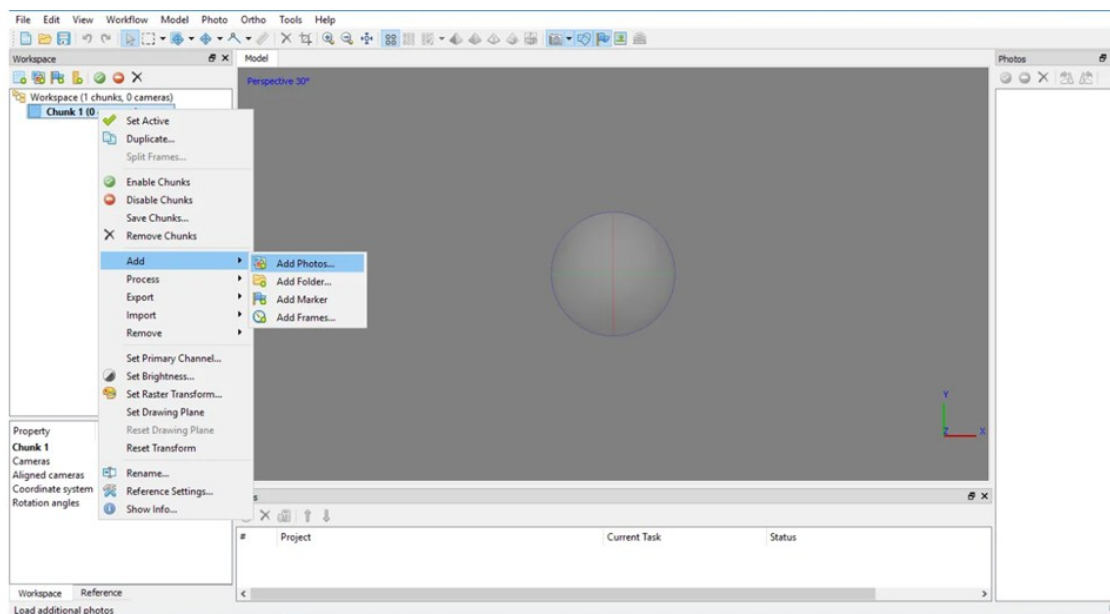
Πηγή: Hatzopoulos, Stefanakis, Georgopoulos, Tapinaki, Pantelis, Liritzis, 2017, σ. 319.

4.1.3 Επεξεργασία δεδομένων.

Η επεξεργασία δεδομένων βασίζεται στη μεθοδολογία SfM, η οποία επιτρέπει την ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων από δισδιάστατες εικόνες, και πραγματοποιείται Διπλωματική Εργασία

σε εξειδικευμένο φωτογραμμετρικό λογισμικό. Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής διαδοχικά στάδια, τον ποιοτικό έλεγχο και την ευθυγράμμιση, όπου γίνεται εισαγωγή των εικόνων και έλεγχος ποιότητας. Ακολουθεί η ευθυγράμμιση, όπου το λογισμικό αντιστοιχίζει κοινά σημεία και παράγει το αρχικό αραιό νέφος σημείων και η εισαγωγή των συντεταγμένων των φωτοσταθερών και η σήμανσή τους επάνω στις φωτογραφίες, αλλά και η βελτιστοποίηση των εσωτερικών παραμέτρων των καμερών. Μετά τη σταθεροποίηση του γεωμετρικού μοντέλου, το λογισμικό υπολογίζει τη θέση εκατομμυρίων σημείων, δημιουργώντας το πυκνό νέφος σημείων (Dense Point Cloud), το οποίο αποδίδει τη λεπτομερή γεωμετρία της επιφάνειας. Το πυκνό νέφος σημείων μετατρέπεται σε πολυγωνικό μοντέλο και από αυτό παράγονται τα τελικά γεωχωρικά προϊόντα, το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM) και το ορθοφωτομωσαϊκό (orthomosaic) υψηλής ανάλυσης (Fonstad et al., 2013, σσ. 69-70, Over et al. 2021, σσ. 12,16, Westoby et al. 2012, σ. 301, Wright, 2023, σ. 5).

4.2 Το λογισμικό Agisoft Metashape.



Εικ. 29. Εισαγωγή εικόνων με δεξί κλικ> Add > Add Photos. Πηγή: Η Φωτογραμμετρική διαδικασία, χρησιμοποιώντας το Agisoft PhotoScan/MetaShape, <http://bit.ly/4o0vpCf>. (5/6/2026).

Το Agisoft Metashape Professional αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα και αξιόπιστα λογισμικά ψηφιακής φωτογραμμετρίας, με ιδιαίτερα εκτεταμένη χρήση στην αρχαιολογική έρευνα, καθώς χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων, ορθοφωτομωσαϊκών και ψηφιακών μοντέλων εδάφους αρχαιολογικών χώρων, μνημείων και ανασκαφών, αξιοποιώντας αλγορίθμους SfM για την παραγωγή χωρικών δεδομένων υψηλής ακρίβειας (Εικ. 29). Η ευρεία αποδοχή του λογισμικού οφείλεται κυρίως στη δυνατότητά του να επεξεργάζεται μεγάλα σύνολα εικόνων από διαφορετικές ή μη βαθμονομημένες κάμερες, μετατρέποντας δισδιάστατες φωτογραφίες σε ακριβή τρισδιάστατα μοντέλα (Agisoft, 2021, σ. 25, Sevara et al. 2018, σ. 611, Wright, 2023, σ. 1).

Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), η τυπική ροή εργασιών στο Agisoft Metashape περιλαμβάνει μια σειρά διαδοχικών και αλληλένδετων σταδίων. Αρχικά πραγματοποιείται η εισαγωγή και οργάνωση των φωτογραφιών σε ομάδες εργασίας ή ομάδες καμερών, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αισθητήρες λήψης. Το στάδιο αυτό αντιστοιχεί στην εντολή Add Photos (εισαγωγή των φωτογραφιών), όπου μέσω της λειτουργίας Estimate Image Quality, το λογισμικό αξιολογεί την εστίαση κάθε εικόνας, αποδίδοντας έναν δείκτη ποιότητας από 0 έως 1. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαδικασία μασκαρίσματος, κατά την οποία αποκλείονται κινούμενα ή ανεπιθύμητα στοιχεία, όπως βλάστηση ή σκιές, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία θορύβου και γεωμετρικών σφαλμάτων κατά την επεξεργασία. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του Agisoft (2021), ακολουθεί η ευθυγράμμιση των φωτογραφιών (Align Photos), όπου το πρόγραμμα αναγνωρίζει αυτόματα κοινά σημεία ενδιαφέροντος και χαρακτηριστικά σημεία μεταξύ επικαλυπτόμενων εικόνων. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζει τη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας στον τρισδιάστατο χώρο και δημιουργεί ένα αρχικό, αραιό νέφος σημείων (Sparse Cloud / tie points). Έπειτα εισάγονται τα σημεία ελέγχου εδάφους ή φωτοσταθερά (GCPs), που τοποθετούνται με ακρίβεια στις εικόνες και χρησιμοποιούνται για τη γεωαναφορά και τη βελτιστοποίηση του μοντέλου. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αντισταθμίζει τις γεωμετρικές εκτροπές του φακού, ενισχύοντας την πιστότητα και τη μετρική ακρίβεια του μοντέλου (Agisoft, 2021, σσ. 23-35, Over et al. 2021, σσ. 12,27,46, Wright, 2023, σσ. 4, 14).

Η επόμενη φάση περιλαμβάνει τη δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων (Dense Point Cloud), το οποίο αναπαριστά με μεγάλη λεπτομέρεια τη γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου και αποτελεί τη βάση για το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM) και Διπλωματική Εργασία

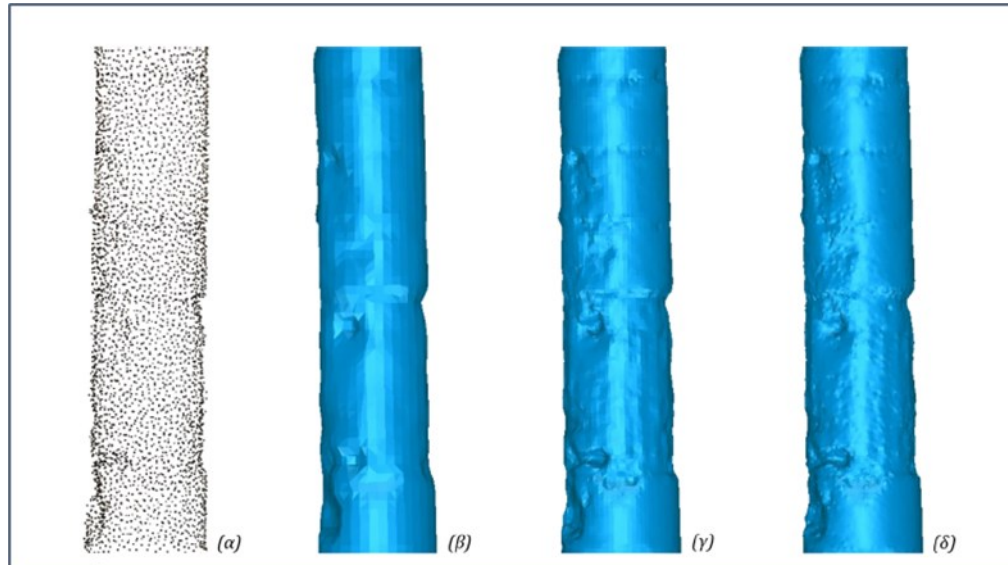
το ορθοφωτομωσαϊκό. Στη συνέχεια, όπως παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο χρήσης του Agisoft (2021), ακολουθεί η κατασκευή του πολυγωνικού μοντέλου (Build Mesh), κατά την οποία το λογισμικό ενώνει τα σημεία του πυκνού νέφους, δημιουργώντας ένα ενιαίο πλέγμα επιφανειών. Επάνω σε αυτό το πλέγμα πραγματοποιείται η δημιουργία και εφαρμογή της τελικής υφής (Build Texture), προσδίδοντας στο 3D μοντέλο μια ρεαλιστική, φωτορεαλιστική εμφάνιση. Η ροή εργασίας ολοκληρώνεται με την επιλογή File - Export, η οποία επιτρέπει την εξαγωγή του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου και των παραγόμενων προϊόντων σε πλήθος διαφορετικών μορφών αρχείων, έτοιμων προς χρήση σε άλλες εφαρμογές (Agisoft, 2021, σσ. 45-83, Over et al. 2021, σσ. 4-8).

Όπως προαναφέρθηκε, η τελική φάση περιλαμβάνει την παραγωγή του πυκνού νέφους σημείων του Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρου (DEM) και του ορθοφωτομωσαϊκού. Σύμφωνα με τον Wright (2023), η ακρίβεια των παραγόμενων προϊόντων εξαρτάται από την ποιότητα των εικόνων, την ορθή κατανομή των GCPs και τη σωστή παραμετροποίηση του λογισμικού. Η βελτιστοποίηση και η μείωση σφαλμάτων αποσκοπεί στη μείωση του RMSE κάτω από 0.3 pixels και ιδανικά κάτω από 0.18 pixels. Παράγοντες όπως θολές εικόνες, ανεπαρκής επικάλυψη ή λανθασμένη γεωαναφορά μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα (Over et al. 2021, σσ. 4-8, 28, Wright, 2023, σσ. 6-7).

4.3 Ακρίβεια και σφάλματα.

Η γεωμετρική ακρίβεια ενός φωτογραμμετρικού μοντέλου αποτελεί βασικό παράγοντα αξιολόγησης της αξιοπιστίας των παραγόμενων χωρικών δεδομένων και εξαρτάται τόσο από τη διαδικασία λήψης των εικόνων όσο και από τη σωστή υπολογιστική επεξεργασία τους. Στο λογισμικό Agisoft Metashape, η βελτίωση της ακρίβειας επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας σταδιακής επιλογής, η οποία εφαρμόζεται στο αραιό νέφος σημείων και αποσκοπεί στην απομάκρυνση λανθασμένων σημείων σύνδεσης που επηρεάζουν αρνητικά τη γεωμετρική συνοχή του μοντέλου. Σύμφωνα με τον Wright (2023), η διαδικασία αυτή βασίζεται σε τρία βασικά κριτήρια: α. στην αβεβαιότητα ανακατασκευής (Σχ. 9), η οποία εντοπίζει σημεία που προκύπτουν από κακή γεωμετρία λήψης, όπως όταν οι ακτίνες των καμερών τέμνονται υπό πολύ μικρή γωνία, και β. στην ακρίβεια προβολής, η οποία αξιολογεί το σφάλμα στον εντοπισμό και το ταίριασμα των pixel κατά τη δημιουργία του

νέφους σημείων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η τιμή να μειωθεί περίπου στο 2 ή 3, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα του μοντέλου της κάμερας (Over, et al. 2021, σ. 38, Wright, 2023, σ. 6).



Σχ. 9. Δημιουργία επιφάνειας μέσω της μεθόδου ανακατασκευής Poisson: (α) νέφος σημείων για τμήμα κίονα, (β-δ) η επιφάνεια του κίονα με τιμές του βάθους της δομής οκταδικών δέντρων 6, 8 και 12 (από αριστερά προς τα δεξιά). Πηγή: Ιωαννίδης, Βερύκοκου, Σοϊλέ, 2026, σ. 132.

Το πιο σημαντικό μέτρο ακρίβειας αποτελεί γ. το σφάλμα αναπροβολής, το οποίο εκφράζει την απόσταση σε pixels, μεταξύ της πραγματικής θέσης ενός σημείου στην εικόνα και της προβολής του στο τρισδιάστατο μοντέλο. Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η σταδιακή απομάκρυνση περίπου του 10% των χειρότερων σημείων σε κάθε κύκλο επεξεργασίας, μέχρι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE να μειωθεί κάτω από 0.3 pixels με απώτερο βέλτιστο όριο τα 0.18 pixels. Η αξιολόγηση της συνολικής ακρίβειας πραγματοποιείται μέσω του δείκτη RMSE, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στη φωτογραμμετρία για την εκτίμηση των αποκλίσεων του μοντέλου (Fonstad et al. 2013, σ. 70, Over et al. 2021, σσ. 4-5,41, Wright, 2023, σ. 6).

Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), η τελική επαλήθευση του μοντέλου γίνεται με τη χρήση των φωτοσταθερών. Ορισμένα σημεία χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου για τη γεωαναφορά του μοντέλου, ενώ άλλα λειτουργούν ως ανεξάρτητα σημεία ελέγχου για την αξιολόγηση της πραγματικής χωρικής ακρίβειας. Η ποιότητα των φωτογραμμετρικών προϊόντων επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως η ποιότητα των εικόνων, η Διπλωματική Εργασία

επικάλυψη των λήψεων, η σωστή κατανομή των GCPs και η βαθμονόμηση της κάμερας. Ατέλειες όπως η μειωμένη ευκρίνεια των εικόνων, η ελλιπής γεωαναφορά και το φαινόμενο της παραμόρφωσης υποβαθμίζουν σημαντικά την αξιοπιστία του μοντέλου. Τέλος, η οριζόντια ακρίβεια του μοντέλου ανέρχεται συνήθως σε 1-3 GSD, ενώ η κατακόρυφη ακρίβεια κυμαίνεται από 2-3 GSD (James & Robson, 2012, σ. 341, Kostrzewa et al. 2025, σ. 4, Over et al. 2021, σ. 45, Wright, 2023, σ. 5).

4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα.

Η ποιότητα και η γεωμετρική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προϊόντων που παράγονται μέσω UAV και τεχνικών Structure from Motion (SfM) επηρεάζονται από ένα σύνολο τεχνικών, περιβαλλοντικών και υπολογιστικών παραγόντων. Η σωστή διαχείριση αυτών των παραμέτρων είναι καθοριστική για την παραγωγή αξιόπιστων ορθοφωτομωσαϊκών, ψηφιακών μοντέλων εδάφους και τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής ανάλυσης.



Εικ. 30. Ακόμα κι αν το drone πετάει οριζόντια, η λεπτομέρεια (GSD) των εικόνων μπορεί να αλλάζει. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος έχει ανωμαλίες και η κάμερα αλλάζει ελαφρώς γωνία. Εφόσον ο χάρτης (ορθομωσαϊκό) συνδυάζει τις θέσεις της κάμερας και ένα τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους, το λογισμικό υπολογίζει και χρησιμοποιεί μια μέση τιμή ανάλυσης για όλο το έργο. Πηγή: Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809> (5/6/2026).

Ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας είναι το Ground Sampling Distance (GSD), ο οποίος σχετίζεται άμεσα με το ύψος της πτήσης και την ανάλυση της κάμερας. Χαμηλότερο GSD σημαίνει ότι κάθε pixel καλύπτει μικρότερη επιφάνεια εδάφους (Εικ. 30), άρα η τελική απεικόνιση περιέχει περισσότερη πληροφορία και υψηλότερη ακρίβεια. Οι Kostrzewa et al.

Διπλωματική Εργασία

(2025) υποστηρίζουν ότι στους βασικούς τεχνικούς παράγοντες περιλαμβάνονται η επικάλυψη των εικόνων, η ποιότητα και η ανάλυση του αισθητήρα, καθώς και η σταθερότητα της πτήσης του UAV. Ο τύπος του αισθητήρα, η γωνία λήψης και η παρουσία σωστά καταναμεμένων GCPs επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια και τη συνοχή των φωτογραμμετρικών δεδομένων. Επιπλέον, οι μεγαλύτεροι αισθητήρες παρέχουν ανώτερη δυναμική περιοχή και περιορισμένο ψηφιακό θόρυβο, ενώ, αντίστοιχα, οι κάμερες με μηχανικό κλείστρο υπερέχουν από εκείνες με κυλιόμενο κλείστρο, επειδή εξαλείφουν τις παραμορφώσεις στην εικόνα που δημιουργεί η κίνηση του drone (James & Robson, 2012, σ. 341, Kostrzewa et al. 2025, σ. 1, Over et al. 2021, σ. 6).

Σύμφωνα με τους Over et al. (2021), ιδιαίτερα σημαντικοί είναι και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, καθώς φωτισμός, οι σκιές και οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την ικανότητα των αλγορίθμων SfM να εντοπίζουν και να αντιστοιχούν σωστά τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων. Ο έντονος ηλιακός φωτισμός δημιουργεί περιοχές υπερέκθεσης και βαθιές σκιές, δυσχεραίνοντας τη διαδικασία ευθυγράμμισης. Αντίθετα, οι συνθήκες ελαφριάς συννεφιάς θεωρούνται ιδανικές, καθώς παρέχουν ομοιόμορφο διάχυτο φωτισμό και αναδεικνύουν καλύτερα τις λεπτές υφές της επιφάνειας. Παράλληλα, η φύση της επιφάνειας που αποτυπώνεται επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Επιφάνειες με ομοιογενή υφή, επαναλαμβανόμενα μοτίβα ή υψηλή ανακλαστικότητα, όπως το νερό ή το μάρμαρο, δυσκολεύουν το ταίριασμα των εικόνων και αυξάνουν τα σφάλματα (Kostrzewa et al. 2025, σ. 1, Over et al. 2021, σ. 5, Wright, 2023, σ. 3).

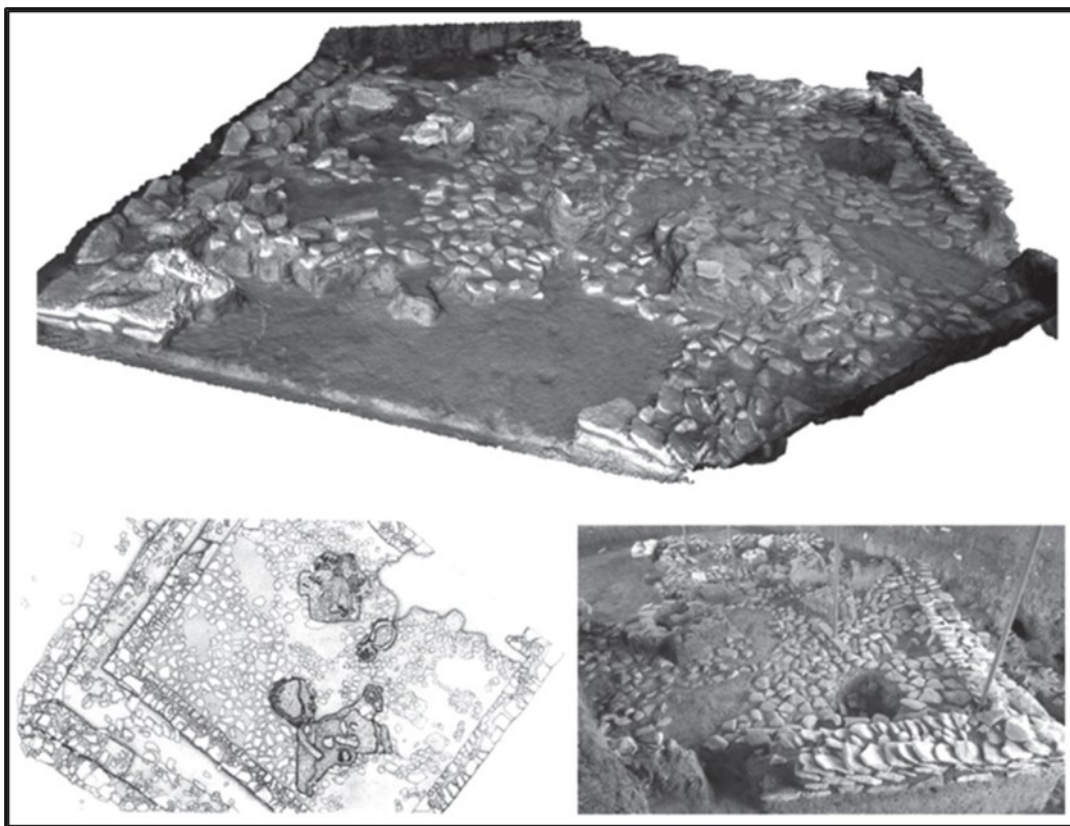
Τέλος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι παράγοντες επεξεργασίας, όπως οι ρυθμίσεις του λογισμικού, η ποιότητα του νέφους σημείων και τα σφάλματα επαναπροβολής. Η ανεπαρκής επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε θόρυβο, κενά και γεωμετρικές παραμορφώσεις στο τελικό μοντέλο. Παράλληλα, η επεξεργασία μεγάλων όγκων εικόνας απαιτεί υψηλή υπολογιστική απόδοση και άριστη διαχείριση των πόρων. Σύμφωνα με τον Wright 2023, η χρήση μιας αποκλειστικής κάρτας γραφικών (GPU) κρίνεται απαραίτητη για την επιτάχυνση της διαδικασίας και τη διασφάλιση της ποιότητας του τελικού αποτελέσματος (Westoby et al. 2012, σ. 304, Wright 2023, σ. 12).

4.5 Εφαρμογές στην αποτύπωση ανασκαφικών χώρων.

Η εφαρμογή των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAVs) και της φωτογραμμετρίας Structure from Motion (SfM) στην αρχαιολογική έρευνα έχει μεταβάλει ριζικά τον τρόπο τεκμηρίωσης και αποτύπωσης των ανασκαφικών χώρων. Η μέθοδος επιτρέπει τη γρήγορη, οικονομική και ιδιαίτερα ακριβή συλλογή γεωχωρικών δεδομένων, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τοπογραφικές και σχεδιαστικές πρακτικές. Η φωτογραμμετρία UAV χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, ορθοφωτομωσαϊκών υψηλής ανάλυσης και ψηφιακών μοντέλων εδάφους, τα οποία συμβάλλουν ουσιαστικά στην τεκμηρίωση, ανάλυση και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Nex & Remondino, 2014, σ. 10, Over, et al. 2021, σ. 1-2).

Σύμφωνα με τις Tsiafakis & Michailidou (2015), μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής είναι η στρωματογραφική καταγραφή τεσσάρων διαστάσεων (4D documentation). Δεδομένου ότι η ανασκαφή αποτελεί μία μη αναστρέψιμη διαδικασία, η δυνατότητα ταχείας τρισδιάστατης αποτύπωσης κάθε ανασκαφικού στρώματος επιτρέπει τη δημιουργία ενός λεπτομερούς ψηφιακού αρχείου, στο οποίο η χωρική πληροφορία συνδέεται με τη χρονική εξέλιξη της ανασκαφής. Με τον τρόπο αυτό, οι αρχαιολόγοι μπορούν να επανεξετάζουν εκ των υστέρων τη στρωματογραφία και την εξέλιξη των αρχιτεκτονικών φάσεων στο εργαστήριο, βελτιώνοντας σημαντικά την επιστημονική τεκμηρίωση (Condorelli & Bonetto, 2022, σ. 51, Reese & Field 2021, σ. 7, Tsiafakis & Michailidou, 2015, σ. 38).

Παράλληλα, η φωτογραμμετρία UAV συμβάλλει ουσιαστικά στην παραγωγή ακριβών ορθοφωτομωσαϊκών (Εικ. 31), τα οποία αντικαθιστούν σε μεγάλο βαθμό τον παραδοσιακό χειροκίνητο σχεδιασμό των ανασκαφικών δομών. Όπως αναφέρουν οι Reese & Field (2021), τα παραγόμενα αρχεία μπορούν να εισαχθούν απευθείας σε περιβάλλοντα GIS, όπου επιτρέπουν τη ψηφιοποίηση αρχιτεκτονικών καταλοίπων, τη λήψη ακριβών μετρήσεων και τη διεξαγωγή σύνθετων χωρικών αναλύσεων. Επιπλέον, τα Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρου (DEM) που παράγονται μέσω λογισμικών επιτρέπουν την εφαρμογή τεχνικών μικροαναλυτικής ανάλυσης, οι οποίες αποκαλύπτουν ανεπαίσθητες μορφολογικές διαφοροποιήσεις που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι (Reese & Field, 2021, σ. 8, Sevara, et al. 2018, σ. 612, Wright, 2023, σ. 1).



Εικ. 31. Φωτογραμμετρία. Το τελικό αποτέλεσμα για το Κτήριο 1 σε αντιπαραβολή με το σχέδιο και τη φωτογραφία. Πηγή: Παπαδόπουλος, Κυπαρίσση-Αποστολικά, Χαμηλάκης, 2015, σ. 986.

Η χρήση UAV και φωτογραμμετρίας είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντική για την παρακολούθηση φθορών, τη συντήρηση και τη ψηφιακή αποκατάσταση μνημείων. Τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ερευνητικούς όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, επιτρέποντας τη δημιουργία ψηφιακών αρχείων υψηλής ακρίβειας για μελλοντική μελέτη και ανάδειξη των μνημείων. Επιπλέον, το Agisoft Metashape παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής αναλυτικών αναφορών, που περιλαμβάνουν στατιστικά στοιχεία σφαλμάτων, παραμέτρους βαθμονόμησης και δεδομένα GCPs, διασφαλίζοντας την επιστημονική εγκυρότητα και την επαναληψιμότητα της έρευνας. Οι Over et al. (2021) αναφέρουν, ότι ο συνδυασμός UAV και SfM φωτογραμμετρίας αποτελεί πλέον ένα ολοκληρωμένο και ιδιαίτερα αξιόπιστο εργαλείο για τη σύγχρονη αρχαιολογική τεκμηρίωση και τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Over, et al. 2021, σ. 45, Wright, 2023, σ. 9).

Κεφάλαιο Πέμπτο - Φωτογραμμετρική αποτύπωση των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων σε ιδιωτικό οικόπεδο στα Μέγαρα Αττικής.

5.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης. Η ιστορική πορεία των Μεγάρων, η λατρεία της Δήμητρας και τα μεγαρικά υπόγεια.

Τα Μέγαρα αποτελούν μία από τις αρχαιότερες πόλεις του ελλαδικού χώρου. Σύμφωνα με τη Λερίου (2010), η ιστορική τους πορεία ξεκινά από την προϊστορική εποχή, με τα πρώτα ίχνη ανθρώπινης δραστηριότητας να ανάγονται περίπου στα μέσα της 3ης χιλιετίας π.Χ. Η συνένωση πέντε κωμών περί τα μέσα του 8ου αιώνα π.Χ. σηματοδότησε την ίδρυση των Μεγάρων. Στην Αρχαϊκή και Κλασική εποχή, η πόλη κυριάρχησε ως σπουδαία ναυτική δύναμη και ανέπτυξε έντονη αποικιστική δραστηριότητα, δημιουργώντας κορυφαίες αποικίες, όπως το Βυζάντιο. Η μετέπειτα οικονομική της άνθηση άνοιξε το δρόμο για τη δημιουργία μνημειακών υποδομών που άλλαξαν την εικόνα της πόλης, με κορυφαίο παράδειγμα το Ευπαλίνειο υδραγωγείο. Παρά τις σοβαρές καταστροφές που υπέστησαν κατά τον Πελοποννησιακό Πόλεμο, λόγω του «Μεγαρικού Ψηφίσματος», ο 4ος αιώνας π.Χ. έφερε νέα πνευματική άνθηση. Η ίδρυση της Μεγαρικής Σχολής από το φιλόσοφο Ευκλείδη και η ευημερία της πόλης καταδεικνύουν την πνευματική και οικονομική της ανάπτυξη. Όπως αναφέρει η Λερίου (2010), ακολούθησαν διαδοχικές κατακτήσεις, από το Δημήτριο τον Πολιορκητή και τους Ρωμαίους, έως το 395 μ.Χ. όπου η καταστροφική επιδρομή των Βησιγόθων επέφερε το οριστικό τέλος της ιστορικής της πορείας (Λερίου, 2010, σσ. 59-61, Μέγαρα: Κοιτίδα Ελληνισμού, 2022, σ. 25, Μπαζιωτοπούλου-Βαλαβάνη, 2008, σ. 20).

Η ιστορία των Μεγάρων και η ονοματοδοσία τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη λατρεία της θεάς Δήμητρας. Σύμφωνα με τον περιηγητή Πausανία (Παπαχατζής, 2004), ο μυθικός βασιλιάς Καρ εισήγαγε τη λατρεία της θεάς και κατασκεύασε τις πρώτες ιερές κρύπτες, τα λεγόμενα «μέγαρα», από τα οποία έλαβε το όνομά της η πόλη. Η ετυμολογία της λέξης «μέγαρο» συνδεόταν άμεσα με την έννοια του φυσικού ή τεχνητού χάσματος και της υπόγειας κοιλότητας, όπου έριχναν τις προσφορές. Τα υπόγεια αυτά είχαν ένα μοναδικό, διπλό ρόλο. Κατά την καθημερινή ζωή, λειτουργούσαν ως χρηστικά κελάρια για

τη μακροχρόνια φύλαξη και προστασία των σιτηρών, λόγω των σταθερών κλιματολογικών συνθηκών του υπεδάφους. Σύμφωνα με τη Μπαζιωτοπούλου-Βαλαβάνη (2008), κατά τη διάρκεια των Θεσμοφορίων, της μεγάλης φθινοπωρινής αγροτικής γιορτής προς τιμήν της Δήμητρας, μετατρέπονταν σε χώρους μυστικιστικής λατρείας. Στο πλαίσιο της τελετουργίας, οι πιστοί έριχναν στα βάραθρα ζωντανά χοιρίδια και ζυμαρένια ομοιώματα φαλλών ως σύμβολα ευγονίας. Μετά την αποσύνθεσή τους, ειδικά επιφορτισμένες γυναίκες κατέβαιναν στις κρύπτες, συνέλεγαν τα υπολείμματα και τα τοποθετούσαν σε βωμούς. Στη συνέχεια, οι αγρότες τα ανακάτευαν με το σιτάρι της σποράς, μια πράξη που θεωρούνταν απαραίτητη για την εξασφάλιση πλούσιας συγκομιδής (Λερίου, 2010, σ. 59, Μέγαρο: Κοιτίδα Ελληνισμού, 2022, σ. 25, Μπαζιωτοπούλου-Βαλαβάνη, 2008, σ. 20, Παπαχατζής, 2004, σσ. 487-488).

Όπως αναφέρει η Λερίου (2010), οι σωστικές ανασκαφές που πραγματοποιούνται στον ιστό της σύγχρονης πόλης φέρνουν στο φως οικιστικά κατάλοιπα των κλασικών και ελληνιστικών χρόνων, τα οποία φανερώνουν μια εξαιρετική κατασκευαστική τεχνική. Έχουν εντοπιστεί περισσότερες από 100 τέτοιες υπόγειες κατασκευές, γνωστές ως «μεγαρικά υπόγεια». Ενώ αρχικά (7ος αιώνας π.Χ.) είχαν τη μορφή απλών κυκλικών λάκκων, κατά την Κλασική περίοδο (5ος - 4ος αι. π.Χ.) εξελίχθηκαν σε μνημειώδεις υπόγειους θαλάμους με κλιμακοστάσιο, λίθινη στέγη και εξαιρετική τοιχοποιία. Οι τοιχοδομίες των αρχαίων κτισμάτων χαρακτηρίζονται από υποδειγματική αρμολογία, με τη χρήση ορθογώνιων πωρόλιθων και εγχώριων ασβεστόλιθων, αναδεικνύοντας το υψηλό επίπεδο των τοπικών μαστόρων (Λερίου, 2010, σ. 59, Μέγαρο: Κοιτίδα Ελληνισμού, 2022, σ. 25, Μπαζιωτοπούλου-Βαλαβάνη, 2008, σ. 20).

5.1.1 Η σωστική ανασκαφή σε οικόπεδο ιδιώτη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών (Ο.Τ. 285) στην πόλη των Μεγάρων.

Το οικόπεδο, φερόμενης ιδιοκτησίας Α. Ι. και Β. Φουρτουλάκη, στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών (Ο.Τ. 285), στα Μέγαρο, βρίσκεται ως προς την αρχαία τοπογραφία των Μεγάρων βόρεια της ακρόπολης της Καρίας, κοντά στο οχυρωματικό τείχος. Κατά τη σωστική ανασκαφή του 2025 βρέθηκαν σημαντικά οικιστικά κατάλοιπα με τουλάχιστον δύο φάσεις κατοίκησης, από την Κλασική ως την Ελληνιστική περίοδο. Ειδικότερα, στο νότιο τμήμα του οικοπέδου εντοπίστηκαν τοίχοι, λάκκοι και ένας τάφος,

ενώ το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο βόρειο τμήμα, όπου διερευνήθηκαν δύο μεγάрика υπόγεια.

Το ανατολικό υπόγειο παρουσιάζει δύο φάσεις. Η αρχική (μέσα του 5ου αι. π.Χ.) περιλάμβανε τέσσερις τοίχους χτισμένους κατά το ορθογώνιο ισόδομο σύστημα, χωρισμένους σε δύο ανισομερή τμήματα. Κατά την Ελληνιστική περίοδο (τέλη 4ου -αρχές 3ου αι. π.Χ.), ο χώρος αναδιαμορφώθηκε και μετασκευάστηκε πιθανώς σε δεξαμενή, καθώς εντοπίστηκαν λαξευμένο πηγάδι και πήλινοι αγωγοί μεταφοράς νερού. Αντίστοιχα, το δυτικό υπόγειο χρονολογείται επίσης στην Ελληνιστική περίοδο. Το δάπεδό του ήταν το φυσικό έδαφος, ενώ στο κέντρο του αποκαλύφθηκε ένας μονολιθικός πεσσός από κογχυλιάτη λίθο, ο οποίος χρησίμευε για τη στήριξη της οροφής.

5.1.2 Η φωτογραμμετρική αποτύπωση της ανασκαφής.

Η φωτογραμμετρική αποτύπωση της ανασκαφής διενεργήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025 από το Γραφείο Μελετών Topologia και τον τοπογράφο κ. Ξ. Λίτσα (εξωτερικό συνεργάτη), υπό την εποπτεία της αρχαιολόγου της ΕΦΑΔΑ κ. Χ. Καζαζάκη. Η διαδικασία ψηφιακού σχεδιασμού και τεκμηρίωσης ανατέθηκε στην εξωτερική συνεργάτιδα, κ. Γ. Δαλακούρα¹. Καίριο σημείο και ουσιώδη συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η προσωπική δημιουργία και παραγωγή των αναλυτικών ψηφιακών σχεδίων, όπως κατόψεων, τομών και όψεων, για τα δύο υπόγεια, τα οποία δημιουργήθηκαν με βάση τα υψηλής ακρίβειας δεδομένα των τρισδιάστατων μοντέλων. Μέσα από αυτή τη σχεδιαστική προσέγγιση κατέστη εφικτή η αναλυτική καταγραφή της δομής και των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των υπογείων χώρων, ενώ το αποτέλεσμα προσφέρει στην επιστημονική κοινότητα ένα έτοιμο προς χρήση, εξαιρετικά ακριβές υπόβαθρο, κατάλληλο για μελλοντικές αρχαιολογικές έρευνες.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η ροή εργασιών και η πρακτική υλοποίηση της εναέριας φωτογραμμετρίας, με επίκεντρο τα τεχνικά δεδομένα της αναφοράς (Processing Report) στις 31 Οκτωβρίου 2025. Μέσω σύγχρονων τεχνικών

¹ Με την παρούσα σημείωση δηλώνεται ότι μου έχει χορηγηθεί επίσημη άδεια χρήσης και μελέτης του τρισδιάστατου υλικού της σωστικής ανασκαφής στα Μέγαρα (συμβολή οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών), σύμφωνα με τη σχετική απόφαση του Υπουργείου Πολιτισμού (ΑΔΑ: 9ΖΥΤ46ΝΚΟΤ-7ΓΠ). Η πρόσβαση και η χρήση του εν λόγω ανασκαφικού υλικού πραγματοποιείται αποκλειστικά για τις ανάγκες εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας στο ΕΑΠ, τηρώντας όλους τους προβλεπόμενους όρους και τις υποχρεώσεις κατάθεσης της εργασίας στους αρμόδιους φορείς (ΕΦΑ Δυτικής Αττικής, Αρχαιολογικό Μουσείο Μεγάρων, ΔΠΚΑ).

φωτογραμμετρίας κοντινής απόστασης και αλγορίθμων Structure from Motion (SfM), δημιουργείται ένα πιστό ψηφιακό αντίγραφο της ανασκαφής, με απώτερο σκοπό την άρτια αρχαιολογική τεκμηρίωση και τη λεπτομερή σχεδίαση του ανασκαφικού χώρου.

5.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Για την τρισδιάστατη φωτογραμμετρική τεκμηρίωση της ανασκαφής, χρησιμοποιήθηκε μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV) τύπου FC7203, εφοδιασμένο με ψηφιακή κάμερα. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός διαθέτει φακό εστιακής απόστασης 4.49 mm, ενώ ο αισθητήρας του προσφέρει ανάλυση 4000 x 2250 pixels με φυσικό μέγεθος εικονοστοιχείου στα 1.76 x 1.76 μm (Πίν. 6). Λόγω έλλειψης αρχικής προβαθμονόμησης της κάμερας (Frame/Precalibrated: No), τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού αποκαταστάθηκαν μέσω της ενσωματωμένης διαδικασίας αυτοβαθμονόμησης (self-calibration) του λογισμικού (Processing Report, 2025, σ. 2).

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC7203 (4.49mm)	4000 x 2250	4.49 mm	1.76 x 1.76 μm	No

Πίν. 6. Τεχνικά χαρακτηριστικά και εσωτερικά στοιχεία του αισθητήρα της κάμερας FC7203.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), για τον προσδιορισμό των Γεωδαιτικών Σημείων Ελέγχου (GCPs) στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε τοπογραφικός εξοπλισμός GNSS (Global Navigation Satellite System) διπλής συχνότητας, ο οποίος εξασφάλισε τη σύνδεση των μετρήσεων με το κρατικό δίκτυο αναφοράς. Η επεξεργασία του συνόλου των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Agisoft Metashape Professional. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος κρίθηκε απαραίτητη λόγω των αυξημένων απαιτήσεων της αρχαιολογικής τεκμηρίωσης, η οποία προϋποθέτει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και τη δυνατότητα λεπτομερούς αποτύπωσης μικρής κλίμακας αρχιτεκτονικών στοιχείων. Η διαχείριση και επεξεργασία του μεγάλου όγκου δεδομένων επιτεύχθηκε σε υπολογιστικό σύστημα υψηλής επίδοσης, με περιβάλλον εργασίας Windows 64-bit και τη χρήση του λογισμικού Agisoft Metashape Professional (έκδοση

1.6.4 build 10928). Το σύστημα διαθέτει επεξεργαστή (CPU) AMD Ryzen 7 2700X Eight-Core, μνήμη RAM 47,93 GB, καθώς και σε κάρτα γραφικών (GPU) NVIDIA GeForce GTX 1060 με αυτόνομη μνήμη 3 GB (Processing Report, 2025, σ. 10).

5.3 Σχεδιασμός αποστολής πτήσης.

Η επιτυχία μιας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σωστό σχεδιασμό της αποστολής πτήσης. Όπως παρουσιάζεται από τα δεδομένα του Processing Report (2025), στην παρούσα αποτύπωση πραγματοποιήθηκε αεροφωτογράφιση από χαμηλό ύψος με σκοπό την επίτευξη υψηλής εδαφικής ανάλυσης (Ground Sampling Distance - GSD). Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας αποτυπώνει την ελάχιστη δυνατή πραγματική επιφάνεια εδάφους, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη λεπτομέρεια. Η μέση απόσταση πτήσης του UAV από την ανασκαφή ήταν περίπου 5,81 m, ενώ η συνολική καλυπτόμενη έκτασή της ανήλθε σε 440 m² (Πίν. 7). Η συγκεκριμένη επιλογή υψομέτρου έγινε μεθοδικά με στόχο μια τελική ανάλυση 1,82 mm/pixel, τιμή που κρίνεται εξαιρετικά υψηλή για τις απαιτήσεις της αρχαιολογικής τεκμηρίωσης, καθώς κάθε pixel αντιστοιχεί σε λιγότερο από δύο χιλιοστά πραγματικής επιφάνειας, καθιστώντας δυνατή την ευκρινή καταγραφή των λεπτομερειών της αρχαίας κατασκευής (Processing Report, 2025, σ. 2).

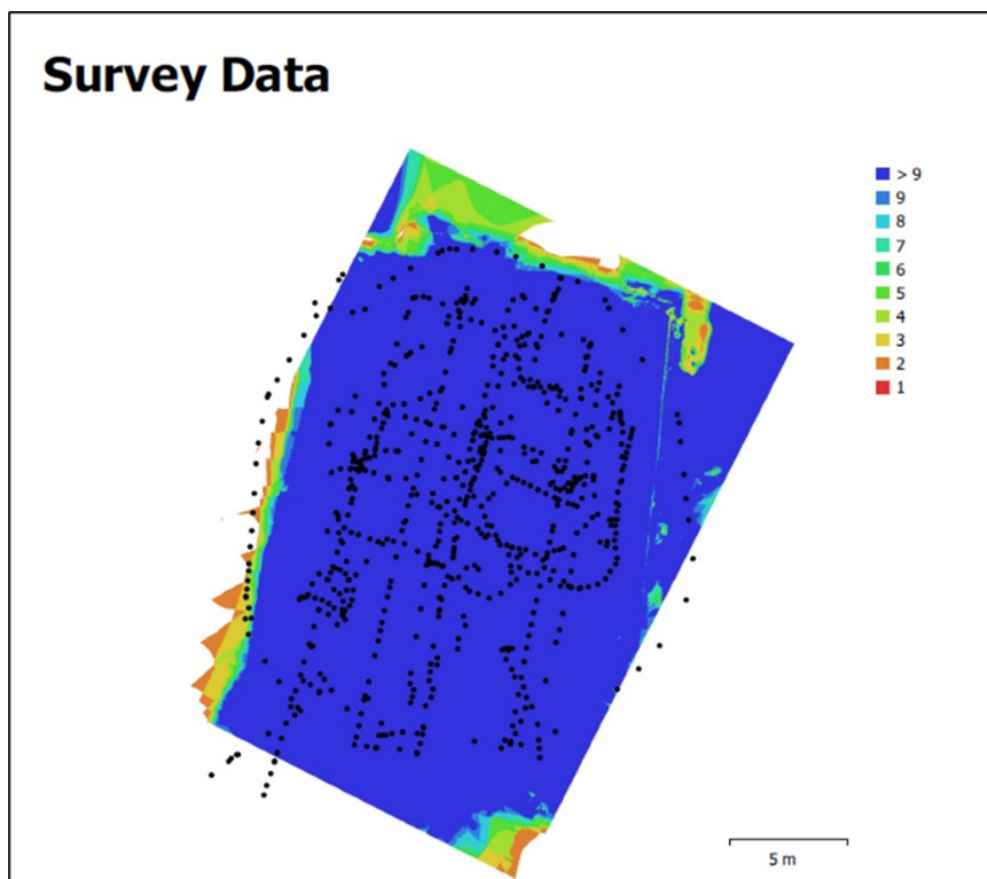
Number of images:	716	Camera stations:	716
Flying altitude:	5.81 m	Tie points:	1,441,763
Ground resolution:	1.82 mm/pix	Projections:	3,887,730
Coverage area:	440 m ²	Reprojection error:	0.546 pix

Πίν. 7. Συνοπτικά στοιχεία και παράμετροι της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας.

Ο σχεδιασμός της πτήσης αποτέλεσε το κρίσιμότερο στάδιο για την εξασφάλιση της γεωμετρικής συνοχής του τελικού μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη το ιδιαίτερο ανάγλυφο και το μεγάλο βάθος των δύο υπογείων. Λόγω της ανάγκης για λεπτομερή καταγραφή των κατακόρυφων τοιχωμάτων, επιλέχθηκε μια σύνθετη στρατηγική πτήσης. Κατά το σχεδιασμό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εξασφάλιση επαρκούς επικάλυψης μεταξύ των Διπλωματική Εργασία

διαδοχικών φωτογραφιών, η οποία σχεδιάστηκε σε πολύ υψηλά ποσοστά ,άνω του 80% κατά μήκος και κατά πλάτος της πτήσης. Η υψηλή επικάλυψη αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη αναγνώριση κοινών χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων και τη σωστή λειτουργία των αλγορίθμων Structure from Motion (SfM) (Processing Report, 2025, σ. 2).

Σύμφωνα με τα στοιχεία, του Processing Report (2025), πραγματοποιήθηκαν συνολικά 716 θέσεις λήψης, οι οποίες κάλυψαν πλήρως όλη την ανασκαφική περιοχή (Πίν. 7). Η μεγάλη πυκνότητα λήψεων συνέβαλε στην παραγωγή ιδιαίτερα λεπτομερούς νέφους σημείων και στη μείωση πιθανών γεωμετρικών σφαλμάτων κατά την ανακατασκευή της επιφάνειας. Παράλληλα, η επιλογή των διαδρομών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται σκιάσεις, τυφλά σημεία και αποκρύψεις εντός των υπογείων χώρων, παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου.



Εικ. 32. Τοποθεσίες λήψης καμερών και διάγραμμα επικάλυψης φωτογραφιών (Image Overlap). Το έντονο μπλε χρώμα υποδεικνύει την κάλυψη κάθε σημείου από περισσότερες από 9 εικόνες.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα ελέγχου επικάλυψης (Εικ. 32), η εκτεταμένη επικάλυψη εξασφάλισε την αποτύπωση κάθε σημείου της ανασκαφής από τουλάχιστον εννέα διαφορετικές οπτικές γωνίες. Συγκεκριμένα, για τη συντριπτική πλειονότητα της περιοχής, ο δείκτης επικάλυψης ξεπέρασε τις 9 διαδοχικές εικόνες ανά σημείο, ένας βαθμός πλεονασμού που κρίνεται απαραίτητος για την ομαλή λειτουργία των αλγορίθμων Structure-from-Motion (SfM) (Processing Report, 2025, σ. 2).

5.4 Συλλογή φωτογραφικών δεδομένων.

Η συλλογή των φωτογραφικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, όπου το UAV εκτέλεσε αυτοματοποιημένα πλέγματα πτήσης παράλληλα με χειροκίνητες λήψεις για την πληρέστερη καταγραφή των εσωτερικών παρειών των υπογείων. Όπως προαναφέρθηκε, συλλέχθηκαν και εισήχθησαν προς επεξεργασία 716 ψηφιακές εικόνες (Εικ. 33 & Εικ. 34).



Εικ. 33. Αεροφωτογραφία του ανασκαφικού χώρου (άποψη από βόρεια προς νότια).

Το σύνολο των εικόνων αυτών αξιοποιήθηκε πλήρως, με τον αριθμό των τελικών σταθμών κάμερας να ταυτίζεται απόλυτα με τις 716 εισαχθείσες λήψεις, γεγονός που αποδεικνύει ότι

καμία φωτογραφία δεν απορρίφθηκε λόγω θολότητας ή χαμηλής ευκρίνειας. Κατά τη συλλογή, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες φωτισμού. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), η φωτογράφιση έγινε σε ώρες διάχυτου φωτισμού για τον περιορισμό των σκληρών σκιών και των υψηλών αντιθέσεων του μεσημεριανού ήλιου, που θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την ποιότητα της μεταγενέστερης ψηφιακής υφής. Οι 716 φωτογραφίες παρείχαν συνολικά 1.441.763 σημεία σύνδεσης (tie points) και 3.887.730 προβολές (projections) των χαρακτηριστικών σημείων, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή ποιότητα και την επάρκεια των συλλεχθέντων δεδομένων (Πίν. 8) (Processing Report, 2025, σσ. 2,10).



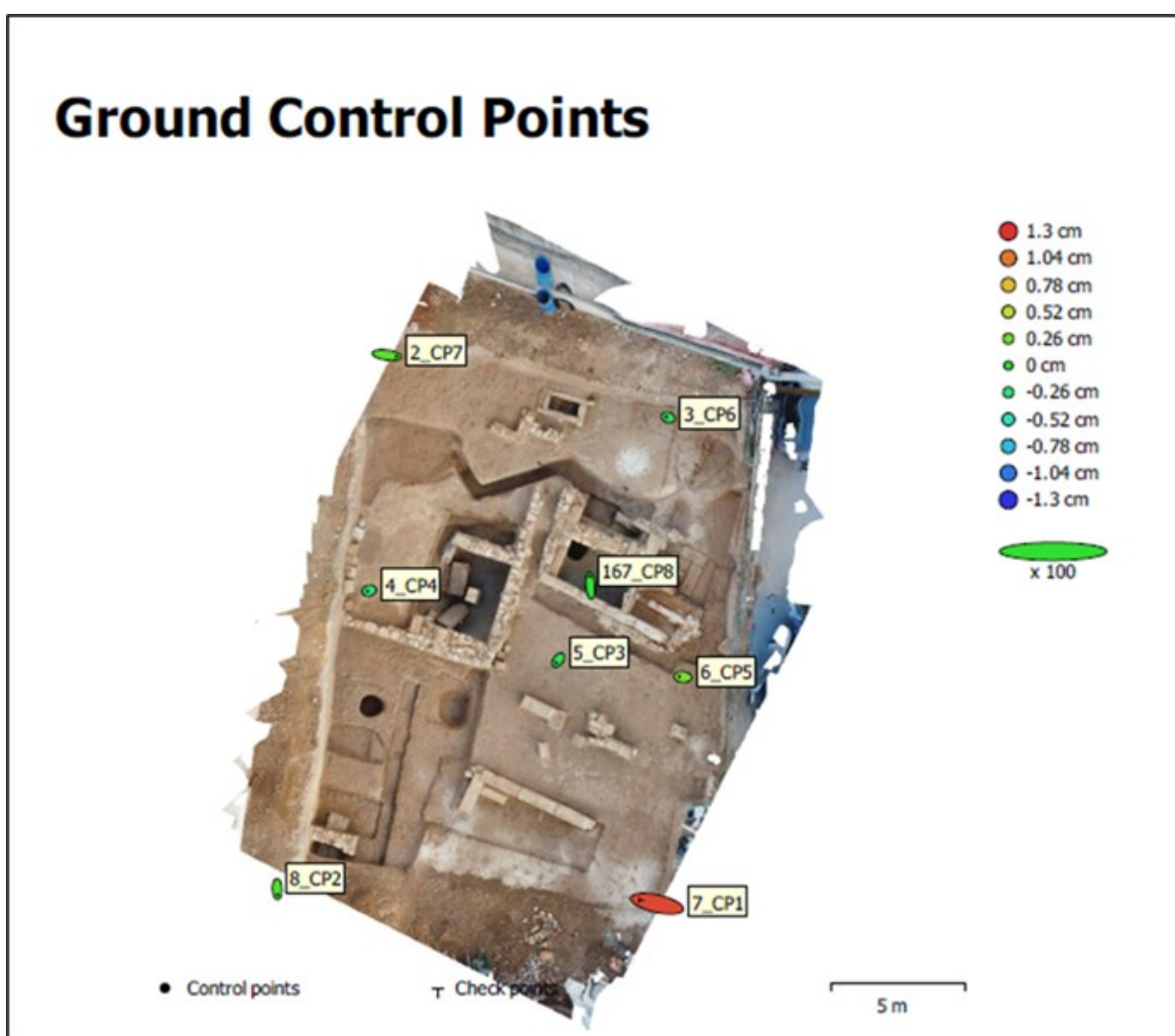
Εικ. 34. Αεροφωτογραφία του ανασκαφικού χώρου (άποψη από νότια προς βόρεια).

5.5 Γεωαναφορά μέσω σημείων ελέγχου.

Η γεωαναφορά του τρισδιάστατου μοντέλου στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87), γνωστό και ως GGRS87/Greek Grid (EPSG::2100) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φωτοσταθερών ή σημείων εδάφους (Ground Control Points - GCPs). Συνολικά τοποθετήθηκαν και μετρήθηκαν με τοπογραφικές μεθόδους υψηλής

ακρίβειας (RTK GNSS) 8 σημεία (Markers) στο χώρο της ανασκαφής (Εικ. 35) (Processing Report, 2025, σ. 5).

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), τα σημεία αυτά διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, στα Σημεία Ελέγχου (Control Points) όπου χρησιμοποιήθηκαν 7 σημεία (2_CP7, 3_CP6, 4_CP4, 5_CP3, 6_CP5, 8_CP2, 167_CP8) (Πίν. 8) για τον υπολογισμό των μετασχηματισμών κλίμακας, στροφής και μετάθεσης του μοντέλου, καθώς και για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κάμερας, και στο Σημείο Ελέγχου Ακρίβειας (Check Point), όπου χρησιμοποιήθηκε το Σημείο 1 (Πίν. 9).



Εικ. 35. Διάγραμμα χωρικής κατανομής των Σημείων Ελέγχου (Control Points) και του Σημείου Ελέγχου Ακρίβειας (Check Point) στο χώρο της ανασκαφής

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
2_CP7	0.725136	-0.0981017	0.160592	0.749157	0.537 (8)
3_CP6	-0.142098	0.0482686	-0.175526	0.230935	0.578 (5)
4_CP4	-0.124429	-0.0367367	-0.286391	0.314407	1.013 (37)
5_CP3	-0.146745	-0.192333	-0.116684	0.268591	1.302 (27)
6_CP5	-0.262734	0.0223431	0.285849	0.388893	0.985 (21)
8_CP2	0.0180773	-0.425362	0.111097	0.440002	0.522 (2)
167_CP8	-0.0587565	0.681897	-0.0282974	0.685009	0.919 (7)
Total	0.30609	0.315484	0.187878	0.478037	1.035

Πίν. 8. Σημεία ελέγχου.

Το σημείο 7 (Πίν. 9) εξαιρέθηκε σκόπιμα από τη διαδικασία της επίλυσης και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ως ανεξάρτητος μάρτυρας για την αξιολόγηση της τελικής γεωμετρικής ακρίβειας του μοντέλου. Η χωρική κατανομή των σημείων κάλυψε ομοιόμορφα την περίμετρο και το εσωτερικό των δύο υπογείων δομών, εξασφαλίζοντας ότι η γεωμετρική παραμόρφωση εκμηδενίστηκε σε όλους τους άξονες (X, Y, Z) (Processing Report, 2025, σ. 5).

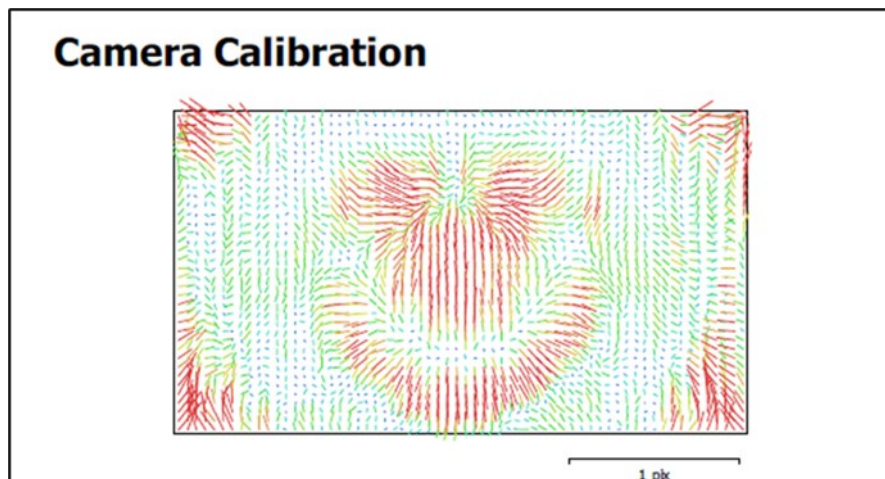
Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
7_CP1	-1.33797	0.295864	1.21981	1.83456	0.843 (5)
Total	1.33797	0.295864	1.21981	1.83456	0.843

Πίν. 9. Σημείο Ελέγχου Ακρίβειας.

5.6 Φωτογραμμετρική επεξεργασία.

Η φωτογραμμετρική ανάλυση των δεδομένων ακολούθησε την τυπική ροή επεξεργασίας Structure from Motion (SfM) στο Agisoft Metashape, όπως αναλύθηκε στα παραπάνω κεφάλαια. Σύμφωνα με το Processing Report (2025), η επεξεργασία ξεκίνησε με τη φάση της ευθυγράμμισης των εικόνων (Image Alignment) με επιλογή της μέγιστης δυνατής ποιότητας (Accuracy Highest). Στο στάδιο αυτό, αναλύθηκαν οι 716 εικόνες, όπου

και εντοπίστηκαν τα χαρακτηριστικά σημεία (Key Points), προχωρώντας στην εύρεση κοινών σημείων μεταξύ των επικαλυπτόμενων φωτογραφιών. Παράλληλα, ενεργοποιήθηκαν οι επιλογές Generic preselection και Adaptive camera model fitting. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε ένα αρχικό Αραιό Νέφος Σημείων (Sparse Point Cloud) αποτελούμενο από 1,441,763 συνδετικά σημεία (Tie Points). Η μέση πολλαπλότητα των σημείων (Average tie point multiplicity) ανήλθε σε 2.98, που σημαίνει ότι κάθε τρισδιάστατο σημείο αναγνωρίστηκε κατά μέσο όρο σε σχεδόν 3 διαφορετικές φωτογραφίες. Κατά τη φάση της βελτιστοποίησης (Optimization), υπολογίστηκαν οι ακριβείς τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του φακού (f , c_x , c_y) καθώς και των συντελεστών ακτινικής (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) και εφαπτομενικής παραμόρφωσης (p_1 , p_2) (Πίν. 10), διορθώνοντας τα σφάλματα του μη-προβαθμονομημένου φακού της κάμερας FC7203 που είχαν εντοπιστεί αρχικά (Εικ. 36) (Processing Report, 2025, σσ. 3,10).



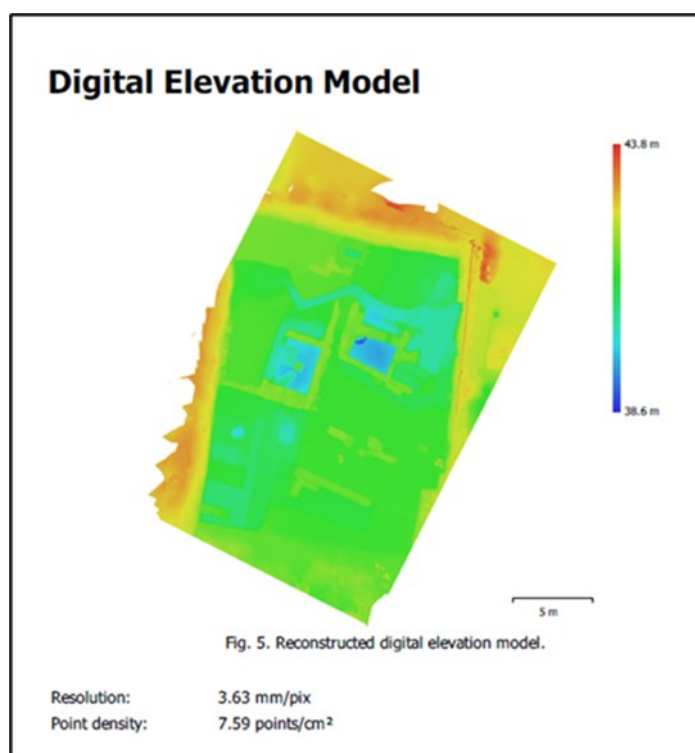
Εικ. 36. Διάγραμμα υπολειμματικών σφαλμάτων (residuals) και βαθμονόμησης του φακού της κάμερας.

Μετά την ολοκλήρωση του γεωμετρικού σχεδιασμού του, ενεργοποιήθηκε το στάδιο της πυκνής αντιστοίχισης (Dense Matching). Το λογισμικό προχώρησε στη δημιουργία χαρτών βάθους (Depth Maps) για κάθε μία από τις 716 εικόνες, χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση υψηλής ποιότητας (Quality High) και ήπιου φιλτραρίσματος (Filtering mode Mild). Όπως καταγράφεται στο Processing Report (2025), το αποτέλεσμα της πυκνής αντιστοίχισης ήταν η παραγωγή ενός εντυπωσιακού πυκνού νέφους σημείων (Dense Point Cloud) το οποίο περιλαμβάνει 60,744,311 σημεία. Κάθε σημείο φέρει τη δική του τρισδιάστατη πληροφορία θέσης (X , Y , Z), καθώς και το πραγματικό του χρώμα (RGB)

από την ανασκαφή. Αυτό το εξαιρετικά πυκνό σύνολο δεδομένων αποτέλεσε τη βάση για όλα τα επόμενα παράγωγα προϊόντα υψηλής ανάλυσης (Εικ. 37) (Processing Report, 2025, σ. 10).

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3034.25	0.028	1.00	0.02	-0.58	-0.13	0.03	-0.12	0.17	-0.15	0.12	0.01	-0.42
Cx	5.55621	0.024		1.00	-0.02	-0.01	0.19	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.91	-0.02
Cy	24.5205	0.027			1.00	-0.25	-0.03	-0.07	0.03	-0.03	0.04	-0.01	0.73
B1	-2.56089	0.0065				1.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	-0.02	0.10
B2	0.225444	0.0057					1.00	0.01	-0.00	0.00	-0.00	-0.02	-0.03
K1	0.0328607	4.5e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	-0.00	-0.08
K2	-0.212352	0.00031							1.00	-0.99	0.95	0.00	0.03
K3	0.499826	0.00082								1.00	-0.99	-0.00	-0.03
K4	-0.409482	0.00076									1.00	0.00	0.03
P1	0.000407892	2.5e-06										1.00	-0.01
P2	1.51495e-05	2.3e-06											1.00

Πίνακας 10. Συντελεστές βαθμονόμησης και πίνακας συσχέτισης.



Εικ. 37. Το παραχθέν Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM) της ανασκαφής.
Διπλωματική Εργασία

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), το τρισδιάστατο πολυγωνικό μοντέλο (Mesh) δημιουργήθηκε με τη μέθοδο χωρικής ανασύνθεσης αυθαίρετης γεωμετρίας (Arbitrary Surface type) και ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκε το πυκνό νέφος σημείων (Dense Cloud), μια προσέγγιση ενδεδειγμένη για την τεκμηρίωση αρχαιολογικών ανασκαφών. Το τελικό πλέγμα αποτελείται από 10,090,236 τρίγωνα και 5,052,501 κορυφές. Το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (DEM) παρήχθη από το πυκνό νέφος σημείων έχει διάσταση 7,686 x 8,567 pixels και παρουσιάζει χωρική ανάλυση 3.63 mm/pixel με μια εξαιρετική πυκνότητα σημείων που αγγίζει τα 7.59 points/cm². Για την οπτικοποίηση του Mesh, εφαρμόστηκε ψηφιακή υφή διάστασης 4,096 x 4,096 pixels με blending mode Mosaic. Τέλος, κατασκευάστηκε το τελικό ορθομωσαϊκό υψηλής ανάλυσης, μεγέθους 14,092 x 17,038 pixels. Η διαδικασία της ανάμειξης βασίστηκε στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), με ενεργοποιημένη τη λειτουργία πλήρωσης κενών (Processing Report, 2025, σσ. 7,10).

5.7 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας.

Η ψηφιακή τρισδιάστατη αποτύπωση των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων στην περιοχή των Μεγάρων συνιστά μια άρτια επιστημονική μέθοδο τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η επιτυχία της μεθοδολογίας φαίνεται από τον εξαιρετικό συνδυασμό της σωστικής αρχαιολογίας με τη φωτογραμμετρία SfM. Μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού, της αυστηρής γεωαναφοράς και της ποιοτικής επεξεργασίας δεδομένων, επιτεύχθηκε η άριστη γεωμετρική ακρίβεια και ευκρίνεια που απαιτείται για τη μόνιμη ψηφιακή τεκμηρίωση των μοναδικών αυτών υπογείων.

Ειδικότερα, η χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV) με κάμερα FC7203 σε εξαιρετικά χαμηλό ύψος πτήσης (5,81 m) εξασφάλισε μια εντυπωσιακή εδαφική ανάλυση 1,82 mm/pixel, επιτρέποντας την πλήρη καταγραφή των κατακόρυφων τοιχωμάτων των υπογείων. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), ο σχεδιασμός της με υψηλά ποσοστά επικάλυψης άνω του 80% και η εκτέλεση 716 λήψεων με συνθήκες διάχυτου φωτισμού απέτρεψαν τη δημιουργία σκιών και τυφλών σημείων και εξασφάλισαν μια υψηλής ποιότητας ψηφιακή υφή. Η γεωαναφορά στο σύστημα ΕΓΣΑ '87 μέσω 8 σημείων εδάφους (Control Points) μετρημένων με RTK GNSS, σε συνδυασμό με τη χρήση

ενός ανεξάρτητου σημείου ως μάρτυρα ακρίβειας (Check Point), εγγυάται τη γεωμετρική εγκυρότητα και την εξάλειψη σφαλμάτων παραμόρφωσης. Τέλος, η επεξεργασία στο Agisoft Metashape Professional παρήγαγε ένα πυκνό νέφους σημείων εκατομμυρίων θέσεων, οδηγώντας σε ένα λεπτομερές πολυγωνικό μοντέλο εκατομμυρίων τριγώνων, καθώς και σε ένα Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (DEM) υψηλής ανάλυσης. Συμπερασματικά, η διαδικασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία, δημιουργώντας ένα υψηλής πιστότητας ψηφιακό αντίγραφο για την τεκμηρίωση της ανασκαφής και για τη μελλοντική μελέτη του ανασκαφικού συνόλου.

Κεφάλαιο Έκτο – Αποτελέσματα φωτογραμμετρικής αποτύπωσης των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων.

6.1 Παρουσίαση παραγόμενων προϊόντων.

Η φωτογραμμετρική επεξεργασία 716 ψηφιακών εικόνων με το πρόγραμμα Agisoft Metashape Professional οδήγησε στη δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων υψηλής ευκρίνειας. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν πλέον ένα μόνιμο, αντικειμενικό και μετρήσιμο ψηφιακό αρχείο της σωστικής ανασκαφής.

6.1.1 Ορθοφωτοχάρτης.



Εικ. 38. Ο ορθοφωτοχάρτης της ανασκαφής.

Το βασικό δισδιάστατο προϊόν της επεξεργασίας είναι ο ψηφιακός ορθοφωτοχάρτης της ανασκαφής (Εικ. 38). Ο ορθοφωτοχάρτης παράχθηκε με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάμειξης μωσαϊκού και με ενεργοποιημένη την πλήρωση κενών. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), έχει τελικές διαστάσεις 14.092 x 17.038 pixels και προσφέρει πλήρη χρωματική πληροφορία 3 ζωνών (RGB, uint8), αποτυπώνοντας με απόλυτη γεωμετρική ορθότητα και χωρίς προοπτικές παραμορφώσεις κάθε λεπτομέρεια της τοιχοποιίας του εσωτερικού των δύο υπογείων και των ανασκαφικών ευρημάτων (Εικ. 38) (Processing Report, 2025, σ. 10).

6.1.2 3D μοντέλα.



Εικ. 39. Τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο (3D model) της ανασκαφής. Παραγωγή μέσω φωτογραμμετρικής αποτύπωσης από την Topologia.gr.

Παράλληλα με την παραγωγή ορθοφωτοχάρτη δημιουργήθηκε τρισδιάστατο φωτορεαλιστικό μοντέλο υψηλής ανάλυσης (Εικ. 39). Όπως σημειώνεται στο Processing Report (2025), η μέθοδος ανακατασκευής βασίστηκε σε πυκνό νέφος σημείων που

περιλάμβανε περισσότερα από 60 εκατομμύρια σημεία, ενώ το τελικό πλέγμα αποτελείται από 10.090.236 τριγωνικές επιφάνειες και 5.052.501 κορυφές. Το τελικό 3D μοντέλο αποδίδει με εξαιρετική ακρίβεια τη γεωμετρία των υπόγειων χώρων και των ιδιαίτερων μορφολογικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την αρχική κατασκευή αλλά και τη μεταγενέστερη φθορά. Επίσης, η δυνατότητα περιστροφής και εξερεύνησης του μοντέλου από οποιαδήποτε οπτική γωνία καθιστά το παραγόμενο προϊόν εξαιρετικά χρήσιμο τόσο για τη μελέτη της ανασκαφής όσο και για ερευνητικούς σκοπούς (Processing Report, 2025, σ.10).

6.2 Αξιολόγηση ακρίβειας.

Η αξιολόγηση της ακρίβειας αποτελεί βασικό στάδιο κάθε φωτογραμμετρικής εφαρμογής, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της αξιοπιστίας των παραγόμενων δεδομένων. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), για τη γεωαναφορά και τη γεωμετρική ακρίβεια του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν επτά σημεία ελέγχου (Ground Control Points) και ένα ανεξάρτητο σημείο ελέγχου (Check Point), καταναμεμένα στον χώρο αποτύπωσης (βλ. Εικ. 35). Η πραγματική γεωμετρική ακρίβεια αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των επτά επίγειων σημείων ελέγχου, τα οποία έδειξαν συνολικό RMSE για τα σημεία ελέγχου ίσο με 0,48 cm (Πίν. 11), γεγονός που υποδηλώνει εξαιρετική προσαρμογή του φωτογραμμετρικού μοντέλου στις πραγματικές συντεταγμένες πεδίου.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	0.30609	0.315484	0.187878	0.43957	0.478037

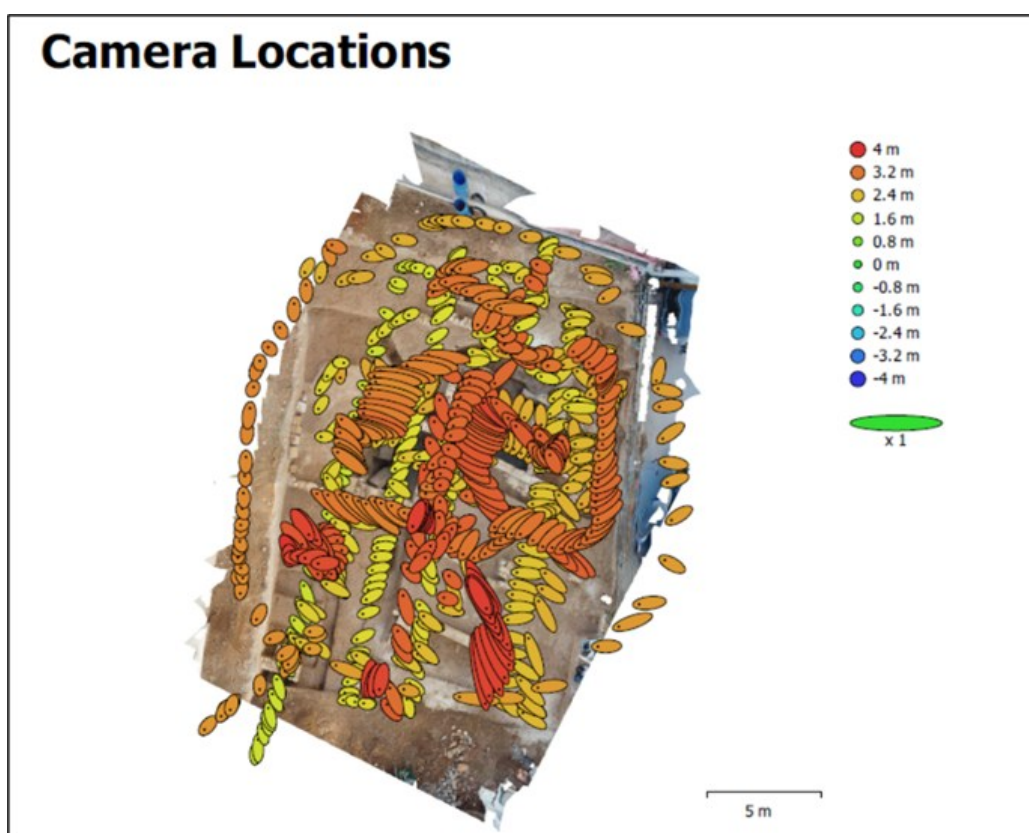
Πίν. 11. Σφάλμα Σημείων Ελέγχου (Control Points RMSE).

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	1.33797	0.295864	1.21981	1.37029	1.83456

Πίν. 12. Σφάλμα Σημείου Ελέγχου Ακρίβειας (Check Point RMSE).

Αντίστοιχα, το ανεξάρτητο σημείο ελέγχου 1 παρουσίασε συνολικό σφάλμα 1,83 cm (Πίν. 12), τιμή η οποία θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητική για εφαρμογές αρχαιολογικής τεκμηρίωσης υψηλής ακρίβειας. Επιπλέον, το μέσο σφάλμα επαναπροβολής υπολογίστηκε σε 0,546 pixels, ένδειξη ορθής ευθυγράμμισης των φωτογραφιών και αξιόπιστης επίλυσης του φωτογραμμετρικού μπλοκ (βλ. Εικ. 36) (Processing Report, 2025, σ. 5).

6.3 Αξιολόγηση ποιότητας.



Εικ. 40. Θέσεις κάμερας και εκτιμήσεις σφάλματος.

Το σφάλμα Z αναπαρίσταται από το χρώμα της έλλειψης. Τα σφάλματα X,Y αναπαρίστανται από το σχήμα της έλλειψης. Οι εκτιμώμενες θέσεις των καμερών σημειώνονται με μια μαύρη κουκκίδα.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.656111	0.56045	2.81826	0.862894	2.9474

Πίν. 13. Μέσο σφάλμα θέσης κάμερας. X - Ανατολικά, Y - Βόρεια, Z - Υψόμετρο.

Η υψηλή ποιότητα των τελικών δεδομένων οφείλεται άμεσα στη μεγάλη πυκνότητα και την καθαρότητα των πληροφοριών. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Processing Report (2025), η αυτόματη βαθμονόμηση της κάμερας FC7203 (4.49mm) με ανάλυση 4000 x 2250 pixels κατά την ευθυγράμμιση περιόρισε στο ελάχιστο τις παραμορφώσεις (Εικ. 40). Αυτό αποδεικνύεται από τα υπολειπόμενα σφάλματα, καθώς οι συντελεστές ακτινικής και εφαπτομενικής παραμόρφωσης (K1-K4, P1-P2) υπολογίστηκαν με εξαιρετικά χαμηλές τιμές (βλ. Πίν. 10). Επιπλέον, το πυκνό νέφος σημείων, το οποίο αποτελείται από 60,7 εκατομμύρια σημεία, χαρακτηρίζεται από υψηλή ομοιογένεια, εξασφαλίζοντας την πλήρη κάλυψη πιθανών κενών δεδομένων στους κατακόρυφους τοίχους των υπόγειων χώρων (Πίν. 13). Η χρήση του φίλτρου ghosting κατά τη δημιουργία της υψής εξάλειψε τα είδωλα και τη θόλωση που προκαλούσαν οι εναλλαγές του φωτισμού, επιτυγχάνοντας υψηλή ευκρίνεια σε όλα τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα της ανασκαφής (Processing Report, 2025, σσ. 3-4).

6.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.

Η συνδυαστική μελέτη του ορθοφωτοχάρτη, του DEM και του τρισδιάστατου μοντέλου προσφέρει μια ολοκληρωμένη αρχαιολογική και κατασκευαστική εικόνα της δομής των δύο αποκαλυφθέντων υπογείων. Τα μεγαρικά υπόγεια αποτελούν μοναδικές υπόγειες κατασκευές, άρρηκτα συνδεδεμένες με τη λατρεία της θεάς Δήμητρας και τη διεξαγωγή των Θεσμοφορίων στα αρχαία Μέγαρα. Παράλληλα, λειτουργούσαν στην καθημερινή ζωή ως χρηστικοί χώροι για τη μακροχρόνια αποθήκευση και προστασία των σιτηρών.

Η υψηλή ανάλυση του ορθοφωτοχάρτη οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα για τη δομή τους, καθώς η τοιχοποιία των δύο χώρων, κατασκευασμένη από μεγάλους ορθογώνιους λίθους, αποτελεί ένα εξαιρετικό έργο της Κλασικής και Ελληνιστικής περιόδου. Η ψηφιακή αποτύπωση τεκμηριώνει την άρτια προσαρμογή των λίθων και την εξαιρετική δόμησή τους, στοιχεία που εξασφάλιζαν τη στατική επάρκειά τους έναντι των εδαφικών πιέσεων. Παράλληλα, η ακριβής αρμολόγηση και η επιλογή των εγχώριων υλικών, όπως ο κοχυλιάτης, αντανακλούν το υψηλό επίπεδο εξειδίκευσης των τοπικών τεχνιτών. Επιπλέον, τα υψομετρικά δεδομένα επιβεβαιώνουν τη μορφολογική εξέλιξη της

δομής, η οποία μεταβλήθηκε από απλούς κυκλικούς λάκκους σε ορθογώνιους χώρους. Συμπερασματικά, η τρισδιάστατη τοπογραφική αποτύπωση αποτυπώνει επακριβώς την υφιστάμενη κατάσταση των δύο υπογείων, τεκμηριώνοντας τις φθορές, τις κλίσεις και τις αστοχίες. Με τον τρόπο αυτό, παρέχεται ένα πολύτιμο εργαλείο για το σχεδιασμό των μελλοντικών παρεμβάσεων στερέωσης και αποκατάστασης

6.5 Συνολική αποτίμηση - Πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Η εφαρμογή της φωτογραμμετρίας στα δύο αρχαία μεγαρικά υπόγεια ανέδειξε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου ως ενός σύγχρονου εργαλείου τεκμηρίωσης μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης προσέγγισης εστιάζονται στην υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, με σφάλματα μικρότερα των δύο εκατοστών, καθώς και στο μη καταστροφικό της χαρακτήρα, αφού ολοκληρώνεται χωρίς καμία επαφή με τα αρχαιολογικά κατάλοιπα. Τα παραγόμενα προϊόντα εγγυώνται την αντικειμενικότητα και την πληρότητα της αποτύπωσης, καταγράφοντας την υφιστάμενη κατάσταση του μνημείου με απόλυτη λεπτομέρεια, αναδεικνύοντας ακόμα και στοιχεία που ενδέχεται να παραλειφθούν σε ένα παραδοσιακό γραμμικό σχέδιο. Παράλληλα, η μέθοδος εξασφαλίζει ταχεία συλλογή δεδομένων στο πεδίο και τη δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών ψηφιακών παραγώγων από το ίδιο αρχικό σύνολο φωτογραφιών, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίησή τους σε μελλοντικές μελέτες.

Συνοψίζοντας, η φωτογραμμετρική αποτύπωση απέδωσε αξιόπιστα και υψηλής ποιότητας αποτελέσματα, επιβεβαιώνοντας ότι μπορεί να αποτελέσει κεντρικό άξονα για τη μελέτη, προστασία και ανάδειξη τόσο των συγκεκριμένων υπογείων όσο και της αρχαιολογικής κληρονομιάς γενικότερα. Η συνδυαστική αξιοποίηση ορθοφωτοχαρτών, ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας (DSM) και τρισδιάστατων μοντέλων (3D models) προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύστημα τεκμηρίωσης, ικανό να υποστηρίξει τόσο την τρέχουσα επιστημονική έρευνα όσο και τη μελλοντική διαχείριση των μνημείων.

Κεφάλαιο Έβδομο – Συμπεράσματα φωτογραμμετρικής αποτύπωσης των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων.

7.1 Συνοπτική αποτίμηση της μεθοδολογίας.

Η τρισδιάστατη γεωμετρική τεκμηρίωση των δύο αρχαίων μεγαρικών υπογείων σε ιδιωτικό οικόπεδο στα Μέγαρα υλοποιήθηκε μέσω προηγμένης μεθοδολογίας εναέριας φωτογραμμετρίας κοντινής απόστασης. Η γεωμετρική αποκατάσταση του χώρου βασίστηκε στη σύνθεση πυκνού νέφους εικόνων με αλγορίθμους Structure-from-Motion (SfM), συνδυάζοντας πτήσεις UAV, δορυφορικές μετρήσεις GNSS και επεξεργασία στο λογισμικό Agisoft Metashape Professional. Η πτήση στα 5,81 μέτρα προσέφερε εξαιρετική εδαφική ανάλυση, ενώ η υψηλή επικάλυψη των λήψεων (άνω του 80%) εξασφάλισε την πλήρη κάλυψη κάθε λεπτομέρειας. Η τεχνική αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς ξεπέρασε τις προκλήσεις του δύσκολου υπογείου αναγλύφου, εξαλείφοντας πλήρως τις ανεπιθύμητες σκιές και τα τυφλά σημεία

7.2 Βασικά αποτελέσματα της έρευνας.

Η επεξεργασία των 761 ψηφιακών εικόνων υψηλής ανάλυσης απέδωσε μια σειρά από ακριβή προϊόντα, δημιουργώντας ένα μόνιμο αρχείο με δυνατότητα ακριβών μετρήσεων για την ανασκαφή. Το αρχικό στάδιο της ευθυγράμμισης απέδωσε ένα αραιό πλέγμα σημείων, ενώ η πυκνή αντιστοίχιση δημιούργησε ένα πυκνό νέφος σημείων, με κάθε εικονοστοιχείο να περιέχει τρισδιάστατη πληροφορία θέσης και πραγματικό χρώμα. Ο ορθοφωτοχάρτης που δημιουργήθηκε παρείχε μια ακριβή απεικόνιση του ανασκαφικού χώρου σε σταθερή κλίμακα και χωρίς παραμορφώσεις, ενώ το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (DEM) κατέγραψε το ανάγλυφο με υψηλή πυκνότητα και ανάλυση. Αντίστοιχα, το φωτορεαλιστικό τρισδιάστατο (3D) μοντέλο αποτυπώνει αναλυτικά τη γεωμετρία των τοίχων και τις ιδιαίτερες λεπτομέρειες της ανασκαφής. Η αξιολόγηση που έγινε επιβεβαίωσε την εγκυρότητα των δεδομένων, το σφάλμα στα Γεωδαιτικά Σημεία

Ελέγχου και στο ανεξάρτητο σημείο ήταν ελάχιστο, γεγονός που καθιστά το μοντέλο υποδειγματικό για απαιτητικές αρχαιολογικές εργασίες.

7.3 Τεχνολογική και πρακτική σημασία.

Η τεχνολογική σημασία της συγκεκριμένης έρευνας έγκειται στην επιτυχή εφαρμογή και αυτοματοποίηση μιας μη καταστροφικής μεθόδου αποτύπωσης υψηλής ακρίβειας σε περιβάλλον σωστικής ανασκαφής. Η φωτογραμμετρική ροή εργασίας SfM επέτρεψε την αποκατάσταση των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας μέσω αυτοβαθμονόμησης (self-calibration), εξαλείφοντας τις ακτινικές και εφαπτομενικές παραμορφώσεις του φακού χωρίς την ανάγκη εργαστηριακής προβαθμονόμησης.

Σε πρακτικό επίπεδο, η συγκεκριμένη μεθοδολογία εξασφαλίζει ένα θεμελιώδες πλεονέκτημα που συνίσταται στην πλήρη, αντικειμενική και εξαιρετικά λεπτομερή τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης των υπογείων, διασφαλίζοντας τον μη καταστροφικό χαρακτήρα της διαδικασίας. Το παραγόμενο ψηφιακό αντίγραφο αποθανατίζει το ανασκαφικό πεδίο, διαφυλάσσοντας κρίσιμα στρωματογραφικά δεδομένα τα οποία αναπόφευκτα χάνονται κατά τη διάρκεια της ανασκαφικής διαδικασίας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των δομικών παραμορφώσεων, των κλίσεων και των καταρρεύσεων στο τρισδιάστατο μοντέλο παρέχει τη γεωμετρική βάση για τη μελέτη της στατικής συμπεριφοράς του μνημείου και τον σχεδιασμό μελλοντικών επεμβάσεων συντήρησης και αναστήλωσης.

7.4 Πρακτικές εφαρμογές στην ψηφιακή αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων. Η Εφαρμογή ορθοφωτοχαρτών και 3D μοντέλων στην αρχαιολογική σχεδίαση.

Σύμφωνα με το Θέμελη (2018), τοπογραφική αποτύπωση αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την εκτέλεση κάθε αρχαιολογικής ανασκαφής. Σήμερα, η αρχαιολογική τεκμηρίωση διέρχεται περίοδο ριζικής αναβάθμισης, με τη χρήση ορθοφωτοχαρτών και τρισδιάστατων (3D) μοντέλων να συνιστά την πλέον καθοριστική καινοτομία στην καταγραφή και τη ψηφιακή αναπαράσταση μνημείων και αρχαιολογικών χώρων. Η

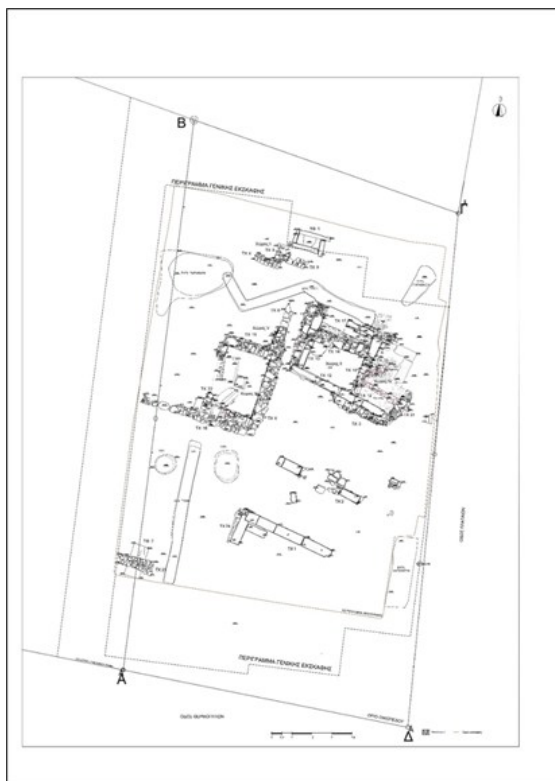
προσέγγιση αυτή συνιστά τη σύγχρονη πρακτική για την αρχαιολογική τεκμηρίωση, ενώ παράλληλα η χρήση σύγχρονων μεθόδων, όπως τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και οι σταθμοί αναφοράς υψηλής ακρίβειας (GPS), προσφέρουν ένα ψηφιακό χαρτογραφικό μοντέλο που διευκολύνει τη ψηφιακή καταγραφή των ευρημάτων. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση επιτυγχάνει την άμεση διασύνδεση των δεδομένων της ανασκαφής με το σχεδιαστικό λογισμικό CAD. Σύμφωνα με τον Djindjian (2020), η ψηφιακή ροή εργασίας εξασφαλίζει ακρίβεια χιλιοστού και υψηλή λεπτομέρεια με άμεσο τρόπο, ενώ εκμηδενίζει τον χρόνο που απαιτείται στο πεδίο, καθώς το κύριο μέρος της επεξεργασίας πραγματοποιείται σε εσωτερικό χώρο (Djindjian, 2020, 204-205, Θέμελης, 2018, 39).



Εικ. 41. Εισαγωγή του Point Cloud σε περιβάλλον CAD.

Ο μεθοδολογικός σχεδιασμός ξεκινά από τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων πεδίου με τη χρήση επίγειων/εναέριων (UAV) φωτογραμμετρικών τεχνικών και τρισδιάστατης σάρωσης. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται σε πλατφόρμες λογισμικού φωτογραμμετρίας (όπως το Agisoft Metashape). Από την επεξεργασία αυτή προκύπτουν δύο κύρια προϊόντα αναφοράς, το ψηφιακό νέφος σημείων (Point Cloud) για την ακριβή τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας και ο ορθοφωτοχάρτης, ο οποίος συνιστά ένα

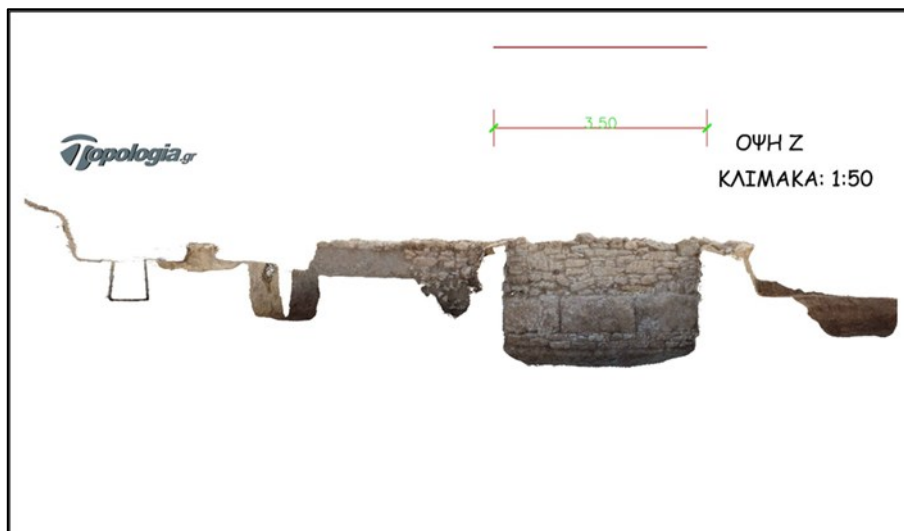
γεωμετρικά διορθωμένο φωτογραφικό υπόβαθρο σταθερής κλίμακας, κατάλληλο για μετρήσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων. Στη συνέχεια, το ψηφιακό υλικό σε μορφή αρχείων .tiff, .jpeg, για τον ορθοφωτοχάρτη και σε μορφή .rcs ή .rcp (μετά από επεξεργασία στο Autodesk ReCap) εισάγεται στο περιβάλλον CAD (Εικ. 41). Βάσει του γεωχωρικού υποβάθρου, τα ανασκαφικά δεδομένα σχεδιάζονται με απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια. Η αποτύπωση των τοίχων, των λίθων και άλλων ευρημάτων υλοποιείται μέσω διανυσματικών γραμμών (Εικ. 42), ενώ με τη χρήση κατάλληλων επιπέδων (layers) και γραμμικών υποστυλωμάτων (hatch), επιτυγχάνεται η άμεση κατηγοριοποίηση των δομικών υλικών και των υφών (DIGITECH III, 2005, σσ. 124-127).



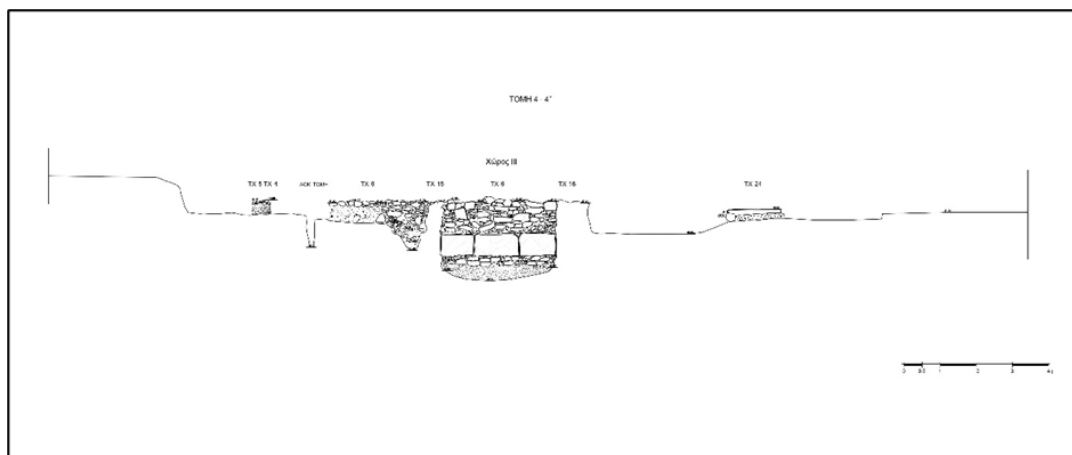
Εικ. 42. Ψηφιακή αποτύπωση της ανασκαφής σε περιβάλλον CAD.

Η αξιοποίηση τρισδιάστατων μοντέλων στο περιβάλλον CAD αναβαθμίζει ριζικά την αρχαιολογική τεκμηρίωση. Ο αυτοματισμός που προσφέρεται, μέσω της απλής τομής των 3D δεδομένων (Εικ. 43) για την παραγωγή σχεδίων ακριβείας (Εικ. 44), υποκαθιστά αποτελεσματικά τις χρονοβόρες παραδοσιακές πρακτικές. Παράλληλα, η χρήση Ψηφιακών

Μοντέλων Εδάφους (DTM) εξασφαλίζει την άμεση εξαγωγή τοπογραφικών διαγραμμάτων και υψομετρικών καμπυλών, αποτελώντας σήμερα την πλέον ενδεδειγμένη μεθοδολογία.



Εικ. 43. Δημιουργία τομής από 3D Μοντέλο.



Εικ. 44. Δημιουργία ψηφιακής τομής σε περιβάλλον CAD.

Η αξιοποίηση των ορθοφωτοχαρτών και των τρισδιάστατων μοντέλων αναβαθμίζει ριζικά τη σύγχρονη αρχαιολογική τεκμηρίωση. Τα ψηφιακά αυτά μέσα αποτελούν απαραίτητα εργαλεία σε κρίσιμες φάσεις διαχείρισης των ευρημάτων, όπως είναι η αποδόμηση ή η κατάχωση μιας ανασκαφής. Συγκεκριμένα, κατά την αποδόμηση, καταγράφονται με απόλυτη ακρίβεια η θέση, οι διαστάσεις και η κατάσταση διατήρησης κάθε αρχιτεκτονικού μέλους, διασφαλίζοντας τη δυνατότητα μελλοντικής ανασύνθεσης ή

αναστήλωσης. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της διατήρησης των αρχαίων σε κατάχωση, η τρισδιάστατη αποτύπωση διασώζει την τελευταία ορατή κατάσταση των οικοδομικών καταλοίπων, κρατώντας την επιστημονική πληροφορία προσβάσιμη και μετά την κάλυψή τους. Παράλληλα, η ψηφιακή σχεδίαση σε περιβάλλον CAD προσφέρει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, οργανωμένη δομή δεδομένων και ευελιξία στις τροποποιήσεις.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι καθοριστικά, καθώς εξασφαλίζεται αντικειμενικότητα μέσω της καταγραφής της απόλυτης γεωμετρικής πραγματικότητας, απαλλαγμένης από υποκειμενικές κρίσεις. Επιπλέον, η τεκμηρίωση είναι μη καταστροφική, με αποτέλεσμα να διατηρείται η πληροφορία αναλλοίωτη στο χρόνο και να διασώζονται πολύτιμα δεδομένα των ανώτερων στρωμάτων, τα οποία αναπόφευκτα θα χάνονταν κατά την εξέλιξη της ανασκαφικής διαδικασίας. Με τον τρόπο αυτό, τα ψηφιακά μοντέλα αναδεικνύονται σε πυρήνα της αρχαιολογικής μεθοδολογίας, συμβάλλοντας καθοριστικά στη διάσωση και την ορθολογική διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

7.5 Αξιολόγηση Σύγχρονων και Παραδοσιακών Τεχνικών Αποτύπωσης: Χρόνος Εφαρμογής και Οικονομική Αποδοτικότητα.

Η αντιπαραβολή της σύγχρονης φωτογραμμετρίας με τις κλασικές τεχνικές αποτύπωσης επιβεβαιώνει την καταλυτική υπεροχή της πρώτης ως προς την ταχύτητα και το κόστος. Ενώ οι παραδοσιακές τεχνικές απαιτούν εξαιρετικά υψηλό χρόνο πεδίου με ημέρες μετρήσεων, η σύγχρονη UAV φωτογραμμετρία ολοκληρώνει τη συλλογή των 716 φωτογραφιών σε μία μόλις ημέρα. Με τη μέθοδο αυτή, ο κύριος όγκος της εργασίας μεταφέρεται από το πεδίο στο γραφείο για εσωτερική διεκπεραίωση. Μακροπρόθεσμα, επιτυγχάνεται δραστική μείωση του κόστους χάρη στην ταχύτερη συλλογή και την αυτοματοποιημένη επεξεργασία δεδομένων, αποφεύγοντας τις ατελείωτες ώρες δουλειάς στο πεδίο.

Ακόμη, σε αντίθεση με την παραδοσιακή καταγραφή που ενέχει τον κίνδυνο υποκειμενικών παραλείψεων, η φωτογραμμετρία εξασφαλίζει μια ολοκληρωμένη αποτύπωση της πραγματικότητας μέσω εκατομμυρίων σημείων. Επιπλέον, από ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων παράγονται πολλαπλά προϊόντα, όπως ορθοφωτοχάρτες, DEM, τρισδιάστατα μοντέλα, και τομές, ξεπερνώντας τον περιορισμό των μεμονωμένων

δισδιάστατων σχεδίων. Έτσι, η φωτογραμμετρία SfM επιτυγχάνει τη βέλτιστη ισορροπία, καθώς ελαχιστοποιεί τον απαιτούμενο χρόνο εργασίας των ειδικών στο πεδίο, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την αντικειμενικότητα, την ακρίβεια και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

7.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η ολοκλήρωση της ψηφιακής ανακατασκευής των δύο μεγαρικών υπογείων ανοίγει το δρόμο για νέα ερευνητικά πεδία, καθιστώντας εφικτό το σχεδιασμό στοχευμένων μελλοντικών δράσεων. Ο συνδυασμός εναέριας φωτογραμμετρίας και επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης laser (TLS) θα μεγιστοποιήσει την πυκνότητα της πληροφορίας στις σκοτεινές και δυσπρόσιτες περιοχές των υπογείων, εξασφαλίζοντας την παραγωγή ενός άρτιου και εξαιρετικά ακριβούς ψηφιακού μοντέλου. Επίσης, η καταγραφή περισσότερων από 100 υπόγειων κατασκευών στα Μέγαρα θέτει τις βάσεις για συστηματική φωτογραμμετρική τεκμηρίωση των ορατών καταλοίπων. Η ψηφιακή τους ένταξη σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) επιτρέπει τη διεπιστημονική χωρική, τυπολογική και χρονολογική τους ανάλυση, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ανασύνθεση της οικιστικής και λατρευτικής τοπογραφίας της αρχαίας πόλης.

Τέλος, το υφιστάμενο 3D φωτορεαλιστικό μοντέλο θέτει τις βάσεις για την πλήρη ψηφιακή ανασύσταση της αρχικής μορφής των υπογείων. Αποκαθιστώντας ψηφιακά τη στέγη των υπογείων και ενσωματώνοντας αναπαραστάσεις των αρχαίων Θεσμοφορίων, δημιουργούνται καινοτόμες εφαρμογές Εικονικής (VR) και Επαυξημένης (AR) Πραγματικότητας. Αυτές οι μουσειακές εφαρμογές θα συμβάλουν ουσιαστικά στην ανάδειξη, την προστασία και τη διάχυση της μοναδικής πολιτιστικής κληρονομιάς των Μεγάρων στο ευρύ κοινό.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση των τελικών συμπερασμάτων, τα οποία προκύπτουν από τη συστηματική θεωρητική διερεύνηση και την πρακτική εφαρμογή της εναέριας φωτογραμμετρίας σε δύο αρχαία υπόγεια κτίσματα στα Μέγαρα Αττικής. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επέτρεψε την εξαγωγή κρίσιμων επιστημονικών ευρημάτων, επιτυγχάνοντας παράλληλα τη γεφύρωση της θεωρητικής γνώσης με την εφαρμοσμένη αρχαιολογική πρακτική στο πεδίο.

Τα βασικά αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαιώνουν την υψηλή αποτελεσματικότητα, ακρίβεια και παραγωγικότητα του μεθοδολογικού συνδυασμού Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) και της αλγοριθμικής μεθόδου Structure from Motion (SfM), όπως αυτή υλοποιήθηκε μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού Agisoft Metashape Professional. Πιο συγκεκριμένα, η ψηφιακή επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων οδήγησε στην παραγωγή ενός εξαιρετικά πυκνού νέφους σημείων, αποτελούμενου από 60.744.311 σημεία με τρισδιάστατη πληροφορία θέσης και χρώματος (RGB), και στη συνακόλουθη δημιουργία λεπτομερούς 3D πολυγωνικού μοντέλου με 10.090.236 τρίγωνα, το οποίο χαρακτηρίζεται από εξαιρετική γεωμετρική και τοπολογική πιστότητα, , παρά τις έντονες χωρικές προκλήσεις του πεδίου.

Η στρατηγική χρήση οκτώ Φωτοσταθερών Σημείων (GCPs), τα οποία αποτυπώθηκαν με μεθόδους υψηλής ακρίβειας RTK GNSS διπλής συχνότητας, εξασφάλισε τη βέλτιστη γεωαναφορά στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87). Η προσέγγιση αυτή οδήγησε στη δημιουργία ενός ορθοφωτοχάρτη εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης, μεγέθους 14.092 x 17.038 pixels, καθώς και ενός Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων (DEM) με χωρική ανάλυση 3.63 mm/pixel και πυκνότητα που αγγίζει τα 7.59 points/cm², όπου οι χωρικές παραμορφώσεις εκμηδενίστηκαν. Η αξιοπιστία της γεωμετρικής ακρίβειας τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι το συνολικό σφάλμα (RMSE) για τα επτά Σημεία Ελέγχου περιορίστηκε στα 0.478 cm και σφάλμα αναπροβολής 1.035 pixels. Παράλληλα, η χρήση του Σημείου 7 ως ανεξάρτητου μάρτυρα ελέγχου ακρίβειας (Check Point) επιβεβαίωσε την εγκυρότητα του μοντέλου με συνολικό σφάλμα 1.834 cm, μέγεθος που κρίνεται απολύτως ικανοποιητικό για τις αυστηρές απαιτήσεις μιας αρχαιολογικής αποτύπωσης. Το κυριότερο εύρημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η εναέρια φωτογραμμετρία υπερέχει καθοριστικά των παραδοσιακών μεθόδων, προσφέροντας ραγδαία μείωση του Διπλωματική Εργασία

χρόνου εργασίας πεδίου και δραστικό περιορισμό του οικονομικού κόστους, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει όγκο και λεπτομέρεια πληροφορίας που η κλασική σχεδίαση αδυνατεί να προσεγγίσει.

Μέσα από την αξιολόγηση αυτών των αποτελεσμάτων δίνονται σαφείς απαντήσεις στα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας, αποδεικνύοντας ότι η μέθοδος SfM λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιορισμένους, σύνθετους και απαιτητικούς χώρους, όπως τα δύο μεγαρικά υπόγεια. Κατά την εκτέλεση της αποστολής, αντιμετωπίστηκαν έντονες χωρικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις, με κυριότερη το μεγάλο βάθος των δομών και την ανάγκη αποτύπωσης κατακόρυφων τοιχωμάτων χωρίς τυφλά σημεία. Η στενότητα του χώρου αντιμετωπίστηκε με τον συνδυασμό αυτοματοποιημένων πλεγμάτων πτήσης UAV σε πολύ χαμηλό ύψος (μέση απόσταση 5.81 m από την ανασκαφή) και συμπληρωματικών χειροκίνητων λήψεων κοντινής απόστασης για τις εσωτερικές παρειές. Η ανάγκη για γεωμετρική συνοχή καλύφθηκε από μια σύνθετη στρατηγική λήψης 716 φωτογραφιών με εξαιρετικά υψηλά ποσοστά επικάλυψης άνω του 80%, εξασφαλίζοντας ότι κάθε σημείο αποτυπώθηκε από τουλάχιστον εννέα διαφορετικές οπτικές γωνίες. Επιπλέον, οι προκλήσεις του φωτισμού εντός των κλειστών υπόγειων χώρων και οι έντονες σκιάσεις εξαλείφθηκαν μεθοδικά, καθώς η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε ώρες διάχυτου φυσικού φωτός, αποτρέποντας τη δημιουργία σκληρών αντιθέσεων, ενώ η έλλειψη αρχικής προβαθμονόμησης της κάμερας FC7203 (φακός 4.49 mm) επιλύθηκε επιτυχώς μέσω της διαδικασίας αυτοβαθμονόμησης στο Agisoft Metashape, υπολογίζοντας με ακρίβεια τις παραμέτρους εσωτερικού προσανατολισμού και τις ακτινικές, εφαπτομενικές παραμορφώσεις του φακού.

Καθοριστικό παράγοντα της μεθοδολογίας συνιστά η δυνατότητα μακροχρόνιας διαφύλαξης της αρχαιολογικής πληροφορίας. Σε περιπτώσεις σωστικών ανασκαφών σε ιδιωτικά οικοπέδα, όπου τα κατάλοιπα υπόκεινται σε φυσική φθορά, αλλοίωση ή στην αναγκαία εκ του νόμου κατάχωση μετά το πέρας των εργασιών, τα παραγόμενα ψηφιακά αρχεία λειτουργούν ως ένα μόνιμο, αναλλοίωτο ψηφιακό απόθεμα. Αυτή η ψηφιακή τεκμηρίωση διασώζει τη γεωμετρική, υλική και χωρική πληροφορία στο διηνεκές, επιτρέποντας τη μελλοντική επανεξέταση της ανασκαφικής διαδικασίας και του αρχαιολογικού πλαισίου ανά πάσα στιγμή, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο για τη συγκεκριμένη ανασκαφή που πραγματοποιήθηκε υπό την εποπτεία της ΕΦΑ Δυτικής Αττικής και κατόπιν επίσημης άδειας μελέτης από το Υπουργείο Πολιτισμού.

Η συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας είναι σημαντική τόσο σε θεωρητικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο. Σε τοπική κλίμακα, προσφέρει για πρώτη φορά μια ολοκληρωμένη, υψηλής ακρίβειας ψηφιακή αποτύπωση μιας έκτασης 440 m² που περιλαμβάνει δύο σπουδαία μνημεία της μεγαρικής αρχιτεκτονικής παράδοσης, θωρακίζοντας την ιστορική μνήμη της περιοχής. Σε ευρύτερο επιστημονικό επίπεδο, η εργασία λειτουργεί ως ένας έγκυρος μεθοδολογικός οδηγός για τη χρήση των UAVs στην αρχαιολογία, αναλύοντας βήμα προς βήμα τη ροή εργασιών από την πτήση έως την τελική 3D μοντελοποίηση, ενώ η συγκριτική αξιολόγηση ψηφιακών και παραδοσιακών τεχνικών εμπλουτίζει την ελληνική βιβλιογραφία γύρω από τη μη επεμβατική γεωμετρική τεκμηρίωση.

Η προσωπική συμβολή μου στην παρούσα εργασία εντοπίζεται στην επεξεργασία της πρωτογενούς χωρικής πληροφορίας των 1.441.763 σημείων σύνδεσης (tie points) και των τρισδιάστατων μοντέλων, και στη μετατροπή τους σε αναλυτικά, δισδιάστατα ψηφιακά σχέδια, όπως κατόψεις, τομές και όψεις, μέσω σχεδιαστικού λογισμικού CAD. Η διαδικασία αυτή κατέστησε εφικτή τη μετατροπή των ψηφιακών δεδομένων σε αξιόπιστα αρχαιολογικά τεκμήρια, αναδεικνύοντας με απόλυτη σαφήνεια τη δομή, τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες και τα επιμέρους κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μεγαρικών υπογείων. Κατά τη σχεδιαστική αυτή μεταφορά, μάλιστα, προέκυψαν ειδικές παρατηρήσεις, καθώς αποκαλύφθηκαν με ακρίβεια χιλιοστού μικρό αποκλίσεις στη γεωμετρία των τοιχωμάτων, οι τρόποι λάξευσης και οι δομικές λεπτομέρειες των υπογείων, οι οποίες δεν ήταν εύκολα αναγνώσιμες με γυμνό μάτι κατά την εργασία πεδίου, προσφέροντας έτσι στην επιστημονική κοινότητα ένα έτοιμο προς χρήση, έγκυρο υπόβαθρο για μελλοντικές αρχαιολογικές έρευνες.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύει την ουσιαστική συμβολή των αναδυόμενων τεχνολογιών στην προστασία και ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς, ανοίγοντας τον δρόμο για μελλοντικές εφαρμογές, όπου η ψηφιακή αποτύπωση δεν θα αντιμετωπίζεται απλώς ως ένα επικουρικό ή σχεδιαστικό μέσο, αλλά ως ο θεμέλιος λίθος της σύγχρονης, ολιστικής αρχαιολογικής τεκμηρίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας (ΑΠΑ). (2021). *Οδηγίες προς χειριστές ΣμηΕΑ για την εφαρμογή του νέου ευρωπαϊκού πλαισίου*. <https://hcaa.gov.gr>

Γράβαλος, Ι., & Μακρής, Α. (2024). *Γεωργικά Ρομπότ και Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (Προπτυχιακό εγχειρίδιο)*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-320>

DIGITECH III: Μελέτη τεχνολογιών ψηφιοποίησης σε τρεις διαστάσεις, (2005). Εγχειρίδιο τρισδιάστατης ψηφιοποίησης ακινήτων μνημείων και χώρων Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Κοινωνία της Πληροφορίας». <https://www.ipet.gr/digitech/docs/monuments.pdf>

Djindjian F., (2020), *Αρχαιολογία. Θεωρίες, μέθοδοι και ανασυνθέσεις*, Εκδόσεις Καρδαμίτσα.

Θέμελης Π., (2018), *Ανασκαφή*, Εκδόσεις Παπαζήση

Ελευθερίου, Β., Καλησπεράκης, Η., Μαυρομάτη, Δ., & Χριστοδουλοπούλου, Ρ. (2017). Εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων αποτύπωσης στην τεκμηρίωση της βορειοδυτικής γωνίας του Παρθενώνα In G. Vavouranakis, M. Katsianis, Y. Papadatos, M. Moulou, & P. Petridis (Eds.), *Digital pasts for the present: Proceedings of the 2nd Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Greek Chapter (CAA-GR) Athens, 20-21 December 2016* (pp. xx–xx). Department of History and Archaeology – National & Kapodistrian University of Athens; Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology – Greek Chapter. https://gr.caa-international.org/wp-content/uploads/sites/26/2018/11/CAA-GR_2016_Procs.pdf

Εργασίες αεροφωτογράφισης μέσω drone του συνόλου του αρχαιολογικού χώρου Δελφών (23/07/2021).

<https://3d4delphi.gr/%ce%b5%ce%b9%ce%ba%cf%8c%ce%bd%ce%b5%cf%82/>

Ετήσια Επισκόπηση της Ασφάλειας του EASA: διερεύνηση του παρελθόντος για τη διατήρηση υψηλού επιπέδου ασφάλειας στην αεροπορία,

<https://www.easa.europa.eu/el/light/topics/easas-annual-safety-review-looking-past-maintain-high-level-safety-aviation>

Ευελπίδου, Ν., Τζουξανιώτη, Μ., & Καρκάνη, Α. (2023). *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών από τη Θεωρία στην Πράξη: Χρήση του ArcGIS Pro* (Προπτυχιακό εγχειρίδιο). Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
<http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-367>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2024). *Εκτελεστικός κανονισμός (ΕΕ) 2024/1110 για την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2019/947*.
http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2024/1110/oj

Η Φωτογραμμετρική διαδικασία, χρησιμοποιώντας το Agisoft PhotoScan/MetaShape,
<http://bit.ly/4o0vpCf>

Θέμελης, Π. Γ. (2018). Ανασκαφή. Εκδόσεις Παπαζήση.

Ιωαννίδης, Χ., Βερύκοκου, Σ. & Σοϊλέ, Σ. (2026). *Πολυεικονική φωτογραμμετρία. Θεωρία και εφαρμογές*. (Προπτυχιακό εγχειρίδιο). Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
<http://doi.org/10.57713/kallipos-1121>

Λερίου, Α. (Επιμ.). (2010). *Δυτική Αττική: Ιστορία - πολιτισμός*. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Δυτικής Αττικής & Ελληνικές Εκδόσεις.

Μαλλούχου Tufano, Φ. (2016). *Προστασία και Διαχείριση Μνημείων* (ηλεκτρ. βιβλ.). Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
<http://hdl.handle.net/11419/6466>

Μπαζιωτοπούλου-Βαλαβάνη, Ε. (2008). *Μεγαρίς, Τόποι Μνημεία Διαδρομές* Υπουργείο Πολιτισμού, Γ' ΕΠΚΑ, ΑΘΗΝΑ

Μπούνια, Α., & Καταπότη, Δ. (Επιμ.). (2021). *Αναδυόμενες τεχνολογίες και πολιτισμική κληρονομιά*. Αθήνα: Εκδόσεις Αλεξάνδρεια.

Μέγαρα: Κοιτίδα Ελληνισμού (2022). (Συλλογικό έργο). Δήμος Μεγαρέων. Media Publishing GK IKE.
<https://www.megara.gr/portal/images/pdf/06-GRAFEIO-EPIKOINONIAS-DIMOSION-SXESEON/2023/22-05-2023-megara-album.pdf>

Μουσιάδης, Α. (2015). Στοιχεία Φωτογραμμετρίας - Φωτοερμηνείας (Κεφάλαιο 2). Στο Περάκης, Κ., Μουσιάδης, Α., & Φαρασλής,. *Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες* (Προπτυχιακό εγχειρίδιο). Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/1842>

Νόμος 4757/2020. *Σύσταση, αρμοδιότητες και οργάνωση της Αρχής Πολιτικής Αεροπορίας και άλλες διατάξεις*. ΦΕΚ 240/Α/1-12-2020.

Παπαδόπουλος, Κ., Κυπαρίσση-Αποστολικά, Ν., & Χαμηλάκης, Γ. (2015). Ψηφιακή σάρωση, φωτογραμμετρία και ψηφιακές (ανα)παραστάσεις: Αρχαιολογική τεκμηρίωση και ερμηνεία σε τρεις διαστάσεις. Η περίπτωση της Κουτρούλου Μαγούλας. Στο Α. Μαζαράκης Αινιάν (Επιμ.), *Αρχαιολογικό Έργο Θεσσαλίας και Στερεάς Ελλάδας 4 (2012): Πρακτικά επιστημονικής συνάντησης, Βόλος 15.3–18.3.2012: Τόμος II: Στερεά Ελλάδα* (σελ. 1171–1180). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας & Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού. https://www.researchgate.net/publication/287998294_Psephiake_Sarose_Photogrammetria_kai_Psephiakes_AnaParastaseis_Archaiologike_Tekmeriose_Ermeneia_se_Treis_Diastaseis_e_Periptose_tes_Koutroulou_Magoulas

Πατιάς, Π. (1993). *Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Πατιάς, Π. (2008). *Φωτογραμμετρία και τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων και ευρημάτων. Με απλά λόγια. Ανάσκαμμα, 02*. <https://anaskamma.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/10/02-patias.pdf>

Παπαχατζής, Ν. Δ. (2004). *Παυσανίου Ελλάδος Περιήγησις: Αττικά*, Αθήνα, Εκδοτική Αθηνών Α.Ε.

Παυλίδης, Γ., Σεβετλίδης, Β., & Χαραλαμπίδου, Μ. (2014). *Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αντικειμένων και χώρων*. Ερευνητικό Κέντρο «Αθηνά». http://3dcms.ipet.gr/wp-content/uploads/2013/11/3dcms_report_2_1_1_draft_web.pdf

Πορτελάνος, Α. (1987). *Αποτυπώσεις μνημείων και συνόλων: Συμβολή στη μελέτη της παθολογίας των κτηρίων. Διαχρονική παρακολούθηση φωτογραμμετρικά αρχεία. Αρχαιολογία και Τέχνες, 23, 60–69*. <http://www.archaiologia.gr/wp-content/uploads/2011/06/23-10.pdf>

Ράγια, Λ. (2024). *Φωτογραμμετρία, Οδηγός Μελέτης, Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, ΠΜΣ, ΑΤΜ, ΕΘΕ, Πάτρα*.

Τοκμακίδης, Κ. (2021). *Τι αλλάζει στην αποτύπωση μνημείων με τη συνεργασία των ειδικών* (σ. 69–80). Στο Μ. Δούση, Ι. Σιναμίδης, & Σ. Κωτσόπουλος (Επιμ.), *Προστασία, συντήρηση, αποκατάσταση μνημείων πολιτισμού: 20 χρόνια Δ.Π.Μ.Σ. – Πρακτικά συνεδρίου*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/8221>

Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ). (2016). *Κανονισμός - Γενικό πλαίσιο πτήσεων Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - ΣμηΕΑ*. ΦΕΚ 3152/Β/30-09-2016.

Χατζησταμάτης, Σ., Αναγνωστόπουλος, Χ.-Ν., & Ερευνητική Ομάδα Τρισδιάστατης Οπτικοποίησης (i-lab). (2023). *Τρισδιάστατη Σάρωση και Ψηφιακή Διατήρηση 3Δ αρχείων: μία επισκόπηση του πεδίου*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου & Εθνικό Κέντρο Τεκμηρίωσης και Ηλεκτρονικού Περιεχομένου, Αθήνα, 1–80.

https://ariadne.ekt.gr/ariadne/bitstream/20.500.12776/17166/1/%ce%95%ce%a0%ce%a3%ce%95%ce%a4%ce%91%ce%9a010401-%ce%a0%ce%b1%cf%81%ce%b1%ce%b4%ce%bf%cf%84%ce%ad%ce%bf%202_final.pdf

Χατζηφώτη, Ο. (2016). *On the popularization of digital close-range photogrammetry: A handbook for new users* (Μεταπτυχιακή εργασία), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ψηφιακό Αποθετήριο της Κεντρικής Βιβλιοθήκης ΕΜΠ.

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/43652>

Ψηφιακό Αρχείο, Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής (ΕΦΑΔΑ).

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Agisoft. (2025). *Agisoft Metashape user manual: Professional edition* (Version 2.2).

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_en.pdf

Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from motion in the geosciences*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>

Chamola, V., Kotesch, P., Agarwal, A., Naren, & Gupta, N. (2021). *A comprehensive review of UAV attacks and Neutralization Techniques*. *Ad Hoc Networks*, 111. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870520306788>

Colomina, I., & Molina, P. (2014). *Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>

Condorelli, F., & Bonetto, J. (2022). 3D digitization and visualization of archaeological artifacts with the use of photogrammetry and virtual reality system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W1-2022, 51–57.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-51-2022>

Douglass, M., Lin, S., & Chodoronek, M. (2015). The application of 3D photogrammetry for in-field documentation of archaeological features. *Advances in Archaeological Practice*, 3(2), 136–152.

https://www.academia.edu/27817474/The_Application_of_3D_Photogrammetry_for_In_Field_Documentation_of_Archaeological_Features

EASA. (2020). *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems*. European Union Aviation Safety Agency. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulation-eu>

Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry* (Publication No. 18515) [Doctoral dissertation, ETH Zurich]. ETH Zurich Research Collection. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD_Theses/105.pdf

Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). *Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications*. *The Photogrammetric Record*, 26(136), 400–421. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00657.x>

European Commission. (2019a). *Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft*. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj

European Commission. (2019b). *Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 on unmanned aircraft systems*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/945/oj>

European Union Aviation Safety Agency (EASA). (n.d.). *Rules & standards – Drones*. <https://www.easa.europa.eu>

Fahlstrom, P. G., & Gleason, T. J. (2012). *Introduction to UAV Systems, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epub/10.1002/9781118396780>

Förstner, W. (2009). *Computer vision and remote sensing - Lessons learned*. Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn. <https://www.ipb.uni-bonn.de/pdfs/Forstner2009Computer.pdf>

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>

Frommholz, D. (2020). Lock-free multithreaded semi-global matching with an arbitrary number of path directions. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, 143–150. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-143-2020>

Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809>

Haala, N. (2011). Multiray photogrammetry and dense image matching. In D. Fritsch (Ed.), *Photogrammetric Week '11* (p. 185–195). VDE Verlag. https://www.researchgate.net/publication/288520688_Multiray_photogrammetry_and_dense_image_matching

Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). *Classifications, applications, and design challenges of drones*. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Hassani, F. (2015). *Documentation of cultural heritage: Techniques, potentials and constraints*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W7, 207–214. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5-W7/207/2015/isprsarchives-XL-5-W7-207-2015.pdf>

Hatzopoulos, J. N., Stefanakis, D., Georgopoulos, A., Tapinaki, S., Pantelis, V., & Liritzis, I. (2017). Use of various surveying technologies to 3D digital mapping and modelling of cultural heritage structures for maintenance and restoration purposes: The Tholos in Delphi, Greece. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 17(3), 311–336. <https://www.maajournal.com/index.php/maa/article/view/280/223>

Hernandez, C. L. (2026). *The ethics of aerial lidar mapping: A call for informed consent*. *American Antiquity*, 91(1), 1–19. <https://doi.org/10.1017/aaq.2025.10112>

Historic England. (2018). *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture* (2nd ed.). Historic England. <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/>

Ioannides, M., & Patias, P. (2023). *The complexity and quality in 3D digitisation of the past: Challenges and risks*. In M. Ioannides & P. Patias (Eds.), *3D research challenges in cultural heritage III: Complexity and quality in digitisation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-35593-6>

Ioannidis, C., Papadimitriou, K., Tourtas, A., Soile, S., Bourexis, F., Tokmakidis, P., Tokmakidis, K., Verykokou, S., & Potsiou, C. (2017). *The geometric documentation of the Greek cultural heritage sites participating in the TRIQUETRA project*. In *Engineering Geology for Society and Territory* (Vol. 8). Springer. https://rosa.uniroma1.it/rosa02/engineering_geology_environment/article/view/1881/1623

Ioannidis, C., Verykokou, S., Soile, S., & Potsiou, C. (2025). UAV photogrammetry for the protection of cultural heritage: methodologies, case studies, and applications. *Proceedings of SPIE*, 13816, Article 138160A.
Διπλωματική Εργασία 96

https://www.researchgate.net/publication/395685013_UAV_photogrammetry_for_the_protection_of_cultural_heritage_methodologies_case_studies_and_applications

Iliodromitis, A., Tsilimantou, E., Kopelou, P., Anastasiou, D., Koulidou, S., Spanodimos, C., Chrysostomou, G., Dimou, V., & Pagounis, V. (2025). Three-Dimensional Digital Geospatial Documentation for Cultural Heritage Preservation and Sustainable Management of Tourism Through a Web Platform: The Case Study of the Archaeological Park of Dion, Greece. *Land*, 14(5), 1062. <https://doi.org/10.3390/land14051062>

Jokilehto, J. (2008). *What is outstanding universal value? Defining the outstanding universal value of cultural world heritage properties*. ICOMOS. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2021/01/What-is-OUV-Jukka-Jokilehto.pdf>

James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(3), 339–351. https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10092276/1/Robson_James_et_al-2012-Journal_of_Geophysical_Research__Earth_Surface_%282003-2012%29.pdf

Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans* (2nd ed.). De Gruyter. <https://dokumen.pub/photogrammetry-geometry-from-images-and-laser-scans-2nd-ed-9783110892871-9783110190076.html>

Kostrzewa, A., Płatek-Żak, A., Banat, P., & Wilk, Ł. (2025). Open-source vs. commercial photogrammetry: Comparing accuracy and efficiency of OpenDroneMap and Agisoft Metashape. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1/W4-2025, 1–6. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-W4-2025/65/2025/isprs-archives-XLVIII-1-W4-2025-65-2025.pdf>

Linder, W. (2016). *Digital Photogrammetry: A practical course* (4th ed.). Springer. <https://proxy.eap.gr/login?url=https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-50463-5>

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2020). *Close-range photogrammetry and 3D imaging* (3rd ed.). De Gruyter.

Moysiadis, T. (2014, November 9–14). *The importance of geometric documentation through technological geospatial approaches to the conservation of cultural heritage*. 18th

ICOMOS General Assembly & Scientific Symposium, Florence, Italy.
https://www.academia.edu/44601407/The_importance_of_geometric_documentation_through_technological_geospatial_approaches_to_the_conservation_of_cultural_heritage

Murtiyoso, A., Remondino, F., Rupnik, E., Nex, F., & Grussenmeyer, P. (2014). *Oblique aerial photography tool for building inspection and damage assessment*. *ISPRS Archives, XL-1*, 309–313. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-1/309/2014/>

Nex, F., & Remondino, F. (2014). *UAV for 3D mapping applications: A review*. *Applied Geomatics*, 6, 1–15. https://www.researchgate.net/profile/Fabio-Remondino/publication/260529522_UAV_for_3D_mapping_applications_A_review/links/00b7d532f0e4da131e000000/UAV-for-3D-mapping-applications-A-review.pdf

Over, J. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., Brown, J. A., Buscombe, D., Noble, T., Sherwood, C. R., Warrick, J. A., & Wernette, P. A. (2021). *Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, Version 1.6—Structure from motion workflow documentation*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1039. <https://pubs.usgs.gov/of/2021/1039/ofr20211039.pdf>

Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., & Chamzas, C. (2007). *Methods for 3D digitization of Cultural Heritage*. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.007>

Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). *A compilation of UAV applications for precision agriculture*. *Computer Networks*, 172, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>

Reese, K. M., & Field, S. (2021). A methodological framework for free and open-source UAV-based archaeological research. *Advances in Archaeological Practice*, 1–8. https://kmreese.io/Documents/Reese_and_Field_2021.pdf

Roncella, R., Bruno, N., Diotri, F., Thoeni, K., & Giacomini, A. (2021). Photogrammetric Digital Surface Model Reconstruction in Extreme Low-Light Environments. *Remote Sensing*, 13(7), 1261. <https://doi.org/10.3390/rs13071261>

Royer, J.-J. (2004, November 7–10). *3D modeling and visualization* (Conference presentation). 9th International CODATA Conference: Data Visualization – Earth and Geo

Science, Berlin, Germany.

https://www.researchgate.net/publication/228568619_3D_modeling_and_visualization

Pratt, W. K. (2007). *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470097434>

Processing Report, 2025 (31 October), Γραφείο Μελετών Topologia, Ψηφιακό Αρχείο ΕΦΑΔΑ.

Sevara, C., Verhoeven, G., Doneus, M., & Draganits, E. (2018). Surfaces from the visual past: Recovering high-resolution terrain data from historic aerial imagery for multitemporal landscape analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 25, 611–642.

https://www.researchgate.net/publication/319203766_Surfaces_from_the_Visual_Past_Recovering_High-Resolution_Terrain_Data_from_Historic_Aerial_Imagery_for_Multitemporal_Landscape_Analysis

Stentoumis, C., Grammatikopoulos, L., Kalisperakis, I., Petsa, E., & Karras, G. (2013). A local adaptive approach for dense stereo matching in architectural scene reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1, 219–224. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-219-2013>

Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., & Zevenbergen, J. (2017). *Review of the current state of UAV regulations*. *Remote Sensing*, 9(5), 459. https://www.researchgate.net/publication/316820424_Review_of_the_Current_State_of_UAV_Regulations

Stylianidis, E. (2019). *The future of cultural heritage documentation*. In *CIPA – Heritage Documentation 50 years: Looking backwards*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W14), 1–9. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W14/1/2019/isprs-archives-XLII-2-W14-1-2019.pdf>

- Szeliski, R. (2011). *Computer Vision – Algorithms and Applications*. Springer.
<https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TM152/Books/Computer%20Vision%3A%20Algorithms%20and%20Applications%20-%20Szeliski.pdf>
- Tal, D., & Altschuld, J. (2021). *Drone Technology in Architecture, Engineering and Construction*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119609155.fmatter>
- Tsiafaki, D., & Michailidou, N. (2015). Benefits and problems through the application of 3D technologies in archaeology: Recording, visualisation, representation and reconstruction. *Scientific Culture*, 1(3), 37–45.
https://www.academia.edu/144572974/Benefits_and_Problems_Through_the_Application_of_3D_Technologies_in_Archaeology_Recording_Visualisation_Representation_and_Reconstruction
- UNESCO. (1972). *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage*. <https://www.unesco.org/en/legal-affairs/convention-concerning-protection-world-cultural-and-natural-heritage>
- UNESCO. (2021). *Guidelines for the selection of digital heritage*. <https://repository.ifla.org/rest/api/core/bitstreams/b5089a59-05d8-4105-b35c-ca4076f86a68/content>
- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill.
- Wright, A. M. (2023). *Creating orthomosaics of archaeological excavations in Agisoft Metashape Professional (A University of Chicago excavations guide)* (Version 6). https://www.academia.edu/41662497/Creating_Orthomosaics_of_Archaeological_Excavations_in_Agisoft_Metashape_Professional_A_University_of_Chicago_Excavations_Guide

Παράρτημα Α: Γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Αττικής. Χορήγηση άδειας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής.

ΑΚΡΙΒΕΣ ΑΝΤΙΓΡΑΦΟ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ
ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ
ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΡΟΪΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΚΛΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ &
ΑΛΛΟΔΑΠΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ
ΙΔΡΥΜΑΤΩΝ & ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΘΕΜΑΤΩΝ
ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ



ΑΔΑ: 9ΖΥΤ46ΝΚΟΤ-7ΠΙ

Αθήνα, 26/05/2026

Α. Π.: 61417

Απάντηση στο έγγραφο: 61417

Ταχ. Δ/ση: Μπουμπουλίνας 20- 22
Ταχ. Κώδικας: 106 82
Πληροφορίες: Αγγ. Δρακογιώργος
Τηλέφωνο: 2103321720
E-mail: txs.dpkar@culture.gr

ΚΟΙΝ.: 1. Γεωργία Δαλακούρα
(δια της ΕΦΑ Δυτικής Αττικής)

2. ΕΦΑ Δυτικής Αττικής

ΘΕΜΑ: Χορήγηση άδειας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής στο αγροτεμάχιο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών στα Μέγαρα, Π.Ε. Δυτικής Αττικής, στην κα Γεωργία Δαλακούρα.

Α Π Ο Φ Α Σ Η

Έχοντας υπόψη:

1. Τις διατάξεις του Ν. 4858/2021 (ΦΕΚ Α'220/19.11.2021) «Κύρωση Κώδικα νομοθεσίας για την προστασία των αρχαιοτήτων και εν γένει της πολιτιστικής κληρονομιάς».
2. Το Π.Δ. 4/2018 (ΦΕΚ 7/Α'22-01-2018) «Οργανισμός Υπουργείου Πολιτισμού», όπως τροποποιήθηκε και ισχύει σύμφωνα με το ΠΔ 32/2022 (ΦΕΚ 9/Α'9-5-2022).
3. Το Π.Δ. 77/2023 (ΦΕΚ 130/Α'27.6.2023) «Σύσταση Υπουργείου και μετονομασία Υπουργείων – Σύσταση, κατάργηση και μετονομασία Γενικών και Ειδικών Γραμματειών – Μεταφορά αρμοδιοτήτων, υπηρεσιακών μονάδων, θέσεων προσωπικού και εποπτευόμενων φορέων».
4. Την αριθ. πρωτ. ΥΠΠΟΑ/ΓΡΥΠ/136506/3067/15-03-2020 Υπουργική Απόφαση (ΦΕΚ Β' 908/17-03-2020) "Μεταβίβαση του δικαιώματος υπογραφής "Με εντολή

Προϊσταμένου Γενικής Διεύθυνσης” του Υπουργείου Πολιτισμού (Τομέας Πολιτισμού), στους Προϊσταμένους Διευθύνσεων, Τμημάτων και Αυτοτελών Τμημάτων της Κεντρικής Υπηρεσίας του Υπουργείου Πολιτισμού”, όπως τροποποιήθηκε με την αριθμ. ΥΠΠΟΑ/ΓΡΥΠ/149474/3466/24.3.2020 Υπουργική Απόφαση (ΦΕΚ Β’ 1021/24-03-2020).

1. Την ομόφωνη γνώμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Αττικής, όπως διατυπώθηκε στην υπ’ αρ. 6/30.03.2026 Πράξη του.

Αποφασίζουμε

Χορηγούμε στην κα Γεωργία Δαλακούρα, Σχεδιάστρια αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, καθώς και μεταπτυχιακή φοιτήτρια στο πρόγραμμα «Αποτύπωση και τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων στο ΕΑΠ/ΑΤΜ», άδεια φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής στο αγροτεμάχιο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών στα Μέγαρα, Π.Ε. Δυτικής Αττικής. Η μελέτη θα διενεργηθεί στο πλαίσιο εκπόνησης από την αιτούσα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Η άδεια χορηγείται για πέντε έτη από την ημερομηνία έκδοσης της Απόφασης υπό τον όρο να κατατεθεί ένα (1) αντίτυπο της μεταπτυχιακής εργασίας στην ΕΦΑ Δυτικής Αττικής, ένα (1) στο Αρχαιολογικό Μουσείο Μεγάρων προς εμπλουτισμό των αρχείων τους, καθώς και ένα (1) στην Διεύθυνση Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων του ΥΠ.Π.Ο.

Με εντολή ΓΔΑΠΚ

Η Προϊσταμένη της ΔΙΠΚΑ

Έλενα Κουντούρη

ΑΚΡΙΒΕΣ ΑΝΤΙΓΡΑΦΟ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ
ΓΕΝΙΚΗ Δ/ΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ
ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ
ΕΦΟΡΕΙΑ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ



Αθήνα, 05/06/2026
Α. Π.: 251271

Ταχυδρομική Διεύθυνση: Πανός 16
105 55 Αθήνα
Πληροφορίες: Χ. Καζαζάκη
Τηλέφωνο: 22960 22426, 210 32.13.571
Fax: 22960 22426, 210 32.16.292
Email: efada@culture.gr

Προς:
Γεωργία Δαλακούρα
gewrgiad@hotmail.com

Θέμα: Διαβίβαση Απόφασης.

Σχετικά:

1. Η υπ' αριθμ. πρωτ. ΥΠΠΟ/18049/16-1-2026 αίτηση της σχεδιάστριας κας Γεωργίας Δαλακούρα, για τη χορήγηση άδειας μελέτης ανασκαφικού σχεδίου από σωστική ανασκαφή στην περιοχή των Μεγάρων.
2. Το υπ' αριθμ. πρωτ. ΥΠΠΟ/61417/11-2-2026 έγγραφό μας με θέμα: «Διαβίβαση αίτησης άδειας μελέτης ανασκαφικού σχεδίου από σωστική ανασκαφή στην περιοχή των Μεγάρων».

Σε συνέχεια των ανωτέρω σχετικών εγγράφων, σας διαβιβάζουμε την υπ' αριθμ. ΥΠΠΟ/61417/26-5-2026 (ΑΔΑ:9ΖΥΤ46ΝΚΟΤ-7Π) Απόφαση με θέμα: «Χορήγηση άδειας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής στο αγροτεμάχιο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών στα Μέγαρα, Π.Ε. Δυτικής Αττικής, στην κα Γεωργία Δαλακούρα».

Συνημμένα:
Η υπ' αριθμ. ΥΠΠΟ/61417/26-5-2026 Απόφαση

Η Αν. Προϊσταμένη του Τμήματος

Αικατερίνη Σταμούδη
Αρχαιολόγος

Παράρτημα Β: Processing Report φωτογραμμετρικής αποτύπωσης.

ΜΕΓΑΡΑ 24-10-2025

Processing Report
ΘΕΡΜΟΠΥΛΩΝ & ΠΛΑΤΑΙΩΝ
ΟΤ 285
19100 Δ. ΜΕΓΑΡΕΩΝ
31 October 2025



Survey Data

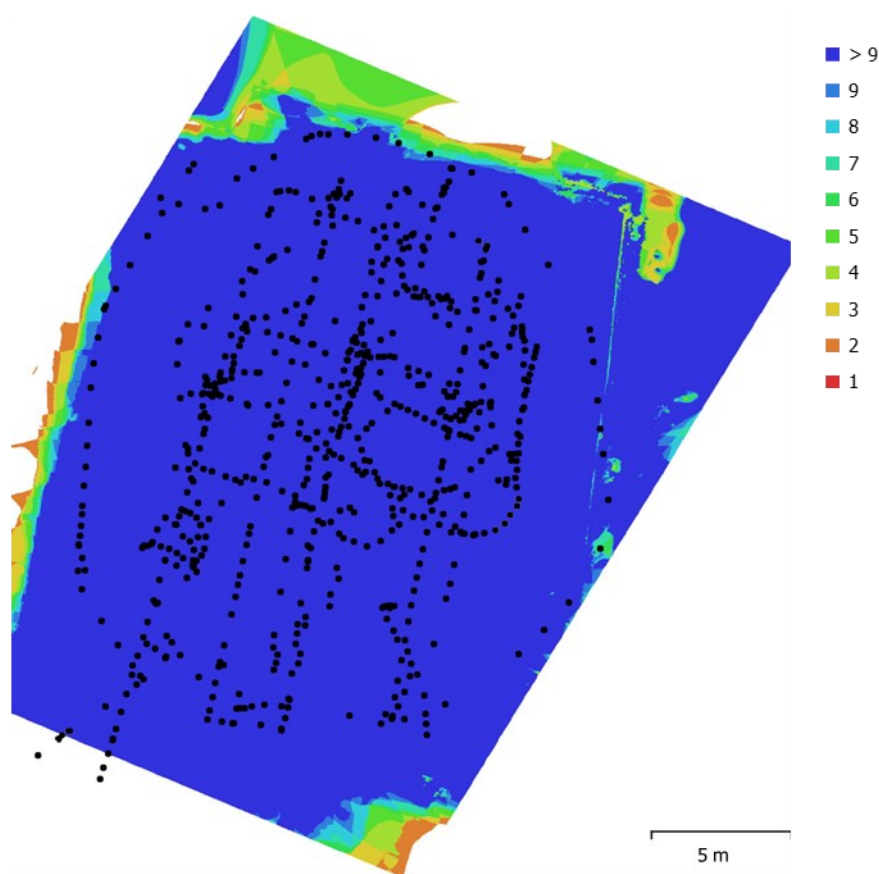


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	716	Camera stations:	716
Flying altitude:	5.81 m	Tie points:	1,441,763
Ground resolution:	1.82 mm/pix	Projections:	3,887,730
Coverage area:	440 m ²	Reprojection error:	0.546 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC7203 (4.49mm)	4000 x 2250	4.49 mm	1.76 x 1.76 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

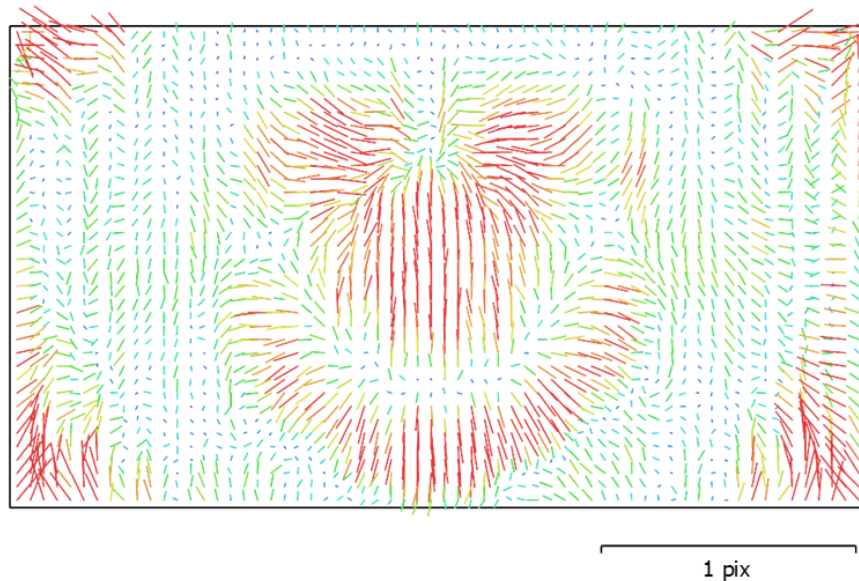


Fig. 2. Image residuals for FC7203 (4.49mm).

FC7203 (4.49mm)

716 images

Type
Frame

Resolution
4000 x 2250

Focal Length
4.49 mm

Pixel Size
1.76 x 1.76 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3034.25	0.028	1.00	0.02	-0.58	-0.13	0.03	-0.12	0.17	-0.15	0.12	0.01	-0.42
Cx	5.55621	0.024		1.00	-0.02	-0.01	0.19	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.91	-0.02
Cy	24.5205	0.027			1.00	-0.25	-0.03	-0.07	0.03	-0.03	0.04	-0.01	0.73
B1	-2.56089	0.0065				1.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	-0.02	0.10
B2	0.225444	0.0057					1.00	0.01	-0.00	0.00	-0.00	-0.02	-0.03
K1	0.0328607	4.5e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	-0.00	-0.08
K2	-0.212352	0.00031							1.00	-0.99	0.95	0.00	0.03
K3	0.499826	0.00082								1.00	-0.99	-0.00	-0.03
K4	-0.409482	0.00076									1.00	0.00	0.03
P1	0.000407892	2.5e-06										1.00	-0.01
P2	1.51495e-05	2.3e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

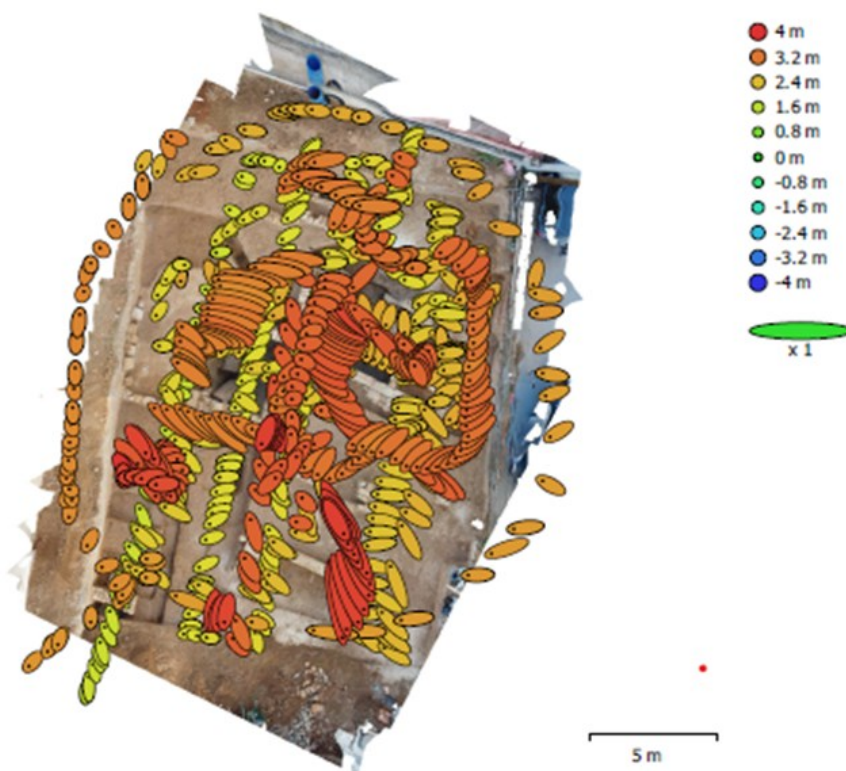


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.656111	0.56045	2.81826	0.862894	2.9474

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

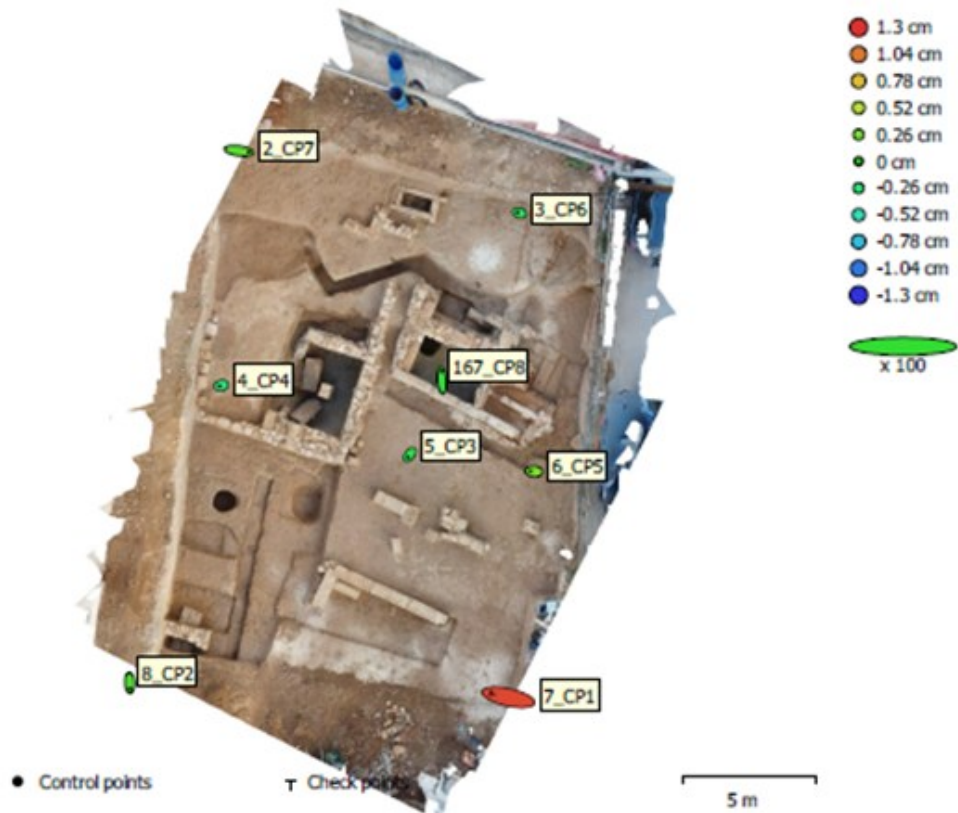


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	0.30609	0.315484	0.187878	0.43957	0.478037

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	1.33797	0.295864	1.21981	1.37029	1.83456

Table 5. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
2_CP7	0.725136	-0.0981017	0.160592	0.749157	0.537 (8)
3_CP6	-0.142098	0.0482686	-0.175526	0.230935	0.578 (5)
4_CP4	-0.124429	-0.0367367	-0.286391	0.314407	1.013 (37)
5_CP3	-0.146745	-0.192333	-0.116684	0.268591	1.302 (27)
6_CP5	-0.262734	0.0223431	0.285849	0.388893	0.985 (21)
8_CP2	0.0180773	-0.425362	0.111097	0.440002	0.522 (2)
167_CP8	-0.0587565	0.681897	-0.0282974	0.685009	0.919 (7)
Total	0.30609	0.315484	0.187878	0.478037	1.035

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
7_CP1	-1.33797	0.295864	1.21981	1.83456	0.843 (5)
Total	1.33797	0.295864	1.21981	1.83456	0.843

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

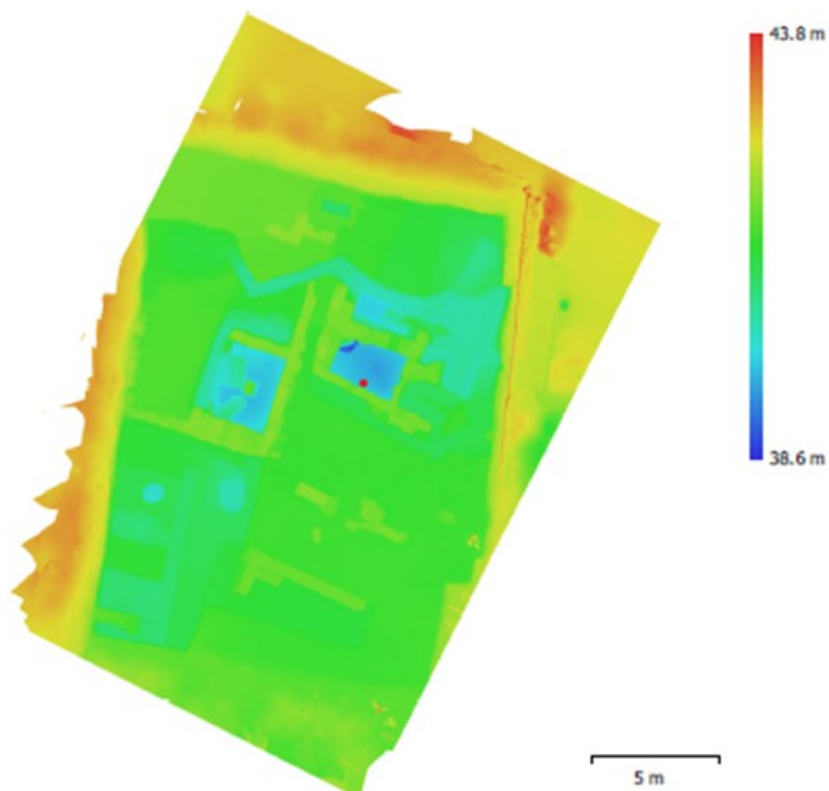


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.63 mm/pix
Point density: 7.59 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	716
Aligned cameras	716
Markers	8
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG::2100)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	1,441,763 of 1,565,588
RMS reprojection error	0.180057 (0.545582 px)
Max reprojection error	1.05767 (28.9775 px)
Mean key point size	2.82046 px
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	2.97648

Alignment parameters

Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	8,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	8 minutes 8 seconds
Matching memory usage	1.32 GB
Alignment time	8 minutes 34 seconds
Alignment memory usage	656.32 MB

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	19 seconds
Software version	1.6.4.10928
File size	108.68 MB

Depth Maps

Count	716
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	53 minutes 57 seconds
Memory usage	2.09 GB
Software version	1.6.4.10928
File size	2.07 GB

Dense Point Cloud

Points	60,744,311
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	53 minutes 57 seconds
Memory usage	2.09 GB

Dense cloud generation parameters

Processing time	2 hours 35 minutes
Memory usage	17.85 GB
Software version	1.6.4.10928
File size	879.80 MB
Model	
Faces	10,090,236
Vertices	5,052,501
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	53 minutes 57 seconds
Memory usage	2.09 GB
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	No
Processing time	27 minutes 43 seconds
Memory usage	29.92 GB
Texturing parameters	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	5 minutes 28 seconds
UV mapping memory usage	2.89 GB
Blending time	12 minutes 46 seconds
Blending memory usage	2.55 GB
Software version	1.6.4.10928
File size	453.54 MB
DEM	
Size	7,686 x 8,567
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG::2100)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	46 seconds
Memory usage	307.13 MB
Software version	1.6.4.10928
File size	119.23 MB
Orthomosaic	
Size	14,092 x 17,038
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG::2100)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	9 minutes 1 seconds
Memory usage	4.50 GB
Software version	1.6.4.10928
File size	6.82 GB
System	

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.4 build 10928
OS	Windows 64 bit
RAM	47.93 GB
CPU	AMD Ryzen 7 2700X Eight-Core Processor
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB

Παράρτημα Γ: Γραφείο Μελετών Topologia. Άδεια χρήσης φωτογραμμετρικής αποτύπωσης σε οικόπεδο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στα Μέγαρα.

σελ. 1/1

4CAD Τεχνική Εμπορική Ο.Ε.

ΘΕΜΑ: Άδεια χρήσης φωτογραμμετρικής αποτύπωσης σε οικόπεδο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στα Μέγαρα.

Επιτρέπω στην κα Γεωργία Δαλακούρα, Σχεδιάστρια αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, καθώς και μεταπτυχιακή φοιτήτρια στο πρόγραμμα «Αποτύπωση και τεκμηρίωση Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων στο ΕΑΠ/ΑΤΜ», να κάνει χρήση της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και τρισδιάστατης καταγραφής που έγινε τον Οκτώβριο του 2025 στο οικόπεδο ιδιοκτησίας κ.κ. Αλίκης και Ιωάννας Φουρτουλάκη στη συμβολή των οδών Θερμοπυλών και Πλαταιών στα Μέγαρα, Π.Ε. Δυτικής Αττικής. Τα παραπάνω δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο εκπόνησης, από την κα Γεωργία Δαλακούρα, της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας της.

Ημερομηνία: 29/05/2026
Ο Μηχανικός



Ξενοφών Λίτσας
Αγρ. Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ
Α.Μ. ΤΕΕ 77708

XENOFON LITSAS

Digitally signed by XENOFON LITSAS
Date: 2025.05.29 13:17:17 +0200

Καλλιμρόης 25, 11743, Αθήνα
Email: info@topologia.gr

Τηλ: 210 9200044
Fax: 210 9200049

www.topologia.gr

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.