



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία
με θέμα:

**Διερεύνηση Ακριβούς Γεωμετρικής Τεκμηρίωσης
Μνημείων με Χαμηλό Κόστος:
Εφαρμογή στο Γεφύρι της Καρύταινας**



Μεταπτυχιακός Σπουδαστής:
Μπουρεξής Φώτης

Επιβλέπων : Ιωαννίδης Χαράλαμπος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία της τεκμηρίωσης ενός μνημείου, απαιτεί τη συγκέντρωση πληροφορίας από διάφορες πηγές για την πλήρη και ολοκληρωμένη ανάλυσή του. Αναφορικά με το κομμάτι της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, οι φωτογραμμετρικές τεχνικές και οι σαρώσεις laser, αποτελούν τα συνήθη εργαλεία που χρησιμοποιούνται στον τομέα αυτό τα τελευταία χρόνια, τόσο για την παραγωγή γραμμικών ή/και εικονιστικών προϊόντων, όσο και τρισδιάστατων αναπαραστάσεων και οπτικοποιήσεων. Παράλληλα, το πεδίο της εγγύς φωτογραμμετρίας γνωρίζει μεγάλη άνθιση, τόσο με την ενσωμάτωση αλγορίθμων και λογισμικών της Όρασης Υπολογιστών, όσο και με την αυξανόμενη ποιότητα των φωτογραφικών μηχανών και την συνεχόμενη παραγωγή συστημάτων χαμηλού κόστους, για διάφορους σκοπούς. Τέτοια συστήματα αποτελούν και τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα (UAS), τα οποία εξελίσσονται σε ευέλικτες, χαμηλού κόστους πλατφόρμες συλλογής γεωχωρικών δεδομένων. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, περιγράφονται οι γενικές αρχές και δυνατότητες της τρισδιάστατης μοντελοποίησης με χρήση πολλαπλών εικόνων (από αλληλουχίες βίντεο) του ίδιου αντικειμένου, οι οποίες λαμβάνονται από συσκευές χαμηλού κόστους (GoPro Hero4, Mobius), τόσο επίγεια και από αέρος, με χρήση ενός πρωτότυπου μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος. Στη συνέχεια, περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου στο ιστορικό βυζαντινό γεφύρι της Καρύταινας, με χρήση διαφορετικών λογισμικών, ελεύθερων ή χαμηλού κόστους και παρουσιάζονται αποτελέσματα εφαρμογής της. Γίνεται αξιολόγηση των εργαλείων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται, κυρίως ως προς τη δυνατότητα παραγωγής των συμβατικών δισδιάστατων προϊόντων (κατόψεις, τομές, όψεις κ.ο.κ), που συνήθως απαιτούν οι χρήστες (αρχιτέκτονες, αρχαιολόγοι), αλλά και πιο σύνθετων προϊόντων (όπως 3D μοντέλα, HBIM, GIS κ.α.). Εξάγονται συμπεράσματα και δίνονται προτάσεις για εφαρμογή των σύγχρονων τεχνικών ή τη συνδυασμένη χρήση τους με πιο συμβατικές τεχνικές, ώστε να επιλέγεται η εκάστοτε οικονομοτεχνικά προσφορότερη μέθοδος γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

ABSTRACT

The process of monument documentation is an activity which requires getting information from different sources for complete and comprehensive analysis. As far as for the part of geometric documentation, photogrammetric procedures and laser scanning techniques, are the standard conducting tools in this sector for the past years, both for the production of 2D raster or vector drawings or 3D modeling simulations and visualizations. At the same time, the field of close range photogrammetry is evolving rapidly both by the integration of algorithms and software of Computer Vision, and the increasing quality of massive low cost systems and camera production for many purposes. Such systems and techniques are the Unmanned Aerial Systems (UAS) that are evolving as low-cost and flexible platforms for geospatial data collection that could meet the needs of many applications and overcome limitations of traditional airborne and terrestrial mobile mapping systems. In this diploma thesis the general principles and possibilities of 3D image based modeling (IBM) through multiview systems (MVS) using images exported from video sequences are described. These are captured from low-cost devices, both ground and air, by the use of a build from scratch mini quadcopter with a mounted camera on it (GoPro Hero4, Mobius). Subsequently, the application of the method in the historic Byzantine bridge of Karitaina is described, using different software, free or low cost and the results of the implementation are presented. An assessment of the tools and techniques that are used, mainly on the production capability of conventional 2D products (plans, sections, etc.), which usually are required by the users (architects, archaeologists), but also more complex products (3D models, HBIM, GIS etc.). Ending, conclusions and recommendations are provided for the application of modern techniques or their combined use with more conventional techniques, in order to select the most appropriate in terms of economy and level of required accuracy of the project geometric documentation method.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.....	1
1.1 Γενικά - Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.2 Συμβατικές μέθοδοι αποτύπωσης.....	1
1.2.1 Τοπομετρική ή εμπειρική μέθοδος.....	2
1.2.2 Τοπογραφική μέθοδος.....	2
1.2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι.....	3
1.2.4 Τεχνικές Σάρωσης.....	3
1.3 Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση από εικόνες.....	5
1.4 Μέθοδοι Αποτυπώσεων Χαμηλού Κόστους.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΛΛΟΓΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	10
2.1 Μέθοδοι συλλογής δεδομένων - UAV.....	10
2.1.1 Πλεονεκτήματα UAV.....	11
2.1.2 Μειονεκτήματα UAV.....	12
2.1.3 Είδη - Χαρακτηριστικά UAV.....	12
2.1.4 Τρόποι λήψης δεδομένων εικόνας.....	14
2.1.5 Τα UAV/UAS στην πολιτιστική κληρονομιά.....	15
2.2 Ένταξη σε Συστήματα Αναφοράς.....	16
2.3 Λογισμικά.....	18
2.3.1 Λογισμικά σχεδιασμού πτήσης και παρακολούθησης.....	18
2.3.2 Λογισμικά επεξεργασίας.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑ ΠΕΤΡΙΝΑ ΓΕΦΥΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	21
3.1 Ιστορική Εξέλιξη.....	21
3.2 Κατηγορίες, Μορφολογία, Τοποθεσία, Υλικά Κατασκευής.....	21
3.3 Αναπαράσταση Κατασκευής.....	22
3.4 Τα Γεφύρια Σήμερα Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς.....	23
3.5 Παλιό Γεφύρι Καρύταινας Αλφειού.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΓΕΦΥΡΙ ΤΗΣ ΚΑΡΥΤΑΙΝΑΣ.....	27
4.1 Επιλογή διαδικασίας και μεθόδου(-ων) αποτύπωσης.....	27
4.2 Εξοπλισμός συλλογής δεδομένων.....	27
4.2.1 Τοπογραφικός εξοπλισμός.....	27
4.2.2 Φωτογραφικός εξοπλισμός χαμηλού κόστους.....	29
4.2.3 UAV.....	30
4.3 Εργασίες Υπαίθρου.....	30
4.3.1 Αναγνώριση περιοχής μνημείου.....	30

4.3.2	Ίδρυση γεωδαιτικού δικτύου - κατανομή φωτοσταθερών	31
4.3.3	Λήψη δεδομένων βίντεο - εικόνας.....	33
4.3.4	Λήψη δεδομένων από σαρωτή laser	36
4.4	Εφαρμογή πολυ-εικονικών μεθόδων	38
4.4.1	Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στο Photoscan	39
4.4.2	Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος του μνημείου με χρήση ελεύθερων λογισμικών 44	
4.4.5	3D Μοντελοποίηση από νέφη σημείων - Απόδοση υψής.....	47
4.5	Προϊόντα	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ		52
5.1	Γενικά	52
5.2	Συγκρίσεις νεφών σημείων	52
5.2.1	Σύγκριση μέσω χαρτών χρωματικών αποκλίσεων	52
5.2.2	Σύγκριση μέσω σημείων ελέγχου	57
5.2.3	Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων.....	58
Κεφάλαιο 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		60
6.1	Αξιολόγηση.....	60
6.2	Συμπεράσματα	61
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία.....		63

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Συσκευές σάρωσης. Σαρωτές laser time-of-flight, διαφοράς φάσης, τριγωνισμού (από αριστερά προς δεξιά).....	4
Εικόνα1.2: Συσκευές σάρωσης. Σαρωτής laser σε UAV, σαρωτής δομημένου φωτός (από αριστερά προς δεξιά)	4
Εικόνα1.3: Χαρακτηριστικά σημεία - κλειδιά και περιγραφείς τους.....	7
Εικόνα1.4: Γραφική αναπαράσταση του bundle adjustment και του	8
Εικόνα 2.1: Μέσα συλλογής εικόνων ανάλογα με υψόμετρο.....	10
Εικόνα 2.2: Με γκρι χρώμα το εκτιμώμενο μερίδιο των UAV στις μεθόδους αποτύπωσης στο διάγραμμα του Bohler, 2005.....	11
Εικόνα 2.3: UAV πολλών στροφείων. (Αριστερά το τετρακόπτερο X8M 3D Robotics, δεξιά χειροποίητο οκτακόπτερο)	13
Εικόνα2.4: UAV/UAS σταθερών πτερυγίων. (Αριστερά το UX5 HP της Trimble, δεξιά το Sirius της TopCon).....	13
Εικόνα2.5: UAV ελικόπτερα. (Αριστερά της Riegl, δεξιά άγνωστο)	14
Εικόνα2.6: Αεροτριγωνισμός (αριστερά) και άμεση γεωαναφορά (δεξιά). (Πηγή: Mian et al., 2015)	17
Εικόνα2.7: Η πλατφόρμα προγραμματισμού και διαχείρισης πτήσης Mission Planner ..	19
Εικόνα2.8: Προγραμματισμός πτήσης κοντά σε κατακόρυφο αντικείμενο μεγάλου ύψους (Πηγή:civilsensing.com).....	19
Εικόνα2. 9: Αποτελεσματικότητα λογισμικών IBM, (Πηγή: Barnes et al, Sparc).....	20
Εικόνα 3. 1: Στάδια κατασκευής γεφυριών Πηγή: Κ.Π.Ε. Μακρινίτσας	23
Εικόνα 3.2: Ευρύτερη περιοχή Καρύταινας από Google Earth	24
Εικόνα 3. 3: Παλιό χαρτονόμισμα πέντε χιλιάδων δραχμών, όπου αναπαρίσταται το γεφύρι.....	25
Εικόνα 3.4: Αριστερά: Άποψη του γεφυριού το 1935. Στο βάθος το κάστρο της Καρύταινας.....	26
Εικόνα 3.5: Κατάσταση γεφυριού σήμερα (αριστερά), κατά τη διάρκεια ισχυρής βροχόπτωσης το 2007 (δεξιά).	26
Εικόνα 4. 1: Γεωδαιτικός σταθμός TopCon OS 105.....	28
Εικόνα 4. 2: Σαρωτής laser ScanStation 2 της Leica	28
Εικόνα 4. 3: Κάμερα Mobius.....	29
Εικόνα 4. 4: Κάμερα GoPro Hero 4 Black.....	29
Εικόνα 4. 5: Πρωτότυπο UAV	30

Εικόνα 4. 6: Γενική άποψη της περιβάλλοντα χώρου του γεφυριού Πάνω: Ανατολική όψη, Κάτω: Δυτική όψη	31
Εικόνα 4. 7: Πολυγωνομετρικό Δίκτυο	32
Εικόνα 4. 8: Προτεινόμενος τρόπος λήψης εικόνων για επικάλυψη. (Πηγή: University of Arkansas)	33
Εικόνα 4. 9: Συνάρτηση ύψους μεγέθους εδαφοψηφίδας. (Πηγή www.senteksystems.com)	34
Εικόνα 4. 10: Διαφορετικά μεγέθη αισθητήρων φωτογραφικών μηχανών	34
Εικόνα 4. 11: Θέση σαρωτή laser επί το πεδίο	37
Εικόνα4. 12: Ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι	37
Εικόνα 4.13: Τρισδιάστατο μοντέλο από το σαρωτή, υπό τη μορφή νέφους σημείων.	38
Εικόνα 4. 14: Επιμέρους τμήματα επεξεργασίας.	40
Εικόνα 4. 15: Συνένωση νεφών σημείων από κάθε επιμέρους τμήμα. (βλ. πίν. 4.9).....	41
Εικόνα 4. 16: Τελικό επεξεργασμένο νέφος σημείων από GoPro. Υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας	42
Εικόνα 4. 17: Σχεδόν ακατέργαστο νέφος σημείων από την Mobius.....	43
Εικόνα 4. 18: Εικόνες από GoPro πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη διόρθωση από ακτινική διαστροφή	44
Εικόνα 4. 19: Νέφη σημείων. Αριστερά: VisualSfM+CMP-MVS, Δεξιά: VisualSfM+PMVS/CMVS.....	46
Εικόνα 4. 20: Νέφος σημείων μέσω του MicMac	46
Εικόνα 4. 21: Τριγωνισμός Delaunay	47
Εικόνα 4. 22: Τρισδιάστατο μοντέλο. Πάνω: Σε αρχική μορφή με σφάλματα, Κάτω: Διορθωμένο 3D μοντέλο	48
Εικόνα4.23: Διαδικασία texture mapping. (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/UV_mapping).....	49
Εικόνα 4.24: Συστήματα αναφοράς κατά το texture mapping. (Πηγή: http://www.slideshare.net/Mark_Kilgard/11texture?next_slideshow=1).....	49
Εικόνα5.1: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από το Photoscan (GoPro) και το σαρωτή laser.	
Εικόνα5. 2: : Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από το Photoscan (Mobius) και το σαρωτή laser.	53
Εικόνα5.3: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα VisualSfM+CMPMVS και το σαρωτή laser.	54
Εικόνα5.4: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα VisualSfM+CMVS και το σαρωτή laser	55
Εικόνα5.5: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα MicMac και το σαρωτή laser.....	56

Εικόνα5.6: Κατανομή GCPs (κόκκινο χρώμα) - σημείων ελέγχου (κίτρινο χρώμα)	57
Εικόνα5.7: Κατανομή GCPs (κόκκινο χρώμα) - σημείων ελέγχου (κίτρινο χρώμα)	58

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4. 1: Χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TopCon OS105	28
Πίνακας 4. 2:Χαρακτηριστικά σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica	28
Πίνακας 4. 3: Χαρακτηριστικά κάμερας Mobius	29
Πίνακας 4. 4: Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάμερας GoPro Hero 4 Black	29
Πίνακας 4. 5: Χαρακτηριστικά μέρη UAV	30
Πίνακας 4. 6: Απαιτούμενη απόσταση λήψης για συγκεκριμένο μέγεθος εδαφοψηφίδας	35
Πίνακας 4. 7: Χαρακτηριστικά λειτουργίας των μηχανών για λήψη των απαραίτητων βίντεο.....	35
Πίνακας 4. 8: Γεωαναφορά του νέφους σημείων του σαρωτή και εναπομείναντα σφάλματα	38
Πίνακας 4. 9: Εικόνες ανά επιμέρους σετ δεδομένων	40
Πίνακας 4. 10: Χαρακτηριστικά νέφους σημείων από GoPro.....	41
Πίνακας 4. 11: Στοιχεία επεξεργασίας εικόνων από την Mobius	43
Πίνακας 4. 12: Στοιχεία επεξεργασίας στο VisualSfM και στα δύο εξωτερικά εργαλεία πυκνής συνταύτισης εικόνας.....	45
Πίνακας 5. 1: Σφάλμα φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου για την GoPro	57
Πίνακας 5. 2: Σφάλμα φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου για την Mobius.....	57
Πίνακας 5. 3: Συγκριτική παράθεση σφαλμάτων σημείων ελέγχου μεταξύ GoPro και Mobius.....	58
Πίνακας 5. 4: Συγκριτική παράθεση τιμών κανονικής κατανομής(μ,σ) προσαρμοσμένης στις τιμές της απόστασης μεταξύ των μοντέλων όπως προκύπτουν από τα διαφορετικά λογισμικά.....	58

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1: Ροή εργασιών για παραγωγή 3D μοντέλου με υφή.....	39
Διάγραμμα 4.2: Επεξεργασία και παραγωγή νέφους σημείων στο VisualSfM	45
Διάγραμμα 5.1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής Σύγκριση Photoscan (GoPro), με το σαρωτή laser.....	53
Διάγραμμα 5.2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής Σύγκριση Photoscan (Mobius), με το σαρωτή laser.....	53
Διάγραμμα 5.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση VisualSfM+CMPMVS, με το σαρωτή laser.....	54
Διάγραμμα 5. 4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση VisualSfM+CMPMVS, με το σαρωτή laser.....	55
Διάγραμμα 5.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση MicMac, με το σαρωτή laser.....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

1.1 Γενικά - Ιστορική Αναδρομή

Με τον όρο μνημείο αποδίδεται γενικότερα οποιοδήποτε διασωθέν οικοδόμημα από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, συμπεριλαμβανομένων όλων των ενδιάμεσων ιστορικών περιόδων καθώς επίσης και συγγράμματα των περιόδων αυτών, δηλαδή πάσης φύσεως έργων τέχνης και λόγου που θεωρούνται αριστουργήματα. Η γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί ένα μέρος της συνολικότερης (ιστορικής, αρχαιολογικής, αρχιτεκτονικής, κλπ), διεπιστημονικών απαιτήσεων τεκμηρίωσης μικρών ή μεγάλων μνημείων, εκτεταμένων συνόλων ή αρχαιολογικών χώρων. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τη σημερινή εποχή είναι πλέον δυνατή η αποτύπωση ενός μνημείου στον τρισδιάστατο χώρο με υψηλή ποιότητα, αποτελεσματικότητα και ευελιξία. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας παρέχει τη δυνατότητα στις φωτογραμμετρικές και τοπογραφικές τεχνικές να παράγουν τεκμηριωτικά παράγωγα και τελικά προϊόντα, καλύπτοντας πλήρως τις εκάστοτε απαιτήσεις ακρίβειας και πληρότητας, ανεξαρτήτως κλίμακας και τρόπου απεικόνισης. Προϊόντα όπως ορθοφωτογραφίες, αναπτύγματα, τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και ρεαλιστικές οπτικοποιήσεις ή εικονικές περιηγήσεις έχουν δώσει νέα εργαλεία και δυνατότητες στα υπόλοιπα μέλη της επιστημονικής ομάδας (αρχιτέκτονες, πολιτικοί και χημικοί μηχανικοί κ.α.), που χρειάζονται τη γεωμετρική τεκμηρίωση για την εκπόνηση μελετών επεμβάσεων, συντηρήσεων ή ανάδειξης των μνημείων (Tsilimantou et al., 2014).

Όμως, ακόμη και αυτά τα εργαλεία και οι τεχνικές, τα τελευταία χρόνια αντιμετωπίζονται πλέον ως συμβατικά, καθώς νέες τεχνολογίες και μέθοδοι εμπλουτίζουν με ταχείς ρυθμούς, σε επίπεδο οργάνων και λογισμικού, όλα τα στάδια της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, από τη συλλογή των δεδομένων μέχρι την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Η εισαγωγή των σαρωτών laser, από τα τέλη της δεκαετίας του '90, και λίγο αργότερα ο συνδυασμός τους με ψηφιακές φωτομηχανές υψηλής ανάλυσης, άνοιξε νέους ορίζοντες και διεύρυνε τις απαιτήσεις των χρηστών, δημιουργώντας παράλληλα, νέες απαιτήσεις για αποτελεσματική και αυτοματοποιημένη διαχείριση τεραστίων ποσοτήτων τρισδιάστατων δεδομένων ακριβείας, μοντελοποίησή τους ή/και ένταξή τους σε (Αρχαιολογικά) Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Grussenmeyer et al., 2010; Schaich, 2013).

Σε ένα τέτοιο διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον καθίσταται επιβεβλημένη η αξιολόγηση των τεχνικών και των προϊόντων που παρέχονται, ώστε να επιλέγεται η εκάστοτε οικονομοτεχνικά προσφορότερη μέθοδος για τη γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων.

1.2 Συμβατικές Μέθοδοι Αποτύπωσης

Η σημασία της ακρίβειας στις αποτυπώσεις μνημείων είναι προφανής, αποτελώντας σε πολλές περιπτώσεις καταλυτικό παράγοντα για την επιλογή της μεθόδου αποκατάστασης των υπάρχοντων προβλημάτων. Σημαντικό ρόλο παίζει η δυνατότητα και ο τρόπος απεικόνισης των ευρημάτων της αποτύπωσης (π.χ. με

εικονιστικά ή τρισδιάστατα προϊόντα) ώστε αυτά να αποτελέσουν το κατάλληλο εργαλείο και υπόβαθρο μελέτης της διεπιστημονικής ομάδας διερεύνησης του προβλήματος. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι αποτύπωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η Τοπομετρική ή Εμπειρική, η Τοπογραφική, η Φωτογραμμετρική και η Τρισδιάστατη με την χρήση σαρωτή Laser [Τσιούκας, 2009]. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους. Συνήθως, οι συνδυασμοί εφαρμογών είναι Τοπογραφία / Φωτογραμμετρία ή Τοπογραφία / Σάρωση laser ή Φωτογραμμετρία / Σάρωση Laser [Τσιούκας, 2009].

1.2.1 Τοπομετρική ή εμπειρική μέθοδος

Αποτελεί μέθοδο αποτύπωσης περιορισμένης μετρητικής ακρίβειας με την χρήση απλών οργάνων όπως μετροταινίες, αλφαδολάστιχα, νήμα της στάθμης και ηλεκτρονικών αποστασιόμετρων (EDM) [Τοκμακίδης, 2010]. Είναι απλή και κατάλληλη για μνημεία ή χώρους που δεν έχουν πολύπλοκο σχήμα και μπορούν να αποτυπωθούν με λίγες μόνο μετρήσεις που διασφαλίζουν ωστόσο την τελική ακρίβειά τους. Επίσης, είναι κατάλληλη για αποτύπωση κατόψεων ή όψεων- τομών εσωτερικών χώρων και όταν οι άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για διάφορους λόγους, πχ. δεν υπάρχει απαραίτητος χώρος για τη λήψη φωτογραφιών ή την τοποθέτηση τοπογραφικού οργάνου σε κατάλληλη θέση. Οι μετρήσεις στηρίζονται σε μια αυθαίρετα ορισμένη αρχή και διεύθυνση ενός άξονα του συστήματος συντεταγμένων και χωρίς καταχώριση υψομετρικής πληροφορίας που θα επέτρεπε την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου.

1.2.2 Τοπογραφική μέθοδος

Η τοπογραφική μέθοδος βασίζεται σε άμεσες μετρήσεις γωνιών και μηκών στο χώρο του μνημείου και γενικά ενός αντικείμενου. Με την χρήση οργάνων υψηλής ακρίβειας, όπως είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (Total station), προσδιορίζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, καθώς και οι κεκλιμένες ή οριζόντιες αποστάσεις. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των σημείων στο οριζόντιο επίπεδο είναι η μέθοδος των τριγώνων ή των πλευρομετρήσεων, η μέθοδος των ορθογωνίων συντεταγμένων και η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων. Αναγκαία προϋπόθεση για την χρήση της τοπογραφικής μεθόδου είναι η ίδρυση πολυγωνομετρικού ή τριγωνομετρικού δικτύου για την εξάρτηση της αποτύπωσης σε συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων. Η μέτρηση των σημείων γίνεται είτε με την χρήση ανακλαστήρων είτε χωρίς ανακλαστήρα (reflectorless) κυρίως σε απροσπέλαστα σημεία ή σε μνημεία μεγάλων διαστάσεων. Η εφαρμογή της τοπογραφικής μεθόδου για την αποτύπωση ενδείκνυται όταν υπάρχει απαίτηση υψηλής ακρίβειας σε κλίμακα 1:50 ή μικρότερη και το μνημείο δεν έχει πολύπλοκη μορφή και σχήμα, οπότε ο αριθμός των μετρούμενων σημείων για τον προσδιορισμό της θέσης, της μορφής και του σχήματος είναι μικρός. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η τοπογραφική μέθοδος καθίσταται ασύμφορη οικονομικά αλλά και χρονικά. Για το λόγο αυτό, η τοπογραφική αποτύπωση μπορεί να συνδυαστεί με φωτογραμμετρικές μεθόδους, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις με τη μέτρηση μόνο φωτοσταθερών σημείων, που είναι απαραίτητα για την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Τέλος, η τοπογραφική μέθοδος χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλης έκτασης του αντικείμενου και συνήθως για την αποτύπωση εξωτερικών χώρων – όψεων κτιρίων αλλά και αρχαιολογικών χώρων ή σκαμμάτων.

1.2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η φωτογραμμετρία είναι μία από τις ταχύτερες μεθόδους γεωμετρικής τεκμηρίωσης, που χρησιμοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την αποτύπωση μνημείων, ιστορικών κτιρίων και συνόλων. Έχει την δυνατότητα συλλογής άπειρων σημείων χωρίς να διασπάται ή συνέχεια του αντικειμένου. Οι μονο-εικονικές φωτογραμμετρικές μέθοδοι της αναγωγής και ορθοφωτογραφίας για αυτοματοποιημένη παραγωγή εικονιστικών προϊόντων και η διεικονική μέθοδος της στερεο-απόδοσης, γραμμικών ή και άλλων προϊόντων, μέσω στερεοσκοπικής παρατήρησης, ή συνδυασμός αυτών, αποτελούν τις συνηθέστερα εφαρμοζόμενες συμβατικές μεθόδους για την επίτευξη της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων. Με κατάλληλο προγραμματισμό λήψεων, χρήση φακού και φωτομηχανής, φωτοσταθερών σημείων και ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού/λογισμικού, είναι δυνατή η ικανοποίηση σχεδόν οποιωνδήποτε απαιτήσεων ακρίβειας (π.χ. για ιδιαίτερα μεγάλες κλίμακες, όπως 1:5 ή 1:10) ή επιπέδου λεπτομερειών. Τα προϊόντα των μονο-εικονικών μεθόδων είναι δισδιάστατα, ενώ αυτά των διεικονικών ή πολύ-εικονικών μεθόδων μπορεί να είναι 2D ή 3D. Η φωτογραμμετρική μέθοδος είναι ιδανική για αποτύπωση πολύπλοκων αντικειμένων με πληθώρα λεπτομερειών (π.χ. όψεις διατηρητέων κτιρίων, κατόψεις κτιρίων - αρχαιολογικών σκαμμάτων) και όταν υπάρχει δυσκολία προσπέλασης των λεπτομερειών του μνημείου ή όταν απαγορεύεται η άμεση επαφή με το αντικείμενο μελέτης. Είναι ιδανική για διαχρονική παρακολούθηση των μνημείων ή όταν απαιτείται συστηματική καταγραφή των φάσεων εξέλιξης σε εργασίες αναστήλωσης ή ανασκαφής. Οι διαδικασίες σύνταξης και παραγωγής τους αποτελούν συνήθη πρακτική για αρκετές δεκαετίες πλέον. (Ioannidis and Georgopoulos, 2007).

1.2.4 Τεχνικές Σάρωσης

Οι πιο συνήθεις τεχνικές σάρωσης αφορούν στους σαρωτές Laser, οι οποίοι αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως Laser Scanners, 3D Scanners, Terrestrial Scanner ή και LIDAR. Είναι όργανα ενεργής απεικόνισης τα οποία έχουν την δυνατότητα απευθείας αποτύπωσης αντικειμένων στον τρισδιάστατο χώρο καθώς και συλλογής στοιχείων σχετικά με την υφή τους ή το υλικό τους (π.χ. μέσω της έντασης του ανακλώμενου σήματος). Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, η χρήση επίγειων σαρωτών laser στην αποτύπωση μνημείων γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη, επηρεάζοντας σημαντικά τόσο τις μεθόδους γεωμετρικής τεκμηρίωσής τους όσο και τα παραγόμενα προϊόντα. Η πιο ουσιώδης και σημαντική διαφορά αναφορικά με τις προηγούμενες μεθόδους είναι η μαζική παραγωγή νεφών σημείων υψηλής ακρίβειας και πυκνότητας, μέσω των οποίων και ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να προκύψουν λεπτομερή 3D μοντέλα και 2D προϊόντα (όψεις και τομές) με υφή, στην περίπτωση συνδυασμού των νεφών σημείων με εικόνες (συστήματα σαρωτή laser με φωτογραφική μηχανή).

Οι σαρωτές laser διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους επίγειους (TLS) και τους αερομεταφερόμενους (γνωστούς και ως LIDAR). Οι επίγειοι σαρωτές laser εκτός από την συμβολής τους στην γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς, χρησιμοποιούνται και σε άλλους τομείς, όπως στον σχεδιασμό και την παραγωγή βιομηχανικών αντικειμένων, αεροσκαφών, πρωτοτύπων, στον έλεγχο ποιότητας, στις αποτυπώσεις εδαφολογικών χαρακτηριστικών και σε πολλές άλλες εφαρμογές, ενώ οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας για πιο εκτεταμένες περιοχές.

Οι επίγειοι σαρωτές laser διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

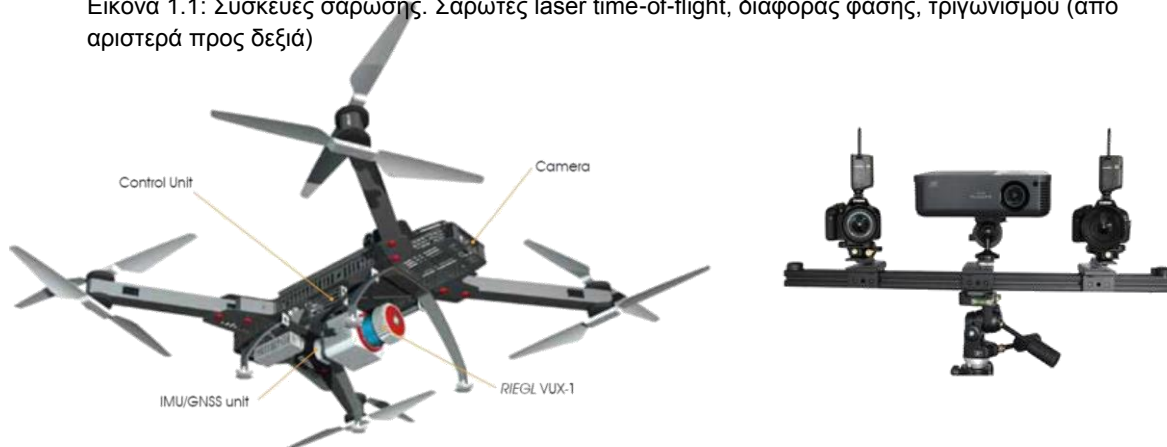
Σαρωτές time-of-flight, για μεγάλες αποστάσεις σάρωσης (που φθάνουν τις μερικές εκατοντάδες μέτρα ή ξεπερνούν το 1 km) και ακρίβειες της τάξης των 5 mm

Σαρωτές διαφοράς φάσης, για μεγάλη ταχύτητα λήψης των νεφών σημείων (περισσότερα από 1 εκατ. σημεία ανά δευτερόλεπτο), εμβέλεια της τάξης των 80 m και ακρίβεια της τάξης των 2 mm

Σαρωτές τριγωνισμού, για μικρές αποστάσεις σάρωσης (λίγων μέτρων) αλλά με επίτευξη ιδιαίτερα υψηλών ακριβειών (0.1 mm)



Εικόνα 1.1: Συσκευές σάρωσης. Σαρωτές laser time-of-flight, διαφοράς φάσης, τριγωνισμού (από αριστερά προς δεξιά)



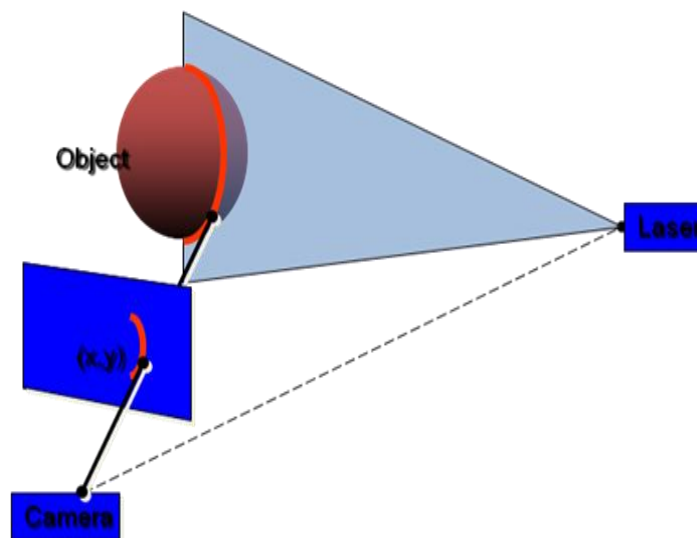
Εικόνα1.2: Συσκευές σάρωσης. Σαρωτής laser σε UAV, σαρωτής δομημένου φωτός (από αριστερά προς δεξιά)

Για την πλήρη αποτύπωση ενός αντικειμένου ή οικοδομήματος, απαιτείται να γίνουν πολλαπλές σαρώσεις του, από διαφορετικές θέσεις τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Οι θέσεις και οι διευθύνσεις των σαρώσεων καθορίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις ακρίβειας και λεπτομέρειας, τη μορφολογία του ίδιου αντικειμένου αλλά και του περιβάλλοντος που το περικλείει και με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η καθολική αποτύπωσή του.

Εκτός από τους παραπάνω τύπους σαρωτών laser, για μικρών διαστάσεων (κινητά) αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη επιτυχία και σαρωτές δομημένου φωτός.

Οι πιο διαδεδομένοι αποτελούνται:

- 1 προβολέα (συνήθως LCD) ο οποίος προβάλλει στο αντικείμενο ένα συγκεκριμένο πρότυπο από παράλληλες λευκές και μαύρες λωρίδες μειούμενου πλάτους,
- 1 φωτομηχανή υψηλής ανάλυσης, για καταγραφή των παραμορφώσεων (λόγω του αναγλύφου του προς σάρωση αντικειμένου) των προβαλλόμενων προτύπων
- 1 ή 2 φωτομηχανές, για μονο ή στερεο φωτογράφιση του αντικειμένου προς απόδοση υψής στο δημιουργούμενο 3D μοντέλο.



Εικόνα 1.3: Τριγωνισμός ακτίνας - επιπέδου

Οι 3D συντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου υπολογίζονται με επίλυση των τριγώνων που σχηματίζουν κάθε φορά οι δύο ομόλογες οπτικές ακτίνες και η θέση του σημείου στο χώρο, με γνωστή τη βάση (μετά από βαθμονόμηση). Με κάθε σάρωση παράγεται ένα πυκνό νέφος σημείων, από την επεξεργασία του οποίου μπορεί να παραχθεί υψηλής ακρίβειας 3D μοντέλο του αντικειμένου με υψή (Soile et al., 2013).

1.3 Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση από Εικόνες

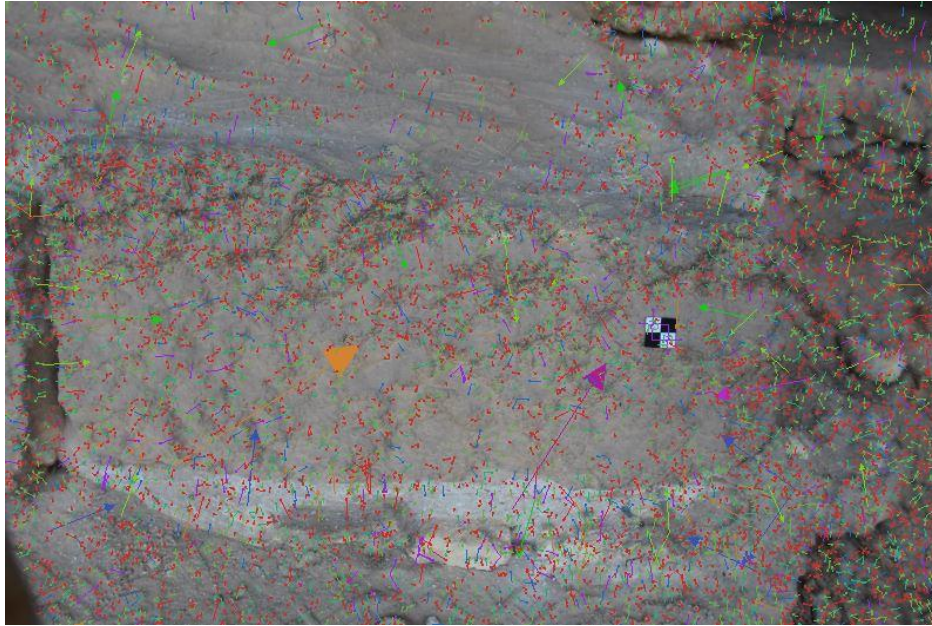
Συνεχείς βελτιώσεις στην απόδοση των υπολογιστών και της πληροφορικής έχουν οδηγήσει στη δυναμική 'εισβολή' μεθόδων, τεχνικών και λογισμικών της Όρασης Υπολογιστών (Computer Vision) σε πεδία που κυριαρχούσε η χρήση της εγγύς Φωτογραμμετρίας, όπως είναι αυτό της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων, εντείνοντας ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες και την ποικιλία προϊόντων που διατίθενται (Sauerbier and Eisenbeiss, 2010; Korumaz et al., 2012; Chiabrando et al., 2014; Balletti et al., 2015; Themistocleous et al., 2015). Με την εφαρμογή τέτοιου είδους τεχνικών, είναι δυνατή η δημιουργία λεπτομερών 3D μοντέλων απλών ή/και πιο πολύπλοκων αντικειμένων και ποικίλλων μεγεθών, ευέλικτα και αποτελεσματικά, μέσω αλληλουχιών εικόνων, ύστερα από επεξεργασία τους σε κατάλληλα λογισμικά

πακέτα, χαμηλού κόστους ή/και ελεύθερα, ακόμα και μέσω διαδικτύου. Η ταυτόχρονη εφαρμογή διαφόρων παραλλαγών πολύ-εικονικών μεθόδων (MVS) και τεχνικών συνταύτισης εικόνας για εξαγωγή μοναδικών χαρακτηριστικών, συμβάλλει στην ενίσχυση της έρευνας στο πεδίο αυτό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εξέλιξη αυτών των μεθόδων έχει οδηγήσει σε περιορισμό των διαφορών τους από τις τεχνικές σάρωσης με laser (Kersten et al., 2012; Santagati et al., 2013; Bolognesi et al., 2015). Ωστόσο, δεν επιτυγχάνονται πάντοτε αποτελέσματα με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια (Lerma et al., 2014), ενώ πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις ή/και να συντρέχουν κάποιες συνθήκες για προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα από την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων. Άλλες έρευνες υποστηρίζουν πως πρέπει να λειτουργούν επικουρικά των συμβατικών τεχνικών (Fiorillo et al., 2013; Balletti et al., 2015). Συνεπώς, οι δυνατότητες για τρισδιάστατες απεικονίσεις και δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αυξάνονται, δημιουργώντας ευρύ πεδίο εφαρμογής, από την παραγωγή σχεδίων υψηλής ακρίβειας κατάλληλα για εξειδικευμένες μελέτες αποκατάστασης μέχρι και ψηφιακές φωτορεαλιστικές αναπαραστάσεις και περιηγήσεις για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στη χρήση μεγάλου αριθμού εικόνων ενός αντικειμένου, οι οποίες έχουν ληφθεί από διαφορετικές οπτικές γωνίες, και από προκαθορισμένες ή πιο αυθαίρετες θέσεις με μια ή περισσότερες, απλές ή πιο σύνθετες φωτομηχανές, γνωστού ή άγνωστου εσωτερικού προσανατολισμού. Μπορεί επίσης, να χρησιμοποιούνται λήψεις μεμονωμένων εικόνων (υψηλής ανάλυσης) ή να προκύπτουν από αλληλουχίες στιγμιότυπων video (συνήθως εικόνες χαμηλότερης ανάλυσης) (Remondino and El-Hakim, 2006; Santagati et al., 2013). Βασική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μεγάλων επικαλύψεων μεταξύ των εικόνων.

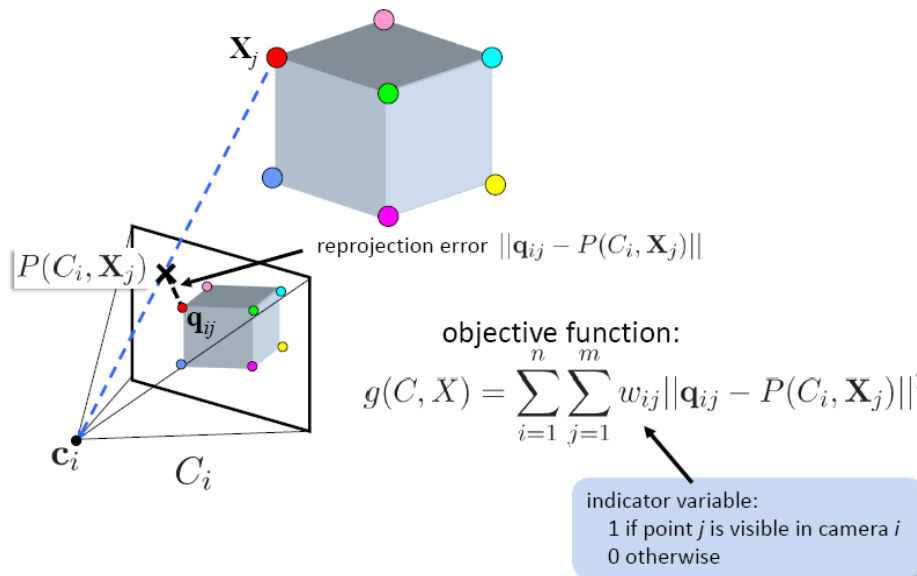
Η διαδικασία διενεργείται σε 3 στάδια:

❖ Αρχικά γίνεται ταυτόχρονος προσδιορισμός του εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού των εικόνων (με όρους συμβατικής φωτογραμμετρίας) και δημιουργία αραιού νέφους σημείων, με εφαρμογή μεθόδου Structure from Motion (SfM). Οι θέσεις των εικόνων και η γεωμετρία του αντικειμένου υπολογίζονται μέσω αυτόματου εντοπισμού κοινών χαρακτηριστικών σημείων (σημείων σύνδεσης) αλληλεπικαλυπτόμενων εικόνων (Wenzel et al., 2013). Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων χρησιμοποιείται είτε ο αλγόριθμος SURF (Bay et al., 2006), που αποτελεί εξέλιξη του πιο αργού αλγορίθμου SIFT (Lowe, 2004) ή κάποιες άλλες παραλλαγές του SIFT. Η ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος αναλλοίωτων σε μετασχηματισμούς κλίμακας γίνεται όχι μόνο από το SURF, αλλά και από άλλους αλγορίθμους, με το συνδυασμό πληροφοριών από πολλαπλές συνελίξεις με την ίδια οικογένεια φίλτρων, σε διαφορετικές κλίμακες [87]. Με τον αλγόριθμο SURF εντοπίζονται σημεία ενδιαφέροντος σε εικόνες διαφορετικής κλίμακας, με τη συνταύτιση των εικόνων να μπορεί να διεξαχθεί με μεγάλο ποσοστό επιτυχίας βάσει των ομολογιών των σημείων. Για κάθε σημείο προκύπτει ένας τοπικός δείκτης (descriptor) ο οποίος βασίζεται στη 'γειτονιά' κάθε σημείου και χρησιμοποιείται για τη συνταύτιση των εικόνων μετέπειτα.



Εικόνα1.3: Χαρακτηριστικά σημεία - κλειδιά και περιγραφείς τους

Για τον προσδιορισμό εσφαλμένων ομολογιών και τη βελτίωση του επιπέδου επιτυχίας της μεθόδου, εφαρμόζεται ο επαναληπτικός αλγόριθμος RANSAC ή βελτιωμένες τροποποιήσεις του. Με τον τρόπο αυτό επιλέγεται η λύση που οδηγεί στο μεγαλύτερο αριθμό των έγκυρων αντιστοιχίσεων μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος ελαχιστοποιώντας τα χονδροειδή σφάλματα μεταξύ των ομολογιών, βρίσκοντας την καλύτερη «συμφωνία» (consensus) μεταξύ των δεδομένων εισόδου. Η διαδικασία σταματά μόλις προσανατολιστούν όλες οι εικόνες ή μετά από κάποιο όριο επαναλήψεων εφόσον δεν είναι δυνατός ο προσανατολισμός του συνόλου των εικόνων. Συνήθως, με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, ακολουθεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων μέσω συνόρθωσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μεταξύ της υπολογιζόμενης θέσης των σημείων πάνω στις εικόνες και των αντίστοιχων πραγματικών τους, γνωστή ως συνόρθωση κατά δέσμες. Παράλληλα, γίνεται και πιο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της φωτομηχανής(-ών), βελτιώνοντας και τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων σε επόμενο στάδιο. Για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων απαιτείται καλή γεωμετρία δικτύου, δηλαδή λήψεις από διαφορετικές οπτικές γωνίες και σε περίπτωση που γίνεται χρήση φωτοσταθερών αυτά πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή για καλύτερα αποτελέσματα (Rumppler et al.,2014)



Εικόνα1.4: Γραφική αναπαράσταση του bundle adjustment και του σφάλματος επαναπροβολής. (Πηγή:www.cc.gatech.edu)

❖ Επόμενο βήμα αποτελεί η πύκνωση του νέφους σημείων, μέσω διαδικασίας πυκνής συνταύτισης εικόνας. Εφαρμόζονται αλγόριθμοι της όρασης υπολογιστών (τοπικοί, καθολικοί, ημι-καθολικοί κ.α.), για τον υπολογισμό των 3D συντεταγμένων χώρου για κάθε ρικελ εικόνας και όχι μόνο των χαρακτηριστικών της σημείων. Οι τοπικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους, ενώ οι καθολικοί πετυχαίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα από άποψη ποιότητας και ακρίβειας, ωστόσο, λόγω μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, συχνά παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις. Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα πετυχαίνοντας περίπου τα ίδια αποτελέσματα με τις καθολικές μεθόδους. Έτσι προκύπτει ένα ιδιαίτερα πυκνό νέφος σημείων, καλύπτοντας όλα τα τμήματα του αντικειμένου που απεικονίζονται σε τουλάχιστον τρεις εικόνες. Ωστόσο, παρουσιάζονται προβλήματα δυσχεραίνοντας την αυτόματη εύρεση ομολογιών και την απώλεια πληροφορίας σε κάποιες περιοχές.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που δυσχεραίνουν τη διαδικασία της συνταύτισης είναι οι εξής:

- Η γεωμετρία της λήψης των εικόνων σε συνδυασμό με σύνθετη μορφολογία της σκηνής. Ένα σύνηθες πρόβλημα που δημιουργείται, όταν υπάρχει απότομη μεταβολή του αναγλύφου, είναι οι μεγάλες προοπτικές παραμορφώσεις στην απεικόνιση των αντικειμένων λόγω εκτροπής αναγλύφου που κατ' επέκταση προκαλεί αποκρύψεις και αντιμετωπίζεται με χρήση πιο πολλών εικόνων.
- Οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις και διαφορές στις εικόνες (θόλωμα, καμένα ρικελ, θόρυβος, ανακλάσεις, χαμηλή ανάλυση της δειγματοληψίας της εικόνας, κινούμενα αντικείμενα, βλάστηση)
- Σκιές ή υπερέκθεση στο φως (λόγω συνθηκών φωτισμού κατά τη λήψη).
- Η έλλειψη υψής και τα επαναλαμβανόμενα πρότυπα (π.χ. μονόχρωμοι λείοι τοίχοι, ταπετσαρίες).

❖ Τελευταίο στάδιο αποτελεί η παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου του αντικειμένου ως συνεχής επιφάνεια, με τη μορφή ακανόνιστου δικτύου τριγώνων

(TIN) ή άλλων πιο εξελιγμένων μορφών προσέγγισης της επιφάνειας (curves, nurbs). Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να εμπλουτιστεί ακόμη περισσότερο και με την απόκτηση υφής (texturing - visualization), περιλαμβάνοντας τη μέγιστη δυνατή πληροφορία, ώστε να αξιοποιηθεί ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις του κάθε τελικού χρήστη.

1.4 Μέθοδοι Αποτυπώσεων Χαμηλού Κόστους

Δεδομένης της τεχνολογικής προόδου στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών και της ανάπτυξης ικανού αριθμού αλγορίθμων μέσω των οποίων είναι δυνατή η ανακατασκευή της τρισδιάστατης γεωμετρίας της σκηνής από φωτογραφίες, το ενδιαφέρον πλέον επικεντρώνεται στη δημιουργία και χρήση συστημάτων χαμηλού κόστους στον τομέα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης για την πολιτιστική κληρονομιά, το οποίο φαίνεται να επιτυγχάνεται μέσω των παραπάνω πολύ-εικονικών μεθόδων και τεχνικών. Το μεγάλο ζήτημα είναι η διατήρηση των επιπέδων της ακρίβειας και της ποιότητας τόσο των δεδομένων (πρωτογενείς μετρήσεις, εικόνες) όσο και των προϊόντων που παράγονται μέσω αυτών (τρειςδιάστατα μοντέλα με ή χωρίς υφή, 2D εικονιστικά προϊόντα) αντίστοιχα υψηλά.

Το είδος, ο αριθμός και οι προδιαγραφές των οργάνων και των τεχνικών που μπορούν κάθε φορά να χρησιμοποιηθούν στην κατεύθυνση αυτή, ορίζονται από τις εκάστοτε ανάγκες της αποτύπωσης. Τέτοια συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν πολύ απλά καθημερινά όργανα μέτρησης αποστάσεων, βασικά ή/και πιο εξειδικευμένα τοπογραφικά όργανα χαμηλής ή/και πολύ υψηλής ακρίβειας, αισθητήρες διαφόρων τύπων (μικρά GPS, αποστασιόμετρα) κ.τ.λ. μέχρι και φωτογραφικές μηχανές (ερασιτεχνικές - καθημερινές ή/και πιο επαγγελματικές). Όλα τα παραπάνω εργαλεία, σε συνδυασμό με τα κατάλληλα λογισμικά (ελεύθερα ή/και εμπορικά) συντελούν στην τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων, με διαφορετική ποιότητα ανάλογη με την ποιότητα των εργαλείων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά και σύμφωνα με τις ανάγκες του τελικού αποδέκτη.

Γενικά, τα απολύτως απαραίτητα εργαλεία για μια τέτοιου τύπου διαδικασία, είναι μια όσο το δυνατόν καλύτερη φωτογραφική μηχανή αναφορικά με τον αριθμό και το μέγεθος των εικονοστοιχείων της, τις παραμορφώσεις του φακού και τον αισθητήρα της, με γνωστά τα βασικά της χαρακτηριστικά (μέγεθος αισθητήρα, μέγεθος φακού) και μια μέθοδος μέτρησης αποστάσεων πάνω στο αντικείμενο ή στη σκηνή για την απόδοση κλίμακας στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Όσο περισσότερα και πιο αξιόπιστα δεδομένα εισάγονται στη διαδικασία, τόσο πιο ακριβή και ποιοτικά τελικά προϊόντα προκύπτουν. Στα παρακάτω κεφάλαια παρατίθεται τα όργανα, τα εργαλεία και οι τεχνικές που πρέπει να γίνουν, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα μια τέτοιας διαδικασίας χαμηλού κόστους όπως οι παραπάνω, να έχει υψηλό δείκτη ποιότητας και αξιοπιστίας, επαναληψιμότητας και σταθερότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΛΛΟΓΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1 Μέθοδοι Συλλογής Δεδομένων - UAV

Για την πλήρη και καθολική αποτύπωση της πλειονότητας των μνημείων με τις πιο εξελιγμένες τεχνικές της σάρωσης με laser και της φωτογραμμετρίας μέσω της δημιουργίας των τρισδιάστατων μοντέλων τους, δημιουργήθηκε η ανάγκη για αναζήτηση νέων τρόπων απόκτησης δεδομένων.

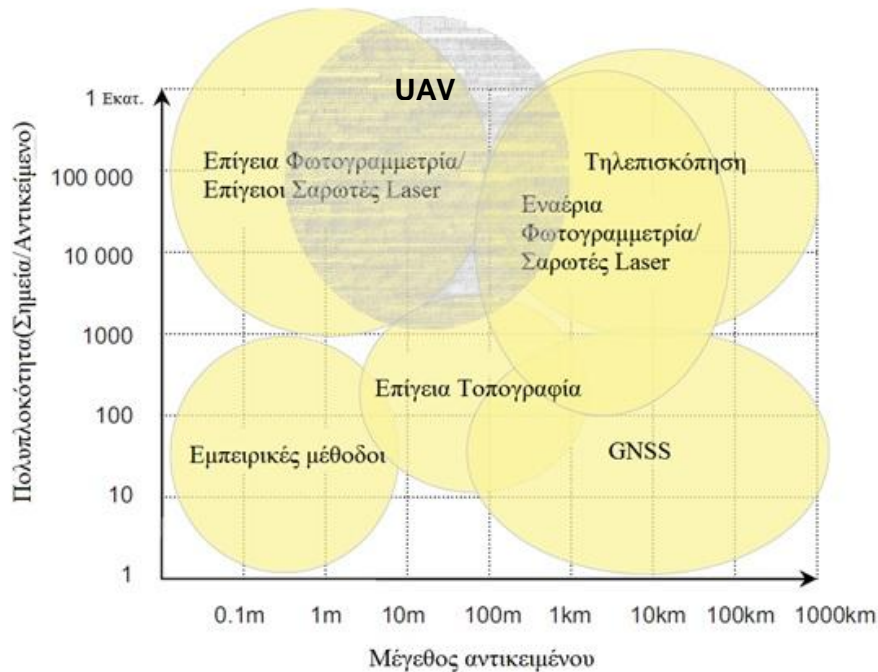
Η ραγδαία εξέλιξη τόσο των συστημάτων σάρωσης και των φωτομηχανών (σε ανάλυση, μέγεθος, βάρος, δυνατότητες) έδωσε νέα δυναμική στη λήψη δεδομένων για εφαρμογές ειδικών αποτυπώσεων. Πληθώρα συστημάτων έχουν δημιουργηθεί με σκοπό την πιο εύκολη, γρήγορη και αποτελεσματική λήψη δεδομένων, επίγεια, από αέρος, ακόμα και υποβρύχια.



Εικόνα 2.1: Μέσα συλλογής εικόνων ανάλογα με υψόμετρο

Αναφορικά με τις εναέριες λήψεις, ενώ στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν από μπαλόνια και γερανοφόρα οχήματα μέχρι και ελικόπτερα για την πλήρη κάλυψη και λήψη δεδομένων από μεγάλο ύψος, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μη επανδρωμένα εναέρια μέσα/συστήματα (UAV/UAS), ικανά να φέρουν σαρωτές laser και φωτομηχανές μικρού (ή και μεγαλύτερου) μεγέθους. Τα εναέρια αυτά συστήματα αποτελούν προσθήκη στον τομέα της εναέριας φωτογραμμετρίας, συνδυάζοντας την υψηλή ακρίβεια με την ευκολία στην απόκτηση γεωχωρικών δεδομένων, χωρίς απαραίτητως να αντικαθιστούν τα ήδη υπάρχοντα επανδρωμένα συστήματα, αλλά λειτουργώντας επικουρικά ή σε μικρότερης έκτασης εργασίες αποτύπωσης. Διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο τους (μικρά αεροπλάνα ή ελικόπτερα με ένα ή παραπάνω έλικες- πολυκόπτερα), αναφορικά με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (μέγεθος, βάρος, ώρα πτήσης, χειρισμός), τους αισθητήρες που μπορούν να φέρουν

(GNSS, INS/IMU, οπτικοί, πολυφασματικοί, θερμικοί, Lidar - Radar) και τέλος τις εφαρμογές όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά και το κόστος τους.



Εικόνα 2.2: Με γκρι χρώμα το εκτιμώμενο μερίδιο των UAV στις μεθόδους αποτύπωσης στο διάγραμμα του Bohler, 2005.

Η συνδυασμένη χρήση χαμηλού κόστους πλατφορμών UAV και φωτογραφικών μηχανών αντίστοιχα, αποτελώντας εναέρια συστήματα συλλογής δεδομένων (UAS) με μικρού κόστους, είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος ζήτημα, καθότι φαίνεται να αποτελεί ένα αποτελεσματικότερο εργαλείο στους τομείς των τρισδιάστατων αποτυπώσεων και σε πλήθος εφαρμογών (χαρτογραφία, οδοποιία, ογκομετρήσεις, παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων και τεχνικών έργων, καλλιέργεια). Παρακάτω παρατίθενται συγκριτικά στοιχεία για τα είδη, τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμεύουν τα κυριότερα από τα είδη των UAV που υπάρχουν σήμερα.

2.1.1 Πλεονεκτήματα UAV

Η χρησιμότητα των UAV συνίσταται κυρίως για περιπτώσεις αποτυπώσεων που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω επίγειων μεθόδων ή η χρήση φωτογραφικών ή άλλων τριπόδων ή οποιουδήποτε είδους πλατφορμών ακόμα και επανδρωμένων οχημάτων δεν ενδείκνυται, σε συνδυασμό με ταχύτητα και ευελιξία στη λήψη των δεδομένων. Τέτοιες μπορεί να είναι δυσπρόσιτες περιοχές όπου είναι αναγκαία, η λήψη εικόνων από χαμηλό σχετικά ύψος, με συγκεκριμένες γωνίες λήψης (κατακόρυφες, πλάγιες, οριζόντιες λήψεις) και πολύ κοντά σε κατασκευές ή αντικείμενα, όπως για παράδειγμα πάνω/κοντά σε αρχαιολογικούς χώρους και μνημεία παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

Τα σύγχρονα UAV έχουν ευελιξία σχεδιασμού και προγραμματισμού πτήσης, με τη βοήθεια μερικών υποβοηθούμενων ή πλήρως αυτόνομων λειτουργιών, μέσω αξιοποίησης συστημάτων πλοήγησης και προσανατολισμού, συνδυαστικά με

προγράμματα αυτόματου πιλότου. Σημαντική είναι η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (εικόνας ή/και βίντεο, θέση και προσανατολισμού κ.α.) σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας άμεση την επίβλεψη της διαδικασίας και τον εντοπισμό σφαλμάτων και ελλείψεων.

Χρησιμοποιούνται για εφαρμογές τόσο μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας, με εύρος αναφορικά με την έκταση που μπορούν να καλύψουν να εκτείνεται από μερικά τετραγωνικά μέτρα έως αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα. Ωστόσο, αυτό επηρεάζεται σημαντικά από το χρόνο και το ύψος πτήσης, στοιχεία τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την τελική επιθυμητή ανάλυση των εικόνων (μέγεθος εδαφοψηφίδας της τάξης των μερικών mm για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας).

Το κόστος αγοράς των UAV μπορεί να είναι από λίγες εκατοντάδες μέχρι και χιλιάδες ευρώ. Ωστόσο, το κόστος λειτουργίας και συντήρησής τους, ειδικά για τις μικρότερες κατηγορίες είναι συνήθως αρκετά μικρό, καθιστώντας τα ένα οικονομικό μέσο συλλογής δεδομένων, ειδικά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, που οι δαπάνες για επανδρωμένα σκάφη ή ακόμη και για επίγεια συστήματα είναι υπέρογκες.

2.1.2 Μειονεκτήματα UAV

Παρά τις νέες προοπτικές και δυνατότητες, η χρήση των UAV δεν είναι εύκολη υπόθεση καθώς υπάρχουν αρκετά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Περιορισμοί υπάρχουν τόσο ως προς το φορτίο, (μέγεθος και βάρος αισθητήρων) που μπορούν να φέρουν, με επακόλουθο το μικρό σχετικά χρόνο πτήσης <20λεπτά), όσο και ως προς το βεληνεκές τους. Επίσης, η επιτρεπόμενη οροφή πτήσης διατηρείται χαμηλή κυρίως λόγω ασφάλειας (αν και δεν υπάρχει σαφές νομικό πλαίσιο) αλλά και κόστους.

Τα UAV χαμηλού κόστους δεν είναι εξοπλισμένα με συστήματα επικοινωνίας με τις αρχές της εναέριας κυκλοφορίας και με συστήματα αποφυγής συγκρούσεων, επομένως είναι αναγκασμένα να λειτουργούν μόνο εντός οπτικού πεδίου του χειριστή, για την ενδεχόμενη περίπτωση αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων. Έτσι, προκύπτει το πρόβλημα της ύπαρξης έμπειρου χειριστή, αν και σε ερευνητικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια επίλυσης τέτοιων προβλημάτων με τον κίνδυνο σύγκρουσης να υπάρχει πάντα. Άλλα προβλήματα που σχετίζονται με τη λήψη εικόνων από UAV, είναι οι κραδασμοί που σε συνδυασμό με τις καιρικές συνθήκες μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην λήψη φωτογραφιών και τα οποία αντιμετωπίζονται εν μέρει από αυτοματοποιημένα λογισμικά ειδικά σχεδιασμένα για εικόνες από UAV. Επισημαίνεται, πως στις λήψεις από μηχανές με κλείστρο τύπου ρολού (rolling shutter), παρατηρείται το φαινόμενο της παραμόρφωσης των αντικειμένων, είτε λόγω κίνησης με υψηλή ταχύτητα, είτε έντονων δονήσεων από την ίδια την πλατφόρμα. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, τόσο πριν την πτήση (με χρήση κατάλληλων μέσων απορρόφησης κραδασμών) όσο και κατά την επεξεργασία των εικόνων, με χρήση μαθηματικών μοντέλων αντιμετώπισης των παραμορφώσεων.

2.1.3 Είδη - Χαρακτηριστικά UAV

Αν και υπάρχουν πάρα πολλά είδη διαφορετικών UAV, τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει διαφόρων χαρακτηριστικών όπως οι διαστάσεις, οι

συσκευές που φέρει ή ο τρόπος απογείωσής τους, αυτά κατηγοριοποιούνται σε τρεις γενικές ομάδες:

α) UAV πολλών στροφείων (πολυκόπτερα)

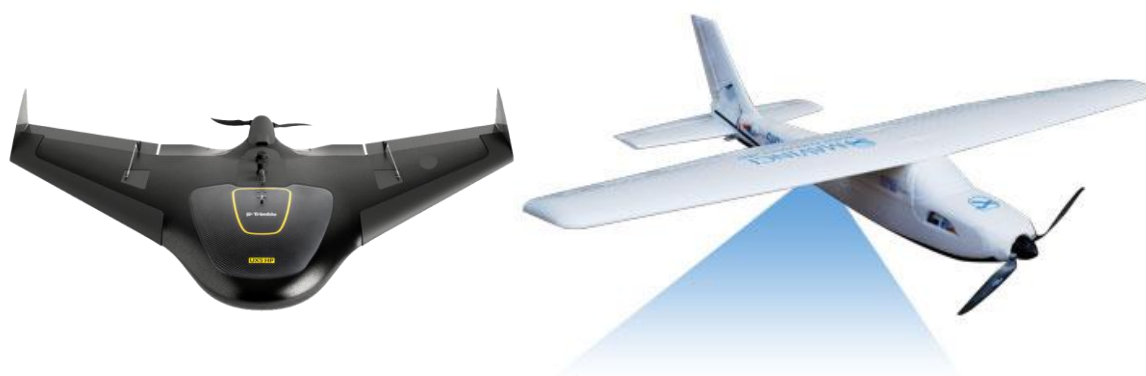


Εικόνα 2.3: UAV πολλών στροφείων. (Αριστερά το τετρακόπτερο X8M 3D Robotics, δεξιά χειροποίητο οκτακόπτερο)

Πρόκειται για μοντέλα με περισσότερα από δύο στροφεία, είναι κατακόρυφης απογείωσης με μικρή απαίτηση χώρου για απογείωση και προσγείωση, όπου διακρίνονται ανάλογα με τον αριθμό των στροφείων σε τετρακόπτερα, εξακόπτερα ή και οκτακόπτερα κ.τ.λ (εικ. 2.3). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η σταθερότητα και η ικανότητα για ελιγμούς. Για το λόγο αυτό, σε συνδυασμό με τη δυνατότητά τους για πτήση σε χαμηλά ύψη και με μικρή ταχύτητα, θεωρούνται ιδανικά για αποτυπώσεις μεγάλων κλιμάκων και φωτογραμμετρικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Η λήψη των εικόνων γίνεται με χρήση ειδικού μηχανισμού ανάρτησης φωτομηχανής, όπου μέσω συστημάτων επικοινωνίας πλατφόρμας-χειριστή μπορούν να λαμβάνονται δεδομένα από οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Το βασικό μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι πως είναι αρκετά πολύπλοκα, λόγω του υλικού κατασκευής τους και των συστημάτων που φέρουν και είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, με αποτέλεσμα την μικρή σχετικά αυτονομία τους(15-20min)

.β) UAV σταθερών πτερυγίων



Εικόνα2.4: UAV/UAS σταθερών πτερυγίων. (Αριστερά το UX5 HP της Trimble, δεξιά το Sirius της TopCon)

Τα μοντέλα αυτού του είδους όπως είναι τα αεροπλάνα και οι πτέρυγες, έχουν πιο απλή δομή με υλικά συνήθως από αφρώδες υλικό, αποτελώντας μια όχι τόσο

σύνθετη κατασκευή, αναφορικά με τα πολυκόπτερα. Για το λόγο αυτό έχουν λιγότερες απαιτήσεις σε θέματα συντήρησης και επισκευής τόσο από άποψη εξειδικευμένης γνώσης και τεχνικής όσο και από άποψη κόστους. Είναι σταθερά και αξιόπιστα, με αρκετά μεγάλο ωφέλιμο φορτίο. Η απλή δομή παρέχει καλύτερη αεροδυναμική, όπου σε συνδυασμό με το μικρό τους βάρος εξασφαλίζουν μεγαλύτερη διάρκεια και ταχύτητα πτήσης, συνεπώς φωτογραφική κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής. Βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτού του είδους αποτελεί η απαίτηση για αρκετό ελεύθερο χώρο για την απογείωσή τους, η οποία μπορεί να γίνεται είτε με ειδικό εκτοξευτήρα ή χειροκίνητα και ακόμα περισσότερο χώρο για την προσγείωσή τους. Σε αντίθεση με τα πολλαπλών στροφείων UAV, ενδείκνυται για αποτυπώσεις μεγαλύτερων περιοχών, επειδή δεν μπορούν να πετούν σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ή να μένουν σταθερά σε συγκεκριμένα σημεία λόγω του ότι απαιτείται να βρίσκονται σε διαρκή κίνηση προς τα εμπρός για τη δημιουργία ανύψωσης.

γ) UAV ελικόπτερα



Εικόνα2.5: UAV ελικόπτερα. (Αριστερά της Riegl, δεξιά άγνωστο)

Μοιάζουν αρκετά με τα σταθερών στροφείων όσο αφορά στον τρόπο απογείωσης και προσγείωσης, αλλά και στην ικανότητά τους για ελιγμούς και πτήση σε χαμηλό ύψος και σε συγκεκριμένες θέσεις. Ωστόσο, η χρήση ενός (ή/και δύο) έλικα(ων) τα καθιστά πιο πολύπλοκα από άποψης χειρισμού, αλλά παράλληλα ικανά για ανύψωση μεγαλύτερου φορτίου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με συσκευές Lidar (εικ. 2.5).

2.1.4 Τρόποι λήψης δεδομένων εικόνας

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι λήψης των απαραίτητων εικόνων στις αναγκαίες θέσεις, που ορίζει ο χειριστής, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των συστημάτων που απαρτίζουν τα UAS (μηχανής, GPS κ.τ.λ.) Αυτοί είναι συνήθως οι παρακάτω:

- Χειροκίνητα μέσω video link.
- Μέσω διαδοχικών λήψεων σε συγκεκριμένο χρονικό βήμα (time lapse):

Οι φωτογραφίες λαμβάνονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή επικάλυψη των εικόνων (ανάλογα και με την ταχύτητα πτήσης). Στη μέθοδο αυτή η φωτογραφική μηχανή δεν είναι απαραίτητως συνδεδεμένη με τον αυτόματο πιλότο αλλά μπορεί να προγραμματιστεί για τη λήψη

των εικόνων πριν την απογείωση, για το λόγο αυτό συναντάται σε πολλά συστήματα χαμηλού κόστους.

- Μέσω διαδοχικών λήψεων σε σταθερές αποστάσεις ή σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο μέσω GPS:

Οι φωτογραφίες λαμβάνονται ανά συγκεκριμένη απόσταση, ή σε κατάλληλες θέσεις ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή επικάλυψη των εικόνων (ανάλογα και με την ταχύτητα πτήσης). Σε αντίθεση με προηγούμενα, ο χειρισμός γίνεται από σύστημα αυτόματου πιλότου

- Αιώρηση πάνω από το σημείο έως ότου επιτευχθούν οι ακρίβειες (GPS)
- Συνεχής καταγραφή μέσω λήψης βίντεο:

Η λήψη βίντεο προσφέρει τη δυνατότητα καταγραφής μεγάλου όγκου δεδομένων, με σκοπό την επιλογή των καταλληλότερων στιγμιότυπων ύστερα από επεξεργασία. Είναι πιο ασφαλής μέθοδος αναφορικά με την φωτογραφική κάλυψη του αντικειμένου, υστερεί όμως συνήθως σε ανάλυση εικόνας, για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν βίντεο υψηλότερης ανάλυσης (FullHD, UHD,4k).

2.1.5 Τα UAV/UAS στην πολιτιστική κληρονομιά

Η χρήση των UAV σε περιπτώσεις αρχαιολογικών εφαρμογών και ψηφιακής καταγραφής των μνημείων της πολιτισμικής κληρονομιάς, έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις μνημείων σε διάφορες τοποθεσίες ανά τον κόσμο. Δεδομένης της πρόσφατης τεχνολογικής εξέλιξης σχετικά με αυτά τα μη επανδρωμένα εναέρια μέσα, δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη και αξιολόγηση χαμηλού κόστους εναέριων συστημάτων εξοπλισμένων με απλές ερασιτεχνικές (ή πιο σύνθετες) φωτογραφικές μηχανές (UAS) ως μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση στα ακριβά, επίγεια συστήματα σάρωσης laser για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση των 3D αντικειμένων. Πολλές φορές, η γεωμετρική τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς αφορά συχνά σε μεγάλης έκτασης εφαρμογές, που πρέπει να αντιμετωπισθούν με μεθόδους γρήγορες και χαμηλού κόστους, πάντα με σεβασμό προς το εκάστοτε μνημείο και τον αντίστοιχο χώρο που τα περιβάλλει (Καραδέδος, 2009). Μέσω των σύγχρονων εναέριων μη επανδρωμένων συστημάτων λήψης δεδομένων (UAS), οι διαδικασίες της γεωμετρικής τεκμηρίωσης για τον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, γίνονται οικονομικότερες από άποψη χρόνου και κόστους, ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις για μεγάλο εύρος εφαρμογών.

ιδιαίτερα σε ιστορικά μνημεία και σύνολα, που είναι ανοιχτά στο κοινό ή προσελκύουν μεγάλο τουριστικό ενδιαφέρον, η ανάγκη για ταχύτητα στην λήψη των δεδομένων γίνεται επιτακτική. Αντίστοιχα, σε περιοχές αρχαιολογικών ανασκαφών όπου σταδιακά, απαιτούνται αποτυπώσεις, τόσο για τον καλύτερο συντονισμό των εργασιών ανεύρεσης αρχαιολογικών ευρημάτων, όσο και για την αποτύπωση όλων των ενδιάμεσων φάσεων μίας ανασκαφής, αλλά ακόμα και για την τρισδιάστατη ανακατασκευή μεμονωμένων ευρημάτων.

Επιπροσθέτως, αυτού του είδους οι τεχνικές αποτύπωσης ανήκουν στην κατηγορία των μη καταστροφικών μεθόδων αποτύπωσης, χωρίς ουσιαστικά επαφή με το αντικείμενο. Σε πολλές περιπτώσεις, αποφεύγεται η απευθείας επαφή με το υπό

μελέτη αντικείμενο για την πρόληψη περαιτέρω καταστροφών μέχρι την ολοκλήρωση των απαραίτητων ενεργειών για την προστασία του (π.χ. σε τοποθεσίες όπου έχει λάβει χώρα κάποια ανθρωπογενής ή φυσική καταστροφή). Με τον τρόπο αυτό, δίνεται μια νέα δυναμική σε μνημεία που βρίσκονται σε χώρους δύσβατους ή ακόμη και σε τοποθεσίες όχι εύκολα προσεγγίσιμες από αρχαιολόγους ή από επανδρωμένα οχήματα, όπως συμβαίνει για αρκετά αρχαιολογικά ευρήματα και άλλα μνημεία της πολιτιστικής μας κληρονομιάς. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να οφείλονται σε κινδύνους λόγω αστάθειας του εδάφους και του ευρύτερου χώρου των μνημείων ή ακόμη και έλλειψη στατικής επάρκειας των ίδιων των μνημείων που λόγω ζημιών και καταστροφών φυσικών ή/μη που έχουν προκληθεί κατά το πέρασμα του χρόνου. Τέλος, σε μερικές περιπτώσεις που η λήψη των απαιτούμενων στοιχείων (μετρήσεις - σήμανση φωτοσταθερών, φωτογραφίες), είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί παρά μόνο με χρήση ειδικών τριπόδων ή και γερανών με τις εκάστοτε δυσκολίες και η εφαρμογή με επίγειων μεθόδων τοπογραφίας και φωτογραμμετρίας είναι σχεδόν αδύνατη (π.χ. ψηλά κτίρια). Αντ' αυτού η χρήση εναέριων συστημάτων δίνει την δυνατότητα παραγωγής εικονιστικών προϊόντων υψηλής ποιότητας με ιδιαίτερα οικονομικό, γρήγορο και εύκολο τρόπο. Ταυτόχρονα, μέσω των παραπάνω μεθόδων και τεχνικών τα υπό μελέτη αντικείμενα δύναται να αναπαρίστανται όχι μόνο υπό τη μορφή δυσδιάστατων σχεδίων και μόνο για σκοπούς γεωμετρικής τεκμηρίωσης, αλλά και υπό τρισδιάστατη αναπαράσταση με πραγματική υφή και υψηλή ευκρίνεια για τουριστικούς ή άλλους σκοπούς προβολής, προώθησης και επιμόρφωσης. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των τρισδιάστατων μοντέλων και των παραγώγων τους αξιολογείται σε επόμενο κεφάλαιο μετά από σύγκριση με αποτελέσματα από επίγειες μετρήσεις με γεωδαιτικό σταθμό και σαρωτή laser.

2.2 Ένταξη σε Συστήματα Αναφοράς

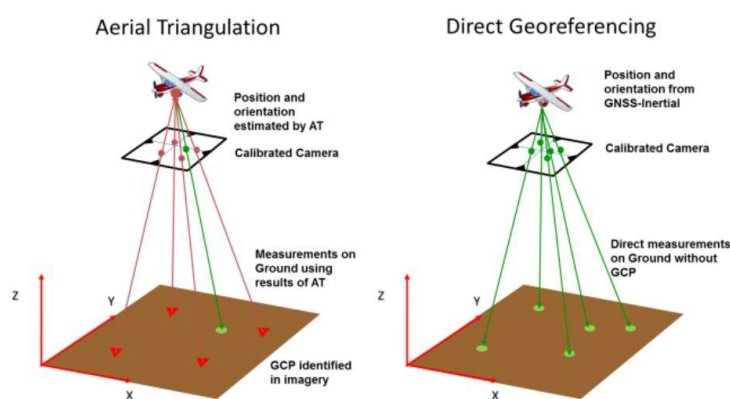
Για την απόδοση κλίμακας ή/και προσανατολισμού στα τρισδιάστατα μοντέλα που προκύπτουν από την εφαρμογή των πολύ-εικονικών μεθόδων και τεχνικών που αναλύονται παραπάνω, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα εργαλεία και τεχνικές, ανάλογα με την επιθυμητή τελική ακρίβεια των παραγόμενων προϊόντων.

Παραδοσιακά, για την ένταξη ενός 3D μοντέλου ή διανυσματικού σχεδίου σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων είτε από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα είτε αυθαίρετο, απαιτείται η χρήση κοινών σημείων γνωστών συντεταγμένων, τα οποία να είναι ευδιάκριτα πάνω σε αυτά.

Στην περίπτωση που η αποτύπωση γίνεται με τοπογραφικές μεθόδους, σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, ως "μοντέλο" θεωρούνται τα σημεία στο χώρο, όπως προκύπτουν από την έμμεση μέτρηση γωνιών κι αποστάσεων και πρέπει οι συντεταγμένες τους να είναι γνωστές και στα δύο συστήματα (αυθαίρετο και γεωδαιτικό). Όταν όμως η αποτύπωση γίνεται μέσω εικόνων οι οποίες στην συνέχεια επεξεργάζονται είτε φωτογραμμετρικά είτε με τις πιο σύγχρονες πολυ-εικονικές μεθόδους της όρασης υπολογιστών, το μοντέλο μπορεί να είναι ακόμα και ένα σύνολο δύο ή περισσότερων εικόνων της ίδιας περιοχής, κατάλληλα συσχετισμένων μεταξύ τους (αποκατάσταση σχετικού προσανατολισμού με κλασικές μεθόδους ή SfM) σε κάποιο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Για τη γεωαναφορά, δηλαδή την ένταξη σε κάποιο γεωδαιτικό (ή/ μη) σύστημα αναφοράς μοντέλων αυτού του είδους, απαιτείται η χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων στο σύστημα αυτό.

Χρησιμοποιούνται λοιπόν προσημασμένα σημεία (φωτοσταθερά σημεία), τα οποία σκοπεύονται στις εικόνες με αποτέλεσμα τον υπολογισμό του συνόλου των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων αυτών ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$). Στην κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία, ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού μίας αεροφωτογραφίας ή ενός μπλόκ εικόνων γίνεται έμμεσα, με την χρήση της μεθόδου του αεροτριγωνισμού. Ο αεροτριγωνισμός αφορά στη συνόρθωση του μπλοκ των αεροφωτογραφιών και αποτελεί ένα σύνολο σχετικών και απόλυτων προσανατολισμών. Αντίθετα, μέσω των πολύ-εικονικών μεθόδων, μπορεί είτε να ακολουθούνται διαδικασίες αντίστοιχες του απόλυτου προσανατολισμού ή/και να γίνεται ενσωμάτωση κλασικών φωτογραμμετρικών διαδικασιών αντίστοιχων της συνόρθωσης κατά δέσμες για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση λήψεων εικόνων από εναέρια συστήματα τα οποία είναι εφοδιασμένα με συστήματα GNSS/INS, η διαδικασία του αεροτριγωνισμού μέσω σημείων γνωστών συντεταγμένων μπορεί να παρακαμφθεί, αφού οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας υπολογίζονται με άμεσο τρόπο τη στιγμή της λήψης από τα συστήματα αυτά, (Skaloud, 2002). Ωστόσο, για εξαγωγή αξιόπιστων τιμών των παραμέτρων αυτών, ο εξοπλισμός θα πρέπει να αποτελείται από υψηλής ακριβείας δέκτες GPS/GNSS και INS/IMU, ενώ η χρήση άλλων πρόσθετων αισθητήρων, όπως μαγνητόμετρα και αισθητήρες πίεσης μπορούν να αξιοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της γεωαναφοράς (Pfeifer κ.ά., 2012). Η διαδικασία είναι γνωστή και ως άμεση γεωαναφορά, βασικό πλεονέκτημα της οποίας αποτελεί η μη απαίτηση ύπαρξης φωτοσταθερών σημείων, παρά μόνο για τη βαθμονόμηση του συστήματος, η οποία δεν απαιτείται να γίνεται πάντα. Μια τέτοια διαδικασία είναι αρκετά πιο γρήγορη και αυτοματοποιημένη και με λιγότερο κόστος αναφορικά με το ανθρώπινο δυναμικό, ωστόσο είναι πιο διαδεδομένη στα επανδρωμένα οχήματα, λόγω του αριθμού και του μεγέθους των συστημάτων που απαιτούνται.



Εικόνα2.6: Αεροτριγωνισμός (αριστερά) και άμεση γεωαναφορά (δεξιά).
(Πηγή: Mian et al., 2015)

Αναφορικά με τα UAV/UAS, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το ωφέλιμο φορτίο τους, υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη διάρκεια πτήσης και τον αριθμό των συστημάτων που μπορούν να φέρουν. Ασφαλώς, υπάρχουν εμπορικά συστήματα τα οποία είναι εφοδιασμένα με το σύνολο των συστημάτων που αναφέρονται παραπάνω, τα οποία επιτυγχάνουν σχετικά καλή ακρίβεια άμεσης γεωαναφοράς, με υψηλό όμως κόστος απόκτησης και κυρίως χρησιμοποιούνται για χαρτογραφικές εφαρμογές. Ωστόσο, η έρευνα στον τομέα αυτό δείχνει πως η χρήση συστημάτων χαμηλού κόστους τόσο GNSS/INS όσο και φωτογραφικών μηχανών (Mian et al.,2015) μπορεί να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα (της τάξης των λίγων cm από ύψη 80μ., με χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού), παράγοντας χρήσιμος για πολλές εφαρμογές. Παρά το γεγονός πως η ακρίβεια που επιτυγχάνεται μέσω της άμεσης γεωαναφοράς δεν είναι αρκετή για την πλειονότητα των περιπτώσεων στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων τα οποία λαμβάνονται από τα εναέρια συστήματα χαμηλού κόστους εφοδιασμένα με GNSS/INS, μπορούν να χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές στη διαδικασία της τρισδιάστατης ανακατασκευής της σκηνής ή του αντικειμένου, με αποτέλεσμα την αρκετά πιο γρήγορη σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας και την σχεδόν άμεση παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων και εικονιστικών προϊόντων. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έκτακτη ανάγκη, όπως φυσικές καταστροφές, όπου ενδέχεται να είναι αναγκαία η γρήγορη παραγωγή ορθοεικόνας σε περιορισμένο χρόνο ή σε περιπτώσεις δυσπρόσιτων περιοχών, όπου δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν εύκολα προσημασμένα σημεία, αλλά και για έλεγχο σχετικά με την επάρκεια των δεδομένων και την καθολική κάλυψη του μνημείου κατά τη διάρκεια της λήψης των δεδομένων.

2.3 Λογισμικά

Γενικά, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της τρισδιάστατης μοντελοποίησης από εικόνες και εξαγωγής αξιόπιστων στοιχείων, απαιτείται η χρήση αρκετών λογισμικών πακέτων εμπορικών ή ελεύθερων από το αρχικό στάδιο της συλλογής των δεδομένων μέχρι και την επεξεργασία τους και την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Μερικά από αυτά παρατίθεται στα στις παρακάτω παραγράφους.

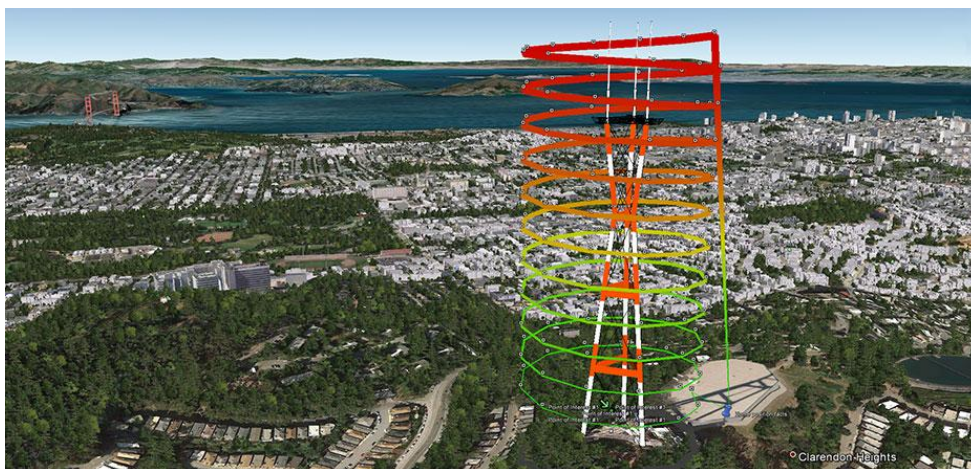
2.3.1 Λογισμικά σχεδιασμού πτήσης και παρακολούθησης

Για τη λήψη δεδομένων μέσω μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων (UAV/UAS) τα οποία φέρουν δέκτες GNSS, υπάρχουν αρκετά λογισμικά προγραμματισμού και διαχείρισης πτήσης, εμπορικά (Ground station) ή/και ανοικτού κώδικα (Ardu pilot, Mission Planer κ.α.). Αυτά, συνήθως αποτελούνται από συστήματα τόσο πάνω στις αερομεταφερόμενες πλατφόρμες (αυτόματοι πιλότοι) όσο και στα συστήματα διεπαφής με τον χειριστή (επίγειοι σταθμοί ελέγχου). Μέσω αυτών πραγματοποιείται εύκολα ο σχεδιασμός και ελέγχεται η πτήση, με τη χρήση ενός υπάρχοντος υποβάθρου (π.χ. Google Earth), καθώς επίσης παρακολουθείται και είναι δυνατή η αλλαγή των ρυθμίσεων σχετικά με τον τρόπο λήψης των δεδομένων (εικόνων ή βίντεο).



Εικόνα2.7: Η πλατφόρμα προγραμματισμού και διαχείρισης πτήσης Mission Planner

Η πτήση μπορεί να γίνεται είτε αυτόματα είτε με παρεμβολή του χειριστή, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες και δυσκολίες (έντονο ανάγλυφο, χαμηλή ορατότητα δορυφόρων, πτήση κοντά στο αντικείμενο). Συνήθως, σε αποτυπώσεις πολύ κοντά σε αντικείμενα ή χώρους με περιορισμένη ορατότητα προς τον ουρανό η πτήση ελέγχεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το χειριστή.



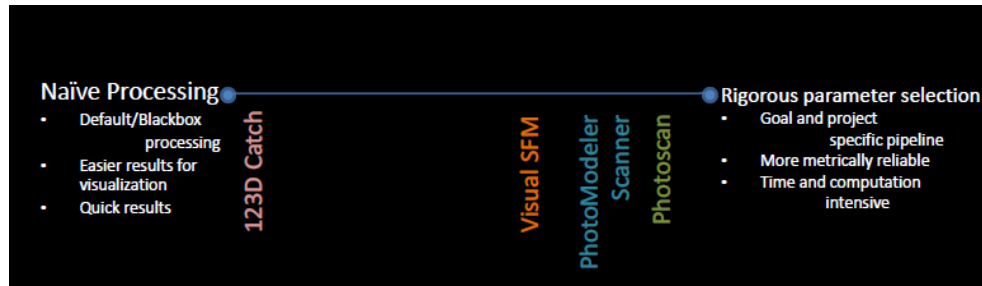
Εικόνα2.8: Προγραμματισμός πτήσης κοντά σε κατακόρυφο αντικείμενο μεγάλου ύψους (Πηγή:civilsensing.com)

2.3.2 Λογισμικά επεξεργασίας

Για την εφαρμογή των πολύ-εικονικών μεθόδων και επεξεργασία των παραγώγων τους διατίθενται ποικίλα λογισμικά πακέτα, που μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- εμπορικά, όπως τα Photomodeler, Pix4D, Agisoft Photoscan, iWitness, 3DF ZephyrPro, Acute 3D,

- ελεύθερα διατιθέμενα (στο διαδίκτυο), όπως τα SURE, VSfM, PMVS, Bundler, MicMac, MeshLab
- παρέχοντα υπηρεσίες (παραγωγή του 3D μοντέλου με υφή) μέσω διαδικτύου (web service software), όπως τα 123D Catch, Photosynth, Cubify, ARC 3D.



Εικόνα2. 9: Αποτελεσματικότητα λογισμικών IBM, (Πηγή: Barnes et al, Sparc)

Συγκρίσεις μεταξύ τέτοιων πακέτων και υπηρεσιών (Kersten and Lindstaedt, 2012), έδειξαν ότι, λόγω των ρυθμίσεων των παραμέτρων τους και της διαφορετικής αρχιτεκτονικής τους, μπορεί από τα ίδια δεδομένα να προκύψουν σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα ακρίβειας, ποιότητας και πληρότητας των 3D μοντέλων, εγείροντας θέματα αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας των προϊόντων. Πάντως, η πλειονότητα των εμπορικών ή ελεύθερων λογισμικών, στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας, βασίζεται στον αλγόριθμο SIFT (π.χ. λογισμικά Bundler, CMPMVS) ή σε κάποια εκδοχή του (π.χ. λογισμικά MicMac, Photoscan, 3DF ZephyrPro), χωρίς να παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες στις περισσότερες των περιπτώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑ ΠΕΤΡΙΝΑ ΓΕΦΥΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1 Ιστορική Εξέλιξη

Τα πέτρινα τοξωτά γεφύρια της Ελλάδας είναι σημαντικά επιτεύγματα αποτελώντας ανέκαθεν προϊόν της επιτακτικής ανάγκης των ανθρώπων για επικοινωνία. Μέσω αυτών των αριστουργημάτων τα οποία αποτελούν δείγματα της λαϊκής αρχιτεκτονικής και τα οποία συνήθως βρίσκονται σε πλήρη αρμονία με το φυσικό τους περιβάλλον, αναπτυσσόταν η κοινωνική και οικονομική ζωή του μείζονος ελληνικού χώρου στα νεότερα χρόνια. Σήμερα αποτελούν ένα πεδίο που μπορεί να προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών από διάφορα επιστημονικά πεδία και να γίνει αντικείμενο διεπιστημονικής μελέτης. Η αλληλεπίδραση της καλλιτεχνικής έμπνευσης του ανθρώπου με την ανέγγιχτη ομορφιά της μητέρας φύσης εμπνέονταν από τη ρήση ότι ο πρώτος γεφυροποιός είναι η ίδια η φύση και έτσι ακολουθούνταν οι κανόνες που η ίδια η φύση υπαγόρευε. Το φυσικό τοπίο προστατευόταν μέσω χρήσης μόνο ντόπιων πετρών και άλλων φυσικών δομικών υλικών, όπως ξύλο, χώμα και νερό. Οι μάστορες της εποχής είχαν εμπειρικές γνώσεις σχετικά με την ποιότητα, την αντοχή, την οικονομία, την ανακύκλωση, την επαναχρησιμοποίηση αλλά και την αισθητική των δομικών υλικών, προσδίνοντας μ' αυτόν τον τρόπο έναν ιδιαίτερα οικολογικό χαρακτήρα στις κατασκευές.

Στην προβιομηχανική Ελλάδα, το κύριο δομικό υλικό ήταν η πέτρα και ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που απασχολούσαν τους κατοίκους περισσότερο της ηπειρωτικής και λιγότερο της νησιωτικής υπαίθρου ήταν η ασφαλής διέλευση των οδοιπόρων και των μεταφορικών μέσων τους πάνω από ποτάμια, ρέματα και χείμαρρους. Μέχρι τον 20^ο αιώνα, τα πέτρινα γεφύρια, απλά ή πιο σύνθετα αποτελούσαν το κυριότερο συγκοινωνιακό τεχνικό έργο που μπορούσε να κατασκευάσει ο ασπούδαστος μάστορας της εποχής εκείνης για να δώσει τη λύση στο συγκοινωνιακό πρόβλημα που απασχολούσε όχι μόνο τον ίδιο αλλά όλους ανεξαιρέτως τους συντοπίτες του. Πολλά από αυτά τα μονότοξα ή πολύτοξα πέτρινα τοξωτά γεφύρια χρησιμεύουν ακόμη και σήμερα στη συνέχιση μιας συγκοινωνιακής γραμμής, π.χ. λιθόστρωτου δρόμου(καλντερίμι), μονοπατιού, αμαξιτού δρόμου ή σιδηροδρομικής γραμμής.

3.2 Κατηγορίες, Μορφολογία, Τοποθεσία, Υλικά Κατασκευής

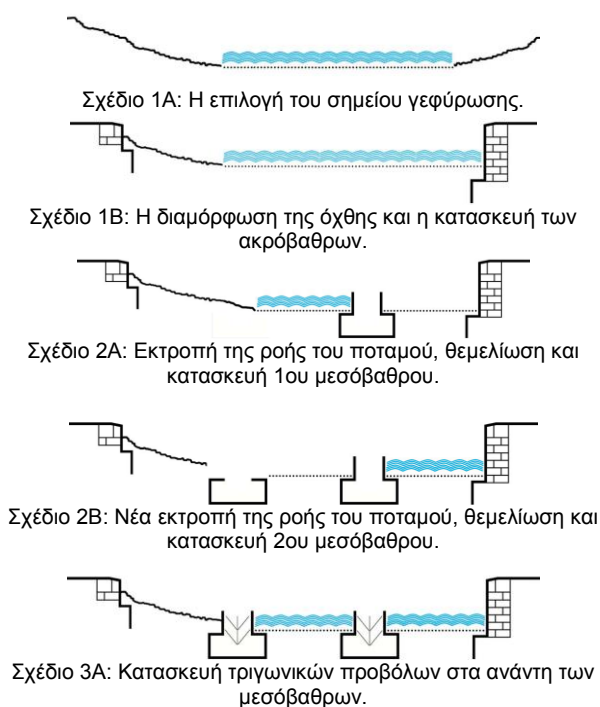
Όλα τα πέτρινα γεφύρια, ανάλογα με τον αριθμό των τόξων τους, ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα μονότοξα και τα πολύτοξα. Η μορφολογία των ποταμιών ακολουθεί την εξής λογική: στα ορεινά εδάφη με μεγάλη κλίση τα ποτάμια έχουν μικρό πλάτος και έτσι είναι πιο ορμητικά, ενώ στα πεδινά εδάφη με ελάχιστη κλίση τα ποτάμια φτάνουν στο μέγιστο πλάτος τους και χάνουν την ορμητικότητά τους. Έτσι, μπορούμε με ασφάλεια να βγάλουμε το εξής συμπέρασμα: τα μονότοξα γεφύρια βρίσκονται στα βουνά και τα πολύτοξα στις πεδιάδες. Επειδή η Ελλάδα είναι κατεχοχόν ορεινή χώρα, τα περισσότερα γεφύρια της είναι μονότοξα και βρίσκονται σε ορεινές περιοχές.

Τα γεφύρια που υπάρχουν στον Ελλαδικό χώρο είναι απλά και απέρριπτα, δίχως υπερβολικές διακοσμήσεις. Το οδόστρωμα είναι αρκετά στενό, περιοριζόμενο αρκετές

φορές μόλις στα δύο μέτρα. Είναι στρωμένο πάντα με καλντερίμι, για να διαμορφωθεί, όταν το ανέβασμα παραγίνει απότομο, σε πλατύσκαλα με ελαφριά κλίση (Μαντάς1984, σ.18). Κανένα γεφύρι δεν είναι ολόιδιο με κάποιο άλλο, γιατί το κάθε ένα έχει τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά. Μπορεί να έχει ανακουφιστικά τόξα, μεμονωμένες ή συσσωματωμένες αρκάδες, σιδερένιες άρπιζες, ενεπίγραφες μαρμάρινες πλάκες, ακόμα και ένα μικρό καμπανάκι που προειδοποιεί για τους κινδύνους της διέλευσης. Βασική πρώτη ύλη ήταν ο σχιστόλιθος που αφθονεί στην Ελλάδα, ενώ για συνδετική ύλη χρησιμοποιούσαν ένα είδος υδατοστεγούς ασβεστοκοκινιάματος, το «κουρασάνι». Αυτό το έφτιαχναν οι ίδιοι οι μάστορες και αποτελούνταν από ένα μίγμα τριμμένου κεραμιδιού, σβησμένου ασβέστη, ελαφρόπετρας, χύματος, νερού και ξερών χόρτων. Σε αρκετές περιπτώσεις, έριχναν μέσα στο μίγμα ασπράδια αυγών και μαλλιά ζώων για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα και τη συνεκτικότητα του. Επίσης, υλοτομούσαν τοπική ξυλεία, την επεξεργάζονταν μερικώς και κατασκεύαζαν τον ξυλότυπο.

Όπου υπάρχουν λιθόγλυπτα διακοσμητικά στοιχεία αφορούν σε οικοδομικές επιγραφές με χρονολογίες κτίσης ή ανακαίνισης. Επίσης, αναφέρονται ονόματα χορηγών και σπανιότατα μαστόρων. Άλλες παραστάσεις είτε ως αυτόνομα θέματα είτε ως πλαίσιο στις επιγραφές σπανίζουν. Οι λιθόγλυπτες επιγραφές εντοιχίζονται στην κορυφή του τόξου, πάνω από τον κορυφαίο θολίτη (κλειδί) ή στο κεντρικό τμήμα των τύμπανων μεταξύ των τόξων. Αρκετά γεφύρια ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα γιατί δε στέκουν μόνα τους στην ερημιά της ελληνικής υπαίθρου. Τα γεφύρια αυτά πλαισιώνονται με ένα εικονοστάσι, ένα ξωκλήσι, μια κρήνη, ένα νερόμυλο, ένα χάνι και σπανιότερα με μια κούλια. Στα χρόνια της Τουρκοκρατίας, η κούλια ήταν ένα φυλάκιο, στο οποίο διέμενε μόνιμη φρουρά για να προστατεύει το γεφύρι από δολιοφθορές και να ελέγχει τους διερχόμενους.

3.3 Αναπαράσταση Κατασκευής



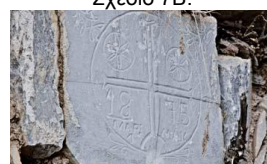
Σχέδιο 6B: Κατασκευή τυμπάνων ή περυγότοιχων.



Σχέδιο 7A: Γεφύρι στις Πορτίτσες Γεφύρι της Άρτας.

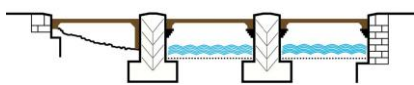


Σχέδιο 7B:

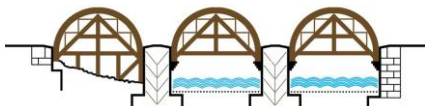


Σχέδιο 8A: Η ενεπίγραφη πλάκα στο γεφύρι της Πατωσίας, στη Μακρινίτσα Μαγνησίας.

Σχέδιο 3B: Κατασκευή τριγωνικών προβόλων στα κατάντη των μεσόβαθρων.



Σχέδιο 4A: Κατασκευή δοκοθηκών στη γένεση του πέτρινου τόξου.



Σχέδιο 4B: Στήριξη του «κρεμαστού» ξυλότυπου στις δοκοθήκες.



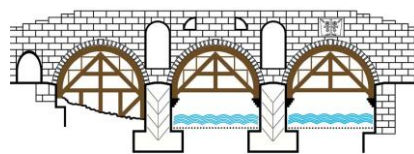
Σχέδιο 5A: Τοποθέτηση των θολιτών λίθων.



Σχέδιο 5B: Τοποθέτηση του «κλειδιού».



Σχέδιο 6A: Κατασκευή ψευδοκαμάρας στην πλημμυρική κοίτη.



Σχέδιο 8B:



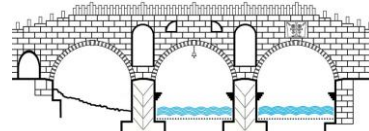
Σχέδιο 9A: Η κατασκευή λιθόστρωτου καταστρώματος (καλντερίμι).



Σχέδιο 9B: Η τοποθέτηση προστατευτικών πέτρινων στυλίσκων (αρκάδες).



Σχέδιο 10A: Η σταδιακή αφαίρεση των ξυλότυπων.



Σχέδιο 10B: Η τοποθέτηση της μικρής καμπάνας και η παράδοση του γεφυριού.

Εικόνα 3. 1: Στάδια κατασκευής γεφυριών Πηγή: Κ.Π.Ε. Μακρινίτσας

3.4 Τα Γεφύρια Σήμερα Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Με το πέρασμα του χρόνου η λάσπη και η πέτρα έδωσαν τη θέση τους στο μπετόν και το ασφάλι. Πολλά πετρογέφυρα παρασύρθηκαν από τα ποτάμια, λόγω έλλειψης συντήρησης και άλλα κατά τη διάρκεια των πολέμων. Σημαντικός αριθμός απ' αυτά βούλιαξαν και εξακολουθούν να βουλιάζουν στον πυθμένα των ταμειωτήρων και λιγότερα ίσως επιχώθηκαν από τις χαράξεις των δρόμων. Δε λείπουν και οι περιπτώσεις που εγκιβωτίστηκαν τα γεφύρια με σκυρόδεμα, για να προκύψει μεγαλύτερο πλάτος καταστρώματος ώστε να καλυφθούν οι σημερινές κυκλοφοριακές ανάγκες. Εκτός από μεμονωμένες περιπτώσεις, κανένα ουσιαστικό μέτρο δεν πάρθηκε για τη διάσωση, έστω των πιο αξιόλογων γεφυριών από επικείμενη κατάρρευση.

Τα πέτρινα τοξωτά γεφύρια έχουν μεγάλη γεωγραφική διασπορά και συνήθως είναι χτισμένα σε μια ιδιαίτερη αλλά και σε πολλές περιπτώσεις δυσπρόσιτη θέση. Συνήθως βρίσκονται σε κομβικά σημεία και συχνά πάνω στη χάραξη αρχαίων και μεταγενέστερων δρόμων και άλλων υπερτοπικών διαδρομών. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την τοπική και την εθνική ιστορία, αφού πολλές φορές αποτέλεσαν πεδίο μάχης, αντικείμενο δολιοφθοράς, χώρο συναντήσεων με ειρηνευτικούς σκοπούς, ακόμα και συνοριακό ορόσημο.

Εξαιτίας της δυσπρόσιτης θέσης τους αλλά και της έντονης αστυφιλίας που καταδυναστεύει την ελληνική ύπαιθρο τις περισσότερες φορές τα πέτρινα τοξωτά γεφύρια δεν αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του άμεσου περιβάλλοντος των

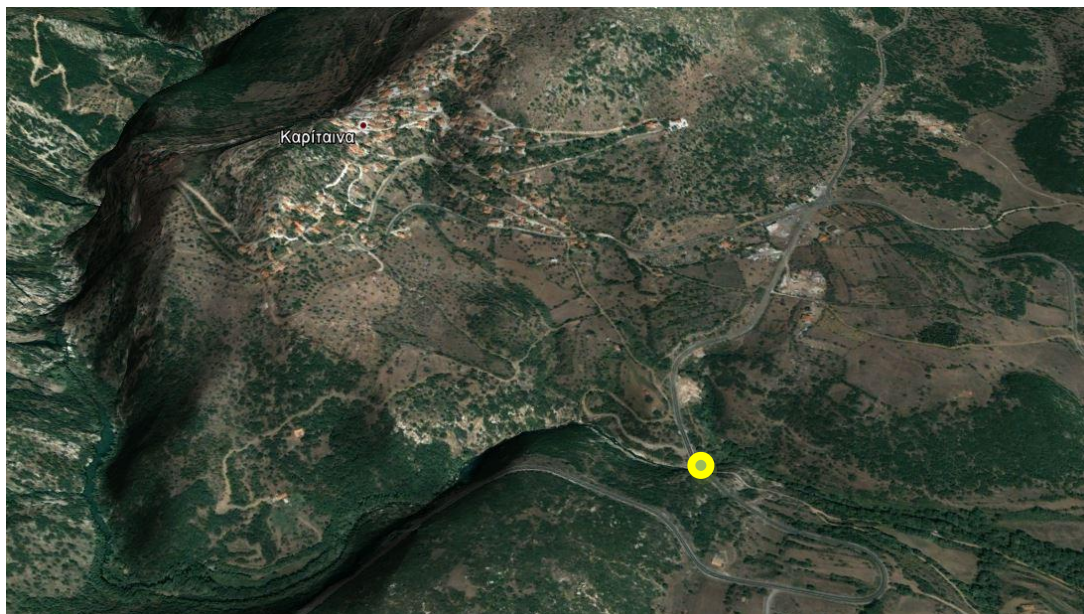
Ελλήνων και οι γνώσεις τους σχετικά με αυτά είναι περιορισμένες έως ανύπαρκτες. Μάλιστα, σε πολλές περιπτώσεις, αγνοείται ακόμα και η ύπαρξή τους. Έτσι πάρα πολλά έχουν περιέλθει σε αχρηστία και αναπόφευκτα έχουν γίνει βορά στη φθοροποιοί δύναμη του πανδαμάτορα χρόνου.

Το πλήθος των εμπειριών και των γνώσεων που σχετίζονται με την κατασκευή των γεφυριών και αποκτήθηκαν με την πάροδο αιώνων, αποτελεί πηγή πληθωρικού λαογραφικού υλικού αποκαλύπτοντας πτυχές της καθημερινής ζωής τόσο των εμπειροτεχνών μαστόρων που τα έχτισαν όσο και του πλήθους των ανθρώπων που τα χρησιμοποιούσαν για αιώνες.

Κύριο μέλημα για την πολιτιστική, τουριστική ανάπτυξη και προστασία του περιβάλλοντος της χώρας μας στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης θα έπρεπε να είναι η ακριβής καταγραφή, η διεπιστημονική μελέτη, η συντήρηση-επισκευή, προστασία και τέλος η ανάδειξη των πέτρινων τοξωτών γεφυριών ως μοναδικά δείγματα της πολιτιστικής κληρονομιάς της χώρας μας.

3.5 Παλιό Γεφύρι Καρύταινας Αλφειού

Η Καρύταινα είναι χτισμένη σε λόφο 582 μέτρων, τον λόφο Άγιος Ηλίας ή Ακρεοβούνι, και είναι από τους πιο εντυπωσιακούς διατηρητέους οικισμούς της Αρκαδίας. Στεφανώνεται από ένα επιβλητικό φράγγικο κάστρο που υπενθυμίζει τον σημαντικό ρόλο που έπαιξε στην περίοδο της Φραγκοκρατίας και του Δεσποτάτου του Μυστρά.



Εικόνα 3.2: Ευρύτερη περιοχή Καρύταινας από Google Earth

Το κάστρο είναι χτισμένο από το Γάλλο ηγεμόνα Γοδεφρείγο ντε Βριγιέρ στα μέσα του 13^{ου} αιώνα, στα ερείπια της αρχαίας πόλης Βρένθης (4ος π.χ αιώνας), την οποία ο Πausanίας το 176 μ.χ. βρίσκει ερειπωμένη. Αποτελεί λαμπρό παράδειγμα της βυζαντινής κυριαρχίας και αίγλης όπου στη συνέχεια μετατράπηκε σε καταφύγιο και προμαχώνας κατά την Τουρκοκρατία. Έχει χαρακτηριστεί σαν το Τολέδο της Ελλάδας και ήταν ορμητήριο του Κολοκοτρώνη κατά την επανάσταση του '21. Η

Καρύταινα, αποτελεί τόπο δεμένο με θρύλους και με σπουδαία ιστορικά γεγονότα που σημάδεψαν την πορεία του Έθνους. Έχει αξιόλογα μνημεία που συγκινούν τον επισκέπτη, όπως εκκλησίες από τη βυζαντινή εποχή, αξιόλογους πύργους και γεφύρια με θαυμάσια αρχιτεκτονική.

Στα ριζά του βράχου πάνω στον οποίο δεσπόζει η γραφική αρκαδική κωμόπολη της Καρύταινας στέκει ένα ιστορικό κτίσμα το οποίο παρουσιάζει έντονο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον. Πρόκειται για την παλαιά Γέφυρα του Αλφειού ποταμού γνωστό και ως «γεφύρι του πεντοχίλιарου», επειδή εικονιζόταν στην πίσω όψη του πιο διάσημου χαρτονομίσματος στα χρόνια της δραχμής. Έχει κηρυχθεί ιστορικό διατηρητέο Μνημείο βάσει της ΥΑ 136340/6023/29-12-1956 - ΦΕΚ 11/Β/12-1-1957.



Εικόνα 3. 3: Παλιό χαρτονόμισμα πέντε χιλιάδων δραχμών, όπου αναπαρίστανται το γεφύρι

Πέτρινο, με πέντε τόξα, μεγαλόπρεπο, χτισμένο από τους Φράγκους το 13^ο αιώνα, στο δρόμο που συνέδεε το κάστρο της Καρύταινας με τη Μεσσηνία κατά το μεσαίωνα. Αποτελούσε πεδίο μαχών μεταξύ Ελλήνων και Τούρκων πολλές φορές κατά την τουρκοκρατία, αλλά κυρίως κατά τους χρόνους της επανάστασης καθώς ήταν από τα λίγα περάσματα από Γορτυνία προς Μεσσηνία και Ηλεία. Τη σημερινή του μορφή με τα πολλά ορθογώνια ανακουφιστικά ανοίγματα την πήρε το 1441, όταν ανακατασκευάστηκε από τον Ραούλ Μανουήλ Μελική, γόνο σπουδαίας Βυζαντινής οικογένειας σύμφωνα μια εντοιχισμένη επιγραφή που υπήρχε μέχρι πρόσφατα στο εσωτερικό του παρεκκλησίου. Από τον ίδιο χτίστηκε και ένα τόξο σε μεσόβαθρο, που ακουμπάει πάνω σε βράχο (το δεύτερο τόξο από ανάντη) και λειτουργούσε σαν ανακουφιστικό. Με σαφή τη σχέση με αυτόν της Άρτας, ο μύθος λέει ότι, προκειμένου να στεριώσει το γεφύρι, στα θεμέλιά της είναι θαμμένη μια πριγκίπισσα των Φράγκων. Το ιδιαίτερο σχετικά με άλλα γεφύρια της εποχής που σώζονται σήμερα είναι μια δίκοχη μικρή εκκλησία αφιερωμένη στο Γενέσιο της Θεοτόκου, η οποία είναι γαντζωμένη στη δυτική πλευρά του γεφυριού, όπως συνήθιζαν να φτιάχνουν οι βυζαντινοί σε γεφύρια για να τα φυλάνε. Η παράδοση λέει ότι στο γεφύρι υπήρχε μια μικρή σχισμή μέσω της οποίας οι διαβάτες άφηναν τον οβολό τους για το εκκλησάκι και τα νομίσματα κατέληγαν από τη γέφυρα κατευθείαν πίσω από την εικόνα της Παναγίας, που βρισκόταν μέσα στον ναό.

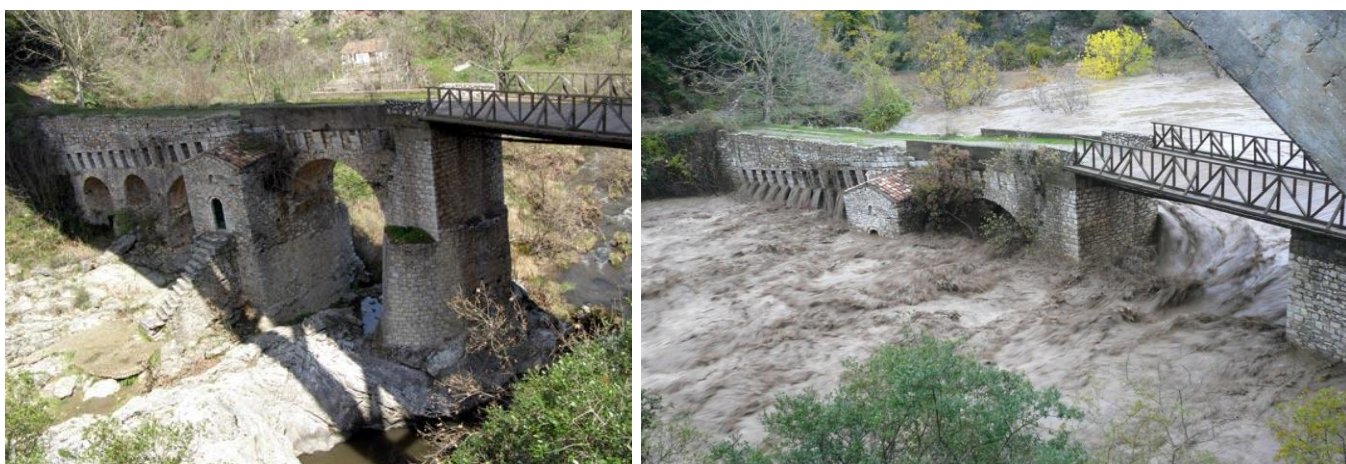
Η παλιά γέφυρα αποτελείται από πέντε άνισα τόξα με ορθογώνια ανακουφιστικά ανοίγματα, έχει μήκος πάνω από 50 μέτρα και 5 άνισες αψίδες, εκ των οποίων η μεγαλύτερη έχει άνοιγμα 8,75 μέτρα. Τα βάθρα του ακουμπούν πάνω σε πέτρα για περισσότερη ανθεκτικότητα στα φυσικά φαινόμενα. Σε γκραβούρες που

χρονολογούνται λίγο πριν το 1830 και έγιναν από μέλη της επιστημονικής εκστρατείας του Μοριά, το γεφύρι παρουσιάζεται με ένα πολύ πιο τονισμένο σαμάρι πάνω από τη μεσαία και μεγαλύτερη αψίδα. Είναι λοιπόν πιθανόν στις αρχές του 19ου αιώνα να έγινε κάποια επισκευή, μετατρέποντας τη μορφή του και να έμεινε η παλιά επιγραφή, η οποία χάθηκε πριν από λίγα χρόνια. Το σίγουρο είναι ότι το πάνω από τις θυρίδες μέρος είναι και αυτό προσθήκη του 19ου αιώνα.



Εικόνα 3.4: Αριστερά: Άποψη του γεφυριού το 1935. Στο βάθος το κάστρο της Καρύταινας (Πηγή www.mixanitouxropou.gr), Δεξιά: γκραβούρα 19ου αι,(πηγή arcadia.ceid.upatras.gr)

Σήμερα σώζονται τρία από τα πέντε τόξα του γεφυριού, καθώς το μεσαίο ανατινάχθηκε κατά τον Εμφύλιο. Το κομμάτι του παλιού γεφυριού που λείπει, έχει συμπληρωθεί από ξύλινο τμήμα, ενώ η διάβαση γίνεται από τη νέα σύγχρονη γέφυρα που είναι χτισμένη από την δεκαετία του '50, κάνοντας αναπόφευκτη τη σύγκριση ανάμεσα στην παλιά και την καινούργια. Η σημερινή κατάσταση του μικρού ναού δεν είναι ιδιαίτερα καλή, καθώς υπάρχουν εμφανείς ρηγματώσεις, ιδιαίτερα στο εσωτερικό του, μαζί με υψηλά επίπεδα υγρασίας. Ενδεχομένως, επιπρόσθετη επιβάρυνση να έχει ασκηθεί στο μνημείο λόγω εντόνων καιρικών φαινομένων της τελευταίας δεκαετίας.



Εικόνα 3.5: Κατάσταση γεφυριού σήμερα (αριστερά), κατά τη διάρκεια ισχυρής βροχόπτωσης το 2007 (δεξιά).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΓΕΦΥΡΙ ΤΗΣ ΚΑΡΥΤΑΙΝΑΣ

4.1 Επιλογή Διαδικασίας και Μεθόδου(-ων) Αποτύπωσης

Για το σύνολο των πετρόχτιστων γεφυριών του ελλαδικού χώρου, μέχρι σήμερα τα διαθέσιμα στοιχεία είναι ανεπαρκή. Το κυριότερο πρόβλημα οφείλεται στο γεγονός ότι οι υπάρχουσες αποτυπώσεις είναι λίγες σε σχέση με τον μεγάλο αριθμό των γεφυριών και διαφοροποιούνται αναφορικά με την ποιότητά τους. Ιδιαίτερα όσον αφορά στα πέτρινα γεφύρια, οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν ενδείκνυται, κυρίως λόγω του μεγέθους των μνημείων, της δυσκολίας πρόσβασης τους λόγω του έντονου ανάγλυφου και της δυσκολίας στη απόκτηση των δεδομένων. Για τους λόγους αυτούς, οι αποτυπώσεις μέσω UAV/UAS θεωρούνται παραπάνω από κατάλληλες, με εφαρμογή είτε πιο συμβατικών φωτογραμμετρικών μεθόδων είτε των πιο εξελιγμένων πολύ-εικονικών τεχνικών στις οποίες περιέχονται και αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στη φωτογραμμετρία.

Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν ιδιαίτερες αναφορές σε αντίστοιχες αποτυπώσεις μέσω πολυ-εικονικών μεθόδων, συνηθίζεται να εφαρμόζεται η τεχνική των laser σαρωτών και των γεωραντάρ. Η παρούσα εφαρμογή εκτός από την αποτύπωση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του παλιού γεφυριού της Καρύταινας, επικεντρώνεται στη διερεύνηση δυνατοτήτων χρήσης οργάνων και εφαρμογής χαμηλού κόστους μεθόδων και τεχνικών αποτύπωσης, μέσω τρισδιάστατης μοντελοποίησης, έτσι ώστε αυτές να έχουν εφαρμογή και σε άλλα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Δεδομένων των συνθηκών που επικρατούν στην παγκόσμια οικονομία, στόχος είναι η εύρεση οικονομικά προσιτών λύσεων για τη συνέχιση και διατήρηση της προσπάθειας για προστασία και ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς, η οποία δεν πρέπει να παραγκωνιστεί λόγω κοινωνικο-οικονομικών προβλημάτων και πολιτικών.

Τα πρωταρχικά ακατέργαστα δεδομένα για την εν λόγω εφαρμογή, αποτελούν λήψεις βίντεο, όπου στη συνέχεια μετατρέπονται σε εικόνες με κατάλληλο λογισμικό. Τα δεδομένα βίντεο, λαμβάνονται από πλατφόρμα UAV αλλά και επίγεια, με χρήση δύο διαφορετικών, χαμηλού κόστους φωτογραφικών μηχανών. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο τεχνικές που ανήκουν στην οικογένεια των αλγορίθμων της Όρασης Υπολογιστών, με χρήση διαφορετικών λογισμικών πακέτων εμπορικών-χαμηλού κόστους αλλά και ελεύθερων ή ανοικτού κώδικα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, συγκρίνονται τόσο μεταξύ τους και με δεδομένα από επίγειο σαρωτή laser για αξιολόγηση της όλης διαδικασίας.

4.2 Εξοπλισμός Συλλογής Δεδομένων

4.2.1 Τοπογραφικός εξοπλισμός

Οι μετρήσεις γίνονται με τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό (total station) με δυνατότητα μέτρησης απόστασης χωρίς ανακλαστήρα Topcon OS-105 (εικόν..). Αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Εικόνα 4. 1: Γεωδαιτικός σταθμός TopCon OS 105

Μοντέλο	OS-105
Γωνιομετρική ακρίβεια	5" (15cc)
Μεγέθυνση τηλεσκοπίου	30X
Εμβέλεια απόστασης με πρίσμα	4.000 m
Εμβέλεια απόστασης χωρίς πρίσμα	500 m
Ακρίβεια στην απόσταση	2mm + 2ppm
Ακρίβεια στην απόσταση χωρίς πρίσμα	3mm + 2ppm
Αντισταθμιστές	2

Πίνακας 4. 1: Χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού TopCon OS105



Εικόνα 4. 2: Σαρωτής laser ScanStation 2 της Leica

Μοντέλο	Leica Scantation 2
Τύπος	Time of Flight (ToF)
Εμβέλεια	μέχρι 300m
Ακρίβεια θέσης/ απόστασης (στα 50m), γωνιακή	6mm/4mm, 60 μrad
Εμβέλεια απόστασης χωρίς πρίσμα	500 m
Ανάλυση σάρωσης	< 1mm
Ταχύτητα σάρωσης	Μέχρι 50.000σημ./λεπτό
Βάρος	18 kg (όργανο) + 20kg (θήκη μεταφοράς)

Πίνακας 4. 2:Χαρακτηριστικά σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica

4.2.2 Φωτογραφικός εξοπλισμός χαμηλού κόστους

Η λήψη των βίντεο από τα οποία προκύπτουν οι εικόνες γίνεται από τις δύο παρακάτω μηχανές, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στους πίνακες που τις συνοδεύουν.



Μοντέλο	Mobius ActionCam
Διαθέσιμη ανάλυση εικόνας	2304×1536, 1920×1080, 1280×720, 848×480
Διαθέσιμη ανάλυση βίντεο	(1080p/30fps FULL HD, 720p/30-60fps HD & WVGA)
Τύπος αισθητήρα	CMOS
Μέγεθος αισθητήρα	1/3 inch, (5.07*3.38mm)
Μέγεθος εικονοστοιχείου	2.2μm*2.2 μm
Κλείστρο	Τύπου Rolling shutter
Time lapse βίντεο	(0.25s, 0.5s, 1s, 2s, 5s, 10s, 30s , με προγραμματισμό)
Διαστάσεις & Βάρος	61mm x 35mm x18mm, 38gr
Κόστος	≈100€

Πίνακας 4. 3: Χαρακτηριστικά κάμερας Mobius

Εικόνα 4. 3: Κάμερα Mobius



Μοντέλο	GoPro Hero 4 Black
Μέγιστη ανάλυση εικόνας	12.0 MP 4000×3000
Διαθέσιμη ανάλυση βίντεο	(4k/30fps-3840 x 2160, 1080p/30-60fps Full HD & WVGA)
Τύπος αισθητήρα	CMOS
Μέγεθος αισθητήρα	1/2.3 inch, (5.2*4.65 mm)
Μέγεθος εικονοστοιχείου	1.55μm*1.55 μm
Κλείστρο	Τύπου Rolling shutter
Συνδεσιμότητα	Wifi + bluetooth
Διαστάσεις & Βάρος	59mm x 41mm x21/30mm, 89gr
Κόστος	≈500€

Εικόνα 4. 4: Κάμερα GoPro Hero 4 Black

Πίνακας 4. 4: Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάμερας GoPro Hero 4 Black

4.2.3 UAV

Για τις λήψεις των βίντεο γίνεται χρήση χαμηλού κόστους μη επανδρωμένου εναέριου μέσου (UAV) με τέσσερα στροφέια, το οποίο δεν αποτελεί προϊόν του εμπορίου, καθώς δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής, αποτελώντας μέρος της παρούσας εργασίας. Μέσω ειδικής κατασκευής από αφρώδες υλικό, για εξοικονόμηση βάρους, η κάμερα προσαρμόζεται κατάλληλα, ανάλογα κάθε φορά με τον επιθυμητό προσανατολισμό και η πτήση γίνεται με τον απόλυτο έλεγχο του χειριστή. Τα μέρη που το συνθέτουν και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του φαίνονται στον πίνακα.



Εικόνα 4. 5: Πρωτότυπο UAV

Διαστάσεις πλαισίου	450mm (διαγώνιος)
Στροφέια(Motors)	(4)x 1200kv
Electronic Speed Control (ESC)	3S, 30A
Flight Control Board	Hobbyking KK2.1.5
Ραδιο-πομπός, δέκτης	2.4G FS-T4B 4CH Radio
Έλικες	9.5 x 4.5
Εμβέλεια	>300m
Μπαταρία	Lipo 3S, 11.1v, 5800mA
Βάρος(χωρίς μπαταρία)	≈400gr
Κόστος	≈300€

Πίνακας 4. 5: Χαρακτηριστικά μέρη UAV

4.3 Εργασίες Υπαίθρου

4.3.1 Αναγνώριση περιοχής μνημείου

Μετά την επιλογή του συγκεκριμένου μνημείου για εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, ακολούθησε επίσκεψη στο χώρο, με στόχο τον καθορισμό της ροής των εργασιών για την αποδοτικότερη και οικονομικότερη αποτύπωσή του. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερο μνημείο, τόσο λόγω της μορφής του και της παλαιότητάς του, όσο και της θέσης του, σε σημείο σχετικά δυσπρόσιτο πλέον, με εξ' ορισμού έντονο ανάγλυφο και πυκνή βλάστηση, για το λόγο αυτό απαιτείται να δοθεί προσοχή στον

τρόπο λήψης των απαραίτητων δεδομένων (επίγειων και από αέρος). Η κοίτη του ποταμού αποτελείται ουσιαστικά από δύο επίπεδα, όπου το υψηλότερο συνήθως δεν καλύπτεται από νερό, σε περιόδους χωρίς έντονα καιρικά φαινόμενα, οπότε η πρόσβαση είναι ευνοϊκότερη κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, όπως υπήρξε και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου. Ιδιαίτερη επίσης προσοχή, δίνεται και στις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας του εδάφους (ώρες ηλιοφάνειας – αποφυγή έντονων διαφοροποιήσεων του φωτισμού για λήψη εικόνων, ένταση ανέμων για πτήση κ.τ.λ.), ώστε τα προϊόντα της αποτύπωσης να έχουν τη μέγιστη δυνατή ποιότητα.



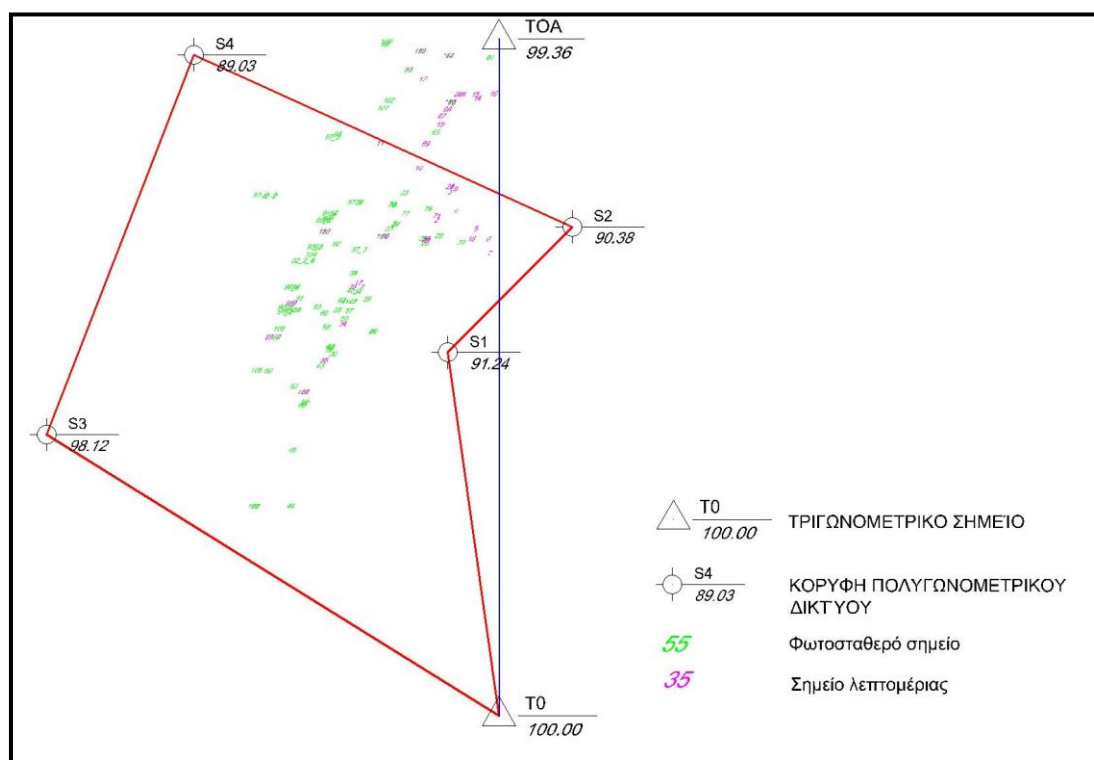
Εικόνα 4. 6: Γενική άποψη της περιβάλλοντα χώρου του γεφυριού Πάνω: Ανατολική όψη, Κάτω: Δυτική όψη

4.3.2 Ίδρυση γεωδαιτικού δικτύου - κατανομή φωτοσταθερών

Οποιαδήποτε μέθοδος γεωμετρικής τεκμηρίωσης και αν επιλεγεί, οι γεωδαιτικές μετρήσεις αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της αποτύπωσης ενός χώρου/αντικειμένου πολιτιστικής κληρονομιάς. Ακόμα και στις περιπτώσεις που δεν απαιτείται ύπαρξη προσανατολισμού παρά μόνο κλίμακα στα τρισδιάστατα μοντέλα (όπου αποδίδεται με κάποιον άλλο τρόπο), οι γεωδαιτικές μετρήσεις εξασφαλίζουν την ακρίβεια της διαδικασίας και αποτελούν εργαλείο για την αξιολόγηση των παραγόμενων προϊόντων. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, για την καθολική

τοπογραφική κάλυψη ενός μνημείου απαιτούνται περισσότερες της μιας στάσης, λόγω πολυπλοκότητας του αντικειμένου. Αντίστοιχα και στην περίπτωση του συγκεκριμένου γεφυριού είναι απαραίτητη η ίδρυση παραπάνω της μιας πολυγωνομετρικής στάσης οργάνου, λόγω της αναγκαιότητας μετρήσεων χαρακτηριστικών σημείων και φωτοσταθερών, τόσο στην κάτοψη όσο και στις δύο όψεις του.

Μετά από προσεκτική μελέτη του περιβάλλοντα χώρου του γεφυριού και λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη μορφολογία του εδάφους, καθώς και την ανάγκη για καλή γεωμετρία του δικτύου και ορατότητα στα μέρη του μνημείου προς αποτύπωση, γίνεται ίδρυση και μέτρηση πέντε (5) κορυφών. Σχηματίζεται με τον τρόπο αυτό, μια κλειστή όδευση γύρω και διαμέσου του μνημείου, με έντονη εναλλαγή υψομέτρου και σε θέσεις έτσι ώστε οι διευθύνσεις σκόπευσης προς το μνημείο να είναι κατά κύριο λόγο εγκάρσιες στο επίπεδο της όψης του, για αποφυγή σφαλμάτων στη μέτρηση της απόστασης από το γεωδαιτικό σταθμό.



Εικόνα 4. 7: Πολυγωνομετρικό Δίκτυο

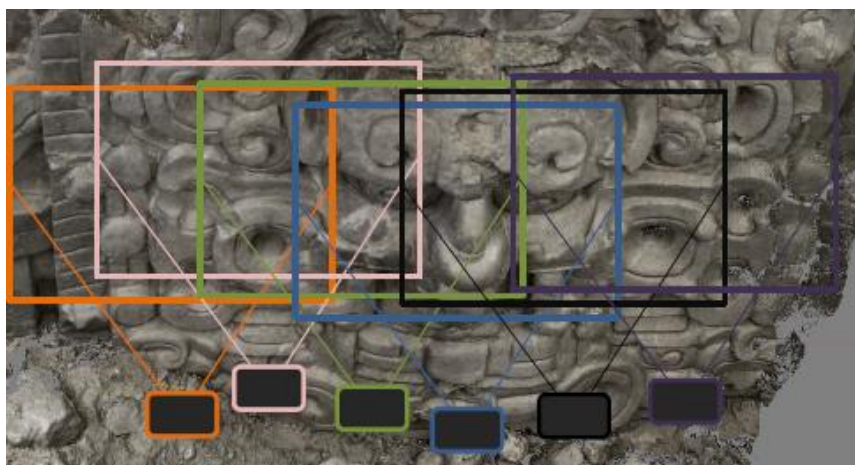
Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στον υπολογισμό των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου, οι μετρήσεις μεταξύ των στάσεων του δικτύου που έχουν αμοιβαία ορατότητα, γίνονται παραπάνω σε περισσότερες της μιας περιόδου και σε διαφορετικές συνθήκες. Ωστόσο, λόγω του έντονου ανάγλυφου και του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου για τοποθέτηση του οργάνου, ορατότητα επιτυγχάνεται κυρίως μόνο μέσω συνεχόμενων κορυφών του δικτύου. Για το λόγο αυτό και για την εξαγωγή ασφαλέστερων αποτελεσμάτων, η επίλυση του δικτύου για την εύρεση των συντεταγμένων των στάσεων γίνεται μέσω επίλυσης κλειστής κυκλικής όδευσης.

Για την εφαρμογή των πολυ-εικονικών τεχνικών και την απόδοση κλίμακας και προσανατολισμού, στο τρισδιάστατο μοντέλο που παράγεται μέσω αυτών των διαδικασιών, απαιτείται να είναι γνωστές οι γεωδαιτικές συντεταγμένες κάποιων σημείων (τουλάχιστον τριών) τα οποία να είναι ευδιάκριτα στις ληφθείσες εικόνες. Ωστόσο, για εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων αναφορικά με την ακρίβεια του μοντέλου και των παραγώγων του, γίνεται χρήση μεγαλύτερου αριθμού φωτοσταθερών και σημείων λεπτομέρειας (80), τα οποία μετρώνται από διαφορετικές στάσεις του δικτύου.

Το μέγεθος των φωτοσταθερών για τις αποτυπώσεις αυτού του είδους δεν προτείνεται να είναι μικρότερο από 3x3 cm. και εν γένει όχι μεγαλύτερο από 5x5cm. Οι θέσεις που τοποθετούνται πάνω στο μνημείο, επιλέγεται να είναι όσο το δυνατό κανονικά κατανομημένες, με ιδιαίτερη προσοχή να δίνεται στα άκρα του μοντέλου, για αποφυγή παραμορφώσεων λόγω ακτινικών διαστρώσεων και κακής γεωμετρίας των θέσεων της μηχανής. Λόγω του μεγέθους του μνημείου αλλά και του περιβάλλοντα χώρου τα υπόλοιπα φωτοσταθερά τοποθετούνται στο εσωτερικό του μοντέλου και σε θέσεις όπου είναι πιο εύκολα προσεγγίσιμες. Για τα πιο ψηλά σημεία όπου δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση φωτοσταθερών, γίνεται χρήση χαρακτηριστικών σημείων λεπτομέρειας (γωνίες λίθων, αρμοί κ.λ.π.). Σε επόμενα κεφάλαια, φαίνονται οι θέσεις και η κατανομή των φωτοσταθερών και των σημείων λεπτομερειών στις όψεις και την κάτοψη του μνημείου.

4.3.3 Λήψη δεδομένων βίντεο - εικόνας

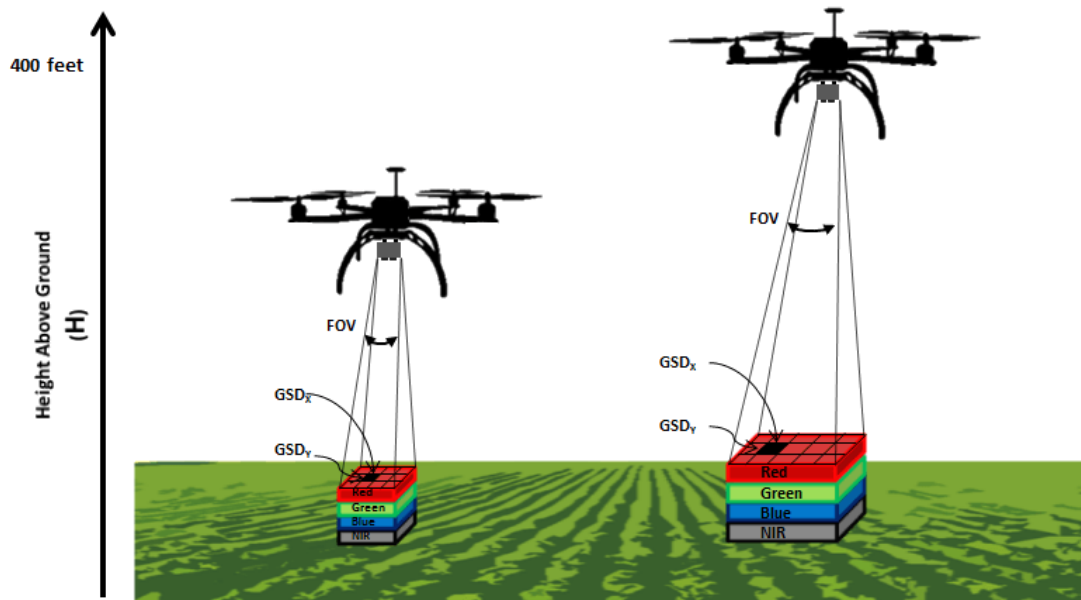
Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του μνημείου απαιτούνται τόσο επίγειες, όσο και από αέρος λήψεις, ανάλογα το τμήμα του μνημείου που αποτυπώνεται. Επειδή οι εικόνες (που προκύπτουν από στιγμιότυπα βίντεο) λαμβάνονται από μη μετρητικές μηχανές, εκτός από πλήρη φωτογραφική κάλυψη του μνημείου, απαιτείται οι θέσεις λήψης να είναι τέτοιες έτσι ώστε κάθε σημείο του μνημείου να απεικονίζεται σε τουλάχιστον δύο (προτείνεται πάνω από τρεις) εικόνες, των οποίων οι ομόλογες ακτίνες να τέμνονται υπό κατάλληλη γωνία (κριτήριο βάσης - απόστασης) για την επίτευξη καλύτερης αλληλοτομίας και τον βέλτιστο προσδιορισμό της θέσης των σημείων στο χώρο.



Εικόνα 4. 8: Προτεινόμενος τρόπος λήψης εικόνων για επικάλυψη. (Πηγή: University of Arkansas)

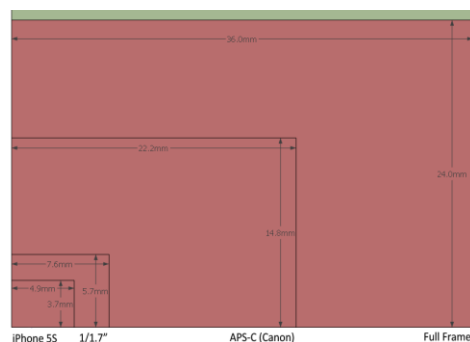
Για την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους αλλά και την αποφυγή σφαλμάτων και ελλείψεων, πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων γίνεται υπολογισμός του εύρους τιμών

που πρέπει να κυμαίνεται η απόσταση λήψης των δεδομένων βίντεο και εικόνας από το αντικείμενο, τόσο επίγεια όσο και από αέρος. Για το λόγο αυτό καθορίζεται η τελική ακρίβεια της αποτύπωσης να είναι της κλίμακας σχεδίων 1:50 και καλύτερη, όπως ορίζεται στην πλειονότητα των προδιαγραφών για τέτοιου είδους μνημεία, στα πλαίσια της γεωμετρικής τεκμηρίωσης. Δεδομένης της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου ματιού (0,2mm) είναι συνεπώς, ότι η ακρίβεια των τελικών προϊόντων είναι: $0,2 \cdot 50 = 1 \text{ cm}$.



Εικόνα 4. 9: Συνάρτηση ύψους μεγέθους εδαφοψηφίδας. (Πηγή www.senteksystems.com)

Δηλαδή, το μέγεθος του εικονοστοιχείου στο έδαφος πρέπει να είναι μικρότερο από 1cm. Αντικείμενα μικρότερων διαστάσεων δεν είναι κατ' ανάγκη διακριτά στα τελικά προϊόντα. Λόγω του πολύ μικρού εικονοστοιχείου των μηχανών χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούνται (η ποιότητα των δεδομένων που καταγράφονται από τον αισθητήρα δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με DSLR μηχανές λόγω υψηλού θορύβου) και για επίτευξη καλύτερης ποιότητας και εμφάνισης των τελικών προϊόντων θεσπίζεται μια μικρότερη τιμή επιθυμητής εδαφοψηφίδας ίση με 3mm.



Εικόνα 4. 10: Διαφορετικά μεγέθη αισθητήρων φωτογραφικών μηχανών

Για τον υπολογισμό των παραπάνω αποστάσεων, δεδομένων των τιμών της σταθεράς του φακού και του μεγέθους των εικονοστοιχείων στον αισθητήρα της

μηχανής, με χρήση των παρακάτω εξισώσεων, προκύπτει ο πίνακας όπου φαίνονται η μέγιστες τιμές των αποστάσεων απ' όπου πρέπει να ληφθούν τα δεδομένα.

$$k = \text{GSD}/\text{μέγεθος εικονοστοιχείου}, \quad 1/k = c/H$$

Μοντέλο μηχανής	Μέγεθος εδαφοψηφίδας (GSD)	Συντελεστής κλίμακας (k)	Μέγεθος εικονοστοιχείου	Σταθερά φακού (c)	Απόσταση - ύψος λήψης (H)
GoPro HERO 4	3mm	1935	1.55μm	2.7	5.8m
Mobius ActionCam	3mm	1364	2.2μm	2.3	3.2m

Πίνακας 4. 6: Απαιτούμενη απόσταση λήψης για συγκεκριμένο μέγεθος εδαφοψηφίδας

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει πως οι τιμές της απόστασης λήψης και του ύψους πτήσης κυμαίνονται γύρω από τα 5.5m για την GoPro και 3.5m για την Mobius για παραγωγή τελικών εικονιστικών προϊόντων μεγέθους εδαφοψηφίδας 3mm.

Οι ρυθμίσεις των καμερών που εφαρμόζονται για τη λήψη βίντεο και η ανάλυση των καρτέ φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Επισημαίνεται, πως για πιο ακριβή αποτελέσματα με λιγότερες παραμορφώσεις και αποφυγή θολώσεων, εφαρμόζεται η μέγιστη τιμή των καρτέ ανά δευτερόλεπτο(fps).

Μοντέλο μηχανής	Ανάλυση βίντεο	Καρτέ ανα δευτ. (fps)	Οπτικό Πεδίο (FOV)	μορφή
GoPro HERO 4	4k (3840*2160)	30	wide	.mp4
Mobius ActionCam	FullHD (1920*1080)	30	wide	.mp4

Πίνακας 4. 7: Χαρακτηριστικά λειτουργίας των μηχανών για λήψη των απαραίτητων βίντεο

Η μετατροπή των βίντεο σε διακριτά στιγμιότυπα(μεμονωμένες εικόνες) γίνεται μέσω του ελεύθερου λογισμικού Free Studio Manager, στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα να αποσπάται ένα στιγμιότυπο είτε ανά κάποιο χρονικό βήμα (π.χ. 1sec) είτε ανά κάποιο συγκεκριμένο αριθμό καρτέ. Δεδομένης της σχετικά αργής ταχύτητας λήψης των δεδομένων βίντεο τόσο από αέρος αλλά και επίγεια, στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγεται να αποθηκεύεται μια (1) εικόνα ανά δέκα (10) καρτέ. Επισημαίνεται πως η ταχύτητα με την οποία κινείται η κάμερα κατά τη διάρκεια λήψης του βίντεο σχετίζεται άμεσα με την παραπάνω διαδικασία, καθώς όσο μεγαλύτερη ταχύτητα κάμερας τόσο πιο συχνό διάστημα απόσπασης εικόνων απαιτείται, με τον κίνδυνο πάντα σε απότομες μεταβολές της θέσης της κάμερας να προκύπτουν θολές εικόνες, γεγονός

το οποίο σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες της μηχανής (καρέ ανά δευτ - fps).

Για την συνολική αποτύπωση του μνημείου επιλέγεται η χρήση μηχανής GoPro, λόγω της υψηλότερης ανάλυσης βίντεο που διαθέτει, ενώ η Mobius χρησιμοποιείται για αποτύπωση της δυτικής του όψης μόνο. Η κάλυψη του μνημείου μέσω βίντεο είναι καθολική, με αρκετό όμως βαθμό δυσκολίας, λόγω της μορφολογίας του εδάφους. Συνολικά, λαμβάνονται 30 περίπου βίντεο συνολικής διάρκειας 40 λεπτών με την GoPro, από τα οποία προκύπτουν 1041 εικόνες και 10 βίντεο συνολικής διάρκειας 20 λεπτών με την Mobius απ' όπου προκύπτουν 319 εικόνες, από διαφορετικές θέσεις του τρισδιάστατου φυσικού χώρου. Οι λήψεις γίνονται σε διαφορετικές τιμές απόστασης και ύψους πτήσης γύρω από το μνημείο, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 2 και 10 μέτρων, με σκοπό τη σύγκρισή των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων από την πολυ-εικονική διαδικασία.

4.3.4 Λήψη δεδομένων από σαρωτή laser

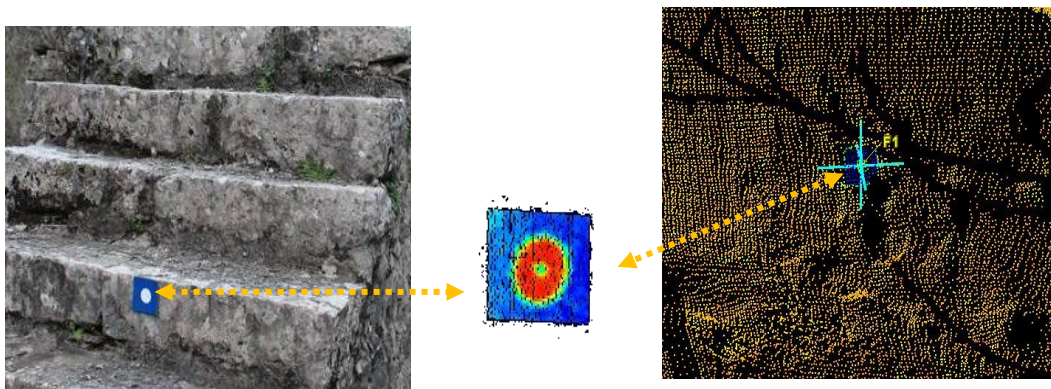
Η χρήση των επίγειων σαρωτών laser στην αποτύπωση μνημείων, αποτελεί σημαντική και καινοτόμα εφαρμοζόμενη μέθοδο γεωμετρικής τεκμηρίωσης τα τελευταία χρόνια. Το πρωτογενές και βασικό προϊόν αλλά και πλεονέκτημα, αποτελεί η δημιουργία πυκνών τρισδιάστατων νεφών σημείων υψηλής ακρίβειας, από τα οποία με κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να προκύψουν λεπτομερή 3D μοντέλα. Βασικό μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος απόκτησής τους, ο μεγάλος όγκος δεδομένων που παράγεται με επακόλουθο την αυξημένη υπολογιστική ισχύ και την απαιτούμενη διαδικασία καθαρισμού του νέφους από άχρηστη πληροφορία πριν τη συνένωση των νεφών σημείων.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, γίνεται χρήση σαρωτή laser, σε ένα τμήμα του γεφυριού, έτσι ώστε το παραγόμενο νέφος σημείων να αποτελέσει τη βάση αναφοράς για σύγκριση και αξιολόγηση των υπόλοιπων μεθόδων αποτύπωσης, που εφαρμόζονται. Αυτό, γίνεται επειδή τα δεδομένα που προκύπτουν από τέτοιου είδους σαρώσεις, μετά από κατάλληλη επεξεργασία και έλεγχο, θεωρούνται υψηλής μετρητικής ακρίβειας (της τάξης των λίγων mm) και αξιοπιστίας. Για την αποφυγή εισαγωγής περαιτέρω σφαλμάτων και θορύβου στο μοντέλο, μέσω της διαδικασίας συνένωσης νεφών σημείων, επιλέγεται να γίνει μια μόνο σάρωση και μόνο στη δυτική όψη του γεφυριού όπου υπάρχουν δεδομένα και από τις δύο κάμερες. Η θέση του σαρωτή (εικ.4.11) επιλέγεται να είναι στο μέσο περίπου του γεφυριού και σε απόσταση τέτοια($\approx 10m$) έτσι ώστε η διεύθυνση αποστολής - λήψης των ακτινών laser να μην σχηματίζουν πολύ μικρές γωνίες με την επιφάνεια του αντικειμένου προς αποτύπωση, η οποία αποτελεί μέσο σύγκρισης με άλλες μεθόδους, για παραγωγή πιο πυκνού και αξιόπιστου μοντέλου.



Εικόνα 4.11: Θέση σαρωτή laser επί το πεδίο

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για τη συλλογή των δεδομένων όσο και για τη γεωαναφορά των νεφών είναι το Cyclone 6.0, της LeicaGeosystems. Για την ένταξη του παραγόμενου από το σαρωτή νέφους σημείων στο τοπικό σύστημα αναφοράς που έχει ιδρυθεί, απαιτείται η χρήση ικανού αριθμού (τουλάχιστον τριών) ειδικών ανακλαστικών στόχων(εικ.4.12).



Εικόνα4.12: Ειδικί ανακλαστικοί στόχοι

Στην προκειμένη περίπτωση γίνεται χρήση πέντε (5) στόχων, για έλεγχο της διαδικασίας, οι οποίοι τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις γύρω ή πάνω στο αντικείμενο (σε διαφορετικές αποστάσεις και ύψη από το σαρωτή σε όλη την περιοχή σάρωσης), όπου σαρώνονται μαζί με το μνημείο. Στη συνέχεια, εντοπίζονται αυτόματα από το λογισμικό του σαρωτή και σαρώνονται με πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής καθορισμός του κέντρου κάθε ενός από αυτούς, του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές αφού οι στόχοι μετρούνται παράλληλα με χρήση γεωδαιτικού σταθμού.



Εικόνα 4.13: Τρισδιάστατο μοντέλο από το σαρωτή, υπό τη μορφή νέφους σημείων.

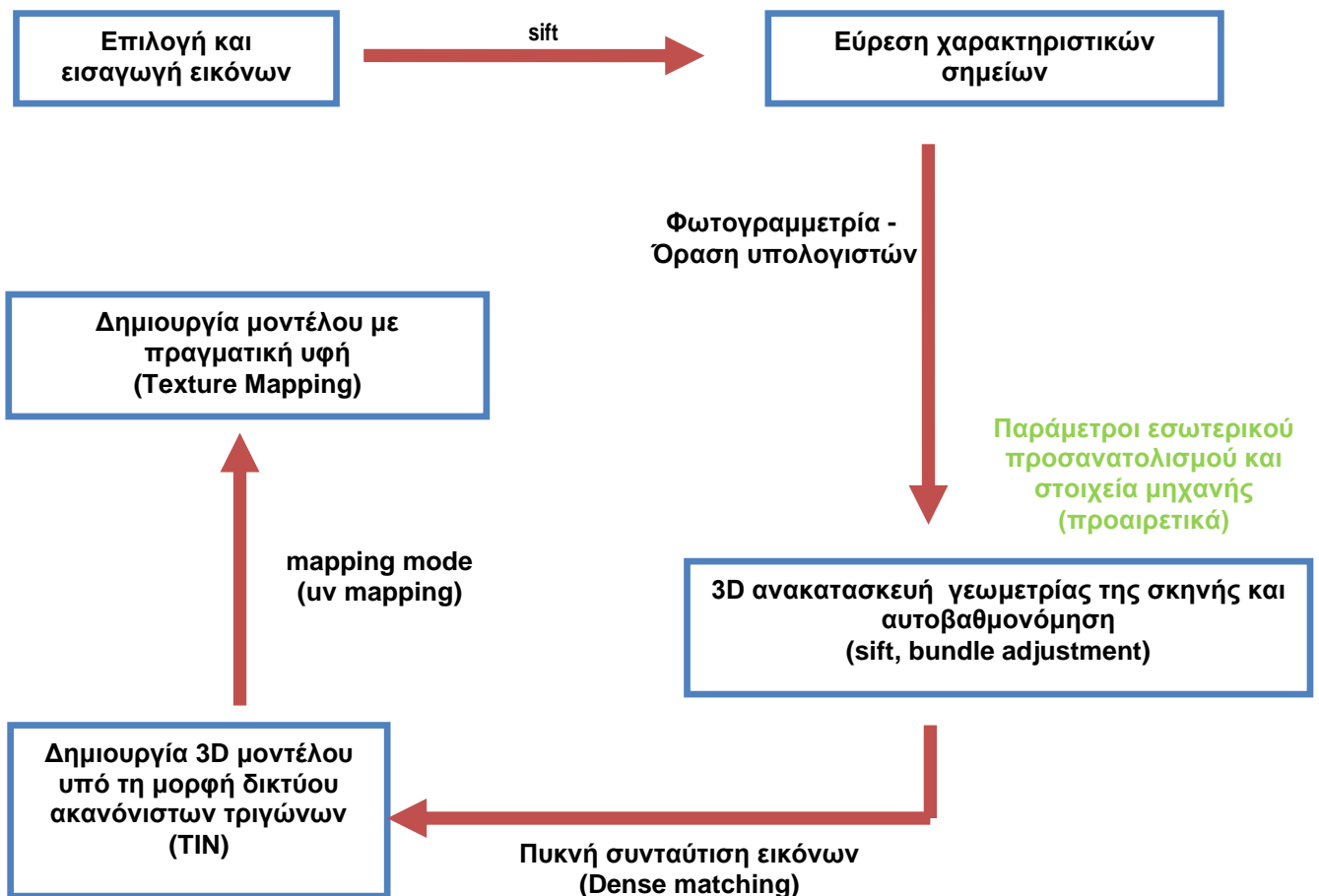
Η διαδικασία της γεωαναφοράς του νέφους σημείων γίνεται και ελέγχεται στο ίδιο λογισμικό, με την εισαγωγή των συντεταγμένων των στόχων στη βάση δεδομένων, όπου και περιέχονται τα πρωταρχικά ακατέργαστα δεδομένα. Τα στατιστικά στοιχεία και τα εναπομείναντα σφάλματα από τη γεωαναφορά φαίνονται στον πίνακα 4.8.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: F2	ScanWorld 3	FS_Scanner_...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	(0.001 m)	(0.000, 0.000, -0.001) m
TargetID: F4	ScanWorld 3	FS_Scanner_...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	(0.001 m)	(-0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: F3	ScanWorld 3	FS_Scanner_...	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	(0.002 m)	(0.001, 0.001, 0.001) m
TargetID: F5	ScanWorld 3	FS_Scanner_...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	(0.002 m)	(-0.002, -0.001, 0.001) m
TargetID: F1	ScanWorld 3	FS_Scanner_...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	(0.002 m)	(0.002, 0.000, 0.001) m

Πίνακας 4. 8: Γεωαναφορά του νέφους σημείων του σαρωτή και εναπομείναντα σφάλματα

4.4 Εφαρμογή Πολυ-εικονικών Μεθόδων

Τα δεδομένα που λαμβάνονται με τις παραπάνω μεθόδους, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου, ολόκληρου με φωτογραφίες από την GoPro ή/και τμημάτων, του μνημείου με φωτογραφίες από τη Mobius, με χρήση διαφορετικών λογισμικών και αλγορίθμων, όπως φαίνεται στις παρακάτω ενότητες. Η γενικότερη ροή εργασιών, για την παραγωγή τέτοιου είδους προϊόντων όπως αυτών που παρατίθενται παρακάτω, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.1: Ροή εργασιών για παραγωγή 3D μοντέλου με υφή

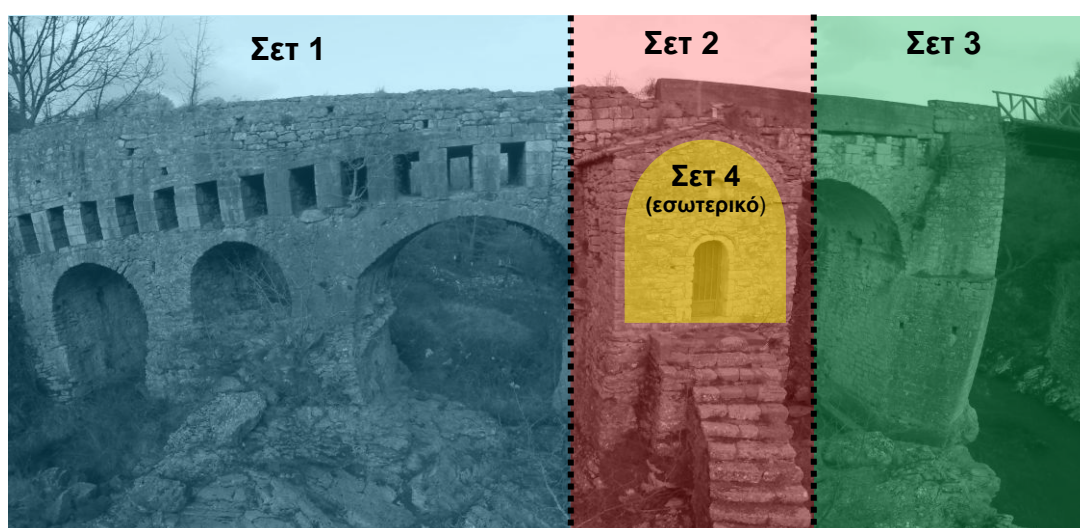
4.4.1 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στο Photoscan

Το Photoscan είναι ένα χαμηλού σχετικά κόστους εμπορικό λογισμικό μέσω του οποίου γίνεται η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου ολόκληρου του μνημείου, με φωτογραφίες από την κάμερα GoPro Hero4 Black, η οποία αντίστοιχα αποτελεί το βασικό εργαλείο λήψης των πρωτογενών εικονιστικών δεδομένων (βίντεο - εικόνων). Η δεύτερη κάμερα (Mobius) χρησιμοποιείται για παραγωγή αντίστοιχων προϊόντων, με στόχο τη διερεύνηση και αξιολόγηση της διαδικασίας (αναφορικά με την μεταβολή του χρόνου διεξαγωγής και της ποιότητας των τελικών προϊόντων) για δεδομένα χαμηλότερης ποιότητας. Για το λόγο αυτό, δεν δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο ολόκληρου του μνημείου, παρά μόνο η δυτική του όψη, καθώς εκτιμάται πως τα δεδομένα είναι αρκετά για τη διενέργεια των απαραίτητων συγκρίσεων, αλλά και για οικονομία χρόνου, τόσο στο ύπαιθρο αλλά και στην μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Τα βήματα που ακολουθούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας και την τελική παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Αν και στο συγκεκριμένο λογισμικό υπάρχει ενσωματωμένη η δυνατότητα ολοκληρωμένης ροής εργασιών, μέχρι το τελικό στάδιο της διαδικασίας, με παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου με υφή και εξαγωγή 2D εικονιστικών παραγώγων, κάποια στάδια μπορούν να παρακαμφθούν, όχι τελείως, αλλά να πραγματοποιηθούν σε κάποιο άλλο λογισμικό πακέτο. Για το λόγο αυτό, το στάδιο της 3D μοντελοποίησης (μετατροπή νέφους σημείων σε μορφή επιφάνειας) παρακάμπτεται και το νέφος σημείων να μετατρέπεται σε επιφάνεια σε εξωτερικό λογισμικό πακέτο (Geomagic), όπως περιγράφεται παρακάτω για μεγαλύτερη ευελιξία και ελευθερία

στην επιλογή των παραμέτρων της μοντελοποίησης, με σκοπό την παραγωγή ενός πιο λεπτομερούς μοντέλου υψηλής ακρίβειας και ποιότητας.

Νέφος σημείων με δεδομένα από GoPro Hero4 Black

Για την αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη από πλευράς χρόνου, διαχείριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, δεδομένου του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του μνημείου, κρίνεται σκόπιμος ο διαχωρισμός του έργου σε επιμέρους τμήματα, τα οποία στο τέλος συγχωνεύονται για τη δημιουργία του ενιαίου νέφους σημείων του γεφυριού. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται σημαντικά η διαδικασία, λόγω της γεωμετρικής αύξησης του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας από ένα αριθμό εικόνων και πάνω (για τη συγκεκριμένη ανάλυση εικόνας στον συγκεκριμένο υπολογιστή, αποφεύγεται χρήση άνω των 300-400 εικόνων ανά σετ δεδομένων).



Εικόνα 4.14: Επιμέρους τμήματα επεξεργασίας.

Από τα επιμέρους αυτά τμήματα, τρία(3) επιλέγεται να τέμνουν το μνημείο εγκάρσια στον κατά μήκος άξονά του και το τέταρτο αφορά στο εσωτερικό του παρεκκλησίου, που υπάρχει σε μια από τις βάσεις του. Δημιουργούνται κατ' αυτόν τον τρόπο τέσσερα(4) σύνολα δεδομένων (εικ.4.14, πιν.4.9), εικόνων, στις οποίες απεικονίζονται κατά κύριο λόγο, οι αντίστοιχες περιοχές του μνημείου.

	Σύνολο Δεδομένων 1	Σύνολο Δεδομένων 2	Σύνολο Δεδομένων 3	Σύνολο Δεδομένων 4 (εσωτερικό)
Αριθμός Εικόνων	425 (γαλάζιο)	310 (κόκκινο)	306 (πράσινο)	256

Πίνακας 4. 9: Εικόνες ανά επιμέρους σετ δεδομένων

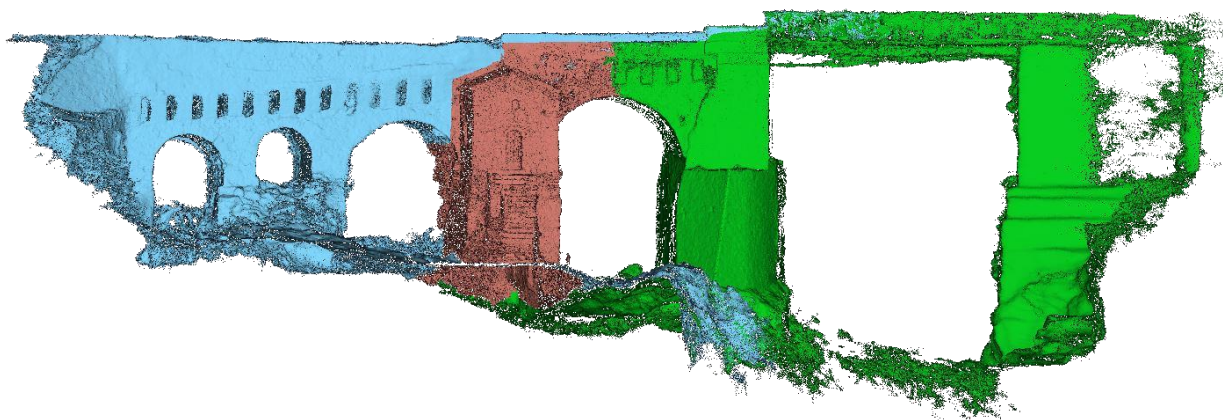
Μετά τον καθορισμό των σετ δεδομένων εκτελείται το πρώτο στάδιο της διαδικασίας, όπου γίνεται αναζήτηση κοινών σημείων μεταξύ των εικόνων, οι οποίες ενώνονται βάσει αυτών. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η θέση της κάμερας στο χώρο για κάθε

εικόνα, ενώ παράλληλα γίνεται αυτοβαθμονόμηση της μηχανής, βελτιώνοντας τον προσδιορισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ένα αραιό νέφος σημείων και μια σειρά από τις θέσεις λήψης των εικόνων στο χώρο. Οι παράμετροι που ορίζονται σε αυτό το στάδιο και οι οποίοι καθορίζουν την ποιότητα και την ταχύτητα της διαδικασίας, είναι αν θα γίνει μείωση της ανάλυσης των εικόνων που χρησιμοποιούνται και ο μέγιστος αριθμός χαρακτηριστικών σημείων που μπορούν να αναγνωριστούν και να συμπεριληφθούν στη διαδικασία. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ύστερα από διάφορες δοκιμές αλλά και λόγω του μεγάλου αριθμού των εικόνων, κρίνεται επαρκής μια μεσαία λύση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση των εικόνων μειώνεται κατά τέσσερις(4) φορές και ύστερα γίνεται η αναζήτηση χαρακτηριστικών κοινών σημείων για ταύτιση των εικόνων μεταξύ τους. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα στατιστικά στοιχεία της παραπάνω διαδικασίας.

Εικόνες	1041
Προσανατολισμένες Εικόνες	1041
Στόχοι	80
Σύστημα αναφοράς	Τοπικό
Σημεία σύνδεσης	267.204
Νέφος σημείων	18.200.56
Μέση απόσταση από αντικείμενο	5.81m
GSD	3.43mm

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά νέφους σημείων από GoPro

Επόμενο στάδιο αποτελεί η πύκνωση του νέφους σημείων, μέσω διαδικασίας πυκνής συνταύτισης εικόνας (Dense matching), μέσω εφαρμογής αλγορίθμων της όρασης υπολογιστών για τον υπολογισμό των 3D συντεταγμένων χώρου για κάθε ριxel της εικόνας και όχι μόνο των χαρακτηριστικών σημείων. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ένα ιδιαίτερα πυκνό νέφος σημείων, καλύπτοντας όλα τα τμήματα του αντικειμένου που απεικονίζονται σε τουλάχιστον τρεις εικόνες. Λόγω της τμηματικής επεξεργασίας των δεδομένων και την οργάνωσή τους σε τέσσερα σετ δεδομένων, προκύπτει αντίστοιχος αριθμός επικαλυπτόμενων νεφών σημείων.



Εικόνα 4.15: Συνένωση νεφών σημείων από κάθε επιμέρους τμήμα. (βλ. πίν. 4.9)

Για την συνένωση των επιμέρους μοντέλων υπό τη μορφή νέφους σημείων και την απόδοση κλίμακας και προσανατολισμού τόσο σε αυτά, όσο και στο συνολικό ενιαίο μοντέλο που θα προκύψει, αλλά παράλληλα και για έλεγχο της αποτύπωσης, γίνεται χρήση φωτοσταθερών σημείων. Αφού εισαχθούν οι συντεταγμένες των μετρημένων αυτών σημείων αυτών στο λογισμικό, κατόπιν καθένα από αυτά σκοπεύεται σε ικανό αριθμό εικόνων, αναλόγως της θέσης του πάνω στο αντικείμενο. Η ακρίβεια σκόπευσης θεωρείται ίση με ένα pixel, ενώ η ακρίβεια μέτρησης των φωτοσταθερών θεωρείται 5mm. Κάποια από αυτά επιλέγεται να συμμετέχουν στη διαδικασία, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου (βλ. Παράρτημα).

Εν συνεχεία, βάσει της ένταξης των επιμέρους νεφών σημείων στο τοπικό σύστημα αναφοράς, που έχει ιδρυθεί μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας, είναι πλέον δυνατή η συνένωσή τους σε ένα ενιαίο νέφος σημείων. Για το λόγο αυτό γίνεται εξαγωγή τους σε κατάλληλη μορφή, για επεξεργασία σε εξωτερικό λογισμικό και συγκεκριμένα στο Geomagic Studio. Ύστερα από κατάλληλη αφαίρεση θορύβου και σφαλμάτων που περιέχονται στο μοντέλο, λόγω της ύπαρξής στις εικόνες περιττής πληροφορίας πέρα από τα επιθυμητά όρια ή και εσφαλμένων σημείων όπου είτε λόγω της μεγάλης απόστασης, είτε των πολύ μικρών γωνιών μεταξύ των ομόλογων ακτινών των επιμέρους εικόνων (κακή αλληλοτομία), προκύπτουν σε λάθος θέσεις, γίνεται η συνένωσή. Η περαιτέρω επεξεργασία του ενιαίου πια νέφους σημείων γίνεται μέσω τεχνικών φιλτραρίσματος που κατά σειρά είναι:

- Αραίωση του νέφους χωρίς απώλεια σημαντικής πληροφορίας μέσω τεχνικών δειγματοληψίας (περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των σημείων με πυκνότερη κατανομή στις καμπύλες επιφάνειες)
- Αφαίρεση εσφαλμένων ή περιττών σημείων μακριά από το αντικείμενο
- Αφαίρεση θορύβου και εξομάλυνση νέφους μέσω στατιστικών δεικτών για παραγωγή πιο ομοιόμορφου αποτελέσματος (μέγιστη μετακίνηση σημείων <1-2mm)

Είναι διαθέσιμη σε πολλές περιπτώσεις, η πυκνότητα των σημείων υπερβαίνει την απαραίτητη για την δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου. Η παραπάνω επεξεργασία στοχεύει στην ευκολότερη διαχείριση και ταχύτερη δημιουργία του μοντέλου με μείωση του όγκου των αρχικών δεδομένων ακόμα και σε ποσοστό 50% χωρίς να μειωθεί η ακρίβεια και να χαθεί χρήσιμη πληροφορία, αλλά απαιτείται προσοχή κατά την εφαρμογή τους (Συμεωνίδης, 2007). Το τελικό συνενωμένο νέφος σημείων μετά την επεξεργασία του, φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.16: Τελικό επεξεργασμένο νέφος σημείων από GoPro. Υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας

Δημιουργία μοντέλου νέφους σημείων με δεδομένα από τη μηχανή Mobius

Η διαδικασία που ακολουθείται για την τρισδιάστατη αποτύπωση του μεγαλύτερου μέρους της δυτικής όψης του γεφυριού, είναι αντίστοιχη με αυτή που ακολουθείται παραπάνω με μόνη διαφορά να αποτελεί ο αριθμός και το είδος των δεδομένων καθώς και ο τρόπος οργάνωσης και επεξεργασίας τους.

Είναι διαθέσιμη λόγω του ότι δεν αποτυπώνεται ολόκληρο το μνημείο, ο αριθμός των εικόνων που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά μικρότερος (πίν..), συνεπώς όλες οι εικόνες οργανώνονται σε ένα σετ δεδομένων, στο οποίο εφαρμόζονται όλα τα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας. Επειδή οι εικόνες έχουν προκύψει από βίντεο χαμηλότερης ανάλυσης σε σχέση με πριν (1920x1080), για εξαγωγή του βέλτιστου αποτελέσματος οι παράμετροι για την ταύτιση των εικόνων διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα. Έτσι, δεν γίνεται μείωση του μεγέθους των εικόνων για αναζήτηση σημείων ενδιαφέροντος και δεν θεσπίζεται όριο στον εντοπισμό τους.



Εικόνα 4.17: Σχεδόν ακατέργαστο νέφος σημείων από την Mobius

Εικόνες	319
Προσανατολισμένες Εικόνες	319
Στόχοι	21
Σύστημα αναφοράς	Τοπικό
Σημεία σύνδεσης	98.064
Νέφος σημείων	15.637.660
Μέση απόσταση από αντικείμενο	2.9 m
GSD	2.04 mm
Χρόνος επεξεργασίας	41 min (matching) /124min (dense matching)

Πίνακας 4.11: Στοιχεία επεξεργασίας εικόνων από την Mobius

4.2 Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος του μνημείου με χρήση ελεύθερων λογισμικών

Στο στάδιο αυτό γίνεται διερεύνηση των δυνατοτήτων παραγωγής νεφών σημείων και τρισδιάστατης μοντελοποίησης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, αναφορικά με τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας και ποιότητας που απαιτούνται σε αυτού του είδους τις εργασίες, μέσω λογισμικών ελεύθερων ή/και ανοικτού κώδικα.

Η γενική ροή εργασιών που ακολουθείται, δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτή που περιγράφεται στην αρχή του κεφαλαίου. Αυτό που διαφοροποιείται είναι ο τρόπος εφαρμογής των αλγορίθμων της φωτογραμμετρίας και της όρασης υπολογιστών και το ποσοστό συμμετοχής τους στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας. Δεδομένα εισόδου, αποτελούν μέρος των εικόνων που χρησιμοποιούνται σε προηγούμενη παράγραφο και που έχουν προκύψει από στιγμιότυπα βίντεο.

Μια σημαντική διαφοροποίηση στη διαδικασία, όπου αφορά κυρίως στην αρχιτεκτονική των λογισμικών και τις λειτουργίες που διαθέτουν, είναι η διόρθωση των εικόνων από ακτινική διαστροφή σε πρωταρχικό στάδιο και η τεχνητή προσθήκη (σωστών) πληροφοριών ως μεταδεδομένα στις εικόνες, για να γίνεται αυτόματα ενημέρωσή τους σχετικά με τα απαραίτητα στοιχεία της μηχανής. Για τη διόρθωση των εικόνων από ακτινική διαστροφή, χρησιμοποιήθηκε το πεδίο ελέγχου του ΕΜΠ και η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Photoscan.



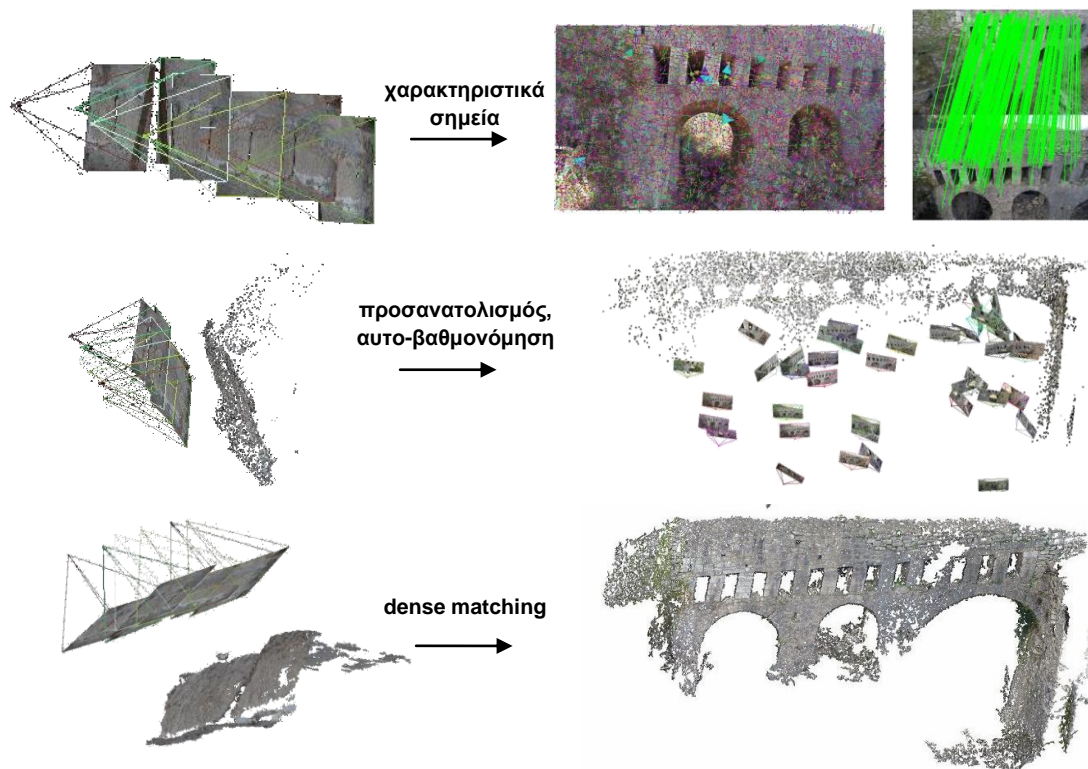
Εικόνα 4.18: Εικόνες από GoPro πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη διόρθωση από ακτινική διαστροφή

Αρχικά, δημιουργείται ένα σύνολο 43 εικόνων, κοινό και για τα δύο λογισμικά, ώστε να αποτελεί βάση αναφοράς για τη σύγκρισή τους. Η περιοχή του μνημείου η οποία αποτυπώνεται είναι αντίστοιχη με αυτή για την οποία υπάρχουν δεδομένα από τον επίγειο σαρωτή (τμήμα της δυτικής όψης). Οι εικόνες που χρησιμοποιούνται επιλέγονται από το σύνολο των εικόνων που χρησιμοποιείται σε προηγούμενο κεφάλαιο, με κριτήριο αφενός την απεικόνιση της επιθυμητής προς αποτύπωση περιοχής, αφετέρου την σε μεγάλο βαθμό αλληλοεπικάλυψή τους.

Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος του μνημείου στο VisualSfM

Το VisualSfM αποτελεί ένα ελεύθερο, όχι ανοικτού πρόγραμμα, αναφορικά την πλατφόρμα του. Ωστόσο, ο κώδικάς του μπορεί να ενσωματωθεί αυτούσιος σε κάποια ενδεχόμενη νέα εφαρμογή. Επίσης, είναι δυνατή η εισαγωγή/εξαγωγή

ενδιάμεσων δεδομένων από/προς άλλα λογισμικά για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Η βασική του λειτουργία είναι ο εντοπισμός των ομοιοτήτων μεταξύ των εικόνων και ο υπολογισμός των παραμέτρων του προσανατολισμού τους. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του, είναι η ζωντανή-δυναμική απεικόνιση των θέσεων της μηχανής στο χώρο κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού των παραμέτρων του προσανατολισμού των εικόνων.

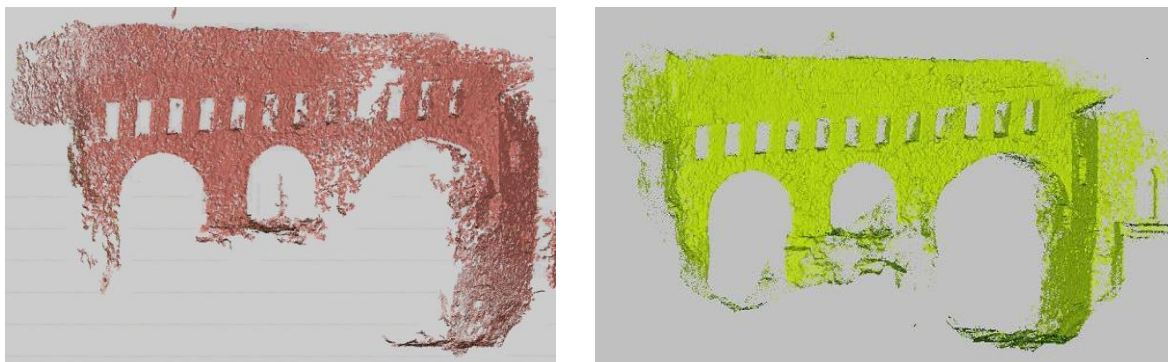


Διάγραμμα 4.2: Επεξεργασία και παραγωγή νέφους σημείων στο VisualSfM

Για την παραγωγή πυκνού νέφους σημείων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος PMVS/CMVS, ωστόσο δύναται να συνεργάζεται και με άλλα εξωτερικά εργαλεία (SURE, CMP-MVS, MVE, MeshRecon). Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, γίνεται χρήση τόσο του βασικού αλγορίθμου PMVS/CMVS, όσο και του CMP-MVS. Η κύρια διαφορά των δύο αλγορίθμων έγκειται στο γεγονός πως ο δεύτερος κατά σειρά μετατρέπει τα αρχικό μοντέλο που παράγει (πυκνό νέφος σημείων), σε τρισδιάστατο μοντέλο με υφή, απευθείας, χωρίς να χρειάζεται επεξεργασία σε εξωτερικό λογισμικό. Η διαδικασία αυτή ενέχει τον κίνδυνο σφαλμάτων σε σύνθετες επιφάνειες και πρέπει να αποφεύγεται, ωστόσο είναι πολύ χρήσιμη για απλές περιπτώσεις αντικειμένων και για πολύ γρήγορη και άμεση οπτικοποίηση.

	Αριθμός εικόνων	Σημεία	Χρόνος παραγωγής
PMVS/CMVS	43	759019	6min
CMP-MVS	43	1735223	120min(μαζί με ορθοεικόνα, μοντέλο)

Πίνακας 4.12: Στοιχεία επεξεργασίας στο VisualSfM και στα δύο εξωτερικά εργαλεία πυκνής συνταύτισης εικόνας.



Εικόνα 4.19: Νέφη σημείων. Αριστερά: VisualSfM+CMP-MVS, Δεξιά: VisualSfM+ PMVS/CMVS

Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος του μνημείου στο MicMac

Το MicMac είναι ελεύθερο/ανοικτού κώδικα λογισμικό, το οποίο αναπτύσσεται από το Γαλλικό Ινστιτούτο Γεωγραφίας (IGN) και έχει ενσωματωμένες όλες τις βασικές λειτουργίες, από τον προσανατολισμό των εικόνων μέχρι την παραγωγή εικονιστικών προϊόντων, με πληθώρα επιλογών και αλγορίθμων παραμετροποίησης της διαδικασίας. Βασικό πρόβλημα που κάνει δύσκολη τη χρήση του είναι η έλλειψη πλατφόρμας διεπαφής με το χρήστη, καθότι όλες οι εντολές πληκτρολογούνται με το χέρι, μέσω της γραμμής εντολών.

Όπως και στα άλλα λογισμικά, εκτελείται η αντίστοιχη ροή εργασιών, με τη διαφορά πως εδώ γίνεται με πιο αναλυτικό τρόπο. Η βασική διαφορά από άλλα λογισμικά αυτού του είδους είναι πως η παραγωγή του νέφους σημείων γίνεται με μονωμένα για κάθε εικόνα. Δηλαδή ορίζεται μια συγκεκριμένη εικόνα από το σύνολο των εικόνων που εισάγονται, με την διαδικασία της πυκνής συνταύτισης, να γίνεται μόνο για περιοχές που απεικονίζονται στην εικόνα αυτή. Με αυτό τον τρόπο, η παραγωγή νέφους σημείων μεγάλων συνόλων ή αντικειμένων γίνεται τμηματικά, μέσω μια εικόνας οδηγού. Στη συνέχεια, τα παραγόμενα νέφη συνενώνονται στο ίδιο ή σε εξωτερικό λογισμικό, για περαιτέρω επεξεργασία

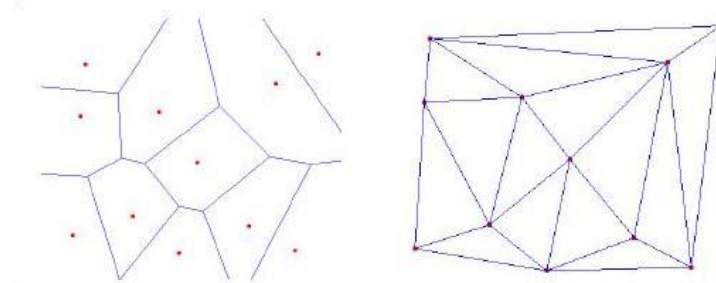


Εικόνα 4.20: Νέφος σημείων μέσω του MicMac

4.4.5 3D Μοντελοποίηση από νέφη σημείων - Απόδοση υφής

Μετά το πέρας των σταδίων της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων και τη δημιουργία του μοντέλου υπό μορφή νέφους σημείων, ακολουθεί ο τριγωνισμός του μοντέλου ή η μοντελοποίησή του υπό μορφή επιφάνειας ή αλλιώς η δημιουργία του τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου. Η πιο συνηθισμένη αναπαράσταση του μοντέλου είναι μέσω ενός πολυγωνικού μοντέλου επιφάνειας (mesh) όπως το δίκτυο ακανόνιστο τριγώνων (TIN), ωστόσο υπάρχουν και άλλες πιο εξελιγμένες μορφές προσέγγισης μιας επιφάνειας (τετράεδρα, curves, nurbs), χρήσιμες και σε άλλα ερευνητικά πεδία (π.χ. structure analysis).

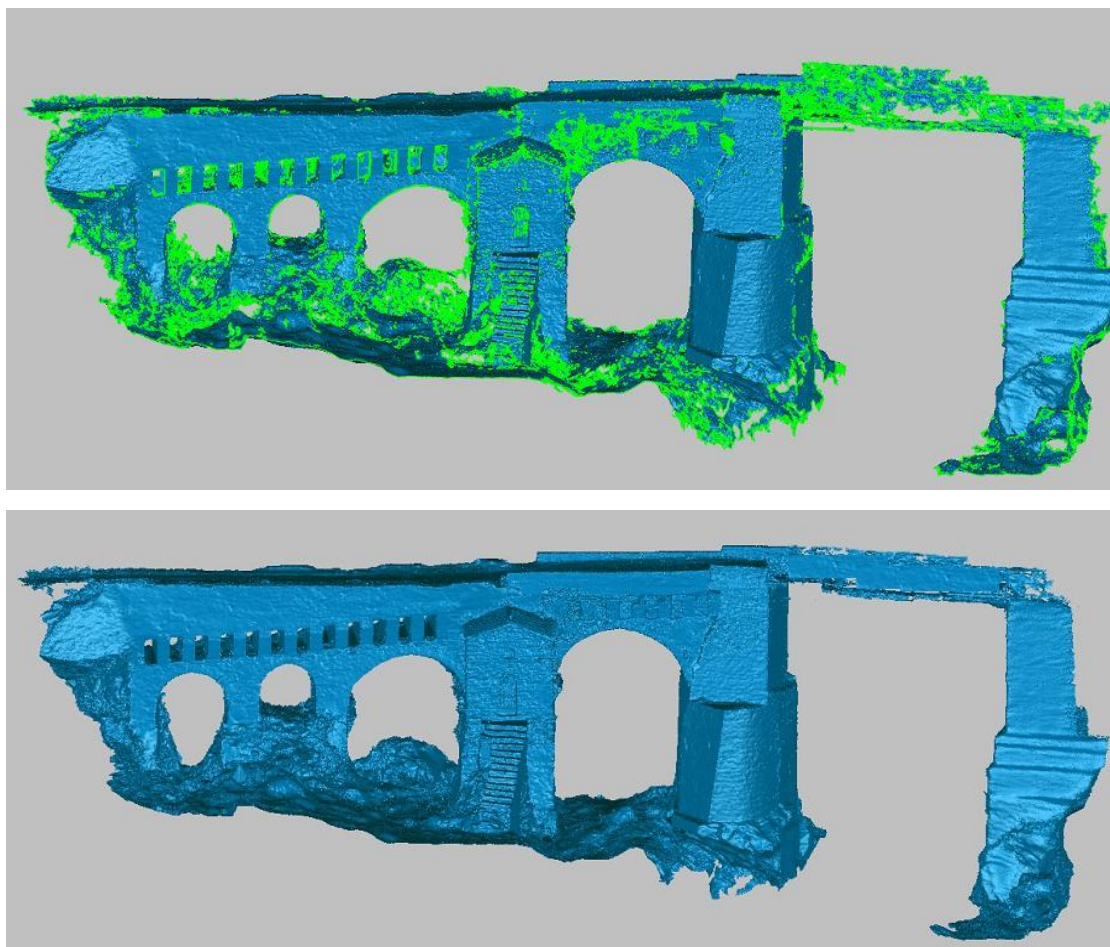
Σε μερικές περιπτώσεις όπου δεν απαιτούνται εικονιστικά προϊόντα (σχέδια όψεων, τομών και κατόψεων από το νέφος σημείων), η δημιουργία πολυγωνικού μοντέλου επιφάνειας (mesh), μπορεί να παρακαμφθεί. Ωστόσο, η ποιότητα των εικονιστικών προϊόντων υψηλής ανάλυσης είναι πολύ υψηλότερη.



Εικόνα 4.21: Τριγωνισμός Delaunay

Αν και σε πολλά λογισμικά εφαρμογής πολυ-εικονικών μεθόδων, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνεται, εντός της ροής εργασιών τους (Photoscan, VisualSfm-CMPMVS), θεωρείται πιο αξιόπιστη η επεξεργασία των παραγόμενων νεφών σημείων σε πιο εξειδικευμένα, σε τέτοια θέματα λογισμικά, όπως στην προκειμένη περίπτωση το Geomagic Studio. Οι τριγωνισμοί αυτού του είδους συνήθως πραγματοποιούνται στον τρισδιάστατο χώρο, με χρήση της μεθόδου Delaunay (εικόνα). Για τη δημιουργία του μοντέλου, ορίζονται αρχικά παράμετροι σχετικά με την πολυπλοκότητα του αντικείμενου, την πυκνότητα των πρωτογενών δεδομένων (τελικό νέφος σημείων), την μέθοδο δειγματοληψίας, τον μέγιστο αριθμό τριγώνων καθώς και τον βαθμό εξομάλυνσης της επιφάνειας.

Μετά τη δημιουργία του αρχικού μοντέλου σε μορφή επιφάνειας, είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του, για εξομάλυνση, επιπλέον ελάττωση του θορύβου αλλά και διόρθωση αυτόματα ή χειροκίνητα, σφαλμάτων που προκύπτουν, όπως παρατηρείται παρακάτω (εικ. 4.21). Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι αναδιπλούμενα τρίγωνα (τρίγωνα με λάθος προσανατολισμό, αντίθετα κάθετα διανύσματα - normals), τρύπες λόγω έντονου ανάγλυφου, πολύ περίπλοκοι σχηματισμοί (φυτά, φυσικά εμπόδια κ.τ.λ.), διπλές επιφάνειες σε περιπτώσεις κακής αρχικής επεξεργασίας. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και έλεγχος κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και προτείνεται η σταδιακή αύξηση των τιμών των παραμέτρων εξομάλυνσης και απαλοιφής θορύβου, για την αποτροπή απώλειας σημαντικής πληροφορίας και λεπτομέρειας. Τελικά μοντέλα μετά το πέρας της διαδικασίας μοντελοποίησης φαίνονται στη παρακάτω εικόνα.

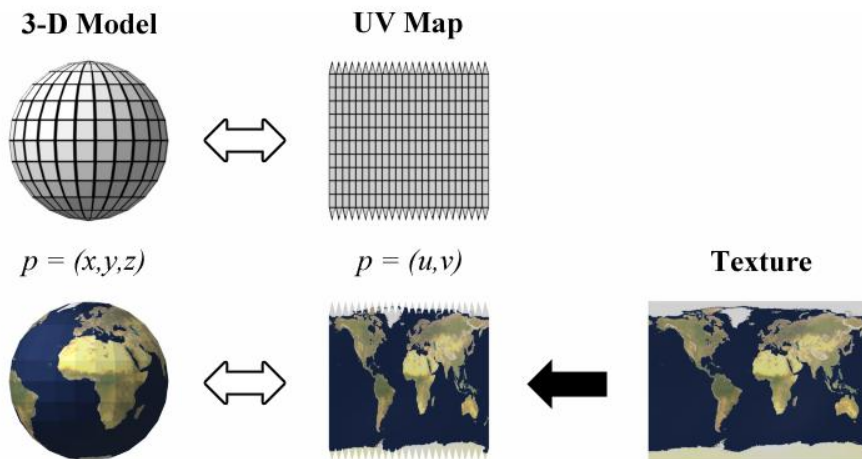


Εικόνα 4.22: Τρισδιάστατο μοντέλο. Πάνω: Σε αρχική μορφή με σφάλματα, Κάτω: Διορθωμένο 3D μοντέλο

Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να εμπλουτιστεί ακόμη περισσότερο, μέσω της απόδοσης σε αυτό υψής (texturing - visualization) τεχνητής ή πραγματικής, περιλαμβάνοντας τη μέγιστη δυνατή πληροφορία, ώστε να αξιοποιηθεί, ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις του κάθε τελικού χρήστη.

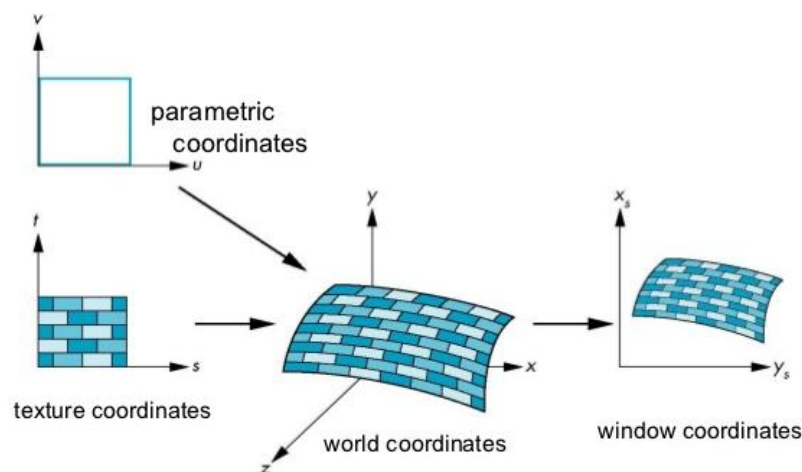
Μια συνηθισμένη διαδικασία για την σωστή απόδοση της υψής του χρώματος σε τρισδιάστατα μοντέλα είναι η παραγωγή UV Texture Map Αντίθετα με τα X, Y, Z, που είναι οι συντεταγμένες του μοντέλου στον τρισδιάστατο χώρο, “U” και “V” είναι οι συντεταγμένες των κόμβων του μετασχηματισμένου αντικειμένου.. Με τον τρόπο αυτό η τρισδιάστατη επιφάνεια μετασχηματίζεται σε μία 2d εικόνα. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα ενός είδους ανάπτωμα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει αυτόματα με αλγόριθμους κάποιου λογισμικού ή να την εκτελέσει χειροκίνητα ο 3D artist, ή ακόμη και συνδυαστικά. Από τη στιγμή που δημιουργείται ένα UV map, προστίθεται χρώμα πάνω σε αυτό και στη συνέχεια προβάλλεται πάλι στο τρισδιάστατο μοντέλο προσδίδοντας του τη σωστή φωτωση.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το texture map που προκύπτει για μία σφαιρική επιφάνεια. Καθώς η σφαίρα είναι μία αναπτυσσόμενη επιφάνεια, το ανάπτωμα της αποτελεί ουσιαστικά το UV map. Στη συνέχεια, μία εικόνα που περιέχει το κατάλληλο χρώμα, αποδίδει το χρώμα ώστε να αποκτηθεί το UV map, το οποίο τελικά μετασχηματίζεται ώστε η τρισδιάστατη επιφάνεια να επενδυθεί με κατάλληλη φωτωση. (Soile et al., 2013)



Εικόνα4.23: Διαδικασία texture mapping. (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/UV_mapping)

(Η πιο γνωστή και συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι το UV mapping, η οποία χρησιμοποιείται για την προβολή ενός ή περισσοτέρων χάρτη(-ών) υφής (texture map) ή αλλιώς ενός αναπτύγματος πάνω σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο, μέσω μιας μαθηματικής σχέσης που τα συνδέει. Ουσιαστικά, ο χάρτης υφής αποτελεί το ανάπτυγμα μιας τρισδιάστατης επιφάνειας στις δυο διαστάσεις. Η δημιουργία του χάρτη υφής γίνεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του προσανατολισμού κάθε εικόνας και την εξίσωση συγγραμμικότητας, έτσι ώστε κάθε επιφάνεια από το μοντέλο να παίρνει το αντίστοιχο χρώμα από την/τις εικόνα(-ες) στις οποίες φαίνεται. Το τρισδιάστατο μοντέλο χωρίζεται σε περιοχές (κάθε περιοχή μπορεί να θεωρείται ένα μεμονωμένο πολύγωνο μέχρι αρκετά περισσότερα) οι οποίες αντιστοιχίζονται στο χάρτη υφής. Γνωρίζοντας τις σχέσεις μεταξύ τρισδιάστατου μοντέλου - χάρτη υφής και χάρτη υφής - εικόνων, προκύπτει το τρισδιάστατο μοντέλο με πραγματική υφή από τις εικόνες.)



Εικόνα 4.24: Συστήματα αναφοράς κατά το texture mapping.
(Πηγή:http://www.slideshare.net/Mark_Kilgard/11texture?next_slideshow=1)

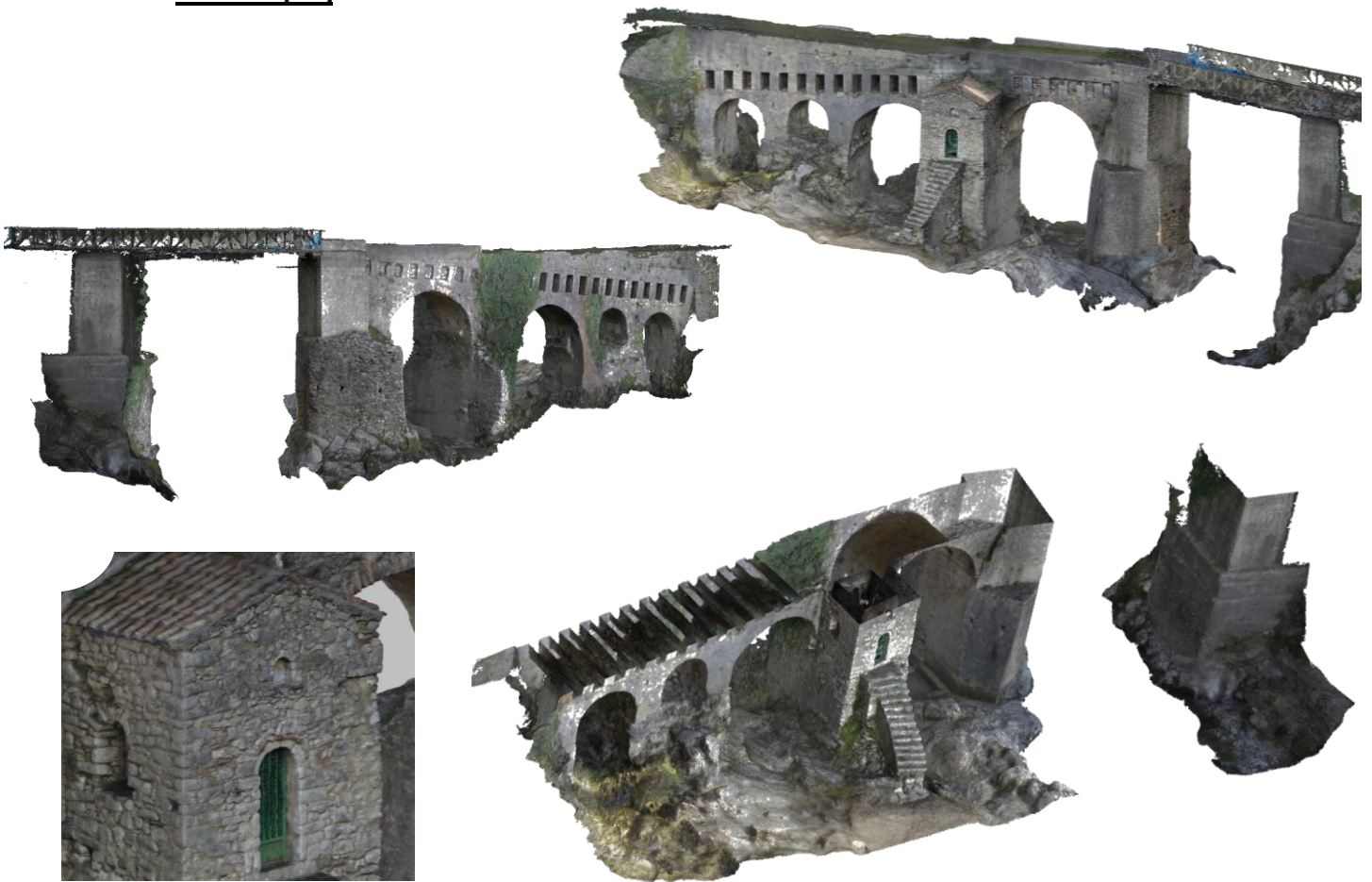
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η απόδοση υφής στα μοντέλα που προκύπτουν γίνεται στο λογισμικό Photoscan, όπου υπάρχουν ήδη από προηγούμενο στάδιο οι προσανατολισμένες εικόνες από τις οποίες δημιουργήθηκαν τα αρχικά νέφη σημείων.

Αντίστοιχες εφαρμογές γίνονται και στα υπόλοιπα εμπορικά κατά κύριο λόγο λογισμικά, με αντίστοιχα αποτελέσματα. Για δημιουργία των χαρτών υψής μέσω δειγματοληψίας, χρησιμοποιείται η γενική μέθοδος, όπου δεν γίνονται υποθέσεις για τη γεωμετρία του μοντέλου, παρά κάθε στοιχείο το αντιστοιχίζεται ως έχει στο χάρτη υψής και προκύπτουν περισσότερο ομοιόμορφα μοντέλα χωρίς υψηλές ραδιομετρικές διαφορές.

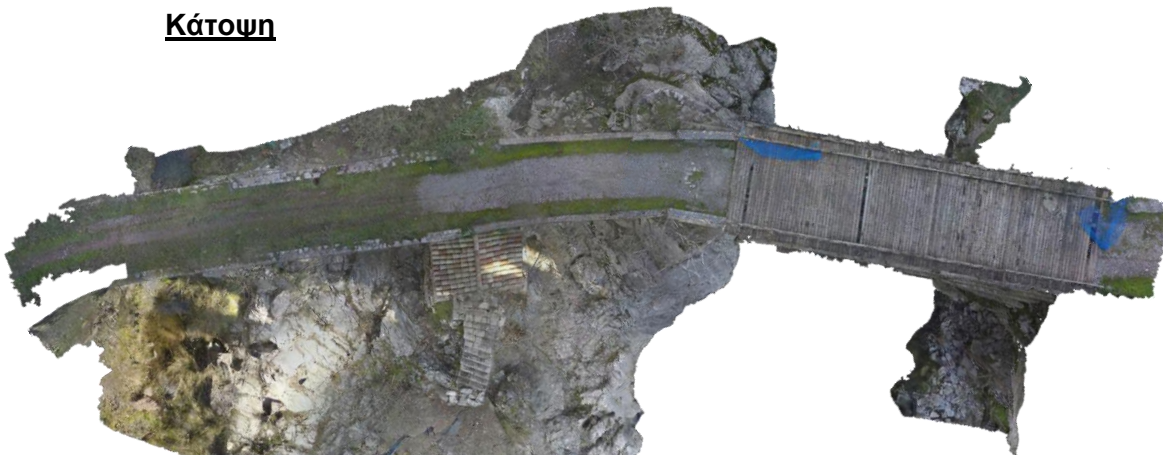
4.5 Προϊόντα

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τρισδιάστατες απόψεις του γεφυριού μέσω του τρισδιάστατου μοντέλου με υψή που προκύπτει, καθώς και 2D εικονιστικά προϊόντα, όπως προκύπτουν και από τις δύο κάμερες (GoPro και Mobius) μετά από την επεξεργασία που έχει προηγηθεί και αναλύεται στα προηγούμενα κεφάλαια.

3D Απόψεις



Κάτωψη



Δυτική Όψη



Ανατολική Όψη



Εσωτερικό Ναού



Δυτική εσωτερική όψη



Άνοψη



Ανατολική Εσωτερική όψη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

5.1 Γενικά

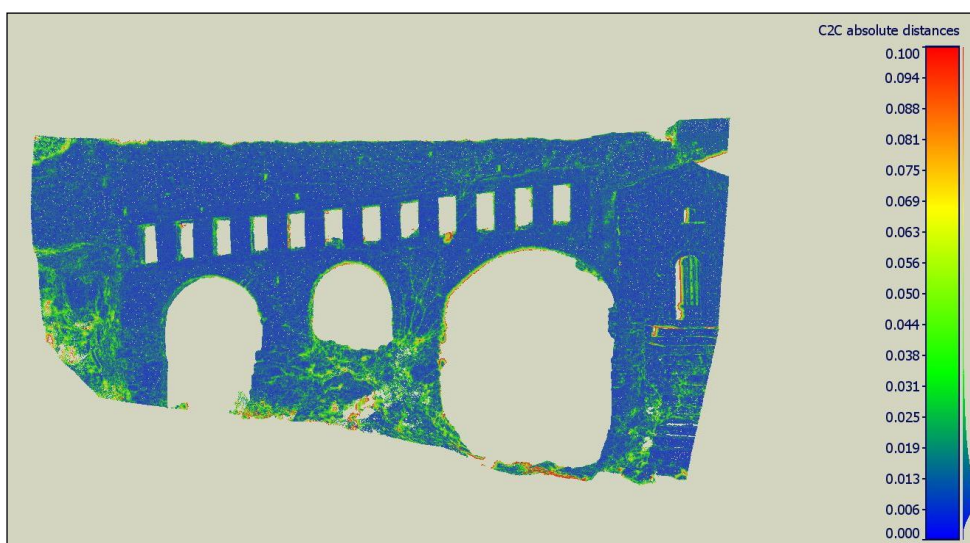
Για την εξακρίβωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μεθόδων και των εργαλείων που χρησιμοποιούνται, είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η αξιολόγηση των παραγόμενων προϊόντων τους. Αυτό γίνεται μέσω της σύγκρισης των πρωτογενών νεφών σημείων, τα οποία δημιουργούνται σε ενδιάμεσο στάδιο της διαδικασίας και δεν έχουν υποστεί ιδιαίτερη επεξεργασία. Η σύγκριση γίνεται στον τρισδιάστατο χώρο, αφού πρώτα καθορίζεται ένα μοντέλο ως μοντέλο αναφοράς, το οποίο είναι υψηλής ακρίβειας και αξιοπιστίας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ως μοντέλο αναφοράς θεωρούνται τα δεδομένα από τη σάρωση του μνημείου με σαρωτή laser, όπου θεωρείται πως είναι ακρίβειας καλύτερης από 5mm. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, η σύγκριση δεν γίνεται για όλη την έκταση του μνημείου, παρά στο μεγαλύτερο τμήμα της δυτικής όψης. Για την σύγκριση των λογισμικών μεταξύ τους χρησιμοποιείται η μηχανή GoPro, ενώ ο ποιοτικός έλεγχος μεταξύ των δύο μηχανών γίνεται στο λογισμικό πακέτο Photoscan.

Ο έλεγχος της σύγκρισης γίνεται τόσο οπτικά, μέσω της παραγωγής χαρτών χρωματικών αποκλίσεων, αλλά και με στατιστικές μεθόδους, μέσω υπολογισμού της καλύτερης τιμής (μ) και της τυπικής απόκλισης (σ) (χρήση κανονική κατανομής), των τιμών της απόκλισης των μοντέλων μεταξύ τους. Επίσης, αναφορικά με την επεξεργασία στο λογισμικό Photoscan, γίνεται ένας επιπλέον έλεγχος μέσω σημείων ελέγχου, των οποίων οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες είναι γνωστές και τα οποία σκοπεύονται στις εικόνες κατά τη διάρκεια των προσανατολισμών τους, αλλά δεν συμμετέχουν στη διαδικασία.

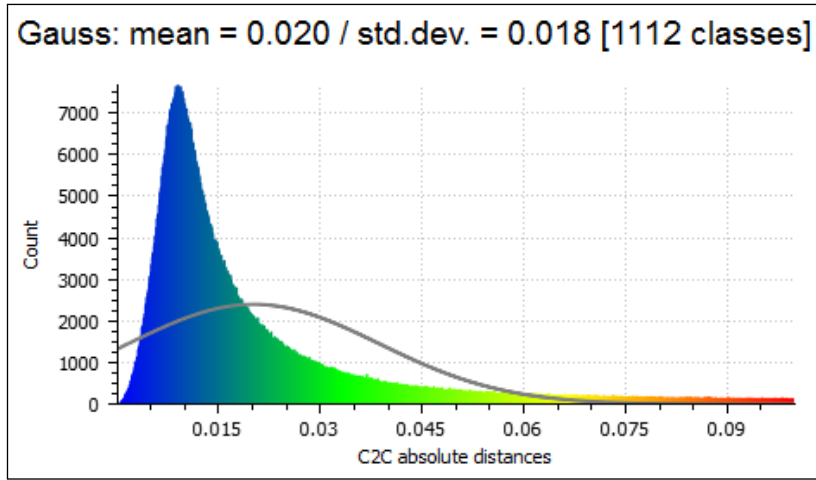
5.2 Συγκρίσεις νεφών σημείων

5.2.1 Σύγκριση μέσω χαρτών χρωματικών αποκλίσεων

- ❖ Σύγκριση μοντέλων από Photoscan (GoPro) και σαρωτή laser

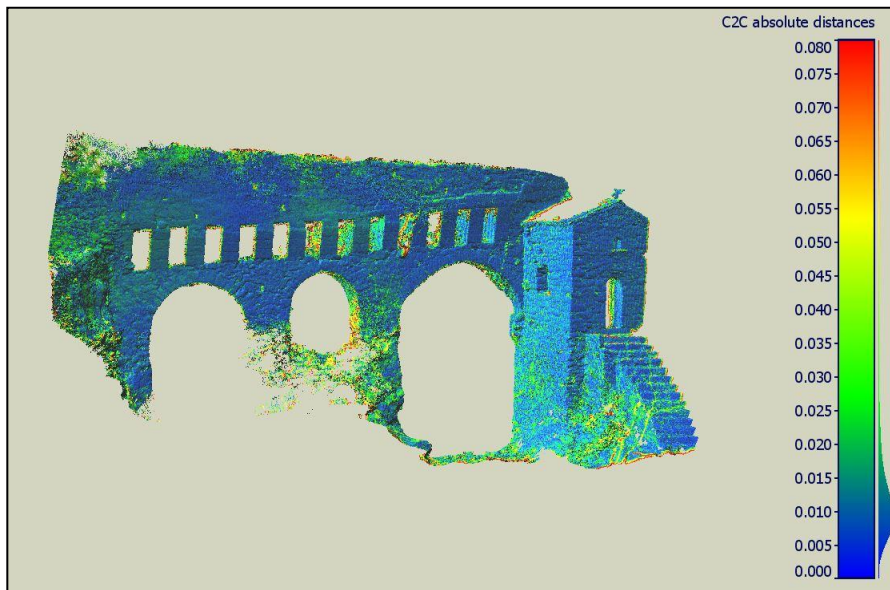


Εικόνα 5. 1: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από το Photoscan (GoPro) και το σαρωτή laser.

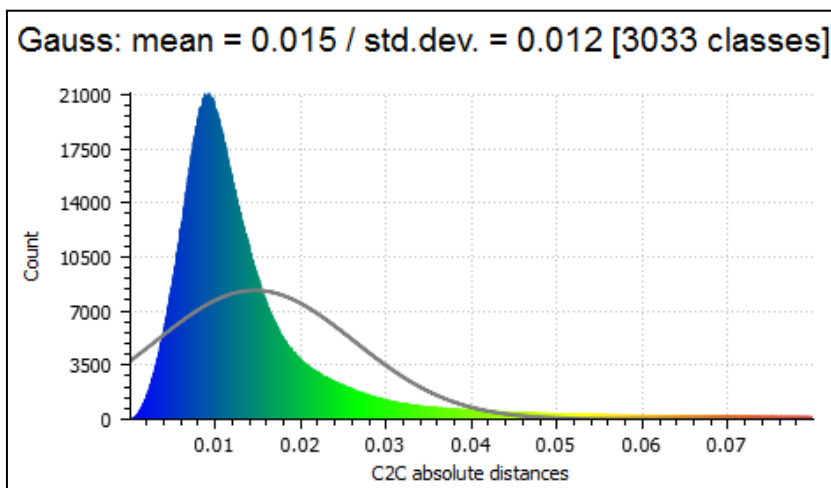


Διάγραμμα 5.1: Ιστόγραμμα συχνότητων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής Σύγκριση Photoscan (GoPro), με το σαρωτή laser.

❖ Σύγκριση μοντέλων από Photoscan (Mobius) και σαρωτή laser

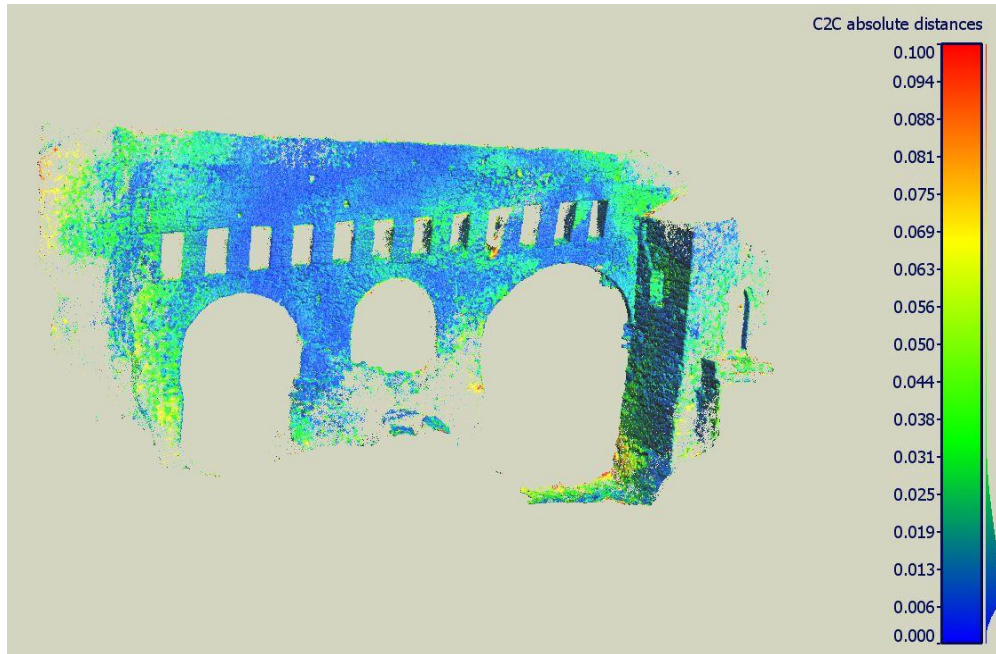


Εικόνα 5. 1: : Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από το Photoscan (Mobius) και το σαρωτή laser.

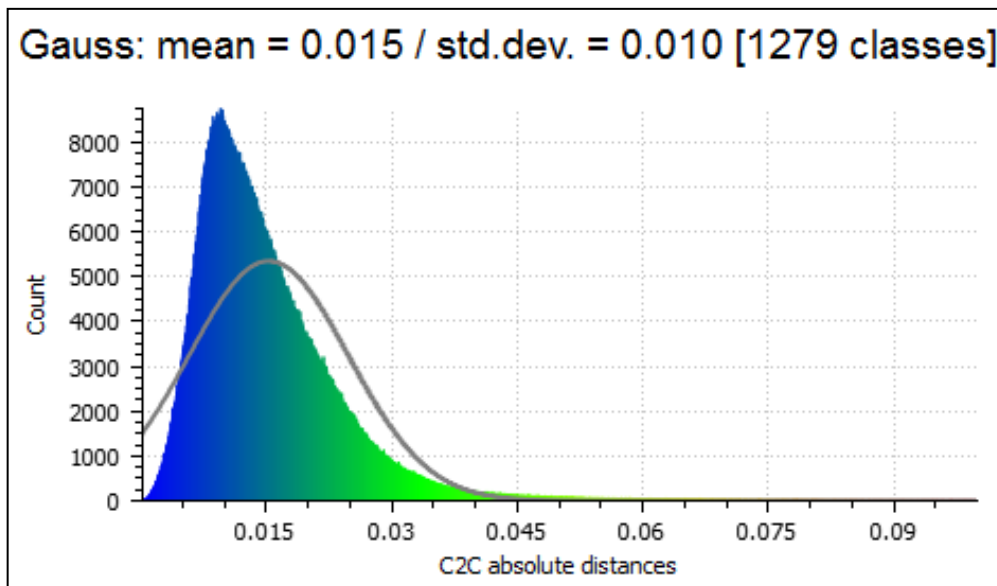


Διάγραμμα 5.2: Ιστόγραμμα συχνότητων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής Σύγκριση Photoscan (Mobius), με το σαρωτή laser.

❖ Σύγκριση μοντέλων από VisualSfM+CMPMVS και σαρωτή laser

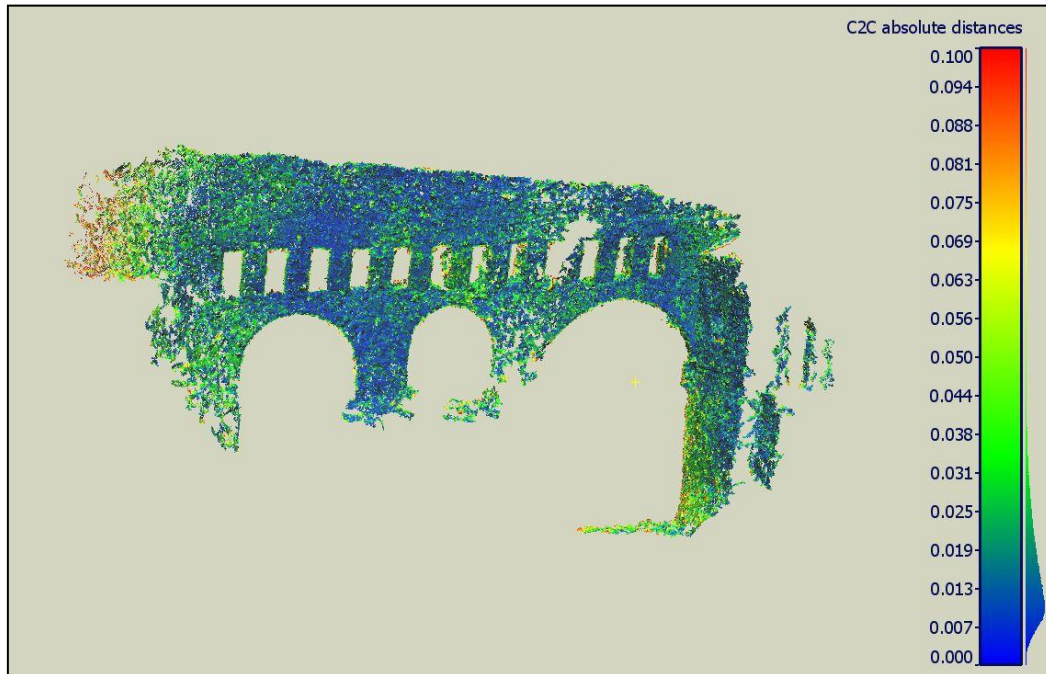


Εικόνα 5.2: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα VisualSfM+CMPMVS και το σαρωτή laser.

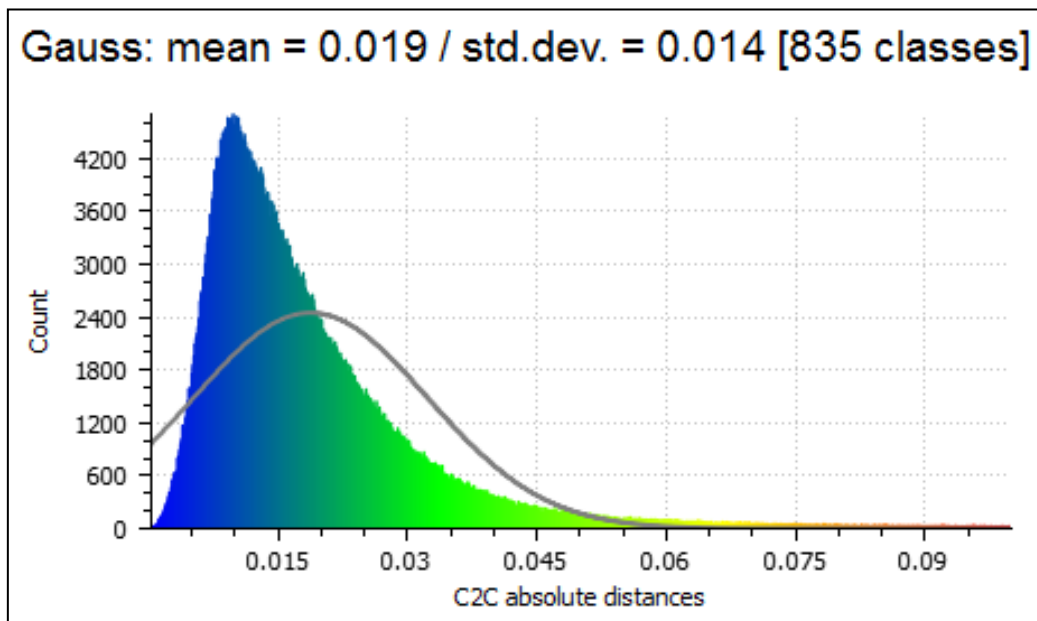


Διάγραμμα 5.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση VisualSfM+CMPMVS, με το σαρωτή laser.

❖ Σύγκριση μοντέλων από VisualSfM+CMVS και σαρωτή laser

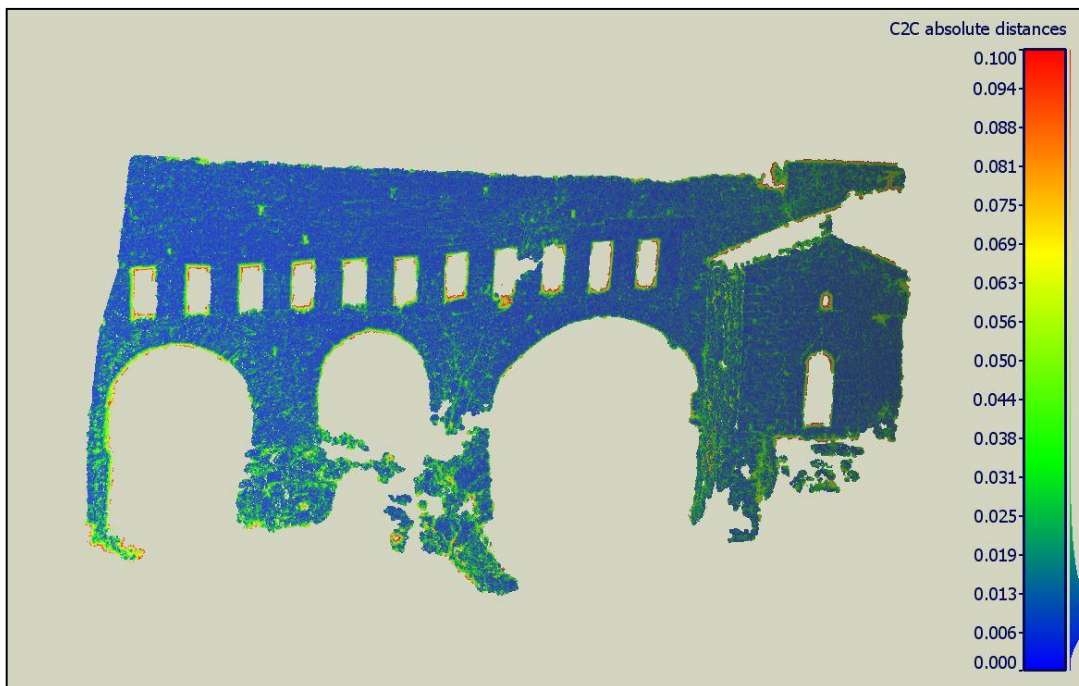


Εικόνα 5.3: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα VisualSfM+CMVS και το σαρωτή laser

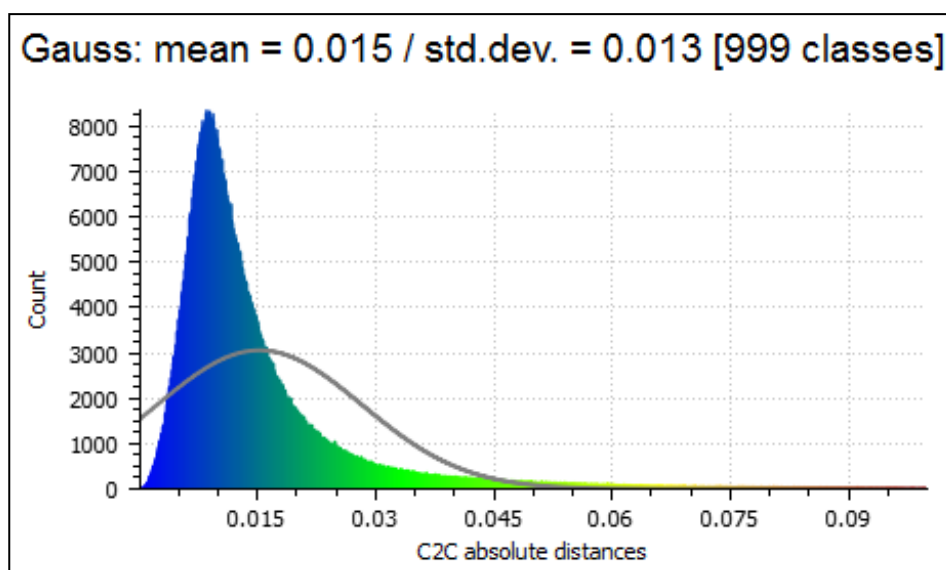


Διάγραμμα 5. 4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση VisualSfM+CMVS, με το σαρωτή laser.

❖ Σύγκριση μοντέλων από MicMac και σαρωτή laser



Εικόνα 5.4: Αποτέλεσμα σύγκρισης μοντέλων από τα MicMac και το σαρωτή laser



Διάγραμμα 5.5: Ιστόγραμμα συχνότητων με προσαρμογή καμπύλης κανονικής κατανομής. Σύγκριση MicMac, με το σαρωτή laser.

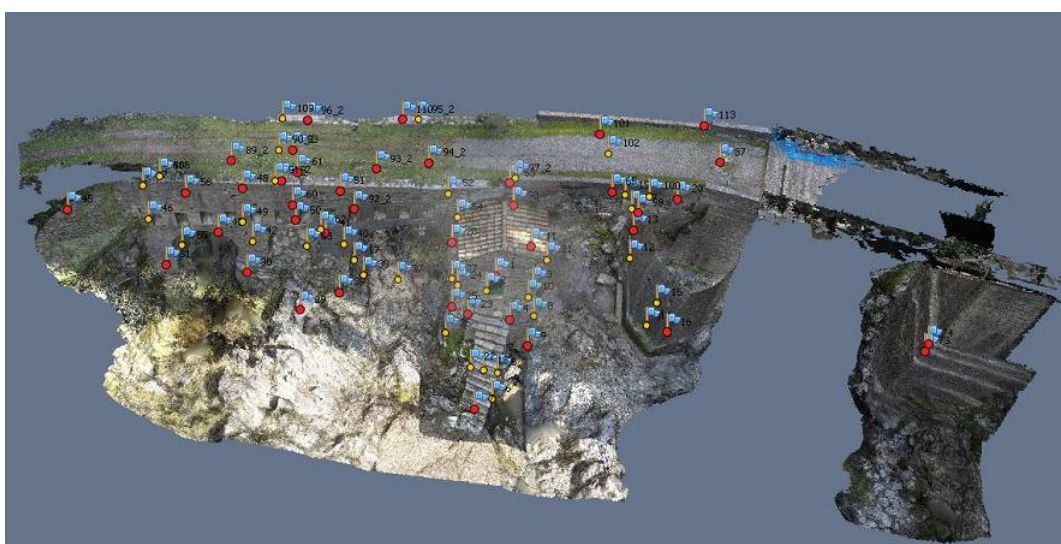
5.2.2 Σύγκριση μέσω σημείων ελέγχου

Για τα δύο σύνολα δεδομένων των οποίων η επεξεργασία γίνεται στο λογισμικό Photoscan, εξάγονται στοιχεία για τη την αξιολόγηση της διαδικασίας μέσω σημείων ελέγχου, τα οποία δεν συμμετέχουν στην διαδικασία και αποτελούν ανεπηρέαστο δείκτη της ακρίβειας της μεθόδου. Για τα δύο σύνολα δεδομένων (GoPro και Mobius) τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω, μαζί με την κατανομή τους

GoPro Hero 4

	Οριζοντιογραφικό σφάλμα(m)	Υψομετρικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα σε pixel
GCP(43)	0.006	0.004	0.007	1.95
Check Points(37)	0.006	0.004	0.007	1.73

Πίνακας 5.1: Σφάλμα φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου για την GoPro

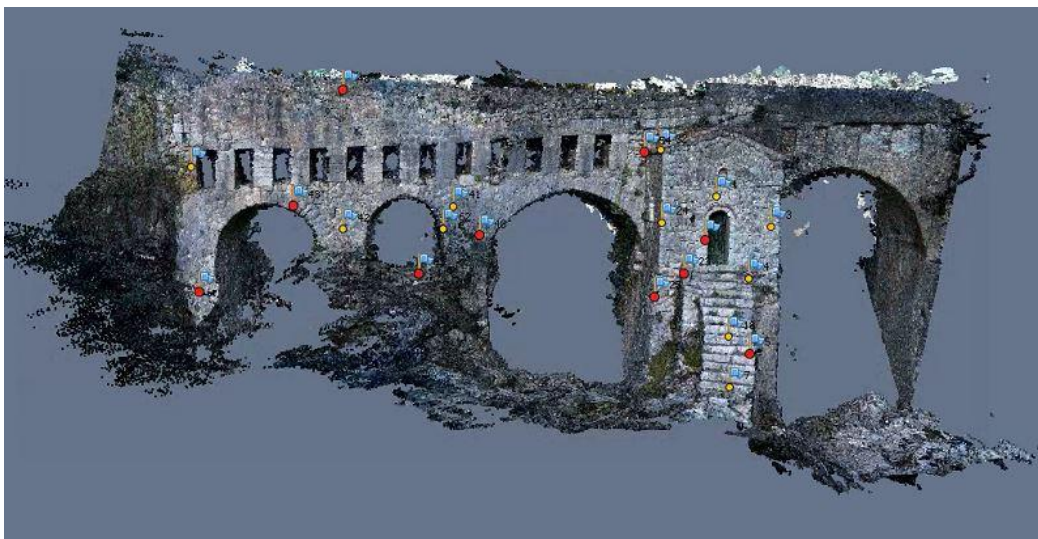


Εικόνα5.5: Κατανομή GCPs (κόκκινο χρώμα) - σημείων ελέγχου (κίτρινο χρώμα)

Mobius

	Οριζοντιογραφικό σφάλμα(m)	Υψομετρικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα σε pixel
GCP(10)	0.007	0.004	0.007	2.0
Check Points(11)	0.011	0.005	0.012	1.86

Πίνακας 5. 2: Σφάλμα φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου για την Mobius



Εικόνα 5.6: Κατανομή GCPs (κόκκινο χρώμα) - σημείων ελέγχου (κίτρινο χρώμα)

5.2.3 Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων

Για την πιο εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια της διαδικασίας, τα ως άνω αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε δύο πίνακες.

Αρχικά γίνεται αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων για τις δύο κάμερες, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι τιμές των σφαλμάτων που προκύπτουν και για τις δύο μηχανές είναι εν γένει πολύ καλές, εντός των αναμενόμενων ορίων. Τα σφάλματα που προκύπτουν από τη μηχανή Mobius είναι ελαφρώς υψηλότερα, γεγονός το οποίο σχετίζεται με τη μικρότερη ανάλυση των εικόνων από το βίντεο με τη χαμηλότερη ποιότητα (1920x1080), αλλά και λόγω του ότι τα ακραία σημεία ελέγχου είναι αναμενόμενο να έχουν μεγάλο σφάλμα, καθώς στα σημεία αυτά η γεωμετρία των ομόλογων ακτινών δεν είναι καλή, με αποτέλεσμα τα μην γίνεται σωστά ο υπολογισμός της θέσης τους στο χώρο.

	Οριζοντιογραφικό σφάλμα(m)	Υψομετρικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα(m)	Συνολικό σφάλμα σε pixel
GoPro	0.006	0.004	0.007	1.73
Mobius	0.011	0.005	0.012	1.86

Πίνακας 5. 3: Συγκριτική παράθεση σφαλμάτων σημείων ελέγχου μεταξύ GoPro και Mobius

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν με χρήση της μηχανής GoPro για τα (3+1) διαφορετικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται.

GoPro	Photoscan	MicMac	VisualSfM+CMPMVS	VisualSfM+CMVS
μ	0.02m	0.015m	0.015m	0.019m
σ	0.018m	0.013m	0.01m	0.014m

Πίνακας 5. 4: Συγκριτική παράθεση τιμών κανονικής κατανομής (μ, σ) προσαρμοσμένης στις τιμές της απόστασης μεταξύ των μοντέλων όπως προκύπτουν από τα διαφορετικά λογισμικά.

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων αναφορικά με το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων είναι μικρές. Από τις τιμές των σφαλμάτων που προκύπτουν από τη σύγκριση των νεφών σημείων μεταξύ τους, στο λογισμικό CloudCompare, φαίνεται πως από όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται, εξάγονται ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια των παραγόμενων. Αυτό που διαφέρει ουσιαστικά εκτός από την ακρίβεια, είναι η και η πυκνότητα και η πιστότητα του πρωταρχικού νέφους σημείων. Το Photoscan και το MicMac φαίνεται να αποφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα από αυτή την άποψη. Ωστόσο, η έλλειψη διεπαφής στο MicMac είναι σοβαρό μειονέκτημα. Αναφέρεται πως τα τελικά αποτελέσματα προκύπτουν μετά από αφαίρεση από κάθε νέφος σημείων, ποσοστού θορύβου που υπάρχει στο εσωτερικό τους. Για την απόκτηση ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια της διαδικασίας, πρέπει στην ιδανική περίπτωση, τα νέφη σημείων να καλύπτουν την ίδια ακριβώς επιφάνεια του αντικειμένου και να είναι απαλλαγμένα από μεταβολές του φυσικού περιβάλλοντος ή και του ίδιου του αντικειμένου, καθώς έτσι εισάγονται σφάλματα στους υπολογισμούς, τα οποία στην ουσία δεν υφίσταται (π.χ. λήψη εικόνων διαφορετικές ημέρες - κινούμενα εμπόδια, βλάστηση κ.α.). Επειδή λοιπόν η περιοχή στην οποία γίνεται η σύγκριση έχει αρκετή βλάστηση και επειδή από κάθε λογισμικό προκύπτει μεταβλητή κάλυψή της, παρατηρούνται διαφορές ακόμα και της τάξης του ενός μέτρου. Για το λόγο αυτό, αφού τα νέφη καθαριστούν όσο το δυνατόν καλύτερα, μετά από ένα αρχικό υπολογισμό των μεταξύ τους διαφορών, αποκόπτονται οι τιμές εκτός του διαστήματος (-3σ,+3σ), για την εξαγωγή ορθότερων ανεπηρέαστων αποτελεσμάτων. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως παρατηρείται η ύπαρξη συστηματικού σφάλματος μεταξύ των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία των εικόνων και του νέφους σημείων από το σαρωτή. Αυτό, κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται σε οριακές περιπτώσεις τμημάτων των μοντέλων (κυρίως στα όρια της περιοχής σύγκρισης) που κανονικά θα έπρεπε να έχουν αφαιρεθεί, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την τελική τιμή του σφάλματος. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται να είναι στην περίπτωση της κάμερας GoPro στο λογισμικό Photoscan, όπου από το χάρτη χρωματικών αποκλίσεων (εικ.5.1) φαίνονται έντονα περιοχές με απότομη αύξηση του σφάλματος .

Κεφάλαιο 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Αξιολόγηση

Η καταγραφή της πολιτιστικής κληρονομιάς συνεπάγεται διαχείριση τεράστιου όγκου πληροφοριών και δεδομένων, από φωτογραφίες/ βίντεο και αναλογικά σχέδια, μέχρι ορθοεικόνες, τρισδιάστατα μοντέλα κ... Για το λόγο αυτό σε όλες τις διαδικασίες, από τον προγραμματισμό λήψης των δεδομένων, την επεξεργασία μέχρι και τη διάδοσή τους, διεισδύουν άμεσα, νέες τεχνολογίες και προοπτικές. Αν και οι παραδοσιακές τοπογραφικές μέθοδοι είναι χρήσιμες ακόμα, οι νέες τεχνολογίες των σαρωτών laser και της συνδυασμένης χρήσης τεχνικών της φωτογραμμετρίας με τους αλγορίθμους της όρασης υπολογιστών, δίνουν νέες δυνατότητες στις αποτυπώσεις. Η βέλτιστη μέθοδος γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων βασίζεται στο συνδυασμό παραγωγής τελικών (2D ή/και 3D) προϊόντων υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας και αξιοπιστίας, με χαμηλό κόστος, ταχεία συλλογή δεδομένων και αυτοματοποιημένη διαδικασία επεξεργασίας τους (Remondino et al., 2010).

Εν γένει, οι ταχύτατα αναπτυσσόμενες πολυ-εικονικές μέθοδοι, ικανοποιούν το σύνολο των προαπαιτούμενων, καθώς τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους είναι η χρήση εξοπλισμού χαμηλού κόστους, η ευελιξία στη λήψη των δεδομένων (δεν απαιτείται βαρύς και δυσμετακίνητος εξοπλισμός), η υψηλή αυτοματοποίηση στην επεξεργασία των δεδομένων (εικόνων) και στον υπολογισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων στο χώρο (νέφη σημείων). Τα τελευταία χρόνια υπάρχει πλούσια διεθνής βιβλιογραφία με αξιολογήσεις και συγκρίσεις της πολυ-εικονικής μεθόδου με συμβατικές μεθόδους, όπως η χρήση επίγειου σαρωτή laser (Thoeni et al., 2014; Lerma et al., 2014; Kersten et al., 2015) ή συμβατικών φωτογραμμετρικών τεχνικών, με ποικίλα συμπεράσματα ως προς την ακρίβεια των παραγόμενων 3D μοντέλων. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών, με την συνεχή εξέλιξη των εναέριων μη επανδρωμένων οχημάτων (UAV), δίνει ώθηση στην ανάπτυξη και εξέλιξη ευέλικτων, χαμηλού κόστους πλατφορμών συλλογής γεωχωρικών δεδομένων (UAS). Λόγω του μικρού ωφέλιμου βάρους τους χρησιμοποιούν μικρές μηχανές χαμηλού κόστους, με δυνατότητες, όπου υπό προϋποθέσεις, μπορούν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των παραδοσιακών εναέριων και επίγειων κινητών συστημάτων χαρτογράφησης, παράγοντας προϊόντα αντίστοιχης ποιότητας και ακρίβειας (Pérez et al., 2013, Bolognesi et al., 2013, Stal et al., 2014)

Η ποιότητα των προϊόντων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θέση, ο τρόπος και το μέσο λήψης των εικόνων, η πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η ανάλυση και η ποιότητα των εικόνων καθώς και το λογισμικό που χρησιμοποιείται. Η χρήση μη επανδρωμένων πλατφορμών UAV/UAS σε περιοχές όπου η απόκτηση πληροφορίας θα ήταν είτε πολύ ακριβή ή αδύνατη δίνει νέες προοπτικές και δυνατότητες. Ωστόσο, αξιοπιστία των πολυ-εικονικών μεθόδων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, για τον λόγο αυτό παρατηρείται στη βιβλιογραφία διασπορά απόψεων σχετικά με την τελική ακρίβεια της μεθόδου. Συνδυαστικά με την υψηλή μετρητική ακρίβεια, τα μοντέλα που προκύπτουν με πολυ-εικονικές μεθόδους παρουσιάζουν πολύ καλύτερα επίπεδα οπτικοποίησης και αναπαράστασης, συγκριτικά με τα προκύπτοντα από τις άλλες

μεθόδους. Πάντως, είναι γενικώς αποδεκτό, αλλά προκύπτει και από τα παραπάνω εκτεθέντα παραδείγματα, ότι ο συνδυασμός ακρίβειας και λεπτομέρειας, που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου, την καθιστά παραπάνω από επαρκή, αποτελώντας ένα αποδοτικό και πολύτιμο εργαλείο για τη βελτίωση της γεωμετρικής τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς για την πλειονότητα των μνημείων (Wessling et al., 2013). Ακόμα και με δεδομένα χαμηλότερης ποιότητας, όπως τα δεδομένα βίντεο, τα αποτελέσματα δείχνουν παραπάνω από ικανοποιητικά.

Με στόχο τη γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων, η τρισδιάστατη μοντελοποίησή τους μπορεί να γίνει γρήγορα και αποδοτικά. Για τη δημιουργία ενός μετρητικού, λεπτομερούς 3D μοντέλου, απαιτούνται:

- ευκρινείς και υψηλής ποιότητας φωτογραφίες, που παρέχουν πολλαπλή κάλυψη του αντικείμενου, με κάθε εικόνα να έχει ληφθεί από διαφορετική θέση, με μεγάλες μεταξύ τους επικαλύψεις (>80%), αποφεύγοντας τις πολύ μικρές γωνίες λήψης ως προς το αντικείμενο
- τουλάχιστον τρία φωτοσταθερά σημεία στο έδαφος.

Αν πρόκειται για την τεκμηρίωση εκτεταμένου μνημείου, οι εικόνες πρέπει να περιέχουν μεγάλο μέρος του με τις ίδιες συνθήκες φωτισμού (διατήρηση ραδιομετρίας) και, αναλόγως της τελικής επιθυμητής ακρίβειας και ανάλυσης, οι εικόνες πρέπει να λαμβάνονται από κατάλληλη απόσταση. Γενικώς, για επίγειες αποτυπώσεις δεν προτείνεται απόσταση λήψης μεγαλύτερη από 4-5 m, για απαιτήσεις ακρίβειας της κλίμακας 1:50. Προτείνεται η προσεκτική επιλογή των εικόνων που θα συμμετέχουν στη διαδικασία και η αποφυγή της άτακτης/άναρξης λήψης μεγάλου πλήθους εικόνων, καθώς η απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ κατά την επεξεργασία της αυξάνεται ραγδαία. Σε αντικείμενα με σαφείς ακμές ή λείες επιφάνειες με ομοιόμορφο πρότυπο χωρίς χαρακτηριστικά σημεία, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και συνίσταται η συνδυασμένη χρήση με συμβατικές μεθόδους για τη μοντελοποίηση του μνημείου, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις.

Μια μελλοντική πρόκληση είναι η δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού του αριθμού και των βέλτιστων θέσεων λήψης των εικόνων για κάθε αντικείμενο, με χρήση on-the-fly τεχνικών ανακατασκευής (Wendel et al., 2012) και μεθόδων υπολογισμού των ελάχιστων απαιτούμενων εικόνων (Hoppe et al., 2012).

Τα τελικά προϊόντα, που μπορούν να παραχθούν εύκολα από τα δημιουργούμενα 3D μοντέλα, είναι συμβατικά δισδιάστατα εικονιστικά σχέδια ή άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου σε εξειδικευμένα λογισμικά επεξεργασίας 3D μοντέλων.

6.2 Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα αναπτύχθηκαν οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων, με έμφαση στον συνδυασμό χαμηλού κόστους μεθόδων και διαδικασιών, με εναέρια μέσα συλλογής δεδομένων, όπως τα ταχύτατα αναπτυσσόμενα μη επανδρωμένα οχήματα (UAV). Η ευελιξία στον τρόπο συλλογής υψηλής ποιότητας δεδομένων, ακόμα και σε δύσκολες περιπτώσεις, καθιστούν τους επιστήμονες που ασχολούνται με τη διατήρηση της πολιτιστικής

κληρονομιάς και ιδιαίτερα με τη γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων, σε θέση να διεξάγουν τις μελέτες τους στον τρισδιάστατο χώρο πιο εύκολα και γρήγορα από το παρελθόν, αλλά και με πολύ μικρό κόστος, αν αναλογιστεί κανείς πως το κόστος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στην παραπάνω εφαρμογή είναι μικρότερο των 500€. Πληθώρα τεχνικών είναι διαθέσιμη, με συνέπεια κάθε φορά να πρέπει να επιλεγεί η οικονομικότερα καταλληλότερη. Η χρήση των πολυ-εικονικών τεχνικών στα πεδία της γεωμετρικής τεκμηρίωσης των μνημείων έχει αρχίσει να γίνεται ολοένα και πιο συχνή, ιδιαίτερα όταν οι απαιτήσεις ακριβείας δεν είναι υπερβολικά υψηλές, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν είναι δυνατή και η παραγωγή προϊόντων ιδιαίτερα υψηλής ακρίβειας. Συγκροτημένες και ολοκληρωμένες ροές εργασιών, οι οποίες εκμεταλλεύονται τα εργαλεία των αλληλοσυμπληρούμενων πεδίων της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών, φαίνονται ικανές να παράγουν τις πιο ισχυρές και αξιόπιστες λύσεις, ακόμα και με χαμηλότερου κόστους εργαλεία. Ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια και το είδος της εκάστοτε εφαρμογής, μπορεί εύκολα να εφαρμοσθεί συνδυασμός μεθόδων και τεχνικών, με στόχο το καλύτερο και οικονομικότερα παραγόμενο τελικό προϊόν. Ωστόσο, είναι επιτακτική η δημιουργία πιο σταθερών αλληλουχιών και αλγορίθμων, στους οποίους θα εμπεριέχονται αυτόματοι και αξιόπιστοι τρόποι εντοπισμού σφαλμάτων και αποφυγής λαθών, με αυξημένο βαθμό επαναληψιμότητας. Οι χρήστες πρέπει πάντα να είναι σε θέση να εκτιμήσουν την αξιοπιστία και την ποιότητα των εργασιών τους και των προβλημάτων, που ενδέχεται να προκύψουν, είτε οπτικά είτε μέσω εργαλείων στατιστικής ανάλυσης, που θα παρέχονται από το χρησιμοποιούμενο λογισμικό.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

Balletti, C., Guerra, F., Tsioukas, V., & Vernier, P., 2014. Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes. *Sensors* (Basel, Switzerland), 14(9), 7471–17490. <http://doi.org/10.3390/s140917471>

Balletti, C., Guerra, F., Scocca, V., Gottardi, C., 2015. 3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Avila, Spain, Vol. XL-5/W4, pp. 215-222.

Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2006. SURF: Speeded up robust features. In: *Computer vision–ECCV 2006*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 404-417.

Bolognesi, M., Furini, A., Russo, V., Pellegrinelli, A., Russo, P., 2015. Testing the low-cost RPAS potential in 3D cultural heritage. In: *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Avila, Spain, Vol. XL-5/W4.

Chiabrando, F., Lingua, A., Noardo, F., Spanò, A., 2014. 3D Modelling of trompe l'oeil decorated vaults using dense matching techniques. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Riva del Garda, Italy, pp. 97-104.

Doneus, M., Neubauer, W., 2005. 3D laser scanners on archaeological excavations. In: *XXth International Symposium CIPA, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Torino, Italy, Vol. XXXVI-5/C34/1, pp. 226-231.

Eling, C., Wieland, M., Hess, C., Klingbeil, L., Kuhlmann H., 2015. Development and evaluation of a UAV based mapping system for remote sensing and surveying applications. In: *the international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 2015

Grussenmeyer, P., Cazalet, B., Burens, A., Carozza, L., 2010. Close Range Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry for 3D-documentation of the Bronze Age Cave „Les Fraux“ in Perdigord (France). In: P. Anreiter et al. (Eds.), *1st Mining in European History – Conference SFB HiMAT*, Innsbruck, Austria, pp. 411-421.

Hoppe, C., Wendel, A., Zollmann, S., Pirker, K., Irschara, A., Bischof, H., Kluckner, S., 2012. Photogrammetric Camera Network Design for Micro Aerial Vehicles. In: *Computer Vision Winter Workshop (CVWW)*, Mala Nedelja, Slovenia.

Ioannidis, C., Georgopoulos, A., 2007. Innovative techniques for the acquisition and processing of multisource data for the geometric documentation of monuments. In: *International Journal of Architectural Computing (IJAC)*, 5(2), pp. 179-198.

Kersten, T., Lindstaedt, M., 2012. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. Report PFG 2012 / 6, 0727–0740, Stuttgart, Germany, DOI: 10.1127/1432-8364/2012/0152

Kersten, T., Lindstaedt, M., 2012. Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. *Lecture Notes in Computer Science*, 7616: 1–10.

Kersten, T., Mechelke, K., Maziull, L., 2015. 3D model of Al Zubarah fortress in Qatar – Terrestrial laser scanning vs. dense image matching. In: *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Avila, Spain, Vol. XL-5/W4.

Korumaz, A., Korumaz, M., Tucci, G., Bonora, V., Niemeier, W., Riedl, B., 2012. UAV systems for documentation of cultural heritage. In: *ICONARCH I-International Congress of Architecture-Innovative Approaches in Architecture and Planning*, Konya, Turkey, Vol. ISBN:978-975-448-206-5, pp:419-430.

Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Chamzas, C., 2013. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), pp. 73–79.

Lerma, J., Navarro, S., Segui, A., Cabrelles, M., 2014. Range-based versus automated markerless image-based techniques for rock art documentation. *The Photogrammetric Record*, 29(145), pp. 30–48.

Levy, T., Vincent, M., Howland, M., Kuester, F., Smith, N., 2014. The art of implementing SfM for reconstruction of archaeological sites in Greece: preliminary applications of cyber-archaeological recording at Corinth. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14(4), pp. 125-133.

Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale- Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60(2), pp. 91–110.

Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., Borghinic, b S., 2015. Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 2015

Pérez, M., Agüera, F., and Carvajal, F.: Low cost surveying using an unmanned aerial vehicle, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 311-315, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-311-2013, 2013.

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), pp. 269–291.

Remondino, F., Rizzi, A., 2010. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritages sites – techniques, problems and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), pp. 85–100.

de Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., de Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., de Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., van Meirvenne, M., de Clercq, W., 2013. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40 (2013), pp. 1108-1121.

- Santagati, C., Inzerillo, L., Di Paola, F., 2013. Image-based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: Limits and potentialities. In: *XXIV International CIPA Symposium, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Strasbourg, France, Vol. XL-5/W2.
- Sauerbier, M., Eisenbeiss, H., 2010. UAVs for the documentation of archaeological excavations. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Newcastle upon Tyne, UK, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 526-531.
- Soile, S., Adam, K., Ioannidis, C., Georgopoulos, A., 2013. Accurate 3D textured models of vessels for the improvement of the educational tools of a museum. In: *3D-ARCH 2013, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Trento, Italy, Vol. XL-5/W1, pp. 219-226.
- Schaich, M., 2013. Combined 3D Scanning and Photogrammetry Surveys with 3D Database Support for Archaeology & Cultural Heritage . A Practice Report on ArcTron's Information System aSPECT^{3D}. In: *Photogrammetric Week 2013*, Stuttgart, Germany, pp. 233-246.
- Themistocleous, K., Ioannides, M., Agapiou, A., Hadjimitsis, D.G., 2015. The methodology of documenting cultural heritage sites using photogrammetry, UAV, and 3D printing techniques: the case study of Asinou Church in Cyprus. In: *SPIE 9535, Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*, doi:10.1117/12.2195626.
- Thoeni, K., Giacomini, A., Murtagh, R., Kniest, E., 2014. Comparison of multi-view 3d reconstruction of a rock wall using Several cameras and a laser scanner. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5, 2014
- Tsilimantou, E., Nikitakos, A., Delegou, A., Moropoulou, A., Soile, S., Tapinaki, S., Ioannidis, C., 2014. Integrated Process of Documentation using Geographic Information System: The case of the historic building of Villa Klonaridi, Athens, Greece. In: *MonuBasin 9 - 9th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Ankara, Turkey.
- Wendel, A., Maurer, M., Graber, G., Pock, T., Bischof, H., 2012. Dense reconstruction on-the-fly. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1450–1457.
- Wenzel, W., Rothmel, M., Fritsch, D., Haala, N., 2013, Image acquisition and model selection for multi-view stereo, In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Trento, Italy, Vol. XL-5/W1, pp. 251-258.
- Wessling, R., Maurer, J., Krenn-Leeb, A., 2013. Structure from Motion for Systematic Single Surface Documentation of Archaeological Excavations. In: *18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT 18, 2013)*, Vienna, Austria.
- Xu A. and Namit, G. «SURF: Speeded- Up Robust Features», COMP 558 -Project Report, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 2008.