ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πτυχιακή εργασία

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

ΜΑΡΙΑ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

Λεμεσός 2013

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Μαρία Αποστόλου

Επιβλέπων καθηγητής

Δρ. Δημήτριος Σκαρλάτος

Λεμεσός 2013

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Μαρία Αποστόλου, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Δημήτριο Σκαρλάτο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ σε βάθος με το πολύ ενδιαφέρον θέμα της διπλωματικής εργασίας και να αποκομίσω καινούργιες γνώσεις. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ερμιόνη Σοφοκλέους για την βοήθεια και στήριξη που μου παρείχε καθ'ολη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας καθώς και την Μαρίνα Γρηγορίου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Κωνσταντίνο Χριστοφόρου για την βοήθεια του στην συλλογή των φωτοσταθερών σημείων στο πεδίο.

Τέλος, ευχαριστώ πάρα πολύ την οικογένεια μου και όλους μου τους φίλους για την ανεκτίμητη βοήθεια, υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις μεγαλύτερες αρχαιολογικές ανακαλύψεις των τελευταίων ετών αποτελεί το πρωτοβυζαντινό μνημείο που ανακαλύφθηκε στο Ακρωτήρι Λεμεσού σύμφωνα με τους αρχαιολόγους. Πρόκειται για ένα εκκλησιαστικό συγκρότημα που ανασκάπτεται στη θέση «Καταλύμματα Πλακωτών» 15 χιλιόμετρα από τη παραλία του Κουρίου το οποίο είχε εντοπισθεί από το 1954 και το 2007 άρχισε να έρχεται στο φως.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή των φωτογραμμετρικών διαδικασιών για την καταγραφή και τοπογραφική τεκμηρίωση του αρχαιολογικού χώρου. Για την λήψη αεροφωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε μη επανδρωμένο εναέριο όχημα και για την εξασφάλιση φωτοσταθερών γεωδαιτικός σταθμός. Στην εφαρμογή επιλέχθηκαν δύο μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων φωτογραμμετρίας, ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός και υπολογιστική όραση με απώτερο σκοπό την σύγκριση αυτών, εκ των οποίων η μία είναι προηγμένης τεχνολογίας. Τελικά προϊόντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι δύο ορθοφωτοχάρτες της περιοχής μελέτης, οι οποίοι ελέγχονται ως προς την ποιότητα και την ακρίβεια και εξάγονται κάποιες διαπιστώσεις και συμπεράσματα για τις ιδιαιτερότητες κάθε μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ iv

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ v

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ vii

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ viii

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ix

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ x

ΕΙΣΑΓΩΓΗ xii

1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 1

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 2

2.1 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΜΝΗΜΕΙΩΝ 2

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΜΝΗΜΕΙΩΝ 2

2.2.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 3

2.2.2 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ 3

2.2.3 ΣΑΡΩΣΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥΣ ΣΑΡΩΤΕΣ LASER 4

2.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΜΝΗΜΕΙΩΝ 4

2.3.1 ΣΤΑΔΙΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ 4

2.3.2 ΤΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ 5

2.3.3 ΤΕΛΙΚΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ 6

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 8

3.1 ΕΝΑΕΡΙΑ ΛΗΨΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ 8

3.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ 9

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 12

4.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ 12

4.1.1 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 12
4.1.2 ΛΗΨΗ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ 12
4.1.2.1 UAV 13
4.1.2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΤΗΣΗΣ 14
4.1.3 ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ 18
4.2 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΡΑΦΕΙΟΥ 22
4.2.1 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ 22
4.2.1.1 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ 22
4.2.1.2 ΑΕΡΟΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ 25
4.2.1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ 27
4.2.1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ 28
4.2.1.4.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ISOP 28
4.2.1.4.2 ΣΥΝΤΑΞΗ ΜΩΣΑΙΚΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ISOP 29
4.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΟΡΑΣΗ 31
4.2.2.1 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ 31
4.2.2.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ 31
4.2.2.3 ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ 32
5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ-ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 35
5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ 35
5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1:Τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακής μηχανής 15

Πίνακας 4-2: Στοιχεία γεωμετρίας της ψηφιακής μηχανής..... 24

Πίνακας 4-3:Αποτελέσματα αεροτριγωνισμού, τυπικό σφάλμα κατά X,Y,Z φωτοσταθερών 27

Πίνακας 4-4: Παράμετροι του Optimazing photo alignment 33

Πίνακας 4-5: Τυπικό σφάλμα των 8 φωτοσταθερών κατά X,Y,Z..... 33

Πίνακας 5-1: Έλεγχος τελικού προιόντος του ΨΦΣ κατά τις διευθύνσεις X και Y 36

Πίνακας 5-2:Τυπικά σφάλματα διευθύνσεων X και Y 37

Πίνακας 5-3: Έλεγχος τελικού προιόντος του Photoscan κατά τις διευθύνσεις X και Y 37

Πίνακας 5-4:Τυπικά σφάλματα διευθύνσεων X και Y 37

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Ανασκαφικός χώρος 1

Εικόνα 3-1: Αεροφωτογραφία μνημείου με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής 9

Εικόνα 4-1: Μη επανδρωμένο αυτόνομης πλοήγησης αεροπλάνο 13

Εικόνα 4-2: Πορεία πτήσης αεροπλάνου όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό 14

Εικόνα 4-3: Η πορεία πτήσης που πραγματοποίησε το αεροπλάνο στο πεδίο 16

Εικόνα 4-4: Αεροφωτογραφίες που προορίζονται για φωτογραμμετρική επεξεργασία 17

Εικόνα 4-5: Επικάλυψη μεταξύ των 5 αεροφωτογραφιών 18

Εικόνα 4-6: Παράδειγμα φωτοσταθερών σημείων στο πεδίο 19

Εικόνα 4-7: Κατανομή των 22 φωτοσταθερών σημείων στο χώρο του μνημείου 20

Εικόνα 4-8: Κατανομή των 8 φωτοσταθερών σημείων στο χώρο του μνημείου 21

Εικόνα 4-9: Κατανομή φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης κατά τον αεροτριγωνισμό.... 26

Εικόνα 4-10: Ορθοφωτομωσαικό με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.02m 30

Εικόνα 4-11: Λεπτομέρεις Ορθοφωτομωσαικού 30

Εικόνα 4-12: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους 32

Εικόνα 4-13: Ορθοφωτοχάρτης με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.02m 34

Εικόνα 4-14: Λεπτομέρειες Ορθοφωτοχάρτη 34

Εικόνα 5-1: Κατανομή σημείων ελέγχου στο χώρο του μνημείου 36

Εικόνα 5-2: Δύο παραδείγματα με κενές εικονοψηφίδες και χωρίς 38

Εικόνα 5-3: Δύο παραδείγματα οπτικής ποιότητας 39

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

GPS: Global Positioning System

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

RTK: Real Time Kinematic

ΨΦΣ: Ψηφιακός Φωτογραμμετρικός Σταθμός

ISPM: Image Station Photogrammetric Manager

ISAT: Image Station Automatic Triangulation

ISAE: Image Station Automatic Elevation

ΨΜΕ: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

ISBR: Image Station Base Rectifier

ISOP: Image Station OrthoPro

TIN: Triangulated Irregular Network

GIS: Geographical Information System

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Block:	Σύμπλεγμα φωτογραφιών
Project:	Αρχείο εργασιών
Pixel:	Ψηφίδα
RMS Control:	Τυπικό σφάλμα φωτοσταθερών
Bundle Adjustment:	Προσανατολισμός της δέσμης
Check Points:	Σημεία Ελέγχου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μνημεία αποτελούν φυσικά τεκμήρια της Ιστορίας της Κύπρου καθώς σε αυτά ανακαλύφθηκαν, αποτυπώθηκαν, και διασώθηκαν πληροφορίες που αφορούν την αρχιτεκτονική, τις τέχνες, τη λατρεία σε θεούς και γενικά τις καταστάσεις που επικρατούσαν. Ακόμη πολιτικές-ιδεολογικές πεποιθήσεις και χαρακτηριστικά των κοινωνικών δομών του παρελθόντος, στοιχεία που χαρακτηρίζουν την ταυτότητα ενός λαού. Επομένως είναι υποχρέωση των ανθρώπων και κυρίως των αρχαιολόγων και ερευνητών να προστατεύσουν και να διασώσουν τα μνημεία καθώς συνδέουν το παρελθόν με το παρόν και το μέλλον.

Η ανασκαφική δραστηριότητα του Τομέα Αρχαιολογίας και Ιστορίας της Κύπρου του Τμήματος Αρχαιοτήτων έχει φέρει στο φως πολύ σημαντικά ευρύματα και έχει συμβάλει στη διάσωση και ανάδειξη του Πολιτισμού της Κύπρου. Οι υπεύθυνοι αρχαιολόγοι του μνημείου με επικεφαλής την αρχαιολόγο Δρ. Ελένη Προκοπίου, Αρχαιολογική Λειτουργός Α΄, ζήτησαν αποτύπωση του μνημείου στο Ακρωτήρι Λεμεσού. Επομένως ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή των φωτογραμμετρικών διαδικασιών που ακολουθούν για την καταγραφή και τοπογραφική τεκμηρίωση ενός αρχαιολογικού χώρου/μνημείου με τελικό προϊόν την παραγωγή ενός ορθοφωτοχάρτη της περιοχής μελέτης. Στην εφαρμογή επιλέχθηκαν δύο μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων φωτογραμμετρίας με απώτερο σκοπό την σύγκριση αυτών, εκ των οποίων η μία είναι προηγμένης τεχνολογίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και κάποια ιστορικά στοιχεία του μνημείου. Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο όπου δίνεται ο όρος της αποτύπωσης μνημείων καθώς και ανασκόπηση στην ιστορική εξέλιξη των μεθόδων αποτύπωσης. Τέλος παρουσιάζονται η συμβολή της φωγραμμετρικής διαδικασίας στην αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων και μνημείων και τα τελικά προϊόντα φωτογραμμετρίας. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε όσον αφορά την λήψη και τον προσανατολισμό των αεροφωτογραφιών καθώς επίσης τις απαιτούμενες ακρίβειες μέτρησης των φωτοσταθερών.

Οι εργασίες και οι διαδικασίες για την υλοποίηση της αποτύπωσης ενός μνημείου είναι τόσο πεδίου όσο και γραφείου. Επομένως το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί την εφαρμογή,

και χωρίζεται σε δύο υποκεφάλαια. Το πρώτο είναι εργασίες πεδίου που αφορά κυρίως τη συλλογή δεδομένων και το δεύτερο εργασίες γραφείου και αφορά την επεξεργασία δεδομένων.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ποιοτικός έλεγχος των τελικών προϊόντων από τις δύο μεθόδους για να φανεί ποία μέθοδος ανταποκρίνεται περισσότερο στις αρχικές απαιτήσεις. Επίσης αναφέρονται διαφορές που εντοπίστηκαν μεταξύ των δύο μεθόδων, και τέλος κάποιες διαπιστώσεις και συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία.

1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Μια από τις μεγαλύτερες αρχαιολογικές ανακαλύψεις των τελευταίων ετών αποτελεί το πρωτοβυζαντινό μνημείο που ανακαλύφθηκε στο Ακρωτήρι Λεμεσού σύμφωνα με τους αρχαιολόγους. Πρόκειται για ένα εκκλησιαστικό συγκρότημα που ανασκάπτεται στη θέση «Καταλύμματα Πλακωτών» 15 χιλιόμετρα από τη παραλία του Κουρίου το οποίο είχε εντοπισθεί από το 1954 και το 2007 άρχισε να έρχεται στο φως.

Μέχρι σήμερα έχει αποκαλυφθεί μεγάλο τμήμα του μνημείου, όμως ο κύριως ναός ακόμη δεν έχει εντοπισθεί. Γύρω από το μνημείο περιβάλλεται ένα μυστήριο και πολλά ερωτιματικά για την επιλογής της θέσης που κτίστηκε, μακριά από τα αστικά κέντρα. Επίσης ο περίτεχνος διάκοσμος των ψηφιδωτών των δαπέδων και των επενδυμένων με μάρμαρα της Κωνσταντινούπολης έρχεται σε αντίθεση με τις κοινωνικοοικονομικές συνθήκες της εποχής.

Η χρονολόγηση του μνημείου εντάσσεται στο β΄ μισό της πρώτης δεκαετίας της Βασιλείας του Ηρακλείου. Η σύντομη διάρκεια χρήσης του (μέσα 7^{ου} αιώνα), η μεγάλη τυπολογική του συνάφεια με το Ιουστινιάνειο μαρτύριο του Αγίου Μηνά στην Μαρεώτιδα της Αλεξάνδρειας, καθώς και ο ταφικός του χαρακτήρας, του προσδίδουν μια πιθανή λειτουργία ως χώρου φιλοξενίας προσφύγων που κατέφυγαν στην Κύπρο. Η επιστροφή των προσφύγων με το τέλος του πολέμου καθώς και ο καταστροφικός σεισμός μέσα του 7^{ου} αιώνα σήμαναν το τέλος του εκκλησιαστικού συγκροτήματος.

Εικόνα 1-1: Ανασκαφικός χώρος

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το μνημείο είναι αντικείμενο που συνδέει το παρελθόν με το παρόν και το μέλλον. Αναμφισβήτητα μεταφέρει την ιστορία του τόπου μέσα στο χρόνο και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της πολιτιστική κληρονομιάς του. Επομένως πρέπει να διασωθεί να μελετηθεί και να αξιολογηθεί εις βάθος.

Στα επόμενα υποκεφάλια δίνεται ο όρος της αποτύπωσης μνημείων καθώς και ανασκόπηση στην ιστορική εξέλιξη των μεθόδων αποτύπωσης. Τέλος παρουσιάζεται η συμβολή της φωγραμμετρικής διαδικασίας στην αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων και μνημείων καθώς και τα τελικά προϊόντα φωτογραμμετρίας.

2.1 Αποτύπωση μνημείων

Αποτύπωση η αλλιώς, τοπογραφική αποτύπωση είναι η απεικόνιση των τμημάτων της γήινης επιφάνειας συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπινων κατασκευών μέσω τοπογραφικών μεθόδων. Επομένως αποτύπωση ενός μνημείου είναι η καταγραφή και απεικόνιση των στοιχείων που ορίζουν τη γεωμετρική μορφή και τη θέση του στο χώρο γι'αυτο και ονομάζεται και γεωμετρική τεκμηρίωση.

Οι συνήθεις μέθοδοι τοπογραφικής αποτύπωσης σημείων του τρισδιάστατου χώρου είναι με θεοδόλιχο και αποστασιόμετρα ή ακόμη όπου είναι εφικτό με τα σύγχρονα συστήματα GPS. Ωστόσο έχει αναπτυχθεί ακόμη μια επιστήμη, που ονομάζεται φωτογραμμετρία και είναι μέθοδος γεωμετρικής τεκμηρίωσης κατάλληλη για αποτύπωση μνημείων και ιστορικών κτιρίων, με χρήση φωτογραφιών.

2.2 Ιστορική εξέλιξη των μεθόδων αποτύπωσης αρχαιολογικών χώρων και μνημείων

Οι μέθοδοι αποτύπωσης ενός μνημείου διαφέρουν ως προς την απαίτηση σε τεχνολογικό εξοπλισμό, ειδικευμένο προσωπικό, χρόνο διεκπεραίωσης καθώς και τελικών προϊόντων. Παρακάτω παρουσιάζονται η τοπογραφική, η φωτογραμμετρική καθώς και η σάρωση με τρισδιάστατους επίγειους σαρωτές laser.

2.2.1 Τοπογραφική μέθοδος

Η τοπογραφική μέθοδος κάνει χρήση όργανα ακριβείας όπως είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί για μέτρηση μηκών και γωνιών στο χώρο του αντικειμένου. Άμεσος σκοπός είναι ο προσδιορισμός τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων του αντικειμένου.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των οργάνων, αποτελεί σήμερα μια ακριβείς μέθοδος καθώς μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των σημείων προς αποτύπωση με ακρίβεια της τάξης μερικών χιλιοστών. Όμως υπάρχουν περιπτώσεις που η πολυπλοκότητα του αντικειμένου είναι μεγάλη και είναι αδύνατη και πολλές φορές χρονοβόρα η εφαρμογή τοπογραφικής μεθόδου.

2.2.2 Φωτογραμμετρική μέθοδος

Στη φωτογραμμετρική διαδικασία αποτύπωσης κυρίως χρησιμοποιούνται αεροφωτογραφίες από διάφορες πλατφόρμες ή επίγειες φωτογραφίες. Επομένως προκύπτει το σημαντικό πλεονέκτημα της φωτογραμμετρίας καθώς απαιτεί ελάχιστο χρόνο παρουσίας στο τόπο ενδιαφέροντος. Παράλληλα θεωρείται μια από τις ταχύτερες διαδικασίες αποτύπωσης/γεωμετρικής τεκμηρίωσης με δυνατότητα επιλογής στο γραφείο των προς απόδοση χαρακτηριστικών.

Επιπλέον οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι δίνουν την δυνατότητα μιας πλήρους αποτύπωσης και αντιμετωπίζονται άμεσα οι δυσκολίες όταν υπάρχουν λεπτομέρειες και πολύπλοκα αρχιτεκτονικά στοιχεία. Σε αντίθεση με τις κλασικές τοπογραφικές μεθόδους, οι οποίες δίνουν την αποτύπωση της βασικής γεωμετρίας του χώρου. Η τοπογραφική μέθοδος χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει την φωτογραμμετρική μέθοδο για μέτρηση φωτοσταθερών σημείων που είναι απαραίτητα για την σύνδεση των φωτογραφιών με το επίγειο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Παρόλα αυτά, έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για εργασίες τόσο στην ύπαιθρο όσο και στο γραφείο, ενώ ο απαραίτητος εξοπλισμός έχει κάποιο κόστος όχι περισσότερο όμως, από την τοπογραφική μέθοδο. Η αβεβαιότητα–ακρίβεια των φωτογραμμετρικών διαδικασιών κυρίως εξαρτάται από την ακρίβεια των αρχικών μετρήσεων στην εικόνα καθώς και όλων των ενδιαμέσων σταδίων υπολογισμών και παραμέτρων.

2.2.3 Σάρωση με τρισδιάστατους επίγειους σαρωτές laser

Οι επίγειοι σαρωτές Laser είναι ενεργητικά όργανα απεικόνισης τα οποία συλλέγουν εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο. Άμεσο προϊόν της σάρωσης είναι η δημιουργία νέφους σημείων όπου κάθε σημείο έχει X,Y,Z που αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή και i η ένταση του ανακλώμενου σήματος. Συγκεκριμένα οι σαρωτές laser εκπέμπουν ακτίνες υπό την μορφή κύματος ή παλμού στο αντικείμενο μελέτης και αφού ανακλάται επιστρέφει πίσω και υπολογίζεται η απόσταση.

2.3 Η εξέλιξη και συμβολή της φωτογραμμετρίας στην αποτύπωση μνημείων

Φωτογραμμετρία είναι η τέχνη, επιστήμη και τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων, προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και άλλων φαινομένων. [Α. Γεωργόπουλος 2010].

2.3.1 Στάδια εξέλιξης φωτογραμμετρίας

Η φωτογραμμετρία έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό παράλληλα με την εξέλιξη της φωτογραφίας και κυρίως για χαρτογραφικές εφαρμογές. Παράλληλα, χρησιμοποιείται και για αποτύπωση κτηρίων, αρχαιολογικών χώρων και ανασκαφών. Τα σημαντικότερα στάδια εξέλιξης της φωτογραμμετρίας ήταν η αναλογική φωτογραμμετρία, η αναλυτική φωτογραμμετρία και η ψηφιακή φωτογραμμετρία.

Αναλογική φωτογραμμετρία

Η αναλογική φωτογραμμετρία χρησιμοποιεί αναλογικά όργανα και οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες (εσωτερικός, εξωτερικός και σχετικός προσανατολισμός) πραγματοποιούνται με τη χρήση των οπτιμηχανικών μέσων όπου είναι δυνατή η εξαγωγή της θέσης στις τρείς διαστάσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου (στερεοζεύγος) όταν οι αναλογικές φωτογραφίες έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις με σημαντική επικάλυψη. Οι αναλογικές φωτογραφίες είναι ασπρόμαυρα φιλμ που απαιτούσαν μεγάλο κόστος και χρόνο επεξεργασίας τους.

Αναλυτική φωτογραμμετρία

Η αναλυτική φωτογραμμετρία βασίζεται σε μεθόδους της φωτογραμμετρίας που εκτελούνται με αριθμητικούς υπολογισμούς, οι οποιοί στηρίζονται σε κατάλληλες αναλυτικές μαθηματικές εξισώσεις και είναι γνωστή και ως υπολογιστική φωτογραμμετρία. Χρησιμοποιεί για πρώτη φορά ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον υπολογισμό τόσο των παραμέτρων και των προσανατολισμών των φωτογραφιών όσο της θέσης των λεπτομερειών του αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο.

Ψηφιακή φωτογραμμετρία

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία δεν χρησιμοποιεί αναλογικές φωτογραφίες αλλά, βασίζεται σε ψηφιακές φωτογραφίες και η επεξεργασία γίνεται με συστήματα που θεωρούνται φωτογραμμετρικά όργανα τρίτης γενιάς. Η μέθοδος ανάλυσης των φωτογραφιών είναι ουσιαστικά η ίδια με εκείνη της αναλυτικής φωτογραμμετρίας με αναλογικές φωτογραφίες.

Υπολογιστική όραση

Σήμερα η φωτογραμμετρία βρίσκεται στο στάδιο όπου συνδυάζει τις δυνατότητες που προσφέρει η υπολογιστική όραση, και μπορεί να παράγει γρήγορα και αυτόματα με βάσει τις φωτογραφίες πλήρη τρισδιάστατα αντικείμενα και ορθοφωτοχάρτες. Τα λογισμικά τελευταίας γενιάς, έχουν τη δυνατότητα να επεξεργάζονται έως και δεκάδες χιλιάδες φωτογραφίες και να παράγουν προϊόντα που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ακρίβειας. Οι περισσότερες διαδικασίες για την παραγωγή προϊόντων πραγματοποιούνται αυτόματα χωρίς την παρεμβολή του χρήστη.

2.3.2 Τα πρωτογενή δεδομένα και πλεονεκτήματα φωτογραμμετρίας

Στη φωτογραμμετρία πραγματοποιούνται αεροφωτογραφίσεις, δορυφορικές καθώς και επίγειες λήψεις. Επομένως ανάλογα με τα πρωτογενή δεδομένα, η φωτογραμμετρία κατηγοριοποιείται σε εναέρια, δορυφορική και επίγεια. Έτσι προκύπτει το σημαντικό πλεονέκτημα της φωτογραμμετρίας καθώς ελαχιστοποιεί το χρόνο παρουσίας στον τόπο ενδιαφέροντος. Παράλληλα θεωρείται μια από τις ταχύτερες διαδικασίες αποτύπωσης/γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

Πρόκειται για ταυτόχρονη καταγραφή τόσο ποσοτικής όσο και ποιοτικής πληροφορίας, γι’αυτό και επιλέγεται σε πολλές περιπτώσεις ως μέθοδος αποτύπωσης αντικειμένων όπου θα ήταν αδύνατο άλλες μέθοδοι να δώσουν αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα αρχαιολογικοί χώροι και κτίρια με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ακόμη και μνημεία που μπορεί να βρίσκονται σε απρόσιτους χώρους είναι δυνατό να αποτυπωθούν με φωτογραμμετρία. Επιπλέον ένα βασικό πλεονέκτημα της φωτογραμμετρίας είναι η δυνατότητα χρήσης της, ακόμη και όταν δεν είναι βέβαιο εκ των προτέρων τι στοιχεία θα χρειαστεί να μετρηθούν αφού υπάρχει επιλογή στο γραφείο της προς απόδοση χαρακτηριστικών.

2.3.3 Τελικά προϊόντα φωτογραμμετρίας

Τα συνήθη φωτογραμμετρικά παραδοτέα, ιδιαίτερα όσον αφορά τις αποτυπώσεις αρχαιλογικών χώρων και μνημείων είναι:

Το ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, είναι η ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της φυσικής γήινης επιφάνειας. Αποτελείται από ένα σύνολο υψομετρικών σημείων σε κανονική ή μη διάταξη, εξαρτάται από την μέθοδο συλλογής ή από την συγκεκριμένη εφαρμογή ακόμη και το εδαφικό ανάγλυφο. Συνήθως είναι χρήσιμο να υπάρχουν λίγα σημεία όπου το έδαφος είναι επίπεδο και περισσότερα όπου υπάρχει έντονο ανάγλυφο. Επίσης αποτελείται από γραμμές ασυνέχειας και αλλαγής κλίσεων οι οποίες αποδίδουν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και τις ανωμαλίες του εδάφους. Σημαντικό είναι το γεγονός πως, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός σημείων τόσο πιο πολύ προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια.

Ο ψηφιακός Ορθοφωτοχάρτης, είναι ένα φωτογραφικό προϊόν αφού πρόκειται για συνένωση φωτογραφιών οι οποίες έχουν διορθωθεί γεωμετρικά για να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις και οι αποκλίσεις από την ορθή προβολή που οφείλονται στο ανάγλυφο του αντικειμένου και στις στροφές των φωτογραφιών. Ως αποτέλεσμα η κλίμακα είναι ενιαία και ονομάζονται ορθοφωτογραφίες, δηλαδή έχουν ορθή προβολή και όλη την πληροφορία των αρχικών εικόνων από τις οποίες προέκυψαν. Οι ορθοφωτογραφίες προκύπτουν από την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου και ο τελικός ορθοφωτοχάρτης συνδυάζει μετρητική ποιότητα και ακρίβεια ενός τοπογραφικού διαγράμματος. Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθούν σε αυτόν αληθινές αποστάσεις, εμβαδά και συντεταγμένες.

Η διαδικασία παραγωγής των τελικών ορθοφωτογραφιών και ορθοφωτοχαρτών προαπαιτεί την εκτέλεση μιας σειράς φωτογραμμετρικών διαδικασιών τα οποία θα αναλυθούν σε πάρακάτω κεφάλαιο:

- Εσωτερικός προσανατολισμός
- Αεροτριγωνισμός – απόλυτος προσανατολισμός αεροφωτογραφιών
- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους
- Δημιουργία ορθοφωτογραφιών
- Δημιουργία ορθοφωτομωσαϊκού

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την επιλογή μεθοδολογίας για την αποτύπωση ενός μνημείου λαμβάνεται υπόψη η τοποθεσία, η προσβασιμότητα, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθώς επίσης ο διαθέσιμος εξοπλισμός, προδιαγραφές ακρίβειας, ο διαθέσιμος χρόνος, οι απαιτήσεις των ζητούμενων τελικών προιόντων κ.λ.π.

Οι υπεύθυνοι αρχαιολόγοι ζήτησαν αποτύπωση του μνημείου που έχει ανακαλυφθεί με τελικό προϊόν την παραγωγή ενός ορθοφωτοχάρτη της περιοχής μελέτης. Επομένως για την επίτευξη αυτή ο συνδυασμός της κλασικής τοπογραφικής μεθόδου και της σύγχρονης εναέριας ψηφιακής φωτογραμμετρίας θεωρήθηκε ο κατάλληλος όσον αφορά το συγκεκριμένο μνημείο.

Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με απώτερο σκοπό την παραγωγή του τελικού ορθοφωτοχάρτη.

3.1 Εναέρια λήψη ψηφιακών φωτογραφιών

Η λήψη φωτογραφιών προγραμματίστηκε να γίνει με εναέρια φωτογραμμετρία. Η εναέρια φωτογραμμετρία χρησιμοποιεί αεροσκάφος με ενσωματωμένη μετρητική μηχανή για την λήψη φωτογραφιών. Τα τελευταία όμως χρόνια υπήρξε σημαντική εξέλιξη των φωτογραμμετρικών μεθόδων, με το πέρασμα από την αναλογική στην αναλυτική και τέλος στην ψηφιακή φωτογραμμετρία. Παράλληλα εξελίχθηκε και η τεχνική λήψης φωτογραφιών αφού τώρα, δύναται να χρησιμοποιηθεί μη επανδρωμένο εναέριο όχημα γνωστό ως UAV, με ενσωματωμένη υψηλής ανάλυσης ψηφιακή κάμερα. Το γεγονός αυτό ευνόησε πολύ την εφαρμογή της φωτογραμμετρίας αφού προηγουμένως το κόστος για τη πτήση του αεροσκάφους ήταν αρκετά μεγάλο. Αντιθέτως η χρήση του τηλεκατευθυνόμενου μετά την αγορά του έχει μηδαμινό κόστος και γίνεται ταχύτατα. Το μειονέκτημα της μεθόδου των UAV έγκειται στο γεγονός ότι παράγοντες όπως ο καιρός-δυνατοί άνεμοι μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια και να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετέπειτα προϊόντων.

Για τη λήψη αεροφωτογραφιών επιλέχθηκε το μη επανδρωμένο αεροπλανάκι που διαθέτει το εργαστήριο φωτογραμμετρίας και με το ειδικό λογισμικό που διαθέτει, προγραμματίστηκε η πορεία πτήσης λαμβάνοντας υπόψη κάποιους περιορισμούς για την λήψη αεροφωτογραφιών όπως θα εξηγηθεί στο κεφάλαιο 4.

Εικόνα 3-1: Αεροφωτογραφία μνημείου με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής

3.2 Προσανατολισμός αεροφωτογραφιών

Για τον προσανατολισμό των αεροφωτογραφιών απαιτείται η γνώση των γεωδαιτικών συντεταγμένων ευδιάκριτων σημείων, γνωστά ως φωτοσταθερά, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για να γίνει σύνδεση των αεροφωτογραφιών με το έδαφος. Τα φωτοσταθερά είναι σημεία τα οποία μετρούνται στο πεδίο με τοπογραφικές μεθόδους και η γνώση των γεωδαιτικών συντεταγμένων τους χρησιμεύει για να συσχετιστούν οι αεροφωτογραφίες με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς των σημείων (απόλυτος προσανατολισμός φωτογραφιών). Τα φωτοσταθερά πρέπει να καλύπτουν όλοι την περιοχή μελέτης.

Η λήψη των αεροφωτογραφιών προγραμματίστηκε ώστε οι αεροφωτογραφίες να έχουν κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη 60%. Επομένως περισσότερο από την μισή έκταση που καλύπτει η κάθε αεροφωτογραφία είναι κοινή με άλλη αεροφωτογραφία γνωστή ως επικαλυπτόμενη περιοχή. Είναι σημαντικό τα φωτοσταθερά να φαίνονται σε περισσότερες από μια αεροφωτογραφίες (επικαλυπτόμενη περιοχή) γιατί λειτουργούν και ως σημεία σύνδεσης μεταξύ τους και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποκατάσταση του αντικειμένου που απεικονίζεται.

Ο προσανατολισμός των αεροφωτογραφιών θα πραγματοποιηθεί με αεροτριγωνισμό ή αλλιώς συνόρθωση της δέσμης. Εφαρμόζεται στα project που χρησιμοποιούν

αεροφωτογραφίες και κατ' αυτόν δημιουργείται block και υπολογίζονται τα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού όλων των εικόνων που συμμετέχουν στο block σε ένα βήμα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σύνδεση των αεροφωτογραφιών μεταξύ τους καθώς και με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς μέσω των φωτοσταθερών. Για την επίλυση του αεροτριγωνισμού τα ελάχιστα φωτοσταθερά που χρειάζονται είναι 3 όμως σε καμία περίπτωση δεν μετρούνται μόνο τόσα, αλλά περισσότερα για να είναι αξιόπιστη η συνόρθωση και να υπάρχει έλεγχος των αποτελεσμάτων.

Η επιλογή των θέσεων φωτοσταθερών σημείων είναι πολύ σημαντική αφού πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα και περιμετρικά στο block των αεροφωτογραφιών για μείωση των σφαλμάτων λόγω ακτινικών παραμορφώσεων και αύξηση της οριζόντιας ακρίβειας του απόλυτου προσανατολισμού. Οπωσδήποτε είναι αναγκαίο να μετρηθούν σημεία και στο εσωτερικό της περιοχής του μνημείου για καλύτερη υψομετρική ακρίβεια.

Για την μέτρηση των φωτοσταθερών επιλέχθηκε η τοπογραφική μέθοδος και συγκεκριμένα η χρήση του γεωδαιτικού σταθμού έτσι ώστε η ακρίβεια μέτρησης να πληροί τις απαιτήσεις ακρίβειας των φωτοσταθερών σημείων. Επιλέχθηκαν 22 φωτοσταθερά σημεία σε φωτογραγραφίες που χρησιμοποιήθηκαν ως κροκί, περιμετρικά και στο εσωτερικό του μνημείου, και είναι διακριτά στις αεροφωτογραφίες. Η επιλογή των θέσεων έγινε ώστε να είναι κοινά σε περισσότερες από δύο για καλύτερη σύνδεση όλων των αεροφωτογραφιών μεταξύ τους. Τα φωτοσταθερά προορίζονταν και για τις δύο μεθόδους επεξεργασίας φωτογραμμετρικών δεδομένων. Επειδή υπάρχει πιθανότητα κάποια από τα σημεία να μην είναι ευδιάκριτα στις αεροφωτογραφίες κατά την εισαγωγή τους ή να μη σκοπευθούν σωστά σε κάθε αεροφωτογραφία μετρούνται περισσότερα από τα απαιτούμενα.

Η ακρίβεια μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων αλλά και των εικονοσυντεταγμένων στις ψηφιακές αεροφωτογραφίες είναι πρώτιστης σημασίας επειδή επηρεάζουν την ακρίβεια των φωτογραμμετρικών διαδικασιών και προϊόντων καθώς είναι η μόνη πληροφορία που συνδέει τις αεροφωτογραφίες με το αντικείμενο.

Για την υλοποίηση ορθοφωτοχάρτη κλίμακας 1:200 ως τελικό προϊόν, η αναμενόμενη επιτρεπόμενη οριζοντιογραφική ακρίβεια που προκύπτει με βάση τα 0,25mm ως ανθρώπινη διακριτική ικανότητα είναι 50mm δηλ. $\pm$5cm.

Το μέγεθος της ψηφίδας της μηχανής είναι 1.53μm (βλ πίνακα 4-1). Με κλίμακα λήψης 1:12268 η ψηφίδα καλύπτει στο έδαφος έκταση περίπου ίση με 12268 x 1.53x 10^{-4}cm= 2cm. Άρα η αναμενόμενη ακρίβεια των φωτοσταθερών σημείων είναι ίση με το 1/3*2cm=7mm. Προκειμένου να επιτευχθεί η ακρίβεια αυτή επιλέχθηκε η χρήση γεωδαιτικού σταθμού με ακρίβεια μέτρησης μερικών χιλιοστών (mm) και όχι GPS διότι η ακρίβεια των σημείων είναι της τάξης μερικών εκατοστών (cm).

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Οι εργασίες και οι διαδικασίες για την υλοποίηση της αποτύπωσης ενός μνημείου είναι τόσο πεδίου όσο και γραφείου. Σε αυτές τις δύο μεγάλες κατηγορίες περιλαμβάνονται όλα τα στάδια της μελέτης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν αναλυτικά οι εργασίες πεδίου και γραφείου που αφορούν κυρίως τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.

4.1 Εργασίες πεδίου

Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο με σειρά είναι: η αναγνώριση της περιοχής μελέτης, λήψη φωτογραφιών, εξασφάλιση και μέτρηση φωτοσταθερών.

4.1.1 Αναγνώριση της περιοχής μελέτης

Η αναγνώριση της περιοχής είναι βασική διαδικασία για τις περισσότερες μελέτες. Ειδικά για την τεκμηρίωση/αποτύπωση του μνημείου αποτελεί το πρώτο στάδιο. Είναι πολύ σημαντικό να προηγείται οποιασδήποτε άλλης εργασίας καθώς η καλή γνώση του ανικειμένου μελέτης έχει ουσιαστικό ρόλο. Αυτό γιατί αν δεν γίνει μια αρχική επίσκεψη στο χώρο για να αντιληφθείς από κοντά τις διαστάσεις και τις απαιτήσεις που έχει το μνημείο, θα είναι αδύνατο να γίνει ένας σωστός προγραμματισμός των εργασιών που θα ακολουθήσουν λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες που έχει το μνημείο. Επομένως για αποφυγή λαθών και καλή οργάνωση των μετέπειτα εργασιών απαιτείται μια ολοκληρωμένη αναγνώριση της περιοχής μελέτης.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συλλογή επίγειων φωτογραφιών τεκμηρίωσης μνημείου που θα βοηθήσουν στην μελέτη της περιοχής. Επίσης παρατήρηση του χώρου και εύρεση πιθανόν θέσεων των φωτοσταθερών σημείων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

4.1.2 Λήψη αεροφωτογραφιών

Αμέσως μετά την αναγνώριση της περιοχής, γίνεται λήψη των αποφάσεων και προγραμματίζεται η λήψη των αεροφωτογραφιών. Λαμβάνονται υπόψη όλα τα ζητούμενα και κριτήρια για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Το μέσω που χρησιμοποιήθηκε για την ανάκτηση των αεροφωτογραφιών ήταν UAV. Με τη χρήση

αυτού επιτυγχάνεται η λήψη αεροφωτογραφιών που καλύπτουν ολόκληρο το χώρο του μνημείου γρήγορα και οικονομικά.

4.1.2.1 UAV

Το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας έχει στη διάθεσή του ένα αξιόπιστο εξοπλισμό που ανταποκρίνεται σε διάφορες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα υπάρχει το Sensefly SwingletCAM το οποίο είναι ένα αεροπλάνο με μόνο 80 εκατοστά άνοιγμα φτερών το οποίο μεταφέρεται εύκολα, δεν χρειάζεται συναρμολόγηση και τροφοδοτείται από μπαταρία όπως φαίνεται στην εικόνα 4-1. Επιτρέπει πλήρως αυτόνομη πλοήγηση με με απογείωση και προσγείωση καθώς παρακολούθηση της πτήσης μέσω του ειδικού λογισμικού, e-motion software. Έχει δυνατότητα πτήσης 30 λεπτών με ταχύτητα 10m/s και διαθέτει ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Cannon IXUS 220HS τα τεχνικά της οποίας περιγράφονται στον πίνακα 4-1. Επίσης είναι εύκολα λειτουργήσιμο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καταστάσεις ανάγκης και δυσπρόσιτες περιοχές.

Εικόνα 4-1: Μη επανδρωμένο αυτόνομης πλοήγησης αεροπλάνο

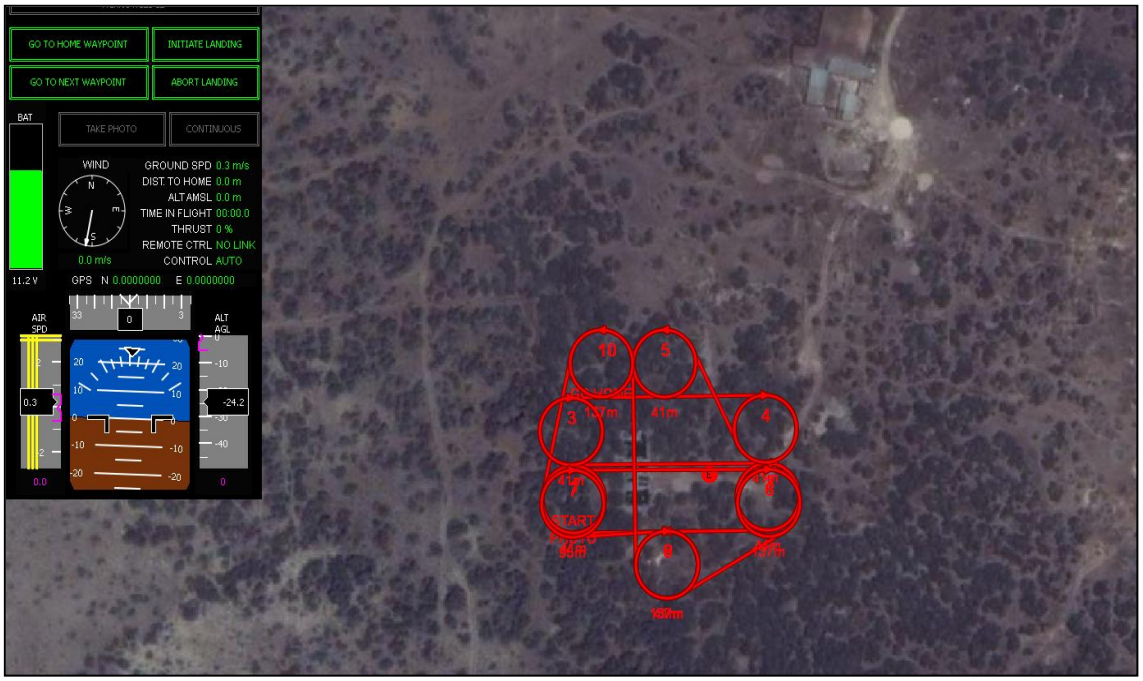
4.1.2.2 Προγραμματισμός πτήσης

Το λογισμικό e-motion software επιτρέπει το σχεδιασμό της πορείας του αεραπλάνου ορίζοντας του κάποια κριτήρια όπως το ύψος πτήσης την επικάλυψη κατά μήκος και κατά πλάτος.

Καθοριστικοί παράγοντες για τον σχεδιασμό πτήσης:

Το ύψος πτήσης Η είναι 41m, δηλαδή από το σημείο εκκίνησης, το αεροπλάνο θα ανέβει 41 μέτρα και θα ξεκινήσει την πτήση του. Το ανάγλυφο είναι ήπιο και έτσι δεν χρειάζεται να αλλάξουμε το υψόμετρο πτήσης για να διατηρηθεί η κλίμακα.

Η κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη μεταξύ των αεροφωτογραφιών είναι 60% . Το 60% επικάλυψη είναι το βέλτιστο για καλή στερεοσκοπική απόδοση, ενώ με λιγότερη επικάλυψη θα δώσει μεγαλύτερη βάση δηλαδή, απόσταση κέντρων ζεύγους αεροφωτογραφιών κατά μήκος. Επίσης η επικάλυψη δεν πρέπει να ξεπερνά κάποια όρια π.χ 80% γιατί δυσχεραίνεται η στερεοσκοπική παρατήρηση.



Εικόνα 4- 2: Πορεία πτήσης αεροπλάνου όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό

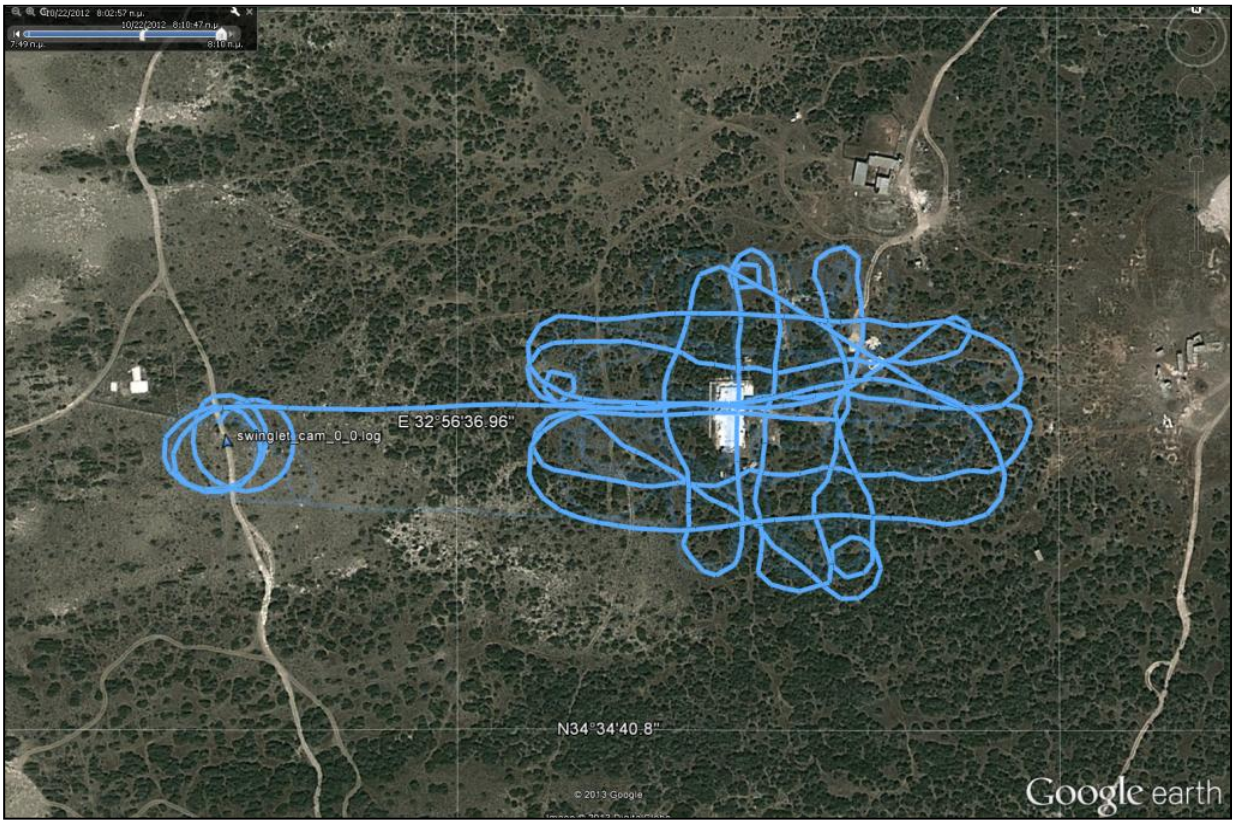
Μετά την ολοκλήρωση του σχεδίου πτήσης του αεροπλάνου, έγινε δεύτερη επίσκεψη στο χώρο του μνημείου για πραγματοποίηση της πτήσης και λήψη των αεροφωτογραφιών. Η ψηφιακή φωτογραφική Canon η οποία είναι συνδεδεμένη με τον αυτόματο πιλότο ρυθμίστηκε για να πάρει τις αεροφωτογραφίες σε συγκεκριμένες αποστάσεις. Σημαντικό είναι το γεγονός πως ο αυτόματος πιλότος έχει την δυνατότητα να σταθεροποιεί το αεροπλάνο την στιγμή που λαμβάνεται η φωτογραφία για να δώσει τη μέγιστη ευκρίνεια της φωτογραφίας.

	Canon ixus 220HS
	Τύπος αισθητήρα: CMOS
	Μέγεθος εικόνας: 4000x3000 pixels
	Μέγεθος ψηφίδας: 1.53μm
	Μέγεθος CCD: 6.17x4.55 mm
	Εστιακή απόσταση φακού: 4.3-21.5mm
	Μορφή φωτογραφιών: JPEG

Πίνακας 4-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακής μηχανής

Γνωρίζοντας το μέγεθος του αρνητικού και την εστιακή απόσταση φακού c, και χρησιμοποιώντας τη σχέση $\frac{H}{c} = \frac{\text{ΕΚΤΑΣΗ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ}}{\text{ΑΡΝΗΤΙΚΟ}}$ όπου H, η μέση απόσταση της μηχανής από το αντικείμενο (μνημείο) προκύπτει η έκταση που καλύπτει μια αεροφωτογραφία στο χώρο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το ύψος πτήσης του αεροπλάνου είναι 41m πάνω από το σημείο εκκίνηση το οποίο ήταν 12m πάνω από τον αρχαιολογικό χώρο. Επομένως η μέση απόσταση της μηχανής από το μνημείο είναι 53m. Ακολούθως γνωρίζοντας ότι η έκταση του αρχαιολογικού χώρου είναι περίπου 41m x 44m και H=53m, υπολογίζεται ότι μια αεροφωτογραφία καλύπτει έκταση 76.05m x 56.08m. Επομένως είναι φανερό ότι με μόνο μια αεροφωτογραφία καλύπτεται ολόκληρος ο αρχαιολογικός χώρος. Αλλά για την πραγματοποίηση φωτογραμμετρικής διαδικασίας απαιτούνται περισσότερες από μια με επικάλυψη έτσι ώστε να δημιουργηθούν στερεοζεύγη.

Η πτήση πραγματοποιήθηκε πρωινές ώρες γιατί δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο φωτισμό του αντικειμένου ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα για ορθοφωτοχάρτη, δηλαδή όσο γίνεται να είναι ομοιόμορφος ο φωτισμός σε όλες τις αεροφωτογραφίες και να μην υπάρχουν σκιάσεις.

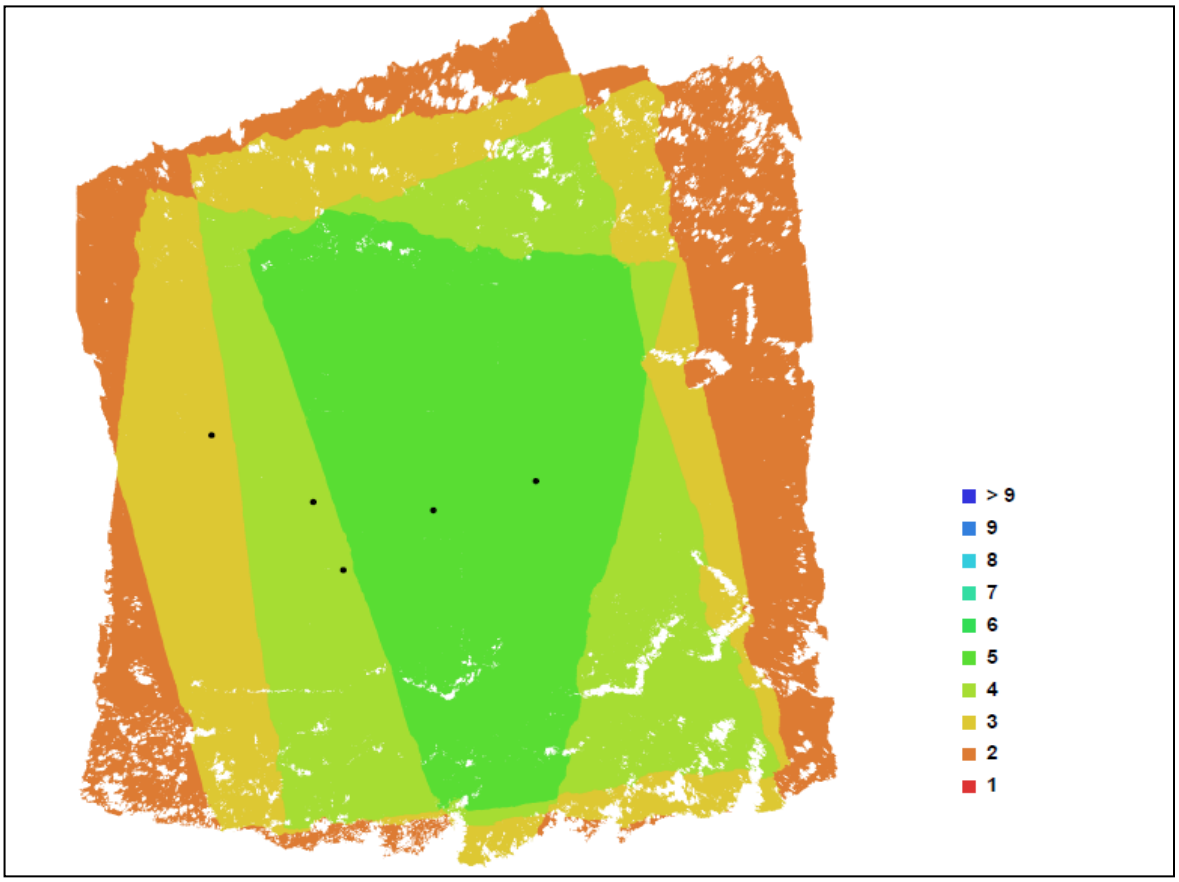


Εικόνα 4-3: Η πορεία πτήσης που πραγματοποίησε το αεροπλάνο στο πεδίο

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 4-3 η πορεία που πραγματοποίησε το UAV δεν είναι ακριβώς όπως αυτή που σχεδιάστηκε στην εικόνα 4-2. Φαίνεται ότι παρεκκλίνει από την πορεία του και αυτό οφείλεται κυρίως στον αέρα. Επίσης είναι σαφές ότι υπάρχουν περισσότερες λωρίδες πτήσης και αυτό γιατί στο πεδίο χρειάστηκε να σχεδιαστεί επί τόπου μια δεύτερη πτήση στα 32m για καλύτερη κάλυψη του χώρου και να μην χρειαστεί να ξανά πραγματοποιηθεί πτήση άλλη μέρα.

Το πλήρες αυτοματοποιημένο UAV πραγματοποίησε με επιτυχία την πτήση δίνοντας περίπου 300 αεροφωτογραφίες. Προκειμένου να παραχθεί το τελικό προϊόν επιλέχθηκαν αεροφωτογραφίες, οι οποίες να πληρούν τα κριτήρια της καλής γεωμετρίας (κάλυψη, κλίμακα) καθώς και τα κριτήρια της ποιότητας (διακριτικότητα αεροφωτογραφίας), και να μην εμφανίζουν σκιάσεις. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το περίγραμμα μιας αεροφωτογραφίας καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του αρχαιολογικού χώρου. Επομένως για την παραγωγή του τελικού προϊόντος δεν απαιτείται μεγάλος αριθμός αεροφωτογραφιών φτάνει να υπάρχει επαρκής επικάλυψη. Από το σύνολο των αεροφωτογραφιών επιλέχθηκαν 5 οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 4-4 και προορίζονται για χρήση.

Εικόνα 4-4: Αεροφωτογραφίες που προορίζονται για φωτογραμμετρική επεξεργασία



Εικόνα 4-5: Επικάλυψη μεταξύ των 5 αεροφωτογραφιών

Στην εικόνα 4-5 φαίνονται τα κέντρα λήψης των αεροφωτογραφιών με μαύρη κουκκίδα καθώς επίσης η επικάλυψη των αεροφωτογραφιών. Όπως παρατηρείται μεγάλο μέρος του μνημείου καλύπτεται και από τις 5 αεροφωτογραφίες (περιοχή με πράσινο χρώμα), ενώ ελάχιστο είναι το κομμάτι που καλύπτεται μόνο από δύο (κίτρινο χρώμα).

4.1.3 Εξασφάλιση φωτοσταθερών σημείων

Αφού προγραμματιστεί και πραγματοποιηθεί η πτήση του αεροπλάνου για τη λήψη αεροφωτογραφιών ακολουθεί η επιλογή και μέτρηση φωτοσταθερών στο χώρο του. Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ευκρίνεια τους πάνω στις αεροφωτογραφίες και να είναι περισσότερα από τα ελάχιστα απαιτούμενα για καλύτερη συνόρθωση. Για την εξασφάλιση αυτών έγινε χρήση τοπογραφικού εξοπλισμού που διαθέτει το εργαστήριο. Ο διαθέσιμος τοπογραφικός εξοπλισμός είναι: Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TC1203+ καθώς επίσης δέκτης GPS. Αρχικά εντοπίστηκε ένα σημείο πιο πέρα από τον αρχαιολογικό χώρο, του οποίου οι συντεταγμένες μετρήθηκαν με τη χρήση του GPS. Ο προσδιορισμός της θέσης του

πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο RTK, δηλαδή ο προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο με ακρίβεια 2cm. Το σημείο αυτό λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τον προσανατολισμό του γεωδαιτικού σταθμού. Αφού επιλέχθηκε το σημείο στάσης του γεωδαιτικού σταθμού από το οποίο είναι ορατά όλα τα φωτοσταθερά σημεία, σκοπεύτηκε το σημείο αναφοράς στο οποίο τοποθετήθηκε τρίποδας με κατάφωτο. Έπειτα αφού έγινε ο προσανατολισμός του οργάνου άρχισε η σκόπευση και εξασφάλιση των φωτοσταθερών σημείων με την χρήση του κατάφωτου.

Έχουν μετρηθεί 22 σημεία στο πεδίο τα οποία φαίνονται στην εικόνα 4-7. Η ακρίβεια μέτρησης των φωτοσταθερών λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ακρίβεια μέτρησης του γεωδαιτικού σταθμού από το οποίο εξαρτώνται αφού δεν μας ενδιαφέρει η ακρίβεια των σημείων ως προς το γεωδαιτικό δίκτυο της Κύπρου, εκτιμήθηκε ίση με 3mm. Μετά από υπόδειξη των αρχαιολόγων του σημείου αφετηρίας των υψομέτρων που καθόρισαν οι ίδιοι, μετρήθηκε επί τόπου με GPS, με ύψος 26.291m και έγινε αναγωγή όλων των υπόλοιπων υψομέτρων των φωτοσταθερών.

Όπως φαίνονται στην εικόνα 4-7 τα 22 φωτοσταθερά είναι κατανεμημένα περιμετρικά του χώρου και κάποια στο εσωτερικό του. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχουν σημεία που είναι σχεδόν στην ίδια θέση και ο λόγος είναι η εξασφάλιση όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων έτσι ώστε κάποια από αυτά να λειτουργήσουν ως εφεδρικά. Δηλαδή σε περίπτωση που έξω στο πεδίο δεν μετρηθεί σωστά ένα σημείο ή δεν είναι αρκετά ευδιάκριτο στις αεροφωτογραφίες να υπάρχει άλλο παρόμοιο του.

Εικόνα 4-6: Παράδειγμα Φωτοσταθερών σημείων στο πεδίο

Εικόνα 4-7 : Κατανομή των 22 φωτοσταθερών σημείων στο χώρο του μνημείου

Η επιλογή των 8 όπως φαίνονται στην εικόνα 4-8 που ακολουθεί, οφείλεται στο γεγονός ότι είναι σημεία τα οποία είναι αναγνωρίσιμα στις ψηφιακές αεροφωτογραφίες, και είναι σε κατάλληλες θέσεις στο χώρο. Επίσης για έλεγχο των μετρήσεων των σημείων έγινε εισαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων που προέκυψαν από τα δεδομένα του γεωδαιτικού σταθμού, στο λογισμικό PhotoScan της εταιρείας Agisoft. Ακολούθως τα σημεία σκοπεύτηκαν σε όσες αεροφωτογραφίες ήταν ορατά και αφού το λογισμικό υπολόγισε τις συντεταγμένες των σημείων αυτόματα, ακολούθως υπολόγισε το υπόλοιπο, δηλαδή την διαφορά των αρχικών συντεταγμένων με αυτών που υπολόγισε. Σε κάποια σημεία ήταν μεγάλο είτε λόγω σφαλμάτων κατά την μέτρηση έξω στο πεδίο είτε λόγω αδυναμίας σκόπευσης πάνω στην αεροφωτογραφία γιατί δεν ήταν τόσο ευδιάκριτο σε αντίθεση με κάποια άλλα που ήταν πιο ευδιάκριτα στις ψηφιακές αεροφωτογραφίες.

Εικόνα 4-8: Κατανομή των 8 φωτοσταθερών σημείων στο χώρο του μνημείου

4.2 Εργασίες γραφείου

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι εργασίες γραφείου που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των λήψεων με την εφαρμογή των φωτογραμμετρικών μεθόδων.

Περιγράφονται αναλυτικά οι προσανατολισμοί των αεροφωτογραφιών, η διαδικασία παραγωγής του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, ορθοφωτογραφίας και ορθοφωτοχάρτη με τη χρήση των δύο μεθόδων.

4.2.1 Φωτογραμμετρική επεξεργασία με ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό

Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών πραγματοποιήθηκε στον ΨΦΣ SSK της Z/I Imaging. Οι σταθμοί αυτοί μπορούν με απλές μεθοδολογίες και διαδικασίες να λύσουν τα διάφορα φωτογραμμετρικά προβλήματα και να παράξουν προϊόντα που χαρακτηρίζονται αξιόπιστα και ακριβή. Ο ΨΦΣ είναι χωρισμένος σε διάφορα υποπρογράμματα ανάλογα με τη φάση της εργασίας. Για την διαχείριση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισιμικό ISPM. Αρχικά δημιουργήθηκε ένα project στο οποίο να εισάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ISAT το οποίο είναι κατάλληλο για αυτόματο τριγωνισμό αεροφωτογραφιών. Στα πάρακάτω εδάφια περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των αεροφωτογραφιών μέσω λογισμικών μέχρι την παραγωγή τελικών προϊόντων.

4.2.1.1 Προσανατολισμός αεροφωτογραφιών

Γενικά τα είδη των προσανατολισμών που πρέπει να αποκαταστηθούν είναι ο εσωτερικός, η επίλυση του σχετικού και η αποκατάσταση του απόλυτου προσανατολισμού των στερεομοντέλων. Η φωτογραφία προσεγγίζεται με κεντρική προβολή. Δηλαδή η δέσμη ακτινών ξεκινά από ένα σημείο το οποίο ονομάζεται προβολικό κέντρο της φωτογραφίας (Xo,Yo,Zo). Λόγω κάποιων επιδράσεων στην ακτίνα κατά την φωτογραφική απεικόνιση δημιουργείται αποχή από την ιδανική κεντρική προβολή. Ο εσωτερικός προσανατολισμός έχει σαν στόχο να καθορίσει την κεντρική προβολή της φωτογραφικής μηχανής από την οποία λήφθηκαν οι φωτογραφίες. Ο σχετικός προσανατολισμός επιδιώκει την δημιουργία στερεοσκοπικού μοντέλου και την ανάπλαση του σχήματος του αντικειμένου

χρησιμοποιώντας ορισμένα κοινά σημεία (σημεία σύνδεσης) μεταξύ των φωτογραφιών τα οποία είναι ομαλά κατανεμημένα σε όλη την επιφάνεια του επικαλυπτόμενου τμήματος (στερεομοντέλου). Ο απόλυτος προσανατολισμός είναι το τελικό στάδιο και πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της κατάλληλης κλίμακας-μέγεθος αντικειμένου και ταυτόχρονα την σύνδεση του με το γεωδαιτικό σύστημα. Μια άλλη δυνατότητα προσανατολισμού των αεροφωτογραφιών, είναι η επίλυση των προσανατολισμών με τη μέθοδο συνόρθωσης κατά δέσμες η οποία πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο project.

Αρχικά έγινε δημιουργία καινούργιου project και έπειτα καθορίστηκαν βασικές παράμετροι όπως αναλύονται πιο κάτω.

Ρύθμιση των παραμέτρων του project: η τυπική απόκλιση σκόπευσης των σημείων στις αεροφωτογραφίες επιλέγηκε ίση με το μέγεθος της εικονοψηφίδας δηλαδή 1.53μm λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της αυτοβαθμονόμησης, ύψος πτήσης ίσο με 53m και ενεργοποίηση αυτόματης διόρθωσης από τη διάθλαση της ατμόσφαιρας και την καμπυλότητας της γης.

Ρύθμιση των ορίων σύγκλισης των προσανατολισμών: οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν την τελική ακρίβεια με την οποία επιθυμείται να κλείσουν οι προσανατολισμοί. Οι τιμές που καθορίζονται δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς των προσανατολισμών, απλά ενημερώνουν τον χρήστη αν είναι εντός των επιθυμητών ορίων. Για τον εσωτερικό και σχετικό προσανατολισμό επιλέγηκε ακρίβεια 5μm και για τον απόλυτο 5cm σύμφωνα με την διακριτική ικανότητα του ματιού (0.025cm) και την κλίμακα απόδοσης (1:200).

Εισαγωγή των πληροφοριών της μηχανής: οι πληροφορίες αυτές αναφέρονται στα φύλλα καλιμπραρίσματος των περισσότερων μηχανών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μηχανή δεν ήταν βαθμονομημένη και τα στοιχεία της γεωμετρίας της ψηφιακής μηχανής αντλήθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα Photoscan. Οι παράμετροι που ρυθμίζονται για την κάμερα είναι σημαντικό να είναι σωστοί και ακριβείς καθώς επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του project.

Εστιακή απόσταση		**Προβολικό κέντρο (πρωτεύον σημείο)**	
fx-fy	2828,3 ± 7,1 pixels **4.3259 mm**	Cx (xo)	2010,6 ± 1.8 pixels **3.0752 mm**
		Cy (yo)	1519,2 ± 1.8 pixels **2.3236 mm**
Συντελεστές πολυωνύμου ακτινικής διαστροφής			
K1 K2 K3		-0.042 0.026 -0.009	

Πίνακας 4-2: Στοιχεία γεωμετρίας της ψηφιακής μηχανής

Τα δεδομένα αυτά χρειάστηκε να μετατραπούν από μονάδα μέτρησης ψηφίδας (pixel) σε χιλιοστά (mm). Αυτό επιτεύχθηκε εύκολα γνωρίζοντας το μέγεθος του αρνητικού της φωτογραφίας σε mm και το μέγεθος της φωτογραφίας σε pixel, σύμφωνα με την συγκεκριμένη μηχανή (βλπ. πίνακα 4-1). Έτσι δημιουργήθηκε η σχέση μεταξύ ψηφίδας και χιλιοστών, δίνοντας τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο πίνακα 4-2. Όπως παρατηρείται στον πίνακα οι συνταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (προβολικό κέντρο) σε χιλιοστά (mm) αποκλίνουν αρκετά από το μηδέν (αρχή των αξόνων). Αυτό γιατί οι συντεταγμένες αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς της φωτογραφίας. Επομένως είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του προβολικού κέντρου στο σύστημα αναφοράς της εικόνας. Οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου προκύπτουν από το μέγεθος του αρνητικού 6.17mm μεγάλη πλευρά και 4.55mm μικρή πλευρά. Έπειτα το λογισμικό δίνει την δυνατότητα εισαγωγής των συντελεστών του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής (κι,κ2,κ3) του φακού ώστε να διορθώνεται από κάθε σημείο που σκοπεύετε. Οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου που προκύπτουν είναι x_o =0.016 mm, y_o = -0.029 mm.

Ο Εσωτερικός προσανατολισμός όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι ο πρώτος προσανατολισμός που εφαρμόζεται σε μια εικόνα. Με την αποκατάσταση αυτού καθορίζεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων των εικονοσημάτων (οι συντεταγμένες των οποίων αναγράφονται στο φύλλο καλιμπραρίσματος της φωτογραφικής μηχανής) και του συστήματος αναφοράς της εικόνας. Για τον λόγο ότι ο τύπος της μηχανής είναι ψηφιακός αυτό παραλείπεται.

Κατόπιν έγινε εισαγωγή των συντεταγμένων των φωτοσταθερών με ακρίβεια μέτρησης 0.003m, μετατροπή των εικόνων στο κατάλληλο φορμάτ, φόρτωμα εικόνων

στο λογισμικό ISAT και προσανατολισμός των εικόνων με αεροτριγωνισμό.

4.2.1.2 Αεροτριγωνισμός

Ο αεροτριγωνισμός ή αλλιώς συνόρθωση κατά δέσμες, όπου μοναδιαίο στοιχείο είναι η δέσμη ακτινών εφαρμόζεται στα project που χρησιμοποιούν αεροφωτογραφίες. Κατ' αυτόν δημιουργείται ένα ενιαίο block και επιτυγχάνεται σύνδεση των αεροφωτογραφιών μεταξύ τους καθώς και με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς μέσω των φωτοσταθερών. Επιπλέον κατά τον αεροτριγωνισμό υπολογίζονται τα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού όλων των εικόνων που συμμετέχουν στο block σε ένα βήμα.

Ο αεροτριγωνισμός χρησιμοποιεί τη Συνθήκη Συγγραμμικότητας ως εξίσωση παρατήρησης σε κάθε δέσμη (αεροφωτογραφία) και τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι εικονοσυντεταγμένες. Η Συνθήκη Συγγραμμικότητας περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$x - x_o = -c\frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)}$$

$$y - y_o = -c\frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)}$$

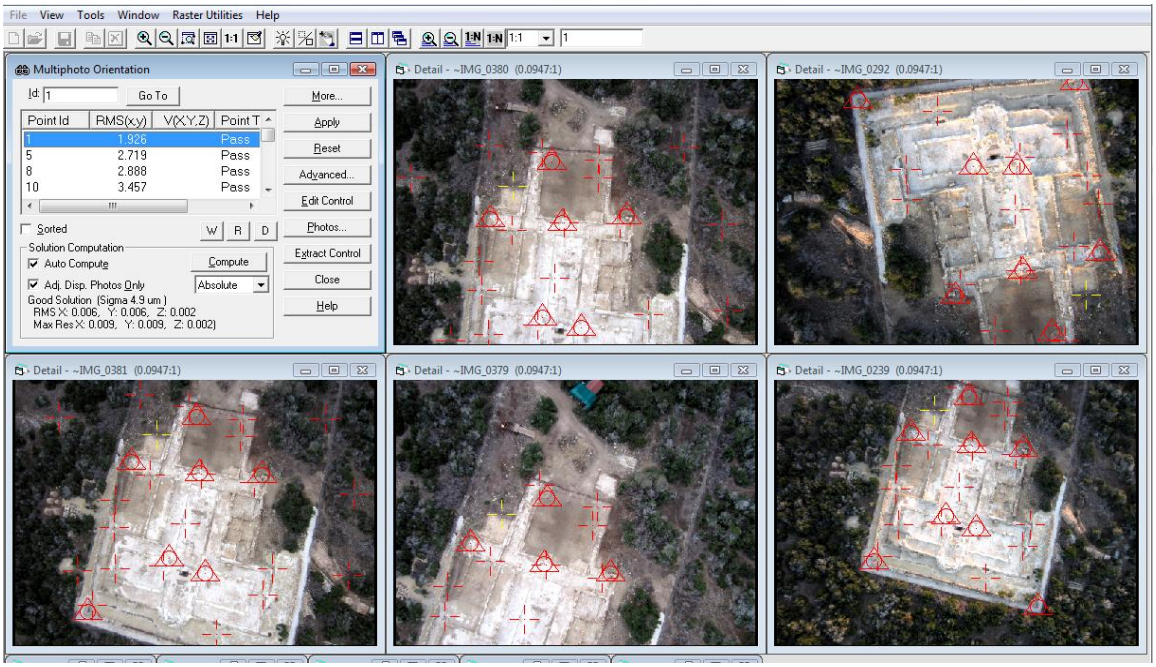
Το περιβάλλον μέτρησης είναι παρόμοιο με αυτό του σχετικού προσανατολισμού και του απόλυτου προσανατολισμού με την διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται όλες οι αεροφωτογραφίες που συμμετέχουν στο block σε ένα παράθυρο. Αντιθέτως οι άλλοι προσανατολισμοί ασχολούνται αποκλειστικά μόνο με ένα μοντέλο (2 εικόνες) κάθε φορά. Επομένως, ο αεροτριγωνισμός μειώνει τα απαιτούμενα επίγεια μετρημένα φωτοσταθερά για τους προσανατολισμούς κάθε μοντέλου ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον αεροτριγωνισμό απαιτούνται τουλάχιστον 4 φωτοσταθερά περιμετρικά του αντικειμένου (στις άκρες του block). Επίσης, καλό είναι να υπάρχουν και στο εσωτερικό για έλεγχο αλλά και αύξηση της υψομετρικής ακρίβειας. Ο αεροτριγωνισμός, θεωρείται ακριβέστερη μέθοδος, γιατί οι εξισώσεις παρατήρησης συσχετίζουν άμεσα τις εικονοσυντεταγμένες με τις γεωδαιτικές χωρίς την μεσολάβηση των συντεταγμένων μοντέλου.

Όσον αφορά το project, αρχικά σκοπεύτηκαν 20 περίπου σημεία σύνδεσης τα οποία βρίσκονταν στις περισσότερες αεροφωτογραφίες ώστε να προκύψουν αρκετές εξισώσεις παρατήρησης και επίτευξη μεγάλου βαθμού ελευθερίας. Ακολούθως σκοπεύτηκαν τα 8 γνωστά φωτοσταθερά των οποίων οι γεωδαιτικές συντεταγμένες

εισαχθήκανε σε προηγούμενο στάδιο. Σύμφωνα με τη συνθήκη συγγραμμικότητας κάθε μετρούμενο σημείο στην εικόνα είτε φωτοσταθερό είτε σημείο σύνδεσης δίνει 2 εξισώσεις (x,y) σε κάθε αεροφωτογραφία.

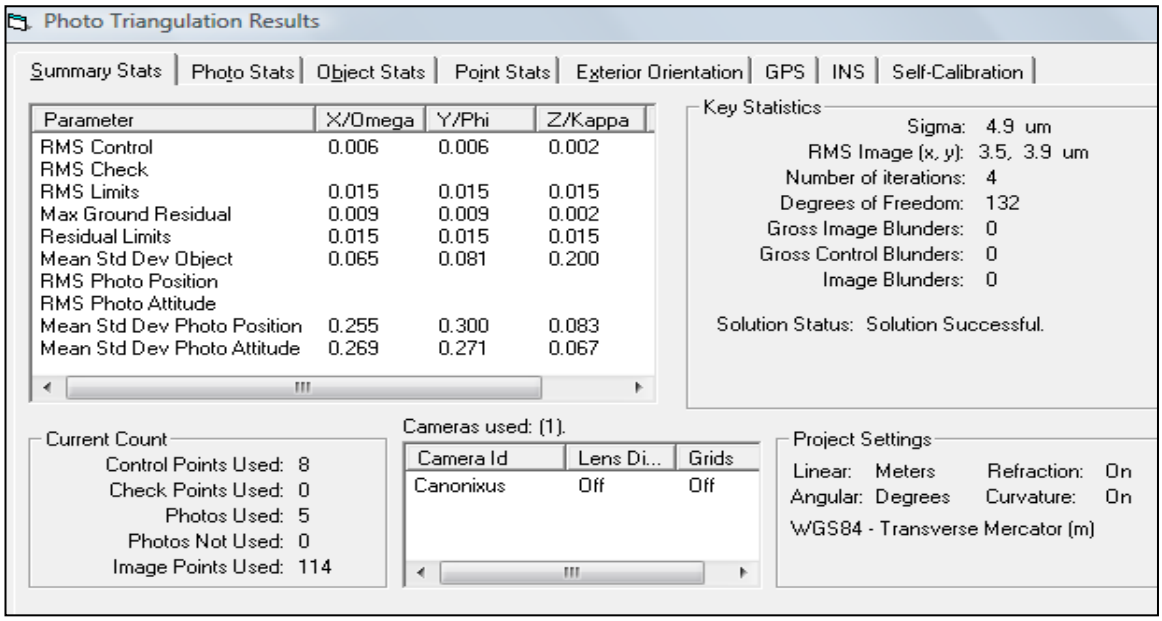
Οι άγνωστες παράμετροι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι τα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού των 5 αεροφωτογραφιών (6 για κάθε αεροφωτογραφία) καθώς επίσης οι γεωδαιτικές συντεταγμένες X,Y,Z των σημείων σύνδεσης που σκοπεύτηκαν. Οι γνωστές παράμετροι είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των 8 φωτοσταθερών, οι εικονοσυντεταγμένες αυτών όπως προκύπτουν από την σκόπευση τους πάνω στις αεροφωτογραφίες καθώς οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων σύνδεσης και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται δεν είναι γραμμικές. Συνεπώς απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές για τους αγνώστους και έτσι η διαδικασία της συνόρθωσης γίνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις. Η επίλυση του αεροτριγωνισμού είναι μια επαναληπτική διαδικασία όπου κάθε φορά ενημερώνεται το διάνυσμα των αγνώστων και υπολογίζονται νέες προσωρινές τιμές μέχρι που οι άγνωστοι παύουν να μεταβάλλονται σημαντικά. Με την σκόπευση τουλάχιστον τριών σημείων υπολογίζεται ο εξωτερικός προσανατολισμός και ξανα υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών.



Εικόνα 4-9: Κατανομή φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης κατά τον αεροτριγωνισμό.

Πραγματοποιώντας τον αεροτριγωνισμό των αεροφωτογραφιών το λογισμικό δίνει τα αποτελέσματα καθώς και το τυπικό σφάλμα κατά X,Y και Z των φωτοσταθερών. Αυτό το σφάλμα αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ των σημείων που εισαχθήκανε (πραγματικές τιμές) και αυτών που υπολογίζονται με την αποκατάσταση του προσανατολισμού. Για την παραγωγή τελικού προϊόντος σε κλίμακα 1:200 και μέγεθος ψηφίδας στο έδαφος 2cm, γίνεται έλεγχος αν το τυπικό σφάλμα κατά X,Y,Z είναι ικανοποιητικό. Συγκεκριμένα η οριζοντιογραφική ακρίβεια των φωτοσταθερών θα πρέπει να είναι ίση με το μέγεθος της ψηφίδας δηλαδή 2cm, ενώ η υψομετρική ακρίβεια ίση με το διπλάσιο του μεγέθους της ψηφίδας δηλαδή 4cm. Όπως φαίνονται στον πίνακα 4-3 που ακολουθεί, το RMS Control σε όλες τις διευθύνσεις είναι σε mm, επομένως ο προσανατολισμός των αεροφωτογραφιών πραγματοποιήθηκε με επιτυχία.



Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα αεροτριγωνισμού, τυπικό σφάλμα κατά X,Y,Z φωτοσταθερών.

4.2.1.3 Παραγωγή τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας του αντικειμένου

Οι αεροφωτογραφίες που έχουν ληφθεί προορίζονταν για παραγωγή ορθοφωτογραφιών και ακολούθως την δημιουργία του τελικού προϊόντος το οποίο είναι ο ορθοφωτοχάρτης. Αυτό προαπαιτεί την συλλογή του ψηφιακού μοντέλου της επιφάνειας η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ISAE. Δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης συλλογής υψομετρικών σημείων με την δημιουργία

μοντέλων και την χρήση των γνωστών υψομέτρων των φωτοσταθερών ώστε να προσδιοριστεί η τρίτη διάσταση κάθε σημείου κανάβου με βήμα (Grid Size) που καθορίζεται από τον χρήστη.

Η αυτόματη συλλογή ΨΜΕ εφαρμόστηκε ξεχωριστά στα 4 μοντέλα του project διότι ο ΨΦΣ δεν υποστηρίζει πολυεικονική συσχέτιση, όπως το Photoscan. Αρχικά καθορίστηκαν οι απαραίτητες ρυθμίσεις για τη συλλογή του ΨΜΕ όπως ο τύπος του ανάγλυφου και το βήμα του καννάβου το οποίο εξαρτάται κυρίως από την πολυπλοκότητα και την πολυεπιπεδότητα του αντικειμένου, καθώς και από το μέγεθος της ψηφίδας του τελικού προϊόντος. Εμπειρικά το βήμα του καννάβου είναι δεκαπλάσιο του μεγέθους της τελικής ψηφίδας εδάφους (0.02m) δηλαδή 0.20m. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρήθηκε κατάλληλο βήμα κανάβου 0.10m για τον λόγο ότι στο μνημείο υπάρχουν τοιχία επομένως διαφορετικά υψόμετρα στην περιοχή του. Επίσης επιλέχθηκε το αρχείο σχεδίασης (Dgn File) το οποίο περιέχει την πληροφορία του συστήματος αναφοράς καθώς και τα πολύγωνα μέσα στα οποία θα δημιουργηθεί το ΨΜΕ.

4.2.1.4 Παραγωγή Εικονιστικών Προϊόντων

Από τον ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό τα εικονιστικά προιόντα που παράγονται είναι ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτης (μωσαϊκό). Η παραγωγή τέτοιων προϊόντων πραγματοποιείται με το ειδικό λογισμικό ISBR καθώς και με το ISOP. Το πρώτο χρησιμοποιείται μόνο για παραγωγή ορθοφωτογραφίας, ενώ το δεύτερο για παραγωγή ορθοφωτογραφίας και ορθοφωτοχάρτη. Επομένως, επιλέχθηκε το ISOP για το συγκεκριμένο project. Το ISOP είναι ένα ψηφιακό σύστημα το οποίο επιτρέπει ορθοδιορθώσεις αεροφωτογραφιών και στη συνέχεια συνένωση αυτών με απώτερο σκοπό την δημιουργία μωσαϊκού. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής των εικονιστικών προϊόντων στο περιβάλλον του λογισμικού.

4.2.1.4.1 Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας στο περιβάλλον του λογισμικού ISOP

Ορθοφωτογραφία ορίζεται ως η αεροφωτογραφία η οποία έχει διορθωθεί γεωμετρικά (ορθοδιόρθωση) με αποτέλεσμα να έχει εννιαία κλίμακα και μπορεί να θεωρηθεί χάρτης. Για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας έγινε δημιουργία καινούργιου OrthoPro project σε περιβάλλον Geomedia ορίζοντας το σύστημα αναφοράς το ίδιο με αυτό στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα εισόδου. Ακολούθως έγινε εκτέλεση των ιεραρχημένων διαδικασιών που παρέχονται στο λογισμικό και αφορούν τις

παραμέτρους του project.

Αρχικά έγινε η επιλογή των πηγών από το φωτογραμμετρικό project, δηλαδή των αεροφωτογραφιών που είναι προσανατολισμένες και χρειάζονται ορθοδιόρθωση. Στη συνέχεια επιλέχτηκε χειροκίνητα η περιοχή μελέτης και καθορίστηκε το μέγεθος της ψηφίδας του τελικού προϊόντος. Αυτό αφορά το μέγεθος που καταλαμβάνει η ψηφίδα στο έδαφος και στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει καθοριστεί ίσο με 2cm. Αυτό προκύπτει από την κλίμακα της αεροφωτογραφίας η οποία είναι 1:12268 και το μέγεθος της ψηφίδας στην αεροφωτογραφία, 1.53μm.

Για την ορθοδιόρθωση των αεροφωτογραφιών χρειάζονται τα στοιχεία των προσανατολισμών καθώς και το ψηφιακό μοντέλο της επιφάνειας που απεικονίζεται το αντικείμενο μελέτης. Επομένως το επόμενο στάδιο αποτελεί την εισαγωγή υψομετρικής πληροφορίας (ΨΜΕ) που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο καθώς και του συστήματος αναφοράς στο οποίο αναφέρεται. Τέλος για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας καθορίστηκαν οι παράμετροι της ορθοδιόρθωσης κάποιες από τις οποίες είναι η μέθοδος παρεμβολής με την οποία θα υπολογιστεί ο τόνος της ψηφίδας της ορθοφωτογραφίας και το πόσο συχνά θα χρησιμοποιείται το ΨΜΕ για την ορθοδιόρθωση. Η μέθοδος παρεμβολής που καθορίστηκε είναι η Διγραμμική παρεμβολή η οποία είναι αρκετά γρήγορή και με ικανοποιητικά αποτελέσματα και η συχνότητα χρήσης του ΨΜΕ ίσο με 1 pixel.

4.2.1.4.2 Σύνταξη μωσαϊκού στο περιβάλλον του λογισμικού ISOP

Το μωσαϊκό ή αλλιώς ορθοφωτοχάρτης αποτελεί το τελικό προϊόν της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Επιτυγχάνεται με τον καθορισμό γραμμών σύνδεσης των επιμέρους ορθοφωτογραφιών. Ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολυγώνων μωσαϊκού στην περιοχής μελέτης τα οποία καθορίζουν ποιά κομμάτια από τις ορθοφωτογραφίες θα χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή μωσαϊκού. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα σχεδίασης γραμμών χειροκίνητα ή αυτόματα. Στο συγκεκριμένο project επιλέχθηκε αυτόματη σχεδίαση. Στο τέλος έγινε έλεγχος των πολυγώνων, δηλαδή αν στο καθένα από αυτά χρησιμοποιείται η επιθυμητή ορθοφωτογραφία ώστε να παραχθεί το τελικό προϊόν που είναι το ορθοφωτομωσαικό το οποίο φαίνεται πιο κάτω, εικόνα 4-10.

Εικόνα 4-10: Ορθοφωτομωσαικό με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.02m

Εικόνα 4-11: Λεπτομέρειες Ορθοφωτομωσαικού

4.2.2 Επεξεργασία αεροφωτογραφιών με υπολογιστική όραση

Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών για την απόκτηση τελικού προϊόντος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ειδικού λογισμικού Photoscan της εταιρείας Agisoft. Το λογισμικό έχει την δυνατότητα επεξεργασίας δεκάδων χιλιάδων φωτογραφιών. Επιπλέον έχει την δυνατότητα να ευθυγραμμίζει και να προσανατολίζει τις αεροφωτογραφίες με την εύρεση νέφους κοινών σημείων, την ανακατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους καθώς και υψομέτρου, για την παραγωγή τελικού προϊόντος που χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ακρίβειας, ορθοφωτοχάρτη. Σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του λογισμικού είναι η αυτόματη βαθμονόμηση της μηχανής καθώς επίσης ο αεροτριγωνισμός και προσαρμογή block.

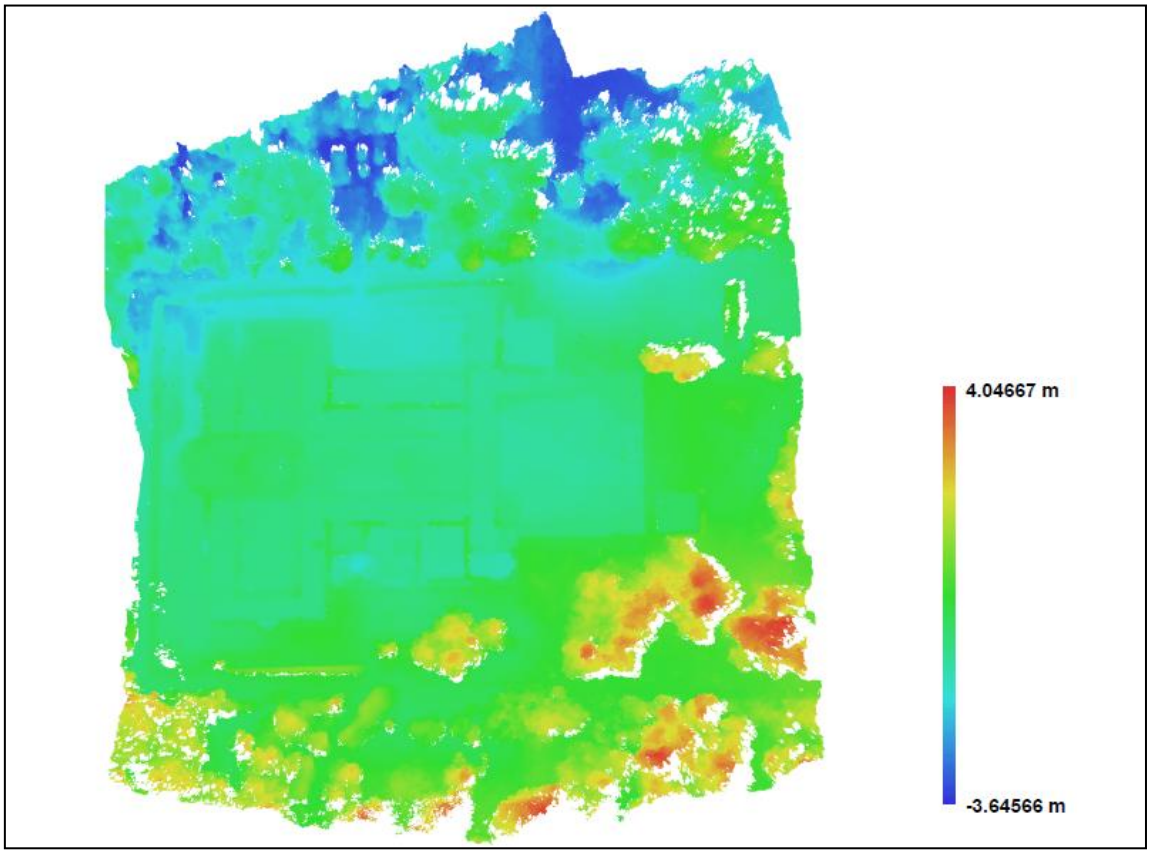
4.2.2.1 Ευθυγράμμιση και προσανατολισμός αεροφωτογραφιών

Αφού έγινε η επιλογή των τελικών αεροφωτογραφιών και η εισαγωγή τους, το λογισμικό έχει την δυνατότητα να εντοπίζει κοινά σημεία μεταξύ των αεροφωτογραφιών (νέφος σημείων) ώστε να τοποθετούνται στην σωστή σειρά και θέση μια διαδικασία που ονομάζεται ευθυγράμμιση των εικόνων. Ταυτόχρονα το λογισμικό ανακτά παραμέτρους της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε (στοιχεία βαθμονόμησης) για τον εσωτερικό προσανατολισμό του block που τίθεται υπό επεξεργασία με την μέθοδο Bundle adjustment. Η διαδικασία γίνεται αυτόματα λόγω του μεγάλου αριθμού των σημείων σύνδεσης που εντοπίζει το λογισμικό μεταξύ των αεροφωτογραφιών. Η μέθοδος Bundle adjustment χρησιμοποιείται κυρίως στην υπολογιστική όραση και σκοπό έχει την μείωση των σφαλμάτων επαναπροβολής των σημείων που εντοπίστηκαν και τον υπολογισμό της γεωμετρίας της μηχανής κατά τη λήψη.

4.2.2.2 Τρισδιάστατη ανακατασκευή μοντέλου εδάφους

Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους έγινε με βάση την πληροφορία της εικόνας καθορίζοντας τον τύπο και την γεωμετρία του αντικειμένου, καθώς επίσης την ποιότητα της ανακατασκευής. Αρχικά το επίπεδο ανακατασκευής καθορίστηκε ως μέτριο απλά για να γίνει η ένωση των αεροφωτογραφιών. Σημαντική παράμετρος στην ανακατασκευή της επιφάνειας είναι ο αριθμός των τριγώνων που θα αποτελέσουν την επιφάνια. Ουσιαστικά γίνεται τριγωνοποίηση από την οποία προκύπτει ένα σύνολο κορυφών (νέφος σημείων) που είναι συνδεδεμένα

μεταξύ τους σχηματίζοντας έτσι πλέγμα τριγώνων. Επομένως δημιουργείται μια επιφάνεια TIN, συνδεδεμένων επίπεδων τριγώνων. Η συγκεκριμένη διαδικασία για τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους πραγματοποιήθηκε αυτόματα στο προαναφερόμενο λογισμικό. Το ψηφιακό μοντέλο το οποίο φαίνεται στην εικόνα 4-12 έγινε με βήμα καννάβου 4cm και με δυνατότητα υπολογισμού 1698.35 σημείων ανά τετραγωνικό μέτρο.



Εικόνα 4-12: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

4.2.2.3 Γεωαναφορά

Γεωαναφορά ονομάζεται η διαδικασία συσχέτισης της επιφάνειας των αεροφωτογραφιών με γνωστό ή αυτόνομο σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή πιθανόν να περιλαμβάνει αλλαγή κλίμακας, θέσης και μεγέθους μια εικόνας ώστε να προσαρμόζεται σε αυτό. Με την ρύθμιση του συστήματος αναφοράς η εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρητική επιφάνεια καθώς και για εξαγωγή συμπερασμάτων συγκρίνοντας την με άλλα γεωαναφερμένα δεδομένα.

Για την υλοποίηση της γεωαναφοράς, είναι απαραίτητη η ύπαρξη 3 τουλάχιστον φωτοσταθερών στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Ο αριθμός των διαθέσιμων φωτοσταθερών είναι 8, τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη

μέθοδο. Αφού έγινε η σκόπευση των φωτοσταθερών σε όλες τις αεροφωτογραφίες που ήταν ορατά, μετά εισαχθήκανε στο λογισμικό οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Επίσης στο στάδιο αυτό καθορίστηκαν 3 βασικοί παράμετροι για την βελτιστοποίηση της ευθυγραμμίας (optimizing photo alignment) των αεροφωγραφιών και της ακρίβειας της γεωαναφοράς ώστε να γίνει ορθοδιόρθωση αυτών και να προκύψουν ορθοφωτογραφίες αυτόματα.

Camera accuracy	1m
Marker accuracy (ακρίβεια μέτρησης των φωτοσταθερών στο πεδίο)	0.003m
Projection accuracy (ακρίβεια σκόπευσης των φωτοσταθερών)	1 pixel=1.53μm

Πίνακας 4-4: Παράμετροι του Optimizing photo alignment

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να δημιουργεί ένα φυλλάδιο αναφοράς στο οποίο έχει τα πιο σημαντικά στοιχεία για το project. Επίσης εμφανίζει την διαφορά μεταξύ φωτοσταθερών που εισαχθήκανε και αυτών που σκοπεύτηκαν στις αεροφωτογραφίες αντίστοιχα κατά X,Y,Z. Επομένως στη συνέχεια υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα κάθε διεύθυνσης για τον έλεγχο του προσανατολισμού των αεροφωτογραφιών. Συγκεκριμένα η οριζοντιογραφική ακρίβεια των φωτοσταθερών θα πρέπει να είναι ίση με το μέγεθος της ψηφίδας δηλαδή 2cm, ενώ η υψομετρική ακρίβεια ίση με το διπλάσιο του μεγέθους της ψηφίδας δηλαδή 4cm. Όπως φαίνεται στο πίνακα 4-5 η ακρίβεια των φωτοσταθερών είναι πολύ καλή αφού είναι πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι είναι λίγο μεγαλύτερα από αυτά που προέκυψαν από τον φωτογραμμετρικό σταθμό.

Τυπικό σφάλμα (m)	
Διεύθυνσης X	0.012
Διεύθυνσης Y	0.013
Διεύθυνσης Z	0.012

Πίνακας 4-5: Τυπικό σφάλμα των 8 φωτοσταθερών κατά X,Y,Z

Ακολούθως έγινε ανακατασκευή της επιφάνειας του εδάφους επιλέγοντας καλύτερη ποιότητα για να προκύψει πιο ακριβής γεωμετρία της επιφάνειας δημιουργώντας ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υψομέτρου για την παραγωγή του τελικού προϊόντος, ορθοφωτοχάρτη όπως φαίνεται στην εικόνα 4-13.

Εικόνα 4-13: Ορθοφωτοχάρτης με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.02m

Εικόνα 4-14: Λεπτομέρειες Ορθοφωτοχάρτη

5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ-ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ-ΣΥΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι αποτύπωση του μνημείου όπως έχει ζητηθεί από τους αρχαιολόγους, μέσω φωτογραμμετρικών διαδικασιών με τελικό προϊόν την παραγωγή ενός ορθοφωτοχάρτη της περιοχής μελέτης. Απώτερος σκοπός όμως της μελέτης είναι αξιολόγηση και σύγκριση των δύο μεθόδων επεξεργασίας φωτογραμμετρικών δεδομένων που αναλύθηκα σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο των τελικών προϊόντων των δύο μεθόδων δηλαδή, ποιά μέθοδος ανταποκρίνεται περισσότερο στις αρχικές απαιτήσεις. Επίσης αναφέρονται διαφορές που εντοπίστηκαν μεταξύ των δύο μεθόδων, και τέλος κάποιες διαπιστώσεις και συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία.

5.1 Αξιολόγηση και σύγκριση τελικών προϊόντων

Τελικά προϊόντα της παρούσας εργασίας είναι δύο ορθοφωτοχάρτες. Ο πρώτος προέκυψε από την επεξεργασία δεδομένων σε ΨΦΣ, SSK της Z/I Imaging μέσω των ειδικών λογισμικών που προσφέρονται σε κάθε στάδιο. Ο δεύτερος προέκυψε από την επεξεργασία δεδομένων με υπολογιστική όραση και συγκεκριμένα του ειδικού λογισμικού που παρέχει το εργαστήριο φωτογραμμετρίας, Photscan. Με το πέρας των εργασιών και την παραγωγή των δύο ορθοφωτογραφιών απαιτείται να γίνει έλεγχος της ποιότητας και της ακρίβειας ώστε να αποδειχθεί ποιά μέθοδος προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα και τις αρχικές απαιτήσεις. Ο έλεγχος των τελικών προϊόντων πραγματοποιείται με τη χρήση check points στο μνημείο τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως σε καμία διαδικασία παραγωγής προϊόντων και φαίνονται στην εικόνα 5-1 που ακολουθεί. Αυτά τα σημεία μετρήθηκαν την ίδια μέρα στο πεδίο με τα 8 φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τελικών προϊόντων και έχουν την ίδια ακρίβεια μέτρησης. Αφού έγινε η εισαγωγή τους στο λογισμικό GIS σκοπεύτηκαν κατά το δυνατό στη σωστή θέση (πραγματική) δίνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα.

Εικόνα 5-1: Κατανομή σημείων ελέγχου στο χώρο του μνημείου

Ο πρώτος έλεγχος αφορά την παραγωγή ορθοφωτοχάρτη από το ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό.

Check point	ΔXi(m)	ΔYi(m)	$(ΔXi)^2$	$(ΔYi)^2$	ΔXY
1	-0.124	0.062	0.015	0.004	0.019
2	-0.031	0.029	0.001	0.001	0.002
3	-0.009	0.022	0.000	0.000	0.001
4	-0.008	0.008	0.000	0.000	0.000
5	-0.015	0.026	0.000	0.001	0.001
6	-0.093	-0.099	0.009	0.010	0.018
7	-0.016	0.014	0.000	0.000	0.000
8	0.036	-0.113	0.001	0.013	0.014
9	-0.086	-0.096	0.007	0.009	0.017
10	0.315	-0.298	0.099	0.089	0.188
11	-0.209	0.037	0.044	0.001	0.045
12	0.044	-0.062	0.002	0.004	0.006
			Σ=0.179	**Σ=0.132**	**M.O=0.026**

Πίνακας 5-1: Έλεγχος τελικού προϊόντος του ΨΦΣ κατά τις διευθύνσεις Χ και Υ

Το τυπικό σφάλμα του τελικού προϊόντος δεν πρέπει να ξεπερνά την αναμενόμενη οριζοντιογραφική ακρίβεια που προκύπτει από την κλίμακα των προϊόντων δηλαδή 5cm.

Ακολούθως έχει υπολογιστεί το τυπικό σφάλμα κατά τις διευθύνσεις X και Y όπως φαίνονται στο πίνακα 5-2. Παρατηρείται ότι το τυπικό σφάλμα των δύο διευθύνσεων είναι σχεδόν δυο φορές μεγαλύτερο από 5cm.

Τυπικό σφάλμα √(Σ/n)	
Διεύθυνσης X **(m)**	0.122
Διεύθυνσης Y **(m)**	0.105

Πίνακας 5-2:Τυπικά σφάλματα διευθύνσεων X και Y

Ο δεύτερος έλεγχος αφορά τον ορθοφωτοχάρτη που προέκυψε από το λογισμικό Photoscan.

Check point	**ΔXi(m)**	**ΔYi(m)**	**$(ΔXi)^2$**	**$(ΔYi)^2$**	**ΔXY**
1	-0.019	0.02	0.000	0.000	0.001
2	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000
3	-0.009	0.013	0.000	0.000	0.000
4	-0.003	0.008	0.000	0.000	0.000
5	0.064	-0.014	0.004	0.000	0.004
6	0.05	-0.042	0.002	0.002	0.004
7	0.001	0.014	0.000	0.000	0.000
8	-0.033	0.013	0.001	0.000	0.001
9	-0.031	0.006	0.001	0.000	0.001
10	0.035	0.245	0.001	0.060	0.061
11	-0.072	0.026	0.005	0.001	0.006
12	-0.006	0.003	0.000	0.000	0.000
			Σ=0.016	**Σ=0.064**	**Μ.Ο=0.007**

Πίνακας 5-3:Έλεγχος τελικού προϊόντος του Photoscan κατά τις διευθύνσεις X και Y

Όπως και προηγουμένως, υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα στις δύο κατευθύνσεις. Παρατηρείται ότι τα τυπικά σφάλματα είναι οριακά κοντά στο 5cm όπως είναι η αναμενόμενη οριζοντιογραφική ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Όπως παρατηρείται είναι πολύ καλύτερη η ακρίβεια αυτού του ορθοφωτοχάρτη από τον πρώτο.

Τυπικό σφάλμα √(Σ/n)	
Διεύθυνσης X **(m)**	0.036
Διεύθυνσης Y **(m)**	0.073

Πίνακας 5-4:Τυπικά σφάλματα διευθύνσεων X και Y

Αισθητική και οπτική σύγκριση τελικών προϊόντων

Μελετώντας τους ορθοφωτοχάρτες που παρήχθησαν από τον ΨΦΣ και το Photoscan προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

Μεταξύ των δύο τελικών προϊόντων υπάρχουν αισθητικές και οπτικές διαφορές. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5-2 η αντίστοιχη περιοχή από τους δύο ορθοφωτοχάρτες φαίνεται με κενές εικονοψηφίδες και χωρίς. Συγκεκριμένα οι κενές εικονοψηφίδες ανήκουν στον ορθοφωτοχάρτη που προέκυψε από το Photoscan. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην μέθοδο παρεμβολής που χρησιμοποιεί το λογισμικό για να προσδιοριστεί το χρώμα της εικονοψηφίδας από τις γειτονικές. Καθώς επίσης και στο γεγονός ότι, για την δημιουργία του υψηλής ποιότητας ορθοφωτοχάρτη το λογισμικό επέλεγε τις καλύτερες περιοχές από τις 5 αεροφωτογραφίες για την παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη και οι άκριες δεν καλύπτονται από όλες τις αεροφωτογραφίες με αποτέλεσμα να μην εντοπίζεται τιμή για κάποιες εικονοψηφίδες. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μόνο στις άκριες του ορθοφωτοχάρτη όπως φαίνεται στην εικόνα 5-3 περιοχές δηλαδή με λιγότερη επικάλυψη. Μπορεί να διορθωθεί αυτόματα από το λογισμικό όμως για σκοπούς σύγκρισης δεν έγινε οποιαδήποτε διόρθωση.

Εικόνα 5-2: Δύο παραδείγματα με κενές εικονοψηφίδες και χωρίς

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5-3 η αντίστοιχη περιοχή από τους δύο ορθοφωτοχάρτες δεν είναι οπτικά η ίδια. Συγκεκριμένα στον ορθοφωτοχάρτη που προέκυψε από ΨΦΣ οι ευθείες καμπυλώνονται και αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που δημιουργήθηκε δεν ελέχθηκε χειροκίνητα αν τα φωτοσταθερά είναι στις σωστές θέσεις και δεν αιωρούνται πάνω στο ΨΜΕ ώστε να είναι αξιόπιστο. Είναι μια βασική διαδικασία στον ΨΦΣ που προαπαιτείται για την δημιουργία

ορθοφωτογραφίας και στην συνέχεια ορθοφωτοχάρτη όμως για λόγους σύγκρισης των προϊόντων από τις δύο μεθόδους δεν έγινε οποιαδήποτε επέμβαση από τον χρήστη. Αντιθέτως ο ορθοφωτοχάρτης που προέκυψε από το Photoscan δεν εμφανίζει κάτι τέτοιο.

Εικόνα 5-3: Δύο παραδείγματα οπτικής ποιότητας

5.2 Συνολική εκτίμηση των δύο μεθόδων και συμπεράσματα

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε ως αποτέλεσμα την τριβή με δύο μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων φωτογραμμετρίας ώστε να εντοπιστούν κάποιες διαφορές των δύο. Οι δύο μέθοδοι, ψηφιακή φωτογραμμετρία και υπολογιστική όραση έχουν την δυνατότητα παραγωγής ίδιων προϊόντων γι'αυτό άλλωστε επιλέχθηκαν για να συγκριθούν. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούν σημαντικές διαφορές που εντοπίστηκαν μέσα από την εκτέλεση των εργασιών.

Μετά την λήψη αεροφωτογραφιών και την εξασφάλιση φωτοσταθερών άρχισαν οι εργασίες γραφείου για την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Η συνολική διάρκεια εργασιών που χρειάστηκε στον ΨΦΣ SSK της Z/I Imaging είναι 2 μήνες. Βέβαια κάποιος πιο έμπειρος και καλός γνώστης των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε φάση των εργασιών, θα χρειαζόταν λιγότερο χρόνο. Πιθανόν, αν οι εργασίες ξανα γίνονταν μετά την πρόσφατη εμπειρία που αποκτήθηκε ο χρόνος δουλειάς να είναι 3 μέρες. Από την άλλη όμως για την παραγωγή των τελικών προϊόντων στο λογισμικό Photoscan της Agisoft χρειάστηκαν 2 μέρες δουλειάς. Το γεγονός ότι το Photoscan έχει την δυνατότητα αυτοματοποιημένων διαδικασιών και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα είναι μεγάλο πλεονέκτημα. Για παράδειγμα για την παραγωγή του τελικού ορθοφωτοχάρτη στο ΨΦΣ χρειάστηκαν σχεδόν 2 ώρες ενώ στο Photoscan μόνο 2 λεπτά.

Όταν πρόκειται για λογισμικά, το περιβάλλον εργασίας ενός λογισμικού θεωρείται επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας στον συνολικό χρόνο επίτευξης εργασιών. Όσον αφορά τα δύο λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, οι διαδικασίες αντιμετωπίστηκαν με μεγαλύτερη ευκολία και λιγότερο χρόνο στο Photoscan. Αυτό κυρίως οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχει όλα τα εργαλεία μαζικά για την υλοποίηση εργασιών από την έναρξη του project μέχρι την παραγωγή προϊόντων και οι διαδικασίες είναι αυτοματοποιημένες. Επίσης είναι απλό και εύχρηστο. Σε αντίθεση με τον ΨΦΣ, ο οποίος παρέχει υπολογισμικά ανάλογα με την φάση των εργασιών με αποτέλεσμα να χρειάζεται εξοικείωση του χρήστη με περισσότερα από ένα λογισμικά και να γίνεται νέο project σε καθένα από αυτά. Όταν όμως υπάρχουν πολλές παράμετροι και δεν γίνονται όλα αυτόματα ο χρήστης έχει καλύτερο έλεγχο των πραγμάτων.

Σημαντικό σημείο στις εργασίες είναι ο αεροτριγωνισμός ή αλλιώς η συνόρθωση κατά δέσμη, μια δυνατότητα προσανατολισμού των αεροφωτογραφιών που προσφέρεται και από τις δύο μεθόδους. Μετά την επίλυση του αεροτριγωνισμού και τον υπολογισμό των εξωτερικών προσανατολισμών των αεροφωτογραφιών υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών και ακολούθως το τυπικό σφάλμα κατά X,Y,Z που προκύπτει από την διαφορά των πραγματικών τιμών και αυτών που υπολογίστηκαν. Τα τυπικά σφάλματα των φωτοσταθερών στις διευθύνσεις X,Y,Z όπως προέκυψε στις δύο μεθόδους είναι πολύ καλά αφού και στις δύο είναι μικρότερο από τις αναμενόμενες ακρίβειες τόσο οριοζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά όμως διαφέρουν μεταξύ τους. Μπορεί στον ΨΦΣ να είναι λίγο μικρότερα από του Photoscan, πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ο αριθμός των σημείων σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκαν στον ΨΦΣ είναι μόνο 20. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να είναι ασταθές ο αεροτριγωνισμός και κάθε μετακίνηση ή εισαγωγή άλλου σημείου επηρέαζε πολύ το αποτέλεσμα. Αντιθέτως στο Photoscan η εύρεση σημείων σύνδεσης έγινε αυτόματα με συνολικό αριθμό σημείων 6714. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο αριθμός των σημείων σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκαν στην συνόρθωση του block είναι σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη σωστού προσανατολισμού των αεροφωτογραφιών και ακολούθως στην δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Ως επακόλουθο των δύο προαναφερόμενων διαδικασιών είναι η δημιουργία ορθοφωτογραφίας και τέλος ορθοφωτοχάρτης. Επομένως όταν έγινε ο ποιοτικός έλεγχος στους δύο ορθοφωτοχάρτες φάνηκε ότι ο προσανατολισμός του block στο Photoscan και η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους ήταν πιο

αξιόπιστα με αποτέλεσμα τα φωτοσταθερά να μην αποκλίνουν αρκετά από την πραγματική τους θέση.

Η φωτογραμμετρία έχει αυξήσει το ενδιαφέρον τόσο σε μηχανικούς όσο και αρχιτέκτονες σε θέματα αποτυπώσεων αρχαιολογικών χώρων καθώς έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό. Αρχίζοντας από αναλογική και φτάνοντας στην ψηφιακή φωτογραμμετρία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον έχει γίνει αναβάθμιση των ήδη υπάρχουσων φωτογραμμετρικών διαδικασιών με σκοπό να πραγματοποιούνται ταχύτερα και όσον το δυνατό αυτοματοποιημένες χρησιμοποιώντας μεγάλο όγκο δεδομένων γνωστή ως υπολογιστική όραση και την παραγωγή προϊόντων που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ακρίβειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Φάκα Μ. (2011). "Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ιερού Ναού στο Πελένδρι, Κύπρος". Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.

Σούγλε Β., (2010). "Φωτογραμμετρική αποτύπωση του οχυρωμένου Βυζαντινού οικισμού της Ρεντίνας". Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Νάτσης Σ., (2008). "Σύνταξη λογισμικού για την εφαρμογή εναλλακτικής μεθόδου παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας". Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Θεσσαλονίκη.

Σοφεκλέους Ε., (2006*). "*Γεωμετρική τεκμηρίωση του ναού της Παναγίας Φορβιώτισσας". Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.

Γεωργόπουλος, Α. (2011). "Σύγχρονες Τεχνολογίες στην Γεωμετρική Τεκμηρίωση των Μνημείων." Διαφάνειες μαθήματος, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα.

Γεωργόπουλος Α., (2010). Προσανατολισμοί. Σημειώσεις του μαθήματος φωτογραμμετρία Ι.

Πατιάς Π., (2009). "Φωτογραμμετρία και τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων και ευρημάτων- με απλά λόγια."

Διαδικτυακοί Τόποι

Υπουργείο Πολιτισμού και Τουρισμού/Αρχαιολογικοί χώροι. (2012). "Οδυσσεύες." <http://odysseus.culture.gr/h/3/gh30.jsp> (Γεν. 4, 2013).

Νέστορας, Χ. (2010-2013). "Ανακαλύφθηκε στο Ακρωτήρι το σημαντικότερο στην Κύπρο πρωτοβυζαντινό μνημείο." Η φωνή Λεμεσού, <http://www.foni-lemesos.com/topika/eidiseis/7259-anakalyfthike-sto-akrotiri-to-simantikotero-stin-kypro-protovyzantino-mnimeio.html> (Γεν. 4, 2013).

Κέντρο ψηφιοποίησης πολιτιστικού αποθέματος. (2006-2008). "Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι." Digitech III-2, <http://www.ipet.gr/digitech2/index.php?option=com_content&task=view&id=73&Itemid=54> (Γεν. 10, 2013).

Land systems dynamics. (2010). "Τοπογραφία Γεωδαισία." < http://www.lesd.gr/land> (Γεν. 10, 2013).

Υσμα. (2011). " Υπηρεσία συντήρησης μνημείων Ακρόπολης." < http://www.ysma.gr > (Γεν. 10, 2013).

Κέντρο ψηφιοποίησης πολιτιστικού αποθέματος. (2006-2008). "Τοπογραφικές μέθοδοι." Digitech III-2, <http://www.ipet.gr/digitech2/index.php?option=com_content&task=view&id=72&Itemid=54 > (Γεν. 10, 2013).

Γεωργόπουλος, Α. (2011). "Συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας – Επίγειοι σαρωτές laser." Αποτυπώσεις Μνημείων, <http://ecourses.dbnet.ntua.gr/el/apotypvseis_mnhmeivn/dialejeis/syllogi_trisdiasaths_plhroforias_-_epigeioi_sarvtes_laser.html> (Γεν. 15, 2013).

Geomatics. (2012). " Αεροφωτογραφίες ."< http://www.geomatics.gr> (Γεν.15, 2013).

Geomatics. (2012). " Ψηφιακές Ορθοφωτογραφίες – Ορθοφωτοχάρτες – OrthoHELLAS ." < http://www.geoserver.gr> (Γεν.15, 2013).

Land systems dynamics. (2010). " Ορθοφωτογραφίες/Ορθοφωτοχάρτες ." < http://www.lesd.gr/land> (Γεν. 15, 2013).

Parrot company. (2009-2013). "swinglet CAM " SenseFly, <http://www.sensefly.com/products/swinglet-cam> (Γεν. 29, 2013).

Wikipedia. (2013). "Bundle Adjustment."<http://en.wikipedia.org/wiki/**Bundle_adjustment**> (Απρίλης. 11, 2013).