



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Κάστρο Πεντεσκούφι: γεωμετρική τεκμηρίωση

Φωτεινή Βρεττού



Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Γεωργόπουλος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

για τον παππού Γιάννη και τη γιαγιά Ευαγγελία στην Αρχαία Κόρινθο

Περιεχόμενα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4	
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	9	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	12	
ABSTRACT	13	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14	
1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ	18	
1.1	ΟΡΙΣΜΟΣ	18
1.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ	18
1.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	22
1.4	ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	23
1.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ	25
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΝΗΜΕΙΟΥ	36	
2.1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	36
2.2	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	41
2.3	ΘΕΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	46
3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	47	
3.1	ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ	47
3.2	ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	50
3.3	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΛΗΨΕΙΣ	53
3.4	ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ	56
4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	59	
4.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	59
4.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	61
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΑΝΑΦΟΡΑ PHOTOSCAN	64
5 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ 3D ΜΟΝΤΕΛΟΥ	67	
5.1	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	67
5.2	ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ	73
5.3	ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ	81
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	93	
I.	ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΡΙΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ : Η ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	93
II.	ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΡΙΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ: Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΌΡΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ	95
III.	Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHOTOSCAN	97
IV.	Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ DENSE CLOUD ΚΑΙ ΤΩΝ MESH ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GEOMAGIC	106
V.	ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	110
VI.	ΑΝΑΦΟΡΑ PHOTOSCAN	119
VII.	ΣΧΕΔΙΑ	120

*Εικόνα εξώφυλλου: Top 30 Most Beautiful and Eye-capturing Earth Photographs of 2015 , <http://www.topntoday.co/2015/07/top-30-most-beautiful-and-eye-capturing.html>

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1-1: Οι περιοχές εφαρμογής των εναλλακτικών τεχνικών ανάλογα την πολυπλοκότητα και την έκταση αποτύπωσης (Boehler W., Heinz G 1999).....	19
Εικόνα 1-2: Κάστρο Shawbak (Crac de Montréal), Ιορδανία. (Drap 2005).....	33
Εικόνα1-3: Πύργος Banh it, Vietnam. (Fangi 2013).....	33
Εικόνα1-4: Ψηφιακή αναπαράσταση της γέφυρας Cadi, Γρανάδα (Rodriguez-Navarro P., Verdiani G. 2013).....	33
Εικόνα 1-5: Οχυρωματικός οικισμός στη Valleriana, Ιταλία (Merlo A., Rodriguez-Navarro P. 2012).....	33
Εικόνα 1-6:Το κάστρο Coatfrec στην Γαλλία. (Πηγή:www.wikiwand.com).....	33
Εικόνα 1-7: Οχυρωμένος βυζαντινός οικισμός της Ρεντίνας.....	33
Εικόνα1-8: Δυτική και Βόρεια όψη του φρουρίου AlZubarah στο Qatar (T. K. Kersten 2015).....	33
Εικόνα 1-9: Τμήμα των βυζαντινών τειχών της Θεσσαλονίκης (Παυλίδης 2011).....	33
Εικόνα 1-10: Κάστρο Haut-Andlau, Γαλλία (Landes T. 2007).....	34
Εικόνα 1-11: Ερείπια κάστρου Perlo, Ιταλία (Chiabrande F., 2009).....	34
Εικόνα1-12: Κάστρο Salobrena, Γρανάδα Ισπανία (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015).....	34
Εικόνα 1-13: Γεωμετρική ανάλυση έργων PaleariFratino, Σικελία, Ιταλία (Pirinu 2015).....	34
Εικόνα 1-14: 3D εκτύπωση του κάστρου Britxi, Βαλένθια Ισπανία (GarfellaRybioJ. 2015).....	34
Εικόνα1-15: Οπύργος Escaletes στην SantaPola, Alicante Ισπανία (Rodriguez –Navarro P. 2015).....	34
Εικόνα 1-16: Κάστρο Wartburg,Γερμανία. (Mayer H. 2003).....	34
Εικόνα 1-17: Κάστρο Χίου, πηγή: www.travelstyle.gr.....	34
Εικόνα 1-18: Κάστρου Graines, Ιταλία. (Agosto 2005).....	35
Εικόνα1-19: Κάστρο Beaufort-Qalaat el-Chaqif Λίβανος. (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003).....	35
Εικόνα 1-20: Κάστρο Stenico (πηγή www.italia.it).....	35
Εικόνα 1-21: Το κάστρο Chatel-sur-moselleστη Γαλλία (πηγή:http://chatel-medieval.fr/.....	35
Εικόνα 1-22: Η Θαλασινή Πύλη, Ρόδος (πηγή: flickrhivemind.net).....	35
Εικόνα 1-23:Οχυρό Kristiansten στο Trondheim (πηγή: marinas.com).....	35
Εικόνα 2-1: Ο χωρισμός εδαφών της PartitioRomaniae.....	39
Εικόνα 2-2: Το μολυβδόβουλο του Λέοντα Σγουρού. (Βλαχοπούλου 2002).....	39
Εικόνα 2-3: Βυζαντινή πύλη στον Ακροκόρινθο. (Athanasoulis 2013).....	39
Εικόνα 2-4: Σχέδιο του κάστρου Ακροκορίνθου όπου υποδεικνύονται λατρευτικές θέσεις. (Αθανασούλης 2010).....	39

Εικόνα 2-5: Τοπογραφικό διάγραμμα με τις θέσεις των μνημείων και των ανασκαφών βυζαντινής περιόδου. Βασισμένο σε σχέδιο του D. Herst. Αμερικάνικη Σχολή Κλασσικής Αρχαιολογίας στην Αθήνα (Athanasoulis 2013)	40
Εικόνα 2-6: Απόσπασμα περιοχής από ορθοφωτοχάρτες της Κτηματολόγιο Α.Ε. σε κλίμακα 1:20000 (ΕΓΣΑ'87).....	42
Εικόνα 2-7: Γεωμετρικά στοιχεία κάστρου.....	42
Εικόνα 2-8: Διακριτά είδη τοιχοδομίας.....	43
Εικόνα 2-9: Όψη του Ακροκορίνθου από το Πεντεσκούφι.....	43
Εικόνα 2-10: Στο δρόμο για το Πεντεσκούφι Διακρίνεται η ΒΑ πλευρά του	44
Εικόνα 2-11: Στο δρόμο για το Πεντεσκούφι. Διακρίνεται η ΒΔ πλευρά του	44
Εικόνα 2-12: Ανατολική πλευρά των τειχών-απρόσιτη	45
Εικόνα 2-13: Νότια πλευρά των τειχών-προσιτή	45
Εικόνα 2-14: ΒΔ όψη	45
Εικόνα 2-15: ΒΑ όψη	45
Εικόνα 2-16: ΝΔ όψη.....	45
Εικόνα 2-17: ΝΑ όψη.....	45
Εικόνα 2-18: Ανατολική όψη	45
Εικόνα 2-19: Δυτική όψη.....	45
Εικόνα 2-20: Ζώνες προστασίας της περιοχής μελέτης	46
Εικόνα 3-1: Σχέδιο δικτύου. Σ1-Σ9 οι στάσεις της εσωτερικής όδευσης, Π3-Π7 οι στάσεις της εξωτερικής όδευσης. Με γαλάζιο χρώμα θέσεις σημείων στην εξωτερική περίμετρο των τειχών.....	52
Εικόνα 3-2: Η θέση λήψης των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο	55
Εικόνα 3-3: Θέσεις λήψης των εικόνων	55
Εικόνα 3-4: Θέσεις λήψης των εικόνων	55
Εικόνα 3-5: Απόσταση λήψης 280m.....	57
Εικόνα 3-6: Απόσταση λήψης 180m.....	57
Εικόνα 3-7: Απόσταση λήψης 100m.....	58
Εικόνα 3-8: Περίπτωση κρίσιμης γεωμετρίας εικόνων που προκύπτει από κοινό σημείο λήψης των εικόνων	58
Εικόνα 3-9: Δύο ομάδες εικόνων χωρίς αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Οι εικόνες της δεξιάς ομάδας δεν μπορούν να προσανατολιστούν και αποκλείστηκαν.	58
Εικόνα 3-10: Θόρυβος –διασκορπισμένα σημεία λόγω γωνίας άξονα λήψης εικόνων.....	58
Εικόνα 3-11: Συνένωση νεφών με διαφορετική φωτεινότητα.....	58
Εικόνα 3-12: Εναλλακτικές γωνίες άξονα λήψης εικόνων πηγή: courseware.e-education.psu.edu.....	58
Εικόνα 4-1: Επίπεδο τομής – στιγμιότυπο Geomagic.....	62
Εικόνα 4-2: Επίπεδο τομής.....	62

Εικόνα 4-3: στροφή συστήματος για κατακόρυφες τομές. (Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ. 2010)	62
Εικόνα 4-4: Νέφος tie points	63
Εικόνα 4-5: Dense Cloud	63
Εικόνα 4-6: Mesh τομής	63
Εικόνα 4-7: Textured Mesh τομής	63
Εικόνα 4-8: Παράμετροι παραγωγής ορθοεικόνας	63
Εικόνα 4-9: Ορθοεικόνα τομής (.tif)	63
Εικόνα 4-10: Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό του mesh του Ανατολικού Τείχους παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα προβολής που επηρεάζει όλο το μοντέλο	65
Εικόνα 4-11: Πληροφορίες για τις παραμέτρους της μηχανής	66
Εικόνα 4-12: Κατανομή φωτοσταθερών σε τμήμα του κάστρου	66
Εικόνα 4-13: Ορθοεικόνα	66
Εικόνα 4-14: DEM σε κάτοψη	66
Εικόνα 4-15: Η θέση των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο	66
Εικόνα 5-1: Η εικόνα του καρφιού της στάσης Σ4, όπως φαίνεται στην ορθοεικόνα και η θέση του αντίστοιχου σημείου σύμφωνα με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες	68
Εικόνα 5-2: Θέσεις σημείων ελέγχου (με κόκκινο)	69
Εικόνα 5-3: Ταύτιση τομών AA' και ΔΔ' κάθετα	70
Εικόνα 5-4: Ταύτιση τομών BB' και NN' κάθετα	70
Εικόνα 5-5: Ταύτιση τομών AA' και ΔΔ' οριζόντια	70
Εικόνα 5-6: Αποχή μάσκας από τα όρια του αντικειμένου	73
Εικόνα 5-7: Θόρυβος στις περιοχές που δεν ορίστηκαν σωστά όρια μάσκας	73
Εικόνα 5-8: Κακή απόδοση του μοντέλου υψής στις περιοχές που δεν ορίστηκαν σωστά όρια μάσκας	73
Εικόνα 5-9: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω πυκνότητας του νέφους σημείων	74
Εικόνα 5-10: Νέφος ομόλογων σημείων (point cloud)	74
Εικόνα 5-11: Ομόλογα σημεία – μπλε κουκίδες	74
Εικόνα 5-12: Νέφος σημείων (dense cloud)	74
Εικόνα 5-13: Ορθοεικόνα. Απόδοση υψής σε περιοχή με αραιό νέφος λόγω βλάστησης	75
Εικόνα 5-14: Αραιό νέφος σημείων σε περιοχές με βλάστηση	75
Εικόνα 5-15: Αραιό νέφος σημείων σε περιοχές με βλάστηση	75
Εικόνα 5-16: Εικόνα από προβληματική περιοχή	75
Εικόνα 5-17: Εικόνα από προβληματική περιοχή με πιο πυκνό βήμα	75
Εικόνα 5-18: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω κενών στο νέφος. Συμπλήρωση στο Geomagic	76

Εικόνα 5-19: Κενά στο νέφος λόγω παρουσίας βλάστησης ή κακής γεωμετρίας εικόνων	76
Εικόνα 5-20: Κενά στο νέφος λόγω παρουσίας βλάστησης ή κακής γεωμετρίας εικόνων	77
Εικόνα 5-21: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω εικόνων διαφορετικής φωτεινότητας.....	77
Εικόνα 5-22: Εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της.....	77
Εικόνα 5-23: Εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της.....	77
Εικόνα 5-24: Θόρυβος στο νέφος	78
Εικόνα 5-25: Θόρυβος στο νέφος	78
Εικόνα 5-26: Ορθοεικόνα: διπλό είδωλο.....	78
Εικόνα 5-27: Νέφος περιοχής με διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.....	78
Εικόνα 5-28: Νέφος περιοχής με διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.....	78
Εικόνα 5-29: Mesh της περιοχής με το διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.....	79
Εικόνα 5-30: Το διπλό είδωλο εμφανίζεται στο mesh μόλις αποδίδεται το χρώμα.	79
Εικόνα 5-31: «Λεκέδες» σε περιοχή με βλάστηση.....	79
Εικόνα 5-32: «Λεκέδες» σε περιοχή με τείχη.	79
Εικόνα 5-33: Νέφος σε περιοχή με βλάστηση που εμφανίζει «λεκέδες»	80
Εικόνα 5-34: Νέφος σε περιοχή με τείχη που εμφανίζει «λεκέδες».....	80
Εικόνα 5-35: Κενά στο νέφος του πύργου, λόγω έλλειψης εικόνων.....	82
Εικόνα 5-36: Κενά στο νέφος του κάστρου, νότια πλευρά, λόγω έλλειψης εικόνων.....	82
Εικόνα 5-37: περιοχή λήψης εικόνων	82
Εικόνα 5-38 : Ανατολική πλευρά.....	82
Εικόνα 5-39: Ανατολική πλευρά τειχών	82
Εικόνα 5-40: ΝΑ πλευρά τειχών	82
Εικόνα 5-41: Τα ΒΔ τείχη	83
Εικόνα 5-42: ΒΔ τμήμα του Τείχους - Align photos – ρύθμιση HIGH	83
Εικόνα 5-43: ΒΔ τμήμα του Τείχους - Align photos – ρύθμιση- LOW	83
Εικόνα 5-44: Δυτική πλευρά των τειχών. Η παρουσία βλάστησης προκαλεί αποκρύψεις.	84
Εικόνα 5-45: Μετρήσεις στην περίμετρο του κάστρου	84
Εικόνα 0-1: σχετικός και απόλυτος προσανατολισμός στερεοζεύγους με τη μέθοδο των δεσμών (Πέτσα 2000)	93
Εικόνα 0-2: Επιπολική γεωμετρία δυο εικόνων (Σ. Φάκα 2010).....	95
Εικόνα 0-3: Δέσμη επιπέδων Π. (Σ. Φάκα 2010)	95
Εικόνα 0-4: Μεμονωμένες εικόνες που δεν ευθυγραμμίζονται με τις υπόλοιπες αποκλείονται.....	98
Εικόνα 0-5: Align photos – HIGH	98
Εικόνα 0-6: Align photos - MEDIUM	98

Εικόνα 0-7: Align photos – LOW	98
Εικόνα 0-8: Align photos χωρίς μάσκες. Περισσότερος θόρυβος, αλλά πιο σωστή απόδοση του βάρους.....	99
Εικόνα 0-9: Align photos ΜΕ μάσκες. Λιγότερος θόρυβος, αλλά τα τείχη έχουν χάσει τον όγκο τους	99
Εικόνα 0-10: Εσφαλμένη προεπισκόπηση φωτοσταθερών.....	99
Εικόνα 0-11 : Φωτοσταθερά για chunk “Χ3alret1_GCPs”	101
Εικόνα 0-12: στιγμιότυπο από την επισήμανση φωτοσταθερών στο Photoscan.	101
Εικόνα 0-13: πίνακες σφαλμάτων Photoscan	101
Εικόνα 0-14: Αρχική ακρίβεια χαρακτηριστικών σημείων - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,043\mu$	102
Εικόνα 0-15: Βελτίωση της ακρίβειας με διαδοχική αφαίρεση σημείων με μεγάλο γεωδαιτικό σφάλμα - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,028\mu$	102
Εικόνα 0-16: Πλασματική βελτίωση της ακρίβειας με τη προσθήκη 14 μετρημένων φωτοσταθερών που όμως δεν ανήκουν στο νέφος (για αυτό δεν δίνεται το γεωδαιτικό σφάλμα) - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,012m$	102
Εικόνα 0-17: Δεδομένα για <i>Point based</i> chunk alignment.....	104
Εικόνα 0-18: Δεδομένα για <i>Camera based</i> chunk alignment	104
Εικόνα 0-19: Στιγμιότυπο Geomagic Αναγνώριση θορύβου νέφους	108
Εικόνα 0-20: Στιγμιότυπο Geomagic Αποτελέσματα θορύβου στο mesh	108
Εικόνα 0-21: Στιγμιότυπο Photoscan. Εμφανής η διαφορά στη φωτεινότητα των εικόνων στο νέφος. Θα επηρεάσει την επεξεργασία του mesh.....	108
Εικόνα 0-22: Στιγμιότυπο Geomagic Διπλές επιφάνειες λόγω κακή σύνδεσης των επιμέρους νεφών.....	108
Εικόνα 0-23: Στιγμιότυπο Geomagic. Merge επιμέρους mesh χωρίς επαρκή επικάλυψη	109
Εικόνα 0-24: Παραμορφωμένο αντικείμενο μετά από χρήση mesh διαφορετικού προσανατολισμού	109
Εικόνα 0-25: Mesh statistics	109
Εικόνα0-26: Mesh statistics μετά το Fix topology	109
Εικόνα 0-27: Συστάσεις για μείωση αριθμού τριγώνων του mesh λόγω ανεπάρκειας μνήμης.	109
Εικόνα0-28: Crease angle , πηγή: accad.osu.edu	109

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1-1 Σύγκριση των χαρακτηριστικών φωτογραμμετρίας και σαρωτών laser. (Barsanti 2014).....	20
Πίνακας 1-2: Προγράμματα/έργα που περιλαμβάνουν εργασίες αποτύπωσης οχρωματικών μνημείων.....	25
Πίνακας 1-3: Αναθέσεις έργων αποτύπωσης μνημείων οχρωματικής αρχιτεκτονικής δημοσιευμένες στη ΔΙΑΥΓΕΙΑ.9F.....	26
Πίνακας 1-4: Συνοπτική περιγραφή επιλεγμένων ερευνητικών εφαρμογών γεωμετρικής τεκμηρίωσης και εφαρμογών της. Τα παρακάτω παραδείγματα παρατίθεται σε χρονολογική σειρά.	29
Πίνακας 2-1: Ιστορικά γεγονότα της περιοχής, σχετικά με το Πεντεσκούφι15F.....	38
Πίνακας 2-2: Κυριαρχία κάστρου Κορίνθου (Καρποδίνη-Δημητριάδη 1990).....	38
Πίνακας 3-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής.....	47
Πίνακας 3-2: Εστιακή απόσταση και μέγιστη ανάλυση διαθέσιμων φακών.....	47
Πίνακας 3-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά total station Topcon 3003.....	47
Πίνακας 3-4: Κλίμακα και μέγεθος εδαφοψηφίδας της τελικής ορθοεικόνας και των εναλλακτικών εικόνων.	53
Πίνακας 3-5: Συντελεστής κλίμακας εικόνας βάσει διαθέσιμων φακών και απόστασης λήψης. Επιλογές με συντελεστή κλίμακας $K > 780$ δηλαδή πάνω από την οριακή κλίμακα της εικόνας, απορρίπτονται). Συστήνονται συνδυασμοί που δίνουν κλίμακα μέχρι 1:500.	54
Πίνακας 3-6: Προσδιορισμός GSD για διαφορετικές κλίμακες εικόνας.....	55
Πίνακας 4-1: Συντεταγμένες κορυφών δευτερεύουσας όδευσης.....	60
Πίνακας 4-2: Συντεταγμένες κορυφών κύριας όδευσης.....	60
Πίνακας 4-3: Πληροφορίες φωτοληψίας. Αναφορά Photoscan.....	64
Πίνακας 4-4: Σφάλματα φωτοσταθερών.....	65
Πίνακας 4-5: Σφάλματα σημείων ελέγχου.....	65
Πίνακας 5-1: τυπικό a posteriori σφάλμα ($\sigma_{a \text{ posteriori}}$) σημείων ελέγχου οριζοντιογραφίας ..	68
Πίνακας 5-2: Συντεταγμένες σημείων τομών.....	71
Πίνακας 5-3: Τυπικό a posteriori σφάλμα ($\sigma_{a \text{ posteriori}}$) σημείων ελέγχου τομής NN'.....	72
Πίνακας 5-4: Τυπικό a posteriori σφάλμα ($\sigma_{a \text{ posteriori}}$) σημείων ελέγχου όψης BB'.....	72
Πίνακας 0-1: έλεγχος υπολογισμού σφαλμάτων για chunk "Χ3alret1_GCPs".....	101
Πίνακας 0-2: ανάλυση μοντέλου με Fix Topologyκαι με Mesh Doctor.....	107



Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση του κάστρου Πεντεσκούφι Κορινθίας για την παραγωγή 3D μοντέλου και ορθοεικόνων (1:50) για κατακόρυφες οψοτομές που θα χρησιμοποιηθούν από την τοπική εφορεία αρχαιοτήτων για αναστηλωτικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Το κάστρο Πεντεσκούφι είναι ένα μικρό κάστρο επιφάνειας περίπου 600m² με πολυγωνική κάτοψη, το οποίο περιλαμβάνει τετράγωνο πύργο και σωζόμενα τείχη μήκους 102m. Εντοπίζεται 3km ΝΑ της Αρχαίας Κορίνθου [X: 39.9331,979 Y: 4.193.349,407]. Κατασκευάστηκε από τους Φράγκους για τις ανάγκες πολιορκίας του Ακροκορίνθου (1205-1210) στην προσπάθεια σύστασης του Πριγκιπάτου της Αχαΐας μετά την πτώση της Κωνσταντινούπολης από την Δ' Σταυροφορία. Σήμερα, η ευρύτερη περιοχή του κάστρου ανήκει στην Α' ζώνη αρχαιολογικού χώρου του Ακροκορίνθου και σε Ζώνη Ειδικής Προστασίας του δικτύου Natura2000.

Για την εκπόνηση των παραγώγων της γεωμετρικής τεκμηρίωσης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν κυρίως αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές μέθοδοι λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που προκύπτουν από το αντικείμενο μελέτης, τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τα παραδοτέα. Προηγήθηκε εκτενής επισκόπηση της βιβλιογραφίας για τις μεθόδους τεκμηρίωσης μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής, σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Η δύσκολη προσέγγιση και το απότομο ανάγλυφο περιμετρικά του κάστρου καθιστούν αδύνατη τη χρήση σαρωτή laser, αλλά και άλλου εξοπλισμού με μεγάλο βάρος και όγκο. Εναέρια μέσα για την λήψη των εικόνων δεν ήταν διαθέσιμα, για αυτό η φωτοληψία περιορίστηκε στις θέσεις που η φυσική πρόσβαση ήταν δυνατή και ασφαλής.

Ιδρύθηκε πολυγωνικό δίκτυο 7 στάσεων μέσα στο κάστρο και 5 στάσεων εξωτερικά. Καθώς η εξωτερική όδευση δεν κάλυπτε το σύνολο της περιμέτρου του κάστρου εξαρτήθηκε από την εσωτερική. Το σύστημα αναφοράς είναι τοπικό και η επίλυση του δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (MET), σταθεροποιώντας δύο κορυφές του δικτύου.

Για τη φωτοληψία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί φακοί και ελήφθησαν πάνω από 1000 εικόνες σε απόσταση 2-300m από το αντικείμενο. Από αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του τελικού μοντέλου 818 εικόνες και ισάριθμες μάσκες που σχεδιάστηκαν για τις ανάγκες της εργασίας. Η παραγωγή του 3D μοντέλου και των ορθοεικόνων έγινε στο πρόγραμμα Agisoft Photoscan και η σύνθεση και βελτίωση του mesh στο Geomagic.

Τα τελικά παράγωγα αξιολογούνται ως προς την ποιότητα, ακρίβεια, πληρότητα και πιστότητά τους, λαμβανομένων υπόψη και των αναπόφευκτων παραλείψεων και περιορισμών και εν γένει προβληματικών χαρακτηριστικών που αντικειμένου αποτύπωσης.

Abstract

Castle Penteskufi: geometric documentation

Fotini Vrettou

Diploma Thesis, February 2016

Castle Penteskufi was built during the siege of Corinth (1204-1210 A.D.) by Guillaume de Champlitte and Geoffroi de Villehardouin. It is a small castle of polygonal footprint covering an area of about 600m². In its current state, it consists of a square shaped tower and 102m long defensive walls. Along with the neighbouring castle of Corinth and the surrounding area, it is protected as a national archaeological site and as a Site of Community Interest (SCI) of the Natura2000 network. The goal of the survey was to produce an accurate 3D rendered model and a set of orthophotos (1:50) to be used by the local archaeological services for restoration and educational purposes, as can be perceived by their webpage still under construction <ecastles.culture.gr>. Its small size and interesting topography were also useful to examine the potential of close range automated photogrammetry. The strategy adopted, mainly due to the difficulty of carrying heavy equipment on top of the steep Penteskufi hill, was to use almost exclusively image based techniques. Some 1000 pictures were taken using combinations of two cameras and three different lenses from various distances (2m-300m). A commercial software applying SfM and Dense Image Matching was used to produce the 3D model and the orthophotos. Issues arising from the steepness of the terrain were dealt with by using the correct combination of camera model and taking distance, however the presence of vegetation could not be appropriately treated by the current SfM algorithms. Despite the freedom provided by the SfM techniques, the CIPA 3X3 rules still apply, especially regarding ground control points quantity and distribution, in order to ensure the accuracy of the final products. In this paper the data acquisition and processing are described. Moreover the results are evaluated for their effectiveness and accuracy.

Εισαγωγή

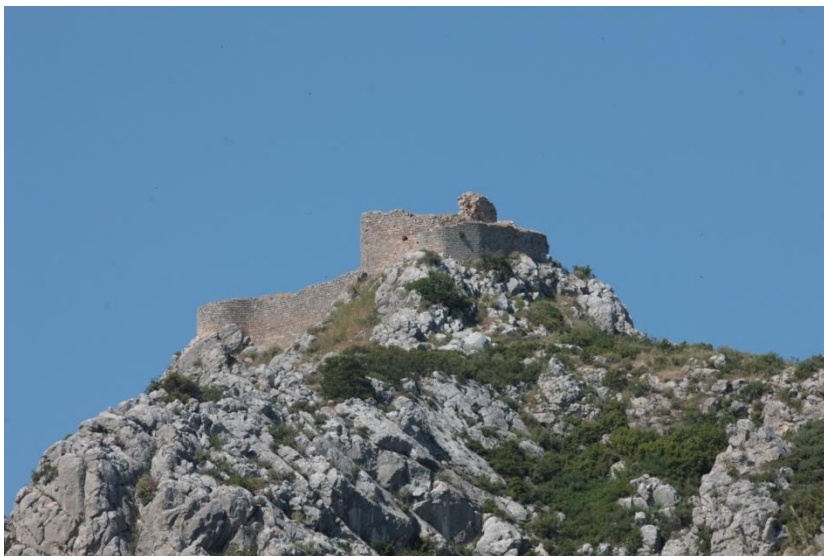
Αντικείμενο και διάρθρωση εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παραγωγή 2D και 3D προϊόντων για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του κάστρου Πεντεσκούφι, Δήμου Κορινθίων. Τα τελικά προϊόντα είναι :

- τρισδιάστατο μοντέλο του κάστρου και των τειχών,
- κάτοψη με οριζόντια τομή στον πύργο (1:50) ,
- κατακόρυφη οψοτομή NN' (1:50) σε νοτιοανατολική διεύθυνση
- κατακόρυφη οψοτομή ΔΔ' (1:50) σε δυτική διεύθυνση
- όψη (1:50) σε βόρεια διεύθυνση

Όλο το διαθέσιμο υλικό (μετρήσεις, εικόνες) και τα προϊόντα της εργασίας θα τεθεί στη διάθεση της Εφορείας Αρχαιοτήτων Κορινθίας.

Αναφορικά με τη διάρθρωση του κειμένου, αρχικά επιχειρείται αποσαφήνιση εννοιών σχετικών με εργασίες γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων και παρατίθενται παραδείγματα από εφαρμογές σε μνημεία οχυρωματικής αρχιτεκτονικής (Κεφάλαιο 251.5). Αναλύονται οι εναλλακτικές διαθέσιμες μεθοδολογίες, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προς αποτύπωση μνημείου (Κεφάλαιο 3) και οι ανάγκες των χρηστών, ώστε να αιτιολογηθεί η επιλογή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια αναλύεται η οργάνωση και η υλοποίηση των εργασιών συλλογής των δεδομένων, και η επεξεργασία των στοιχείων, σημειώνοντας τυχόν παραλείψεις και σφάλματα, καθώς και τις αιτίες που τα προκάλεσαν (Κεφάλαια 4 και 5). Τέλος αξιολογείται η ποιότητα των παραχθέντων προϊόντων και σημειώνονται οι ενέργειες που έπρεπε να ακολουθηθούν για τη βελτίωσή τους (Κεφάλαιο 6).



Το κάστρο Πεντεσκούφι, η ΒΑ πλευρά

Ολοκληρωμένη τεκμηρίωση και διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Η σημασία της αναγνώρισης, προστασίας, ερμηνείας και διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς καλύπτεται εκτενώς από τη διεθνή, ενωσιακή και εθνική νομοθεσία. Το Σύνταγμα του 1975/1996/2001 καθιέρωσε για πρώτη φορά αυξημένη συνταγματική προστασία των αρχαιοτήτων και του πολιτιστικού περιβάλλοντος, καθιστώντας υποχρέωση του Κράτους την προστασία και διαφύλαξή τους κατά το άρθρο 18 παρ.1, και κυρίως κατά το άρθρο 24, παρ.1: «*Η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του Κράτους και δικαίωμα του καθενός. Για τη διαφύλαξή του το Κράτος έχει υποχρέωση να παίρνει ιδιαίτερα προληπτικά ή κατασταλτικά μέτρα στο πλαίσιο της αρχής της αειφορίας.*».¹

Οι διεθνείς συμβάσεις που έχει κυρώσει η Ελλάδα -που έχουν μεγαλύτερη τυπική ισχύ από το νόμο- συνθέτουν μαζί με το Σύνταγμα το θεσμικό πλαίσιο προστασίας και κανονιστικής εφαρμογής της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ενδεικτικά αναφέρονται η **Ευρωπαϊκή Σύμβαση του Λονδίνου** για την προστασία της αρχαιολογικής κληρονομιάς (1969) που κυρώθηκε με τον νόμο 1127/1981, η **Διεθνής Σύμβαση των Παρισίων για την Παγκόσμια Φυσική και Πολιτιστική Κληρονομιά (1972)** που κυρώθηκε με τον νόμο υπ' αριθμ. 1126/1981 (ΦΕΚ Α'32) και ειδικότερα το άρθρο 4: «*Έκαστον των Κρατών Μελών της παρούσης Συμβάσεως αναγνωρίζει ότι η υποχρέωσις όπως πραγματοποιηθή ο προσδιορισμός, η προστασία, η συντήρησις, η αξιοποιήσις και η μεταβίβασις εις τας μελλούσας γενεάς της πολιτιστικής και φυσικής κληρονομιάς της αναφερομένης εις τα άρθρα 1 και 2 και κειμένης επί του εδάφους του ανήκει εις αυτό κατά κύριονλόγον. Θα κάνη ότι είναι δυνατόν προς τον σκοπόν αυτόν, μέχρι του μεγίστου ορίου των διαθεσίμων πόρων του και, ενδεχομένως, μέσω οιασδήποτε διεθνούς συνδρομής και συνεργασίας, τας οποίας δύναται να επιτύχη, συγκεκριμένως επί οικονομικού, καλλιτεχνικού, επιστημονικού και τεχνικού πεδίου.*» και το άρθρο 24: «*Λίαν σημαντική διεθνής συνδρομή δεν δύναται να παρασχεθή ειμή κατόπιν λεπτομερούς επιστημονικής, οικονομικής και τεχνικής μελέτης. Η μελέτη αυτή πρέπει να επικαλήται τας πλέον προηγμένας τεχνικάς μεθόδους προστασίας, συντηρήσεως, αξιοποιήσεως και επανορθώσεως της πολιτιστικής και φυσικής κληρονομιάς και να ανταποκρίνεται προς τους αντικειμενικούς σκοπούς της παρούσης Συμβάσεως. Η μελέτη πρέπει ωσαύτως να αναζητή τα μέσα ορθολογικής χρησιμοποίησεως των διαθεσίμων πόρων εντός του ενδιαφερομένου Κράτους.*», η **Ευρωπαϊκή Σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογικής κληρονομιάς** που υπογράφηκε στη **Βαλέττα** (1992) και κυρώθηκε με τον νόμο υπ' αριθμ. 3378/2005 (ΦΕΚ Α'203), η **Ευρωπαϊκή Σύμβαση για την προστασία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς της Ευρώπης** που υπογράφηκε στη **Γρανάδα** το 1985 και κυρώθηκε με τον νόμο υπ' αριθμ. 2039/1992 (ΦΕΚ Α'61) και ειδικότερα άρθρο 2: «*Για τον ακριβή προσδιορισμό των μνημείων αρχιτεκτονικών συνόλων και τόπων, που πρόκειται να προστατευθούν, κάθε συμβαλλόμενος υποχρεώνεται να προχωρήσει στην καταγραφή τους και σε περίπτωση απειλής να ετοιμάσει το συντομότερο την κατάλληλη γι' αυτό τεκμηρίωση*».

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει αναφορά στον «Χάρτη της Βενετίας για την Αποκατάσταση και Συντήρηση Μνημείων και Μνημειακών Συνόλων». Η Χάρτα της Βενετίας (1964) αποτελεί μια συμφωνημένη δήλωση αρχών για τη συντήρηση και την αποκατάσταση μνημείων και μνημειακών συνόλων, που ποτέ δεν ενσωματώθηκε τυπικά στο ευρωπαϊκό και εθνικό δίκαιο, αν και πιθανότατα χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία των

¹Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολιτιστική κληρονομία εμπεριέχεται στην ευρύτερη έννοια του περιβάλλοντος καθώς από το Σύνταγμα δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ της έννοιας του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος.

παραπάνω συμβάσεων. Ωστόσο αποτελεί κείμενο με επιρροή που συμβάλει στην ερμηνεία και εξειδίκευση άλλων δεσμευτικών νομικών κειμένων, δηλαδή των νόμων 1126/1981 και 2039/2005. Στο άρθρο 16 της Χάρτας γίνεται σαφή αναφορά στην ανάγκη λεπτομερούς και αναλυτικής τεκμηρίωσης κατά τη διάρκεια κάθε εργασίας παρέμβασης σε μνημεία: «Οι εργασίες συντηρήσεως, αποκαταστάσεως και ανασκαφής θα πρέπει να βασίζονται σε εξακριβωμένη τεκμηρίωση, δηλαδή σε αναλυτικές και κριτικές εκθέσεις, εικονογραφημένες με σχέδια και φωτογραφίες. Όλες οι φάσεις των εργασιών για την απάλειψη νεώτερων στοιχείων, την στερέωση, την ανασύνθεση και την ένταξη νέων (στοιχείων), καθώς και όλα τα τεχνικά και μορφολογικά στοιχεία που θα εξακριβώνονται κατά την διάρκεια των εργασιών, θα πρέπει να καταγράφονται λεπτομερειακά. Αυτή η τεκμηρίωση θα κατατίθεται στα αρχεία ενός δημοσίου ιδρύματος και θα είναι προσιτή στους ερευνητές. Προτείνεται η δημοσίευσή τους.»²

Η **συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση** της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία (Georgoroulos, 2004) που υλοποιείται με τη συνεργασία πολλών ειδικοτήτων και αδρομερώς περιγραφόμενη περιλαμβάνει τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το υπό εξέταση πολιτιστικό αγαθό (το μνημείο, το αντικείμενο και το χώρο) συμπεριλαμβανομένων των φυσικών χαρακτηριστικών, της ιστορίας, της κατάστασης διατήρησης, και τη διαδικασία της οργάνωσης, ερμηνείας και διαχείρισης (μεταφορά, αποθήκευση, αναπαραγωγή) των πληροφοριών αυτών (LeBlancF., ErrichR., 2005). Η καταγραφή των ειδικών γεωμετρικών και φυσικών χαρακτηριστικών του πολιτιστικού αγαθού είναι προφανώς **μια από τις πολλές διαδικασίες που απαιτούνται για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωση** και διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς, η οποία πρέπει να αξιοποιεί τη βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία, με τη συνεργασία διαφορετικών επιστημονικών εμβαθύνσεων.

Όπως επισημαίνεται χαρακτηριστικά στη Διακήρυξη της Ταϊπέι³ για την «Ολοκληρωμένη Τεκμηρίωση και Διαχείριση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς» (2015) άρθρο 4 παρ. 2: «*Besides their specialties, the experts of cultural heritage and digital technologies should cooperate in the documentation and management of cultural heritage, including their record, processing and application.*», παρ. 3: «*The gaps and obstacles of documentation and management caused by the existing differences in culture, knowledge and technology should be removed and common ideas and extensively applicable methods should be re-established.*» και παρ. 4: «*In addition to the preservation of the cultural heritage, the experts' research should be able to serve the general public on an open platform where the documentation of cultural heritage could be exchanged at a low-cost and prompt way. This is a goal for every expert in the future to achieve.*».⁴

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί η **διαφορά της γεωμετρικής τεκμηρίωσης από τις λοιπές διαδικασίες τεκμηρίωσης**. Η γεωμετρική τεκμηρίωση είναι περισσότερο τεχνική και όχι τόσο τέχνη και ως τέτοια προσπαθεί να άρει την υποκειμενικότητα και την αισθητική παρέμβαση κατά την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης ενός αντικειμένου. Στον πυρήνα της έχει τη μετρητική πληροφορία, διέπεται δε και ελέγχεται από μαθηματικές σχέσεις. Κατ' επέκταση το μετρητικό σχέδιο, τα διαγράμματα ή τα άλλα προϊόντα της, εξυπηρετούν διαφορετικό σκοπό από αυτόν του ελεύθερου σχεδίου ή του σκαριφήματος που δίνουν μεγαλύτερη προσοχή στη γενική τυπολογία και αναλογία των μετρήσεων και

² Venice Charter 1964 Ανάκτηση από <http://www.charta-von-venedig.de/>

³Στα πλαίσια του 25^{ου} Διεθνούς Συμποσίου της CIPA, Ανάκτηση από www.cipa2015.org

⁴Στο πνεύμα της παραπάνω διακήρυξης έγινε προσπάθεια συνεργασίας με τους/τις μηχανικούς και επιστήμονες που θα χρησιμοποιήσουν τα προϊόντα της γεωμετρικής τεκμηρίωσης και πληροφόρησής τους για τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και τις δυνατότητες εφαρμογών της.

λιγότερο στη μετρητική ακρίβεια. Η συχνή αυτή παρανόηση από ειδικότητες που χρησιμοποιούν τα προϊόντα της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, οφείλεται σε σύγχυση των εννοιών της «κλίμακας» και της «ακρίβειας». Γι' αυτό είναι αναγκαίο να προηγηθούν διεξοδικές συζητήσεις, «μεταφράζοντας» κατά το δυνατό τις τεχνικές έννοιες, τα εργαλεία, τις δεδομένα και τα προϊόντα στη «διάλεκτο» των χρηστών. Η αμοιβαία προσέγγιση, συνεργασία, κατανόηση των αναγκών και ο σεβασμός για τη χρησιμότητα κάθε ειδικότητας καθίσταται περισσότερο αναγκαία σήμερα, καθώς η τεχνολογική πρόοδος των μέσων αποτύπωσης που καθιστούν τις μεθόδους τεκμηρίωσης μνημείων πιο αντικειμενικές, πιο γρήγορες και πιο οικονομικές, εντείνουν τον κίνδυνο της σύγχυσης μεταξύ της φαινομενικής απλότητάς τους και της –κακώς εννοούμενης- απλοϊκότητας (Πατιάς 2009).

Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων απαιτεί υψηλό βαθμό ακρίβειας, που συνήθως εκφράζεται από σχεδιαστικά προϊόντα μεγάλης κλίμακας (1:10, 1:50) και υψηλής ανάλυσης. Τα τελευταία απαιτούν αξιόπιστες άμεσες μετρήσεις (*εξωτερικός έλεγχος*) προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμα ακόμα και όταν το μνημείο έχει φθαρεί ή καταστραφεί. Η υψηλή ακρίβεια στην αποτύπωση είναι, μεταξύ άλλων, απαραίτητη για τον έλεγχο κατάστασης του μνημείου και τον σχεδιασμό εργασιών αποκατάστασης και ψηφιακής αναπαράστασης του μνημείου. Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων δεν περιορίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, αλλά παρέχει συμπληρωματικές ποιοτικές πληροφορίες συνήθως δια του χρώματος και υφής. Ακόμη, δεν χρειάζεται να περιοριστεί σε 2D εικονιστικά προϊόντα ή σχέδια. Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση μνημείων παρέχει υλικό τόσο για επιστημονικές εφαρμογές, όπως μελέτες αποκατάστασης και αρχιτεκτονικές μελέτες, αλλά και για εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλό βαθμό ακρίβειας, π.χ. για την παραγωγή διαδρομών εικονικής πραγματικότητας σε μνημεία ή αρχαιολογικούς τόπους.

Οι δυνατότητες και οι εφαρμογές που μπορούν να αναπτυχθούν, ειδικά μετά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης, είναι συναρπαστικές. Ο κανόνας όμως του *garbage in – garbage out* είναι αμείλικτος. Απαραίτητο βήμα λοιπόν, η ορθή, αξιόπιστη και πλήρης ψηφιοποίηση του μνημείου.

1 Γεωμετρική τεκμηρίωση

1.1 Ορισμός

Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων περιλαμβάνει τη συλλογή, επεξεργασία, αποθήκευση και παρουσίαση στοιχείων στον τρισδιάστατο χώρο, που τεκμηριώνουν τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος ενός υλικού πολιτιστικού αγαθού για μια δεδομένη χρονική στιγμή (Γεωργόπουλος Α. 2013). Αποτελεί την αντικειμενική και ελεγχόμενη καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης ενός αντικείμενου σε δεδομένο χρόνο, χωρίς την ερμηνεία της μελετούμενης μορφής του. Η γεωμετρική τεκμηρίωση και ανάλυση παρέχει υψηλό επίπεδο ακρίβειας και αντικειμενικότητας, δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των μετρήσεων, των σχεδίων και λοιπών προϊόντων ανά πάσα στιγμή και σε οποιαδήποτε θέση, τη σύγκριση της τυπολογίας μεταξύ παρόμοιων δομών (ανάπτυξη αυτοματοποιημένης τεχνικής), τη συνεχή επαφή με το αντικείμενο για την μελέτη και την ερμηνεία του, καλύτερη εποπτεία για την διατήρηση και προστασία του μνημείου. Παρέχει υλικό για επιστημονικές εφαρμογές, πχ για τη χαρτογράφηση στατικών ή δομικών προβλημάτων (Arias, 2005), (Lai 2013), (Stefani 2014), (Barrile 2015) για μελέτες αποκατάστασης και αρχιτεκτονικές μελέτες (Daskalopoulos 2003), ειδικές αρχαιολογικές εφαρμογές (Howland 2014), (Levy 2014), (Brutto 2015), αλλά και για εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλό βαθμό ακρίβειας και έχουν επικοινωνιακή ή εκπαιδευτική στόχευση (Koutsoudis A. 2007).

1.2 Μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης

Παρακάτω επιχειρείται να διερευνηθούν παράμετροι των διαθέσιμων (επίγειων) τεχνικών και τεχνολογιών γεωμετρικής τεκμηρίωσης προκειμένου να τεκμηριωθεί η επιλογή της κατάλληλης για τη συγκεκριμένη εργασία.

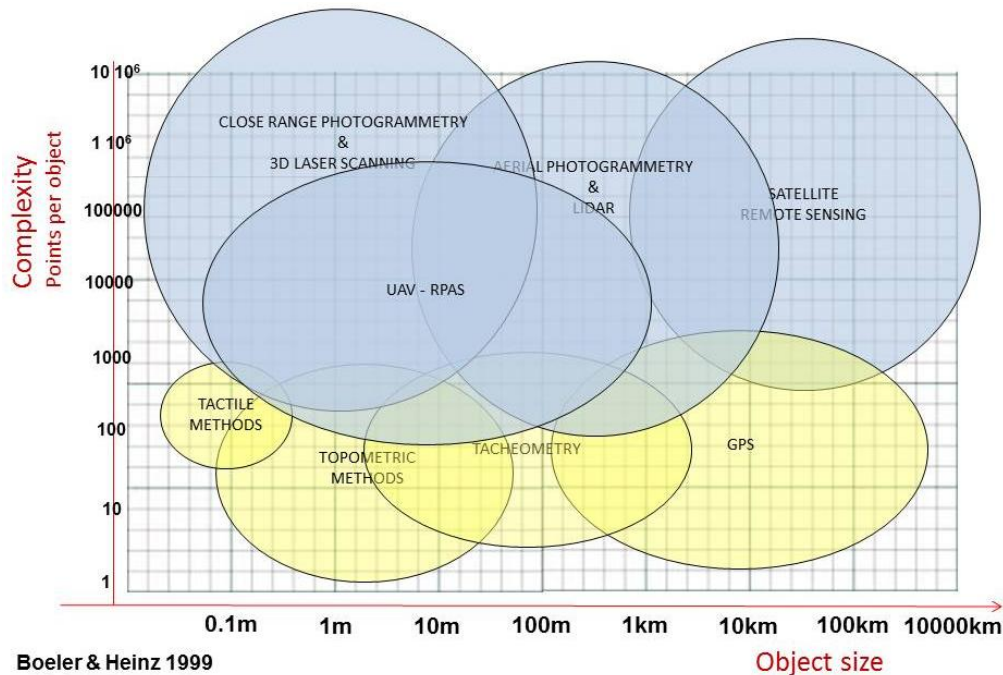
Ενεργητικές και παθητικές μέθοδοι

Για την παραγωγή 3D μοντέλων επιφάνειας και άλλων προϊόντων γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων, κτηρίων και αρχαιολογικών χώρων χρησιμοποιούνται ενεργητικές, παθητικές μέθοδοι και συνδυασμοί τους. Και οι δύο μέθοδοι πληρούν πολλά από τα χαρακτηριστικά της ιδανικής τεχνολογίας για την γεωμετρική αποτύπωση πολιτιστικών μνημείων και αντικείμενων.

Στις **ενεργητικές**, η εκτίμηση της θέσης κάθε σημείου του αντικείμενου στο χώρο γίνεται άμεσα με μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών χρησιμοποιώντας ακτινοβολία συγκεκριμένης συχνότητας. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανακλάται πάνω στο αντικείμενο και επιστέφοντας πίσω, υπολογίζεται η απόσταση κάθε σημείου του αντικείμενου βάσει του χρόνου διαδρομής της ακτίνας του φωτός. Στην περίπτωση των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών ο παλμός είναι στιγμιαίος και μοναδιαίος, ενώ στους σαρωτές λείζερ (time-of-flight terrestrial laser scanner-TOF, συστήματα LIDAR ή SAR) οι παλμοί είναι διαδοχικοί και πολλαπλοί. Αντίθετα στις **παθητικές μέθοδοι**, τα τεχνικά μέσα (κάμερες ή φωτογραφικές μηχανές) καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία ενός αντικείμενου σε μια ειδική επιφάνεια. Η τρίτη διάσταση δεν καταγράφεται, άλλωστε οι εικόνες είναι δισδιάστατες και η πρόκληση σε αυτή την περίπτωση είναι η ανακατασκευή

της τρίτης διάστασης χρησιμοποιώντας στοιχεία της εικόνας όπως ο φωτισμός, η σκιά και η απόσταση των σημείων και αντικειμένων σε αυτή.

Οι τεχνικές που εφαρμόζουν τις παραπάνω μεθόδους καλύπτουν διακριτούς χώρους ανάλογα με το μέγεθος, την πολυπλοκότητα του προς αποτύπωση αντικειμένου και την κλίμακα των παραγόμενων προϊόντων, ενώ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τις εν γένει δυνατότητές τους ως προς το πλήθος των σημείων και την έκταση της επιφάνειας που μπορούν να καταγράψουν [Εικόνα 1-1].



Εικόνα 1-1: Οι περιοχές εφαρμογής των εναλλακτικών τεχνικών ανάλογα την πολυπλοκότητα και την έκταση αποτύπωσης (Boehler W., Heinz G 1999).

Προφανώς υπάρχουν κατά τόπους αλληλοεπικαλύψεις και επαφίεται στην κρίση του ειδικού να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος και τεχνική για το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι περιοχές που καλύπτονται από περισσότερες από μια τεχνικές, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες καθώς τα μειονεκτήματα της μιας μεθόδου μπορούν να καλυφθούν από τα πλεονεκτήματα της άλλης [Πίνακας 1-1]: ο σαρωτής laser (laser scanner) δίνει λιγότερο θόρυβο σε χρωματιστά τμήματα, αλλά και οι δύο μέθοδοι απαιτούν ειδικό χειρισμό για την αποτύπωση εσοχών και κενών, οι φωτογραφικές μηχανές είναι ελαφρύτερες, και οι σαρωτές laser απαιτούν συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ αυτών και του αντικειμένου, που μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί (F. Giraud, 2013). Για μια ακριβή και πλήρη απόδοση του αντικειμένου συνήθως συστήνεται ο συνδυασμός των δύο τεχνικών και υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία με παραδείγματα από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων (Lambers, 2007) (D'Urso, M., Russo, G., 2008), (S. Al-kheder, 2009), (K. Bartos, 2011).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι, αλλά το κύριο βάρος της ανάλυσης δίνεται στις παθητικές μεθόδους που χρησιμοποιεί η φωτογραμμετρία.

Πίνακας 1-1 Σύγκριση των χαρακτηριστικών φωτογραμμετρίας και σαρωτών laser. (Barsanti 2014).

Χαρακτηριστικά	Φωτογραμμετρία	Σάρωση laser
Κόστος επένδυσης	Χαμηλό	Υψηλό
Ευελιξία στη μεταφορά	Εξαιρετική	Επαρκής
Χρόνος λήψης μετρήσεων/δεδομένων	Αρκετά χαμηλός	Υψηλός
Χρόνος ανάκτησης μοντέλου	Αρκετά χαμηλός, απαιτεί εμπειρία	Συχνά υψηλός
3D πληροφορία	Προς ανάκτηση	Άμεση λήψη
Απόσταση λήψης	Ανεξάρτητη	Εξαρτημένη
Διαστάσεις αντικειμένου	Ανεξάρτητη	Εξαρτημένη
Υλικό αντικείμενου	Σχεδόν ανεξάρτητη	Εξαρτημένη
Φωτισμός	Εξαρτημένη	Σχεδόν/Πλήρως ανεξάρτητη
Πολυπλοκότητα γεωμετρίας	Αρκετά εξαρτημένη	Ανεξάρτητη
Υφή επιφάνειας αντικειμένου	Εξαρτημένη	Ανεξάρτητη
Κλίμακα	Εικόνας	Έμμεση (1:1)
Όγκος δεδομένων	Εξαρτάται από το πλήθος, την ανάλυση των εικόνων και τις μετρήσεις	Πυκνό νέφος σημείων
Απόδοση λεπτομερειών μοντέλου	Καλή/Εξαιρετική	Γενικά εξαιρετική
Απόδοση υφής	Περιλαμβάνεται στα δεδομένα	Απούσα ή προβληματική ανάλυση
Απόδοση ακμών	Εξαιρετική	Αρκετά προβληματική
Λογισμικά ανοιχτού κώδικα	Κάποια	Λίγα

Ανάκτηση της τρίτης διάστασης με παθητικές μεθόδους

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πρόκληση για τις παθητικές μεθόδους είναι η ανάκτηση της τρίτης διάστασης που χάνεται στο δισδιάστατο μέσο, την εικόνα. Για τον προσδιορισμό της τρίτης διάστασης με τη χρήση εικόνων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι,⁵ οι δύο κύριες που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση αντικειμένων για μετρητικούς σκοπούς στα φωτογραμμετρικά συστήματα, είναι η «Στερεοσκοπική» μέθοδος και η «Δομή από Κίνηση».

Η **Στερεοσκοπική μέθοδος** προσομοιώνει τη ανθρώπινη όραση με την χρήση στερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων. Το βάθος γίνεται αντιληπτό από τη διαφορετική θέση ομόλογων σημείων σε δύο αλληλεπικαλυπτόμενες εικόνες που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο μετά από λήψη με -συνήθως- βαθμονομημένη φωτογραφική μηχανή. Απαιτεί αυστηρότητα στην θέση και την κλίση των μηχανών κατά την λήψη των εικόνων, στο ποσοστό αλληλοεπικάλυψης των εικόνων, αλλά παρέχει υψηλές ακρίβειες. Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων παράγονται από την επισήμανση ομόλογων σημείων σε ένα ζεύγος εικόνων και την μέτρηση της κατά x απόστασής τους. Συνδυασμός με γεωδαιτικές μετρήσεις αποδίδει σωστή θέση, προσανατολισμό και κλίμακα στο τρισδιάστατο μοντέλο που έχει παραχθεί. Η γεωδαιτική θέση της κάμερας κατά την λήψη, καθώς και οι

⁵Τέτοιες αποτελούν η Στερεοσκοπική Όραση (StereoVision), η Δομή από Κίνηση (Structure from Motion), το Σχήμα από Σκίαση (Shape from Shading), Βάθος από Εστίαση (Range from Focus), Βάθος από Μη Εστίαση (Depth from Defocus), Σχήμα από Υφή (Shape from Texture) (Σ. Φάκας 2010).

γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου είναι απαραίτητα στοιχεία για την τοποθέτηση των 3D μοντέλων στον χώρο.

Η μέθοδος της «**Δομή από Κίνηση**» (Structure-from-Motion-SfM) είναι μια γενίκευση και αυτοματοποίηση της Στερεοσκοπικής Όρασης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Όρασης Υπολογιστών και επεξεργασίας εικόνας για την δημιουργία και ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Στην SfM οι εικόνες λαμβάνονται από μια ελεύθερη κινούμενη κάμερα συνδυάζοντας πολλές εικόνες ταυτόχρονα και όχι αυστηρά ζεύγη εικόνων. Γνώση της γεωδαιτικής θέσης της κάμερας κατά την λήψη δεν είναι απαραίτητη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα πλήθος μη προσανατολισμένων εικόνων από τυχαία σημεία λήψης για να παραχθεί ένα πυκνό νέφος σημείων που εκφράζει την τρισδιάστατη γεωμετρία ενός αντικείμενου. Με τα ομόλογα σημεία στις αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές των εικόνων υπολογίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού της κάμερας (Robertson, 2009). Πολλά λογισμικά χρησιμοποιούν τη μέθοδο των δεσμών για να βελτιώσουν την ακρίβεια της θέσης της κάμερας και να μειώσουν το σφάλμα επαναπροβολής [reprojection error] (Engels, 2006). Μέσα από μια σειρά διαδικασιών που θα περιγραφούν παρακάτω, παράγεται ένα μοντέλο αυθαίρετης θέσης, κλίμακας και προσανατολισμού, όπως το αποτέλεσμα του σχετικού προσανατολισμού κατά την στερεοσκοπική μέθοδο. Τα στοιχεία επαναυπολογίζονται επαναληπτικά με τη χρήση μη γραμμικής ελαχιστοτετραγωνικής τεχνικής (Βέργος 2015). Χρησιμοποιώντας έναν ελάχιστο αριθμό σημείων ελέγχου με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες και μέσω ενός μετασχηματισμού ομοιότητας δίνεται κλίμακα και προσανατολισμός στο μοντέλο. Η ανάγκη πλεονασματικών παρατηρήσεων (σημείων με γνωστές συντεταγμένες) με καλή κατανομή στο χώρο διατηρείται και σε αυτή τη μέθοδο, χωρίς ωστόσο τον ίδιο βαθμό αυστηρότητας όπως στην στερεοσκοπική.

Αν και οι δύο μέθοδοι εξάγουν πληροφορίες για τη γεωμετρική θέση ενός αντικείμενου στο χώρο με τη χρήση εικόνων κάθε μια απαιτεί μια ελαφρώς διαφορετική θεωρητική εμβάθυνση. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται σε πρόσφατη διδακτορική εργασία για το θέμα: «[σ]την συμβατική Φωτογραμμετρία το ζητούμενο είναι σαφές: η μετρική (ευκλείδεια) ανακατασκευή του αντικείμενου. Δεν συμβαίνει όμως κατ' ανάγκην το ίδιο στην Όραση Υπολογιστών, όπου ο Faugeras (1995) έχει διατυπώσει την σημαντική έννοια της «επαλληλίας» (stratification) ή «επάλληλης ανακατασκευής» stratified reconstruction). Η έννοια αυτή της «επάλληλης ανακατασκευής» αναφέρεται σε μια διαδοχή ιεραρχημένων ανακατασκευών του 3D χώρου: αρχικά προβολική (αποκατάσταση διπλού λόγου), κατόπιν αφινική (αποκατάσταση σχετικών αποστάσεων ανά διεύθυνση, παραλληλίας), εν συνεχεία μετρική (αποκατάσταση γωνιών, σχετικών αποστάσεων) και τελικά ευκλείδεια (αποκατάσταση κλίμακας)» (Γραμματικόπουλος 2007). Να σημειωθεί ότι σε δύο πρόσφατες διδακτορικές διατριβές επισημαίνεται η ανάγκη για συνεργασία και οι κοινί ερευνητικοί στόχοι των δύο επιστημονικών κλάδων, της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών (Γραμματικόπουλος 2007), (Καλησπεράκης 2010), ενώ αξίζει να επισημανθεί ότι η Επιτροπή III της ISPRS μετονομάστηκε από το 2008 σε «Φωτογραμμετρική Όραση Υπολογιστών και Ανάλυση Εικόνας». Η γνώση της μαθηματικής βάσης των δύο μεθόδων είναι αναγκαία προκειμένου να ερμηνευτούν τα πιθανά λάθη που θα γίνουν κατά τη διαδικασία και τα προβλήματα που θα παρουσιάσουν τα προϊόντα [βλ. Κεφ. και Κεφ.].

1.3 Τεχνικές Προδιαγραφές

Υπάρχουν τρία διεθνώς αναγνωρισμένα πρωτόκολλα για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, το Core Data Index to Historic Buildings and Monuments of the Architectural Heritage, το International Core Data Standard for Archaeological Sites and Monuments, και το ObjectID,⁶ ενώ το πρόσφατο πρόγραμμα EU-CHIC (European Cultural Heritage Identity Card – Ταυτότητα της Ευρωπαϊκής Πολιτιστικής Κληρονομιάς)⁷ επιχειρεί μια συστηματική οργάνωση των δεδομένων που αφορούν την πολιτιστική κληρονομιά συνδυάζοντας κάποια από τα παραπάνω. Διαπιστώνεται ότι τα πρωτόκολλα καλύπτουν το γενικό πλαίσιο των αναγκαίων πληροφοριών για την τεκμηρίωση των μνημείων ή αντικειμένων, **χωρίς ενιαίες προδιαγραφές για τη γεωμετρική τεκμηρίωση** κατασκευών και ειδικά των μνημείων. Επομένως οι προδιαγραφές πρέπει να προσδιορίζονται κάθε φορά ανάλογα με το σκοπό των προϊόντων, τους χρήστες, το κόστος και το μέγεθος της κατασκευής.

Η κλίμακα και η ανάλυση αποτελούν βασικές παραμέτρους των προδιαγραφών που τίθενται. Καθώς είναι σημαντικές στον προσδιορισμό των εργασιών και των τελικών προϊόντων και συχνό αντικείμενο παρανόησης από τους τελικούς χρήστες κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μια σύντομη αποσαφήνιση των εννοιών αυτών.

Κλίμακα

Ως **κλίμακα διαγράμματος** ορίζεται ο λόγος της τιμής μιας απόστασης στο διάγραμμα προς την αντίστοιχη πραγματική τιμή της στο πεδίο. Πριν την εισαγωγή των προγραμμάτων ψηφιακής σχεδίασης η κλίμακα ενός διαγράμματος ταυτίζονταν με την κλίμακα σχεδίασης. Πλέον ένα διάγραμμα μπορεί να εκτυπωθεί σε περισσότερες από μια κλίμακες.

Μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης ορίζεται ως η μεγαλύτερη κλίμακα που καλύπτεται από την ακρίβεια που έχει επιτευχθεί σε κάθε αποτύπωση. Δεδομένου ότι η διακριτική ακρίβεια του ματιού είναι 0,25mm η μέγιστη απόσταση που θα διακρίνεται σε ένα σχέδιο 1:50 θα είναι $0,25 \times 50 = 12,5\text{mm}$ και σε ένα σχέδιο 1:20 θα είναι 5mm αντίστοιχα. Δηλαδή αντικείμενα μικρότερα από 12.5 ή 5mm δεν θα είναι διακριτά στις κλίμακες αυτές.

Οι κλίμακες στη γεωμετρική τεκμηρίωση κατασκευών πολιτιστικής κληρονομιάς είναι συνήθως οι 1:20, 1:50, 1:100. Μεγαλύτερες κλίμακες 1:10 ή 1:5 χρησιμοποιούνται για κατασκευές που περιέχουν μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας, ενώ μικρότερες πχ 1:200 ή 1:500 για την αποτύπωση του περιβάλλοντα χώρου της κατασκευής. Επομένως, μετρήσεις των συντεταγμένων σημείου με αβεβαιότητα προσδιορισμού $\sigma_x, \sigma_y = \pm 5\text{mm}$ είναι κατάλληλες και επαρκείς για κλίμακες σχεδίων 1:20, 1:50, 1:100 κλπ, όμως η μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης που καλύπτεται από την $\sigma_x, \sigma_y = \pm 5\text{mm}$ αβεβαιότητα είναι η 1:20.

Κλίμακα εικόνας και ορθοεικόνας: Λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου της κεντρικής προβολής μια εικόνα δεν έχει σταθερή κλίμακα, όπως έχει ένας χάρτης (ορθή προβολή 3D χώρου). Η κλίμακά της αλλάζει από περιοχή σε περιοχή, τα χαρακτηριστικά της περιοχής ή του αντικειμένου εμφανίζονται παραμορφωμένα και επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρητικούς σκοπούς. Η διορθωμένη γεωμετρικά εικόνα πάνω στην οποία μπορούν να γίνουν μετρήσεις σχετικών και απόλυτων στοιχείων (πχ αποστάσεις, έκταση) είναι η ορθοεικόνα. Επομένως η ορθοεικόνα έχει (σταθερή) κλίμακα και μετρητικές

⁶Object ID, The Importance of Documentation. Ανάκτηση 11.12.2015 από <http://goo.gl/LCMsYN>

⁷CulturalHeritageIdentityCards, EU-CHIC Ανάκτηση 11.12.2015 από <http://eu-chic.eu/i>

ιδιότητες αντίστοιχες της διανυσματικής ορθής προβολής, ενώ η εικόνα/φωτογραφία από την οποία προήλθε δεν έχει.

Ανάλυση

Ο όρος ανάλυση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ποιότητας της εικόνας και του 3D μοντέλου με διαφορετική έκφραση για κάθε αντικείμενο.

Ο όρος ανάλυση μπορεί να αναφέρεται σε διάφορες παραμέτρους της εικόνας και του οπτικού μέσου: στο μέγεθος και των αριθμό των pixel (pixel resolution), στο εύρος του φάσματος που καλύπτεται, στην ικανότητα διάκρισης μεταξύ υλικών με γειτονικές φασματικές υπογραφές κλπ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή είναι δεδομένο το μέγεθος και ο αριθμός των pixel της εικόνας, και λαμβάνονται εικόνες μόνο στο ορατό φάσμα, η έννοια της ανάλυσης για τις ανάγκες της εργασίας θα ταυτιστεί με την χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας, δηλαδή το μέγεθος του pixel σε πραγματικές διαστάσεις. Η χωρική ανάλυση μιας εικόνας εκφράζεται από το μέγεθος GSD (Ground sampling distance) δηλαδή την απόσταση μεταξύ των κέντρων των pixel, μετρημένη στο έδαφος. Μικρό GSD σημαίνει μικρή εδαφοψηφίδα, δηλαδή έκταση που καλύπτει ένα pixel στον φυσικό χώρο (εφόσον προϋποτίθεται σταθερό μέγεθος pixel) και επομένως καλύτερη ανάλυση της εικόνας.

Και στην περίπτωση ενός 3D μοντέλου η έννοια της ανάλυσης καθορίζεται από τα δομικά του στοιχεία. Ένα 3D μοντέλο αποτελεί μια μαθηματική αναπαράσταση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου μέσω ενός ειδικού λογισμικού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι 3D μοντέλων ο πιο κοινός και αυτός που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το πολυγωνικό μοντέλο ή mesh που αποτελείται από επιφάνειες, ακμές και κορυφές (faces, edges, vertices)⁸. Η ποιότητα του μοντέλου καθορίζεται από τον αριθμό, τη γεωμετρία και την κατανομή των faces. Ένα υψηλής ανάλυσης 3D μοντέλο χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα πολυγώνων εκεί που είναι αναγκαίο π.χ. σε περιοχές με έντονη αλλαγή ανάγλυφου, σε καμπυλωτές περιοχές, και χαμηλή ανάλυση σε περιοχές με λιγότερες λεπτομέρειες.

1.4 Ποιοτικός έλεγχος

Κριτήρια του ποιοτικού ελέγχου είναι η **αξιοπιστία**, η **πιστότητα** και η **πληρότητα** (Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ. 2010). Η αξιοπιστία της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μιας κατασκευής καθορίζεται από την αξιοπιστία του προσδιορισμού της θέσης των σημείων που την ορίζουν. Η ακρίβεια και η ορθότητα συνθέτουν την έννοια της **αξιοπιστίας** (reliability): η **ορθότητα** (accuracy) των μετρήσεων δηλώνει το πόσο κοντά προσεγγίζουν την αληθή τιμή του μεγέθους (εξωτερική ακρίβεια) και η **ακρίβεια** τη διασπορά των μετρήσεων, δηλαδή το πόσο απέχουν μεταξύ τους (εσωτερική ακρίβεια). Ιδανικά οι μετρήσεις ενός μεγέθους στο ίδιο σύστημα θα έπρεπε να δίνουν πάντα το ίδιο αποτέλεσμα, το οποίο θα ήταν η αληθή τιμή του μεγέθους. Στην πραγματικότητα κάθε μέτρηση περιέχει μικρά ή μεγάλα σφάλματα. Η ακρίβεια εξαρτάται από την ευαισθησία του οργάνου και την ικανότητα του παρατηρητή και μπορεί να εκτιμηθεί μετά από πολλαπλές μετρήσεις στο ίδιο σύστημα «όργανο-παρατηρητής-συνθήκες» και άμεσες μετρήσεις ελέγχου στο πεδίο. Η ορθότητα εξασφαλίζεται με τον εργαστηριακό έλεγχο των οργάνων ως προς την ορθή τους

⁸Faces: πολυγωνικές επιφάνειες που συνθέτουν το μοντέλο (συνήθως 4πλευρα-quads ή 3πλευρα-tris στο gaming περιβάλλον), Edges: κάθε σημείο της κοινής ακμής δυο faces, Vertices: το σημείο στο οποίο συναντιούνται τρία ή περισσότερα edges. Ανάκτηση 11.12.2015 από <http://goo.gl/EMYtFS>

λειτουργία. Η ακρίβεια της γεωμετρικής τεκμηρίωσης δίνεται από την αβεβαιότητα (uncertainty) ή το σφάλμα (error) προσδιορισμού των καρτεσιανών συντεταγμένων (X,Y,Z) κάθε σημείου της αποτύπωσης. Με τον όρο αβεβαιότητα της μετρημένης ή της υπολογισμένης τιμής ενός μεγέθους ορίζεται η ποσότητα που εκφράζει το διάστημα γύρω από τη μέση ή την καλύτερη τιμή ενός μεγέθους, μέσα στο οποίο μπορεί να βρίσκεται. Επομένως, για να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι ορθές και ακριβείς και επομένως πρέπει να συνοδεύονται από το μέγεθος της αβεβαιότητας που τις χαρακτηρίζει κάθε φορά.

Η έννοια της **πιστότητας** εκφράζει το κατά πόσο το προϊόν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα του αντικειμένου στον συγκεκριμένο χρόνο που αποτυπώθηκε, και η **πληρότητα** το ποσοστό κάλυψης του αντικειμένου από την αποτύπωση.

Ποιοτικός έλεγχος 2D προϊόντων

Η ορθότητα της γεωμετρικής απεικόνισης συνδέεται άμεσα με τη σωστή τοποθέτηση και συσχέτιση των γραμμικών σχεδίων, και των ορθοεικόνων, την ορθή απεικόνιση της κλίμακας, και άρα των διαστάσεων του αντικειμένου καθώς και την ορθότητα και πληρότητα τεχνολογικών και προβαλλόμενων στοιχείων που υπάρχουν σε αυτά.

Για τον έλεγχο της ακρίβειας εξετάζονται (ι) ο βαθμός σύμπτωσης των φωτοσταθερών που μετρήθηκαν στο πεδίο σε σχέση με τη θέση τους στην εικόνα. Τυχόν σφάλματα πρέπει να είναι μικρότερα από 1.25 cm όπως καθορίζεται από την κλίμακα εκτύπωσης [1:50] και (ii) η εντός των επιτρεπτών ορίων σύμπτωση των σημείων της κατακόρυφης τομής με την αντίστοιχη οριζόντια τομή. Επιπλέον για το σκοπό αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί δειγματοληπτικός έλεγχος αποστάσεων, γωνιών και υψομετρικών διαφορών στο πεδίο με τοπομετρικές μετρήσεις (μετροταινία) και γεωδαιτικές μετρήσεις με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό. Τα στοιχεία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα στο ψηφιακό σχέδιο και ελέγχεται αν οι αποκλίσεις τους (δηλαδή αβεβαιότητες ή σφάλματα) είναι κάτω από το όριο που επιβάλλει η ακρίβεια της μέγιστης κλίμακας εκτύπωσης.

Ποιοτικός έλεγχος 3D προϊόντων

Ο έλεγχος της πληρότητας και πιστότητας του 3D μοντέλου πραγματοποιείται με οπτική παρατήρηση, και ειδικά ο έλεγχος της πιστότητας περιέχει μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας. Η έρευνα για την ανθρώπινη οπτική αντίληψη και πώς αποτιμάται η εμπειρία της θέασης 3D εξελίσσεται ραγδαία, αλλά δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Η ορθότητα της αποτύπωσης της πραγματικής κατάστασης του αντικειμένου επίσης δεν προσδιορίζεται σαφώς. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η έννοια της ανάλυσης δεν μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα, αλλά εξαρτάται από τον αριθμό, τη γεωμετρία, την κατανομή των faces, την πολυπλοκότητα του αντικείμενου κλπ. Στην περίπτωση ειδικά των 3D μοντέλων που παράγονται με φωτογραμμετρικές τεχνικές, η ποιότητα του 3D μοντέλου επηρεάζεται από την ποιότητα του 3D mesh και των εικόνων⁹ από τις οποίες αντλείται το χρώμα και η υφή του μοντέλου. Επομένως σε ό,τι αφορά το 3D mesh, ο μετρητικός έλεγχος μπορεί να γίνει μόνο ως προς την επάρκεια, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, τον δείκτη GSD, ενώ ως προς τις εικόνες ως προς την καταλληλότητα της κλίμακας λήψης.

⁹που προφανώς επηρεάζονται επίσης από την ανάλυση της φωτογραφικής μηχανής, την απόσταση λήψης, τη φύση και τη μορφολογία της επιφάνειας του αντικειμένου κ.ά.

1.5 Εφαρμογές γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής

1.5.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων είναι μόνο ένα μικρό τμήμα των εργασιών που απαιτούνται για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωση με στόχο την διαχείριση και ανάδειξή τους. Για την κατανόηση του πλαισίου στο οποίο εντάσσονται οι εργασίες του Τοπογράφου Μηχανικού στο συγκεκριμένο πεδίο, κρίνεται χρήσιμο να γίνει αναφορά σε ολοκληρωμένα προγράμματα διαχείρισης μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής στην Ελλάδα [Πίνακας 1-2 Πίνακας 1-2], και να παρατεθούν παραδείγματα ανάθεσης σχετικών έργων αποτύπωσης των τελευταίων ετών [Πίνακας 1-3]. Διαπιστώνεται ότι τα 2D και 3D προϊόντα που παράγονται από τοπογραφικές εργασίες, χρησιμοποιούνται για την τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου στα πλαίσια των αρχαιολογικών και αρχιτεκτονικών μελετών, ως υποστηρικτικό υλικό σε στατικές, γεωτεχνικές, χωροταξικές, πολεοδομικές μελέτες και ως υπόβαθρο για επεμβάσεις αποκατάστασης και ανάδειξης του μνημείου. Τα τελευταία χρόνια αρχίζουν να αξιοποιούνται περισσότερο στο πλαίσιο προβολής της πολιτιστικής κληρονομιάς, της βελτίωσης του τουριστικού προϊόντος και της αύξησης της προσβασιμότητας σε σχετικές με το μνημείο πληροφορίες μέσω εφαρμογών του διαδικτύου. Στις τοπογραφικές εργασίες που απαιτούνται, ειδικά στο πλαίσιο των εργασιών αποκατάστασης ενός μνημείου, παρατηρείται ποικιλία τεχνικών αποτύπωσης, ανάλογα με τη σκοπιμότητα των εργασιών, ενώ κυριαρχεί η χρήση του επίγειου σαρωτή laser. Ακόμη και στις περιπτώσεις που ζητείται κάποιο 3D προϊόν, προβάλλεται η μέθοδος της σάρωσης με laser και της επίθεσης των εικόνων στο mesh που παράγεται.

Πίνακας 1-2: Προγράμματα/έργα που περιλαμβάνουν εργασίες αποτύπωσης οχυρωματικών μνημείων.

I. «**Κάστρων περίπλους**»: ονομάστηκε πρόγραμμα για την αναβάθμιση των υποδομών και ανάδειξη 36 κάστρων στην ηπειρωτική και νησιωτική Ελλάδα, στα οποία δεν περιλαμβάνεται ο Ακροκόρινθος και το Πεντεσκούφι. Το στρατηγικού χαρακτήρα πρόγραμμα υλοποιήθηκε το 1998 από το Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων του Υπ. Πολιτισμού και περιλάμβανε την ιστορική, αρχαιολογική, φωτογραφική και σχεδιαστική τεκμηρίωση των μνημείων, αρχιτεκτονικές προτάσεις διαμορφώσεων και φυσικά τοπογραφικές μελέτες ως υποστηρικτικό εργαλείο για την τις επεμβάσεις ανάδειξης, στερέωσης, ανασκαφικής έρευνας, γεωτεχνικών ερευνών, χωροταξικών και πολεοδομικών μελετών.

II. «**Οχυρωματική αρχιτεκτονική στην Πελοπόννησο (5ος-15ος αιώνας)**»: αποτελεί διεθνές συνέδριο (2011) που διοργάνωσε η 25^η ΕΒΑ σε συνεργασία με το Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών με στόχο την εμβάθυνση της έρευνας στην οχυρωματική και την προβολή του μνημειακών εκφράσεων της στα κάστρα της Πελοποννήσου.

Συνέχεια των εργασιών του συνεδρίου αποτελεί και το έργο «**Ψηφιακή προσβασιμότητα και ανάδειξη των κάστρων Αργολίδας, Αρκαδίας και Κορινθίας**». Το έργο περιλαμβάνει τη διαδικτυακή πύλη ecastles.culture.gr με πληροφορίες για την οχυρωματική, την τυπολογία και την εξέλιξή της, τα οχυρωματικά μνημεία των νομών, ενώ συνοδεύεται από εφαρμογή για φορητές συσκευές που προβάλλει αποδοτικά τις τρισδιάστατες εικονικές αναπαραστάσεις των κάστρων, λαμβάνοντας υπ' όψη τη θέση και τον προσανατολισμό της φορητής συσκευής του χρήστη. Ανάμεσα στις πληροφορίες που αναρτήθηκαν περιλαμβάνονται σχέδια και 3D αναπαραστάσεις των μνημείων. Στην περίπτωση του κάστρου Πεντεσκούφι τέτοιες πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συμπλήρωση του υλικού της σχετικής ιστοσελίδας.

III. «**Ψηφιοποίηση, Τεκμηρίωση και Ανάδειξη του Πολιτιστικού Αποθέματος των αρχαιολογικών χώρων Κάστρου Πάτρας, Φρουρίου Ρίου, Κάστρου Χλεμουτσίου**». Το έργο που υλοποιείται από την 6^η ΕΒΑ περιλαμβάνει την τρισδιάστατη αποτύπωση τμημάτων του Κάστρου της Πάτρας, του Φρουρίου του Ρίου και του Κάστρου του Χλεμουτσίου και 100 αντικειμένων του Μουσείου του Χλεμουτσίου. Η τεκμηρίωση θα συνοδευτεί

από την εφαρμογή μεθοδολογιών και τεχνολογιών ανοικτών διασυνδεδεμένων δεδομένων (open linked data), την ένταξη τους στην Ευρορεαπα, την ανάπτυξη εφαρμογής τεκμηρίωσης και σύνδεσης του υλικού με οντολογίες και με γεωχωρική πληροφορία, την ανάπτυξη μιας σύγχρονης, διαδραστικής και πολυκαναλικής πύλης, την ανάπτυξη συστήματος οπτικοακουστικής ξενάγησης, βασιζόμενης στην θέση του χρήστη και την ανάπτυξη σειράς εκπαιδευτικών διαδραστικών εφαρμογών, οι οποίες θα προσφέρονται σε πολλαπλές εκδόσεις για εκτέλεση μέσω διαδικτύου και μέσω έξυπνων συσκευών με λειτουργικά τουλάχιστον iOS και Android. [<https://goo.gl/gAEYRu>]

IV. «**Network creation and promotion of castles – NetCastle**». Το συγκεκριμένο έργο του Προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας «Ελλάδα-Αλβανία 2007-2013 υλοποιείται στο πλαίσιο της ανάδειξης των διασυνοριακών πολιτιστικών αγαθών, την αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό των τουριστικών υπηρεσιών. Στοχεύει «στη δημιουργία ενός δικτύου για την προβολή και την ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς των ιστορικών κάστρων των στοχευμένων περιοχών». Για τις ανάγκες του θα υλοποιηθούν μεταξύ άλλων, ψηφιοποίηση πληροφοριών για τα ιστορικά μνημεία της περιοχής και ανάπτυξη εφαρμογής εικονικών περιηγήσεων με τη χρήση 3D αναπαράστασεων των ιστορικών μνημείων. Το εταιρικό σχήμα του έργου απαρτίζεται από την Π.Ε. Κέρκυρας, την Π.Ε. Θεσπρωτίας, το Institution of Prefect of Gjirokastra region και το UET Center στην Αλβανία. [<http://goo.gl/kjhRt2>]

IV. **Τείχη Ακρόπολης**. Αν και δεν ανήκει στα μνημεία της περιόδου που εξετάζει η παρούσα εργασία (700-1830 μ.Χ.), εν τούτοις η εξαιρετική σημασία του μνημείου για το οποίο αναπτύσσονται και εφαρμόζονται οι βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές, το καθιστούν απαραίτητο στοιχείο αναφοράς. Για την γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων της Ακρόπολης, πραγματοποιήθηκε φωτογραμμετρική αποτύπωση σε συνδυασμό με τρισδιάστατη σάρωση, λόγω του μεγέθους του μνημείου, της δυσκολίας πρόσβασης, του απότομου αναγλύφου αλλά και της συνεχούς παρουσίας επισκεπτών. Όπως αναφέρεται στα ενημερωτικά δελτία της Υπηρεσίας Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης (ΥΣΜΑ):

«Η ίδρυση του τριγωνομετρικού δικτύου έγινε με δορυφορική γεωδαισία και η επίλυση στο ΕΓΣΑ'87 με ΜΕΤ. Η εσωτερική αλλά και η τελική μέση οριζοντιογραφική ακρίβεια των συντεταγμένων των κορυφών του τριγωνομετρικού δικτύου ήταν της τάξης των 3mm και η τελική ακρίβεια των κορυφών του χωροσταθμικού δικτύου είναι καλύτερη των 4mm, σε ένα συνολικό μήκος χωροσταθμικής όδευσης που ξεπερνά τα 8Km.

Η λήψη των εικόνων έγινε από ειδικά διαμορφωμένο μετεωρολογικό μπαλόνι από απόσταση 5 m. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 1557 εικόνες για την κάτοψη και 2250 εικόνες για τις όψεις του Τείχους με μέση κλίμακα 1:110, 65% οριζόντια επικάλυψη και 35% κατακόρυφη. Ο προσανατολισμός των κατακόρυφων εικόνων έγινε στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, όπου αρχικά δημιουργήθηκαν τέσσερα blocks τα οποία συνενώθηκαν σε ένα. Στο στάδιο της συλλογής του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου οι γραμμές αλλαγής κλίσης σχεδιάστηκαν από χειριστή, ενώ η συλλογή των υψομετρικών σημείων έγινε αυτόματα. Στη συνέχεια ελέγχθηκαν στερεοσκοπικά και διορθώθηκαν τυχόν σφάλματα. Ο φωτοτριγωνισμός επιλύθηκε με μέση τετραγωνική απόκλιση 1.7 cm στα φωτοσταθερά.

Η σάρωση των Τειχών έγινε με ανάλυση τουλάχιστον 1 cm εξωτερικά και τουλάχιστον 5cm στο εσωτερικό και τον Βράχο. Εσωτερικά του Τείχους πραγματοποιήθηκαν συνολικά 30 σαρώσεις. Εξωτερικά πραγματοποιήθηκαν 71 σαρώσεις. Οι γειτονικές σαρώσεις συνδέθηκαν μεταξύ τους με τρεις τουλάχιστον κοινούς στόχους, με κατάλληλη γεωμετρία, ενώ παράλληλα γινόταν γεωαναφορά των σαρώσεων, καθώς οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό τους ταυτόχρονα μετρήθηκαν με γεωδαιτικό σταθμό και εντάχθηκαν στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.»

Επιπλέον για τη διαχείριση των πληροφοριών χωρικών και σημασιολογικών αναβαθμίστηκε η βάση δεδομένων των αναστηλωτικών επεμβάσεων και αναπτύχθηκε σύστημα GIS [<http://www.ysma.gr/γεωμετρική-τεκμηρίωση>]

Πίνακας 1-3: Αναθέσεις έργων αποτύπωσης μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής δημοσιευμένες στη ΔΙΑΥΓΕΙΑ.¹⁰

1. **Ενετικά τείχη Ηρακλείου:** χρησιμοποιήθηκαν επίγειες τοπογραφικές αποτυπώσεις δομημένων εκτάσεων σε κλίμακα 1:500. <https://diavgeia.gov.gr/doc/ΒΛ10Ω00-24Σ>
2. **Τείχος φρουρίου Χίου:** πραγματοποιήθηκαν τοπογραφικές εργασίες αποτύπωσης με laser scanner για τις ανάγκες στερέωσης και αποκατάστασης του εσωτερικού επιθαλάσσιου τείχους. <https://diavgeia.gov.gr/79PTΓ-91H>

¹⁰Στον ιστότοπο <https://diavgeia.gov.gr/αναρτώνται> οι περισσότερες διοικητικές αποφάσεις προκειμένου να καταστούν εκτελεστές. Λειτουργεί από το 2010. Ανάκτηση των στοιχείων του πίνακα 2 στις 10.1.2016.

3. **Κάστρο Κορώνης:** μετά την κατάρρευση αναλημματικού τοίχου πλησίον του κάστρου και για την εφαρμογή προσωρινών μέτρων προστασίας του μνημείου, πραγματοποιήθηκαν εργασίες ψηφιακής σάρωσης με λέιζερ σκάνερ της παράκτιας ζώνης και των πρηνών του κάστρου. <https://diavgeia.gov.gr/view/BΛΛ5Γ-Z9I>
4. **Κάστρο Μύρινας Λήμνου:** πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη σάρωση και απεικόνιση τμήματος του ΒΑ τείχους του κάστρου το οποίο είχε καταρρεύσει, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση και ανάκτηση του τμήματος του τείχους <https://diavgeia.gov.gr/decision/view/ΩΚΟΞ4653Π4-76I>
5. **Κάστρο Λεονταρίου:** για τις ανάγκες αποκατάστασης και ανάδειξης του κάστρου εφαρμόστηκε τρισδιάστατη σάρωση. <https://diavgeia.gov.gr/decision/view/457ΦΓ-ΡΔΘ>
6. **Κάστρο Χρυσής, Πέλλα:** προβλέπεται η εκπόνηση οριζοντιογραφίας της περιοχής του κάστρου σε 1:500 και 1:200, αποτύπωση των κτισμάτων και κτηριακών υπολειμμάτων σε 1:50 και 1:20 με φωτογραμμετρικές μεθόδους και παραγωγή ορθοεικόνων, για την άμεση και λεπτομερή σχεδιαστική απόδοση των όψεών τους. <https://diavgeia.gov.gr/decision/view/6ΚΧΝ4653Π4-ΠΝΤ>

1.5.2 Ερευνητικές εφαρμογές

Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τις δυνατότητες των σύγχρονων τοπογραφικών μεθόδων, την ιστορική πορεία εξέλιξής τους και τις διαφορετικές εφαρμογές τους -ιδιαίτερα των προϊόντων ψηφιοποίησης. Οι πληροφορίες αυτές έχουν ληφθεί υπόψη για την επιλογή της μεθόδου αποτύπωσης του κάστρου Πεντεσκούφι.

Παρατηρείται ότι χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι στην αξιολόγηση, τεκμηρίωση και διαχείριση των πολιτιστικών αγαθών (Boehler W., Heinz G 1999), (Kraus 2003), (Baltsavias 2005), (Letellier 2007), (Ioannides 2010). Απλές τοπομετρικές, με απευθείας μετρήσεις πάνω στο αντικείμενο σε τοπικό σύστημα αναφοράς (με αλφαδολάστιχο, κλισίμετρο, μετροταινία κ.ά.) χρησιμοποιούνται ακόμα στους κλάδους της αρχαιολογίας και αρχιτεκτονικής και μπορεί να είναι επαρκείς και συνιστώμενες όταν το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του αντικειμένου είναι περιορισμένα και η ακρίβεια και ο έλεγχος της δεν είναι πρωταρχικής σημασίας. Λόγω όμως του μη επεμβατικού χαρακτήρα τους, της ταχύτητας, και της ακριβειάς τους, οι τεχνολογικές μέθοδοι αποτύπωσης συστήνονται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τεκμηρίωσης σύνθετων μνημείων. Η φωτογραμμετρία είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιεί η τοπογραφία για την αποτύπωση της γεωμετρίας σύνθετων κατασκευών. Παρέχει ελεγχόμενες και ακριβείς μετρητικές πληροφορίες, εφαρμόζεται σε ένα εύρος κλιμάκων (Remondino 2011) και ιστορικά έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη ειδικά για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Η τεχνολογία επέδρασε καταλυτικά στις εφαρμογές των κλάδων της τοπογραφίας, χαρτογραφίας, φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης. Οι μέθοδοι αποτύπωσης μνημείων ακολούθησαν αυτές τις αλλαγές, διευκολύνοντας την παραγωγή παραδοσιακών προϊόντων της φωτογραμμετρίας όπως οι ορθοεικόνες, δημιουργώντας νέες εφαρμογές όπως τα τρισδιάστατα μοντέλα υψής και παρέχοντας προϊόντα που τεχνικά, οικονομικά ή λόγω κλίμακας και πολυπλοκότητας των αντικειμένων δεν ήταν δυνατό να παραχθούν στο παρελθόν. Έτσι διανυσματικά και εικονιστικά φωτογραμμετρικά προϊόντα τεκμηρίωσης μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής αξιοποιούνται σε έρευνες ιστορικού, αρχαιολογικού ή αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος (Drap 2005), (Ringle K. 2005), (Merlo A., Rodriguez-Navarro P. 2012), (Barreau 2014), (Pirinu 2015), (Rodriguez –Navarro P. 2015), σε εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης. (Ioannidis C., Potsiou C. 1999), (P. Gianniou, 2007), (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015), (Rodriguez –Navarro P. 2015), (T. K. Kersten 2015), στατικές μελέτες (AriasP. 2007), μελέτες στρωματογραφίας (Campanella C. 2005), (Drap 2005) αλλά και καινοτόμες εφαρμογές όπως τη 3D εκτύπωση μοντέλου κάστρου (Garfella Rybio J. 2015), τη 3D ψηφιακή φωτορεαλιστική αναπαράσταση κατεστραμμένων ή μη μνημείων (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003), (Lerma J. 2004), (El-

Hakim 2007), (Chiabrande F. 2009), (E.Alby, 2012), (Rodríguez-Navarro P., Verdiani G. 2013), (Barreau 2014), (Kersten T. L., 2015) τόσο για σκοπούς ιστορικής ερμηνείας, όσο και για την αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό του τουριστικού προϊόντος της περιοχής.

Σε ό,τι αφορά ειδικά τη γεωμετρική τεκμηρίωση οχυρωματικών έργων, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συνδυασμοί τεχνικών, τεχνικών μέσων, και λογισμικών και δεν διακρίνεται μια ενιαία και κατάλληλη για όλα προσέγγιση. Η **μεθοδολογία** δεν έχει οριστικοποιηθεί, οριζόντιες προδιαγραφές δεν υπάρχουν, η ορολογία συνεχίζει να παρουσιάζει αμφισημίες, οι ανάγκες των χρηστών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, ενώ διαρκώς προστίθενται νέες τεχνικές και δυνατότητες (Rodríguez –Navarro P. 2015). Άλλωστε η ποικιλομορφία της πολιτιστικής έκφρασης, η τοπογραφία και οι ιδιαιτερότητες κάθε μνημείου, κυρίως ως προς το μέγεθος, το σχήμα και την πολυπλοκότητα, καθιστούν ένα τέτοιο εγχείρημα εξαιρετικά δύσκολο, ειδικά μάλιστα στις οχυρωματικές κατασκευές, όπου οι αρχές της καθετότητας και της συμμετρίας δεν αποτελούν τον κανόνα (Boehler W., Heinz G, 1999).

Ακριβώς λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των κάστρων αποτελεί συνήθη πρακτική ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων συλλογής δεδομένων, δηλαδή **συνδυασμός χρήσης σαρωτών λέιζερ και φωτογραμμετρικών εφαρμογών** (Agosto 2005), (Landes T. 2007), (P. Gianniou, 2007), (El-Hakim 2007), (El-Hakim 2007), (Kersten T. L., 2015), (T. K. Kersten 2015), (Garfella Rybio J. 2015), (Rodríguez –Navarro P. 2015). Οι επίγειες **γεωδαιτικές μετρήσεις** για την ίδρυση ενός τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου παραμένουν αναντικατάστατες, ενώ υπάρχει πλέον η υποστήριξη των δορυφορικών εφαρμογών τους (GNSS) και βελτιωμένων σχεδιαστικών πακέτων (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003), (Chiabrande F. 2009), (Pintea 2015). Παραδοσιακά προϊόντα της αναλυτικής φωτογραμμετρίας, όπως οι **αναγωγές εικόνων**, συνεχίζουν και χρησιμοποιούνται και αποτελούν πολύτιμο εργαλείο σε κλάδους της αρχαιολογίας και των ιστορικών μελετών. Ο τρόπος παραγωγής τους, γίνεται πιο εύκολος και ταχύτερος ενώ παρέχεται η δυνατότητα αναπτυγμάτων από πιο σύνθετες μαθηματικές επιφάνειες (Ioannidis C., Potsiou C. 1999), (Chazaly 2001), (Agosto 2005), (Vidman 2011), (Pintea 2015). Η εξέλιξη των λογισμικών διευκολύνει τη χρήση **ιστορικών εικόνων και σχεδίων** σε διάφορες εφαρμογές όπως για την ανασύνθεση της μορφής ενός κατεστραμμένου μνημείου ή για την ερμηνεία του σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής και τα πρωτότυπα κατασκευαστικά σχέδια του (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003), (Ringle K. 2005), (Pirinu 2015). Η σταδιακή αντικατάσταση των γραμμικών σχεδίων από εικονιστικά προϊόντα και η εξέλιξη των τελευταίων είναι ξεκάθαρη: οι ορθοφωτογραφίες εξελίσσονται σε ορθοεικόνες, ορθοφωτομωσαϊκά και 3D μοντέλα με υφή, η αναλυτική παραγωγή σχεδίων αρχικά στο χέρι, μετά σε plotter αντικαθίσταται σταδιακά από 3D ψηφιακά διανυσματικά προϊόντα που επιτρέπουν τη μέτρηση, οπτικοποίηση και αναπαραγωγή σε 3D περιβάλλον. Η προσθήκη διανυσματικής πληροφορίας πάνω στην εικόνα ή το 3D μοντέλο και η σύνδεσή της χωρικής με τη σημασιολογική που δίνει ο εξειδικευμένος χρήστης (π.χ. ιστορική, αρχιτεκτονική, τεχνική) αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο με στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου GIS συστήματος **οργάνωσης και διαχείρισης της πληροφορίας** (Drap 2005), (Bobek K., Jedlicka K. 2011), (Pintea 2015), (Houshiara 2015). Η **σάρωση με laser** έχει ευρύτατη εφαρμογή (Fiani M. , Siani N. 2005), (Τζουβάρας, 2007), (Křemen T. 2011), (Merlo A., Rodríguez-Navarro P. 2012), (Fangi 2013), (Barreau 2014), (Garfella Rybio J. 2015), (Πετρίδης 2015). Όταν η αποτύπωση με σαρωτή laser δεν μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω εν γένει αδυναμιών της τεχνικής ή του απρόσιτου της θέσης της κατασκευής, χρησιμοποιείται **αποκλειστικά αυτοματοποιημένη φωτογραμμετρία** (Rodríguez-Navarro P., Verdiani G. 2013), (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015). Ιδιαίτερα για την τελευταία περίπτωση κρίνεται αναγκαία η **χρήση εναέριων μέσων**

αποτύπωσης (Mayer H. 2003), (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003), (El-Hakim 2007), (Σουγλέ 2010), (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015), (Rodriguez –Navarro P. 2015).

Σε αρκετές δημοσιεύσεις επιχειρείται **σύγκριση των μεθόδων και έλεγχος της ακρίβειας** μεταξύ των εναλλακτικών τεχνικών και των προϊόντων τους (Mayer H. 2003), (Landes T. 2007), (P. Giannίου, 2007), (El-Hakim 2007), (Παυλίδης 2011), (Fangi 2013), (T. K. Kersten 2015). Οι περισσότερες καταλήγουν στο ότι οι δυο τεχνικές εξασφαλίζουν την επιθυμητή ακρίβεια, ενώ άλλες επισημαίνουν ότι τα προϊόντα του επίγειου σαρωτή laser προσφέρουν καλύτερη ακρίβεια (Παυλίδης 2011), (T. K. Kersten 2015). Η **ακρίβεια της αυτοματοποιημένης φωτογραμμετρίας** παραμένει ανοιχτό ζήτημα καθώς δεν μπορούν να αναγνωριστούν οι αλγόριθμοι που έχουν επιλεγεί στα εμπορικά λογισμικά που εφαρμόζουν τεχνικές όρασης υπολογιστών (CV) και τα οποία προφανώς δεν είναι ανοιχτού κώδικα και πολύ περισσότερο δεν επιτρέπουν να διατηρηθεί εύκολα ο έλεγχος κατά την παραγωγή των προϊόντων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας, κάτι που συνέβαινε παλαιότερα με την αναλυτική φωτογραμμετρία.

Πίνακας 1-4: Συνοπτική περιγραφή επιλεγμένων ερευνητικών εφαρμογών γεωμετρικής τεκμηρίωσης και εφαρμογών της. Τα παρακάτω παραδείγματα παρατίθεται σε χρονολογική σειρά.

Γεωμετρική τεκμηρίωση για την αποκατάσταση του κάστρου της Χίου. Για τις ανάγκες αποκατάστασης του κάστρου ήταν αναγκαία η γεωμετρική τεκμηρίωσή του και καθώς τμήμα του βρίσκεται μέσα στη θάλασσα επιλέχθηκαν φωτογραμμετρικές τεχνικές. Πραγματοποιήθηκε αναγωγή των φωτογραφιών που απεικονίζουν επίπεδες επιφάνειες του τείχους και στερεοσκοπική φωτογραμμετρία για την απόδοση των υπόλοιπων επιφανειών. Για να αποδοθεί μια πιο φυσική εικόνα του κάστρου και να αποφευχθούν τυχόν διαστροφές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, επιλέχθηκε η προβολή των κυλινδρικών τμημάτων του κάστρου σε περισσότερες από μια επιφάνειες, σε γωνία 45ο μεταξύ τους. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές με κυλινδρικά και κωνικά αναπτύγματα. (Ioannidis C., Potsiou C. 1999)[Εικόνα 1-17]

1) 3D φωτορεαλιστικό μοντέλο του κάστρου Cesky Krumlov, Τσεχία Σκοπός ήταν η δημιουργία φωτορεαλιστικών μοντέλων του χώρου του κάστρου (που χρησιμοποιείται ως χώρος παραστάσεων) και η διερεύνηση των δυνατοτήτων animation. Η αποτύπωση έγινε κυρίως με γεωδαιτικές μεθόδους και η απόδοση της υψής και του χρώματος του μοντέλου προήλθε από ανηγμένες εικόνες. Επειδή χρησιμοποιήθηκε μη μετρητική μηχανή η ακρίβεια δεν ήταν αποδεκτή. (Hodac 2001)

2) 3D μοντέλο για διαδικτυακές τουριστικές εφαρμογές κάστρο Wartburg, Γερμανία Για τις ανάγκες συμπλήρωσης γεωβάσης που χρησιμοποιείται για διαδικτυακές τουριστικές εφαρμογές ήταν αναγκαία η παραγωγή ενός 3D μοντέλου του κάστρου. Η χρήση λογισμικών όρασης υπολογιστών για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων αρχίζει να δίνει αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στη σύγκριση μεταξύ της αυτόματης βαθμονόμησης των εικόνων και των γνωστών στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και καταλήγει σε ικανοποιητική ακρίβεια. Καθώς η περιοχή περιμετρικά του κάστρου είναι πολύ απότομη, χρησιμοποιήθηκαν εναέρια μέσα για την λήψη των εικόνων. Για την επεξεργασία των στοιχείων (γεωδαιτικές μετρήσεις, εικόνες) χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά AICONPPA-Pro και το Photomodeler.(Mayer H. 2003) [Εικόνα 1-16].

3) Εργασίες αποκατάστασης και ψηφιακής αναπαράστασης του κάστρου Beaufort-Qalaat el-Chaqif, Λίβανος. Πρόκειται για ένα κάστρο (12-17^{ος} αιώνας) που έχει υποστεί αρκετές αλλαγές και καταστροφές λόγω σεισμών πυρκαγιών και ου πολέμου με το Ισραήλ. Αξιοποιήθηκε ιστορικό φωτογραφικό υλικό της γαλλικής ΓΥΣ της περιόδου 1935-1937 και πραγματοποιήθηκε φωτογραμμετρική λήψη εικόνων με εναέρια μέσα και ταυτόχρονη τοπογραφική αποτύπωση. Με στερεοσκοπική φωτογραμμετρία στο πρόγραμμα PhotoModeller 5.0 κατασκευάστηκε το 3D μοντέλο και στη συνέχεια παράγονται συγκριτικές ορθοεικόνες περιόδου 1935-1937 και 2003. Με επίθεση των (ψηφιοποιημένων) ιστορικών φωτογραφιών επισημαίνονται οι περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος και γίνεται μια πρώτη εκτίμηση των εργασιών αποκατάστασης. (GrussenmeyerP., YasmineJ. 2003) [Εικόνα1-19].

4) Αποτύπωση σε μεγάλες κλίμακες του κάστρου Graines στην Ιταλία για την αξιολόγηση νέων τεχνικών. Στα πλαίσια έργου INTERREGIII B πραγματοποιήθηκε αποτύπωση των εξωτερικών τειχών του κάστρου (ορθοεικόνες και 3D μοντέλο) χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές (φωτογραμμετρία και LIDAR) με και σκοπό να ελεγχθεί η μετρητική ακρίβεια των νέων τεχνικών και να αξιολογηθούν τα προϊόντα από τους αρχαιολόγους του έργου. Για την αναγωγή εικόνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RDF, για την παραγωγή DSM

και 3D μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής, και για την κατασκευή *solidimages*¹¹. Από τα παραπάνω προϊόντα οι αρχαιολόγοι βρίσκουν ιδιαίτερα χρήσιμες τις ορθοεικόνες, μεταξύ άλλων και επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γεωμετρική βάση για ένα GIS. Αντίστοιχα χρήσιμες μπορούν να αποδειχθούν οι *solid images*. (Agosto 2005) [Εικόνα 1-18].

5) Ορθοεικόνες ως υποστηρικτικό εργαλείο σε αρχαιολογική έρευνα στρωματογραφίας, κάστρο Shawbak, Ιορδανία. Η αρχαιολογική στρωματογραφία χρησιμοποιείται για την ερμηνεία της αρχιτεκτονικής ενός κτίσματος από την αρχική κατασκευή του μέχρι σήμερα και χρησιμοποιείται εναλλακτικά της μελέτης τυπολογίας. Η μεθοδολογία (που χαρακτηρίζεται στην εργασία ως *light archaeology*) απαιτεί την παραγωγή και διαχείριση σύνθετων τρισδιάστατων δεδομένων που ξεπερνάνε τις δυνατότητες ενός τυπικού GIS. Για τις ανάγκες έρευνων στρωματογραφίας στο κάστρο του 12^{ου} αιώνα Shawbak (δύο πύλες του) παρήχθησαν ορθοεικόνες και ανηγμένες εικόνες με χρήση του Photomodeler και μέσω του I-MAGE ψηφιοποιήθηκαν περιοχές ενδιαφέροντος στις εικόνες. Το σύνολο του υλικού [3d γεωμετρικά δεδομένα και δεδομένα ιστορικής και αρχαιολογικής τεκμηρίωσης (πχ σημειώσεις της ανασκαφής, φωτογραφίες, ιστορικές αναφορές)] σώζονται σε XML και χρησιμοποιούνται ως στοιχεία μιας *δομής δεδομένων* στο πρόγραμμα ARPEUR. Μέσω του εργαλείου ISA-PX παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης. Έτσι η γεωμετρική πληροφορία εμπλουτίζεται και η αρχαιολογική έρευνα έχει ταυτόχρονη πρόσβαση και συνθετική αναζήτηση σε όλα τα διαθέσιμα στοιχεία. (Drap 2005) [Εικόνα 1-2].

6) Έλεγχος ακρίβειας ιστορικών σχεδίων του κάστρου Heidelberg, Γερμανία. Στο συγκεκριμένο έργο χρησιμοποιήθηκε ειδική φωτογραμμετρική μηχανή για την παραγωγή ανηγμένων εικόνων του κάστρου Heidelberg (1214). Οι ορθοεικόνες χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθούν τα πρωτότυπα σχέδια του κάστρου και να διαπιστωθούν αλλαγές ή φθορές στην κατασκευή (πχ τοποθέτηση νέων λίθων) (RingleK., 2005)

7) 3D μοντέλο του κάστρου Haut-Andlau στη Γαλλία χρησιμοποιώντας μικτές τεχνικές. Η πρόσβαση στο κάστρο Haut-Andlau (κατασκευή 1337-1344) λόγω της βλάστησης και των τάφων είναι πολύ δύσκολη. Για την αποτύπωση του χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μεθόδων (γεωδαιτική αποτύπωση, σάρωση με λέιζερ, φωτογραμμετρία) και πραγματοποιήθηκε συγκριτικός έλεγχος της ακρίβειάς τους. Η παραγωγή του mesh από τις σαρώσεις έγινε στο λογισμικό 3D Reshaper και χρησιμοποιήθηκαν 50 στερεοζεύγη να συμπληρωθούν οι περιοχές που λόγω της βλάστησης παρουσίαζαν αποκρύψεις. Ο έλεγχος της γεωμετρικής ακρίβειας περιλαμβάνει 90 κοινά σημεία, 21 αποστάσεις και κατέληξε ότι και οι τρεις τεχνικές πετυχαίνουν ακρίβειες αναγκαίες για την γεωμετρική τεκμηρίωση του κάστρου. (Landes T., 2007) [Εικόνα 1-10].

8) 3D γεωμετρική τεκμηρίωση της Θαλασσινής Πύλης της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου για τις ανάγκες εργασιών αποκατάστασης Στην περίπτωση της Θαλασσινής Πύλης χρησιμοποιήθηκαν σαρωτές λέιζερ, γεωδαιτικές και φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Για την παραγωγή του φωτορεαλιστικού μοντέλου συνδυάστηκαν ορθοφωτομωσαϊκά και νέφος σημείων με χρώμα από τον σαρωτή laser χρησιμοποιώντας συμβατικά λογισμικά. Για το μοντέλο TIN χρησιμοποιήθηκε το Geomagis. Διαπιστώθηκε ότι τα εμπορικά λογισμικά δεν αποδίδουν αληθοφανή υφή (χρώμα) σε νέφη σημείων ή σε 3D μοντέλα επιφανειών.¹² [Εικόνα 1-22] (P. Gianniou, 2007)

9) 3D φωτορεαλιστική αναπαράσταση του Castello di Stenico χρησιμοποιώντας μεικτές τεχνικές Η πολυπλοκότητα της δομής του κάστρου, το απρόσιτο τμημάτων του, καθιστούν αδύνατη τη εύρεση επαρκών και κατάλληλων θέσεων για τη λήψη εικόνων ή σαρώσεων. Επιλέχθηκε η λήψη εικόνων με εναέρια (ελικόπτερο) και επίγεια μέσα. Τμήματα με αποκρύψεις καλύφθηκαν με γεωδαιτικές μετρήσεις. Η παραγωγή του 3D μοντέλου έγινε με ημιαυτόματες μεθόδους, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ShapeCapture και αξιοποιώντας υφιστάμενα διαγράμματα κάτοψης. Η τελική ακρίβεια ήταν ομοιογενής και κυμαινόταν $\sigma_x=17\text{mm}$, $\sigma_y=15\text{mm}$, $\sigma_z=16\text{mm}$. [Εικόνα 1-20] (El-Hakim 2007)

10) Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του κάστρου Perlo, Ιταλία. Η μορφή του λόφου αποτυπώθηκε με δορυφορική και επίγεια γεωδαισία, ενώ UAV χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των εικόνων. Το mesh των κτηρίων παρήχθη στο Photomodeler και με το 3DS max κατασκευάστηκε μια φωτο-ρεαλιστική απεικόνιση του λόφου και του κάστρου. (Chiabrande F. 2009) [Εικόνα 1-11].

11) Παραγωγή ορθοεικόνων του οχυρωμένου Βυζαντινού οικισμού της Ρεντίνας: Για την καταγραφή και την τοπογραφική τεκμηρίωση του οχυρωμένου Βυζαντινού οικισμού του Βυζαντινού Κάστρου της Μυγδονικής Ρεντίνας πραγματοποιήθηκαν λήψεις αεροφωτογραφιών, μετρήσεις με GPS [Topcon Hiper Pro RTK] Μετά την επεξεργασία των στοιχείων με το λογισμικό Leica Photogrammetry Suite 9.2 της Erdas παρήχθησαν ορθοεικόνες

¹¹ Πρόκειται για ορθοεικόνες με δυνατότητα προβολής σε κάθε σημείο της υψομετρικής πληροφορίας και προσθήκης σχεδιαστικά διανυσματικής πληροφορίας.

¹² Η διαδικασία προσθήκης της υφής από εικόνες σε ορθοεικόνες και προβολή αυτών στο 3D μοντέλο, μειώνει την αληθοφάνεια του τελικού προϊόντος, επειδή η διαδικασία γίνεται εν πολλοίς χειροκίνητα και η χρήση ορθοεικόνων έχει αφαιρέσει την αίσθηση της προοπτικής. Επιπλέον η μέθοδος αυτή παράγει μεγάλο γεωμετρικό σφάλμα.

και ορθοφωτοχάρτης (Σουγλέ 2010) [Εικόνα 1-7].

12) Αποτύπωση τμήματος των τειχών της Θεσσαλονίκης: Για την αποτύπωση του βυζαντινού τείχους της Θεσσαλονίκης έχουν χρησιμοποιηθεί τοπογραφικές, φωτογραμμετρικές μέθοδοι αποτύπωσης μέθοδοι με laserscanner (Τζουβάρας, 2007), (Πετρίδης 2015). Πρόσφατη διπλωματική που συνέκρινε την αποτύπωση τμήματος των δυτικών τειχών με laserscanner και με στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, κατέληξε ότι οι τρισδιάστατοι σαρωτές laser υπερτερούν έναντι άλλων μεθόδων αποτύπωσης. [Εικόνα 1-9] (Παυλίδης 2011)

13) 3d μοντέλο του κάστρου Kozel, Τσεχία για τις ανάγκες οργάνωσης εθνικής βάσης δεδομένων μνημείων Η εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό και την οργάνωση ενός μοντέλου οντοτήτων (datamodel) με γεωγραφική πληροφορία συμβατό με τα χαρακτηριστικά υφιστάμενης γεωβάσης δεδομένων μνημείων (ως GIS), το οποίο περιλαμβάνει περιγραφική πληροφορία (πίνακα), χωρική πληροφορία (χάρτης) και τρισδιάστατη απεικόνιση του κάστρου η οποία έχει παραχθεί με φωτογραμμετρία ή λέιζερ σκάνερ. Περισσότερες λεπτομέρειες δεν δίνονται. (BobekK., JedlickaK. 2011)

14) 3D τεκμηρίωση και φωτορεαλιστική αναπαράσταση του κάστρου Chatel-sur-moselle στη Γαλλία για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Για την αποτύπωση των εξωτερικών τειχών και του περιβάλλοντα χώρου έγιναν σαρώσεις με LiDAR, ενώ για τον εσωτερικό χώρο χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός γεωδαιτικών, φωτογραμμετρικών τεχνικών και σαρώσεις με επίγειο σαρωτή λέιζερ. Προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι διαφορετικές ανάγκες των αρχαιολόγων και των επισκεπτών του κάστρου, παρήχθησαν τρεις εναλλακτικοί τύποι 3D μοντέλων. Η σύνθεση του νέφους σημείων μέσω εικόνων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα PhotoModeler-Scanner και το νέφος ενώθηκε με αυτό από τον επίγειο σαρωτή για να καλυφτεί με ακρίβεια και πληρότητα το αντικείμενο. [Εικόνα 1-21] (E.Alby, 2012)

15) Πολεοδομική μελέτη οχυρωματικού οικισμού της περιοχής Valleriana, Ιταλία Αντικείμενο ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν οι μετρητικές και γεωμετρικές σχέσεις των κτηρίων και του δημόσιου χώρου για την πολεοδομική και ιστορική ερμηνεία του οικισμού. Η αποτύπωση έγινε με τοπομετρικές μεθόδους και χρήση laserscanner.(MerloA., Rodriguez-NavarroP. 2012) [Εικόνα 1-5].

16) Γεωμετρική τεκμηρίωση και 3D αναπαράσταση της γέφυρας Cadi, τμήματος των τειχών της Γρανάδα, Ισπανία Σκοπός του έργου ήταν η 3D αναπαράσταση της γέφυρας στη μορφή που είχε κατά τον 11^ο αιώνα. Για την αναπαράσταση χρειάστηκε αρχιτεκτονική τεκμηρίωση και ανάλυση της γεωμετρίας της δομής της όπως διατηρείται σήμερα. Το απρόσιτο της θέσης οδήγησε στην επιλογή της αποτύπωσης με SfM φωτογραμμετρία. Χρησιμοποιήθηκε το Agisoft Photoscan και το Autodesk 123D Catch για την επεξεργασία των εικόνων και δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στο mesh. Με επεξεργασία του στο Raindrop Geomagic Studio βελτιώθηκε η ποιότητα και η ταχύτητα των εργασιών επεξεργασίας.(Rodriguez-Navarro P., Verdiani G. 2013) [Εικόνα1-4].

17) Σφαιρική φωτογραμμετρία για την αποτύπωση πύργων της δυναστείας Cham, Βιετνάμ Για τη γεωμετρική τεκμηρίωση πύργων της δυναστείας Cham (8^ο -17^ο αι.) στο Βιετνάμ, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με laser scanner, SfM φωτογραμμετρία και σφαιρική φωτογραμμετρία (Panoramic Spherical Photogrammetry - SPS). Η PSP είναι μια χαρτογραφική τεχνική στην οποία προβάλλονται εικόνες που έχουν ληφθεί από το ίδιο σημείο σε μια σφαίρα, επιτρέποντας την ευρυγώνια απεικόνιση μιας σκηνής. Τα αποτελέσματα του laser scanner ήταν τα πιο ικανοποιητικά, ωστόσο για πρακτικούς λόγους δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα μνημεία. Η SPS τεχνική είναι γρήγορη ωστόσο η μη αυτοματοποίηση των διαδικασιών αποκατάστασης των προσανατολισμών, την καθιστά δύσχρηστη. (Fangi 2013) [Εικόνα1-3].

18) 3D μοντέλο του κάστρου Coatsfrec στην Γαλλία για να περιοριστεί η περαιτέρω υποβάθμιση του μνημείου και για να διευκολυνθεί η ιστορική αναδόμηση Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα σάρωσης με επίγειο σαρωτή λέιζερ και μιας προ 10ετίας γεωδαιτικής αποτύπωσης που παρείχε πληροφορία σε περιοχές με αποκρύψεις λόγω της βλάστησης. Η μελέτη επικεντρώνεται στην τεχνικές επιλογές της αναδόμησης και όχι στην παραγωγή του 3Dμοντέλου. [Εικόνα 1-6] (Barreau 2014)

19) 3D τεκμηρίωση και φωτορεαλιστική αναπαράσταση του οχυρού (fortification) Kristiansten στην Νορβηγία για τουριστικούς σκοπούς. Στην περίπτωση των οχυρού Kristiansten στο Trodheim (Νορβηγία) χρησιμοποιήθηκαν σαρωτές λέιζερ, γεωδαιτικές και φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Τα κτήρια του οχυρού ανασυντέθηκαν από εικόνες και νέφη σημείων χρησιμοποιώντας το AutoCAD. Το TIN μοντέλο της ευρύτερης περιοχής του οχυρού και τα τείχη επεξεργάστηκαν στο Geomagic. Για την οπτικοποίηση του οχυρού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Cinema 4D, ενώ το τελικό 3D μοντέλο μεταφέρθηκε στην παιχνιδιομηχανή Unity για τις ανάγκες διαδραστικής επαφής με το αντικείμενο [Εικόνα 1-23](KerstenT. L., 2015)

20) 2D/3D γεωμετρική τεκμηρίωση του φρουρίου (fortress) Al Zubarah στο Κατάρ για τις ανάγκες εργασιών αποκατάστασης. Στην περίπτωση του οχυρού AlZubarah χρησιμοποιήθηκαν σαρωτές λέιζερ και φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Τα νέφη σημείων από τις σαρώσεις χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των 2D

διαγραμμάτων και του DSM. Νέφη σημείων και DSM παρήχθησαν επίσης χρησιμοποιώντας τα ελεύθερα λογισμικά Bundler/PMVS2, VisualSfM, AutodeskWebService, 123DCatchbeta, και το AgisoftPhotoScan. Η σύγκριση των προϊόντων μεταξύ τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα προϊόντα του επίγειου σαρωτή λέιζερ προσφέρουν καλύτερη ακρίβεια. [Εικόνα1-8] (T. K. Kersten 2015)

21) Αρχιτεκτονική μελέτη έργων των Jacopo και Giorgio Paleari Fratino Στα πλαίσια μελέτης των τεχνικών χαρακτηριστικών των οχυρωματικών έργων δυο στρατιωτικών μηχανικών Jacopo και GiorgioPaleariFratino του 16^{ου} στη Σαρδηνία χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικά σχέδια και τρισδιάστατα μοντέλα. Η σύγκριση μεταξύ πρωτότυπων σχεδίων και υφιστάμενων δομών και η αρχιτεκτονική ερμηνεία, επιβεβαιώνουν ότι τα έργα των αδελφών μηχανικών υλοποιήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια και ενσωματώνοντας υφιστάμενες κατασκευές σε συμφωνία με την τοπική τοπογραφία της κάθε περιοχής. (Pirinu 2015) [Εικόνα 1-13].

22) Τεκμηρίωση της φθοράς και σχεδιασμός δράσεων αποκατάστασης στο κάστρο Salobrena, Γρανάδα, Ισπανία. Το απρόσιτο της θέσης του κάστρο Salobrena καθιστά το σχεδιασμό δράσεων αποκατάστασης της εξωτερικής οχύρωσης ιδιαίτερα δύσκολο. Κλασική επίγεια φωτογραμμετρία ή αποτύπωση με laserscanner δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω της μεγάλης γωνίας του άξονα λήψης, διαφόρων εμποδίων που προκαλούν αποκρύψεις. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η εναέρια φωτογραμμετρική μέθοδος. Για τη λήψη των εικόνων χρησιμοποιήθηκε τετρακόπτερο, ενώ για την επεξεργασία τους και την παραγωγή των ορθοεικόνων, βάσει των οποίων επιλέχθηκαν τα σημεία προς αποκατάσταση, το πρόγραμμα AgisoftPhotocan. Η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να επιλύσει παρόμοιες δύσκολες περιπτώσεις. (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015) [Εικόνα1-12].

23) 3D εκτύπωση μοντέλου του κάστρου-παλατιού Bretxi, Βαλένθια, Ισπανία Στα πλαίσια διερεύνησης των δυνατοτήτων των νέων 3D τεχνικών, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με laserscanner και φωτογραφήσεις με βαθμονομημένη κάμερα. Η απόδοση χρώματος στα σημεία του νέφους έγινε χρησιμοποιώντας τις εικόνες. Το επεξεργασμένο 3D μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για 3D εκτύπωση. Δεν αναφέρονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω διαδικασίες. (Garfella Rybio J. 2015) [Εικόνα 1-14].

24) Παραγωγή ορθοεικόνων για εκπαιδευτικούς σκοπούς του château de Chambord, Γαλλία Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε SfM φωτογραμμετρία και το OS λογισμικό MicMac για την παραγωγή του νέφους σημείων, ψηφιακών αναπτυγμάτων (σε απλές μαθηματικές επιφάνειες 2^{ου} βαθμού) και τελικά ορθοεικόνων του κάστρου. Σκοπός είναι η παραγωγή 2D ψηφιακών προϊόντων για να μελετηθούν οι διαδικασίες 2D mapping δηλαδή προσθήκης σημασιολογικής πληροφορίας (σε XML φορματ) σε ένα GIS αρχαιολογικό σύστημα. (Pintea 2015)

25) Συμπληρωματικές εφαρμογές για την ιστορική και αρχιτεκτονική ερμηνεία Πύργων της Βαλένθια, Ισπανία Επιχειρείται διερεύνηση των δυνατοτήτων των νέων τεχνολογιών στην παροχή υποστηρικτικού υλικού για την ερμηνεία των ιστορικών και αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών των μνημείων οχυρωματικής και προτείνεται μια μεθοδολογία για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών επιλογής και παραγωγής του σχετικού υλικού. Αντικείμενο εφαρμογής είναι οι πύργοι στην Βαλένθια και οι μέθοδοι που εξετάζονται περιλαμβάνουν σχέδια, τοπομετρικές παρατηρήσεις με totalstation, φωτογραμμετρικές αναγωγές εικόνων, SfM φωτογραμμετρία, επίγεια και εναέρια (χρήση UAV), και σάρωση με laserscanner. (Rodríguez –Navarro P. 2015) [Εικόνα1-15].



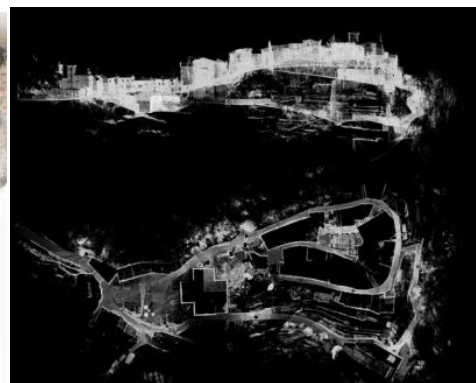
Εικόνα 1-2: Κάστρο Shawbak (Crac de Montréal), Ιορδανία. (Drap 2005)



Εικόνα1-3: Πύργος Banh it, Vietnam. (Fangi 2013)



Εικόνα1-4: Ψηφιακή αναπαράσταση της γέφυρας Cadi, Γρανάδα (Rodríguez-Navarro P., Verdiani G. 2013)



Εικόνα 1-5: Οχυρωματικός οικισμός στη Valleriana, Ιταλία (Merlo A., Rodríguez-Navarro P. 2012)



Εικόνα 1-6: Το κάστρο Coatfrec στην Γαλλία. (Πηγή:www.wikiwand.com)



Εικόνα 1-7: Οχυρωμένος βυζαντινός οικισμός της Ρεντίνας



Εικόνα1-8: Δυτική και Βόρεια όψη του φρουρίου AlZubarah στο Qatar (T. K. Kersten 2015)



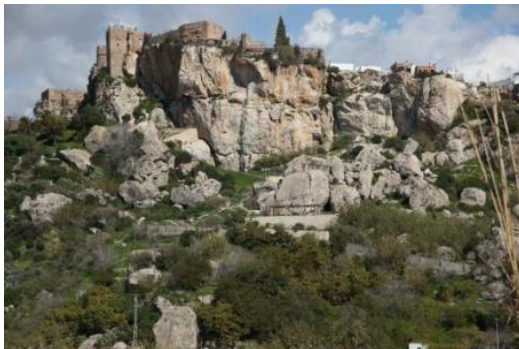
Εικόνα 1-9: Τμήμα των βυζαντινών τειχών της Θεσσαλονίκης (Παυλίδης 2011)



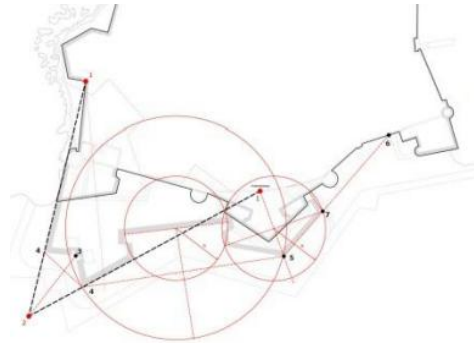
Εικόνα 1-10: Κάστρο Haut-Andlau, Γαλλία (Landes T. 2007)



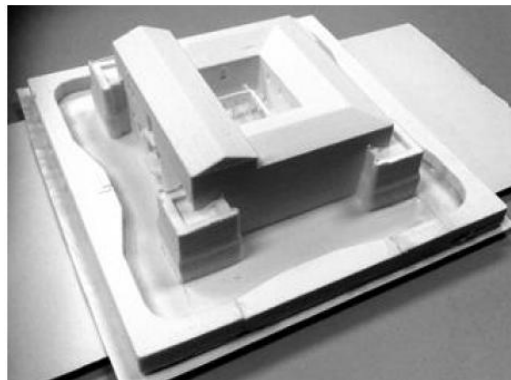
Εικόνα 1-11: Ερείπια κάστρου Perlo, Ιταλία (Chiabrando F., 2009)



Εικόνα 1-12: Κάστρο Salobrena, Γρανάδα Ισπανία (Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. 2015)



Εικόνα 1-13: Γεωμετρική ανάλυση έργων PaleariFratino, Σικελία, Ιταλία (Pirinu 2015)



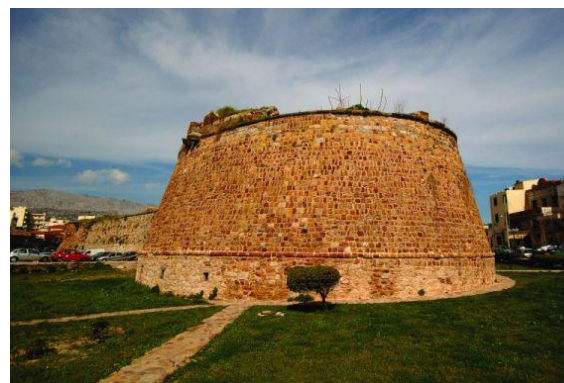
Εικόνα 1-14: 3D εκτύπωση του κάστρου Britxi, Βαλένθια Ισπανία (GarfellaRybioJ. 2015)



Εικόνα 1-15: Οπύργος Escaletes στην SantaPola, Alicante Ισπανία (Rodriguez –Navarro P. 2015)



Εικόνα 1-16: Κάστρο Wartburg, Γερμανία. (Mayer H. 2003)



Εικόνα 1-17: Κάστρο Χίου, πηγή: www.travelstyle.gr



Εικόνα 1-18: Κάστρο Graines, Ιταλία. (Agosto 2005)



Εικόνα1-19: Κάστρο Beaufort-Qalaat el-Chaif Λίβανος. (Grussenmeyer P., Yasmine J. 2003)



Εικόνα 1-20: Κάστρο Stenico (πηγή www.italia.it)



Εικόνα 1-21: Το κάστρο Chatel-sur-moselle στη Γαλλία (πηγή: <http://chatel-medieval.fr/>)



Εικόνα 1-22: Η Θαλασσινή Πύλη, Ρόδος (πηγή: flickrhivemind.net)



Εικόνα 1-23: Οχυρό Kristiansten στο Trondheim (πηγή: marinas.com)

2 Περιγραφή μνημείου

2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το Πεντεσκούφι είναι ένα μικρό κάστρο χτισμένο σε ένα βραχώδη λόφο απέναντι και προς νότο από τον Ακροκόρινθο. Εκτιμάται ότι χτίστηκε από τους Φράγκους το 1205 για τις ανάγκες της πολιορκίας του Ακροκορίνθου.

Μετά την κατάληψη της Κωνσταντινούπολης [1204] υπογράφεται από τους ηγέτες της Δ΄ Σταυροφορίας (1205-1210) η συνθήκη «Partitio Terrarumim peri Romaniae» για τη «Διανομή Εδαφών της Αυτοκρατορίας της Ρωμανίας». Με τη συνθήκη αυτή δημιουργήθηκαν νέα διάδοχα του Βυζαντίου κράτη, που κυριάρχησαν στον χώρο τους επόμενους αιώνες, μεταξύ των οποίων το Βασίλειο της Θεσσαλονίκης, το Ενετικό Βασίλειο (ή Δουκάτο) της Κρήτης, το Δεσποτάτο της Ηπείρου [Εικόνα 2-1]. Οι Φράγκοι ιππότες Guillaume de Champlitte και ο Geoffroi de Villehardouin (ανιψιός του συνώνυμου ιστορικού) συμμαχούν για την κατάκτηση της Πελοποννήσου εκ μέρους του Bonifacio I del Monferrato, βασιλιά της Θεσσαλονίκης. Μετά τη νικηφόρα μάχη του Κούντουρα (κοντά στη σημερινή Μεθώνη) το 1205, οι Φράγκοι κατευθύνθηκαν προς το Ναύπλιο και τον Ακροκόρινθο, περιοχές ελεγχόμενες από τον Λέοντα Σγουρό (Βλαχοπούλου 2002).¹³

Τα κάστρα του Άργους, της Κορίνθου και του Ναυπλίου ήταν καλά οχυρωμένα από τους Βυζαντινούς πιθανόν γιατί πολιορκούνταν πολλά χρόνια χωρίς αποτέλεσμα (Κόντη Β. 1983), (Δημητριάδη 1990). Το κάστρο της Κορίνθου, από τα αρχαιότερα κάστρα της Πελοποννήσου, χαρακτηρίζεται από συνεχή κατοίκηση μέχρι την υποχώρηση του Ιμπραήμ το 1827. Κατοικήθηκε από διαφορετικούς πληθυσμούς και πολιορκήθηκε πολλές φορές με τους εκάστοτε κύριους της περιοχής να προβαίνουν σε επιδιορθώσεις, προσθήκες, αλλαγές

Πίνακας 2-2]. Αποτελείται από τρεις ζώνες οχυρώσεων που διατηρούν αρχαία τμήματα επισκευές και προσθήκες της βυζαντινής εποχής [Εικόνα 2-3, Εικόνα 2-5], των περιόδων της Φραγκοκρατίας, της Τουρκοκρατίας, της Ενετοκρατίας (Αθανασούλης 2010). Η συναρπαστική ιστορία του κάστρου της Κορίνθου μαρτυρείται στις οχυρώσεις, τους λατρευτικούς χώρους [Εικόνα 2-4] και τις άλλες κατασκευές, τμήματα των οποίων διατηρούνται μέχρι σήμερα [Εικόνα 2-4] (Athanasoulis, 2013) αλλά και πιο εντυπωσιακά στους στίχους του Lord Byron για την πολιορκία του 1715, στο «The Siege of Corinth» [1816], στροφή Ι, στίχοι 1-8:

**Many a vanished year and age,
And tempest's breath, and battle's rage,
Have swept o'er Corinth ; yet she stands
A fortress formed to Freedom's hands.
The whirlwind's wrath, the earthquake's shock,
Have left untouched her hoary rock.**

¹³ Ο Λέων Σγουρός αποτελεί από τις πιο σημαντικές και αντιφατικές προσωπικότητες της ελληνικής μεσαιωνικής ιστορίας [Εικόνα 2-2]. Βυζαντινός άρχοντας (τοπάρχης, δυνάστης) του Ναυπλίου, είχε επαναστατήσει το 1201 ενάντια στον αυτοκράτορα Αλέξιο Γ΄, εκμεταλλευόμενος την χαώδη κατάσταση από την πολιορκία της Κωνσταντινούπολης και είχε ανακηρύξει αυτόνομο βασίλειο στην περιοχή, το οποίο περιελάμβανε την Ναυπλία (ευρύτερη περιοχή Ναυπλίου), το Άργος, την Κόρινθο, την Αττική και τη Βοιωτία. «Ο Λέων Σγουρός είναι μια μορφή για την οποία ο χαρακτηρισμός ως 'τύραννος' με την έννοια της κλασσικής ελληνικής εποχής θα του ταίριαζε απόλυτα. Παρόλο που στόχευε σε υψηλότερους σκοπούς, τελικά πάντοτε παρέμεινε ένας 'τύραννος πόλεων'», Hoffman 1974, σσ138-139 ανάκτηση από (Βλαχοπούλου,2001).

**The keystone of a land, which still,
Though fall'n, looks proudly on that hill.**

Η πολιορκία του κάστρου του Ακροκορίνθου ήταν δύσκολη και χρονοβόρα. Εκτιμάται ότι για να περιορίσουν τον ανεφοδιασμό και τις αιφνιδιαστικές αντεπιθέσεις του Σγουρού, οι Φράγκοι κατασκεύασαν το 1205 σε ένα βραχώδη λόφο απέναντι από τον Ακροκόρινθο ένα μικρό κάστρο ελέγχου (αντίκαστρο),¹⁴ το Πεντεσκούφι (Carpenter R., Antoine B. 1936). Όπως μνημονεύεται στο χρονικό του Μορέως, στ. 2801-2813, εδάφιο «Γουλιέλμος Βιλλαρδουΐνου Πρίγκιψ», παράγραφος 192:

Λοιπόν, διατί ἔνι τὸ βουνὶ τοῦ κάστρου τῆς Κορίνθου πλατὺ καὶ μέγα, φοβερὸν, καὶ ἀπάνω ἔνι τὸ κάστρον, εὐρίσκεται πρὸς μεσημβρίαν τοῦ ἐκείνου τοῦ κάστρου ὁ κάτι ἓνα βουνόπουλον, τραχῶνι γὰρ με σπήλαιον. Καὶ ὀρίζει ἐνταῦτα ὁ πρίγκιπας καὶ ἀπάνω ἔχτισε κάστρον, Μοῦντ Ἑσκουβὲ τὸ ὠνόμασαν, οὕτως τὸ κράζουσι πάλε καὶ ἀπὸ τὴν ἄλλην γὰρ μερέαν, τὸ λέγουσιν πρὸς ἄρκτον, ὁ Μέγας Κύρης ἔποικεν κάστρο ἐδικὸ τοῦ ἐκεῖσε. Ἐβάλασιν σωτάρχισιν, σκουταροτζαγρατόρους.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει μια μυθιστορηματική περιγραφή της κατασκευής του κάστρου (Γκίκας 1979):

Ἐφυγεν ὁ Βονιφάτιος, μα οἱ Φράγκοι το' βαλαν σκοπό να το παρούνε το κάστρο. Σε λίγο λοιπόν καταφτάνει ὁ Δούκας τῆς Αθῆνας Ὄθων ντε λα Ρος , μ ἑκατοντάδες σιδηρονημένα ἄλογα, με καθαλάρηδες τὴν αφρόκρεμα τοῦ Δουκάτου. Μα, μπροστά στη σθεναρὴ ἀντίσταση τῶν πολιορκημένων, γρήγορα παίρνει καὶ αὐτὸς τῶν ὀμματίων του. Ἐρχεται καὶ ὁ Φλαμανδὸς ὑπόπτης Ιάκωβος Ἀβέσν, που λογαριαζόταν «σπεσιαλίστας» θὰ λέγαμε σήμερα στους καστρόπολεμους, ἀλλὰ μια σπαθιά πάνω στη συμπλοκή, ἔξω απ τα τείχη, του κόβει καὶ αὐτοῦ το φῶρα. Αὐτὸς ἄφησε κ' ἓνα ἐνθύμιο: τὸ μικρὸ καστράκι Μόντε Ἐσκουβὲ ἢ Πεντεσκούφι, που ἔχτισε σ' ἓνα μυτερὸ βραχώδικο βουνόπουλο, στα νότια τοῦ Ακροκόρινθου για να ελέγχει καλλίτερα τὸ μεγάλο κάστρο.

Το κάστρο του Ακροκορίνθου πολιορκήθηκε πολλές φορές μέχρι το θάνατο του Σγουρού το 1209 και την τελική συνθηκολόγηση του Θεόδωρου Δούκα το 1210. Κατόπιν, η περιοχή θα προσαρτηθεί στο Πριγκιπάτο της Αχαΐας που είχε οριστεί από την Partitio Romanie [Εικόνα 2-1], με πρώτο πρίγκιπα τον Guillaume de Champlitte. Τα εδαφικά όρια και η επικυριαρχία στο Πριγκιπάτο θα αλλάξουν πολλές φορές μέσα στους επόμενους αιώνες και κατ' επέκταση η χρήση του μικρού κάστρου [Πίνακας 2-1]. Κατά την περίοδο ηγεμονίας των Λατινικών οίκων η περιοχή αποτελεί πεδίο μαχών, ενώ άλλες φορές δίνεται ως αντάλλαγμα για την απελευθέρωση αιχμαλώτων ή ως γαμήλιο δώρο. Η μετάβαση σε βυζαντινή κυριαρχία θα είναι σύντομη μέχρι την δεύτερη κατάκτηση από τους Οθωμανούς. Η περιοχή θα αποτελέσει πεδίο μάχης μεταξύ Βενετών και Οθωμανών κατά τον 17^ο αιώνα. Το κάστρο θα χρησιμοποιηθεί επίσης από τους επαναστατημένους Έλληνες σε μάχες κατά των Τούρκων το 1821 και 1822. Εκτός από την πιθανή χρήση του κάστρου από τους διάφορους ηγεμόνες και κατακτητές της περιόδου αξίζει να σημειωθούν οι ισχυροί σεισμοί που έχουν καταγραφεί στην περιοχή τα έτη 1300, 1858, 1925 1928, και 1981 και έχουν επηρεάσει τη μορφή του όπως διατηρείται σήμερα (Gates, A., Ritchie, D., 2007).

Η προέλευση του ονόματος του κάστρου δεν είναι σαφής και φαίνεται να υπήρχε μια σύγχυση με άλλο μικρό φρούριο της περιοχής (Carpenter R., Antoine B. 1936). Η αρχική ονομασία του κάστρου ήταν Mont Escovée ή Montesquie, οι Λατίνοι χρησιμοποίησαν και το όνομα Malvicino ή Malvesmo ως ο «εχθρικός γείτονας» του Ακροκορίνθου, ενώ η σημερινή του ονομασία εικάζεται ότι αποτελεί παραφθορά του φράγκικου ονόματος Mont Escovée.¹⁵

¹⁴To ensure their watch on the beleaguered mountain, the Franks built a tiny fort, an antikastro, " en une montagne ague qui est encoste le chastel devers miedi," calling it Mont Escovee (or in some of the records Malvesmo). Ανάκτηση από (Carpenter R., Antoine B. 1936).

¹⁵Το κάστρο στις πηγές αναφέρεται με τις εξής ονομασίες: i. **ΜοῦντἙσκουβὲ**: σε Χρονικὸν τοῦ Μορέως κατὰ τὸν κώδικα τῆς Κοπεγχάγης. ii. **Malvezmo**: σε αραγωνικὴ παραλλαγή τοῦ Χρονικοῦ τοῦ Μορέως. iii. **Malvicino**: στον κατάλογο τῶν κάστρων τοῦ 1377 [πρβλ. Βοη 1969, σ. 691]. iv. **Monte Stufe** (σε ... ἔκδοση τοῦ Χρονικοῦ τοῦ Μορέως). [Horf, σ. 436] v. **Mont Escovée**. Το ὄνομα Πεντεσκούφι δεν ἀπαντᾷ σε μεσαιωνικὲς πηγὲς καὶ πιθανόν

Πίνακας 2-1: Ιστορικά γεγονότα της περιοχής, σχετικά με το Πεντεσκούφι¹⁶

1210	Κυριαρχία οίκου Villehardouin(και Ανζου Νάπολη)[1210-1259]
1358	Βυζαντινή κατάκτηση από τον Θωμά Παλαιολόγο [1359-1458]
1395	Κυριαρχία Φλωρεντιανού πρίγκιπα Acciaiolí [1259-1359]
1404	Πώληση σειωανίτες, ιπότες της Ρόδου -Γενουάτης Centurionell Zaccaria τελευταίος πρίγκιπας της Αχαΐας.
1432	Το πριγκιπάτο της Αχαΐας περιέρχεται στους Βυζαντινούς του δεσποτάτου του Μορέως
1458	Κατάκτηση από τους Οθωμανούς - σουλτάνος Μωάμεθ Β' [1458-1687]
1687	Πόλεμος του Μορέα - Βενετοκρατία [1687-1715] - 6ος Βενετο-Οθωμανικός πόλεμος (1684–99).
1715	Επανάκτηση των Οθωμανών[1715-1827]
1823	Παράδοση Ακροκορίνθου σε επαναστατημένους Έλληνες.

Πίνακας 2-2: Κυριαρχία κάστρου Κορίνθου (Καρποδίνη-Δημητριάδη 1990)

7 ^{ος} /6 ^{ος} αι.π.Χ.	Οχύρωση από τους Κορίνθιους
338-243 π.Χ.	Μακεδονική φρουρά
243-223 π.Χ.	Αχαϊκή Συμπολιτεία
146 π.Χ.	Κατάληψη από τους Ρωμαίους
4 ^{ος} αι. μ.Χ.	Επαναοχύρωση
6 ^{ος} αι. μ.Χ. -1202	Βυζαντινό φρούριο
1147-1150	Κατάληψη από τους Νορμανδούς
1203-1210	Κυριαρχία Λέοντα Σγουρού
1210-1259	Φράγκικη κυριαρχία
1259-1359	Κυριαρχία οικογένειας Ατζαγιόλι
1395-1400 και 1400-1458	Επανάκτηση Βυζαντινών
1458-1687	Οθωμανική κυριαρχία
1687-1715	Κυριαρχία Βενετών

προήλθε από την παραφθορά του φράγκικου ονόματος *Mont Escouée*.. Ανάκτηση από <http://ecastles.culture.gr/> [20.01.2016]

¹⁶ Αμερικάνικη Σχολή Κλασικής Αρχαιολογίας στην Αθήνα [<http://goo.gl/nkOd3k>], Wikipedia/Ακροκόρυθος [<https://goo.gl/ORLnFX>], Ίδρυμα Μείζονος Ελληνισμού [goo.gl/bG74HU]



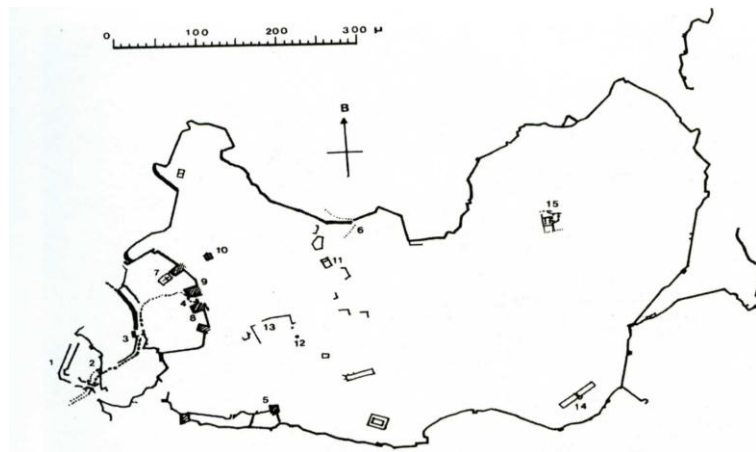
Εικόνα 2-1: Ο χωρισμός εδαφών της Partitio Romaniae



Εικόνα 2-2: Το μολυβδόβουλο του Λέοντα Σγουρού. (Βλαχοπούλου 2002)



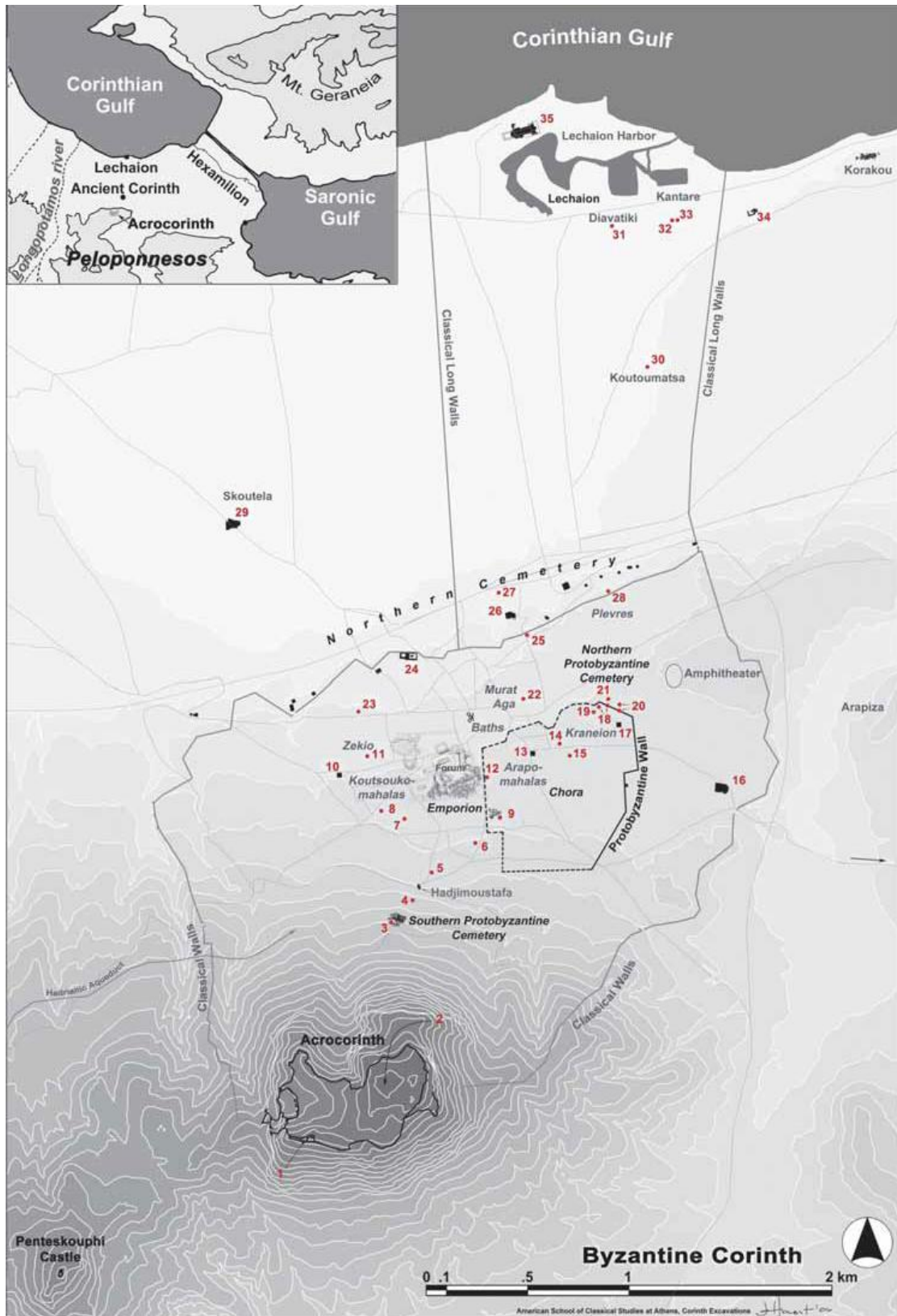
Εικόνα 2-3: Βυζαντινή πύλη στον Ακροκόρινθο. (Athanasoulis 2013).



- | | | | |
|-----------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| ΥΠΟΜΝΗΜΑ | 5. ΘΡΑΚΙΚΟΣ ΠΥΡΓΟΣ | 10. ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ | 13. ΒΥΖΑΝΤΙΝΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ |
| 1. ΤΑΦΡΟΣ | 6. ΒΟΡΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΣ | 11. ΤΖΑΜΙ | 14. ΑΝΘ ΠΕΡΙΡΗΗ |
| 2. Α ΠΥΛΗ | 7. ΕΝΕΤΙΚΗ ΕΚΚΛΗΣΙΑ | 12. ΜΙΝΑΡΕΣ | 15. ΝΑΟΣ ΑΒΡΟΔΙΤΗΣ |
| 3. Β ΠΥΛΗ | 8-9. ΤΟΥΡΚΙΚΕΣ ΒΡΥΣΕΣ | | |

Εικ. 3. Σχέδιο του κάστρου Ἀκροκορίνθου (Ἀν. Κουμούση, Ἀκροκόρινθος, Ἀθήνα 2001, σ. 18, εικ. 12).

Εικόνα 2-4: Σχέδιο του κάστρου Ακροκορίνθου όπου υποδεικνύονται λατρευτικές θέσεις. (Αθανασούλης 2010).



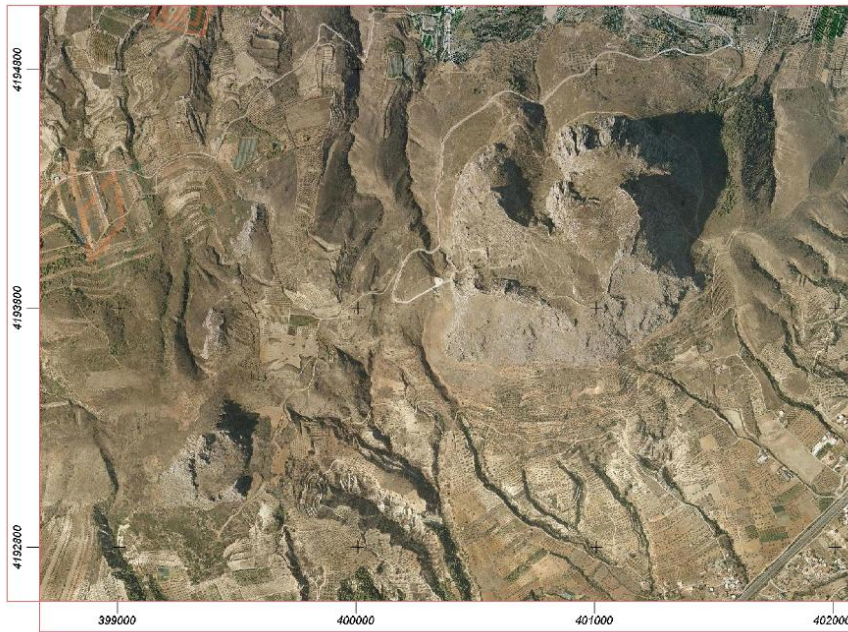
Εικόνα 2-5: Τοπογραφικό διάγραμμα με τις θέσεις των μνημείων και των ανασκαφών βυζαντινής περιόδου. Βασισμένο σε σχέδιο του D. Herst. Αμερικάνικη Σχολή Κλασσικής Αρχαιολογίας στην Αθήνα (Athanasoulis 2013)

2.2 Αρχιτεκτονικά στοιχεία

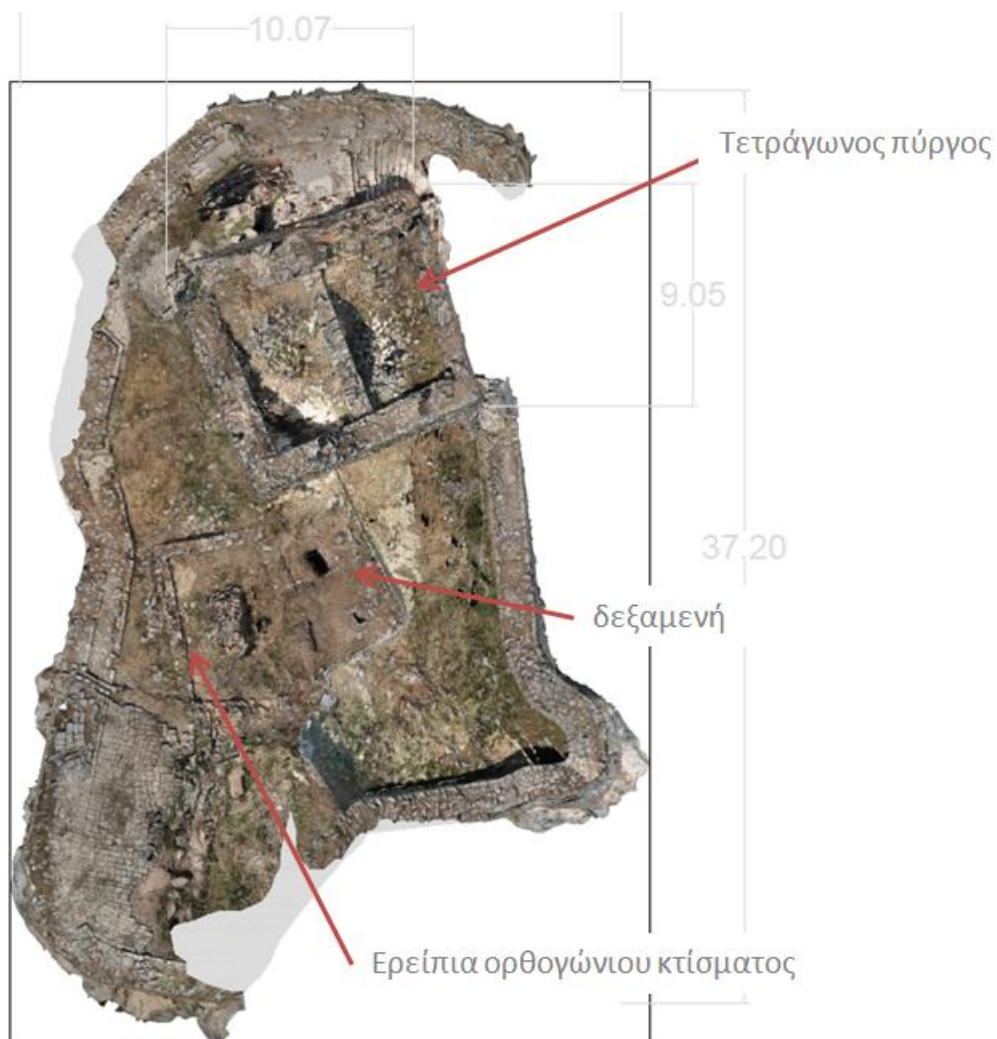
Το κάστρο απέχει περίπου 1.6km από τον Ακροκόρινθο προς τα νοτιοανατολικά και περίπου 3km προς τα νοτιοανατολικά από την Αρχαία Κόρινθο σε υψόμετρο 475m. Καταλαμβάνει έκταση 600 m² με μέγιστο μήκος 37m (διεύθυνση βορρά νότου) και μέγιστο πλάτος 24m. Έχει πολυγωνικό σχήμα κάτοψης και περιλαμβάνει τετράγωνο πύργο. Τα τείχη του εξωτερικού περιβάλλοντος οχύρωσης έχουν ακανόνιστο σχήμα ακολουθώντας σε μεγάλα τμήματα την πορεία του φυσικού βράχου, στον οποίο θεμελιώνονται. Διατηρούνται σημαντικά τμήματα του τείχους σε ικανό ύψος σε όλη την περίμετρο του κάστρου. Το συνολικό μήκος του σωζόμενου τείχους είναι 102.5 μέτρα και το ύψος των τειχών κυμαίνεται από 0.80 – 5.90 μέτρα (δεν λαμβάνεται ως τείχος το τμήμα που ανήκει στον πύργο [Εικόνα 2-6 έως 2-17]).

Η αρχιτεκτονική περιγραφή του Πεντεσκούφι αναπαράγεται από τα δημοσιευμένα στοιχεία του έργου "Ψηφιακή προσβασιμότητα και ανάδειξη των κάστρων Αργολίδας, Αρκαδίας και Κορινθίας"¹⁷ που υλοποιήθηκε από την 25^η ΕΒΑ: «Το κάστρο αποτελείται από ισχυρό τετράγωνο πύργο και περίβολο που φέρει έξι κανονιοθυρίδες. Τα δύο διαφορετικά είδη τοιχοδομίας που παρουσιάζουν δηλώνουν δύο κατασκευαστικές φάσεις: την πρώτη κατά την ίδρυσή του το 1205–1210 και την δεύτερη πιθανώς κατά τους χρόνους της Β' Ενετοκρατίας (1687 – 1715). Ο πύργος έχει κάτοψη σχεδόν τετράγωνη, με είσοδο στη νότια πλευρά του. Το εσωτερικό του αρχικά ήταν ενιαίο, αλλά σε μεταγενέστερη φάση διακρίθηκε σε δύο χώρους μέσω τοίχου αποτελούμενου από τους ίδιους γκρίζους ορθογώνιους πωρόλιθους που χαρακτηρίζουν και τον περίβολο του φρουρίου. Ο τοίχος έχει διεύθυνση Β-Ν και διατρύπεται από τοξωτή θύρα που συνδέει τα δύο δωμάτια. Ο περίβολος φέρει στην άνω επιφάνειά του έξι κανονιοθυρίδες προσανατολισμένες προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από το ύψωμα. Στο εσωτερικό του περιβάλλοντος, και σε επαφή με τη νότια πλευρά του πύργου, βρίσκεται δεξαμενή που ανήκει στην ίδια οικοδομική φάση με τον περίβολο, καθώς και τα ερείπια μικρού ορθογώνιου κτίσματος. Ο πύργος και ο περίβολος έχουν διαφορετικά είδη τοιχοδομίας: ο πύργος είναι χτισμένος από αργούς ασβεστόλιθους μεσαίου μεγέθους με τμήματα κεράμων τοποθετημένα ανάμεσά τους σε άτακτη διάταξη, τα οποία περιβάλλουν τους λίθους. Εξάιρεση αποτελεί ο ανατολικός τοίχος, του οποίου ένα μόνο τμήμα στο κεντρικό χαμηλότερο τμήμα είναι κατασκευασμένο από την αρχική αυτή τοιχοδομία· το υπόλοιπο τμήμα του τοίχου φαίνεται ότι κατέρρευσε, και ανακατασκευάστηκε με επεξεργασμένους ορθογώνιους πωρόλιθους, με πολύ μικρότερη χρήση κεράμων ανάμεσά τους. Από το ύστερο αυτό είδος τοιχοδομίας αποτελείται και ο περίβολος του φρουρίου. Η πρώτη τοιχοδομία του πύργου στο Πεντεσκούφι έχει ομοιότητες με το βορειοανατολικό εξωτείχισμα του Ακροκορίνθου, ενώ παρόμοια, σχετικά πρόχειρη απαντά στα περισσότερα φραγκικά κάστρα της Πελοποννήσου, με την εξαίρεση του Χλουμουτζίου και της Γλαρέντζας. Η ύστερη τοιχοποιία του πύργου ομοιάζει με την ύστερη τοιχοδομία του φράγκικου πύργου του Ακροκορίνθου. Το Κάστρο ιδρύθηκε τους χρόνους της φράγκικης πολιορκίας του Ακροκορίνθου κατά τα έτη 1205 – 1210. Στην φάση αυτή αντιστοιχεί και το πρώτο είδος τοιχοδομίας που περιγράφηκε ανωτέρω. Το δεύτερο είδος τοιχοδομίας είναι ύστερο, πιθανώς κατά τους χρόνους της Β' Ενετοκρατίας (1687 – 1715) ή οθωμανικό.»

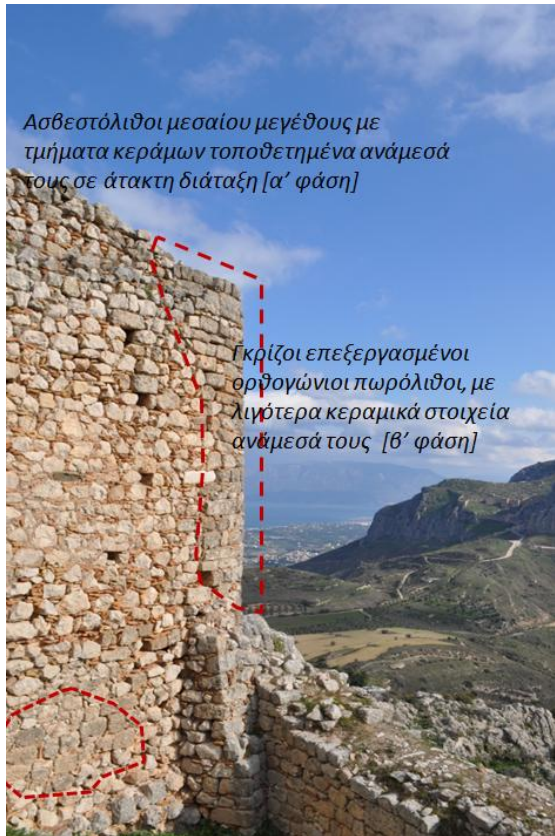
¹⁷ Ανάκτηση από <http://ecastles.culture.gr/> [20.01.2016]



Εικόνα 2-6: Απόσπασμα περιοχής από ορθοφωτοχάρτες της Κτηματολόγιο Α.Ε. σε κλίμακα 1:20000 (ΕΓΣΑ'87)



Εικόνα 2-7: Γεωμετρικά στοιχεία κάστρου



Εικόνα 2-8: Διακριτά είδη τοιχοδομίας



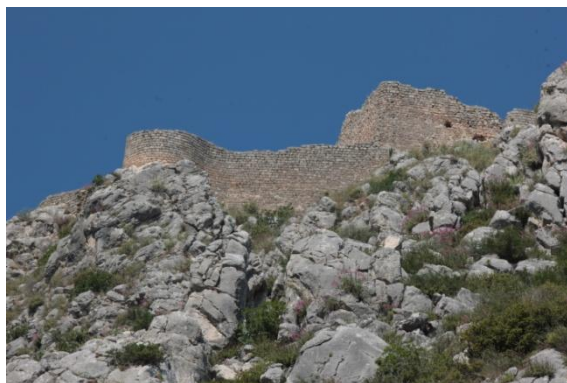
Εικόνα 2-9: Όψη του Ακροκορίνθου από το Πεντεσκούφι



Εικόνα 2-10: Στο δρόμο για το Πεντεσκούφι. Διακρίνεται η ΒΑ πλευρά του



Εικόνα 2-11: Στο δρόμο για το Πεντεσκούφι. Διακρίνεται η ΒΔ πλευρά του



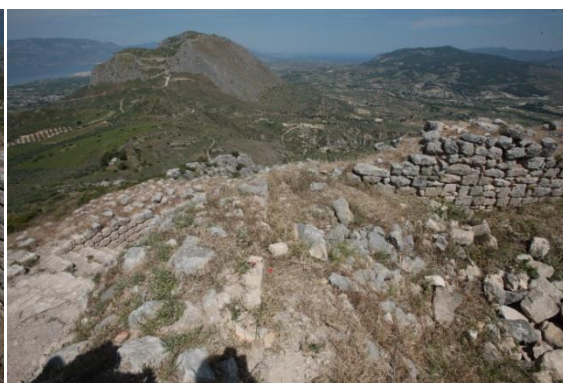
Εικόνα 2-12: Ανατολική πλευρά των τειχών-απρόσιτη



Εικόνα 2-13: Νότια πλευρά των τειχών-προσιτή



Εικόνα 2-14: ΒΔ όψη



Εικόνα 2-15: ΒΑ όψη



Εικόνα 2-16: ΝΔ όψη



Εικόνα 2-17: ΝΑ όψη



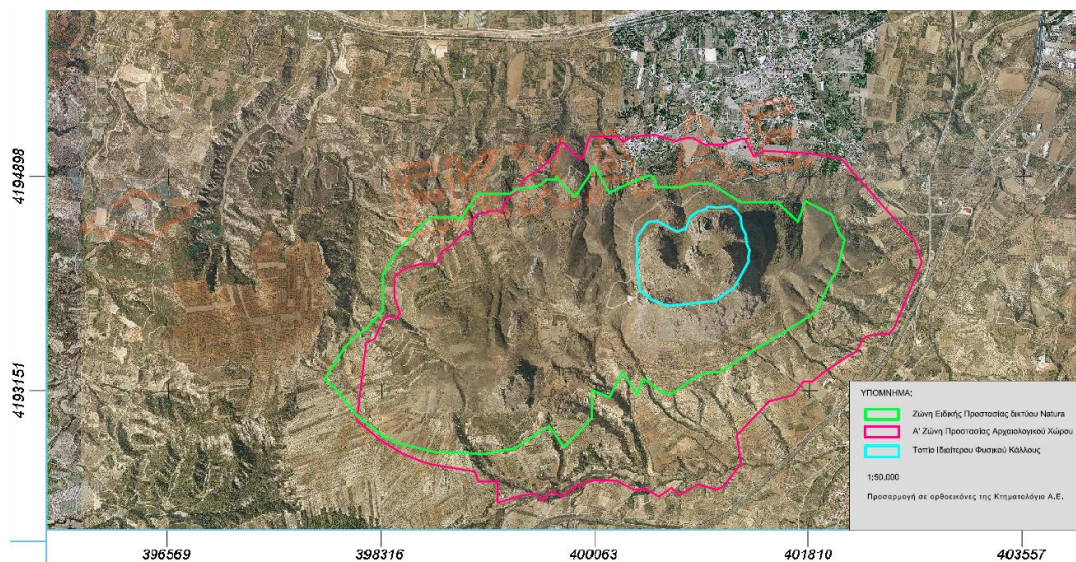
Εικόνα 2-18: Ανατολική όψη



Εικόνα 2-19: Δυτική όψη

2.3 Θεσμική προστασία

Το Πεντεσκούφι και ο Ακροκόρινθος αντιμετωπίζονται ως οργανική ενότητα από την πολεοδομική, περιβαλλοντική και πολιτιστική νομοθεσία και καλύπτονται από ένα πλέγμα προστατευτικών διατάξεων. Η ευρύτερη περιοχή στην οποία εντοπίζονται, έχει χαρακτηριστεί ως **Ειδική Ζώνη Διατήρησης GR2530003-Ακροκόρινθος** κατά το νόμο 3937/11 (ΦΕΚ Α'160)¹⁸, ως **Ζώνη Α' απολύτου προστασίας του κάστρου Ακροκορίνθου** κατά την υπ' αριθμ. ΥΠΠΟ/ΓΔΑΠΚ/ΑΡΧ/Β1/Φ50/67929/3339 (ΦΕΚ ΑΑΠ 7/2006),¹⁹ και ως **Περιοχή Ειδικής Προστασίας (ΠΕΠ)** κατά την υπ' αριθμ. 19379/1207 Απόφαση του Γενικού Γραμματέα της Αποκεντρωμένης Διοίκησης για την Έγκριση του Γενικού Πολεοδομικού Σχεδίου (Γ.Π.Σ.) της Δημοτικής Ενότητας (πρώην Δήμου) Κορινθίων του Δήμου Κορινθίων της Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας (ΦΕΚ ΑΑΠ 255/2013).²⁰



Εικόνα 2-20: Ζώνες προστασίας της περιοχής μελέτης

¹⁸Τα προστατευτέα αντικείμενα για τα οποία έγινε η ένταξη της περιοχής στο ευρωπαϊκό δίκτυο προστατευόμενων περιοχών Natura 2000 ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας, περιλαμβάνουν δυο προστατευτέα είδη πανίδας (1078-*Callimorpha quadripunctaria*, 1218-*Testudo marginata*) και τρεις τύπους οικοτόπων [5420 – Φρύγανα με *Sarcopoterium spinosum*, 8210 – Ασβεστολιθικοί βράχοι με χασμοφυτική βλάστηση 9540 – Μεσογειακά κωνοφόρα δάση με ενδημικά είδη κωνοφόρων].

¹⁹Στην ζώνη Α' απολύτου προστασίας ισχύουν απαγορεύεται οποιαδήποτε αλλοίωση του εδάφους, η δόμηση καθώς και οποιαδήποτε κατασκευή ή διάνοιξη νέων οδών. Οι δασικές εκτάσεις διατηρούν το χαρακτήρα τους, και επιτρέπεται αποκλειστικά η γεωργική χρήση της γης με ανοικτές καλλιέργειες και οι συναφείς με αυτή κατασκευές στις αντίστοιχες εκτάσεις.

²⁰Οι ΠΕΠ του ΓΠΣ στοχεύουν στη συμπληρωματική προστασία του βιοτόπου της Ακροκορίνθου, ενώ οι χρήσεις γης και οι περιορισμοί δόμησης που περιγράφονται στην υπ' αριθμ. απόφαση ΥΠΠΟ/ΓΔΑΠΚ/ΑΡΧ/Β1/Φ50/1498/79 (ΦΕΚ 12Δ'/2008) υπερισχύουν κάθε άλλης που αναφέρεται στην απόφαση. Σημειώνονται η Ζώνη Ζ5 «Προστασίας Ορεινών Όγκων» στην οποία ανήκουν κυρίως δασικές εκτάσεις του Ν.998/79 και Ζώνη Ζ6 «Προστασίας του Φυσικού Περιβάλλοντος» που περιλαμβάνει τον αρχαιολογικό χώρο του Ακροκορίνθου και τη Ζώνη Ειδικής Προστασίας του δικτύου Natura2000.

3 Συλλογή στοιχείων

3.1 Προεργασία

Αναγνώριση περιοχής και αντικειμένου αποτύπωσης

Η αναγνώριση της περιοχής και του αντικειμένου αποτύπωσης είναι σημαντική για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, των κατάλληλων οργάνων και τον σωστό προγραμματισμό των εργασιών. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκαν η προσβασιμότητα περιμετρικά του μνημείου, θέματα ασφάλειας, η ορατότητα μεταξύ στάσεων, η μέγιστη απόσταση λήψης εικόνων, οι πιθανές αποκρύψεις, καταγράφηκαν οι βασικές διαστάσεις του μνημείου, τα πιθανά εμπόδια, και συντάχθηκαν τα πρώτα αυτοσχέδια υπαίθρου.

Διαθέσιμος εξοπλισμός

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός περιλαμβάνει την ψηφιακή μηχανή Canon EOS-1Ds Mark III (Πίνακας 3-1), τέσσερις φακούς 24mm, 50mm, 135mm, 300mm Πίνακας 3-2), τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό Topcon 3003 με τα παρελκόμενά του (Πίνακας 3-3).

Πίνακας 3-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής

Model	FOVCF	Sensor	PixelSize	Pixels/Megapixels	Viewfinder	DLA*
Canon EOS 1Ds Mark III	1.0x	36.0 x 24.0mm	6.4μm	5616 x 3744 21.1	.76x 100%	f/10.2

Πίνακας 3-2: Εστιακή απόσταση και μέγιστη ανάλυση διαθέσιμων φακών

Εστιακή απόσταση	Διαστάσεις εικόνας ²¹	Εστιακή απόσταση	Διαστάσεις εικόνας
16 mm	3504 X 2336 pix 5616 X 3744 pix	50 mm	3504 X 2336 pix 5616 X 3744 pix
18 mm	5616 X 3744 pix	300 mm	5616 X 3744 pix
24 mm	3504 X 2336 pix 5616 X 3744 pix		

Πίνακας 3-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά total station Topcon 3003

Γωνιομετρική ακρίβεια	≤15cc
Ελάχιστη γωνία ανάγνωσης	5"/1"
Εμβέλεια απόστασης με πρίσμα	3000μ
Ακρίβεια μέτρησης απόστασης	±(3mm+2ppm x D)
Ακρίβεια μέτρησης απόστασης χωρίς πρίσμα	≤±5mm
Εμβέλεια μέτρησης απόστασης χωρίς πρίσμα	≤250m

²¹ Αποδίδεται η οριζόντια και κάθετη διάσταση της εικόνας σε pixel. 3504 x 2336 pix = 8.185pix ή 8,2 megarpix και 5616 x 3744=21 megarpix ως ένα μέγεθος ανάλυσης της εικόνας της μηχανής.

Επιλογή μεθόδου αποτύπωσης

Ο προγραμματισμός των εργασιών αποτύπωσης πρέπει να καταλήγει σε επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συλλογής στοιχείων υπαίθρου και του αντίστοιχου εξοπλισμού που ικανοποιούν τις αρχές της αξιοπιστίας, της πληρότητας και της πιστότητας και αποτελούν τη βέλτιστη λύση για τους σκοπούς της αποτύπωσης λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, την πολυπλοκότητα του αντικείμενου καθώς και τη διαθεσιμότητα ανθρώπινου δυναμικού, χρόνου, πόρων κλπ. Επειδή ειδικά οι οχυρωματικές κατασκευές έχουν συνήθως ιδιαιτερότητες στη γεωμετρία τους (πολύπλοκη μορφή, διακοσμητικές λεπτομέρειες) και, κυρίως, βρίσκονται σε δυσπρόσιτες θέσεις συνήθως επιλέγονται συνδυασμοί γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών μεθόδων (T. , Kersten 2004), (Grussenmeyer 2008) που καλύπτουν τις υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας (Linsinger 2005).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η αποτύπωση του κάστρου αξιοποιώντας κυρίως φωτογραμμετρικές τεχνικές. Η χρήση επίγειου σαρωτή laser μπορεί να αποδώσει την απαιτούμενη ακρίβεια αποτύπωσης και την υφή, όμως το απρόσιτο της έκτασης δεν επιτρέπει την τοποθέτηση στάσεων περιμετρικά του κάστρου σε όλη του την έκταση, τουλάχιστον όχι σε θέσεις χωρίς σημαντικές αποκρύψεις. Επιπλέον το απρόσιτο της θέσης του κάστρου καθιστά τη μεταφορά και την τακτική φόρτιση του σαρωτή εξαιρετικά δύσκολη. Αν και η ελεύθερη χρήση της κάμερας απελευθερώνει από τη στατικότητα και το βάρος του επίγειου σαρωτή και ικανοποιεί τις προδιαγραφές ακρίβειας και πληροφορίας υφής, εν τούτοις δεν επιτρέπει τη φυσική παρουσία σε όλες τις κατάλληλες θέσεις για την λήψη των εικόνων. Πλήρης κάλυψη του κάστρου θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με την χρήση εναέριων μέσων. Καθώς η χρήση UAV δεν ήταν δυνατή, η αποτύπωση του κάστρου με επίγεια φωτογραμμετρία αποτέλεσε τη δεύτερη καλύτερη λύση και τελικώς την επιλεγείσα.

Επιλογή λογισμικού επεξεργασίας

Για τη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων διατίθενται διάφορα ελεύθερα και εμπορικά λογισμικά²² **Όρασης Υπολογιστών (CV)** ή **Φωτογραμμετρίας** (στερεοσκοπική φωτογραμμετρία) που βασίζονται σε αλγορίθμους των μεθόδων Structure from Motion (SfM) και Dense MultiView 3D Reconstruction (DMVR). Και τα δύο χρησιμοποιούν αλγορίθμους για τον εντοπισμό και τη συσχέτιση ομόλογων σημείων σε μια σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων για την παραγωγή του νέφους σημείων, τη δημιουργία δικτύου τριγώνων [πολυγωνικό μοντέλο-mesh] μεταξύ των σημείων και την απόδοση χρώματος στην επιφάνεια των τριγώνων. Η διαφορά των δύο ομάδων λογισμικών είναι ότι στην περίπτωση των φωτογραμμετρικών λογισμικών SfM δίνεται μεγαλύτερος έλεγχος παρέμβασης στον χρήστη και εκδίδεται φύλλο ανάλυσης σφαλμάτων για κάποιες από τις παραπάνω διαδικασίες. Και οι δύο παραπάνω δυνατότητες είναι αναγκαίες για τον έλεγχο της γεωμετρίας του τελικού προϊόντος. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει ακόμα σημαντική βιβλιογραφία για την αξιολόγηση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για διαδικασίες με αυξημένες μετρητικές απαιτήσεις, γεγονός που αυξάνει το βάρος του ελέγχου των τελικών προϊόντων (Mahiddine A. 2013).

²² N. Snavely, Bundler: structure from motion for unordered image collections, <http://goo.gl/3lrBBD>, Microsoft Photosynth <http://photosynth.net>, M. Vergauwen, L. VanGool, Web-based 3D reconstruction service, Mach Vision Appl 17 (2006) 411–426, 123D Catch, Autodesk, <http://www.123dapp.com/catch>, Hypr3D, ViztuTechnologies <http://www.hypr3d.com>, Smart3DCapture, Acute3D www.acute3d.com, PhotoModeler Scanner, <http://goo.gl/Gsrfk>

Σύμφωνα με έρευνα-σύγκριση μεταξύ (σχεδόν) φωτογραμμετρικών λογισμικών [AgisoftPhotoscan, Pix4UAV] και λογισμικών όρασης υπολογιστών [Erdas-LPS, EyeDEA (Univ. ofParma)] διαπιστώθηκε ότι και οι δύο κατηγορίες λογισμικών δίνουν πυκνά νέφη σημείων, ψηφιακά μοντέλα επιφανείας (DSM) και στερεομοντέλα με εξωτερικό προσανατολισμό σε καλή ποιότητα. Τα λογισμικά όρασης υπολογιστών είναι απολύτως αυτοματοποιημένα, αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο επεξεργασίας. Τα φωτογραμμετρικά λογισμικά έδωσαν μικρότερα σφάλματα RMSE στα σημεία ελέγχου, ίσως επειδή προβλέπεται μεγαλύτερος έλεγχος του χρήστη. Στην περίπτωση ορθοεικόνων και DSM, το Photoscan έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ειδικά σε σκιασμένες περιοχές (Gini 2013). Σε σύγκριση των παραγόμενων mesh μεταξύ του Agisoft Photoscan και το Autodesk 123D Catch δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές (Rodriguez –Navarro P. 2015). Πρόσφατη εργασία (B. V. Koutsoudis A. 2014) στην οποία συγκρίνεται το τρισδιάστατο mesh που παράγεται με laser scanner με προϊόντα που έχουν παραχθεί από το Photoscan Agisoft καταλήγει ότι το μοντέλο SfM δεν περιέχει αναλογικά σφάλματα (proportional errors). Σύγκριση νεφών σημείων και DSM που παρήχθησαν χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Bundler/PMVS2, Visual SfM, Autodesk Web Service, 123DCatch beta, και Agisoft PhotoScan κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα προϊόντα του επίγειου σαρωτή λέιζερ πετυχαίνουν καλύτερη ακρίβεια (T. K. Kersten 2015). Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης αποτύπωσης θα χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο λογισμικό Agisoft Photoscan, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς με τους οποίους συνοδεύεται.

Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούν αδρομερώς οι αλγόριθμοι που τρέχουν σε κάθε ένα από τα στάδια επεξεργασίας του Agisoft Photoscan, ώστε να ερμηνεύονται καλύτερα τα όρια κάθε διαδικασίας και οι πιθανές πηγές προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν. Καθώς δεν πρόκειται για ανοιχτά λογισμικά μόνο εικασίες μπορούν να γίνουν για τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν. Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται στο Photoscan για την παραγωγή των προϊόντων περιλαμβάνουν τα εξής:²³

²³ Agisoft Community Forum <http://goo.gl/qtwnzG>

Εύρεση ομόλογων σημείων: Κατά το πρώτο στάδιο το PhotoScan χρησιμοποιεί αλγόριθμους τύπου SIFT²⁴ για να ανιχνεύσει ομόλογα σημεία στις εικόνες. Η αντιστοίχιση καθίσταται εφικτή παρά τις πιθανές διαφορές στη φωτεινότητα των εικόνων, στην κλίμακα και τις στροφές κάθε εικόνας, ή στην έντονη εκτροπή αναγλύφου στην περιοχή λήψης. Ο αλγόριθμος καταλήγει στη δημιουργία ενός διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών για κάθε σημείο ενδιαφέροντος (detector). Οι πίνακες διανυσμάτων χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την συντάχηση των σημείων (Αδάμ 2011).]

Εύρεση παραμέτρων εσωτερικού, σχετικού και εξωτερικού προσανατολισμού: Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο τύπου Bundler, δηλαδή χρησιμοποιεί τη μέθοδο των δεσμών για να αναπλάσει την εσωτερική γεωμετρία της κάμερας και τη θέση της στο χώρο τη στιγμή της λήψης, δηλαδή υπολογίζει τις τιμές του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής, του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων.

Ανακατασκευή επιφανειών (Dense surface reconstruction): Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι επεξεργασίας, όπως ο τριγωνισμός Delauney ή η ανακατασκευή επιφάνειας Poisson κ.ά.²⁵ για να συσταθούν τριγωνικές και πολυγωνικές επιφάνειες που συνθέτουν έναν TIN μοντέλο.

Απόδοση υφής (Texture mapping): το PhotoScan παραμετροποιεί μια επιφάνεια, «τεμαχίζοντας» την επιφάνεια του αντικειμένου και «αναμειγνύοντας» τα τεμάχια με τις εικόνες για να αποδώσει την υφή του αντικειμένου.

3.2 Γεωδαιτικές μετρήσεις

Η ίδρυση ενός τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου είναι απαραίτητη για τις ανάγκες της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μιας κατασκευής (Μπαλοδήμος Δ. 2005). Το δίκτυο εξασφαλίζει την οριζοντιογραφική και υψομετρική σύνδεση των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων της κατασκευής και την απόδοση της θέσης των φωτοσταθερών, των χαρακτηριστικών σημείων της κατασκευής.

Η **επιλογή της θέσης των πολυγωνικών κορυφών** είναι το αποτέλεσμα πολλών παραμέτρων. Λαμβάνονται υπόψη το μέγεθος και το σχήμα της κατασκευής, η προσβασιμότητα, η ασφάλεια, η πλήρης κάλυψη του χώρου προς αποτύπωση, η αμοιβαία ορατότητα κάθε στάσης από τουλάχιστον άλλες δύο και κάποια στοιχεία γεωμετρίας, όπως η τοποθέτηση των στάσεων σε θέσεις που διέρχεται το επίπεδο της κατακόρυφης και οριζόντιας τομής και σε περίπου ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι το ζήτημα της ασφάλειας ήταν πολύ σημαντικό ειδικά στο εσωτερικό του κάστρου, γιατί η περιοχή δίπλα στα τείχη είναι σε αρκετά σημεία απότομη και ασταθής. Για την επιλογή των στάσεων στην περιφέρεια του κάστρου κρίσιμη παράμετρος ήταν η αποφυγή του ανώμαλου και ολισθηρού έδαφους που δεν επέτρεπε την εύκολη κέντρωση του οργάνου, η παρουσία πυκνής βλάστησης και οι απότομες κλίσεις που δυσχέραιναν την ορατότητα μεταξύ των στάσεων. Για τις ανάγκες της αποτύπωσης ιδρύθηκε πολυγωνομετρικό δίκτυο 8 στάσεων στο εσωτερικό του κάστρου και 7 στάσεων περιμετρικά [Εικόνα 3-1]. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των στάσεων στο εσωτερικό δίκτυο είναι 12m και στο περιμετρικό 65m. Επειδή

²⁴ SIFT (Scale Invariant Feature Transform) Ανάκτηση από: Lowe, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features Conference on Computer Vision. Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1150-1157.

²⁵ Depth map είναι μια εικόνα ή ένα κανάλι που περιέχει πληροφορία σχετική με την απόσταση των επιφανειών αντικειμένων από το σημείο λήψης της εικόνας. Bump mapping είναι μια τεχνική Γραφικών Υπολογιστή που προσομοιώνει βαθουλώματα και πτυχές στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Heightmap ή heightfield είναι μια raster εικόνα για την αποθήκευση τιμών, όπως τα υψόμετρα, η οποία χρησιμοποιείται για την απόδοση της γεωμετρικής θέσης σημείων σε επιφάνειες και την μετατροπή τους σε 3D δίκτυο (3D mesh). Ανάκτηση από <http://en.wikipedia.org>

καταστράφηκαν οι στάσεις Σ_5 και Π_3 , οι μετρήσεις από και προς τη Σ_5 και την Π_3 χρειάστηκε να επαναληφθούν.

Η **επισήμανση των στάσεων** πρέπει να εξασφαλίζει πλήρως και μονοσήμαντα τη θέση και τη μονιμότητά τους, τουλάχιστον για το διάστημα των μετρήσεων. Για την ελαχιστοποίηση των επεμβάσεων στο μνημείο και την αντιστρεψιμότητα αυτών, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν καρφιά μικρής διαμέτρου σε γωνίες αρμών ή σε λίθους της κατασκευής, χωρίς να προστίθεται επισήμανση με χρώμα, ενώ για τις στάσεις στην περιφέρεια χρησιμοποιήθηκαν ξύλινοι πάσσαλοι και καρφιά.

Οι **μετρήσεις** των αποστάσεων υλοποιούνται με τη χρήση ανακλαστήρα. Για την βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν ειδικοί ανακλαστήρες μικρής διαμέτρου (mini prism) που τοποθετήθηκαν σε τρίποδο. Για τις μετρήσεις ακολουθείται η κλασική **μέθοδος των πολικών συντεταγμένων**. Για την απόδοση της θέσης των στάσεων **μετρούνται** οριζόντιες γωνίες (β), κατακόρυφες γωνίες (z), κεκλιμένα μήκη (S), το ύψος οργάνου YO και το ύψος στόχου YS . Θεωρούνται αυθαίρετως γνωστές οι συντεταγμένες δύο κορυφών του δικτύου βάσει των οποίων γίνεται ο προσανατολισμός του. Επιλέχθηκαν οι στάσεις Σ_1 και Σ_6 . Από τις παρακάτω σχέσεις προσδιορίζονται οι ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y) και το υψόμετρο της σκοπευόμενης θέσης.

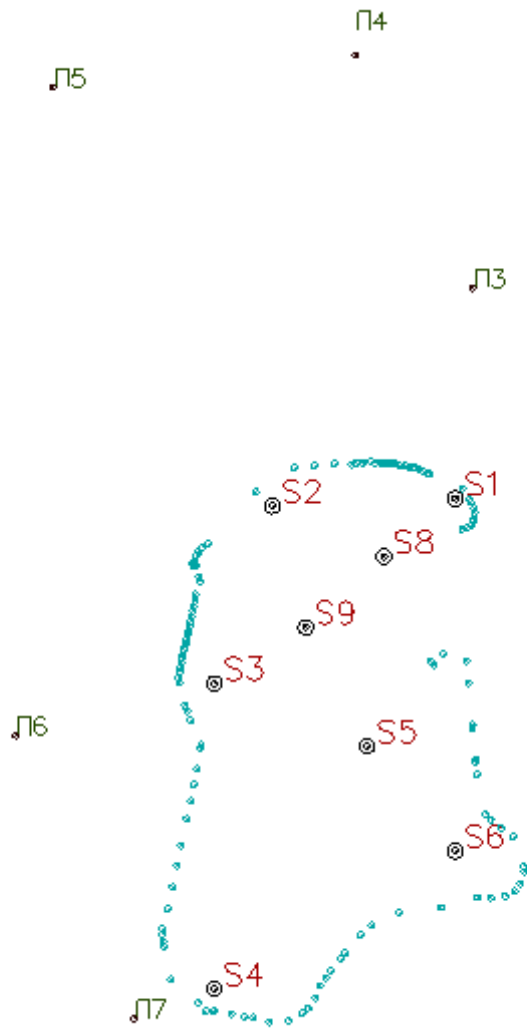
$$y_i = y_{\Sigma i} + S_{\Sigma i} \cos a_{\Sigma i}$$

$$x_i = x_{\Sigma i} + S_{\Sigma i} \sin a_{\Sigma i}$$

$$H_i = H_{\Sigma i} + D_{\Sigma i} \cos z_{\Sigma i} + YO - YS$$

Η αποτύπωση του μνημείου απαιτεί την ίδρυση ενός ενιαίου συστήματος αναφοράς πάνω στο οποίο θα συνδεθούν οι γεωδαιτικές και φωτογραμμετρικές μετρήσεις. Το **σύστημα αναφοράς** είναι τοπικό, δηλαδή δεν θα ενταχθεί στο κρατικό σύστημα αναφοράς. Η παραμόρφωση των μηκών που απαιτεί το προβολικό σύστημα του ΕΓΣΑ87, και προκαλείται με την εισαγωγή της κλίμακας παραμόρφωσης K , δεν εξυπηρετεί για μετρήσεις και επεμβάσεις πάνω στην πραγματικές διαστάσεις του μνημείου. Μόνο το γενικό τοπογραφικό σχέδιο θα πρέπει να είναι ενταγμένο στο ΕΓΣΑ87 αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε διοικητικές διαδικασίες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έγινε εξάρτηση των μετρήσεων από το ΕΓΣΑ87. Η υψομετρική αφετηρία ορίστηκε επίσης αυθαίρετα για τους ίδιους λόγους. Ωστόσο και εφόσον απαιτηθεί, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η ένταξη όλων των σχεδίων στο ΕΓΣΑ87 με τις ελάχιστες δεσμεύσεις.

Απόρροια των παραπάνω είναι η επιλογή της επίλυσης με τις ελάχιστες δεσμεύσεις. Η **επίλυση του δικτύου** γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (MET) με τις ελάχιστες δεσμεύσεις, δηλαδή αίρονται οι ατέλειες θέσης και προσανατολισμού του δικτύου, είτε με την σταθεροποίηση δύο κορυφών του δικτύου, ή με την σταθεροποίηση μια κορυφής και ενός αζιμούθιου και διατηρείται η ατέλεια κλίμακας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα σταθεροποιηθούν δύο κορυφές του δικτύου Σ_1 και η Σ_6 .



Εικόνα 3-1: Σχέδιο δικτύου. Σ1-Σ9 οι στάσεις της εσωτερικής όδευσης, Π3-Π7 οι στάσεις της εξωτερικής όδευσης. Με γαλάζιο χρώμα θέσεις σημείων στην εξωτερική περίμετρο των τοιχών.

3.3 Φωτογραφικές λήψεις

Ο προγραμματισμός και η καλή οργάνωση του δικτύου των φωτοληψιών είναι κρίσιμες παράμετροι για να αποφευχθούν αστοχίες του σχεδίου, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται μη βαθμονομημένες μηχανές, όπως γίνεται συνήθως στην μέθοδο SfM (Nocerino, 2014). Πριν τις φωτογραφικές λήψεις πρέπει να έχει προσδιοριστεί κατ' αρχάς το είδος του φακού που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε θέση, η απόσταση λήψης, η βάση αλληλεπικάλυψης των εικόνων, η πορεία λήψης των εικόνων, κάτι ανάλογο του «προγραμματισμού πτήσης» για τη λήψη αεροφωτογραφιών. Η μέθοδος SfM δίνει μεγάλη ευελιξία, καθώς επιτρέπει τη χρήση εικόνων με κλίσεις (δηλαδή όχι αυστηρά σε κάθετη διεύθυνση ως προς το αντικείμενο αποτύπωσης και με παράλληλους τους άξονες λήψης), με διαφορετική βάση (η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών εικόνων) με διαφορετικό βαθμό επικάλυψης (κατά πλάτος και κατά μήκος) και σε διαφορετική απόσταση λήψης (το αντίστοιχο του ύψους πτήσης). Παρόλα αυτά παραμένουν βασικές γεωμετρικές παραδοχές της διασύνδεσης των εικόνων μεταξύ τους, επομένως δίνεται προσοχή στην λήψη εικόνων γενικά με μεγάλο βαθμό αλληλεπικάλυψης, χωρίς σημαντικές διαφορές στο βάθος λήψης και που καλύπτουν πλήρως όλο το αντικείμενο. Η κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η κλίμακα της εικόνας.

Η **κλίμακα της εικόνας** προσδιορίζεται βάσει της κλίμακας του τελικού προϊόντος δηλαδή της ορθοεικόνας. Δεδομένου ότι το τελικό προϊόν/σχέδια θα έχουν κλίμακα 1:50, η κλίμακα των ορθοεικόνων προγραμματίζεται και αυτή σε 1:50. Οι αρχικές εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή της ορθοεικόνας θα πρέπει να έχουν τέτοια κλίμακα που να υπερκαλύπτει το επίπεδο ανάλυσης της ορθοεικόνας, γιατί οι διάφορες διαδικασίες που μεσολαβούν μέχρι την παραγωγή της ορθοεικόνας προσθέτουν σφάλματα και μειώνουν την ακρίβεια. Συνήθως επιλέγεται μια κλίμακα εικόνας με το υποδιπλάσιο μέγεθος εδαφοψηφίδας, ώστε ενσωματώνονται τα σφάλματα των υπόλοιπων διαδικασιών [Πίνακας 3-4]. Δεδομένου ότι το τελικό προϊόν (διαγράμματα και ορθοεικόνες) θα έχουν κλίμακα 1:50 υπάρχουν αρκετές κλίμακες εικόνας που καλύπτουν την ακρίβεια που απαιτείται.

Πίνακας 3-4: Κλίμακα και μέγεθος εδαφοψηφίδας της τελικής ορθοεικόνας και των εναλλακτικών εικόνων.

Απεικόνιση	Ελάχιστο διακριτό στοιχείο	Κλίμακα	Μέγεθος εδαφοψηφίδας	Σχόλιο για συντελεστή κλίμακας K
Ορθοεικόνα	0.1mm	1:50	50x0,1=5 mm	
Εικόνα	1pix=6.4μm	1:80	80x6.4x10 ⁻³ = 0.51mm	
		1:100	100x6.4x10 ⁻³ = 0.64mm	
		1:200	200x6.4x10 ⁻³ = 1.28mm	
		1:400	400x6.4x10 ⁻³ = 2.56mm	Συνιστώμενος
		1:500	500x6,4x10 ⁻³ = 3.2mm	Επιτρεπτός
		1:780	780x6,4x10 ⁻³ = 5mm	Οριακός

Η κλίμακα της εικόνας καθορίζεται από το είδος του φακού (c) και την απόσταση λήψης (H) μηχανής και επιφάνειας αντικειμένου. Χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση: $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$ προσδιορίζονται οι διαφορετικοί συνδυασμοί φακού και απόστασης λήψης που παράγουν εικόνα με την επιθυμητή κλίμακα. Αυτή η περίπτωση αφορά στη *μέση κλίμακα* και όχι στην πραγματική κλίμακα, αφού όπως προαναφέρθηκε μια εικόνα δεν έχει σταθερή κλίμακα. Παρακάτω σημειώνονται οι οριακές αποστάσεις λήψης και η σχέση τους με τους διαθέσιμους φακούς για την επίτευξη της επιθυμητής ή επιτρεπτής κλίμακας των εικόνων.

Πίνακας 3-5: Συντελεστής κλίμακας εικόνας βάσει διαθέσιμων φακών και απόστασης λήψης. Επιλογές με συντελεστή κλίμακας $K > 780$ δηλαδή πάνω από την οριακή κλίμακα της εικόνας, απορρίπτονται). Συστήνονται συνδυασμοί που δίνουν κλίμακα μέχρι 1:500.

	16 mm	18 mm	24 mm	50 mm	135mm	300 mm
1m	63	56	42	3	7	3
2m	125	111	83	40	15	7
3m	188	167	125	60	22	10
4m	250	222	167	80	30	13
5m	313	278	208	100	37	17
6m	375	333	250	120	44	20
7m	438	389	292	140	52	23
8m	500	444	333	160	59	27
9m	563	500	375	180	67	30
10m	625	556	417	200	74	33
11m	688	611	458	220	81	37
12m	750	667	500	240	89	40
13m	813	722	542	260	96	43
14m	875	778	583	280	104	47
15m	938	833	625	300	111	50
16m	1000	889	667	320	119	53
17m	1063	944	708	340	126	57
18m	1125	1000	750	360	133	60
19m	1188	1056	792	380	141	63
20m	1250	1111	833	400	148	67
25m	1563	1389	1042	500	185	83
30m	1875	1667	1250	600	222	100
50m	3125	2778	2083	1000	370	167
80m	5000	4444	3333	1600	593	267
100m	6250	5556	4167	2000	741	333
120m	7500	6667	5000	2400	889	400
150m	9375	8333	6250	3000	1111	500
200m	12500	11111	8333	4000	1481	667
250m	14375	12778	9583	4600	1704	767
300m	15625	13889	10417	5000	1852	833

Ειδικά για την περίπτωση του ισχυρού τηλεφακού $c=300\text{mm}$ που εξυπηρετεί τις λήψεις των απρόσιτων περιοχών του κάστρου (εξωτερικά ΒΑ τείχη), η μέγιστη απόσταση λήψεων υπολογίζεται στα 150m. Ωστόσο η διαμόρφωση του εδάφους (εμπόδια, μεγάλες κλίσεις) περιμετρικά του κάστρου δεν επιτρέπει την επίτευξη της επιθυμητής κλίμακας για όλες τις εικόνες.

Η κλίμακα της εικόνας προσδιορίζει αντίστοιχα και το **επίπεδο ανάλυσης του 3d μοντέλου**. Η ανάλυση ελέγχεται από το δείκτη Ground Sampling Distance–GSD, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο οποίος ορίζεται ως:

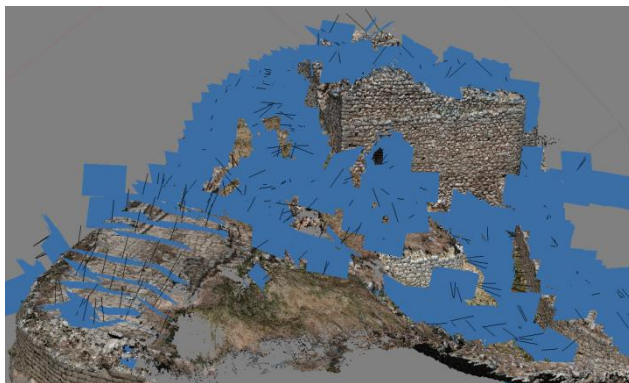
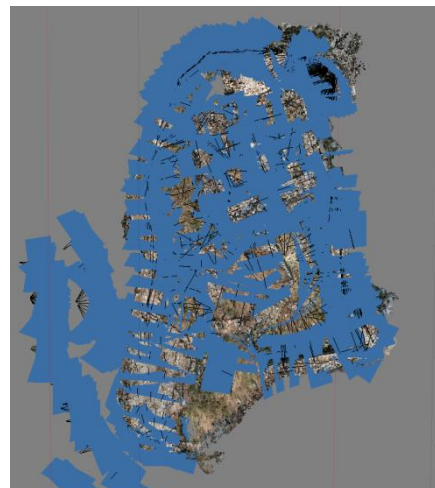
$$GSD = \text{pixel size (mm)} * \frac{H (m)}{c (mm)}$$

Με το δεδομένο ότι το pixel της μηχανής είναι τετράγωνο με πλευρά 6.4 μm προσδιορίζεται το για διαφορετικές κλίμακες εικόνας ως:

Πίνακας 3-6: Προσδιορισμός GSD για διαφορετικές κλίμακες εικόνας

κλίμακα εικόνας	συνιστώμενη	1:400	2,6mm
	επιτρεπτή	1:500	3,2mm
	οριακή	1:780	5,0mm

Σε ό,τι αφορά στις εικόνες, ο αριθμός τους θα πρέπει να είναι τέτοιος που να καλύπτει πλήρως το αντικείμενο. Κάθε σημείο του αντικειμένου θα πρέπει να βρίσκεται σε τουλάχιστον τρεις εικόνες για να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία των εικόνων και για αυτό συνήθως επιλέγεται μεγάλος βαθμός αλληλοεπικάλυψης των εικόνων π.χ. 80%. Ως προς την θέση λήψης των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο αποτύπωσης έγινε προσπάθεια να ακολουθηθούν οι συστάσεις στο εγχειρίδιο του Photoscan για τη βελτιστοποίηση της φωτοληψίας.²⁶ Το αντικείμενο καλύφθηκε από όσες θέσεις ήταν δυνατή η φυσική παρουσία [Εικόνα 3-3, Εικόνα 3-4].

**Εικόνα 3-2:** Η θέση λήψης των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο**Εικόνα 3-3:** Θέσεις λήψης των εικόνων**Εικόνα 3-4:** Θέσεις λήψης των εικόνων

²⁶ Agisoft: Useful Tips on Image Capture: How to Get an Image Dataset that Meets PhotoScan Requirements? <http://goo.gl/pP8NVd>

3.4 Σφάλματα στις εργασίες υπαίθρου

Κατά το σχεδιασμό της όδευσης και την υλοποίηση των γεωδαιτικών μετρήσεων έγιναν μια σειρά παραβλέψεων που κόστισαν σε χρόνο και ενδεχομένως και σε ακρίβεια.

- Η αρχική θέση των στάσεων Σ1 - Σ4 δεν επέτρεπε επαρκή και ασφαλή χώρο εργασιών με το total station. Οι στάσεις μετακινήθηκαν και οι μετρήσεις προς αυτές επαναλήφθηκαν.
- Οι στάσεις Π1 και Π2 τοποθετήθηκαν πολύ μακριά από το αντικείμενο αποτύπωσης και τελικά καταργήθηκαν.
- Οι στάσεις της εξωτερικής όδευσης Π1- Π7 λόγω της μεγάλης κλίσης του εδάφους είχαν κακή ορατότητα με το εσωτερικό δίκτυο και στις περισσότερες θέσεις δεν ήταν εφικτές παρατηρήσεις προς αυτό, ούτε και προς τα φωτοσταθερά που είχαν τοποθετηθεί. Η χρήση αγκωνοειδούς πρίσματος ήταν αναγκαία.
- Η στάση Π6 τοποθετήθηκε σε ολισθηρή επιφάνεια με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά δύσκολη η κέντρωση και κατακορύφωση του οργάνου.
- Στην αρχική εσωτερική όδευση προστέθηκαν στην πορεία δύο στάσεις Σ8 και Σ9 για να καλυφθεί το εσωτερικό του πύργου.
- Η στάση Σ5, η μόνη στάση στη εσωτερική όδευση με ξύλινο πάσσαλο, καταστράφηκε κατά τη διάρκεια καθαρισμών του κάστρου από την τοπική εφορεία και οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν.

Σφάλματα κατά τη φωτοληψία

Παρά τον προηγούμενο σχεδιασμό των λήψεων υπήρχαν σφάλματα στη φωτοληψία που διαπιστώθηκαν κατά την παραγωγή του νέφους σημείων στο Photoscan. Κάποια από τα σφάλματα διορθώθηκαν με επανάληψη των λήψεων, με τη χρήση διαφορετικών φακών ή τη λήψη εικόνων σε πιο πυκνό βήμα. Αιτίες των προβλημάτων αποτέλεσαν:

i. Η απόσταση λήψης των εικόνων

Για την αποτύπωση των Ανατολικών τειχών πραγματοποιήθηκαν λήψεις μεταξύ των 100-280μ ενώ για τον επιθυμητό συντελεστή κλίμακας η απόσταση λήψης με τον 300mm φακό δεν έπρεπε να ξεπεράσει τα 120m. Η κακή ανάλυση του νέφους σημείων της συγκεκριμένης ομάδας εικόνων οφείλεται στη μεγαλύτερη από την επιθυμητή απόσταση λήψης [Εικόνα 3-5, Εικόνα 3-6, Εικόνα 3-7]53. Ωστόσο επειδή το ανάγλυφο της περιοχής στην ανατολική πλευρά δεν επιτρέπει την προσέγγιση του κάστρου στα 100m και τα φυσικά εμπόδια πλησιάζοντας το κάστρο δημιουργούν περισσότερες αποκρύψεις, η απόσταση των λήψεων δεν μπορούσε να φτάσει την επιθυμητή. Η χρήση μεγαλύτερου τηλεφακού ή η εναέρια φωτοληψία από μη επανδρωμένη πλατφόρμα (UAV) θα μπορούσε να διορθώσει το πρόβλημα.

ii. Η θέση λήψης των εικόνων

Κρίσιμες γεωμετρικές λήψεων χαρακτηρίζονται αυτές στις οποίες ο *θεμελιώδης* πίνακας F δεν μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα άρα δεν μπορεί να δοθεί λύση. Τέτοιες προκύπτουν στις περιπτώσεις α. κοινού σημείου λήψης των εικόνων, β. όταν τα κέντρα λήψης και τα ομόλογα σημεία που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του επιτολικού πίνακα ανήκουν σε ευθειογενή επιφάνεια 2ου βαθμού γ. όταν οι ομολογίες σημείων που χρησιμοποιούνται αφορούν συνεπίπεδα σημεία (Αδάμ 2011). Χωρίς τον θεμελιώδη πίνακα

Ε δεν μπορεί να υπολογιστεί η επιπολική γεωμετρία των εικόνων και άρα να τοποθετηθούν σωστά στο χώρο. Τέτοιες λήψεις [Εικόνα 3-8] είτε δεν παράγουν ομολογίες σημείων, είτε παράγουν πολύ θόρυβο, οπότε χρειάστηκε επανάληψη των λήψεων.

iii. Ο βαθμός επικάλυψης των εικόνων

Βασική αρχή της στερεοσκοπικής παρατήρησης είναι να υπάρχει αλληλεπικαλυπτόμενο τμήμα μεταξύ των στερεοζεύγων. Κατά την αποτύπωση των ανατολικών τειχών, η μορφολογία του εδάφους γύρω από το κάστρο εμπόδισε τη σωστή λήψη των εικόνων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επαρκής επικάλυψη μεταξύ δύο ομάδων εικόνων [

Εικόνα 3-9]. Οι εικόνες της ομάδας που δεν προσανατολίστηκαν, διαγράφηκαν.

iv. Ο αριθμός και η κατανομή των φωτοσταθερών

Λόγω υπερβολικής εκτίμησης των δυνατοτήτων του αλγορίθμου δεν καλύφθηκε όλο το κάστρο με φωτοσταθερά, γεγονός που έκανε τις εργασίες της σύνδεσης εικόνων και των chunks δύσκολη. Οι υπολογιστικές ικανότητες του προγράμματος είναι μεγάλες, και ο αριθμός των φωτοσταθερών μπορεί να περιοριστεί αρκετά, αλλά ο κανόνας της σωστής κατανομής και τοποθέτησης φωτοσταθερών παραμένει, ειδικά για αντικείμενα με ακανόνιστο σχήμα, όπως το εν λόγω κάστρο.

v. Ο άξονας λήψης των εικόνων

Κάποιες εικόνες χαρακτηρίζονται από μεγάλη γωνία του άξονα λήψης σε σχέση με την επιφάνεια του αντικείμενου, λόγω της μορφολογίας του εδάφους, της απότομης αλλαγής κλίσης περιμετρικά του κάστρου σε αρκετά σημεία και της ύπαρξης φυσικών εμποδίων (δένδρα, μεγάλοι βράχοι). Ο θόρυβος στο νέφος (διασκορπισμένα σημεία) παρουσιάζεται λόγω της κακής γεωμετρίας λήψης των εικόνων [Εικόνα 3-12, Εικόνα 3-10].

vi. Οι διαφορετικές συνθήκες φωτισμού

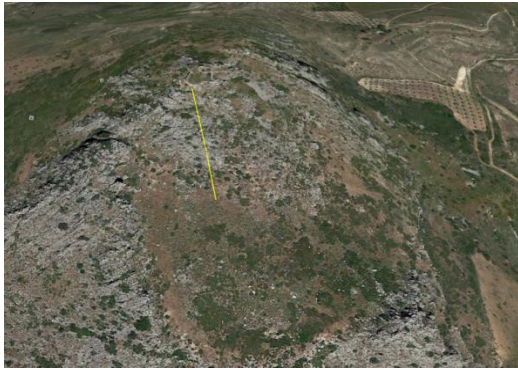
Διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, οδηγούν σε διαφορετική καταγραφή RGB σε κάθε pixel της εικόνας. Όταν χρειάστηκε να ενωθούν δύο ομάδες λήψεων (chunk) που περιλαμβάνουν τμήμα του ίδιου αντικείμενου από προσανατολισμένες εικόνες με διαφορετικό φωτισμό παρουσιάστηκαν προβλήματα. Ιδανικά, η φωτοληψία πρέπει να πραγματοποιείται σε συνθήκες συννεφιάς, οπότε οι διαφορετικές σκιάσεις περιορίζονται ή να λαμβάνεται μέριμνα για παρόμοιες συνθήκες φωτισμού [Εικόνα 3-11].



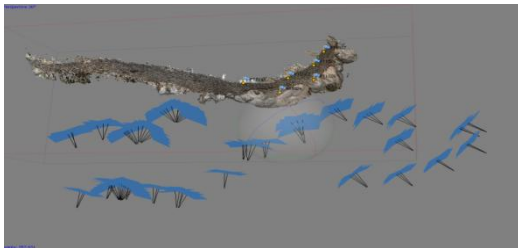
Εικόνα 3-5: Απόσταση λήψης 280m



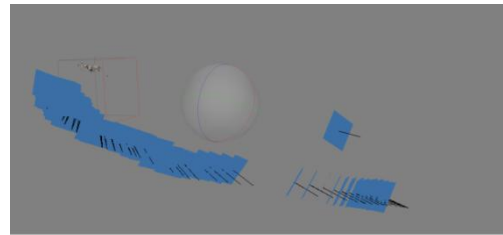
Εικόνα 3-6: Απόσταση λήψης 180m



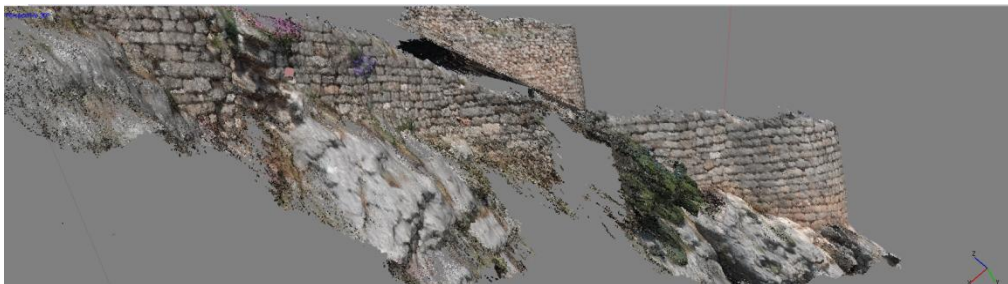
Εικόνα 3-7: Απόσταση λήψης 100m



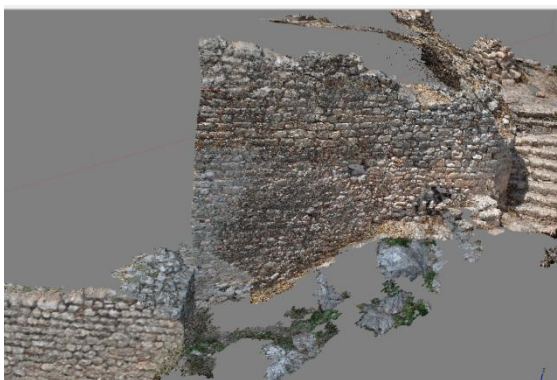
Εικόνα 3-8: Περίπτωση κρίσιμης γεωμετρίας εικόνων που προκύπτει από κοινό σημείο λήψης των εικόνων



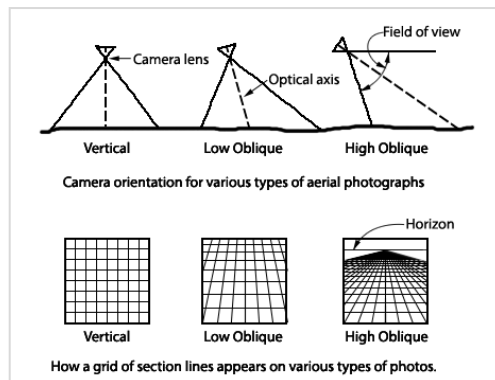
Εικόνα 3-9: Δύο ομάδες εικόνων χωρίς αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Οι εικόνες της δεξιάς ομάδας δεν μπορούν να προσανατολιστούν και αποκλείστηκαν.



Εικόνα 3-10: Θόρυβος –διασκορπισμένα σημεία λόγω γωνίας άξονα λήψης εικόνων



Εικόνα 3-11: Συνένωση νεφών με διαφορετική φωτεινότητα



Εικόνα 3-12: Εναλλακτικές γωνίες άξονα λήψης εικόνων πηγή: courseware.e-education.psu.edu

4 Επεξεργασία στοιχείων

4.1 Επεξεργασία γεωδαιτικών μετρήσεων

Παρακάτω παρατίθενται οι συντεταγμένες των κορυφών και οι παράμετροι επίλυσης του πολυγωνικού δικτύου [Εικόνα 3-1]. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί (Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ. 2010) βρίσκονται στο Κεφ. V.

Οριζοντιογραφική επίλυση κλειστής εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3\Sigma_4\Sigma_5\Sigma_6\Sigma_1$ (εσωτερικό δίκτυο)

Σταθερή κορυφή η Σ_1 (1000,1000,100) και διεύθυνση η $\alpha_{\Sigma_1\Sigma_6}=200g$.

Το συνολικό γωνιακό σφάλμα: $0,0901^g$

Η αναλογική διόρθωση ανά γωνία : $0,0150^g$

Το γραμμικό σφάλμα κατά x και y: $\omega_x=0,0005$ m $\omega_y=0,0022$ m

Το ολικό γραμμικό σφάλμα: $\omega_s=0,002$ m

Γωνία διεύθυνσης του γραμμικού σφάλματος: $\alpha_{\omega_s}=73,6117g$

Το γραμμικό σφάλμα ω_s είναι μικρότερο από το ανεκτό ορισμένο από τις προδιαγραφές (5mm) και γίνεται αποδεκτό.

Οριζοντιογραφική επίλυση ανοιχτής πλήρως εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο $\Sigma_4\Sigma_9\Sigma_8\Sigma_1$ (εσωτερικό δίκτυο)

Οι συντεταγμένες των γνωστών σημείων προέρχονται από την επίλυση της όδευσης στο πολύγωνο $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3\Sigma_4\Sigma_5\Sigma_6\Sigma_1$. Τα γνωστά σημεία Σ_1 και Σ_4 θα εξαρτηθούν από τις κορυφές Σ_6 και Σ_3 αντίστοιχα.

Το γωνιακό σφάλμα $\omega_\beta = -0,0778^g$

Η αναλογική διόρθωση για κάθε γωνία $\delta_\beta = -0,0195^g$

Το γραμμικό σφάλμα κατά x και y : $\omega_x=0,0038$ m $\omega_y=0,0046$ m

Το ολικό γραμμικό σφάλμα $\omega_s=0,0060$ m

Η γωνία διεύθυνσης του σφάλματος είναι: $\alpha_{\omega_s}=42,9553^g$

Το γραμμικό σφάλμα ω_s είναι *οριακά μεγαλύτερο* από το ανεκτό ορισμένο από τις προδιαγραφές (5mm) αλλά θα γίνει αποδεκτό γιατί είναι σχεδόν το μισό από τη μέγιστη γραφική ακρίβεια (1,25cm). Η στόχευση φωτοσταθερών από τις συγκεκριμένες στάσεις θα γίνει με μεγαλύτερη προσοχή για να μην προστεθούν μεγάλα σφάλματα.

Οριζοντιογραφική επίλυση ανοιχτής πλήρως εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο Σ1Π3Π4Π5 Π6 Π7 Σ2 (εξωτερικό δίκτυο)

Οι συντεταγμένες των γνωστών σημείων προέρχονται από την επίλυση της όδευσης στο πολύγωνο Σ₁Σ₂Σ₃Σ₄Σ₅Σ₆Σ₁. Τα γνωστά σημεία Σ1 και Σ4 θα εξαρτηθούν από τις κορυφές Σ6 και Σ3 αντίστοιχα .

Το γωνιακό σφάλμα $\omega_{\beta} = -0,0058^{\text{g}}$

Η αναλογική διόρθωση για κάθε γωνία $\delta_{\beta} = -0,0008^{\text{g}}$

Το γραμμικό σφάλμα κατά x και y : $\omega_x = -0,013\text{m}$ $\omega_y = -0,013\text{m}$

Το ολικό γραμμικό σφάλμα $\omega_s = 0,018\text{m}$

Το γραμμικό σφάλμα ω_s είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη ανεκτή ψηφιακή ακρίβεια (5mm) και οριακά μεγαλύτερο από την μέγιστη γραφική ακρίβεια (1,25cm). Υπό τις δεδομένες συνθήκες και επειδή δεν μπορούν να επαναληφθούν οι μετρήσεις πεδίου θα γίνει αποδεκτό με επιφύλαξη.

Υψομετρική επίλυση κλειστής εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο Σ1 Σ2 Σ3 Σ4 Σ5 Σ6 Σ1 (εσωτερικό δίκτυο)

Το υψομετρικό σφάλμα της όδευσης είναι $\omega_{\Delta\text{H}} = 0.001\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₂ Σ₃ Σ₄ Σ₅ Σ₆ Σ₁, και $\omega_{\Delta\text{H}} = -0.006\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₆ Σ₅ Σ₄ Σ₃ Σ₂ Σ₁ που κατανέμεται ανάλογα με το μέγεθος της κάθε πλευράς.

Το υψομετρικό σφάλμα της όδευσης είναι $\omega_{\Delta\text{H}} = 0.011\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₂ Σ₃ Σ₄ Σ₉ Σ₈ Σ₁, και $\omega_{\Delta\text{H}} = -0.012\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₈ Σ₉ Σ₄ Σ₃ Σ₂ Σ₁ που κατανέμεται ανάλογα με το μέγεθος της κάθε πλευράς.

Υψομετρική επίλυση ανοιχτής πλήρως εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο Σ1 Π3 Π4 Π5 Π6 Π7 Σ2 (εξωτερικό δίκτυο)

Το υψομετρικό σφάλμα της όδευσης είναι $\omega_{\Delta\text{H}} = 0.006\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₂ Π₃Π₄ Π₅Σ₂Σ₁, και $\omega_{\Delta\text{H}} = 0.002\text{m}$ για τη διαδρομή Σ₁ Σ₂Π₅ Σ₄ Π₃Σ₂ Σ₁ που κατανέμεται ανάλογα με το μέγεθος της κάθε πλευράς.

Συντεταγμένες κορυφών όδευσης

	X	Y	H
S1	1000,000	1000,000	100,000
S2	987,926	999,514	101,181
S3	984,094	987,773	101,146
S4	984,093	967,548	101,462
S5	994,183	983,611	99,266
S6	1000,000	976,678	95,673
S8	995,303	996,146	102,693
S9	990,127	991,479	102,718

Πίνακας 4-2: Συντεταγμένες κορυφών κύριας όδευσης

	X	Y	H
Π1	-	-	-
Π2	-	-	-
Π3	1001,158	1013,929	87,589
Π4	993,376	1029,329	80,082
Π5	973,461	1027,216	75,076
Π6	970,966	984,329	90,738
Π7	978,773	965,580	97,154

Πίνακας 4-1: Συντεταγμένες κορυφών δευτερεύουσας όδευσης

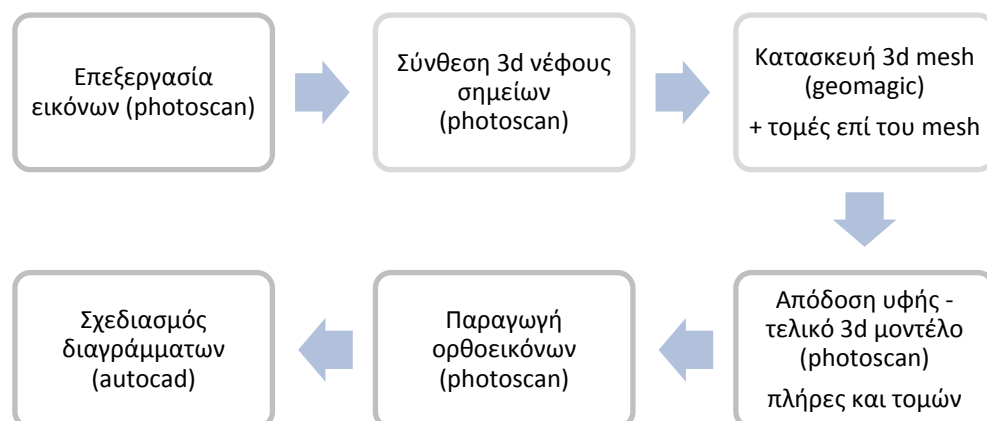
4.2 Επεξεργασία εικόνων

Οι επιλεγμένες εικόνες εισάγονται στο Photoscan και οργανώνονται σε ομάδες (chunk). Για την γρηγορότερη επεξεργασία των εικόνων και για την βελτίωση της ποιότητας του νέφους σχεδιάζονται μάσκες σε τμήματα της εικόνας που είτε δεν ανήκουν στο προς αποτύπωση αντικείμενο π.χ. ουρανός, περιβάλλον χώρος, είτε σε περιοχές με μεγάλη σκίαση. Σημειώνεται ότι οποιαδήποτε επεξεργασία που μπορεί να αλλοιώσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εικόνας π.χ. crop, τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά π.χ. επεξεργασία στο photoshop, ή τον εσωτερικό προσανατολισμό της π.χ. rotate, θα επηρεάσει την αναγνώριση των χαρακτηριστικών σημείων, τη σύνδεση των εικόνων και την παραγωγή του νέφους σημείων.

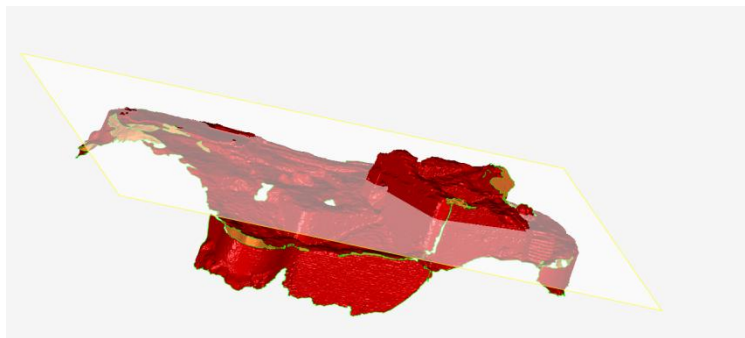
Μετά τον πρώτο προσανατολισμό των εικόνων σε χαμηλή ακρίβεια [Εικόνα 4-4], ακολουθεί η επισήμανση των φωτοσταθερών και χαρακτηριστικών σημείων στις εικόνες. Κατόπιν επαναλαμβάνεται ο προσανατολισμός των εικόνων και παράγεται το πυκνό 3d νέφος σημείων [Εικόνα 4-5]. Η διαδικασία γίνεται σε μικρά chunk που ανταποκρίνονται στη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Εφόσον η ακρίβεια των φωτοσταθερών και η ποιότητα του νέφους είναι ικανοποιητική, τα επιμέρους νέφη ενώνονται μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι η ένωση των επιμέρους τμημάτων του κάστρου μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε από τα στάδια επεξεργασίας του (dense point cloud, mesh, textured mesh). Στη συνέχεια τα νέφη εισάγονται στο πρόγραμμα Geomagic και «καθαρίζονται» από πλεονασματικά ή λάθος προσδιορισμένα σημεία (θόρυβος). Ακολουθεί η παραγωγή του mesh (πλέγμα τριγώνων) και κατόπιν εκτελούνται εργασίες καθαρισμού και συμπληρώματός του. Ο καθαρισμός του mesh γίνεται αφού αυτό χωριστεί σε επιμέρους τμήματα με αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Μετά την εισαγωγή του mesh πίσω στο Photoscan [Εικόνα 4-6] εξετάζεται ξανά η ποιότητά του, αποδίδεται υφή [Εικόνα 4-7] και παράγεται το τελικό 3D μοντέλο και η αναφορά ελέγχου του. Για την παραγωγή των ορθοεικόνων αξιοποιείται η σχετική διαδικασία του Photoscan [Εικόνα 4-8].

Αναλυτικές πληροφορίες με τις εργασίες για την επεξεργασία των εικόνων και την παραγωγή του τελικού 3D μοντέλου παρατίθεται στα κεφάλαια III και IV.

Διάγραμμα ροής 1: στάδια επεξεργασίας εικόνων και παραγωγής 3d μοντέλου



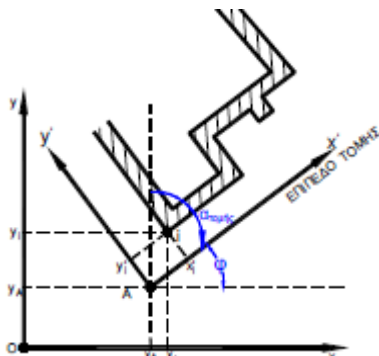
Για τα 2D διαγράμματα τομής πρέπει να παραχθούν οι αντίστοιχες ορθοεικόνες. Καθώς οι τα ίχνη των τομών δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν με αυστηρή γεωμετρία, μπορούν να αξιοποιηθούν τα σχετικά εργαλεία του Geomagic. Το πλήρες mesh του κάστρου εισάγεται στο Geomagic και ρυθμίζεται η θέση και διεύθυνση των επιφανειών τομής [Εικόνα 4-1, Εικόνα 4-2]. Από το Geomagic εξάγονται και οι γραμμές τομής ως αρχείο .igs. Το τετμημένο mesh επανεισάγεται στο Photoscan και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία παραγωγής ορθοεικόνας [Εικόνα 4-9]. Η τελευταία μαζί με την γραμμή τομής εισάγεται στο AutoCAD και σχεδιάζεται το τελικό διάγραμμα. Σημειώνεται ότι ειδικά για τις κατακόρυφες τομές πρέπει να προηγηθεί στροφή του συστήματος σε αυτό του επιπέδου της τομής για να αποδίδονται σωστά τα υψόμετρα. Ανάλογα με την πλευρά που αποδίδεται: $\phi_{\text{στροφής}} = \alpha_{\text{τομής}}$ ή $\phi_{\text{στροφής}} = \alpha_{\text{τομής}} - 100^\circ$ ώστε ο άξονας y ή ο άξονας x αντίστοιχα να γίνει παράλληλος στο επίπεδο τομής. [Εικόνα 4-3]



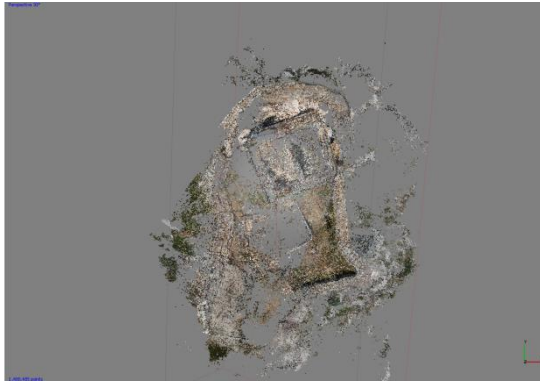
Εικόνα 4-1: Επίπεδο τομής – στιγμιότυπο Geomagic



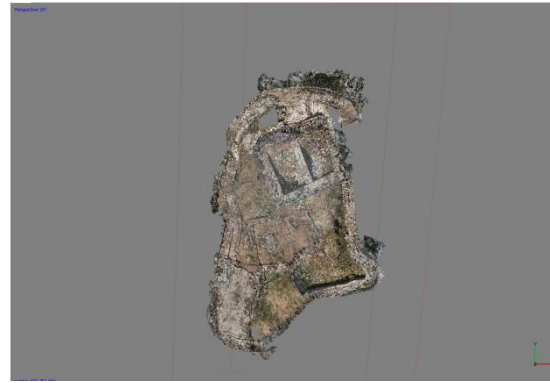
Εικόνα 4-2: Επίπεδο τομής



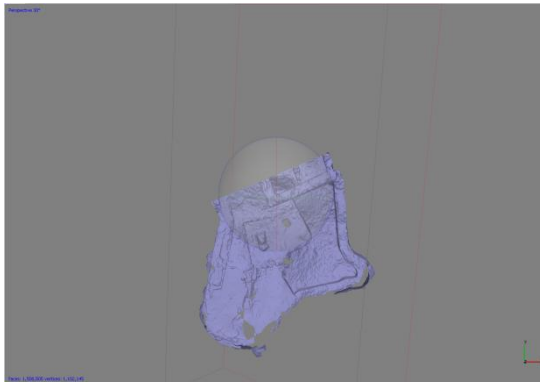
Εικόνα 4-3: στροφή συστήματος για κατακόρυφες τομές. (Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ. 2010)



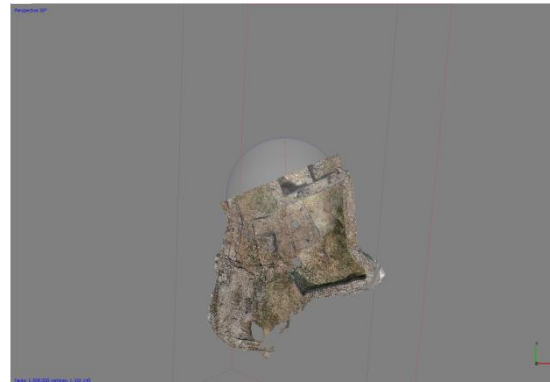
Εικόνα 4-4: Νέφος tie points



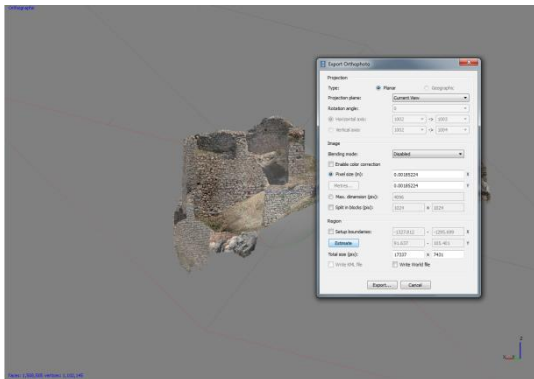
Εικόνα 4-5: Dense Cloud



Εικόνα 4-6: Mesh τομής



Εικόνα 4-7: Textured Mesh τομής



Εικόνα 4-8: Παράμετροι παραγωγής ορθοεικόνας



Εικόνα 4-9: Ορθοεικόνα τομής (.tif)

4.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων - Αναφορά Photoscan

Η τελική αναφορά του Photoscan παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας της διαδικασίας παραγωγής του 3D μοντέλου σχετικά με την φωτοληψία, την βαθμονόμηση των μηχανών, την ανάλυση κ.ά.. Ειδικότερα:

Φωτοληψία

Η διαδικασία της φωτοληψίας, κρίνεται σε μεγάλο βαθμό επαρκής και πλήρης καθώς ο αριθμός, η θέση, η ανάλυση των εικόνων και η κάλυψη του αντικειμένου πληρούν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Ειδικότερα:

Number of images/Camera stations: χρησιμοποιήθηκαν 818 εικόνες από 818 διαφορετικές θέσεις λήψης, γιατί προηγήθηκε η αφαίρεση των εικόνων χωρίς καλή γεωμετρία λήψης. Αναφορικά με τη θέση των εικόνων και την κάλυψη του αντικειμένου από αυτές [**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**], σημειώνεται ότι κάθε τμήμα του αντικειμένου καλύπτεται από περισσότερες από εννιά εικόνες. Επειδή το τεθέν κατώφλι είναι οι τρεις, η κάλυψη του αντικειμένου κρίνεται επαρκής. Η σχετική απόσταση των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο δίνει κάποιες πληροφορίες για την κλίμακα των εικόνων χωρίς αριθμητική πληροφορία για την απόσταση λήψης.

Tie pts/Projections: Εντοπίστηκαν 1,5 εκ ομολογίες σημείων

Ground resolution: Η εδαφοψηφίδα της εικόνας 0.00188678 m/pix είναι μικρότερη από τη συνιστώμενη (βλ.Κεφ.1.3), επομένως η συνιστώμενη κλίμακα των εικόνων έχει επιτευχθεί.

Error: το σφάλμα θέσης της μηχανής είναι μικρότερο από τη χωρική ανάλυση της εικόνας, δηλαδή μικρότερο από 1pix.

Number of images:	818	Camera stations:	818
Flying altitude:	28.1528m	Tie-points:	1.488.485
Ground resolution:	0.00188678 m/pix	Projections:	4.751.339
Coverage area:	0.0005612sq km	Error:	0.674693 pix

Πίνακας 4-3: Πληροφορίες φωτοληψίας. Αναφορά Photoscan

Βαθμονόμηση μηχανής

Το Photoscan παρέχει τη δυνατότητα βαθμονόμησης των μηχανών, επιτρέποντας έτσι τη χρήση μη μετρητικών μηχανών. Η αναφορά παρέχει πληροφορίες για τα στοιχεία κάθε συνδυασμού μηχανής και φακού [Εικόνα 4-11], δηλαδή τα στοιχεία της βαθμονόμησης²⁷ όπου F_x , F_y οι διευθύνσεις της σταθεράς της μηχανής $c=f$, C_x , C_y : οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, K1-K4 και P1-P2 τα στοιχεία του πολωνύμου της ακτινικής απόστασης (Δr) Skew: η απόκλιση των αξόνων του pixel από το ορθογώνιο σχήμα. Για κάθε συνδυασμό μηχανής-φακού δίνεται διάγραμμα στο οποίο παριστάνονται με κόκκινα ευθύγραμμα τμήματα οι αποκλίσεις/τα υπόλοιπα των συντεταγμένων της εικόνας.

²⁷ δηλαδή της σταθεράς της μηχανής c , τη θέση x_0 , y_0 του πρωτεύοντος σημείου και του πολωνύμου της ακτινικής διαστροφής που καθορίζουν το μοντέλο της κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα τη συγκεκριμένη μηχανή.

Η ακρίβεια των συντεταγμένων της εικόνας δίνεται από το a posteriori τυπικό σφάλμα της κάθε μέτρησης ως $\hat{\sigma}_i = \hat{\sigma}_o \sqrt{q_{ii}}$ όπου q_{ii} είναι τα στοιχεία της διαγωνίου του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας V_x . Αν ο τριγωνισμός με τη μέθοδο των δεσμών χρησιμοποιεί μόνο ισοβαρείς παρατηρήσεις (οι παρατηρήσεις είναι οι συντεταγμένες σημείων στην εικόνα), τότε το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους, το $\hat{\sigma}_o$ δίνει την ακρίβεια του συνδυασμού της μηχανής και *image measuring device*. Στην περίπτωση που οι αποκλίσεις, τα a posteriori σφάλματα δεν είναι παρόμοιες προς τις δυο διαστάσεις, δηλαδή κατά x και κατά y, υπονοείται η παρουσία συστηματικών σφαλμάτων (Luhman 2006). Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις σε όλα τα διαγράμματα δεν υπερβαίνουν το 1 pix και επομένως δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα.

Φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου

Επιλέχθηκαν 18 φωτοσταθερά και 24 σημεία ελέγχου για την τελική επίλυση με σφάλμα σε pix και σε m μικρότερο από αυτό που προβλέπουν οι προδιαγραφές

σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_{xyz} (m)	σ_{xyz} (pix)
2,6mm	2.03mm	2.6mm	4.2mm <5mm	0.4mm <1pix

Πίνακας 4-4: Σφάλματα φωτοσταθερών

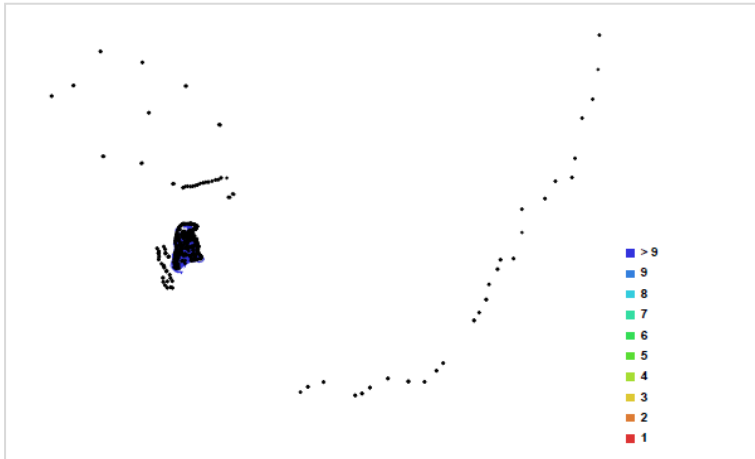
σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_{xyz} (m)	σ_{xyz} (pix)
9.4mm	14.4mm	10.6mm	2cm>5mm και 1.3cm	0.4mm <1pix

Πίνακας 4-5: Σφάλματα σημείων ελέγχου

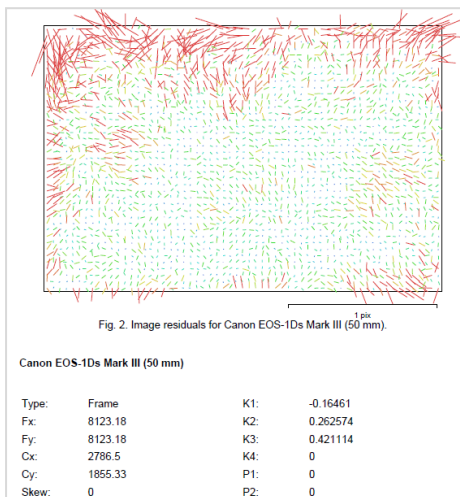
Τα σφάλματα αφορούν στην θέση των συγκεκριμένων σημείων και από τη στιγμή που η κατανομή τους δεν ήταν ομοιόμορφη δεν μπορούν να εκφράσουν με ασφάλεια την ακρίβεια όλων των σημείων του μοντέλου. Οι τιμές μπορούν να αποδώσουν πλασματική τιμή για την ακρίβεια, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο III. Επίσης να σημειωθεί ότι ειδικά τα φωτοσταθερά και χαρακτηριστικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό του mesh του Ανατολικού Τείχους (FT614, fp604, fp605, fp608) παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα προβολής που επηρεάζει όλο το μοντέλο [**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**]. Όταν εξαιρεθούν από την επίλυση τα συγκεκριμένα σημεία η ακρίβεια του μοντέλου φτάνει τα 0,004m και τα 0,44pix. Επομένως το τμήμα που κάστρου που καλύπτεται από το chunk «Ανατολικά τείχη» και καλύπτει το ανατολικό τείχος και την είσοδο έχει απόκλιση της τάξης των 2-6cm.

<input type="checkbox"/>	FT604	987.012000	980.301000	100.294000	0.019349	4	0.974
<input type="checkbox"/>	FT603	987.499000	978.305000	100.607000	0.007342	4	0.995
<input type="checkbox"/>	FT215	987.328000	992.839000	103.724000	0.013228	7	1.064
<input type="checkbox"/>	FT611	982.049000	971.672000	101.390000	0.008125	4	1.073
<input checked="" type="checkbox"/>	fp604	984.751883	992.077844	101.471498	0.003770	8	5.067
<input checked="" type="checkbox"/>	fp605	984.592625	992.232164	101.386608	0.021353	7	6.388
<input checked="" type="checkbox"/>	FT614	984.165627	994.560286	101.283544	0.058284	7	10.395
<input checked="" type="checkbox"/>	fp608	984.285253	992.214668	101.642007	0.022669	8	12.650
Total Error					0.010821		4.110
Scale Bars		Distance (m)				Error (m)	

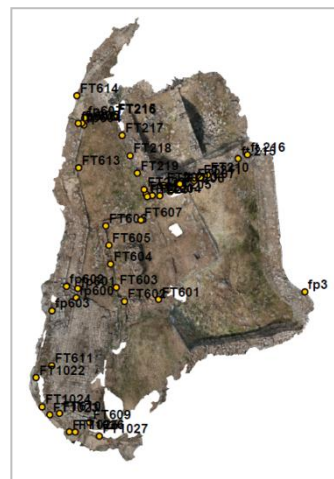
Εικόνα 4-10: Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό του mesh του Ανατολικού Τείχους παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα προβολής που επηρεάζει όλο το μοντέλο



Εικόνα 4-15: Η θέση των εικόνων σε σχέση με το αντικείμενο



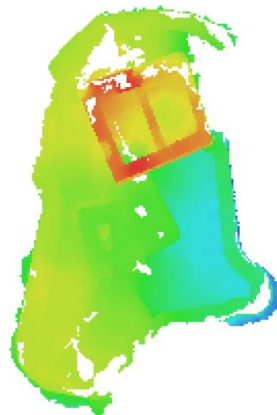
Εικόνα 4-11: Πληροφορίες για τις παραμέτρους της μηχανής.



Εικόνα 4-12: Κατανομή φωτοσταθρών σε τμήμα του κάστρου



Εικόνα 4-13: Ορθοεικόνα



Εικόνα 4-14: DEM σε κάτοψη

5 Έλεγχος και αξιολόγηση διαγραμμάτων και 3D μοντέλου

Ο έλεγχος των παραγόμενων διαγραμμάτων και του 3D μοντέλου για πιθανά σφάλματα και παραλείψεις είναι απαραίτητος. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, λόγω παραλείψεων, εσφαλμένων επιλογών, και εν γένει προβληματικών χαρακτηριστικών του αντικειμένου αποτύπωσης, τα κριτήρια ποιοτικού ελέγχου της ακρίβειας, πληρότητας και πιστότητας έχουν ικανοποιηθεί μερικώς.

5.1 Ακρίβεια

Ο έλεγχος της ακρίβειας γίνεται εξετάζοντας, στην περίπτωση του 3D μοντέλου :

- i. την ανάλυση του mesh ή το δείκτη GSD
- ii. το σφάλμα επαναπροβολής των φωτοσταθερών

ενώ για τα διαγράμματα τομής ελέγχεται

- iii. το a posteriori τυπικό σφάλμα μεταξύ των γεωδαιτικών συντεταγμένων φωτοσταθερών που μετρήθηκαν στο πεδίο και των αντίστοιχων τιμών τους στην ορθοεικόνα
- iv. η ταύτιση της γεωμετρικής πληροφορίας μεταξύ των διαγραμμάτων

3D μοντέλο

Σύμφωνα με την αναφορά του Photoscan, η **ανάλυση του μοντέλου** (ή το GSD) είναι 2mm ανά pix (βλ. Κεφ. VI). Το GSD για κλίμακα της εικόνας 1:400, που αποτελεί τη συνιστώμενη κλίμακα (βλ. Κεφ.3.3), είναι 2.6mm [Πίνακας 3-6]. Επομένως το GSD είναι αρκετά πυκνό και εντός προδιαγραφών.

Το **σφάλμα επαναπροβολής των φωτοσταθερών** είναι $\sigma_{xyz} = \pm 4\text{mm}$ [Πίνακας 4-4] ενώ η ακρίβεια που προσδιορίστηκε από τις προδιαγραφές είναι $\pm 5\text{mm}$. Επομένως η ακρίβεια των φωτοσταθερών (ή το σφάλμα επαναπροβολής τους) στο σύνολο του κάστρου είναι ικανοποιητική και επίσης μέσα στα όρια των προδιαγραφών.

Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή των ανατολικών τειχών. Για την παραγωγή ορθοεικόνας με ακρίβεια 5mm, η μέγιστη, οριακή απόσταση λήψης εικόνων με φακό 300mm, που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη του συγκεκριμένου τμήματος, είναι 230m. Η συγκεκριμένη απόσταση δίνει κλίμακα εικόνας 1:767 και εδαφοψηφίδα περίπου 5mm. Μεγαλύτερη απόσταση μικραίνει την εδαφοψηφίδα. Στο συγκεκριμένο τμήμα η λήψη αρκετών εικόνων έγινε από μεγαλύτερη απόσταση, με αποτέλεσμα η κλίμακα να είναι μικρότερη από την ενδεδειγμένη. Το παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση φωτοσταθερών στη συγκεκριμένη πλευρά, λόγω της τοπογραφίας του εδάφους (μεγάλη κλίση, ανώμαλο έδαφος), οδήγησε σε μεγάλη αβεβαιότητα κατά τη σκόπευση των χαρακτηριστικών σημείων πάνω στις εικόνες ($\sigma_{xyz} = \pm 1,4\text{cm}$). Επιπλέον δεν υπήρχε επικαλυπτόμενο τμήμα μεταξύ των αντίστοιχων σειρών εικόνων του κάστρου και των ανατολικών τειχών που θα διευκόλυε τη σύνδεση τους. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας τα σημεία σύνδεσης της σειράς των ανατολικών τειχών δεν συμπεριελήφθησαν στην

επίλυση του κάστρου ως φωτοσταθερά, αλλά ως σημεία ελέγχου. Αυτό αιτιολογεί το μεγάλο σφάλμα επαναπροβολής των σημείων ελέγχου στα $\sigma_{xyz} = \pm 2\text{cm}$.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το ολικό γραμμικό σφάλμα στην περιμετρική όδευση (Π_3 - Π_7) που υπολογίστηκε σε $\omega_s=0,018\text{m}$, ήταν *μεγαλύτερο* από τη μέγιστη ανεκτή ψηφιακή ακρίβεια (5mm) και οριακά μεγαλύτερο από την μέγιστη γραφική ακρίβεια (1,25cm) [βλ.Κεφ.4.1]. Επομένως φωτοσταθερά που μετρήθηκαν στα εξωτερικά τείχη του κάστρου και χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση των σειρών εικόνων με αυτό του κάστρου παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας που μεταφέρεται και στην ακρίβεια της τελικής θέσης των συγκεκριμένων τμημάτων.

Διάγραμμα οριζόντιας τομής

Ο έλεγχος της ακρίβειάς τους μπορεί να γίνει κατ' αρχάς συγκρίνοντας τη θέση φωτοσταθερών στην ορθοεικόνα και των αντίστοιχων γεωδαιτικών συντεταγμένων τους. Εφόσον η ποιότητα της εικόνας το επιτρέπει μπορεί να διακριθεί η απόσταση μεταξύ του μετρημένου σημείου και του αντίστοιχού του στην εικόνα π.χ. οι συντεταγμένες μιας στάσης και η εικόνα του καρφιού που την ορίζει.



Εικόνα 5-1: Η εικόνα του καρφιού της στάσης Σ4, όπως φαίνεται στην ορθοεικόνα και η θέση του αντίστοιχου σημείου σύμφωνα με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Ο κατ' εξοχήν έλεγχος για την οριζοντιογραφική ακρίβεια γίνεται εξετάζοντας τα σφάλματα μεταξύ της θέσης των φωτοσταθερών όπως αποτυπώνεται στην ορθοεικόνα και της αντίστοιχης θέσης τους, μετρημένη στο πεδίο.

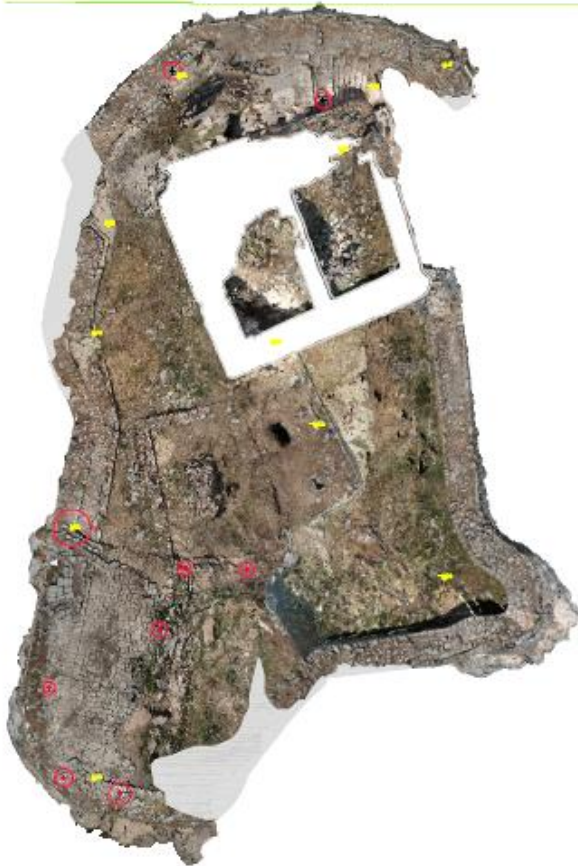
Πίνακας 5-1: τυπικό σ_a posteriori σφάλμα (σ_a posteriori) σημείων ελέγχου οριζοντιογραφίας

	γεωδαιτικές συν/νες στην ορθοεικόνα		γεωδαιτικές συν/νες μετρημένες στο πεδίο		διαφορά (υπόλοιπα)		σ^2			
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y		
FT602	988.1835	977.1042	FT602	988.1994	977.1188	-0.0159	-0.0146	0.0003	0.0002	
FT612	983.1001	978.9554	FT612	983.0899	978.9642	0.0102	-0.0088	0.0001	0.0001	
FT601	991.0225	977.0397	FT601	991.0857	977.3077	-0.0632	-0.2680			
FT611	982.0468	971.6635	FT611	982.0444	971.6773	0.0024	-0.0138	0.0000	0.0002	
FT608	987.0458	974.3088	FT608	987.0375	974.3235	0.0083	-0.0147	0.0001	0.0002	
FT610	982.7054	967.5865	FT610	982.7014	967.6312	0.0040	-0.0447	0.0000	0.0020	
FT609	985.2659	966.8642	FT609	985.2451	966.8724	0.0208	-0.0082	0.0004	0.0001	
S4	984.0963	967.5501	S4	984.0932	967.5479	0.0031	0.0022	0.0000	0.0000	
								$\Sigma=$	0.0009	0.0028
								$n=$	7	7

σ_x	σ_y
0.012m	0.022m

Στη οριζοντιογραφία [Εικόνα 5-2] διακρίνονται 8 φωτοσταθερά. Σημειώνεται ότι στην επίλυση του mesh συμπεριλήφθηκε μόνο το FT610, τα FT 608, FT612 και η S4 εξαιρέθηκαν τελείως, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα σημεία χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία ελέγχου. Τα pt1

και pt4 είναι φωτοσταθερά που αν και φαίνονται στην ορθοεικόνα, δεν συνοδεύονται από γεωδαιτικές μετρήσεις στο πεδίο.



Εικόνα 5-2: θέσεις σημείων ελέγχου (με κόκκινο)

Όπως αναμενόταν, το μικρότερο σφάλμα προέρχεται από τη στάση Σ4, στην οποία η κατακόρυφωση και οριζοντίωση του καταφώτου είναι πολύ καλύτερη από ό,τι κατά τη μέτρηση των φωτοσταθερών. Το σημείο pt5 παρουσιάζει πολύ μεγάλα σφάλματα, της τάξης των 2-6cm. Προφανώς αποτελεί παρατήρηση με χονδροειδές σφάλμα και θα εξαιρεθεί της επίλυσης. Επίσης παρατηρείται ότι τα υπόλοιπα κατά Y έχουν όλα αρνητικές τιμές, κάτι που μπορεί να υποκρύπτει κάποιο συστηματικό σφάλμα.

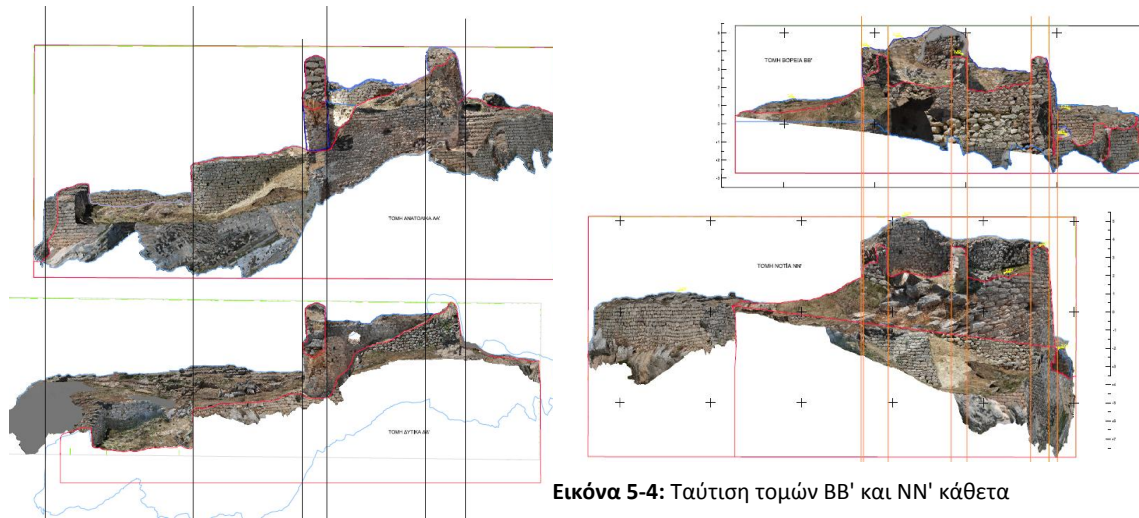
Παρατηρείται ότι το a posteriori τυπικό σφάλμα των μετρήσεων κατά X πληροί τις προδιαγραφές των διαγραμμάτων, δηλαδή ακρίβεια 1.3cm, όχι όμως και το αντίστοιχο κατά Y. Επομένως τα συγκεκριμένα διαγράμματα θα πρέπει είτε να τυπωθούν σε μικρότερη κλίμακα.

Διαγράμματα κατακόρυφης τομής

Η εξαγωγή των ορθοεικόνων από το Photoscan συνοδεύεται από ένα αρχείο με πληροφορίες γεωναφοράς τους, δηλαδή τις στροφές της εικόνας και τη θέση του πρώτου ριχελ ξεκινώντας από επάνω αριστερά. Στην περίπτωση των κατακόρυφων τομών το επίπεδο τομής δεν ταυτίζεται με κάποιο από τα επίπεδα XY, XZ, YZ του συστήματος αναφοράς του αντικειμένου, αλλά εισάγεται ένα νέο τοπικό σύστημα για κάθε τομή ξεχωριστά. Ο έλεγχος ότι η κλίμακα των ορθοεικόνων έχει διατηρηθεί, γίνεται ταυτίζοντας τη γεωμετρική πληροφορία του διαγράμματος της οριζόντιας τομής με αυτή των κατακόρυφων τομών, τοποθετώντας κατάλληλα τις εικόνες (στραμμένες και μετακινημένες

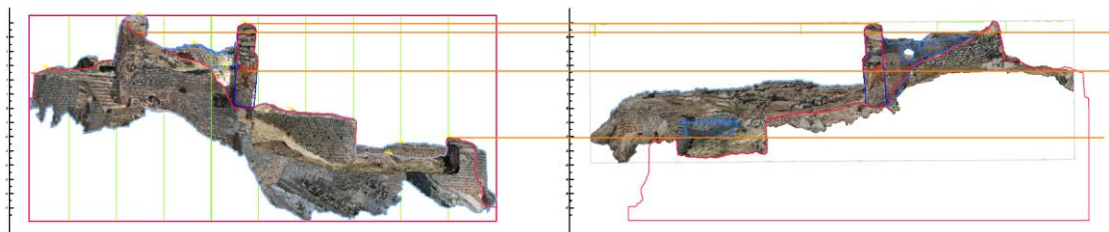
στο AutoCAD). Ομοίως εξετάζονται οι κατακόρυφες τομές μεταξύ τους και ελέγχονται κατά μήκος και καθ' ύψος [Εικόνα 5-3, Εικόνα 5-5, Εικόνα 5-4]. Θεωρητικά επειδή οι τομές έχουν προέλθει όλες από το ίδιο στερεό αντικείμενο και όχι από ενσωμάτωση διαφορετικών μεθόδων μέτρησης, απολαμβάνουν το ίδιο επίπεδο ακρίβειας με το αντικείμενο από το οποίο προήλθαν. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν επαρκή φωτοσταθερά, εμφανή και μετρημένα για να γίνει πλήρης έλεγχος όλων των διαγραμμάτων τομής. Στην ορθοεικόνα για το διάγραμμα τομής NN' παρατηρούνται 6 φωτοσταθερά, ενώ στις υπόλοιπες ορθοεικόνες μόλις 1-3.

Ωστόσο για να διασφαλιστεί ότι κατά την εξαγωγή της ορθοεικόνας διατηρείται ο κρίσιμος παράγοντας της κλίμακας, κρίθηκε αναγκαίο να γίνουν όλοι οι παραπάνω έλεγχοι.



Εικόνα 5-4: Ταύτιση τομών ΒΒ' και ΝΝ' κάθετα

Εικόνα 5-3: Ταύτιση τομών ΑΑ' και ΔΔ' κάθετα



Εικόνα 5-5: Ταύτιση τομών ΑΑ' και ΔΔ' οριζόντια

Στην περίπτωση των κατακόρυφων τομών απαιτούνται κάποιες πρόσθετες εργασίες. Το επίπεδό τους δεν συμπίπτει με το ΧΖ ή ΥΖ επίπεδο του συστήματος αναφοράς του κάστρου επειδή οι τομές έχουν ληφθεί σε στροφή. Επομένως πριν την σύγκριση οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων της τομής πρέπει να ενσωματώσουν την στροφή του συστήματος.

Για θετική στροφή γύρω από τον άξονα Ζ (στροφή κ), ο πίνακας στροφής είναι:

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 και η αλλαγή των συντεταγμένων των σημείων της τομής είναι αντίστοιχα:

Πίνακας 5-2: Συντεταγμένες σημείων τομών

ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΤΟΜΗ				Συντεταγμένες μετά την στροφή			
Συντεταγμένες πριν την στροφή				Συντεταγμένες μετά την στροφή			
	X	Y	Z	X = Y'	Y = Z'	Z = X'	
ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΤΟΜΗ				ΣΗΜΕΙΑ ΔΥΤΙΚΗ ΤΟΜΗ			
φ=22.775g				φ=225.775g			
point 1	991.8687	987.8932	102.9926	point 1	-517.3257	102.9926	-1300.8115
point 2	992.2862	986.8916	103.0598	point 2	-516.2406	103.0598	-1300.8007
point 3	992.2997	986.8633	103.5984	point 3	-516.2092	103.5984	-1300.8020
point 4	991.8715	987.8916	103.6423	point 4	-517.3231	103.6423	-1300.8135
ΣΗΜΕΙΑ ΒΟΡΕΙΑ ΤΟΜΗ				ΣΗΜΕΙΑ ΝΟΤΙΑ ΤΟΜΗ			
φ=25.8660g				φ=125.8660g			
point 4	993.2826	991.2632	101.9520	point 4	1304.1804	101.9520	-518.0026
point 5	994.0552	991.5740	101.9107	point 5	1305.0129	101.9107	-517.9828
point 6	994.0636	991.5737	102.7728	point 6	1305.0205	102.7728	-517.9792
point 7	993.2988	991.2444	102.7923	point 7	1304.1878	102.7923	-517.9789
point 4	993.2826	991.2632	101.9520	point 4	-1304.1804	101.9520	-518.0026
point 5	994.0552	991.5740	101.9107	point 5	-1305.0129	101.9107	-517.9828
point 6	994.0636	991.5737	102.7728	point 6	-1305.0205	102.7728	-517.9792
point 7	993.2988	991.2444	102.7923	point 7	-1304.1878	102.7923	-517.9789

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των τομών σημειώνεται ότι οι μετρημένες γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών έχουν στραφεί στο σύστημα της τομής. Μόνο στην ορθοεικόνα της τομής NN' εντοπίζονται επαρκή φωτοσταθερά για έλεγχο. Το τυπικό σ_{posterio} σφάλμα στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται $\sigma_x = \pm 1,3\text{cm}$ και $\sigma_y = \pm 1,4\text{cm}$ και χαρακτηρίζεται εντός προδιαγραφών.

Πίνακας 5-3: Τυπικό a posteriori σφάλμα ($\sigma_{a \text{ posteriori}}$) σημείων ελέγχου τομής NN'

	γεωδαιτικές συν/νες στην ορθοεικόνα		γεωδαιτικές συν/νες μετρημένες στο πεδίο		διαφορά (υπόλοιπα)		σ^2		
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	
FT327	-1306.4917	103.4475	FT327	-1306.4800	103.4290	-0.0117	0.0185	0.0001	0.0003
FT328	-1305.1675	102.5309	FT328	-1305.1588	102.5500	-0.0087	-0.0191	0.0001	0.0004
FT339	-1300.6830	102.0773	FT339	-1300.6897	102.0770	0.0067	0.0003	0.0000	0.0000
FT340	-1302.5181	102.2236	FT340	-1302.5108	102.2211	-0.0073	0.0025	0.0001	0.0000
FT341	-1303.2983	103.9097	FT341	-1303.3209	103.9232	0.0226	-0.0135	0.0005	0.0002
FT342	-1302.5650	104.6369	FT342	-1302.5622	104.6280	-0.0028	0.0089	0.0000	0.0001
							sum=	0.0008	-0.0010
							n=	6	6

σ_x	σ_y
0.013	0.014

Διαγράμματα όψης

Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και στο διάγραμμα όψης BB'. Σε αυτή την περίπτωση το τυπικό a posteriori σφάλμα υπολογίζεται $\sigma_x = \pm 2,1\text{cm}$ και $\sigma_y = \pm 2,8\text{cm}$. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα θα πρέπει να τυπωθούν σε μικρότερη κλίμακα.

Πίνακας 5-4: Τυπικό a posteriori σφάλμα ($\sigma_{a \text{ posteriori}}$) σημείων ελέγχου όψης BB'

	γεωδαιτικές συν/νες στην ορθοεικόνα		γεωδαιτικές συν/νες μετρημένες στο πεδίο		διαφορά (υπόλοιπα)		σ^2		
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X	Y	
FT201	1299.5942	104.0107	FT201	1299.625	104.037	-0.031	-0.027	0.001	0.001
FT204	1300.1912	102.2722	FT204	1300.196	102.290	-0.005	-0.018	0.000	0.000
FT205	1301.123	102.2327	FT205	1301.131	102.237	-0.008	-0.004	0.000	0.000
FT206	1302.3317	101.8878	FT206	1302.313	101.860	0.019	0.028	0.000	0.001
FT207	1303.3642	101.1502	FT207	1303.357	101.130	0.007	0.020	0.000	0.000
FT210	1304.602	100.0406	FT210	1304.582	100.014	0.020	0.027	0.000	0.001
							sum=	0.002	0.003
							n=	6	6

σ_x	σ_y
0.021m	0.028m

5.2 Πιστότητα

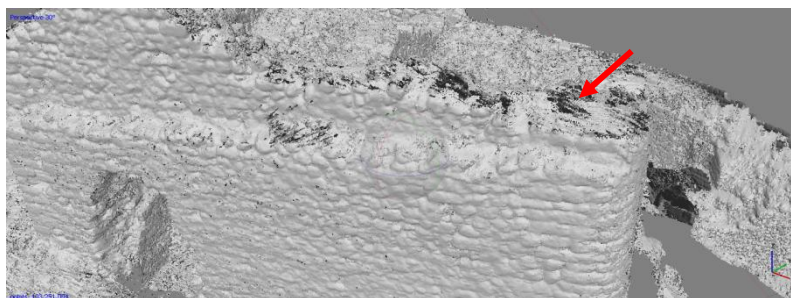
Η πιστότητα εκφράζει το κατά πόσο η απεικόνιση του αντικειμένου στα σχέδια, και λοιπά προϊόντα μετά από όλες τις διαδικασίες επεξεργασίας, ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και ελέγχεται κυρίως οπτικά. Υπάρχουν αρκετές περιοχές στις οποίες η **ποιότητα του mesh δεν ήταν η ενδεδειγμένη, με αποτέλεσμα τη θολή ή παραμορφωμένη απεικόνιση του μοντέλου**. Τα προβλήματα πιστότητας μπορεί να οφείλονται :

ι. στον τρόπο εφαρμογής των μάσκων

Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που οι μάσκες δεν εφαρμόστηκαν με απόλυτη συνέπεια και δεν απέκρυψαν πλήρως τμήματα που δεν ανήκουν στο αντικείμενο π.χ. ουρανός [Εικόνα 5-7], παρουσιάστηκε θόρυβος στο μοντέλο [Εικόνα 5-8] και τελικά κακή απόδοση της υφής [Εικόνα 5-9].



Εικόνα 5-6: Αποχή μάσκας από τα όρια του αντικειμένου.



Εικόνα 5-7: Θόρυβος στις περιοχές που δεν ορίστηκαν σωστά όρια μάσκας



Εικόνα 5-8: Κακή απόδοση του μοντέλου υφής στις περιοχές που δεν ορίστηκαν σωστά όρια μάσκας

ii. στην συμπλήρωση κενών στο mesh

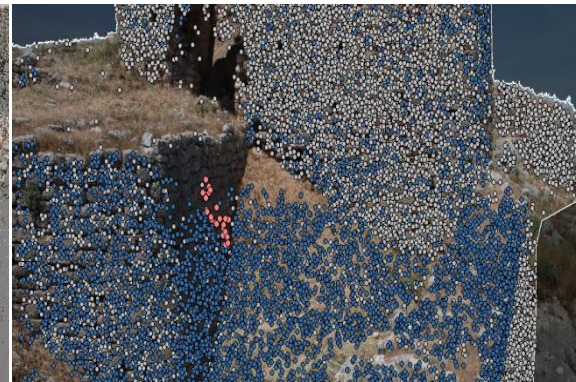
Διακρίνονται περιοχές που, παρά την καλή γεωμετρία των εικόνων, δεν γίνεται αναγνώριση ομόλογων σημείων [Εικόνα 5-11, Εικόνα 5-12], με αποτέλεσμα το νέφος σημείων να μην είναι εξίσου πυκνό [Εικόνα 5-13].



Εικόνα 5-9: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω πυκνότητας του νέφους σημείων.



Εικόνα 5-10: Νέφος ομόλογων σημείων (point cloud)



Εικόνα 5-11: Ομόλογα σημεία – μπλε κουκίδες

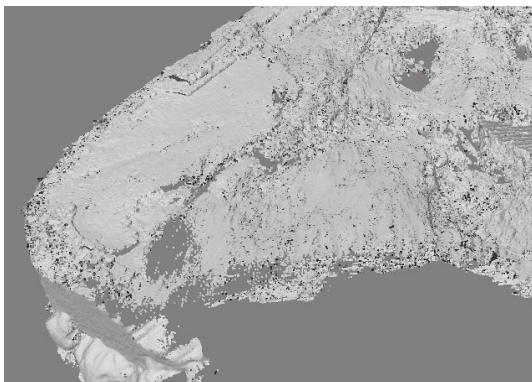


Εικόνα 5-12: Νέφος σημείων (dense cloud)

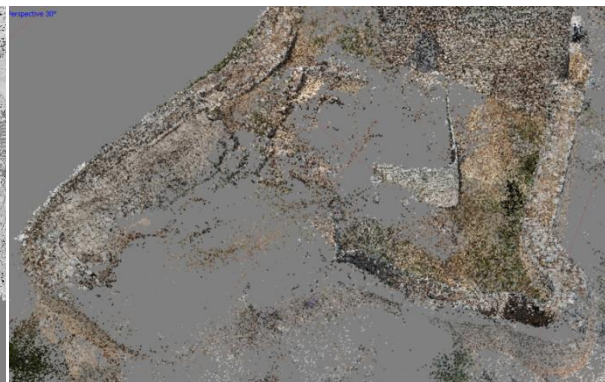
Προβλήματα αναγνώρισης ομόλογων σημείων παρατηρούνται συστηματικά σε περιοχές με βλάστηση [Εικόνα 5-15, Εικόνα 5-16] τα οποία κατά πάσα πιθανότητα οφείλονται στον τρόπο λειτουργίας των αλγόριθμων αναγνώρισης στοιχείων του προγράμματος (βλ. Κεφ. 3.4). Ακόμη και όταν λαμβάνονταν νέες εικόνες με πιο πυκνό βήμα [Εικόνα 5-17, Εικόνα 5-18] δεν εντοπίζονταν ομόλογα σημεία και συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη στο bundle adjustment. Για να μην παρουσιάζονται πολλά κενά στο mesh, επιλέχθηκε αυτά να συμπληρωθούν στο λογισμικό Geomagis. Η υφή στις περιοχές χωρίς πληροφορία αντλήθηκε αναγκαστικά από γειτονικές περιοχές και προφανώς το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό [Εικόνα 5-10, Εικόνα 5-14].



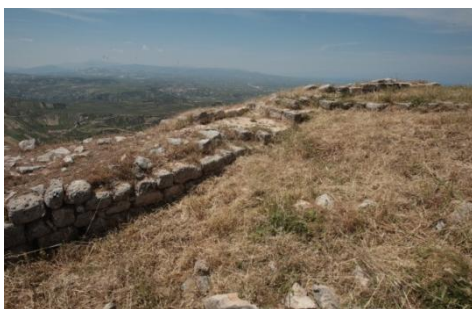
Εικόνα 5-13: Ορθοεικόνα. Απόδοση υφής σε περιοχή με αραιό νέφος λόγω βλάστησης.



Εικόνα 5-14: Αραιό νέφος σημείων σε περιοχές με βλάστηση



Εικόνα 5-15: Αραιό νέφος σημείων σε περιοχές με βλάστηση



Εικόνα 5-16: Εικόνα από προβληματική περιοχή



Εικόνα 5-17: Εικόνα από προβληματική περιοχή με πιο πυκνό βήμα

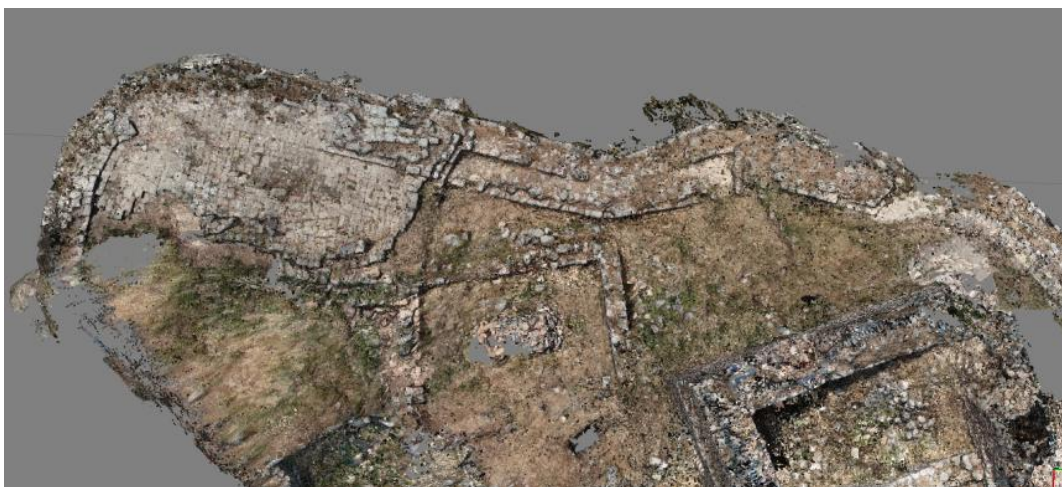
Αντίστοιχα προβλήματα συναντώνται σε ένα μεγάλο κομμάτι της περιμέτρου του κάστρου, όπου είτε λόγω κακής γεωμετρίας των εικόνων, είτε λόγω παρουσίας της βλάστησης δεν παρήχθη πυκνό νέφος σημείων.

Τα **τμήματα του εσωτερικού περιβόλου του κάστρου** για τα οποία δεν κατέστη δυνατή η παραγωγή πυκνού νέφους σημείων περιλαμβάνουν περιοχές καλυμμένες από βλάστηση και περιοχές στα εξωτερικά άνω όρια των τειχών του κάστρου. Στην πρώτη περίπτωση εκτιμάται ότι η ομοιογένεια του αντικειμένου δηλαδή της βλάστησης, απέτρεψε την εύρεση ομόλογων τμημάτων. Οι μέθοδοι SFM-DMVR φαίνεται ότι αντιμετωπίζουν δυσκολία στην ανασύνθεση επιφανειών ομοιόμορφων χρωματικά και χωρίς εξάρσεις λόγω της χαμηλής συχνότητας των εναλλαγών χρώματος (B. F. Koutsoudis A. 2013).

Η έλλειψη πυκνού νέφους σημείων στη δεύτερη περίπτωση αποδίδεται στην κακή θέση λήψης των εικόνων, και άρα στην κακή γεωμετρία της σύνδεσής τους. Η λήψη εικόνων των εξωτερικών τειχών από τη βάση του κάστρου και η λήψη πάνω στην κάτοψη των τειχών δεν επιτρέπει αλληλεπικαλυπτόμενο τμήμα. Η επανάληψη των δοκιμών χρησιμοποιώντας πιο πυκνό βήμα στη λήψη των εικόνων δεν βοήθησε. Το πρόβλημα ίσως μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη λήψη εικόνων σε κατάλληλη γωνία προκειμένου να δημιουργηθεί μια ζώνη αλληλεπικάλυψης των δύο σετ εικόνων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση εναέριων μέσων ή κάποιας άλλης κατασκευής που επιτρέπει στην φωτογραφική μηχανή να παίρνει λήψεις σε επαρκή απόσταση από τα τείχη και με κατάλληλη γωνία.



Εικόνα 5-18: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω κενών στο νέφος. Συμπλήρωση στο Geomagic



Εικόνα 5-19: Κενά στο νέφος λόγω παρουσίας βλάστησης ή κακής γεωμετρίας εικόνων



Εικόνα 5-20: Κενά στο νέφος λόγω παρουσίας βλάστησης ή κακής γεωμετρίας εικόνων

iii. στις εναλλαγές φωτισμού στις εικόνες

Παρατηρείται ότι σε περιοχές με πλήρες νέφος σημείων και mesh, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν εικόνες με διαφορετικό φωτισμό [Εικόνα 5-23, Εικόνα 5-24] για την άντληση του χρώματος και της υφής, προέκυψαν ανάμεικτοι «λεκέδες» χρώματος [Εικόνα 5-22]. Οι «λεκέδες» αυτοί παρουσιάζονται και ως θόρυβος στο νέφος [Εικόνα 5-25, Εικόνα 5-26]. Επίσης το πρόγραμμα φαίνεται να προκρίνει τις εικόνες με μεγαλύτερη φωτεινότητα για την άντληση του χρώματος που σε συνδυασμό με τον θόρυβο του νέφους ίσως ερμηνεύει την μείξη υφής στο άνοιγμα. Η επιλογή των εικόνων που τελικά χρησιμοποιούνται για την άντληση του χρώματος, ίσως να βελτιώνει το αποτέλεσμα.



Εικόνα 5-21: Ορθοεικόνα: προβλήματα στην υφή λόγω εικόνων διαφορετικής φωτεινότητας.



Εικόνα 5-22: Εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της.



Εικόνα 5-23: Εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της.



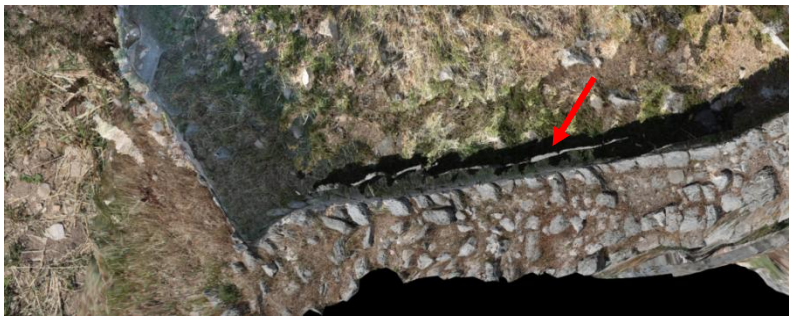
Εικόνα 5-24: Θόρυβος στο νέφος



Εικόνα 5-25: Θόρυβος στο νέφος

iv. σε άλλους παράγοντες

Σε διάφορες περιοχές των ορθοεικόνων σημειώνονται άλλα προβλήματα όπως διπλά είδωλα [Εικόνα 5-27, Εικόνα 5-28, Εικόνα 5-29], και τυχαίοι «λεκέδες» [Εικόνα 5-32, Εικόνα 5-33]. Το πρόβλημα εντοπίζεται τόσο σε περιοχές με βλάστηση, αλλά και σε περιοχές που απεικονίζουν τείχη στις οποίες δεν αναμένονταν προβλήματα. Τα προβλήματα δεν φαίνεται να οφείλονται σε θόρυβο στο νέφος, αλλά στον τρόπο άντλησης του χρώματος [Εικόνα 5-34, Εικόνα 5-35].



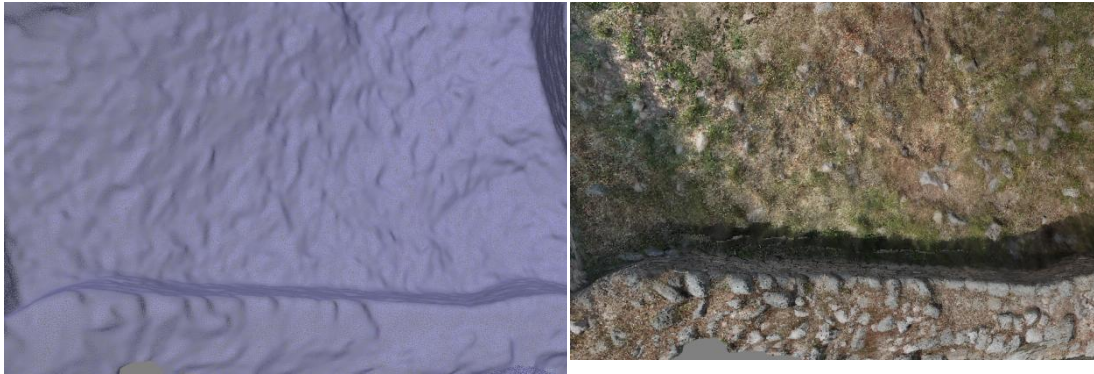
Εικόνα 5-26: Ορθοεικόνα: διπλό είδωλο.



Εικόνα 5-27: Νέφος περιοχής με διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.



Εικόνα 5-28: Νέφος περιοχής με διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.



Εικόνα 5-29: Mesh της περιοχής με το διπλό είδωλο. Δεν παρατηρείται θόρυβος.

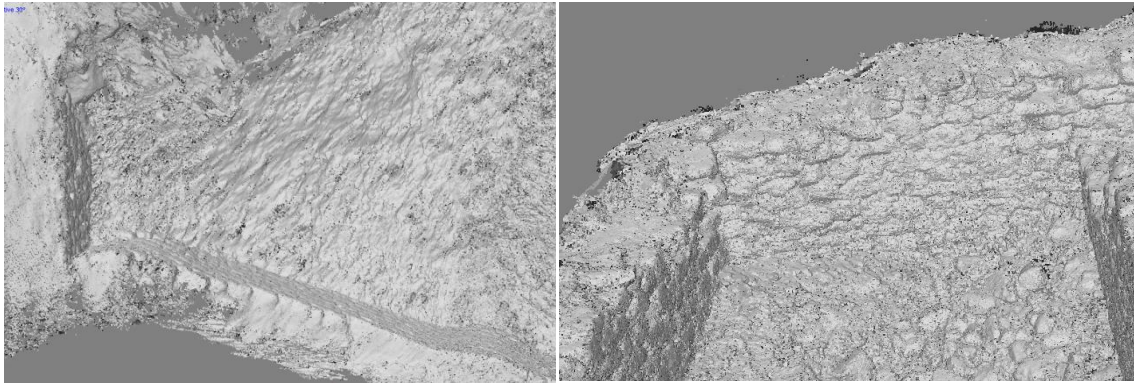
Εικόνα 5-30: Το διπλό είδωλο εμφανίζεται στο mesh μόλις αποδίδεται το χρώμα.



Εικόνα 5-31: «Λεκέδες» σε περιοχή με βλάστηση.



Εικόνα 5-32: «Λεκέδες» σε περιοχή με τείχη.



Εικόνα 5-33: Νέφος σε περιοχή με βλάστηση που εμφανίζει «λεκέδες»

Εικόνα 5-34: Νέφος σε περιοχή με τείχη που εμφανίζει «λεκέδες»

Ανάλογα με το αντικείμενο που εμφανίζει πρόβλημα πιστότητας επιλέγεται ραδιομετρική διόρθωση στο photoshop ή απόκρυψη με hatch και επισήμανση για έλλειμμα πληροφορίας. Προφανώς διορθώσεις στο photoshop προκρίνονται μόνο για περιπτώσεις χωρίς σημαντική πληροφορία δηλαδή τις περιοχές με βλάστηση. Αντίθετα αλλαγές στο photoshop πρέπει να αποφεύγονται σε τμήματα που αφορούν αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του κάστρου. Βέλτιστα η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει παρουσία κάποιου ειδικού, αρχιτέκτονα ή αρχαιολόγου, που μπορεί καλύτερα να κρίνει τη σημασία του τμήματος της εικόνας που πρέπει να διορθωθεί.

5.3 Πληρότητα

Το κριτήριο της πληρότητας δεν έχει πλήρως επιτευχθεί, καθώς αρκετά στοιχεία του κάστρου δεν αποδίδονται στα τελικά προϊόντα. Ειδικότερα παρουσιάζονται ελλείψεις στο ΝΑ, και το ΒΔ τμήμα του τείχους, στην κάτοψη των τοίχων του πύργου, στην οριογραμμή της βάσης του εξωτερικού τείχους και περιορισμένα σε κάποιες περιοχές του εσωτερικού περιβόλου. Οι ελλείψεις αποδίδονται στους παρακάτω παράγοντες:

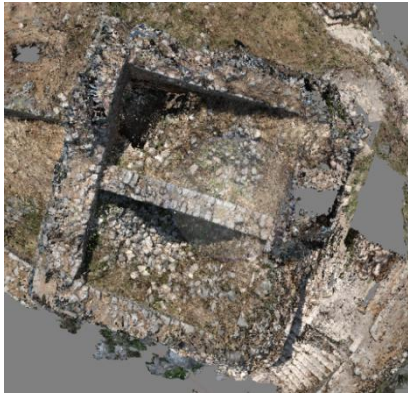
ι. έλλειψη εικόνων

Η κάτοψη των τοίχων του πύργου και τα εξωτερικά τείχη στα νότια του κάστρου, δεν αποδίδονται και το νέφος στις αντίστοιχες θέσεις είναι κενό [Εικόνα 5-36, Εικόνα 5-37], γιατί δεν υπάρχουν φωτογραφίες που τα αποτυπώνουν.

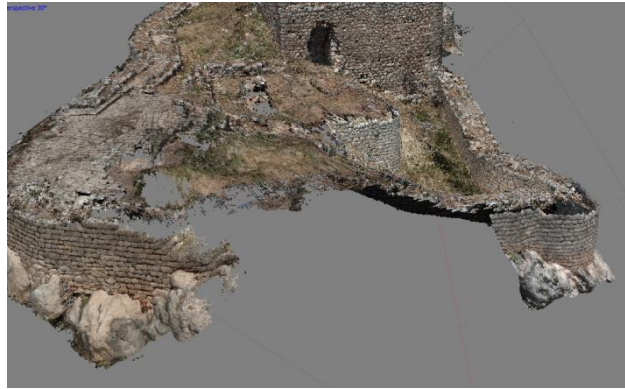
Δεν κατέστη δυνατό να ληφθούν εικόνες από κατάλληλη θέση, σε επαρκή απόσταση και με επαρκή επικάλυψη που θα επέτρεπαν την πλήρη κάλυψη του πύργου, που άλλωστε αποτελεί το πιο ψηλό στοιχείο της κατασκευής, γιατί το συγκεκριμένο τμήμα κρίθηκε αρκετά ασταθές και επικίνδυνο.

Το ΝΑ τμήμα του τείχους δεν αποδίδεται, γιατί δεν ελήφθησαν εικόνες με επιθυμητή ανάλυση και με κατάλληλη γεωμετρία λήψης καθώς η πρόσβαση στο νότιο κομμάτι των εξωτερικών τειχών ήταν πολύ απαιτητική και η παρουσία βράχων εμπόδιζαν τη λήψη εικόνων με κατάλληλη γωνία [Εικόνα 5-38 έως Εικόνα 5-41]. Γενικά η συγκεκριμένη πλευρά του κάστρου είναι αρκετά απότομη. Όσο η φωτογραφική μηχανή πλησίαζε στα τείχη του κάστρου, τόσο μεγάλωνε ο άξονας λήψης των εικόνων με αποτέλεσμα η αλληλοτομία των εικόνων να καθίσταται προβληματική. Αύξηση της απόστασης λήψης των εικόνων θα επέτρεπε να συμπεριληφθεί το συγκεκριμένο τμήμα του τείχους στις εικόνες, ωστόσο θα άλλαζε την ανάλυση των εικόνων, εφόσον επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί κάποιος από τους διαθέσιμους φακούς, έξω από τα όρια του επιθυμητού συντελεστή κλίμακας (βλέπε Πίνακας 3-2). Επιπλέον με την αύξηση της απόστασης λήψης πρέπει να αντιμετωπιστούν προβλήματα του αναγλύφου, καθώς μικροί λόφοι στην περίμετρο του κάστρου αποκρύπτουν διάφορα τμήματά του.

Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με εναέρια λήψη εικόνων ή με τη χρήση σκαλωσιάς επαρκούς ύψους μόνο για την αποτύπωση του πύργου.



Εικόνα 5-35: Κενά στο νέφος του πύργου, λόγω έλλειψης εικόνων



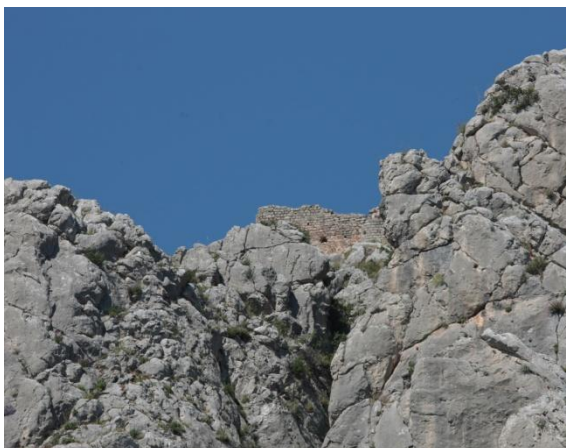
Εικόνα 5-36: Κενά στο νέφος του κάστρου, νότια πλευρά, λόγω έλλειψης εικόνων



Εικόνα 5-37: περιοχή λήψης εικόνων



Εικόνα 5-38 : Ανατολική πλευρά



Εικόνα 5-39: Ανατολική πλευρά τειχών



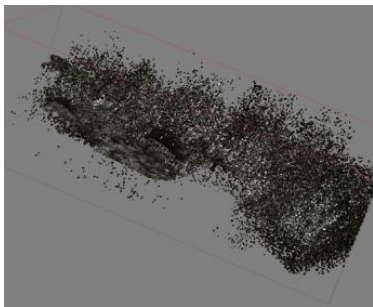
Εικόνα 5-40: ΝΑ πλευρά τειχών

ii. αδυναμία παραγωγής ικανοποιητικού νέφους σημείων

Το ΒΔ τμήμα του Τείχους [Εικόνα 5-42] δεν αποδίδεται λόγω αδυναμίας του αλγορίθμου να αναγνωρίσει σωστά ομόλογα σημεία και να παραγάγει ικανοποιητικό νέφος σημείων. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος συστήνεται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, πύκνωση των εικόνων και μείωση της απόστασης λήψης. Αν και έγιναν δοκιμές συνδυάζοντας εικόνες με διαφορετικό βαθμό επικάλυψης και διαφορετική απόσταση λήψης, με και χωρίς μάσκες και σε διάφορες ρυθμίσεις του Photoscan, το σωστό «δέσιμο» των εικόνων δεν κατέστη δυνατό [Εικόνα 5-43, Εικόνα 5-44]. Παρατηρείται αυξημένος θόρυβος, με σημεία σε διασκορπισμένες τυχαίες θέσεις ή μια εικόνα του νέφους χωρίς τη διάσταση του βάθους. Εκτιμάται ότι η ομοιογένεια του τείχους (βλ. κρίσιμες γεωμετρίες Κεφάλαιο 3.4) και η παρουσία δύο δένδρων στο συγκεκριμένο τμήμα επιδρούν αρνητικά στην αναγνώριση ομόλογων σημείων. Προτείνεται η επανάληψη των δοκιμών χρησιμοποιώντας άλλο λογισμικό και εικόνες από διαφορετική γωνία.



Εικόνα 5-41: Τα ΒΔ τείχη



Εικόνα 5-42: ΒΔ τμήμα του Τείχους - Align photos – ρύθμιση HIGH



Εικόνα 5-43: ΒΔ τμήμα του Τείχους - Align photos – ρύθμιση LOW

iii. αποκρύψεις λόγω βλάστησης

Η παρουσία της βλάστησης είναι έντονη όλο το χρόνο και προκαλεί μεγάλες αποκρύψεις σε τμήματα του κάστρου [Εικόνα 5-45]. Η οριογραμμή της **βάσης του εξωτερικού τείχους** δεν αποδίδεται λόγω της παρουσίας έντονης βλάστησης, αλλά και του κακού προγραμματισμού των εργασιών. Η λήψη εικόνων σε μικρότερη απόσταση από τα τείχη, επιλύει σε κάποιες περιπτώσεις το πρόβλημα, αν και αυξάνει πολύ τον αριθμό των εικόνων και κατ' επέκταση τις εργασίες που απαιτούνται στη συνέχεια. Επίσης θα ήταν αναγκαίο να ληφθούν εικόνες με καλύτερη γωνία λήψης, που θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με εναέρια λήψη εικόνων. Εκτιμάται ότι και πάλι τα αποτελέσματα θα ήταν κάπως περιορισμένα λόγω της πυκνής παρουσίας της βλάστησης. Επομένως δεν μπορεί να αποδοθεί όλο το μήκος της οριογραμμής της βάσης του κάστρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο βράχος πάνω στον οποίο εδράζεται το κάστρο αποτελεί οργανικό κομμάτι του. Κατά τον προγραμματισμό των εργασιών έπρεπε να ληφθεί υπόψη η ανάγκη αποτύπωσης του βράχου του κάστρου, που δυστυχώς υποτιμήθηκε και κατά τον προγραμματισμό των εργασιών και κατά την επεξεργασία των εικόνων για την παραγωγή του νέφους.

Για το σκοπό αυτό προτείνεται η λήψη νέων εικόνων με μεγαλύτερο βαθμό κάλυψης του φυσικού βράχου και εκ νέου επεξεργασία τους με τις παλιές για την παραγωγή συμπληρωτικού τμήματος του νέφους.

Για να διορθωθεί το πρόβλημα της πληρότητας στις περιπτώσεις που προκαλείται από αδυναμία του αλγόριθμου να εντοπίσει ομόλογα σημεία, υλοποιήθηκαν μετρήσεις με total station και κατάφωτο σε ακμές του τείχους [Εικόνα 3-1, Εικόνα 5-46]. Το κατάφωτο δεν ήταν δυνατό να κατακορυφωθεί με ασφάλεια επομένως τα σημεία έχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας και παρέχουν γενικές πληροφορίες για το εξωτερικό όριο των τειχών. Αντίστοιχες μετρήσεις θα έπρεπε να υλοποιηθούν και στη βάση των τειχών, όπου αυτό είναι δυνατό και όπου διακρίνεται η βάση των τειχών, καθώς το νέφος και το mesh δεν δίνουν επαρκή πληροφορία στις συγκεκριμένες θέσεις, λόγω της παρουσίας της βλάστησης.



Εικόνα 5-44: Δυτική πλευρά των τειχών. Η παρουσία βλάστησης προκαλεί αποκρύψεις.



Εικόνα 5-45: Μετρήσεις στην περίμετρο του κάστρου

Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η γεωμετρική τεκμηρίωση του κάστρου Πεντεσκούφι Κορινθίας, με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων, για την παραγωγή του τελικού 3D μοντέλου και των ορθοεικόνων.

Η φωτογραμμετρία είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος για τη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων οχυρωματικής αρχιτεκτονικής που βρίσκονται σε απρόσιτες θέσεις και με δύσκολη τοπογραφία εδάφους, ειδικά όταν κρίνεται αναγκαία η παραγωγή 3D μοντέλων με υφή. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η χρήση τη μεθόδου SfM-MVS απέδωσε ένα αρκετά ικανοποιητικό μοντέλο που σε άλλες συνθήκες θα απαιτούσε πιο σύνθετες και ακριβές εργασίες. Ωστόσο χωρίς τη χρήση εναέριων μέσων για τη λήψη των εικόνων, όπως στην προκειμένη περίπτωση, η πληρότητα του μοντέλου δεν μπορεί να εξασφαλιστεί.

Διαπιστώθηκε ότι παρά την τεράστια ευελιξία που προσφέρει η σύγχρονη αυτοματοποιημένη φωτογραμμετρία, παραμένουν σε ισχύ οι κανόνες της κλασσικής φωτογραμμετρίας που αφορούν στον έλεγχο της ποιότητας και της ακρίβειας των προϊόντων, και συγκεκριμένα στο πλήθος και την κατανομή των φωτοσταθερών, τον καλό σχεδιασμό και επίλυση του δικτύου. Διατηρείται ακόμη η σημασία στην επιμέλεια καταγραφής των στοιχείων στο πεδίο (σημειώσεις, κροκί, μετρήσεις) και η συνέπεια σε όλα τα στάδια επεξεργασίας των στοιχείων. Κατά τις διαδικασίες παραγωγής του 3D μοντέλου και των ορθοεικόνων παρατηρήθηκε ότι ο διαφορετικός φωτισμός στις εικόνες επηρεάζει την τελική απόδοση της υφής στο μοντέλο και, επομένως, απαιτείται –αφού προηγηθούν οι απαραίτητες δοκιμές– προσεκτική επιλογή των εικόνων από τις οποίες αντλείται το χρώμα ή εφαρμογή μασκών στις σκιασμένες περιοχές. Η ύπαρξη βλάστησης στον περιβάλλοντα χώρο του αντικειμένου της αποτύπωσης έδωσαν, όπως ήταν αναμενόμενο, πολύ θόρυβο στο νέφος.

Για τον περιορισμό του συστήνεται η λήψη εικόνων σε μικρότερη απόσταση και σε διαφορετική γωνία λήψης καθώς και ο προσεκτικός σχεδιασμός των μασκών. Ο τελευταίος πρέπει να γίνεται με μεγάλη επιμέλεια, όπως και ο καθαρισμός του θορύβου ειδικά στις περιοχές εναλλαγών φωτισμού, αποκρύψεων κλπ., καθώς στην προσπάθεια βελτίωσης του νέφους μπορεί να χαθεί αναγκαία πληροφορία. Οι επιλογές που δίνει το πρόγραμμα Photoscan για εξαγωγή και επεξεργασία του νέφους, και προσθήκης script σε rython αποδείχθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερα εξυπηρετικές και συνέβαλαν στη διόρθωση τυχόν αδυναμιών του προγράμματος. Διαπιστώθηκε, ακόμα, πως η συμπλήρωση κενών στο mesh πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε περιορισμένες εκτάσεις ενώ, ιδανικά, απαιτείται και η συνεννόηση με τον τελικό χρήστη, με τον οποίο η συνεργασία θα πρέπει να διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και με την αυτοματοποιημένη μέθοδο περιορίζεται ακόμα περισσότερο ο χρόνος παραμονής στο πεδίο, αυξάνεται αντίστοιχα ο χρόνος επεξεργασίας των στοιχείων στο γραφείο.

Κλείνοντας πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι οι παραπάνω διαπιστώσεις αφορούν μόνο στο συγκεκριμένο έργο. Γενικεύσεις σε άλλα, αντίστοιχα έργα αποτύπωσης οχυρωματικής αρχιτεκτονικής θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με σκεπτικισμό, καθώς κάθε μνημείο και έργο συνοδεύεται από ιδιαιτερότητες που τελικά καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποτύπωσης τεχνικών μέσων, και λογισμικών.

Βιβλιογραφία

1. Agosto, E., Ardisson, P., Bornaz, L., C. «The castle of Graines: Different Methodologies for the documentation of historical buildings.» *CIPA 2005 XX International Symposium*. Torino, Italy, 2005.
2. Alby, E., Grussenmeyer P. «From point cloud to 3D model, modelling methods based on architectural knowledge applied to fortress of Chatel-sur-moselle (France).» *XXIIth ISPRS Congress, Volume: I*, 2012.
3. Al-kheder, S. , Y.Al-shawabkeh, N. Haala. «Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser.» *Journal of Archaeological Science* 36 (2009): 537-546.
4. Almagro-Gorbea A., Orihuela Uzal A. «Metodos para documentar y restaurar zonas de dificil acceso en el Castillo de Salobrena (Granada).» *Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII centuries*. 2015. 287-290.
5. Arias P., Armesto, J., Di-Capua, D., Gonzalez-Drigo, R., Lorenzo, H., Perez-Gracia V. «Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge.» *Engineering Failure Analysis* 14, 2007: 1444-1457.
6. Arias, P., Herraiez, J., Lorenzo, H., Ordonez, C. «Control of structural problems in cultural heritage monuments using close range photogrammetry and computer methods.» *Computers and Structures*, 2005: 1754-1766.
7. Athanasoulis, D.,. *Heaven & Earth. Cities and Countryside in Byzantine Earth*. Athens: the Hellenic Ministry of Culture and Sports and the Benaki Museum, 2013, 192-209.
8. Baltsavias, M., Gruen, A., van Gool, L., Pateraki, M. *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. Proceedings of the International Workshop, 2005.
9. Barreau, JB., Bernard, Y., Petit, Q., Beuchet, L., Petit, E., Platen, V., Gaugne, R., Le Rumeur, J., Gouranton V. «Combination of 3D Scanning, Modeling and Analyzing Methods around the Castle of Coatfrec.» *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection Volume 8740 of the series Lecture Notes in Computer Science*, 2014: pp 418-426.
10. Barrile, V., Billotta, G., D'Amore, E., Marando, R., Meduri, G., Trovato, S.,. «Structural Analysis of Cultural Heritage assisted by 3D Photogrammetry.» *8th International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering*, 2015.
11. Barsanti, S. «Photogrammetry and Laser Scanning for Archaeological Site 3D Modeling - Some Critical Issues.» *CEUR Workshop Proceedings*, 2014.
12. Bartos, K., Pukanska K., Gajdosik, J., Krajnak, M. «The issue of documentation of hardly accessible historical monuments by using photogrammetry and laser scanner techniques.» *Geoinformatics 2011*, 2011.
13. Bobek K., Jedlicka K. «3d data model for purposes of cultural heritage custody-Case study at the Castle Kozel.» *XXVIII CIPA. Symposium*, 2011.
14. Boehler W., Heinz G. «Documentation, Surveying, Photogrammetry.» *CIPA International Symposium*, 1999.

15. Bruno, F., Bruno, S., De Sensi, G., Luchi, M., Mancuso, S., and Muzzupappa, M. «From 3d reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition.» *Journal of Cultural Heritage*, 2010: vol. 11, 42–49.
16. Brutto, M.Lo., Garraffa, A., Pellegrino, L., Di Natale, B.,. «3D mosaic documetation using close range photogrammetry.» *1st International Conferance on Metrology for Achaeology*. Benevento, 2015.
17. Campanella C., Michela Tessonni A., Bortolotto S., Macchi A. «Methods for dating historical buildings and verticality control of the Baronale Palace at Avio's Castle.» XX CIPA International Symposium, 2005.
18. Carpenter R., Antoine B. *The defenses of Acrocorinth and the lower town*. The American School of Classical Studies at Athens., Harvard University Press, 1936, 134-137.
19. Chazaly, B. «Cylindrical Orthophotography Complete coverage of Inside/Outside cylindrical surfaces such as castle towers.» *XVIII CIPA Symposium*. 2001.
20. Chiabrando F., De Bernardi M.L., Curetti S. «Integration of low cost geomatic techniques to support thw architectural project the Perlo castle area survey.» 22nd CIPA Symposium, 2009.
21. Daskalopoulos, A., Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., Makris, G.N. «A trip from object to image and back.» *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2003: Vol. XXXIV, Part 6/W12.
22. Drap, P., A. Durand, J. Seinturier, G. Vannini, M. Nucciotti. «Full XML documentation from photogrammetric survey to 3D visualization. The case study of Shawbak castle in Jordan.» *CIPA 2005 XX International Symposium*. Torino, 2005.
23. D'Urso, M., Russo, G. «On the Integrated use of laser scanning and digital archaeology applied to an archaeological site.» *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008.
24. El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., Whiting, E. «Detailed 3D Modelling of Castles. .» *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 2007: 199-220.
25. Engels, C., Stewenius, H., Nister, D. «Bundel adjustment rules.» *Proceedings of the photogrammetric computer vision conference*. Bonn, Germany, 2006.
26. Fangi, G., Malinverni, E. S., Tasseti, A. N. «The metric documentation of Cham towers in Vietnam by Spherical Photogrammetry.» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, XXIV International CIPA, 2013.
27. Fiani M. , Siani N. «Comparison of terrestrial laser scanner in production of DEMs for Cetara tower.» CIPA 2005 XX International Symposium, 2005.
28. Garfella Rybio J., Manez Pitarch M.J., Martinez Moya J.A., Ortega Tomas F. «Puesta en valor del Palacio-Castillio de Betxi, a traves de la modelizacion mediante arquitecturas inversas y documentacion grafica avanzada.» *Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII centuries*. 2015. 315-320.
29. Gates, A., Ritchie, D. *Encyclopedia of Earthquakes and Volcanoes*. Checkmark Books, 2007.

30. Georgopoulos, A., Ioannidis, C. *Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments*. Athens: FIG, 2004.
31. Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., Ioannides, M. «3D Virtual Reconstructions at the service of computer Assisted Archaeological Measurements.»
32. Gianniou, P., A. Georgopoulos, M. Tsakiri, K. Della. «The documentation of the mediaval entrance of the Rhodes fortification complex.» *XXI International CIPA Symposium*, 2007.
33. Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., Dosso, P. «UAV photogrammetry: block triangulation comparisons.» *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, 2013: 157–162.
34. Giraud, F., Jacquot K., C. Chevrier, G. Halin. «Acquire high quality meshes of scale models for an automatic modeling process.» Μοντάζ: XXIV International CIPA Symposium. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W2* (2013).
35. Grussenmeyer P., Yasmine J. . «The restoration of Beaufort castle (South Lebanon) A 3D restitution according to historical documentation.» *International Archives of ISPRS*, 2003: 322-327.
36. Grussenmeyer, P. , T. Landes, T.Voegtler, T.Ringl. «Comparison Methods of terrestrial laser scanning , photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings.» *XXIst ISPRS Congress: Commission V, WG 2 , Beijing*, 2008: 213-218.
37. Hodac, J. «Document ation of the Baroque Theatre at the Cesky Krumlov Castle.» *XVIII CIPA Symposium*. 2001.
38. Houshiara, H., Borrmanna, D., Elseberga, J. , Nuchtera, A., Nath,B. Winklerc S. «CASTLE3D – a computer aided system for labeling archaeological excavations in 3D.» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015.
39. Howland, M., Kuester, F., Levy, Th. «Photogrammetry in the field: Documenting, Recording and Presenting Archaeology.» *Mediterranean Achaeology and Archaeometry*, 2014: 101-108.
40. Ioannides, M. , Fellner, D. , Georgopoulos, A. , Hadjimitsis D. 2D and 3D Data Capture Methodologies and Data Processing. Archaeolingua, 2010.
41. Ioannidis C., Potsiou C. «Detailed restitution and representation of the seaward castle of Chios.» *XVII CIPA International Symposium*. 1999.
42. Kersten, T., K. Mechelke and L. Maziull. «3D model of Al Zubarah fortress in Qatar - Terrestrial Laser Scanning vs Dense Image Matching.» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015: Volume XL-5/W4,2015 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures.
43. Kersten, T., Lindstaedt, M., Maziull, L., Schreyer, K., Tschirschwitz, F., and Holm, K. «3D recording, modelling and visualization of the fortification Kristiansten in Trondheim (Norway) bu photogrammetric methods and terrestrial laser scanning in the framework of erasmus programmes.» *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W4, 255-262, 2015: I XL-5/W4, 255-262.

44. Kersten, Th. , C. Acevedo Pardo, M. Lindstaedt. «3D acquisition, modeling and visualization of north german castles by digital architectural photogrammetry.» *XXth ISPRS Congress, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, 2004.
45. Koutsoudis A., B. Vidmar, G. Ioannakis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, C. Chamzas. «Multi-image 3D reconstruction data evaluation.» *Journal of Cultural Heritage*, 2014: 73–79.
46. Koutsoudis A., B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, F. Remondino. «3D Digitisation of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage.» 2013.
47. Koutsoudis A., Arnaoutoglou F., Chamzas C. «On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry.» *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007): 26-31.
48. Kraus, K. «Photogrammetry, remote sensing and spatial information science for heritage documentation.» Antalya, Turkey: XIX CIPA Symposium, 2003.
49. Křemen T., Koska B., Pospíšil J. «Laser Scanning for Castle documentation.» XXIIIrd International CIPA Symposium, 2011.
50. Lai, L., M. Sordini. «3D documentation of a megalithic building in Sardinia.» *International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*, 2013.
51. Lambers, K., H. Eisenbeiss, M. Sauerbier, D. Kupferschmidt, T. Gaisecker, S. Sotoodeh. «Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru.» *Journal of Archaeological Science* 34 (2007): 1702-1712.
52. Landes T., Grussenmeyer P., Voegtle T., Ringle K. «Combination of Terrestrial Recording techniques for 3D object modelling regarding topographic constraints. Example of the castle of Haut-Andlau, Alsace, France.» Athens: XXI International CIPA Symposium, 2007.
53. LeBlanc F., Eppich R. *Documenting Our Past for the Future*. The Getty Conservation Institute, 2005.
54. Lerma J., Vidal J., Portales C. «Three dimensional city model visualization for real time guided museum tours.» *Photogrammetric Record Vol 19 No 106.*, 2004.
55. Letellie, R. *Recording, Documentation and Information Management for the conservation of heritage places*. The Getty Conservation Institute, 2007.
56. Levy, Th., Vincent, M., Howland, M., Kuester, F., Smith, N. «The art of implementing SfM for reconstruction of archaeological sites in Greece: Preliminary applications of cyber-archaeological recording in Corinth.» *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2014: 125-133.
57. Linsinger, S. «- “3D laser” versus “stereo photogrammetry” for documentation and diagnosis of buildings and monuments (pro and contra).» *CIPA 2005 XX International Symposium*, 2005.
58. Lowe, David. «Object recognition from local scale-invariant features Conference on Computer Vision.» *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999: 1150-1157.
59. Luhman, T., Robson S., Kyle, S., Harley, I. *Close Range Photogrammetry*. UK: Whittles Publishing, 2006.

60. Mahiddine A., J. Seinturier, D. Peloso, H. Boulaassal, J. Boï, D. Merad, P. Drap. «Validating photogrammetric orientation steps by the use of relevant theoretical models. Implementation in the “arpenteur” framework.» *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium*, 2013.
61. Mayer H., Mosch M., Peipe J. «Comparison of photogrammetric and computer vision techniques -3D reconstruction and visualization of Wartburg Castle.» *XIX CIPA Symposium*, 2003.
62. Merlo A., Rodriguez-Navarro P. «Los poblados fortificados en la Valleriana (Pescia, Italia). Analysis de la forma urbana del castello Di Pietrabuona.» *XI Congreso International de expression grafica aplicada a la edificacion*. 2012.
63. Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F.,. «Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects.» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, 2014: Vol. XL-5.
64. Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., and Chamzas, C. «Methods for 3D digitization of Cultural Heritage.» *Journal of Cultural Heritage*, 2007: vol. 8, 93–98.
65. Pinteá, R. Hénoa, M. Pierrot-Deseillignya, X. Brunetaud, S. Janvier-Badosa, R. Janvier. «Orthoimages of the outer walls of the Chateau de Chanbord.» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W3*, 2015.
66. Pirinu, A. «Design models and “attention” to the topography of the places in the sixteenth strongholds of Sardinia: the use of the tenaille.» *Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII centuries*. 2015.
67. Remondino, Fabio. «Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning.» *Remote Sens* 3 (2011): 1104-1138.
68. Ringle K., Nutto M., Teschauer O., Mohn C. «Integration of historical plants into a modern facility management system taking the Castle of Heidelberg as an example.» Torino: XX International Symposium CIPA, 2005.
69. Robertson, D.P., R. Cipolla, R. «Structure from motion.» Στο *Practical Image processing and computer vision*. John Willey and Sons Ltd, 2009.
70. Rodriguez –Navarro P., Verdiani G., Gil Piqueras T. «Comprehensive methodology for documenting defense towers of the Valencian Coast, Spain.» *Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII centuries*. 2015. 321-356.
71. Rodriguez-Navarro P., Verdiani G. «Digital survey and interpretation of a fortification fragment: the Cadi bridge at the feet of the Alhambra hill, Granada.» *International Conference on Digital Heritage*. Marseilles France, 2013.
72. Stefani, Ch., Brunetaud, X., Janvier-Badosa, S., Beck, K., De Luca, L., Al-Mukhatar, M. «Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform.» *Journal of Cultural Heritage*, 2014: 1-9.
73. Vidman, J., Zastoupil J., Hlavenka, P. «Digital photogrammetric methods for documentation of wall paintings on the Karstein castle.» *XXVIII CIPA. Symposium*. 2011.

74. Wachowiak, M.J., and Karas, B.V. «3D scanning and replication for museum and cultural heritage applications.» *Journal of the American Institute for Conservation*, 2009: vol. 48, 141–158.
75. Yilmaz, H.M., Yakar, M., Gulec, S.A., and Dulgerler, O.N. «Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage.» *Journal of Cultural Heritage*, 2007: vol. 8, 428–433.
76. Αγατζά-Μπαλοδήμου, Α. *Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις Ι*. Αθήνα: ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, 2009.
77. Αδάμ, Κατερίνα. *Γεωμετρία του στερεοζεύγους από βαθμονομημένες και από μη βαθμονομημένες μηχανές -Διπλωματική εργασία*. Αθήνα: ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Εργ.Φωτογραμμετρίας, 2011.
78. Αθανασούλης, Δ., Αθανασούλα, Μ., Μανωλέσσου, Ελ., Μελέτη, Π. *Σύντομη επισκόπηση της αρχαιολογικής έρευνας μεσαιωνικών καταλοίπων Κορίνθου*. Πρακτικά του Η' Διεθνούς Συνεδρίου Πελοποννησιακών Σπουδών, Κόρινθος: Ανάτυπον, 2010.
79. Βέργος, Κωνσταντίνος. *Διπλωματική Εργασία : Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων*. ΕΜΠ Τομέας Τοπογραφίας, 2015.
80. Βλαχοπούλου, Φ. *Λέων Σγουρός*. Ηρόδοτος, 2002.
81. Γεωργόπουλος Α., Ταπεινάκη Σ., Πανταζής Γ., Λάμπρου Ε., Άγα Ε., Μακρής Γ., Ιωαννίδης Χ. *Μάθημα θέμα: Αποτυπώσεις Μνημείων*. Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2013.
82. Γκίκας, Γιάννης. *Κάστρα του θρύλου και της ιστορίας*. Αστήρ, 1979.
83. Γραμματικόπουλος, Λ. *Γεωμετρική πληροφορία από μεμονωμένες εικόνες στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.
84. Δημητριάδη, Δρ.Ε. Καρποδίνη. *Κάστρα της Πελοποννήσου*. Αθήνα: Adam Editions, 1990.
85. Καλησπεράκης, Ι. *Η επιπολική γεωμετρία στον προβολικό και ευκλείδιο χώρο*. Αθήνα: ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, 2010.
86. Καρποδίνη-Δημητριάδη, Ε. *Κάστρα της Πελοποννήσου*. Αθήνα: Adam Editions, 1990.
87. Κόντη Β. «Συμβολή στην ιστορική γεωγραφία του νομού Αργολίδας.» *Βυζαντινά Σύμμεικτα* 5, 1983: 169-202.
88. Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ. *Εφαρμοσμένη Γεωδαισία*. Αθήνα: Ζήτη, 2010.
89. Μπαλοδήμος Δ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. *Σημειώσεις τεχνικής γεωδαισίας*. Αθήνα: Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, ΕΜΠ, 2005.
90. Νάκος, Β. *Γραφισμός και Χαρτογραφία: Αρχές οπτικοποίησης*. Αθήνα: ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, 2006.
91. Πατιάς, Π. «<https://anaskamma.files.wordpress.com/>.» *Φωτογραμμετρία και τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων και ευρημάτων*. 2009. <https://anaskamma.files.wordpress.com/2009/10/02-patias.pdf>.

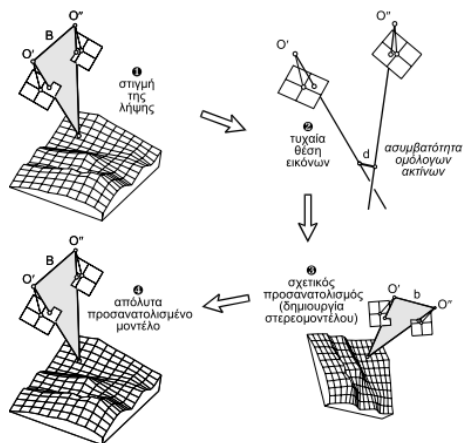
92. Παυλίδης, Μ. Αποτύπωση τμήματος των τειχών της Θεσσαλονίκης με *laser scanner* και σύγκριση με φωτογραμμετρική μέθοδο αποτύπωσης. <http://digital.lib.auth.gr/record/128504>: ΑΠΘ, 2011.
93. Πετρίδης, Ι. Η τρισδιάστατη αποτύπωση του Δυτικού Τείχους Θεσσαλονίκης με τη χρήση σαρωτή *Laser*. Διπλωματική εργασία. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ-ΤΑΤΜ, 2015.
94. Πέτσα, Ε. Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας. Αθήνα: ΑΤΕΙ Αθηνών, Τμήμα Τοπογραφίας, 2000.
95. Σουγλέ, Βασιλική. Φωτογραμμετρική αποτύπωση του οχυρωμένου βυζαντινού οικισμού της Ρεντίνας. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ-ΤΑΤΜ, 2010.
96. Φάκα, Μαρίνα. Γεωμετρική τεκμηρίωση Ι.Ν. Τίμιου Σταυρού στο Πελενδρί, Κύπρος [Διπλωματική εργασία]. Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Εργ. Φωτογραμμετρίας, 2011.
97. Φάκα, Σ. Τρισδιάστατη ανακατασκευή αντικειμένων από φωτογραφίες (με χρήση *Matlab*). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής, 2010.

Παράρτημα

Ι. Ανάκτηση τρίτης διάστασης : η φωτογραμμετρική προσέγγιση

Στη φωτογραμμετρική προσέγγιση ο στόχος είναι ο προσανατολισμός των εικόνων για να εφικτή η στερεοσκοπική παρατήρηση, ο προσανατολισμός και τοποθέτηση του 3D μοντέλου στο χώρο και τέλος ο υπολογισμός των σημείων του.

Περιγραφικά η διαδικασία αυτή εκτελείται ως εξής [Εικόνα 0-1]: Οι δύο εικόνες, τμήμα των οποίων απεικονίζεται από κοινού και στις δύο, και προέρχονται από μηχανή γνωστής γεωμετρίας,²⁸ προσανατολίζονται σχετικά ή μια ως προς την άλλη, παράγοντας ένα στερεομοντέλο του αντικείμενου που απεικονίζουν. Ο προσανατολισμός γίνεται με τη χρήση ομόλογων σημείων και απαιτεί μηδενισμό της κατακόρυφης διαφοράς των θέσεων του ίδιου σημείου στις δύο εικόνες (γ παράλλαξη²⁹) ώστε να είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση. Στη συνέχεια με εμπροσθοτομία υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων του αντικείμενου. Η μέθοδος μπορεί να επιλυθεί είτε με **ανεξάρτητα προσανατολισμένες δέσμες** για κάθε μια εικόνα, δηλαδή κάθε εικόνα τοποθετείται στη σωστή της θέση στο χώρο και στη συνέχεια συνδέεται με την ομόλογή της, είτε με **κοινό προσανατολισμό δεσμών**, δηλαδή οι εικόνες και το αντικείμενο που απεικονίζουν αντιμετωπίζονται ως ένα σώμα και προσανατολίζονται ταυτόχρονα. Το στερεομοντέλο υλοποιείται από τις αλληλοτεταγμένες δέσμες ακτίνων που ενώνουν μηχανή, εικόνες και αντικείμενο στη χώρο.



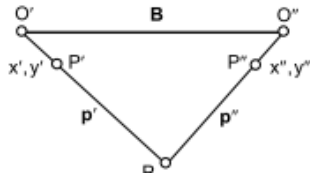
Εικόνα 0-1: σχετικός και απόλυτος προσανατολισμός στερεοζεύγους με τη μέθοδο των δεσμών (Πέτσα 2000)

Η μαθηματική επίλυση αυτής της διαδικασίας στην περίπτωση της μεθόδου των δεσμών που αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο, υλοποιείται με την εφαρμογή της συνθήκης συνεπιπεδότητας και ενός προβολικού μετασχηματισμού. Η συνθήκη συνεπιπεδότητας

²⁸ Δηλαδή μετρητικές ή μη μετρητικές βαθμονομημένες μηχανές για τις οποίες υπάρχει γνώση των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού δηλαδή της σταθεράς της μηχανής c , τη θέση x_0, y_0 του πρωτεύοντος σημείου και το πολυώνυμο της ακτινικής διαστροφής που καθορίζουν το μοντέλο της κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα τη συγκεκριμένη μηχανή.

²⁹ Σε τυχαία θέση των δύο εικόνων, οι ομόλογες ακτίνες είναι προφανώς ασύμβατες και η διαφορά των τομών τους με τυχαίο οριζόντιο επίπεδο έχει δύο συνιστώσες μια κατά x (οριζόντια παράλλαξη P_x) και μια κατά y (κατακόρυφη παράλλαξη P_y του μοντέλου).

προβλέπει ότι για κάθε σημείο P στο επικαλυπτόμενο τμήμα των δύο εικόνων, το διάνυσμα B της βάσης και τα δύο ομόλογα διανύσματα p' και p'' είναι συνεπίπεδα ή ότι ισχύει: $B \cdot (p' \times p'') = B \cdot d = 0$ (1)



Τα διανύσματα εκφράζουν την προβολική ακτίνα που διέρχεται του κέντρου λήψης της μηχανής O και του σημείου P στο χώρο (\vec{OP}) . Το διάνυσμα d, εκφράζει το επιπολικό επίπεδο των p' και p'' που πρέπει να είναι κάθετο στη βάση B, ώστε το εξωτερικό τους γινόμενο να είναι μηδέν. Ξεκινώντας από τη σχέση (1), αναλύοντας τα τρία διανύσματα στις συνιστώσες τους κατά xyz, θεωρώντας του λόγους $\beta_x = \frac{B_y}{B_x}$ και $\beta_z = \frac{B_z}{B_x}$, εκφράζοντας στη συνέχεια τις συνιστώσες στο σύστημα αναφοράς της αριστερής εικόνας, δηλαδή:

$$p' = \vec{O'P} = k' \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix} = k' \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix}$$

$$p'' = \vec{O''P} = k'' \begin{bmatrix} p''_x \\ p''_y \\ p''_z \end{bmatrix} = k'' R_{\Sigma}^T \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ -c \end{bmatrix} = k'' \begin{bmatrix} x''_{\delta} \\ y''_{\delta} \\ -c_{\delta} \end{bmatrix}$$

και με τη χρήση των στοιχείων του πίνακα στροφής R_{Σ} [$r_{11} - r_{33}$], οποίος περιγράφει τη σχετική στροφή της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή,

$$R_{\omega\phi\kappa} = R_{\kappa} R_{\phi} R_{\omega}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\phi\sin\kappa & \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\phi\cos\kappa \\ -\cos\phi\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\phi\sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{bmatrix}$$

καταλήγουμε στην τελική έκφραση της συνθήκης συνεπιπεδότητας:

$$c(x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32}) + y'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33}) - \beta_y [x'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33})] + c(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31}) + \beta_z [x'(x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32})] - y'(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31}) = 0$$

Τα γνωστά μεγέθη είναι οι παράμετροι της μηχανής, κοινές και για τις δύο εικόνες (c, X_0 , Y_0), τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι εικονοσυντεταγμένες του κοινού σημείου στις δύο εικόνες: x' , y' και x'' , y'' και οι άγνωστες παράμετροι που υπολογίζονται μέσω της συνθήκης είναι πέντε (5): οι συνιστώσες της βάσης β_x , β_z και οι στροφές κατά ω, ϕ, κ που κρύβονται στις μετασχηματισμένες μέσω του πίνακα στροφής εικονοσυντεταγμένες της δεξιάς εικόνας. Η επίλυση απαιτεί τουλάχιστον 5 ομολογίες σημείων. Η περίσσεια των παρατηρήσεων επιβάλλει τη συνόρθωση με MET και επειδή η συνθήκη συνεπιπεδότητας δεν είναι γραμμική απαιτείται γραμμικοποίηση κατά Taylor. Το παραγόμενο προϊόν είναι ένα στερεομοντέλο με 7 ατέλειες θέσης, κλίμακας και προσανατολισμού. Η άρση των ατελειών ή ο «εξωτερικός προσανατολισμός» του στερεομοντέλου απαιτεί γνώση των γεωδαιτικών συντεταγμένων τουλάχιστον τριών σημείων στο στερεομοντέλο (φωτοσταθερά) και υλοποιείται με τη εφαρμογή ενός μετασχηματισμού ομοιότητας που περιλαμβάνει τρεις μεταθέσεις (t_x, t_y, t_z), τρεις στροφές (Ω, Φ, κ) και μια κλίμακα (λ).

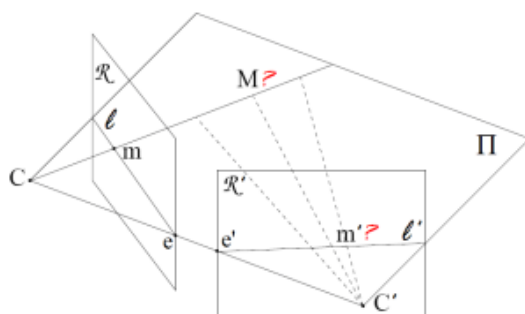
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \times R_{\Omega\Phi\kappa} \times \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

II. Ανάκτηση τρίτης διάστασης: η προσέγγιση της Όρασης Υπολογιστών

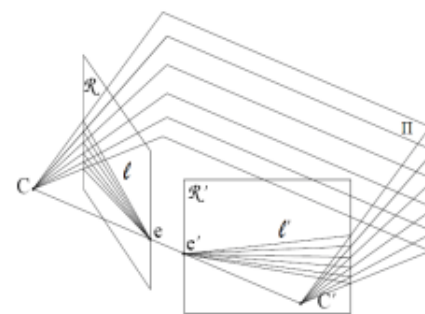
Η προσέγγιση της μεθόδου *δομή από κίνηση-SfM* από το πεδίο Όρασης Υπολογιστών στοχεύει στην εκτίμηση της 3D γεωμετρίας (δομή) ενός αντικειμένου και τη θέση της κάμερας (κίνηση). Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου SfM σε σχέση με την παραδοσιακή στεροσκοπική μέθοδο είναι ότι είναι περισσότερο ευέλικτη σε προϋποθέσεις όπως στη χρήση ομόλογων σημείων με σωστή θέση και κατανομή (τα 6 σημεία Gruber), στη διατήρηση του άξονα πτήσης ($\beta_y, \beta_z=0$), στη χρήση της ίδιας μηχανής με γνωστή εσωτερική γεωμετρία, αρχικές τιμές για τις εξισώσεις έμμεσων παρατηρήσεων. Έτσι η γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής και της σχετικής γεωμετρίας των εικόνων στο χώρο δεν είναι αναγκαία για την 3D ανάπλαση του αντικειμένου που απεικονίζεται.

Περιγραφικά η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα: Αρχικά πρέπει να γίνει συνταύτιση των εικόνων για την αποκατάσταση ομολογιών (τόνων του γκρίζου, χαρακτηριστικών σημείων, σχέσεων στην εικόνα), δηλαδή **εντοπισμός, σύγκριση, επιλογή και αντιστοίχιση** μεταξύ σημείων ενδιαφέροντος ή σημείων χαρακτηριστικών δομών στις εικόνες, όπως ευθείες, καμπύλες, επίπεδα επί της σκηνής ή και τυχαίες επιφάνειες. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η επιπολική γεωμετρία μεταξύ των εικόνων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη βαθμονόμηση της κάμερας και απλοποιεί την αναζήτηση περισσότερων αντιστοιχιών. Οι αντιστοιχίσεις των σημείων και η επιπολική γεωμετρία του συστήματος χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της δομής της σκηνής (θέση σημείων), της κίνησης της κάμερας και την παραγωγή ενός αραιού μοντέλου επιφάνειας. Με πολλαπλούς επαναλαμβανόμενους κύκλους των παραπάνω βημάτων παράγεται ένα βελτιωμένο μετρητικά νέφος σημείων.

Η μαθηματική ερμηνεία του SfM βασίζεται στη μέθοδο της επιπολικής επανασύστασης, μέσω της οποίας δύο ή περισσότερες εικόνες προβάλλονται σε ένα κοινό επίπεδο οπότε λειτουργούν ως στεροζεύγος (Σ. Φάκα 2010). Για το σκοπό αυτό πρέπει να υπολογιστεί ο θεμελιώδης πίνακας F και να οριστούν οι προβολικοί πίνακες κάθε μηχανής P και P' .



Εικόνα 0-2: Επιπολική γεωμετρία δυο εικόνων (Σ. Φάκα 2010)



Εικόνα 0-3: Δέσμη επιπέδων Π . (Σ. Φάκα 2010)

Η απλουστευμένη περίπτωση περιλαμβάνει κατ ελάχιστο δύο εικόνες που αποδίδουν το ίδιο τμήμα του αντικειμένου χωρίς να είναι απαραίτητα αλληλεπικαλυπτόμενες, όπου:

- M : η γεωδαιτική θέση ενός σημείου
- m, m' : η θέση του σημείου M στις δύο εικόνες
- C, C' : τα κέντρα προβολής των δυο εικόνων

- e, e' : η προβολή του κέντρου προβολής στην άλλη εικόνα (επιπολικά σημεία)
- Π : επίπεδο που ορίζει μια επιπολική αντιστοιχία
- l : η ευθεία που ενώνει το m και το c
- l' : η προβολή της ευθείας l στην δεύτερη εικόνα
- P, P' : ο προβολικός πίνακας κάθε κάμερας

Τα επιπολικά σημεία ορίζουν την ευθεία που τέμνει τα κέντρα των καμερών (C, C') με το επίπεδο της εικόνας (R, R'). Αυτή η ευθεία καθορίζει μια δέσμη επιπέδων Π . Από κάθε επίπεδο Π μπορεί να προκύψει μια επιπολική αντιστοιχία, δηλαδή κάθε σημείο της \mathbb{R}^2 να αντιστοιχίζεται σε κάποιο σημείο της l' και αντίστροφα.

- Για τη σχέση του σημείου M στον τρισδιάστατο χώρο και την προβολή του m σε μια εικόνα που παρήχθη από την κάμερα P θα ισχύει η ομογραφία: $m \sim PM$ ³⁰
- Καθώς το σημείο m πρέπει να ανήκει πάνω στην ευθεία l θα ισχύει: $l^T m = 0$
- Επειδή η ευθεία l πρέπει να διέρχεται από το επιπολικό σημείο e θα ισχύει η ισοδυναμία: $l \sim [e]_x m$
- Το επίπεδο Π στο οποίο εντοπίζεται το σημείο M μπορεί να εκφραστεί ως: $\Pi \sim l^T M$
- Το επίπεδο Π αντιστοιχείται σε μια προβολή της l και επειδή $l^T m \sim l^T P M \sim \Pi^T M$ προκύπτει $\Pi \sim P^T l$
- Αντίστοιχα για την ευθεία l' , αφού είναι συνεπίπεδη θα ισχύει: $\Pi \sim P'^T l'$
- Συνδυάζοντας τις παραπάνω προκύπτει: $l' \sim (P'^T) P^T l \sim (P'^T) P^T [e]_x m$
- και θέτοντας $F \sim (P'^T) P^T [e]_x$ προκύπτει: $l' \sim F m$
- Τελικά $m'^T F m = 0$

Ο F ονομάζεται θεμελιώδης πίνακας, είναι μοναδικός και τάξης $\text{rank} F = 2$. Περιέχει την πληροφορία για την επιπολική γεωμετρία των δύο εικόνων και για τον υπολογισμό των P, P' . Επομένως μέσω του F γίνεται βαθμονόμηση των μηχανών, δηλαδή ορίζεται η κίνηση της σκηνής. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τους F, P και P' , υπολογίζονται οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του M (τριγωνοποίηση), δηλαδή ορίζεται η δομή της σκηνής.

Ο F είναι ένας πίνακας 3×3 , επειδή όμως η τάξη του είναι 2, έχει $9 - 2 = 7$ βαθμούς ελευθερίας. Καθώς κάθε ζευγάρι ομόλογων σημείων στις δυο εικόνες δίνει μια εξίσωση, απαιτούνται επτά αντιστοιχίες σημείων για την επίλυση του.

Λανθασμένες αντιστοιχίες σημείων (outliers) μεταξύ των εικόνων, οδηγούν σε εσφαλμένο υπολογισμό του F , με αποτέλεσμα οι υπολογισμένες επιπολικές γραμμές να μην συμπίπτουν, άρα αλλοιώνουν την πραγματική γεωμετρία του συστήματος των εικόνων. Το γεγονός αυτό θα παρουσιάζεται ως μη επίλυση του συστήματος ή ως εσφαλμένη τοποθέτηση των σημείων, δηλαδή ως θόρυβος.

Για την αναγνώριση και την αντιστοίχιση σημείων ελέγχεται η ένταση της φωτεινότητας όλων των pixel (area based matching) ή η ομοιότητα των χαρακτηριστικών δομών (πχ ακμές, γωνίες) (feature based matching) και τίθενται διάφορα μέτρα για την αξιολόγηση της ποιότητας της αντιστοίχισης (συνάρτησεις κόστους). Αλγόριθμοι όπως ο RANSAC, χρησιμοποιούνται συνήθως για να ελαχιστοποιηθούν τα outliers μετά την εξαγωγή των ομόλογων σημείων.

³⁰Όπου ομογραφία ένας προβολικός μετασχηματισμός που μετασχηματίζει τις ομοιογενείς συντεταγμένες του M στη θέση m στον προβολικό χώρο από ένα επίπεδο στο άλλο.

III. Η επεξεργασία των εικόνων στο πρόγραμμα Photoscan

Παρακάτω επιχειρείται τεκμηρίωση των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία των εικόνων, του νέφους και του DSM στα προγράμματα Photoscan και Geomagic.

i. Align photos:

Accuracy: Στην επιλογή High, το Photoscan χρησιμοποιεί την εικόνα σε πλήρη ανάλυση, στην επιλογή Medium θα χρησιμοποιήσει στο 50% της ανάλυσης και στο Low στο 25%. Υψηλότερη ανάλυση κοστίζει σε χρόνο. Επιλέγεται το High.

Pair Pre Selection: Με την επιλογή Generic, το Photoscan κάνει έναν σκανάρισμα για αλληλεπικαλυπτόμενες εικόνες. Ο προέλεγχος αυτός κάνει την ευθυγράμμιση των εικόνων πιο γρήγορη, ωστόσο η ρύθμιση αυτή έχει μικρή επίδραση όταν πρόκειται για υψηλής ανάλυσης εικόνες. Επιλέγεται το Disabled

Key Point Limit: Είναι ο μέγιστος αριθμός ομόλογων σημείων που θα εξάγει το πρόγραμμα από κάθε εικόνα. Για μια εικόνα 36 Megapixel ο μέγιστος αριθμός σημείων θα είναι περίπου 240.000 σημεία, ενώ για μια 21 Megapixel θα είναι 180.000 σημεία. Πρόχειρος έλεγχος από χρήστη του προγράμματος δείχνει ότι το κατώφλι που θέτει το πρόγραμμα είναι σχετικά καλά ορισμένο.³¹Επιλέγουμε το κατώφλι του προγράμματος (40.000 σημεία).

Tie Point Limit: Είναι το κατώφλι των επιλεχθέντων ομόλογων σημείων που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για την ευθυγράμμιση των εικόνων. Θέτοντας το κατώφλι το πρόγραμμα απορρίπτει τα ομόλογα σημεία με το μικρότερο αριθμό προβολών σε αλληλεπικαλυπτόμενες εικόνες. Το όριο εφαρμόζεται πριν τον υπολογισμό της θέσης της κάμερας. Η επιλογή συστήνεται στην περίπτωση μεγάλων έργων με εκατοντάδες εικόνες, γιατί μειώνει το χρόνο για την ευθυγράμμιση των εικόνων και το χρόνο απόκρισης του προγράμματος κατά την επεξεργασία του νέφους.³²Αλλάζουμε το κατώφλι του προγράμματος και από 1000 δίνουμε την τιμή 0.

Στο τέλος της διαδικασίας έχουν αναγνωριστεί και έχουν αντιστοιχηθεί σημεία από μια εικόνα προς όλες τις υπόλοιπες του chunk. Μεμονωμένες εικόνες που δεν ευθυγραμμίζονται με τις υπόλοιπες αποκλείονται (Εικόνα 0-4).

Σημειώνεται ότι η επιλογή High μπορεί να προσθέσει σημαντικό θόρυβο σε σερ εικόνων στις οποίες υπάρχουν περιοχές με σημαντικές αποκρύψεις (πχ κλαδιά) ή ομοιόμορφες επιφάνειες. Εφόσον το αποτέλεσμα κρίνεται προβληματικό συστήνεται η επιλογή Medium ή Low [Εικόνα 0-5, Εικόνα 0-6, Εικόνα 0-7]. Στο στάδιο αυτό γίνεται ο σχεδιασμός των μασκών και η επισήμανση των φωτοσταθερών και χαρακτηριστικών σημείων σύμφωνα με τα παρακάτω:

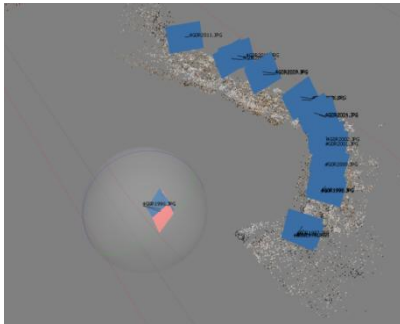
³¹Agisoft Community Forum <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3559.0>

³²Agisoft Community Forum <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3517.0>

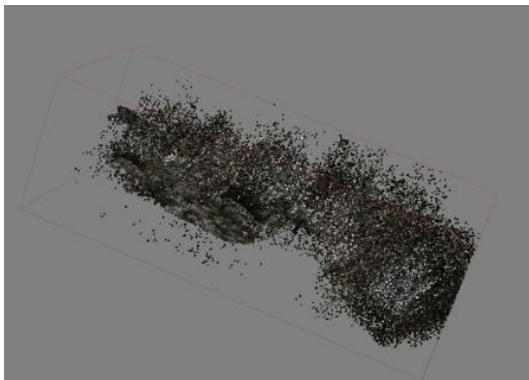
Μάσκες

Οι μάσκες κατασκευάζονται στο Photoscan ή στο Photoshop και στόχο έχουν την απόκρυψη τμημάτων της εικόνας εκτός του αντικειμένου προς αποτύπωση.

Constrain features by mask: η χρήση της μάσκας αποκλείει περιοχές που δεν ανήκουν στο προς αποτύπωση αντικείμενο (πχ ουρανό). Το πρόγραμμα χρειάζεται λιγότερη μνήμη και η διαδικασία επιταχύνεται. Επιλέγεται η χρήση μασκών. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις η χρήση μασκών προσθέτει θόρυβο [Εικόνα 0-8, Εικόνα 0-9].



Εικόνα 0-4: Μεμονωμένες εικόνες που δεν ευθυγραμμίζονται με τις υπόλοιπες αποκλείονται



Εικόνα 0-5: Align photos – HIGH



Εικόνα 0-6: Align photos - MEDIUM



Εικόνα 0-7: Align photos – LOW

Φωτοσταθερά

Για το δέσιμο των επιμέρους στερεομοντέλων (chunks) και τον εξωτερικό προσανατολισμό τους απαιτείται η χρήση φωτοσταθερών, δηλαδή σημείων πάνω στην εικόνα για τα οποία υπάρχει ακριβής γεωδαιτική πληροφορία. Για τον προσανατολισμό ενός στερεομοντέλου (chunk-dense point cloud) στον χώρο απαιτούνται τουλάχιστον 3 φωτοσταθερά. **Συνήθως τοποθετούνται περισσότερα 5 με 10 φωτοσταθερά, ειδικά όταν πρόκειται για αντικείμενα με έντονο ανάγλυφο.** Οι τρεις μορφές των φωτοσταθερών στο πρόγραμμα είναι: πράσινα σημεία: σημεία που προσδιορίζονται και τοποθετούνται από τον χρήστη, μπλε σημεία: σημεία που τοποθετεί αυτόματα το πρόγραμμα, γκρι σύμβολα: σημεία που δεν συμμετέχουν στον τριγωνισμό.³³ Τα τελευταία αντιμετωπίζονται «σημεία ελέγχου-control points», όπως φαίνεται στην αναφορά του προγράμματος.

Η διάταξη των φωτοσταθερών θα πρέπει να ομοιόμορφη και να μην τοποθετούνται σε ευθεία, για να μειωθούν πιθανά σφάλματα στην κλίμακα και τον προσανατολισμό του στερεομοντέλου. Τα φωτοσταθερά πρέπει να επισημαίνονται σε τουλάχιστον 2 εικόνες για να υπολογιστεί το σφάλμα θέσης τους (ουσιαστικά το πρόγραμμα λύνει μια εμπροσθοτομία, όποτε χρειάζεται 2 ομόλογες ακτίνες, άρα 2 εικόνες για να προσδιορίσει τη θέση του σημείου στο χώρο). Θεωρητικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των εικόνων στις οποίες επισημαίνονται τα φωτοσταθερά (projections) τόσο καλύτερα δένει το στερεομοντέλο. **Αύξηση των φωτοσταθερών πέρα από κάποιο αριθμό δεν βελτιώνει την ακρίβεια.**



Εικόνα 0-8: Align photos χωρίς μάσκες. Περισσότερος θόρυβος, αλλά πιο σωστή απόδοση του βάθους

Εικόνα 0-9: Align photos ΜΕ μάσκες. Λιγότερος θόρυβος, αλλά τα τείχη έχουν χάσει τον όγκο τους



Εικόνα 0-10: Εσφαλμένη προεπισκόπηση φωτοσταθερών

³³ Agisoft Community Forum <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=779.0>

Ακρίβεια Φωτοσταθερών

Καθώς κάθε διαδικασία προσθέτει κάποιο σφάλμα στο αντικείμενο που παράγει, συνιστάται η ακρίβεια των στοιχείων που χρησιμοποιούνται (στη συγκεκριμένη περίπτωση εικόνες και φωτοσταθερά) να είναι ίδια ή καλύτερη από την ακρίβεια του μοντέλου στην κατασκευή του οποίου θα χρησιμοποιηθούν.³⁴

Για το έργο μετρήθηκαν πάνω από 70 φωτοσταθερά που κατανεμήθηκαν σε πολλαπλά chunks, ωστόσο κατά τη συνένωση των chunks μειώθηκε σημαντικά ο αριθμός των φωτοσταθερών στη βάση της καταλληλότητας της θέσης στο αντικείμενο και της ακρίβειας τους.

Αν η ευθυγράμμιση των εικόνων έχει γίνει σωστά τότε μετά την υπόδειξη της θέσης ενός φωτοσταθερού σε μια εικόνα, η προεπισκόπηση του ομόλογου σημείου σε άλλη εικόνα δεν θα χρειάζεται διόρθωση της θέσης, αλλά μόνο ενεργοποίηση του φωτοσταθερού (μετατροπή από γκρι σύμβολο σε πράσινη σημαία). Σε αντίθετη περίπτωση η εικόνα δεν έχει ευθυγραμμιστεί σωστά [Εικόνα 0-10] Πρέπει να επισημανθεί ότι σε κάθε συνένωση chunk, η θέση των φωτοσταθερών και το σφάλμα θέσης τους επαναυπολογίζεται.

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ακρίβειας επισήμανσης των φωτοσταθερών υπολογίζοντας το σφάλμα επαναπροβολής σε μέτρα και pixels.³⁵ Το σφάλμα σε μέτρα είναι η διαφορά της μετρημένης θέσης ενός σημείου (marker) και της υπολογισμένης θέσης του από το πρόγραμμα.³⁶ Χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ακρίβεια της εκτίμησης για τη θέση ενός σημείου σε σχέση με την προβολή του στην εικόνα και στόχος είναι η ελαχιστοποίησή του. Γι αυτό άλλωστε πρέπει να αποφεύγεται η χρήση εικόνων με μεγάλο σφάλμα επαναπροβολής κατά την δημιουργία του νέφους.

Σημειώνεται ότι δοκιμάζοντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων με βάρη, και θεωρώντας τις τιμές του Error ως το τυπικό σφάλμα κάθε μέτρησης (δηλαδή το υπόλοιπο της διαφοράς $v_i = \hat{x} - x_i$) παρατηρούνται κάποιες μικρές αποκλίσεις από την υπολογισμένη τιμή του πίνακα [Εικόνα 0-11] και [Πίνακας 0-1]. Κατά την επισήμανση τους ελέγχθηκε το σφάλμα θέσης κάθε φωτοσταθερό και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα όπως δίνεται από τους αντίστοιχους πίνακες (Εικόνα 1-23 Εικόνα 0-12, Εικόνα 0-13). Λαμβάνεται υπόψη ότι οι τιμές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές της ακρίβειας των φωτοσταθερών και όχι ολόκληρου του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μειώνεται με τη διαδοχική μείωση των παρατηρήσεων³⁷ (χαρακτηριστικά σημεία) με

³⁴ Η ακρίβεια της ανάλυσης του στερεομοντέλου καθορίζεται από τη σχέση 0.1mm X Συντελεστή Κλίμακας και στη συγκεκριμένη εργασία θα είναι: 0.1mm X 50= 5mm.

³⁵ <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3639.0> Error in meters is the difference between measured position of the point (camera or marker) and estimated by PhotoScan

³⁶ Η μαθηματική έκφραση του σφάλματος επαναπροβολής (reprojection error) είναι η ακόλουθη: Έστω $\{x_i \leftrightarrow x'_i\}$ η αντιστοιχία μεταξύ ομόλογων σημείων δυο εικόνων. Αναζητούμε τον πίνακα προβολικού μετασχηματισμού ή ομογραφίας \hat{H} και ζεύγη ιδανικών ομολόγων σημείων μεταξύ των δυο εικόνων \hat{x}'_i και \hat{x}_i που ικανοποιούν τη σχέση $\hat{x}'_i = \hat{H}\hat{x}_i$ και ελαχιστοποιούν το **σφάλμα επαναπροβολής** από τη σχέση $\sum_i d(x_i, \hat{x}_i)^2 + d(x'_i, \hat{x}'_i)^2$ δηλαδή την απόσταση των σημείων x_i, x'_i από τη θέση των ιδανικών αντίστοιχων \hat{x}_i και \hat{x}'_i .

³⁷ FT = φωτοσταθερά μετρημένα με totalstation - RL

fp και ft. = χαρακτηριστικά σημεία χωρίς γεωδαιτικές συντεταγμένες fp – χωρίς αυτοκόλλητο φωτοσταθερού, ft. – με αυτοκόλλητο φωτοσταθερού

1002-2009 = χαρακτηριστικά σημεία μετρημένα με totalstation και κατάφωτο

μεγάλο μέσο σφάλμα [Εικόνα 0-14] αλλά και με την προσθήκη φωτοσταθερών χωρίς να έχουν επισημανθεί σε θέσεις του νέφους [Εικόνα 0-16].

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> FT207	994.071000	1010.663000	105.448000	0.000425	5	0.474
<input checked="" type="checkbox"/> FT210	995.196000	1011.148000	104.332000	0.000855	7	0.371
<input checked="" type="checkbox"/> FT211	994.602000	1010.937000	103.598000	0.000729	5	0.315
Total Error				0.000694		0.390

Εικόνα 0-11 : Φωτοσταθερά για chunk "Χ3alret1_GCPs"

	u ²	P βάρη					
u1	0.000425	0.000000	5	P1*u1 ² =	0.000001	P1*u1=	0.002125
u2	0.000855	0.000001	7	P2*u2 ² =	0.000005	P2*u2=	0.005985
u3	0.000729	0.000001	5	P3*u3 ² =	0.000003	P3*u3=	0.003645
average=	0.000670		17	sum=	0.000009	sum=	0.011755
				avr=	0.000004	avrg kan/m=	0.000691 m
				sqrt=	0.002083		

	u ²	P βάρη					
u1	0.474	0.224676	5	P1*u1 ² =	1.123	P1*u1=	2.37
u2	0.371	0.137641	7	P2*u2 ² =	0.963	P2*u2=	2.597
u3	0.315	0.099225	5	P3*u3 ² =	0.496	P3*u3=	1.575
u aver	0.387	0.461542	17	sum=	2.583	sum=	6.542
				avr=	1.291	avrg kan/m =	0.385 pix
				sqrt=	1.136		

Πίνακας 0-1: έλεγχος υπολογισμού σφαλμάτων για chunk "Χ3alret1_GCPs"

Property	Value
Errors	
4G0R7465.JPG	0.404 pix
4G0R7474.JPG	0.788 pix
4G0R7475.JPG	0.734 pix
4G0R7476.JPG	0.777 pix
4G0R7478.JPG	0.215 pix
4G0R7479.JPG	0.722 pix
4G0R7480.JPG	1.177 pix
Total	0.745 pix

Εικόνα 0-12: στιγμιότυπο από την επισημάνση φωτοσταθερών στο Photoscan.

On the Source page

Markers	Easting	Northing	Altitude	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718733.494000	4842765.432000	154.031000	0.041670
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718735.857000	4842766.600000	154.423000	0.015269
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718738.470000	4842769.021000	154.867000	0.024638
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718744.241000	4842774.606000	155.654000	0.023668
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718744.674000	4842779.259000	155.115000	0.027067
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	718746.641000	4842764.284000	156.329000	0.023489
Total Error				0.027145

Root Sum of Squares

Root Mean Squared Error

On the Error page

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	-0.000283	0.037643	-0.017870	0.041670
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	-0.001465	-0.013281	0.007389	0.015269
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	-0.008594	-0.017266	0.015333	0.024638
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	0.003091	0.020577	0.011278	0.023668
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	-0.014141	-0.018157	-0.014247	0.027067
<input checked="" type="checkbox"/> TEST_50...	0.021391	-0.009520	-0.001877	0.023489
Total Error	0.011130	0.021351	0.012535	0.027145

Root Sum of Squares

Root Mean Squared Errors

Εικόνα 0-13: πίνακες σφαλμάτων Photoscan

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
1000	995.718000	1002.312000	100.524000			
1001	996.006000	1002.286000	99.092000			
1002	995.717000	1002.310000	100.527000			
1003	993.853000	1002.386000	100.621000			
1004	990.677000	1002.171000	100.642000			
1006	986.816000	1000.452000	99.771000			
FT201	990.544000	986.103000	104.037000			
FT210	995.199000	987.827000	100.014000			
FT322	996.870000	994.596000	102.617000			
FT323	997.225000	993.358000	103.198000			
FT340	992.729000	988.325000	102.221000			
fp1					7	1.263
fp2					8	1.451
fp500					5	0.523
fp502					8	1.836
fp506					5	0.643
fp508					7	0.847
fp509					6	1.479
fp510					3	0.835
fp511					11	1.086
fp3	1003.439012	977.928980	95.932172	0.003221	7	0.978
FT614	984.165751	994.558599	101.286045	0.033725	4	0.559
fp608	984.285021	992.213078	101.644230	0.036184	4	1.059
fp604	984.751747	992.076274	101.476776	0.083598	4	0.586
fp605	984.592573	992.230601	101.389090	0.135678	4	0.775
ft.213	992.872687	987.075284	104.927132	0.305695	2	1.595
ft.222	999.139825	989.862795	101.211151	0.401927	3	1.006
fp606	984.211081	992.924431	100.956842	0.675256	2	0.095
fp503	998.624419	993.893855	100.603706	0.730740	3	0.393
fp504	998.092818	995.139399	101.430672	0.773770	3	0.382
Total Error				0.432611		0.838

Εικόνα 0-14: Αρχική ακρίβεια χαρακτηριστικών σημείων - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,043\mu$

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
1000	995.718000	1002.312000	100.524000			
1001	996.006000	1002.286000	99.092000			
1002	995.717000	1002.310000	100.527000			
1003	993.853000	1002.386000	100.621000			
1004	990.677000	1002.171000	100.642000			
1006	986.816000	1000.452000	99.771000			
FT201	990.544000	986.103000	104.037000			
FT210	995.199000	987.827000	100.014000			
FT322	996.870000	994.596000	102.617000			
FT323	997.225000	993.358000	103.198000			
FT340	992.729000	988.325000	102.221000			
fp1					7	1.263
fp2					8	1.451
fp500					5	0.523
fp502					8	1.836
fp506					5	0.643
fp508					7	0.847
fp509					6	1.479
fp510					3	0.835
fp511					11	1.086
fp3	1003.439012	977.928980	95.932172	0.003221	7	0.978
FT614	984.165751	994.558599	101.286045	0.033725	4	0.559
fp608	984.285021	992.213078	101.644230	0.036184	4	1.059
fp604	984.751747	992.076274	101.476776	0.083598	4	0.586
fp605	984.592573	992.230601	101.389090	0.135678	4	0.775
ft.213	992.872687	987.075284	104.927132	0.305695	2	1.595
ft.222	999.139825	989.862795	101.211151	0.401927	3	1.006
fp606	984.211081	992.924431	100.956842	0.675256	2	0.095
fp503	998.624419	993.893855	100.603706	0.730740	3	0.393
fp504	998.092818	995.139399	101.430672	0.773770	3	0.382
Total Error				0.028618		0.911

Εικόνα 0-15: Βελτίωση της ακρίβειας με διαδοχική αφαίρεση σημείων με μεγάλο γεωδατικό σφάλμα - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,028\mu$

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
1000	995.718000	1002.312000	100.524000	0.000000	0	0.000
1001	996.006000	1002.286000	99.092000	0.000000	0	0.000
1002	995.717000	1002.310000	100.527000	0.000000	0	0.000
1003	993.853000	1002.386000	100.621000	0.000000	0	0.000
1004	990.677000	1002.171000	100.642000	0.000000	0	0.000
1006	986.816000	1000.452000	99.771000	0.000000	0	0.000
FT201	990.544000	986.103000	104.037000	0.000000	0	0.000
FT210	995.199000	987.827000	100.014000	0.000000	0	0.000
FT322	996.870000	994.596000	102.617000	0.000000	0	0.000
FT323	997.225000	993.358000	103.198000	0.000000	0	0.000
FT339	991.962000	987.593000	102.077000	0.000000	0	0.000
FT340	992.729000	988.325000	102.221000	0.000000	0	0.000
FT602	988.199000	977.119000	100.449000	0.000000	0	0.000
FT614	984.165751	994.558599	101.286045	0.033725	4	0.559
fp1					7	1.263
fp2					8	1.451
fp3	1003.439012	977.928980	95.932172	0.003221	7	0.978
fp500					5	0.523
fp502					8	1.836
fp503	998.624419	993.893855	100.603706	0.730740	3	0.393
fp504	998.092818	995.139399	101.430672	0.773770	3	0.382
fp506					5	0.643
fp508					7	0.847
fp509					6	1.479
fp510					3	0.835
fp511					11	1.086
fp604	984.751747	992.076274	101.476776	0.083598	4	0.586
fp605	984.592573	992.230601	101.389090	0.135678	4	0.775
fp606	984.211081	992.924431	100.956842	0.675256	2	0.095
fp608	984.285021	992.213078	101.644230	0.036184	4	1.059
ft.213	992.872687	987.075284	104.927132	0.305695	2	1.595
ft.222	999.139825	989.862795	101.211151	0.401927	3	1.006
Total Error				0.012392		0.911

Εικόνα 0-16: Πλασματική βελτίωση της ακρίβειας με τη προσθήκη 14 μετρημένων φωτοσταθερών που όμως δεν ανήκουν στο νέφος (για αυτό δεν δίνεται το γεωδατικό σφάλμα) - Ανατολικά τείχη $\sigma_{xy}=0,012m$

ii. Build dense cloud:

Το Photoscan χρησιμοποιεί τις θέσεις της μηχανής, όπως προκύπτουν από το alignment για να υπολογίσει το βάθος κάθε σημείου και να δώσει τελικά το νέφος σημείων. Σύμφωνα με το manual, το PhotoScan παράγει νέφη σημείων, τα οποία με την ίδια πυκνότητα, αν όχι μεγαλύτερη με τα νέφη σαρωτών LIDAR.³⁸

Quality: όσο πιο υψηλή η ρύθμιση ποιότητας που τίθεται, τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια της γεωμετρίας του αντικειμένου, αλλά αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Επιλέγεται το Medium, επειδή το σύστημα κρασάρει στην ρύθμιση high.

Depth filtering: Η ρύθμιση χρησιμοποιείται για να μειωθεί ο πιθανός θόρυβος (ακραίες τιμές σημείων) που προκαλείται από την κακή ποιότητα των εικόνων (κακή εστίαση, κακή ανάλυση κλπ). Το PhotoScan υπολογίζει τους χάρτες βάθους για κάθε εικόνα και στη συνέχεια εξαιρεί τις ακραίες τιμές που εντοπίζει, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους αλγορίθμους φιλτραρίσματος: **Mild** φιλτράρισμα του χάρτη βάθους επιλέγεται σε περιπτώσεις αντικειμένων με μεγάλη λεπτομέρεια ώστε να μην εξαιρεθούν σημαντικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή δεν εξομαλύνει το αντικείμενο. Σε αντίθετη περίπτωση επιλέγεται η ρύθμιση **Aggressive**, ενώ τέλος η **Moderate** ρύθμιση είναι μια ενδιάμεση κατάσταση. Για το συγκεκριμένο έργο, δοκιμές έδειξαν ότι η ρύθμιση Moderate είναι επαρκής.

Reuse depth maps: κατά την παραγωγή του νέφους σημείων γίνεται πρώτα η ανακατασκευή του βάθους σκηνής (depth reconstruction) και στη συνέχεια η δημιουργία των ομόλογων σημείων που τελικά αποτελούν το νέφος σημείων. Επιλέγοντας «reuse depth maps» το Photoscan προχωρά κατευθείαν στο δεύτερο βήμα. Σε δοκιμή που πραγματοποιήσαμε βγάζει FAIL, γιατί αποτελεί η πρώτη μας δοκιμή και δεν έχει υπολογιστεί ο χάρτης βάθους για κάθε εικόνα. Δεν επιλέγεται.

iii. Building mesh

Στο στάδιο αυτό μετατρέπεται το νέφος σημείων σε ένα σύνολο τριγωνικών επιφανειών, που περιγράφουν τριδιάστατα το αντικείμενο. Το σύνολο τριγωνικών επιφανειών ονομάζεται μοντέλο TIN (triangulated irregular network) και η ποιότητά του καθορίζεται από τις παραμέτρους που θέτουμε στον αλγόριθμο ώστε να προσδιοριστεί με τον πιο πιστό τρόπο το αντικείμενο.

Η ποιότητα του TIN (mesh) σχετίζεται προφανώς με τον αριθμό των πολυγώνων, καθώς αύξηση του αριθμού των πολυγώνων βελτιώνει την περιγραφή του αντικειμένου. Η ποιότητα εξαρτάται ακόμα από την έκταση της επιφάνειας του αντικειμένου, την ανάλυση των εικόνων, την ακρίβεια της γεωμετρίας, και την πληρότητα απόδοσης της λεπτομέρειας. (Giraud, 2013)¹

Surface type: Η παράμετρος αυτή αφορά τον τύπο επιφάνειας που θα χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση του αντικειμένου. Ο τύπος *Arbitrary* συνίσταται για εργασίες επίγειας φωτογραμμετρίας, που περιλαμβάνουν λίγες εικόνες και υψηλό βαθμό επεξεργασίας, όπως η αποτύπωση αγαλμάτων, κτηρίων. Ο τύπος *Height field* επιλέγεται συνήθως για εργασίες εναέριας φωτογραμμετρίας καθώς επιτρέπει την επεξεργασία μεγαλύτερων συνόλων δεδομένων και απαιτεί λιγότερη μνήμη. Ο τύπος αυτός θέτει ένα πιο αυστηρό κατώφλι για το πλήθος σημείων που θα χρησιμοποιηθούν και τις τριγωνικές επιφάνειες που θα παραχθούν, δηλαδή ρυθμίζει θέτει μικρότερα κατώφλια και για τις παρακάτω ρυθμίσεις. Επιλέγεται ο τύπος Arbitrary.

³⁸ Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.0.0, <http://bit.ly/1FavrvE>

Source data: Καθορίζει την πυκνότητα του νέφους σημείων που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη δημιουργία των τριγωνικών επιφανειών. Πιο πυκνό νέφος θα δημιουργήσει καλύτερης ποιότητας μοντέλο, αλλά θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο επεξεργασίας. Επιλέγεται ο τύπος Dense Cloud.

Polygon count: Καθορίζει το μέγιστο πλήθος επιφανειών στο τελικό πλέγμα. Η ρύθμιση low παράγει ~6 εκ. πολύγωνα, η medium ~12 εκ. πολύγωνα και η high ~20εκ.³⁹

Interpolation: Όταν η λειτουργία της παρεμβολής ρυθμίζεται στο Disabled κατασκευάζονται επιφάνειες μόνο μεταξύ των σημείων του νέφους και τυχόν κενά στο δίκτυο επιφανειών (πλέγμα) συμπληρώνονται στη συνέχεια. Αν ρυθμιστεί στο Enabled (default) το πρόγραμμα θα παρεμβάλει επιφάνειες μέσα σε έναν κύκλο με συγκεκριμένη ακτίνα γύρω από κάθε σημείο του νέφους, καλύπτοντας κάποια κενά του νέφους. Και σε αυτή την περίπτωση τυχόν κενά στο πλέγμα μπορούν να συμπληρωθούν στη συνέχεια. Στη ρύθμιση Extrapolated το πρόγραμμα δημιουργεί πλέγμα χωρίς κενά. Η ρύθμιση Enabled συνιστάται για την παραγωγή ορθοεικόνων, και αυτή επιλέγεται.

iv. Align chunks:

Method: Για την ευθυγράμμιση των κομματιών που έχουμε ήδη κατασκευάσει υπάρχει η δυνατότητα Point based, Camera based και Marker based. Όπως διαπιστώσαμε η Point based μέθοδος δίνει σημαντικά μικρότερο νέφος σημείων (Εικόνα 0-17), μόλις 7 εκ. σημεία σε σχέση με τα 71 εκ. σημεία της άλλης μεθόδου, παρά το γεγονός ότι τέθηκε Pointlimit=0.⁴⁰ Η Camera based μέθοδος από την άλλη έδωσε ελαφρά μεγαλύτερο σφάλμα επαναπροβολής (Εικόνα 0-18) και συγκεκριμένα 0.7 pix (3.7pixmax) σε σχέση με 0.5pix (1.8pixmax).

Property	Value
General	
Cameras	172
Aligned cameras	172
Markers	70
Point Cloud	
Points	183,817 of 282,697
Effective overlap	3.28613
Reprojection error	0.523951 (1.80164 max)
Dense Point Cloud	
Points	7,348,063
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Mild

Εικόνα 0-17: Δεδομένα για Point based chunk alignment

Property	Value
General	
Cameras	172
Aligned cameras	172
Markers	70
Point Cloud	
Points	233,014 of 343,509
Effective overlap	3.20002
Reprojection error	0.700292 (3.72398 max)
Dense Point Cloud	
Points	71,537,261
Reconstruction parameters	

Εικόνα 0-18: Δεδομένα για Camera based chunk alignment

Η Marker based μέθοδος από την άλλη είναι η ταχύτερη των μεθόδων γιατί δεν απαιτεί την επαναευθυγράμμιση των εικόνων. Η ακρίβεια της εξαρτάται από τον αριθμό και την κατανομή των φωτοσταθερών. Θεωρητικά πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 3 φωτοσταθερά στα δύο chunk που ευθυγραμμίζονται. Στην πράξη αυτό δεν είναι αρκετό.

Εφόσον το align chunks έχει γίνει σωστά, η σχετική θέση των 2 chunks και των κοινών φωτοσταθερών πρέπει να είναι απολύτως συμπληρωματική. Η συσχέτιση των dense clouds των chunks μεταξύ τους γίνεται πιθανόν με τη χρήση ενός αλγορίθμου ICP - Iterative Closest Point. Ο ICP ελαχιστοποιεί τη απόσταση μεταξύ των δύο νεφών και βοηθά στην ανακατασκευή 2D ή 3D επιφανειών.

³⁹ Ανάκτηση από Agisoft Community Forum στις 10.01.2016 [http://goo.gl/9QjIQz]

⁴⁰ Ίσως επηρέασε αρνητικά η επιλογή: Image Matching accuracy = medium

v. Build mesh:

Η διαδικασία της κατασκευής του mesh υλοποιείται σε διαφορετικό πρόγραμμα (βλ. Κεφ. IV)

vi. Add texture:

Mapping mode: συστήνεται η επιλογή Generic για αντικείμενα με φυσική ακανονιστική γεωμετρία.

Blending mode: για τη σύνθεση της τιμής των pixels που θα έχει η τελική υφή του αντικειμένου παρότι συστήνεται το Mosaic επιλέγεται το Disabled γιατί διαπιστώθηκε ότι δίνει καλύτερη ποιότητα ορθοεικόνας.

Texture size/count: η επιλογή αυτή καθορίζει τις διαστάσεις (πλάτος και μήκος) του χάρτη υφής (texture atlas) σε pixels, και τον αριθμό των αρχείων. Αύξηση του αριθμού των αρχείων βελτιώνει την ανάλυση του τελικού μοντέλου και διευκολύνει την επεξεργασία από άποψη μνήμης. Επιλέχθηκε ο συνδυασμός 4096x1.

IV. Η επεξεργασία των dense cloud και των mesh στο πρόγραμμα Geomagic

Η διαδικασία επεξεργασίας του νέφους συνεχίστηκε στο πρόγραμμα Geomagic επειδή η ποιότητα παραγωγής του mesh και τα εργαλεία επεξεργασίας του Photoscan είναι περιορισμένα. Η εξαγωγή densecloud για επεξεργασία έγινε ως αρχείο .ply και η εισαγωγή του επεξεργασμένου mesh ως αρχείο .obj. Προφανώς η ποιότητα του νέφους καθορίζει την ποιότητα του mesh. Κατά την διαδικασία παραγωγής του στο πρόγραμμα Geomagic διαπιστώθηκαν τα εξής:

Πριν το wrapping πρέπει να γίνει καλός καθαρισμός του νέφους. Ο καθαρισμός γίνεται χρησιμοποιώντας το **reduce noise** και το **select outliers**.⁴¹ Το reduce noise επιλέγει τα σημεία με την μεγαλύτερη απόκλιση από την επιφανειακή καμπυλότητα του αντικείμενου, δηλαδή σημεία που θεωρητικά δεν ανήκουν σε αυτό. Επιλέγεται η παράμετρος **Free-form** γιατί το ακανόνιστο σχήμα του κάστρου προσιδιάζει περισσότερο σε οργανικά αντικείμενα (όχι μηχανική κατασκευή).

Ως **outlier** χαρακτηρίζεται ένα σημείο που δεν θεωρείται έγκυρο βάσει της απόκλισης του από το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας (normal ή normal vector deviation) ή την ευκλείδεια απόστασή του από την γειτονική ομάδα σημείων. Η απομάκρυνσή τους βελτιώνει την ακρίβεια του μοντέλου. Σε ότι αφορά τα outliers οι ρυθμίσεις ξεκινούν συνήθως από μια πολύ χαμηλή ευαισθησία της τάξης του 5%, δηλαδή ο αλγόριθμος εντοπίζει το σημεία με 95% πιθανότητα εκτός επιφανειακής καμπυλότητας του αντικείμενου. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το ποσοστό "ευαισθησίας", τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των επιλεγόμενων σημείων. Πριν διαγραφούν τα επιλεχθέντα σημεία, από επιλέγονται αυτά που ανήκουν σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα, για να μην χαθεί πολύτιμη πληροφορία.

Η διαδικασία των **reduce noise** και **select outliers** επαναλαμβάνεται μέχρι το οπτικό αποτέλεσμα να είναι ικανοποιητικό. Για τον έλεγχο της ποιότητας του νέφους χρησιμοποιήθηκε επίσης η τιμή του δείκτη crease angle. Ο δείκτης αυτός υποδηλώνει τη γωνία μεταξύ των πρωτεύοντων κάθετων διανυσμάτων δύο διαδοχικών επιφανειών και χρησιμοποιείται για την εξομάλυνσή του [Εικόνα 0-28]. Όσο μεγαλύτερη η γωνία τόσο πιο αδρό το αντικείμενο. Μεγάλος δείκτης crease angle δημιουργεί προβλήματα σκίασης (ανάλογα με την γωνία normals δίνεται διαφορετική ένταση φωτεινότητας) και φαίνεται ότι αλλοιώνει την τελική υφή του αντικείμενου. Όταν η γωνία μεταξύ των γεωμετρικών normals δύο γειτονικών επιφανειών είναι μικρότερη από τη crease angle, τότε η σκίαση των γειτονικών επιφανειών είναι ομοιόμορφη και επομένως τα δύο τρίγωνα με την ίδια σκίαση θα φαίνονται ως τμήμα της ίδιας επιφάνειας,⁴² ενώ όταν η γωνία μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη θα σκιάζονται διαφορετικά, δηλαδή το ένα πιο σκούρο και το άλλο πιο φωτεινό.

Μείωση του θορύβου και των outliers μειώνει αντίστοιχα την μέση crease angle που υπολογίζει το πρόγραμμα για το mesh. Πρόσφατη διπλωματική σε γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείου προτείνει την ελάχιστη τιμή 10rad για την crease angle πριν την διαδικασία του wrapping (Μ. Φάκα 2011). Παρατηρείται [Εικόνα 0-19] ότι ο θόρυβος συνήθως εντοπίζεται

⁴¹How does the Sensitivity parameter in Select Outliers work? Ανάκτηση από <http://goo.gl/fnzDNI>

⁴²Ο αλγόριθμος λειτουργεί κάπως έτσι: IF [face angle >= crease angle, use facet shading] ELSE [use smooth shading]

σε θέσεις με κακή γεωμετρία εικόνων [1] ή σε περιοχές αλληλοεπικάλυψης μεταξύ διαφορετικών νεφών [2] που δεν έχουν δέσει σωστά. Ο θόρυβος μεταφράζεται σε κακή απόδοση mesh, σε έλλειμμα πληροφορίας, ή σε αναδιπλωμένες επιφάνειες που πρέπει να καθαριστούν με προσοχή [Εικόνα 0-20]. Ο θόρυβος που οφείλεται στην κακή ένωση νεφών από διαφορετικές θέσεις λήψης είχε επίσης ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δύο διακριτές επιφάνειες mesh [Εικόνα 0-22]. Συγχώνευση των επιμέρους επιφανειών με χειροκίνητο προσδιορισμό θα περιέχει σημαντικό σφάλμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται επισήμανση των τμημάτων που μετακινήθηκαν χειροκίνητα ή επανάληψη της διαδικασίας καθαρισμού του νέφους με διαφορετικές ρυθμίσεις, όπως και έγινε στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Ο καθαρισμός του mesh γίνεται αφού αυτό χωριστεί σε επιμέρους τμήματα με αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Χωρίς επαρκή αλληλοεπικάλυψη η σύνδεση των επιμέρους τμημάτων με την εντολή merge θα αλλάξει τον προσανατολισμό του mesh [Εικόνα 0-23]. Με την χρήση του mesh στο Photoscan σε νέφος με διαφορετικό προσανατολισμό δεν θα παραχθεί η σωστή υφή του αντικειμένου [Εικόνα 0-24].

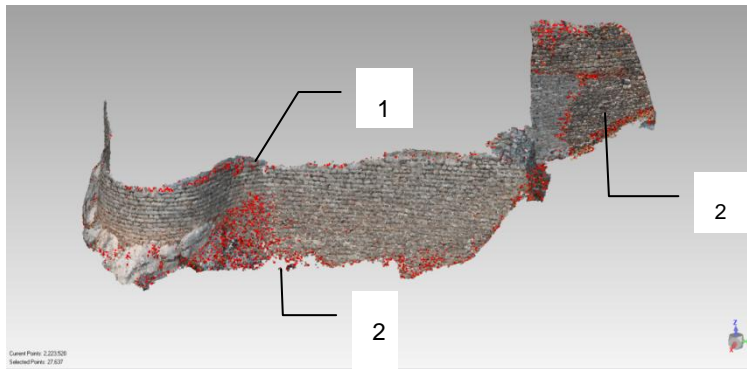
Η εξαγωγή του νέφους από το Photoscan γίνεται ως αρχείο .ply και η εισαγωγή του mesh από το Geomagic γίνεται ως αρχείο .obj. Μετά την εισαγωγή εξετάζεται ξανά η ποιότητα του mesh με την εντολή Mesh Statistics>Fix Topology. Ιδανικά όλες οι υπόλοιπες τιμές πλην 1.Total faces, 2.Total vertices, 3.Connected Components πρέπει να είναι μηδενικές. Η επεξεργασία του mesh δεν επηρεάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης.

Πίνακας 0-2: ανάλυση μοντέλου με Fix Topology και με Mesh Doctor

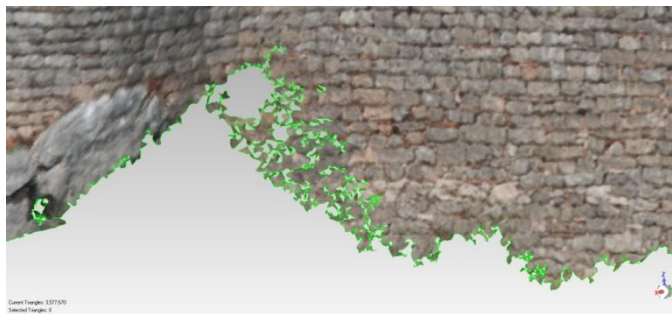
	Αρχείο	Resolution	Point density
Μη επεξεργασμένο mesh	Kastro_2	0,00571846m/pix	30580.3pts per m ^έ
Fix Topology	Kastro_2.1	0,00571850m/pix	30579.9 pts per m ^έ
Mesh Doctor⁴³	Kastro_2.2	0,00571849m/pix	30579.9 pts per m ^έ

Κατόπιν εκτελείται η εντολή add texture και παράγεται η τελική αναφορά ελέγχου του αρχείου.

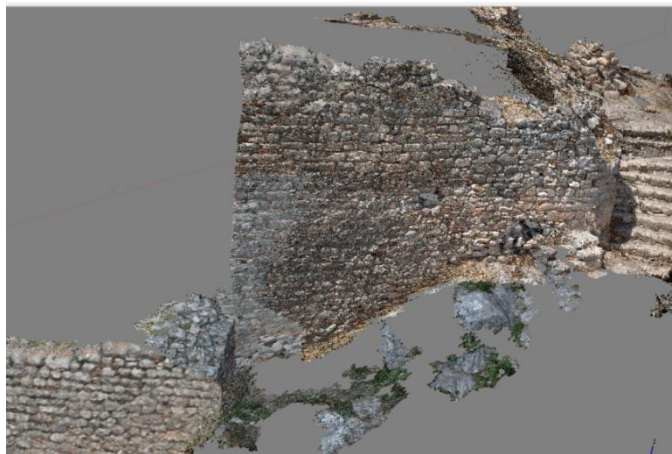
⁴³ Αν έχει γίνει πλήρης έλεγχος του MeshDoctor δηλαδή όλα τα προβληματικά στοιχεία έχουν μηδενιστεί, τότε το MeshStatistics του Photoscan δεν εφαρμόζει την επιλογή FixTopology.



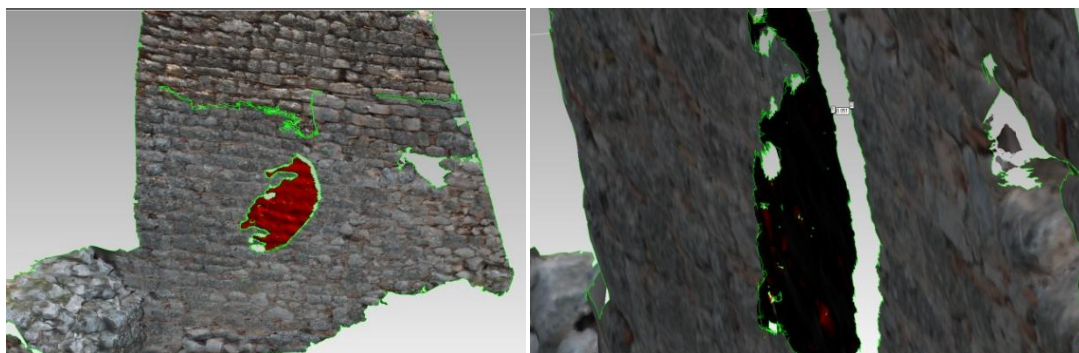
Εικόνα 0-19: Στιγμιότυπο Geomagic Αναγνώριση θορύβου νέφους



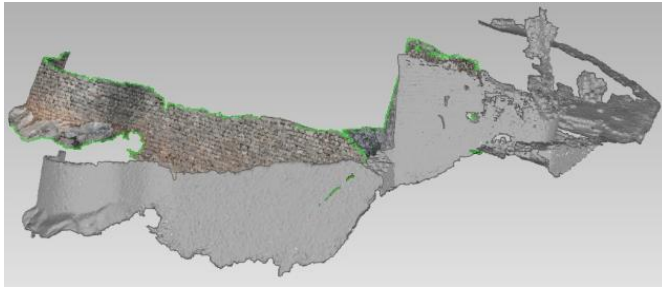
Εικόνα 0-20: Στιγμιότυπο Geomagic Αποτελέσματα θορύβου στο mesh



Εικόνα 0-21: Στιγμιότυπο Photoscan. Εμφανής η διαφορά στη φωτεινότητα των εικόνων στο νέφος. Θα επηρεάσει την επεξεργασία του mesh



Εικόνα 0-22: Στιγμιότυπο Geomagic Διπλές επιφάνειες λόγω κακή σύνδεσης των επιμέρους νεφών.



Εικόνα 0-23: Στιγμιότυπο Geomagic. Merge επιμέρους mesh χωρίς επαρκή επικάλυψη



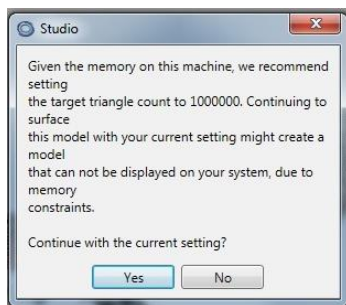
Εικόνα 0-24: Παραμορφωμένο αντικείμενο μετά από χρήση mesh διαφορετικού προσανατολισμού

Property	Value
Total faces	4992588
Total vertices	2506407
Out of range indices	0
Free vertices	4001
Similar vertices	4
Duplicate faces	0
Zero faces	0
Degenerated faces	6
Open edges	12272
Multiple edges	4
Flipped normals	0
Connected components	11

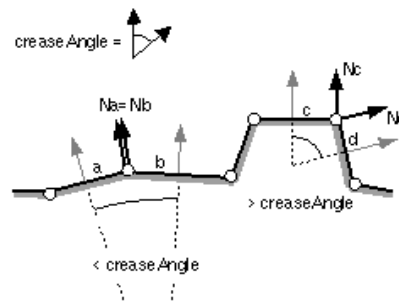
Εικόνα 0-25: Mesh statistics

Property	Value
Total faces	4992574
Total vertices	2502394
Out of range indices	0
Free vertices	0
Similar vertices	4
Duplicate faces	0
Zero faces	0
Degenerated faces	6
Open edges	12270
Multiple edges	0
Flipped normals	0
Connected components	5

Εικόνα0-26: Mesh statistics μετά το Fix topology



Εικόνα 0-27: Συστάσεις για μείωση αριθμού τριγώνων του mesh λόγω ανεπάρκειας μνήμης.



Εικόνα0-28: Crease angle , πηγή: accad.osu.edu

V. Γεωδαιτικές μετρήσεις

5.3.1 Εσωτερικό Δίκτυο - Οριζοντιογραφική επίλυση κλειστής εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3\Sigma_4\Sigma_5\Sigma_6\Sigma_1$

Τίθεται ως σταθερή κορυφή η Σ_1 (1000,1000,100) και ως διεύθυνση η $\alpha_{\Sigma_1\Sigma_6} = 200g$.

		εσωτερικές	εσωτερικές διορθωμένες
β_1	β_{612}	97,4205	97,4355
β_2	β_{123}	122,6324	122,6474
β_3	β_{234}	179,9049	179,9199
β_4	β_{345}	35,6887	35,7037
β_5	β_{456}	319,8367	319,8517
β_6	β_{561}	44,4267	44,4417
		799,9099	800,0000

Υπολογίζεται η αναλογική διόρθωση για κάθε γωνία και στη συνέχεια υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές των γωνιών β'

$$800 - 799,9099 = 0,0901^g \text{ Το συνολικό γωνιακό σφάλμα}$$

$$0,0150^g \text{ Η αναλογική διόρθωση ανά γωνία}$$

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης κάθε πλευράς $\alpha_{\Sigma_1\Sigma_6} = 200g$

	εσωτερικές
α_{21}	97,4355
α_{32}	20,0829
α_{43}	0,0029
α_{54}	235,7066
α_{65}	355,5583
α_{16}	0,0000

Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών της όδευσης

	M.O.	stDEV
D12	12,084	0,0010
D23	12,350	0,0037
D34	20,226	0,0023
D45	18,969	0,0036
D56	9,050	0,6891
D61	23,321	0,0008
$\Sigma S =$	96,000m	

Υπολογίζονται οι προσωρινές διαφορές συντεταγμένων Δx_{ij} Δy_{ij}

$$\Delta x_{12}' = S_{\Sigma 1\Sigma 2} \cdot \sin \alpha_{\Sigma 1\Sigma 2}$$

$$\Delta y_{12}' = S_{\Sigma 1\Sigma 2} \cdot \cos \alpha_{\Sigma 1\Sigma 2}$$

$\Delta x'_{12}$	12,074	$\Delta y'_{12}$	-0,487
$\Delta x'_{23}$	3,832	$\Delta y'_{23}$	-11,741
$\Delta x'_{34}$	0,001	$\Delta y'_{34}$	-20,226
$\Delta x'_{54}$	-10,090	$\Delta y'_{54}$	16,063
$\Delta x'_{56}$	-5,817	$\Delta y'_{56}$	-6,933
$\Delta x'_{61}$	0,000	$\Delta y'_{61}$	23,321
$\Sigma \Delta x'_{ij} =$	-0,0005	$\Sigma \Delta y'_{ij} =$	-0,0022
$\omega_x =$	0,0005m	$\omega_y =$	0,0022m

Υπολογίζεται το γραμμικό σφάλμα: $\omega_s = 0,002m$

Το γραμμικό σφάλμα είναι μικρότερο από το ανεκτό ορισμένο από τις προδιαγραφές (5mm) και γίνεται αποδεκτό.

Γωνία διεύθυνσης του γραμμικού σφάλματος: $\alpha_{\omega_s} = \arctan(\omega_x/\omega_y)$ $\alpha_{\omega_s} = 73,6117^\circ$

Υπολογίζονται οι διορθώσεις δx_{ij} και δy_{ij} στα $\Delta x'_{ij}$ και $\Delta y'_{ij}$. Το γραμμικό σφάλμα μοιράζεται στις μετρημένες πλευρές του μήκους τους $S_{ij}/\Sigma S$

$\delta \Delta x_{12}$	0,0001	$\delta \Delta y_{12}$	0,0003
$\delta \Delta x_{23}$	0,0001	$\delta \Delta y_{23}$	0,0003
$\delta \Delta x_{34}$	0,0001	$\delta \Delta y_{34}$	0,0005
$\delta \Delta x_{45}$	0,0001	$\delta \Delta y_{45}$	0,0004
$\delta \Delta x_{56}$	0,0000	$\delta \Delta y_{56}$	0,0002
$\delta \Delta x_{61}$	0,0001	$\delta \Delta y_{61}$	0,0005

$$\omega_x = \Sigma \Delta x'_{ij} = 0,0005 \text{ m}$$

$$\omega_y = \Sigma \Delta y'_{ij} = 0,0022 \text{ m}$$

Υπολογίζονται οι τελικές τιμές των Δx_{ij} και Δy_{ij} , όπου $\Delta x_{ij} = \Delta x'_{ij} + \delta \Delta x_{ij}$

Δx_{12}	12,074	Δy_{12}	-0,486
Δx_{23}	3,832	Δy_{23}	-11,741
Δx_{34}	0,001	Δy_{34}	-20,225
Δx_{45}	-10,090	Δy_{45}	16,063
Δx_{56}	-5,817	Δy_{56}	-6,933
Δx_{61}	0,000	Δy_{61}	23,322

Υπολογίζονται οι καρτεσιανές συν/νες των κορυφών

x_S1	1000,000	y_S1	1000,000
x_S2	987,926	y_S2	999,514
x_S3	984,094	y_S3	987,773

x_S4	984,093	y_S4	967,548	
x_S5	994,183	y_S5	983,611	
x_S6	1000,000	y_S6	976,678	
x_S1	1000,000	y_S1	1000,000	έλεγχος

5.3.2 Εσωτερικό Δίκτυο -Οριζοντιογραφική επίλυση ανοιχτής πλήρως εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο Σ₄Σ₉Σ₈Σ₁

Οι συντεταγμένες των γνωστών σημείων προέρχονται από την επίλυση της όδευσης στο πολύγωνο Σ₁Σ₂Σ₃Σ₄Σ₅Σ₆Σ₁

Τα γνωστά σημεία Σ1 και Σ4 θα εξαρτηθούν από τις κορυφές Σ6 και Σ3 αντίστοιχα .

x_S1	1000	y_S1	1000,0000
x_S3	984,0942	y_S3	987,7730
x_S4	984,0932	y_S4	967,5479
x_S2	987,9261	y_S2	999,5136

Υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης (2ο θεμελιώδες) α_{T3 Σ4} και α_{Σ1 T6}

α _{T3 Σ4}	ΔΧ	-0,0010	0,0001	0,0031	g	200+	200,0031 ^g
	ΔΥ	-20,2251					
α _{Σ1 T6}	ΔΧ	-12,0739	24,8255	97,4367	g	200+	297,4367 ^g
	ΔΥ	-0,4864					

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνση (3ο θεμελιώδες) α' Σ1 T6 από τις μετρήσεις της όδευσης

$$\alpha' \Sigma 1 T 6 = \alpha T 3 \Sigma 4 + S 4 . S 9 . S 8 + S 9 . S 8 . S 1 + 2 * 200$$

$\alpha' \Sigma 1 T 6 = 240.5873g$

Υπολογίζεται το γωνιακό σφάλμα

$$\omega_{\beta} = \alpha_{\Sigma 1 T 6} - \alpha'_{\Sigma 1 T 6}$$

$$\omega_{\beta} = -0,0778^g$$

Υπολογίζεται η αναλογική διόρθωση για κάθε γωνία

$$\delta\beta = \omega_{\beta} / 4 = -0,0195^g$$

Υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές των γωνιών (β'=β+δβ)

β _{S3.S4.S9}	15,7329 ^g	15,7134 ^g
β _{S4.S9.S8}	237,5953	237,5758
β _{S9.S8.S1}	202,9873	202,9678
β _{S8.S1.S2}	41,1959	41,1764

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης κάθε πλευράς από το 3ο θεμελιώδες

$$\alpha_{\Sigma 4 \Sigma 9} = 15,7166^g$$

$$\alpha_{\Sigma 9 \Sigma 8} = 53,2924^g$$

$$\alpha_{\Sigma 8 \Sigma 1} = 56,2603^{\text{B}}$$

$$\alpha_{\Sigma 1 \Gamma 2} = 297,4367 \quad \text{έλεγχος}$$

Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών της όδευσης ως $S_{ij} = D_{ij} \cdot \sin z_{ij}$

$S_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	24,676 m	$D_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	24,722	$Z_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	96,1225
$S_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	6,969 m	$D_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	6,991	$Z_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	105,1097
$S_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	6,076 m	$D_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	6,779	$Z_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	129,2609
$\Sigma S =$	37,720				

Υπολογίζονται οι προσωρινές διαφορές των συντεταγμένων $\Delta x'_{ij}$ και $\Delta y'_{ij}$

$\Delta x'_{ij} = S_{ij} \cdot \sin a_{ij}$		$\Delta y'_{ij} = S_{ij} \cdot \sin a_{ij}$	
$\Delta x'_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	6,030	$\Delta y'_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	23,928
$\Delta x'_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	5,176	$\Delta y'_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	4,666
$\Delta x'_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	4,697	$\Delta y'_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	3,854
$\Sigma \Delta x'_{ij}$	15,903 m	$\Sigma \Delta y'_{ij}$	32,447 m

Υπολογίζονται τα x'_{s1} και y'_{s1}

$$x'_{s1} = x_{s4} + \Sigma \Delta x'_{ij} \quad y'_{s1} = y_{s4} + \Sigma \Delta y'_{ij}$$

$$x'_{s1} = 999,996 \quad y'_{s1} = 999,995$$

Υπολογίζεται το γραμμικό σφάλμα

$$\omega_x = x_{s1} - x'_{s1} \quad \omega_y = y_{s1} - y'_{s1}$$

$$\omega_x = 0,0038\text{m} \quad \omega_y = 0,0046\text{m}$$

Το ολικό σφάλμα της όδευσης είναι:

$$\omega_s = 0,0060\text{m}$$

και η γωνία διεύθυνσης του σφάλματος είναι: $\alpha_{\omega_s} = 42,9553^{\text{B}}$

Το γραμμικό σφάλμα είναι λίγο μεγαλύτερο από το ανεκτό ορισμένο από τις προδιαγραφές (5mm) αλλά θα γίνει αποδεκτό.

Υπολογίζονται οι διορθώσεις $\delta \Delta x_{ij}$ και $\delta \Delta y_{ij}$ στα $\Delta x'_{ij}$ και $\Delta y'_{ij}$

Το γραμμικό σφάλμα μοιράζεται στις μετρημένες πλευρές ανάλογα με το μήκος τους $S_{ij}/\Sigma S$

$\delta \Delta x_{ij} = \omega_x \cdot S_{ij} / \Sigma S$		$\delta \Delta y_{ij} = \omega_y \cdot S_{ij} / \Sigma S$	
$\delta \Delta x_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	0,0025	$\delta \Delta y_{\Sigma 4 \Sigma 9}$	0,0030
$\delta \Delta x_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	0,0007	$\delta \Delta y_{\Sigma 9 \Sigma 8}$	0,0009
$\delta \Delta x_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	0,0006	$\delta \Delta y_{\Sigma 8 \Sigma 1}$	0,0007
	0,0038m έλεγχος		0,0046m έλεγχος

Υπολογίζονται οι τελικές τιμές των Δx_{ij} και Δy_{ij}

$$\Delta x_{ij} = \Delta x'_{ij} + \delta \Delta x_{ij} \quad \Delta y_{ij} = \Delta y'_{ij} + \delta \Delta y_{ij}$$

$\Delta x_{\Sigma 4\Sigma 9}$	6,0326	$\Delta y_{\Sigma 4\Sigma 9}$	23,9307
$\Delta x_{\Sigma 9\Sigma 8}$	5,1764	$\Delta y_{\Sigma 9\Sigma 8}$	4,6671
$\Delta x_{\Sigma 8\Sigma 1}$	4,6977	$\Delta y_{\Sigma 8\Sigma 1}$	3,8543

Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των κορυφών (1ο θεμελιώδες)

$x_i = x_{i-1} + \Delta x$		$y_i = y_{i-1} + \Delta y$	
x9	990,1269	y9	991,4786
x8	995,3033	y8	996,1457
x1	1000,0010 έλεγχος	y1	1000,0000 έλεγχος

5.3.3 Εσωτερικό Δίκτυο - Υψομετρική επίλυση

Διαδρομή A		Διαδρομή B	
[Σ ₁ Σ ₂ Σ ₃ Σ ₄ Σ ₅ Σ ₆ Σ ₁]		[Σ ₁ Σ ₈ Σ ₉ Σ ₄ Σ ₃ Σ ₂ Σ ₁]	
H1	100	H1	100
H2	101,183	H2	101,179
H3	101,150	H3	101,141
H4	101,470	H4	101,453
H9	102,728	H9	102,708
H8	102,703	H8	102,683
H1	100,012	H1	99,988

Υπολογίζεται η διόρθωση δH_{ij} για κάθε υψομετρική διαφορά, ανάλογα με το μέγεθος της κάθε πλευράς

Απόκλιση για τη διαδρομή A $\omega_{\Delta H}$: 0,011m και απόκλιση για τη διαδρομή B $\omega_{\Delta H}$: -0,012m

και κατανέμεται αναλογικά με τις αποστάσεις s .

Διορθώσεις υψ. διαφορών

		αποστάσεις		M.O.
δH_{12}	0,002	δH_{21}	-0,002	Σ1.Σ2 12,084
δH_{23}	0,002	δH_{32}	-0,002	Σ2.Σ3 12,350
δH_{34}	0,003	δH_{43}	-0,003	Σ3.Σ4 20,227
δH_{49}	0,003	δH_{94}	-0,004	Σ4.Σ9 24,676
δH_{98}	0,001	δH_{89}	-0,001	Σ9.Σ8 6,969
δH_{81}	0,001	δH_{18}	-0,001	Σ8.Σ1 6,080
				ΣS= 82,385m

Τελικά υψόμετρα

Διαδρομή Α		Διαδρομή Β		
H1	100	H1	100	απόκλιση
H2	101,181	H2	101,181	0,001m
H3	101,147	H3	101,145	0,002
H4	101,463	H4	101,460	0,004
H9	102,718	H9	102,718	0,000
H8	102,692	H8	102,694	-0,002
H1	100,000	H1	100,000	0,000
απόκλιση ω _{ΔΗ} : 0,000		απόκλιση ω _{ΔΗ} : 0,000		

5.3.4 Εξωτερικό δίκτυο - Οριζοντιογραφική επίλυση ανοιχτής πλήρως εξαρτημένης όδευσης στο πολύγωνο Σ1Π3Π4Π5Σ2

Οι συντεταγμένες των γνωστών σημείων προέρχονται από την επίλυση της όδευσης στο πολύγωνο Σ1 2 3 4 5 6 1

Τα γνωστά σημεία Σ1 και Σ4 θα εξαρτηθούν από τις κορυφές Σ6 και Σ3 αντίστοιχα

x_Σ1	1000	y_Σ1	1000,0000
x_Σ2	987,9261	y_Σ2	999,5136
x_Σ3	984,0942	y_Σ3	987,7730
x_Σ6	1000,000	y_Σ6	976,678

Υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης (2ο θεμελιώδες) α_{Τ6 Σ1} και α_{Σ2 Τ3}

α _{Τ6 Σ1}	ΔΧ	-0,0001	0,0000	0,0003	g	400-	399,9997
	ΔΥ	23,3217					
α _{Σ2 Τ3}	ΔΧ	-3,8318	0,3264	20,0836	g	200+	220,0836
	ΔΥ	-11,7406					

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνση (3ο θεμελιώδες) α' Σ2 Τ3 από τις μετρήσεις της όδευσης

$$\alpha' \Sigma 2 \text{ T} 3 = \alpha_{\text{T}6 \Sigma 1} + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + 5 \cdot 200 \quad 614,8184 \text{ g}$$

$\alpha' \Sigma 2 \text{ T} 3 = 220,127783^g$

Υπολογίζεται το γωνιακό σφάλμα

$$\omega_{\beta} = \alpha_{\Sigma 2 \text{ T} 3} - \alpha' \Sigma 2 \text{ T} 3$$

$$\omega_{\beta} = -0,0442$$

Υπολογίζεται η αναλογική διόρθωση για κάθε γωνία

$$\delta\beta = \omega_{\beta} / 53 = -0,0088$$

Υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές των γωνιών ($\beta'=\beta+\delta\beta$)

$\beta'1$	T6.S1.P3	205,2652
$\beta'2$	S1.P3.P4	164,9230
$\beta'3$	P3.P4.P5	123,0526
$\beta'4$	P4.P5.S2	76,0305
$\beta'5$	P5.S2.T3	250,8127

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης κάθε πλευράς από το 3ο θεμελιώδες

$\alpha_{s1.p3}$	5,2649
$\alpha_{p3.p4}$	370,1878
$\alpha_{p4.p5}$	293,2404
$\alpha_{p5.s2}$	169,2709
$\alpha_{s2.s3}$	220,0836

Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών της όδευσης ως $S_{ij}=D_{ij}*\sin\alpha_{ij}$

$S_{s1.p3}$	13,949	m	$D_{s1.p3}$	18,989	$z_{s1.p3}$	147,4746
$S_{p3.p4}$	17,247	m	$D_{p3.p4}$	18,830	$z_{p3.p4}$	126,2946
$S_{p4.p5}$	20,033	m	$D_{p4.p5}$	20,637	$z_{p4.p5}$	115,4463
$S_{p5.s2}$	31,219	m	$D_{p5.s2}$	40,660	$z_{p5.s2}$	55,7296
$\Sigma S=$	82,447					

Υπολογίζονται οι προσωρινές διαφορές των συντεταγμένων $\Delta x'_{ij}$ και $\Delta y'_{ij}$

$\Delta x'_{ij} = S_{ij} * \sin \alpha_{ij}$

$\Delta x'_{s1.p3}$	1,152	$\Delta y'_{s1.p3}$	13,902		
$\Delta x'_{p3.p4}$	-7,784	$\Delta y'_{p3.p4}$	15,390		
$\Delta x'_{p4.p5}$	-19,920	$\Delta y'_{p4.p5}$	-2,123		
$\Delta x'_{p5.s2}$	14,491	$\Delta y'_{p5.s2}$	-27,652		
$\Sigma \Delta x'_{ij}$	-12,061	m	$\Sigma \Delta y'_{ij}$	-0,484	m

Υπολογίζονται τα $x' S1$ και $y' S1$

$x' S2 = x S1 + \Sigma \Delta x'_{ij}$

$x' S2=$	987,939	$y' S2=$	999,516	x_{S2}	987,9261	y_{S2}	999,5136
----------	---------	----------	---------	----------	----------	----------	----------

Υπολογίζεται το γραμμικό σφάλμα

$\omega_x = x_{s2} - x'_{s2}$

$\omega_x = -0,013m$

$\omega_y = -0,003m$

Το ολικό σφάλμα της όδευσης είναι:

$\omega_s = 0,013m$

και η γωνία διεύθυνσης του σφάλματος είναι: $\alpha_{\omega_s} = 85,56164$
 200+ 285,5616

Υπολογίζονται οι διορθώσεις $\delta\Delta x_{ij}$ και $\delta\Delta y_{ij}$ στα $\Delta x'_{ij}$ και $\Delta y'_{ij}$

Το γραμμικό σφάλμα μοιράζεται στις μετρημένες πλευρές ανάλογα με το μήκος τους $S_{ij}/\Sigma S$

$\delta\Delta x_{ij} = \omega x \cdot S_{ij} / \Sigma S$		$\delta\Delta y_{ij} = \omega y \cdot S_{ij} / \Sigma S$	
$\delta\Delta x'_{s1.p3}$	-0,002	$\delta\Delta y'_{s1.p3}$	0,000
$\delta\Delta x'_{p3.p4}$	-0,003	$\delta\Delta y'_{p3.p4}$	-0,001
$\delta\Delta x'_{p4.p5}$	-0,003	$\delta\Delta y'_{p4.p5}$	-0,001
$\delta\Delta x'_{p5.s2}$	-0,005	$\delta\Delta y'_{p5.s2}$	-0,001
	-0,013 έλεγχος		-0,003 έλεγχος

Υπολογίζονται οι τελικές τιμές των Δx_{ij} και Δy_{ij}

$\Delta x_{ij} = \Delta x'_{ij} + \delta_{\Delta x_{ij}}$		$\Delta y_{ij} = \Delta y'_{ij} + \delta_{\Delta y_{ij}}$	
$\Delta x'_{s1.p3}$	1,150	$\Delta y'_{s1.p3}$	13,901
$\Delta x'_{p3.p4}$	-7,787	$\Delta y'_{p3.p4}$	15,389
$\Delta x'_{p4.p5}$	-19,923	$\Delta y'_{p4.p5}$	-2,124
$\Delta x'_{p5.s2}$	14,486	$\Delta y'_{p5.s2}$	-27,653

Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των κορυφών (1ο θεμελιώδες)

$x_i = x_{i-1} + \Delta x$		$y_i = y_{i-1} + \Delta y$	
x_{p3}	1001,150	y_{p3}	
x_{p4}	993,363	y_{p4}	1029,290
x_{p5}	973,440	y_{p5}	1027,167
x_{s2}	987,926 έλεγχος	y_{s2}	999,514 έλεγχος

5.3.5 Εξωτερικό Δίκτυο - Υψομετρική επίλυση

Πολύγωνο 1.P3.P4.P5.2.1.		Πολύγωνο 1.2.P5.P4.P3.1.	
H1	100,000	H1	100,000
H_P3	87,589	H2	101,181
H_P4	80,088	H_P5	75,075
H_P5	75,082	H_P4	80,081
H2	101,183	H_P3	87,594
H1	100,002	H1	100,006

Υπολογίζεται η διόρθωση $\delta\Delta H_{ij}$ για κάθε υψομετρική διαφορά, ανάλογα με το μέγεθος της κάθε πλευράς

Απόκλιση για τη διαδρομή A $\omega_{\Delta H}$: 0,002m και απόκλιση για τη διαδρομή B $\omega_{\Delta H}$: 0,006m

και κατανέμεται αναλογικά με τις αποστάσεις.

Διορθώσεις υψ. διαφορών

				αποστάσεις	
δ_ΔΗ_S1.P3	0,000	δ_ΔΗ_P3.S1	0,001	P3.S1	13,945
δ_ΔΗ_P3.P4	0,000	δ_ΔΗ_P4.P3	0,001	P4.P3	17,246
δ_ΔΗ_P4.P5	0,000	δ_ΔΗ_P5.P4	0,001	P4.P5	20,035
δ_ΔΗ_P5.S2	0,001	δ_ΔΗ_S2.P5	0,002	S2.P5	31,221
δ_ΔΗ_S2.S1	0,000	δ_ΔΗ_S1.S2	0,001	S1.S2	12,084
Σδ_{ΔΗ}	0,002	Σδ_{ΔΗ}	0,006	ΣS=(sum)	94,531

Τελικά υψόμετρα

Πολύγωνο 1.P3.P4.P5.2.1.		Πολύγωνο 1.2.P5.P4.P3.1.	
H1	100	H1	100
H_P3	87,587	H2	101,181
H_P4	80,085	H_P4	80,080
H2	101,180	H_P3	87,589
H1	100,000	H1	100,000

VI. Αναφορά Photoscan

VII. Σχέδια

