



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας - Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΗΜΙ-ΚΑΘΟΛΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ
ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΚΑΙ
ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ**

Διπλωματική Εργασία
Κύρκου Αθανασία

Επιβλέπων Καθηγητής: Χαράλαμπος Ιωαννίδης, Αν.Καθ.ΕΜΠ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Γεωργόπουλος Ανδρέας, Καθηγητής ΕΜΠ
Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Καρράς Γιώργος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

© 2015 Α. Κύρκου (Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή του υλικού του κειμένου, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτού, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνετέλεσαν στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Χαράλαμπο Ιωαννίδη, για το ενδιαφέρον και την υπομονή που επέδειξε, καθώς και για τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, Ευάγγελο Μαλτέζο, για την πρακτική βοήθεια του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα, ακόμη, να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους, στους οποίους οφείλω αυτό που είμαι σήμερα, στην οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, ηθική και πρακτική όλα αυτά τα χρόνια, για το ήθος και τις αρχές που μου δίδαξαν, καθώς και τις φίλες μου, Ελένη Κουτή, Μαρία Κακογιάννου, Αλεξάνδρα Λέλλη, Ιωάννα Χουβαρδά και Μυρτώ Τζαμαλή, για την υπομονή, την κατανόηση και την αγάπη που τόσο απλόχερα μου έδωσαν.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	13
Abstract.....	14
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	15
1.1. Επιτολική γεωμετρία και επιτολική επανασύσταση εικόνων	15
1.2. Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων	19
1.3. Πυκνή συνταύτιση σημείων - Στέρεο συνταύτιση	21
1.4. Παράγοντες που δυσχεραίνουν τη διαδικασία της συνταύτισης.....	24
1.5. Δεσμεύσεις	25
1.6. Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης	26
1.6.1. Τοπικός Αλγόριθμος (Local Algorithm).....	26
1.6.2. Καθολικός Αλγόριθμος (Global Algorithm)	26
1.7. Μέθοδοι υπολογισμού κόστους συσχέτισης	27
1.8. Επιλογή παραθύρου αναζήτησης.....	28
1.9. Ημι-καθολική μέθοδος συνταύτισης (Semi Global Matching-SGM).....	30
1.9.1. Συνάρτηση StereoSGBM (Semi Global Algorithm)	32
1.9.2. Παράμετροι αλγορίθμου SGM	33
2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	35
2.1. Στόχοι.....	35
2.2. Δεδομένα και χαρακτηριστικά τους.....	35
2.3. Προεργασία και προγραμματισμός μετρήσεων	37
2.4. Μετρήσεις.....	39
2.5. Επίλυση αεροτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση.....	42
2.6. Επιτολική επανασύσταση εικόνων	47
2.7. Παραγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης.....	51
2.8. Επιλογή περιοχής εργασίας.....	53
2.9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με διαφοροποίηση των τιμών των παραμέτρων.....	56
2.10. Συγκριτική θεώρηση αποτελεσμάτων αλγορίθμου στις διάφορες περιοχές.....	57
2.11. Δυσκολίες διαδικασίας συνταύτισης – Αστοχίες αλγορίθμου	58

2.12. Ποιότητα ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από πυκνή συνταύτιση σημείων	60
2.13. 3D ανακατασκευή – Γεωαναφορά	62
2.14. Προετοιμασία DTM για παραγωγή ορθοεικόνας	66
2.15. Σύνταξη ορθοεικόνας	68
2.16. Έλεγχος ποιότητας ορθοεικόνας	72
2.17. Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης (Median filter)	75
2.18. Ένωση πινάκων ψηφιακής παράλλαξης – ICP.....	78
3. ΕΛΕΓΧΟΙ	83
3.1. Έλεγχοι και σύγκριση με άλλα προϊόντα.....	83
3.2. Σύγκριση ορθοεικόνας από πυκνή συνταύτιση με ορθοφωτογραφία Κτηματολογίου ...	83
3.3. Έλεγχοι με προϊόντα σάρωσης από το σύστημα LIDAR	85
3.4. Αλλαγή συστήματος αναφοράς.....	85
3.5. Προσδιορισμός της αποχής του γεωειδούς.....	86
3.6. Παραγωγή ορθοεικόνων με χρήση του DSM των δεδομένων σάρωσης με LIDAR	87
3.7. Οριζοντιογραφικός έλεγχος ορθοεικόνας με DSM από LIDAR	89
3.8. Σύγκριση μεταξύ των ορθοεικόνων με DSM από πυκνή συνταύτιση και LIDAR	91
3.9. Σύγκριση μοντέλου αναγλύφου από πυκνή συνταύτιση με το αντίστοιχο από LIDAR....	92
3.9.1. Ποιοτικός έλεγχος.....	93
3.9.2. Ποσοτικός έλεγχος.....	95
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	107

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1:	Επιπολική γεωμετρία.....	16
Εικόνα 1.2:	Ζεύγος εικόνων πριν και μετά την επιπολική επανασύσταση ($B_y=B_z=0$).....	17
Εικόνα 1.3:	Αριστερή και δεξιά εικόνα ζεύγους επιπολικών εικόνων. Περιορισμός αναζήτησης ομολογιών κατά μήκος της επιπολικής ευθείας στη δεξιά εικόνα.....	19
Εικόνα 1.4:	Παράθυρα αναφοράς και αναζήτησης.....	21
Εικόνα 1.5.α:	Αριστερή εικόνα στερεοζεύγους.....	22
Εικόνα 1.5.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης	22
Εικόνα 1.6.α:	Περιοχές αποκρύψεων λόγω διαφορετικής θέσης λήψης στις δυο εικόνες του στερεοζεύγους.....	23
Εικόνα 1.6.β:	Μαύρες περιοχές υποδηλώνουν κενά στον πίνακα ψηφιακής παράλλαξης, λόγω έλλειψης πληροφορίας σε περιοχές με αποκρύψεις	23
Εικόνα 1.7:	Επίδραση μεγέθους ψηφιακού παραθύρου στον παραγόμενο πίνακα ψηφιακής παράλλαξης.....	29
Εικόνα 1.8.α:	Οχτώ ελάχιστες σε κόστος διαδρομές κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης του κόστους συσχέτισης.....	31
Εικόνα 1.8.β:	Δεκαέξι ελάχιστες σε κόστος διαδρομές κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης του κόστους συσχέτισης.....	31
Εικόνα 2.1:	Περιοχή εργασίας στο βόρειο τμήμα της νήσου Μήλου.....	37
Εικόνα 2.2.α:	Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν.....	40
Εικόνα 2.2.β:	Κατανομή φωτοσταθερών στην ορθοφωτογραφία της Κτηματολόγιο Α.Ε.....	40
Εικόνα 2.2.γ:	Εκτέλεση μετρήσεων.....	40
Εικόνα 2.3:	Κατανομή των σημείων που συμμετέχουν στον α/τ. Με μαύρους ρόμβους συμβολίζονται τα κέντρα λήψης, με κόκκινα τρίγωνα τα φωτοσταθερά, και με μαύρα τρίγωνα τα σημεία ελέγχου.....	45
Εικόνα 2.4:	Συνορθωμένο μπλοκ εικόνων στο περιβάλλον του λογισμικού Photomod.....	47
Εικόνα 2.5:	Στερεοζεύγος επιπολικών εικόνων 243-244.....	49
Εικόνα 2.6:	Στερεοζεύγος επιπολικών εικόνων 244-245.....	49
Εικόνα 2.7:	Στερεοζεύγος επιπολικών εικόνων 245-246.....	50
Εικόνα 2.8:	Αρχική εικόνα περιοχής με αμιγώς αστική κάλυψη και πίνακας ψηφιακής	54

	παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 244-245	
Εικόνα 2.9:	Αρχική εικόνα αγροτικής περιοχής και πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 243-244	55
Εικόνα 2.10:	Αρχική εικόνα αγροτικής περιοχής με αραιή δόμηση και πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 243-244.....	55
Εικόνα 2.11.α:	Αρχική εικόνα.....	59
Εικόνα 2.11.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης.....	59
Εικόνα 2.12.α:	Αρχική εικόνα.....	59
Εικόνα 2.12.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης.....	59
Εικόνα 2.12.γ:	Νέφος σημείων.....	59
Εικόνα 2.13.α:	Αρχική εικόνα.....	60
Εικόνα 2.13.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης.....	60
Εικόνα 2.14.α:	Αρχική εικόνα.....	60
Εικόνα 2.14.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης.....	60
Εικόνα 2.15.α:	Αρχική εικόνα.....	63
Εικόνα 2.15.β:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης.....	64
Εικόνα 2.15.γ:	Νέφος σημείων κατόπιν ανακατασκευής του πίνακα ψηφιακής παράλλαξης, στα άκρα του οποίου εντοπίζονται outliers	64
Εικόνα 2.16:	Ψηφιακό μοντέλο όπως προέκυψε μετά από rasterization του γεωαναφερμένου νέφους από πυκνή συνταύτιση και αντίστοιχες ορθοεικόνες για (α) την αστική περιοχή, (δ) την αγροτική περιοχή και (ε) την αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση, τμήμα ορθοεικόνας της αστικής περιοχής όπου (β) το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, (δ) εντοπίστηκαν προβλήματα.....	70
Εικόνα 2.17:	Αρχική και ανηγμένη εικόνα για τμήμα της αστικής περιοχής, όπου παρατηρήθηκαν έντονες παραμορφώσεις.....	71
Εικόνα 2.18:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (α) αρχικός (β) με εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής 9x9.....	76
Εικόνα 2.19.α:	Αρχική εικόνα	77
Εικόνα 2.19.β:	Αρχικός πίνακας ψηφιακής παράλλαξης	77
Εικόνα 2.19.γ:	Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης με εφαρμογή φίλτρου 9x9.....	77

Εικόνα 2.19.δ:	Νέφος σημείων	77
Εικόνα 2.20:	Ορθοφωτογραφία που προέκυψε από τον πίνακα ψηφιακής παράλλαξης (α) χωρίς φίλτρο (β) με φίλτρο.....	78
Εικόνα 2.21:	Συνενωμένο μοντέλο περιοχής εργασίας	79
Εικόνα 2.22:	Λάθη κατά τη συνένωση των μοντέλων (α), (β) κακή ευθυγράμμιση, (γ) διπλά αντικείμενα.....	80
Εικόνα 3.1.α:	Ορθοφωτογραφία Κτηματολογίου.....	84
Εικόνα 3.1.β:	Θέσεις σημείων ελέγχου.....	84
Εικόνα 3.2:	Ορθοεικόνα αστικής περιοχής με DSM (α) από πυκνή συνταύτιση (β) από LIDAR, (γ) τμήμα αρχικής εικόνας αστικής περιοχής, τμήμα αντίστοιχης ορθοεικόνας με DSM (δ) από πυκνή συνταύτιση (ε) από LIDAR.....	88
Εικόνα 3.3:	Ορθοεικόνα αγροτικής περιοχής με DSM (α) από πυκνή συνταύτιση (β) από LIDAR.....	89
Εικόνα 3.4:	Μοντέλο αναγλύφου (α), (γ) από πυκνή συνταύτιση, (β), (δ) από LIDAR.....	94
Εικόνα 3.5:	Τμήμα (α) αρχικής εικόνας, και ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από (β) πυκνή συνταύτιση, (γ) από LIDAR.....	95
Εικόνα 3.6:	Προσδιορισμός απόκλισης μοντέλων για την αγροτική περιοχή.....	96
Εικόνα 3.7:	Προσδιορισμός απόκλισης μοντέλων για την αστική περιοχή.....	97

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1:	Χαρακτηριστικά ψηφιακής φωτομηχανής Leica RCD105.....	36
Πίνακας 2.2:	Συντεταγμένες μετρηθέντων σημείων.....	41
Πίνακας 2.3:	Εσωτερικός προσανατολισμός μηχανής, πριν και μετά την αυτοβαθμονόμηση.....	43
Πίνακας 2.4:	Σφάλματα φωτοσταθερών κατά την αυτοβαθμονόμηση.....	44
Πίνακας 2.5:	Εξωτερικοί προσανατολισμοί εικόνων.....	45
Πίνακας 2.6:	Σφάλματα φωτοσταθερών κατά την τελική επίλυση του αεροτριγωνισμού.....	46
Πίνακας 2.7:	Αποτελέσματα ελέγχου εικονοσυντεταγμένων ομόλογων σημείων μετά την επιπολική επανασύσταση των εικόνων	51
Πίνακας 2.8:	Τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση.....	56
Πίνακας 2.9:	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα όπως υπολογίστηκε για το μετασχηματισμό κάθε περιοχής.....	65
Πίνακας 2.10:	Τιμές παραμέτρων μετασχηματισμού και τυπικά σφάλματα.....	66
Πίνακας 2.11:	Βήμα DTM για τις τρεις περιοχές για τις οποίες θα παραχθεί ορθοφωτογραφία.....	67
Πίνακας 2.12:	Εκτίμηση οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών.....	74
Πίνακας 3.1:	Έλεγχος οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ της ορθοεικόνας, που δημιουργήθηκε με χρήση του μοντέλου από πυκνή συνταύτιση και της αντίστοιχης από την ΕΚΧΑ Α.Ε.	84
Πίνακας 3.2:	Προσδιορισμός αποχής γεωειδούς με χρήση των επίγειων μετρήσεων.....	86
Πίνακας 3.3:	Εκτίμηση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών από DSM/LIDAR για την αγροτική και την αστική περιοχή	90
Πίνακας 3.4:	Ποσοτικοποίηση οριζοντιογραφικής απόκλισης των ορθοφωτογραφιών με DSM από LIDAR και DSM από πυκνή συνταύτιση.....	92
Πίνακας 3.5:	Αποτελέσματα ICP για τις δυο περιοχές.....	95
Πίνακας 3.6:	Αποτελέσματα C2C για τις δυο περιοχές	97

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της ημι-καθολικής μεθόδου πυκνής συνταύτισης σημείων για την εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου και ορθοεικόνας.

Αναπτύσσονται οι βασικές αρχές της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης με εφαρμογή του ημικαθολικού αλγορίθμου (SGBM-Semi Global Algorithm), περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού του κόστους συσχέτισης (βαθμού ομοιότητας μεταξύ των εικονοψηφίδων της εικόνας αναφοράς και αναζήτησης) που χρησιμοποιεί, και οι βασικές παράμετροι του αλγορίθμου. Ακόμη, γίνεται εκτίμηση των αποτελεσμάτων με διαφοροποίηση των τιμών των εν λόγω παραμέτρων, και αξιολόγηση των προϊόντων της εφαρμογής της τεχνικής σε ζεύγη αεροφωτογραφιών για την περιοχή της Μήλου. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος και συγκριτική θεώρηση των προϊόντων της εφαρμογής με ανάλογα προϊόντα από σάρωση με Lidar.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι να επισημάνει μέσω της εφαρμογής που πραγματοποιήθηκε, τη χρησιμότητα της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης σημείων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου, τόσο από άποψη οικονομίας χρόνου, οικονομικών και τεχνικών πόρων, όσο και λόγω της δυνατότητας συλλογής πολύ πιο πυκνής πληροφορίας σε σχέση με τις κλασικές φωτογραμμετρικές μεθόδους.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της πυκνής συνταύτισης σημείων και μια πιο ειδική αναφορά στις μεθόδους και τεχνικές που εφαρμόστηκαν για τις ανάγκες εκπόνησης της παρούσης εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, που αφορά την πρακτική εφαρμογή της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης, γίνεται αναφορά στην περιοχή εργασίας, στα δεδομένα, στις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν και στις τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή των τελικών προϊόντων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια σειρά ελέγχων των προϊόντων της εφαρμογής και σύγκρισής τους με αντίστοιχα προϊόντα, με στόχο την αξιολόγηση της τεχνικής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, διατυπώνονται κάποιες γενικές παρατηρήσεις, και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μέσα από την πρακτική εφαρμογή της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης, καθώς και κάποιες προτάσεις

Abstract

The present diploma thesis aims in the investigation of the semi global method of dense image matching in order to extract a digital relief model and an ortho-image.

The basic principles of the dense matching technique using the semi global algorithm is being analyzed, along with the calculation method of correlation cost (similarity degree among the pixels of the reference and the match image). The assessment of the results take place differentiating the values of the parameters of the algorithm along with the evaluation of the products of the application of the technique of pairing the aerial images taken in the Greek island of Milos. Finally, the products from this application are checked and compared to similar results from the scanning with Lidar.

The aim of this thesis is to highlight the importance of this technique of dense image matching, in order to create the digital relief model, regarding time, expenses, and resources, not to mention the chance of collecting really dense information in contrast with the rest of the photogrammetric methods.

In the first chapter, there is an introduction to the literature regarding the dense image matching. The techniques and methods applied in the present thesis are analyzed.

The second chapter aims in analyzing the application of the technique of dense matching. The study area, the data and the whole procedure that was followed in order to create the final products are described.

The third chapter deals with the checking of the final products, the comparison with similar products and the evaluation of this technique.

The final results, along with some general observations and conclusions and future suggestions are described in the fourth chapter.

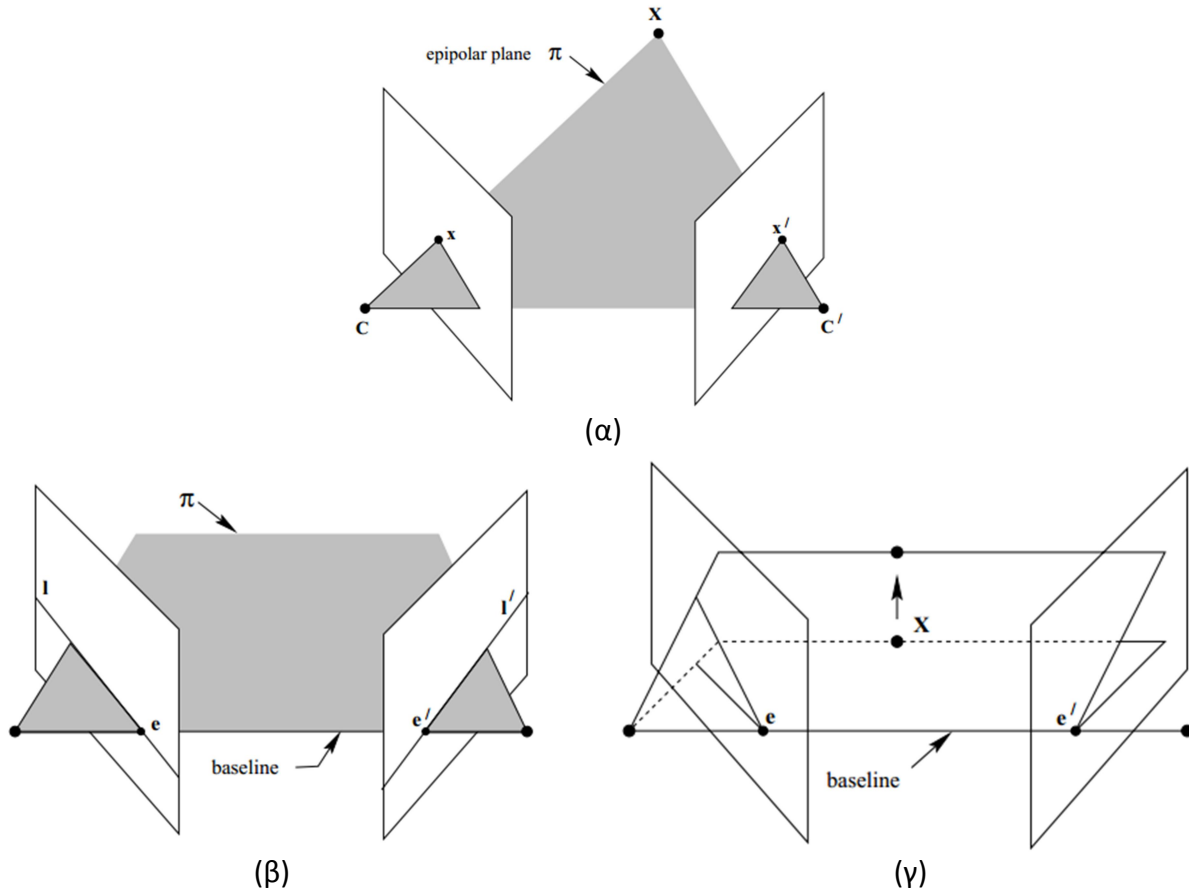
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1. Επιπολική γεωμετρία και επιπολική επανασύσταση εικόνων

Η έννοια της επιπολικής γεωμετρίας περιγράφει την προβολική γεωμετρική σχέση που ενυπάρχει μεταξύ δυο εικόνων (Hartley & Zisserman, 2003). Η χρησιμότητά της σε διαδικασίες αυτοματισμού, έγκειται στη βασική ιδιότητά των επιπολικών εικόνων, δηλαδή στον περιορισμό της περιοχής αναζήτησης ομολογιών κατά μήκος των επιπολικών ευθειών, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία συνταύτισης μεταξύ των εικόνων.

Οι γεωμετρικές οντότητες που ορίζουν την επιπολική γεωμετρία είναι οι εξής (Εικόνα 1.1):

- **Επιπολικό επίπεδο (π):** Είναι το επίπεδο που περιλαμβάνει τα προβολικά κέντρα των δυο εικόνων (C, C' που ορίζουν τη βάση λήψης), το εκάστοτε σημείο (X) του 3D χώρου, καθώς και τις προβολές του (x, x') στις δυο εικόνες (Εικόνα 1.1(α)). Καθώς οι ομόλογες ακτίνες τέμνονται στα διάφορα σημεία του χώρου, τα επιπολικά επίπεδα ορίζουν αξονική δέσμη επιπέδων περί της βάση λήψης (Εικόνα 1.1(γ)).
- **Επιπολικές ευθείες (l, l'):** Είναι τα ίχνη των επιπολικών επιπέδων στα επίπεδα των εικόνων (Εικόνα 1.1(β)). Οι προβολές x και x' στις εικόνες του σημείου X του χώρου κείνται επί των ομόλογων επιπολικών ευθειών. Συνεπώς το ομόλογο σημείο ενός εικονοσημείου κείται απαραίτητως στην επιπολική ευθεία της άλλης εικόνας του στερεοζεύγους. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί μία ισχυρή δέσμευση, μειώνοντας σημαντικά τις πιθανές θέσεις, κατά την αναζήτηση ομολογιών.
- **Πόλοι (e, e'):** Υλοποιούνται από την τομή της βάσης λήψης με τα επίπεδα των εικόνων (Εικόνα 1.1(β)). Επιπλέον, αποτελούν τα σημεία σύγκλισης των επιπολικών ευθειών σε κάθε εικόνα του στερεοζεύγους (Εικόνα 1.1(γ)). Κατ' αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται επί των εικόνων δύο ομόλογες επίπεδες δέσμες επιπολικών ευθειών με κορυφές τους πόλους.



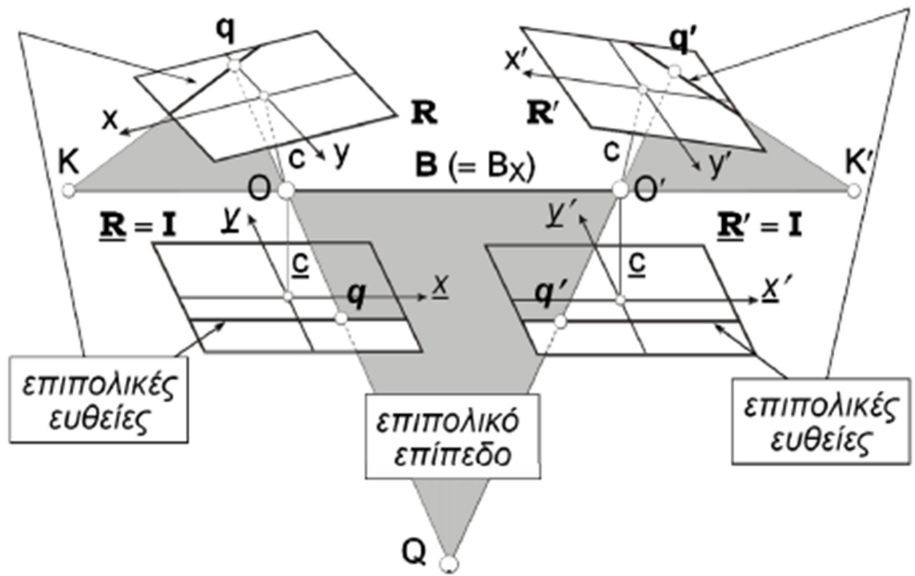
Εικόνα 1.1: Επιπολική γεωμετρία (Hartley & Zisserman, 2003)

Κατά τη στιγμή της λήψης οι εικόνες (και συγκεκριμένα τα συστήματα αναφοράς τους xy και $x'y'$) βρίσκονται εν γένει σε τυχαία θέση ως προς τη βάση του ζεύγους, πράγμα που ισχύει συνεπώς και για τη θέση και τον προσανατολισμό των επιπολικών ευθειών. Ζητούμενο κατά τη διαδικασία επιπολικής επανασύστασης του στερεοζεύγους είναι ακριβώς η δημιουργία ζεύγους εικόνων (από τα ίδια σημεία λήψης) οι οποίες θα είναι συνεπίπεδες, και επιπλέον οι ομόλογες επιπολικές γραμμές θα είναι συνευθειακές και θα συμπίπτουν με τις γραμμές της ψηφιακής εικόνας (Θεοφάνους, 2004).

Για τη διαδικασία μετασχηματισμού των εικόνων σε επιπολικές απαιτείται η γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, καθώς και του εξωτερικού προσανατολισμού τους ή, ισοδύναμα, του σχετικού προσανατολισμού του ζεύγους, ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει τον “εξωτερικό προσανατολισμό” της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής με άγνωστη τιμή μετάθεσης (άγνωστη κλίμακα μοντέλου).

Με τον τρόπο αυτό, οι εικόνες μετασχηματίζονται στο σύστημα της βάσης τους. Κατά συνέπεια οι πίνακες στροφής των νέων εικόνων είναι μοναδιαίοι ($R = R' = I$), ως προς το σύστημα

αναφοράς του εξωτερικού τους προσανατολισμού (ή αντίστοιχα του σχετικού τους προσανατολισμού), οι άξονες λήψης είναι παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι στη βάση του ζεύγους, η οποία είναι παράλληλη στον άξονα X του συστήματος. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται “κανονικοποίηση στερεοζεύγους” (Φλωρίδη, 2013). Στην Εικόνα 1.2 φαίνεται η τυχαία θέση δύο εικόνων κατά τη στιγμή της λήψης και η θέση τους μετά από τη διαδικασία της κανονικοποίησης, για την απλή περίπτωση όπου οι κατά Y και Z συνιστώσες της βάσης λήψης είναι μηδενικές ($B_y=B_z=0$), συνεπώς ισχύει εξαρχής $B=B_x$.



Εικόνα 1.2: Ζεύγος εικόνων πριν και μετά την επιπολική επανασύσταση ($B_y=B_z=0$) (Καρράς, διαφάνειες Φωτογραμμετρίας III)

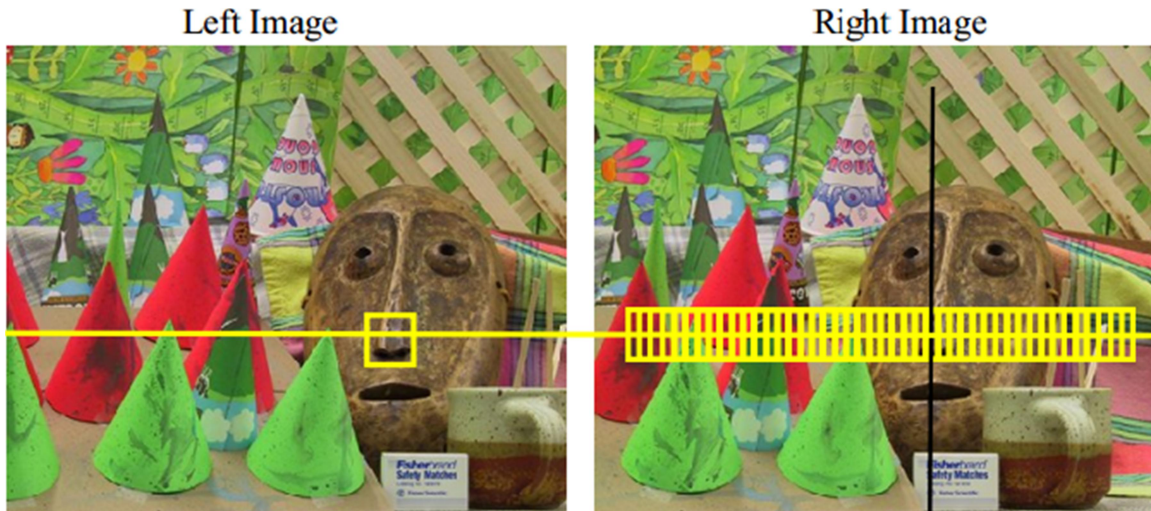
Τα στάδια που εκτελούνται κατά την κανονικοποίηση των εικόνων συνοψίζονται παρακάτω:

- Στροφή των εικόνων (κατά τον ανάστροφο πίνακα στροφής τους R^T , R'^T αντίστοιχα) προκειμένου να αποκτήσουν μοναδιαίο πίνακα στροφής στο σύστημα του εξωτερικού ή του σχετικού προσανατολισμού (άρα στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών να γίνουν αυστηρά κατακόρυφες και με ίδιο αξιμουθιακό προσανατολισμό, δηλαδή $\omega=\phi=\kappa=0$)
- Υπολογισμός του πίνακα στροφής της βάσης στο χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς (R_B), βάσει του οποίου μετασχηματίζεται κάθε εικόνα στο σύστημα της βάσης λήψης ($R_{N1}=R_B R_1^T$ και $R_{N2}=R_B R_2^T$). Σημειωτέον ότι, σε περίπτωση που η επιπολική επανασύσταση πραγματοποιείται μέσω του σχετικού προσανατολισμού του ζεύγους, το σύστημα των αρχικών εικόνων ταυτίζεται, συνήθως, με το σύστημα της αριστερής εικόνας. Συνεπώς, ο αρχικός πίνακας στροφής της αριστερής εικόνας είναι μοναδιαίος

($R_1=I$) και άρα ισχύει $R_{N1}=R_B$ και $R_{N2}=R_B R^T$, όπου R ο πίνακας του σχετικού προσανατολισμού.

- Ορισμός των διαστάσεων των νέων εικόνων, μέσω προσδιορισμού της θέσης των άκρων τους. Με βάση τις συντεταγμένες των άκρων της αρχικής εικόνας η συνθήκη συγγραμμικότητας επιτρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των άκρων της κανονικοποιημένης εικόνας.
- Προσδιορισμός θέσης πρωτεύοντος σημείου στη νέα εικόνα, που ουσιαστικά είναι η προβολή του ναδέρ της αρχικής εικόνας στο σύστημα της βάσης.
- Ο μετασχηματισμός των εικονοσυντεταγμένων της αρχικής εικόνας σε εκείνες της κανονικοποιημένης (και το αντίστροφο), είναι ουσιαστικά ένας 2D προβολικός μετασχηματισμός μέσω της συνθήκης συγγραμμικότητας, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση συνδέει το σύστημα της αρχικής εικόνας με το σύστημα της κανονικοποιημένης. Σημειώνεται ότι, για να αποφευχθεί τυχόν απώλεια πληροφορίας (εικονοστοιχείων) της αρχικής εικόνας, κατά τον μετασχηματισμό των εικονοσυντεταγμένων, επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή για τη σταθερά της μηχανής σε σχέση με την αρχική, ενώ το μέγεθος της εικονοψηφίδας της κανονικοποιημένης εικόνας είναι το ίδιο με της αρχικής (Kraus, 2010).
- Επειδή τα εικονοστοιχεία των κανονικοποιημένων εικόνων δεν αντιστοιχούν σε ακέραιες θέσεις των αρχικών εικόνων, πραγματοποιείται παρεμβολή για την κάλυψη των κενών που δημιουργούνται στις νέες εικόνες. Με βάση, λοιπόν, τις συντεταγμένες κάθε εικονοστοιχείου της κανονικοποιημένης εικόνας, υπολογίζεται η αντίστοιχη ζητούμενη θέση του στην αρχική (αντίστροφη συνθήκη συγγραμμικότητας), όπου εκτελείται διγραμμική παρεμβολή σε μια γειτονιά εικονοστοιχείων για την απόδοση του χρώματος (ή του τόνου του γκρίζου).

Με την επανασύσταση των εικόνων, εξασφαλίζεται η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης, ενώ διευκολύνεται σημαντικά, κατά συνέπεια, και η αυτόματη αναζήτηση ομόλογων σημείων (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Αριστερή και δεξιά εικόνα ζεύγους επιπολικών εικόνων. Περιορισμός αναζήτησης ομολογιών κατά μήκος της επιπολικής ευθείας στη δεξιά εικόνα (<http://www.cse.psu.edu/>)

Κατά τις διαδικασίες λοιπόν της επιφανειακής συνταύτισης ή και της συνταύτισης χαρακτηριστικών, το παράθυρο αναζήτησης αποτελείται από ορισμένες στήλες στην κατά x διάσταση και θεωρητικά θα μπορούσε να αποτελείται μόνο από μια γραμμή κατά τη διάσταση y . Το πρόβλημα δηλαδή ανάγεται σε 1D ανίχνευση με παράλληλη ελάττωση σφαλμάτων, υπολογισμών και χρόνου. Στην πράξη, βέβαια, χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια γραμμές, γιατί τα εναπομένοτα σφάλματα του σχετικού προσανατολισμού δεν επιτρέπουν την εξάλειψη της παράλλαξης κατά τη διεύθυνση y (Αδάμ, 2011).

1.2. Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων

Το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας μπορεί να οριστεί απλά ως η αυτόματη εύρεση, ομολογιών μεταξύ δύο ή περισσότερων επικαλυπτομένων εικόνων (Πρόκος, Καρράς, 2008). Η εν λόγω μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως στη ψηφιακή φωτογραμμετρία και συμβάλλει καθοριστικά στον αυτοματισμό των διαδικασιών της (Γεωργόπουλος, 1998). Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Βαθμονόμηση των δεκτών μέσω αυτόματου εντοπισμού και μέτρησης φυσικών ή προσημασμένων στόχων του πεδίου ελέγχου
- Εσωτερικός προσανατολισμός με αυτόματο εντοπισμό εικονοσημάτων
- Σχετικός προσανατολισμός με αυτόματο εντοπισμό ομόλογων σημείων
- Αεροτριγωνισμός με αυτόματο εντοπισμό φωτοσταθερών (ειδικά όταν είναι προσημασμένα) και σημείων σύνδεσης

- Εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου με αυτόματο προσδιορισμό γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων του
- Φωτογραμμετρική απόδοση με αυτόματο εντοπισμό των διαφόρων χαρακτηριστικών αλλά ακόμη και την αναγνώρισή τους.

Για την υλοποίηση αυτών των αυτόματων διαδικασιών οι μέθοδοι συνταύτισης που χρησιμοποιούνται είναι:

- **επιφανειακή συνταύτιση** (σύγκριση μεταξύ παραθύρων - υποπεριοχών των εικόνων),
- **συνταύτιση χαρακτηριστικών** (γίνεται καταρχάς εξαγωγή χαρακτηριστικών οντοτήτων από τις εικόνες, πχ. σημείων, γραμμών, ακμών κ.α., και εν συνεχεία γίνεται προσπάθεια συνταύτισης αυτών των χαρακτηριστικών)
- **σχεσιακή συνταύτιση** (περίπτωση συνταύτισης με βάση τις τοπολογικές σχέσεις των χαρακτηριστικών).

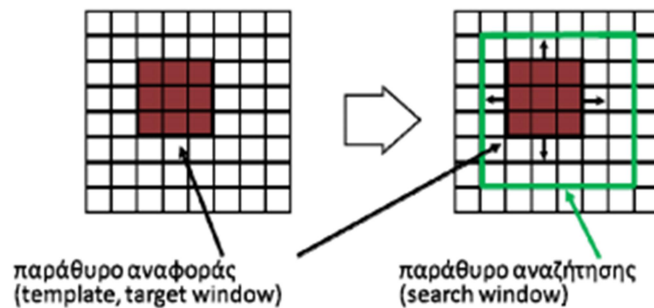
Το πρόβλημα της συνταύτισης υπάγεται στην κατηγορία των «αντίστροφων» προβλημάτων (2D → 3D) που είναι ελλιπώς ορισμένα (ill-posed). Ένα πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως ελλιπώς ορισμένο (Heipke, 1992) όταν ενδέχεται να μην έχει:

- λύση (στην προκειμένη περίπτωση πχ. λόγω αποκρύψεων)
- μοναδική λύση (πχ. λόγω επαναλαμβανόμενων προτύπων)
- σταθερή λύση για μικρές μεταβολές των δεδομένων (πχ. λόγω απουσίας υψής στην εικόνα, ικανής να προσδώσει σταθερότητα στη λύση (Καρφής, 2009).

Η εκάστοτε εικονοψηφίδα περιέχει ως πληροφορία μόνο την ψηφιακή τιμή της (τόνος του γκρι). Η πληροφορία αυτή δεν είναι επαρκής ως πρότυπο αναζήτησης, αφενός διότι η ίδια τιμή ενδέχεται να εντοπίζεται σε περισσότερες εικονοψηφίδες, αφετέρου διότι λόγω της διαφορετικής θέσης λήψης των δύο εικόνων το ίδιο σημείο του αντικειμένου δεν δίνει ίδια ένταση σήματος στις δύο εικόνες. Για το λόγο αυτό, ως πρότυπο συνταύτισης επιλέγεται ένα σύνολο γειτονικών σε αυτό εικονοψηφίδων που αποτελεί ένα παράθυρο προς συνταύτιση. Το ζητούμενο είναι επομένως ο εντοπισμός του αντίστοιχου παραθύρου στη δεύτερη εικόνα, εφόσον υπάρχει (Καρφής, 2009).

Οι οντότητες που συγκρίνονται είναι οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων σε παράθυρα ίδιου μεγέθους στις εικόνες του στερεοζεύγους. Το πρότυπο παράθυρο ή παράθυρο αναφοράς βρίσκεται στην πρώτη εικόνα και περικλείει το σημείο του οποίου το ομόλογο αναζητείται στη δεύτερη εικόνα. Το δεύτερο παράθυρο ή παράθυρο σύγκρισης, κινείται μέσα

σε μία ευρύτερη περιοχή αναζήτησης της δεύτερης εικόνας (Εικόνα 1.4), και σε κάθε θέση που καταλαμβάνει υπολογίζεται η τιμή ενός μέτρου ομοιότητας με το παράθυρο αναφοράς της πρώτης εικόνας. Βάσει των τιμών που υπολογίζονται σε όλες τις πιθανές θέσεις του παραθύρου μέσα στην περιοχή αναζήτησης, επιλέγεται τελικά το παράθυρο που αντιπροσωπεύει καλύτερα το ομόλογο του προτύπου, εκείνο δηλαδή, που παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιότητα. Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται με τον ορισμό μιας συνάρτησης κόστους, η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή της οποίας υποδεικνύει την πιθανότερη θέση του ομόλογου προτύπου.



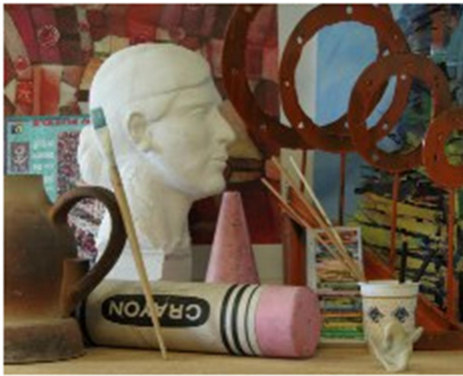
Εικόνα 1.4 : Παράθυρα αναφοράς και αναζήτησης (Φλωρίδη, 2013)

1.3. Πυκνή συνταύτιση σημείων - Στέρεο συνταύτιση

Η πυκνή συνταύτιση σημείων (dense matching) είναι μία γενίκευση της διαδικασίας συνταύτισης εικόνας, ώστε να βρίσκονται ομολογίες όχι απλώς για διακριτά σημεία ενδιαφέροντος ή «πρόσφορα» σημεία, αλλά για όλα τα σημεία της εικόνας (δηλαδή για όλες τις εικονοψηφίδες). Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθετο, δίνει όμως την δυνατότητα, και μάλιστα με πολύ χαμηλό κόστος (ουσιαστικά το κόστος μιας φωτογραφικής μηχανής), να προσδιορίζεται πυκνή 3D πληροφορία από τις επικαλυπτόμενες περιοχές των εικόνων. (Πρόκος, 2012).

Το προϊόν της πυκνής συνταύτισης σημείων, είναι ένας πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (disparity map), ο οποίος εμπεριέχει οπτικοποιημένη (σε μια κλίμακα των τόνων του γκριζου) την κατά x συνιστώσα της ψηφιακής παράλλαξης κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας αναφοράς (αριστερή εικόνα του στερεοζεύγους). Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα εικονοστοιχεία του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης μεταφέρουν την πληροφορία της τρίτης διάστασης των σημείων του χώρου (στην ουσία την απόσταση φακού αντικειμένου), που απεικονίζονται στην αριστερή εικόνα του στερεοζεύγους (Εικόνα 1.5). Στην στέρεο συνταύτιση εικόνας ο πίνακας ψηφιακής παράλλαξης προκύπτει από τουλάχιστον δύο εικόνες, την εικόνα αναφοράς και την εικόνα αναζήτησης (Μαλτέζος, 2013).

Σημειώνεται ότι, δεδομένου ότι η παράλλαξη είναι συνάρτηση του βάθους, και μάλιστα τα μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα, όσο πιο μικρή είναι η απόσταση φακού αντικειμένου, τόσο πιο μεγάλη η παράλλαξη και το αντίστροφο. Κατά συνέπεια αντικείμενα που βρίσκονται πιο κοντά στο φακό, απεικονίζονται με πιο υψηλούς τόνους του γκρι στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.



(α)



(β)

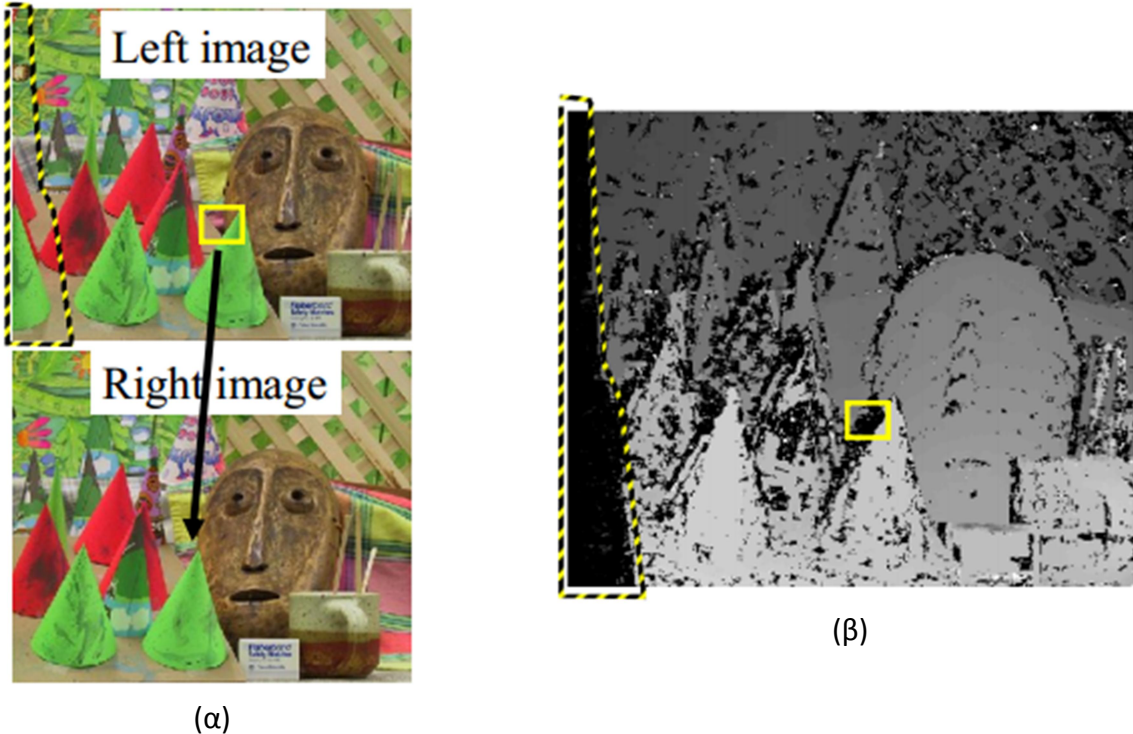
Εικόνα 1.5: (α) Αριστερή εικόνα στερεοζεύγους (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (<http://vision.middlebury.edu/stereo>)

Για την εκτέλεση της στέρεο συνταύτισης έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι. Τα τέσσερα βασικά βήματα που δομούν μεγάλο ποσοστό των αλγορίθμων αυτών, έχουν διατυπωθεί ως εξής (Scharstein, Szeliski, 2002):

1. Υπολογισμός του κόστους συσχέτισης. Συνιστά το μέτρο του βαθμού ομοιότητας μεταξύ του εκάστοτε εικονοστοιχείου της εικόνας αναφοράς και του κάθε πιθανού ομόλογού του στην εικόνα αναζήτησης.
2. Συσσωμάτωση κοστών συσχέτισης. Υπολογισμός του αθροίσματος των επιμέρους τιμών κόστους συσχέτισης που υπολογίζονται για κάθε εικονοψηφίδα εντός μιας ορισμένης περιοχής υποστήριξης (παράθυρο) της εικόνας αναφοράς, με την υπόθεση ότι αναφέρονται στην ίδια παράλλαξη με την κεντρική εικονοψηφίδα του εν λόγω παραθύρου.
3. Υπολογισμός ψηφιακής παράλλαξης. Προσδιορισμός της βέλτιστης ψηφιακής παράλλαξης που σχετίζεται είτε με το ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης είτε με τη συνάρτηση ενέργειας που ελαχιστοποιεί, και συμπλήρωση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.
4. Βελτιστοποίηση ψηφιακής παράλλαξης, ώστε να απαλειφθούν εναπομείναντα σφάλματα στον χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

Σημειωτέον ότι στην πράξη ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού του κόστους συσχέτισης και τον αλγόριθμο συσχέτισης που χρησιμοποιούνται, καθορίζεται και η ακολουθία των παραπάνω βημάτων, ενώ ενδέχεται κάποια εξ αυτών να παραλείπονται.

Είναι προφανές ότι αναγκαία προϋπόθεση για την συνταύτιση ομόλογων σημείων είναι η εμφάνιση του υπό εξέταση σημείου και στις δύο εικόνες (αναφοράς και αναζήτησης). Αυτό βέβαια δεν είναι πάντοτε εφικτό, καθώς σε κάθε σκηνή είναι πιθανό να υπάρχουν αποκρύψεις. Ως περιοχές αποκρύψεων στην εικόνα χαρακτηρίζονται ομάδες εικονοψηφίδων, χωρικά συνεκτικές, οι οποίες εμφανίζονται σε μια μόνο από τις δυο εικόνες του ζεύγους (Εικόνα 1.6(α)) και υποδηλώνουν ασυνέχειες βάθους (Εικόνα 1.6(β)). Φυσικά, για τα σημεία που βρίσκονται σε περιοχές αποκρύψεων είναι αδύνατος ο προσδιορισμός συντεταγμένων στο χώρο. Αυτό έχει ως συνέπεια είτε εσφαλμένες αντιστοιχίσεις σημείων και χονδροειδή σφάλματα είτε την παρουσία “κενών” στο 3D μοντέλο του αντικειμένου (Φλωρίδη, 2013).



Εικόνα 1.6: (α) Περιοχές αποκρύψεων λόγω διαφορετικής θέσης λήψης στις δυο εικόνες του στερεοζεύγους (β) Μαύρες περιοχές υποδηλώνουν κενά στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, λόγω έλλειψης πληροφορίας σε περιοχές με αποκρύψεις (<http://vision.middlebury.edu/stereo>)

Μια επιπλέον δυσκολία στη διαδικασία συνταύτισης υφίσταται στα όρια των αντικειμένων. Ως γνωστόν, τα φυσικά όρια των αντικειμένων απεικονίζονται ως απότομες μεταβολές ή ασυνέχειες της έντασης. Στις περιοχές όπου εντοπίζονται ακμές, λοιπόν, οι γειτονικές

εικονοψηφίδες αντιστοιχούν σε δυο διακριτές «γειτονιές» τιμών έντασης, καθώς κάποιες εξ αυτών ανήκουν στο αντικείμενο, ενώ κάποιες άλλες, σε διπλανά τμήματα της σκηνής. Κατά συνέπεια όταν ένα παράθυρο διασχίσει μία ασυνέχεια βάθους, κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του κόστους συσχέτισης, κάποια σημεία θα συνταυτιστούν με σημεία του αντικειμένου στο εμπροσθεν μέρος της σκηνής ενώ τα υπόλοιπα θα συνταυτιστούν με το αντικείμενο στο πίσω μέρος της σκηνής με αποτέλεσμα το τελικό συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης των σημείων κοντά στα όρια των αντικειμένων, να κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών ψηφιακής παράλλαξης. Στις περιοχές αυτές, επομένως, παρατηρείται απότομη μεταβολή της ψηφιακής παράλλαξης, δημιουργώντας ασυνέχειες στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

1.4. Παράγοντες που δυσχεραίνουν τη διαδικασία της συνταύτισης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επιδρούν στη διαδικασία της συνταύτισης, δυσχεραίνοντας την αυτόματη εύρεση ομολογιών, είναι οι εξής:

- Η γεωμετρία της λήψης των εικόνων. Ένα σύνθετο πρόβλημα που δημιουργείται, όταν υπάρχει απότομη μεταβολή του αναγλύφου, είναι οι μεγάλες προοπτικές παραμορφώσεις στην απεικόνιση των αντικειμένων λόγω εκτροπής αναγλύφου που κατ' επέκταση προκαλεί αποκρύψεις. Το πρόβλημα των αποκρύψεων είναι πολύ σημαντικό, καθώς συνεπάγεται απώλεια πληροφορίας και άρα μη δυνατή εύρεση ομολογιών σε εκείνες τις περιοχές.
- Οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις στις εικόνες (θόλωμα, καμένα pixel, θόρυβος, ανακλάσεις, χαμηλή ανάλυση της δειγματοληψίας της εικόνας, κινούμενα αντικείμενα)
- Οι ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων του στερεοζεύγους.
- Η σύνθετη γεωμετρία της σκηνής (έντονο ανάγλυφο με απότομες εναλλαγές, επαναλαμβανόμενα πρότυπα).
- Οι σκιές (λόγω συνθηκών φωτισμού κατά τη λήψη).
- Η έλλειψη υφής (π.χ. υδάτινες επιφάνειες).
- Η βλάστηση κ.α.

Τα παραπάνω προβλήματα που εντοπίζονται στις αρχικές εικόνες, δυσχεραίνουν τη σωστή εφαρμογή των αλγορίθμων συνταύτισης, συνεπάγονται εσφαλμένες συνταυτίσεις και δημιουργούν σφάλματα στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Τα σφάλματα αυτά αποτυπώνονται με τοπικές ασυνέχειες βάθους, αναντιστοιχίες, που δημιουργούν κενά, ακραίες τιμές (peaks), μαύρες περιοχές, και θόρυβο στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Για την εξάλειψη των στιγμάτων και των περιοχών με ακραίες τιμές στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, εφαρμόζεται συνήθως φίλτρο εξομάλυνσης (διαμέσου, μέσου όρου κλπ), το οποίο εξομαλύνει τις εικόνες,

διατηρώντας, ωστόσο, τις ακμές. Επιπλέον, εκτελείται παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών παραλλάξεων για την πλήρωση των κενών στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

1.5. Δεσμεύσεις

Η επιβολή δεσμεύσεων κατά την εφαρμογή πυκνής συνταύτισης σημείων, βελτιώνει και συχνά διευκολύνει τη διαδικασία, συμβάλλοντας στην επίτευξη ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Οι δεσμεύσεις που επιβάλλονται διαφοροποιούνται ανάλογα με τον αλγόριθμο συσχέτισης που χρησιμοποιείται (Μαλτέζος, 2013). Επιπλέον, η χρήση δεσμεύσεων ενδείκνυται για τον εντοπισμό τυχόν αποκρύψεων στις εικόνες (π.χ. δέσμευση αμφίδρομης συμβατότητας, δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων).

Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις δεσμεύσεις που απαντώνται στη βιβλιογραφία (<http://www.isprs.org/>):

- **Δέσμευση επιπολικής γεωμετρίας:** επιβάλλεται σε όλους τους αλγόριθμους καθώς μειώνει σημαντικά τον χρόνο αναζήτησης ομολογιών, εφόσον η διαδικασία αναζήτησης περιορίζεται κατά μήκος των επιπολικών ευθειών.
- **Δέσμευση αμφίδρομης συμβατότητας:** ελέγχεται η συνέπεια μεταξύ των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης της εικόνας αναφοράς και αναζήτησης αντίστοιχα, οι οποίοι παρότι έχουν προσδιοριστεί από τα ίδια κόστη συσχέτισης, ενδέχεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις.
- **Δέσμευση ομοιότητας:** γίνεται η υπόθεση ότι τα ομόλογα εικονοστοιχεία χαρακτηρίζονται από την ίδια τιμή έντασης στις δυο εικόνες του στερεοζεύγους. Στην πράξη η υπόθεση αυτή δεν μπορεί να είναι αληθής, διότι αφενός, λόγω της διαφορετικής θέσης λήψης των δύο εικόνων το ίδιο σημείο του αντικειμένου δεν δίνει ίδια ένταση σήματος στις δύο εικόνες λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, αφετέρου διότι τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από τα ιδεώδη υλικά Lambert και δεν παρουσιάζουν ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις (Καρφής, 2009).
- **Δέσμευση ομαλότητας:** γίνεται η θεώρηση ότι οι τιμές έντασης των εικονοστοιχείων μεταβάλλονται ομαλά, διατηρώντας, ωστόσο, τις φυσικές ασυνέχειες των αντικειμένων (πχ. στις ακμές)
- **Δέσμευση διάταξης εικονοστοιχείων:** θεωρείται δεδομένο ότι οι σχετικές θέσεις μεταξύ των αντικειμένων του χώρου, δε μεταβάλλονται. Η δέσμευση αναφέρεται σε σημεία που βρίσκονται πάνω στις επιπολικές ευθείες, και προϋποθέτει ότι οι επιφάνειες των αντικειμένων δεν παρουσιάζουν ασυνέχειες.

1.6. Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης

Οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης διακρίνονται σε αυτούς που εφαρμόζονται τοπικά (local) και σε εκείνους που έχουν καθολική (global) εφαρμογή.

1.6.1. Τοπικός Αλγόριθμος (Local Algorithm)

Οι τοπικές μέθοδοι δίνουν έμφαση στον υπολογισμό της ψηφιακής παράλλαξης του εκάστοτε σημείου, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές έντασης μέσα σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο γύρω από το εν λόγω σημείο. Επομένως, κατά την εφαρμογή τους υπολογίζονται τα κόστη συσχέτισης σε μια περιοχή υποστήριξης (ψηφιακό παράθυρο), τα οποία στη συνέχεια συναθροίζονται. Τέλος, για κάθε εικονοψηφίδα επιλέγεται με τη μέθοδο Winner Takes All (WTA), η ψηφιακή παράλλαξη d_p που σχετίζεται με το συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης που έχει τη χαμηλότερη τιμή. Οι περιοχές υποστήριξης μπορεί να είναι είτε δισδιάστατες (ευνοώντας μετωπικά παράλληλες επιφάνειες) είτε τρισδιάστατες (υποστηρίζοντας κεκλιμένες επιφάνειες). Οι πιο απλές περιπτώσεις των περιοχών υποστήριξης είναι αυτές που τα ψηφιακά παράθυρα είναι τετραγωνικά (Μαλτέζος, 2013).

1.6.2. Καθολικός Αλγόριθμος (Global Algorithm)

Οι καθολικές μέθοδοι παραλείπουν τη διαδικασία συσσωμάτωσης των κοστών συσχέτισης κατά τον υπολογισμό της ψηφιακής παράλλαξης και εκτελούν κάποιες επαναληπτικές διαδικασίες ή διαδικασίες βελτιστοποίησης, με γνώμονα την εύρεση των τιμών εκείνων (d) που ελαχιστοποιούν μία καθολική συνάρτηση ενέργειας $E(d)$.

Οι καθολικές μέθοδοι δεν χρησιμοποιούν τοπικές δεσμεύσεις (για παράδειγμα τη δέσμευση ομοιότητας μεταξύ πιθανών ομολογιών), αλλά εφαρμόζουν δεσμεύσεις όπως αυτή της ομαλότητας και της διάταξης των εικονοστοιχείων, οι οποίες ελαχιστοποιούν τις αναντιστοιχίες μεταξύ των εικονοψηφίδων, βοηθώντας κατ' αυτόν τον τρόπο, στην εξομάλυνση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Ως εκ τούτου, είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε περιοχές που έχουν ελλιπή υφή.

Για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης ενέργειας έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι όπως ο δυναμικός προγραμματισμός, graph cuts, belief propagation, simulated annealing, intrinsic curves κ.α. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα ακριβείς και αποτελεσματικές (ιδιαίτερα η graph cuts), ωστόσο μειονεκτούν ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους (ιδιαίτερα σε εικόνες υψηλής ανάλυσης) αλλά και ως προς τις υψηλές απαιτήσεις τους στην μνήμη του υπολογιστή (Μαλτέζος, 2013).

Τέλος, υπάρχει και η ημι-καθολική μέθοδος η οποία συνιστά μια προσέγγιση μεταξύ των τοπικών και καθολικών αλγορίθμων, με επιβολή της δέσμευσης ομαλότητας, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 1.9).

Οι τοπικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους. Οι καθολικοί αλγόριθμοι πετυχαίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα από άποψη ποιότητας και ακρίβειας, ωστόσο, λόγω μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, ενδέχεται συχνά να παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις.

Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα πετυχαίνοντας περίπου τα ίδια αποτελέσματα με τις καθολικές μεθόδους.

1.7. Μέθοδοι υπολογισμού κόστους συσχέτισης

Οι μέθοδοι υπολογισμού του κόστους συσχέτισης, προσδιορίζουν το μέτρο ομοιότητας μεταξύ των εικονοστοιχείων των εικόνων αναφοράς και αναζήτησης, συγκρίνοντας παράθυρα γύρω από το εκάστοτε εικονοστοιχείο του οποίου το ομόλογο αναζητείται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί η μέγιστη ομοιότητα (εκφρασμένη ανάλογα με τη διαδικασία που εφαρμόζεται).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες μεθόδων υπολογισμού κόστους συσχέτισης, εκείνες που βασίζονται στις τιμές έντασης των εικονοψηφίδων (παραμετρικές μέθοδοι AD, SAD, ZSAD, BT, NCC κ.α.) και σε εκείνες που βασίζονται στις σχετικές θέσεις των τιμών έντασης εντός του ψηφιακού παραθύρου (μη παραμετρικές μέθοδοι Rank, Census) (Zabih and Woodfill, 1994).

Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες μέθοδοι, οι οποίες παρότι είναι ευαίσθητες σε περιοχές με ελλιπή υφή ή με αποκρύψεις, είναι οι πιο συνήθεις:

- **Απόλυτες διαφορές (AD) – Τετραγωνικές διαφορές (SD):** Για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται η διαφορά της τιμής φωτεινότητάς της με την αντίστοιχη της κάθε πιθανής ομόλογής της.
- **Άθροισμα Απόλυτων διαφορών (SAD) – Άθροισμα τετραγωνικών διαφορών (SSD):** Εφαρμόζεται σε τοπικές μεθόδους, όπου αθροίζονται τα επιμέρους κόστη κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης. Ως ομόλογο παράθυρο ορίζεται αυτό στο οποίο εμφανίστηκε το μικρότερο άθροισμα.

- **BT (Birchfield και Tomasi):** Εκτελείται γραμμική παρεμβολή σε γειτονικές εικονοψηφίδες για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης.
- **Συντελεστής Συσχέτισης - Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Μεταβλητότητας (NCC):** χρησιμοποιείται συχνά στις τοπικές μεθόδους συνιστά δείκτη ομοιότητας μεταξύ των παραθύρων αναφοράς και αναζήτησης. Για τιμές ± 1 , τα δύο παράθυρα παρουσιάζουν πλήρη συσχέτιση (θετική ή αρνητική αντίστοιχα) ενώ, η τιμή μηδέν (0), υποδηλώνει ότι τα δύο παράθυρα δεν συσχετίζονται.
- **Αμοιβαία Πληροφορία (MI):** Βασίζεται σε ολόκληρη την εικόνα σε επίπεδο εικονοψηφίδων και όχι σε ψηφιακά παράθυρα, και αποτελεί ένα μέτρο για την «ευθυγράμμιση» του μοντέλου που βασίζεται στο εύρος μιας κατανομής πιθανότητας δύο εικόνων (εντροπία H_1) και στην κοινή τους εντροπία $H_{1,2}$.

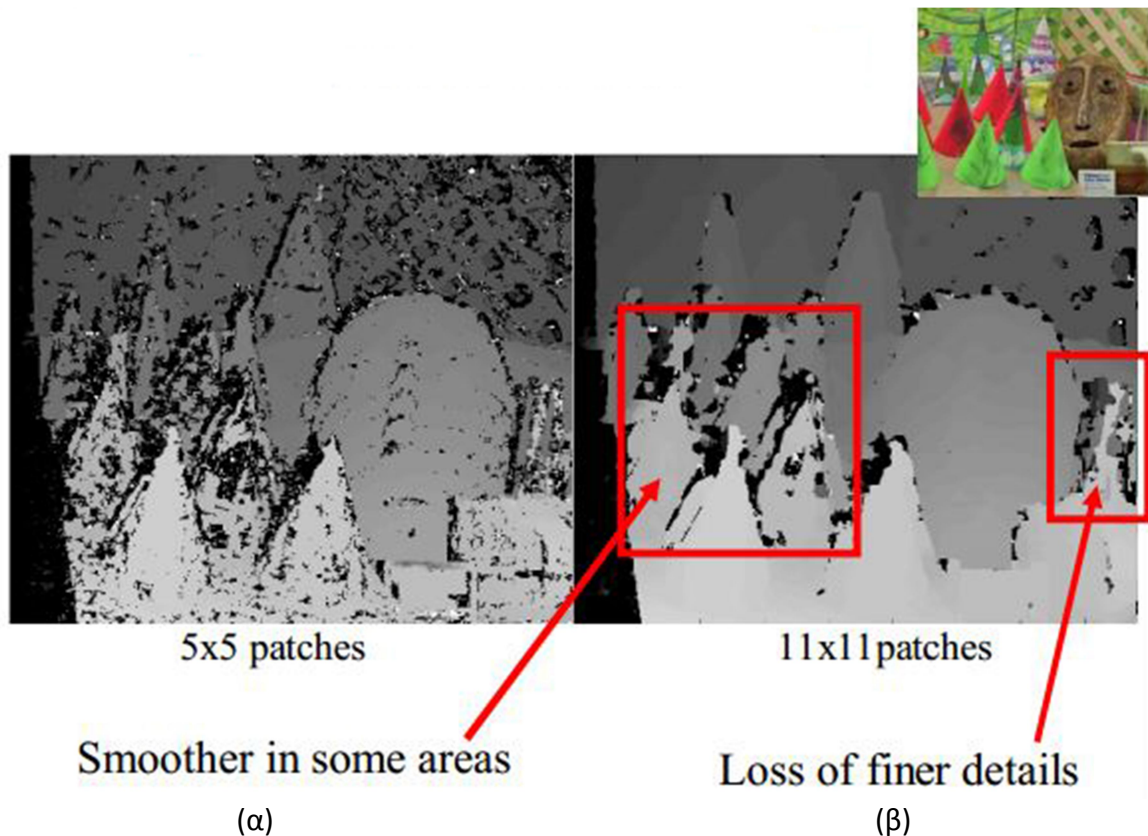
Σημειώνεται ότι, οι μη παραμετρικές μέθοδοι είναι εξίσου ευαίσθητες με τις παραμετρικές σε περιοχές με ελλιπή υφή (για αυτό το λόγο έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές όπως οι Soft Rank filter κ.λπ.). Το γεγονός, ωστόσο, ότι οι εν λόγω μέθοδοι εκμεταλλεύονται τη σχετική διάταξη των τιμών ένταση των εικονοστοιχείων εντός των ψηφιακών παραθύρων, και όχι τις ίδιες τις τιμές, αποτελεί πλεονέκτημα σε σχέση με τις παραμετρικές μεθόδους, σε περιπτώσεις που εντοπίζονται εντός των ψηφιακών παραθύρων ραδιομετρικές παραμορφώσεις ή περιοχές με ασυνέχειες βάρους.

Ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης με τεχνικές που βασίζονται στην τιμή φωτεινότητας των εικονοστοιχείων γίνεται είτε σε επίπεδο εικονοψηφίδων είτε σε επίπεδο ψηφιακών παραθύρων (επιφανειακή συνταύτιση). Στις καθολικές μεθόδους, ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται σε επίπεδο εικονοψηφίδων. Αντίθετα, στις τοπικές μεθόδους συνταύτισης, ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται με χρήση ψηφιακών παραθύρων γύρω από το κάθε εικονοστοιχείο, αξιοποιείται η πληροφορία από τη γειτονική του περιοχή, και εν τέλει υπολογίζεται ένα συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης. Για τη διαδικασία αυτή, επομένως, πρέπει να οριστεί ένα πρότυπο παράθυρο αναφοράς.

1.8. Επιλογή παραθύρου αναζήτησης

Η επιλογή των διαστάσεων ενός παραθύρου αναφοράς (συνεπώς και αναζήτησης), κρίνεται εξαιρετικά σημαντική, για τον αξιόπιστο προσδιορισμό του κόστους συσχέτισης, και την εξαγωγή κατά συνέπεια, ενός ποιοτικού χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Σημειώνονται τα εξής:

- Η θέση και το μέγεθος του προτύπου πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να καθίσταται δυνατή η εύρεση του ομολόγου παραθύρου. Για παράδειγμα, είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί ομολόγο ενός παραθύρου που περιέχει ομοιόμορφους τόνους (περιοχή με έλλειψη υφής).
- Το μέγεθος του παραθύρου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να περιγράφεται με σαφήνεια η περιοχή που περιβάλλει την εικονοψηφίδα ενδιαφέροντος, να περιέχεται δηλαδή, όλη η απαραίτητη πληροφορία (τιμές έντασης) και να μειώνεται παράλληλα η πιθανότητα εσφαλμένων συνταυτίσεων (περιοχές με ελλιπή υφή). Ταυτόχρονα πρέπει να μην είναι τόσο μεγάλο που να εισάγει θόρυβο ή προοπτικές παραμορφώσεις, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απότομες μεταβολές της ψηφιακής παράλλαξης μέσα στο παράθυρο (που εντοπίζονται κυρίως στα όρια των αντικειμένων).
- Η θέση της περιοχής αναζήτησης εξαρτάται από την α priori γνώση που έχουμε για το απεικονιζόμενο αντικείμενο. Αν δεν υπάρχει καμία γνώση για το αντικείμενο τότε, θεωρητικά, περιοχή αναζήτησης είναι ολόκληρη η εικόνα. Σε αντίθετη περίπτωση, το μέγεθος της περιοχής αναζήτησης μπορεί να μικρύνει σημαντικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δίνοντας την δυνατότητα πιο γρήγορης ανεύρεσης του ομολόγου παραθύρου (Καρράς, Intro In Image Matching).



Εικόνα 1.7: Επίδραση μεγέθους ψηφιακού παραθύρου στον παραγόμενο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης

Παρατηρείται, εν γένει πως η χρήση σχετικά μικρών παραθύρων έχει ως αποτέλεσμα τα φυσικά όρια των αντικειμένων της εικόνας να διατηρούνται σχετικά αναλλοίωτα στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης (Εικόνα 1.7(α)). Εντοπίζονται, ωστόσο, διάσπαρτες μαύρες περιοχές, εκτός των περιοχών των αποκρύψεων, οι οποίες υποδηλώνουν την ύπαρξη λανθασμένης πληροφορίας και συνιστούν θόρυβο. Είναι λογικό η πληροφορία που αξιοποιείται κατά τη διαδικασία αναζήτησης ομολογιών να είναι περιορισμένη λόγω του μεγέθους του παραθύρου, γεγονός που οδηγεί σε εσφαλμένες συνταυτίσεις. Από την άλλη μεριά, η υπερβολική αύξηση της διάστασης του παραθύρου οδηγεί βαθμιαία σε χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομαλότητα, αλλά μικρότερη πιστότητα στην απόδοση των σχημάτων των αντικειμένων. Σε αντίστοιχες περιπτώσεις, τα όρια και τα σχήματα των αντικειμένων δεν είναι σαφώς ορισμένα, έχουν αμβλυνθεί σημαντικά, γεγονός που συνεπάγεται απώλεια πληροφορίας (Εικόνα 1.7(β)).

1.9. Ημι-καθολική μέθοδος συνταύτισης (Semi Global Matching-SGM)

Η ημι-καθολική μέθοδος είναι μία προσέγγιση μεταξύ των τοπικών και καθολικών αλγορίθμων, με επιβολή της δέσμευσης ομαλότητας. Επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει μια καθολική συνάρτηση ενέργειας $E(d)$ επιλύοντας έναν αριθμό από μονοδιάστατα (1D) προβλήματα ελαχιστοποίησης με τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού ή της scanline optimization (Μαλτέζος, 2013).

Η εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση μιας καθολικής συνάρτησης ενέργειας $E(d)$, η οποία διατυπώνεται ως εξής (Hirschmüller, 2008):

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p)) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (1)$$

Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στο άθροισμα των κοστών συσχέτισης, ενώ οι επόμενοι δυο όροι εκφράζουν τις δεσμεύσεις ομαλότητας.

Σημειώνεται ότι, για την αποφυγή προβλημάτων κατά την αντιστοίχιση των εικονοψηφίδων, χρησιμοποιείται δέσμευση ομαλότητας, στις καθολικές και ημικαθολικές μεθόδους ως όρος που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση ενέργειας. Γίνονται, δηλαδή, υποθέσεις περί εξομάλυνσης των επιφανειών των αντικειμένων, που σημαίνει ότι οι τιμές χαρακτηρισμού των εικονοστοιχείων μεταβάλλονται ομαλά σε όλη την εικόνα διατηρώντας παράλληλα τις φυσικές ασυνέχειες, πχ στα όρια των αντικειμένων. Η μαθηματική διατύπωση των δεσμεύσεων ομαλότητας είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς των ψηφιακών παραλλάξεων μεταξύ των

γειτονικών εικονοψηφίδων σε όλη την εικόνα. Επομένως, επιβάλλεται ποινή P_1 στις εικονοψηφίδες των οποίων οι ψηφιακές παραλλάξεις διαφέρουν κατά μια εικονοψηφίδα, και αντίστοιχα επιβάλλεται ποινή P_2 , στις εικονοψηφίδες που παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφορές ψηφιακής παράλλαξης, όπως είναι τα όρια των αντικειμένων, όπου εμφανίζονται ασυνέχειες βάθους. Σε κάθε περίπτωση για τη σωστή εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να διασφαλίζεται ότι $P_1 > P_2$ (Μαλτέζος, 2013).

Για τον προσδιορισμό της σωστής ομολογίας, λαμβάνεται υπόψη η πληροφορία από διάφορες διευθύνσεις της εικόνας. Για κάθε εικονοψηφίδα p και ψηφιακή παράλλαξη d , υπολογίζεται το συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης $S(p,d)$, με τη συνάθροιση των επιμέρους τιμών κόστους όλων των ελάχιστων σε κόστος μονοδιάστατων διαδρομών (1D) που καταλήγουν σε αυτή την εικονοψηφίδα (Εικόνα 1.8). Ο συνιστώμενος αριθμός των ελάχιστων σε κόστος διαδρομών είναι οχτώ (8) έως δεκαέξι (16) (Hirschmuller, 2008).



Εικόνα 1.8: (α) Οχτώ (β) δεκαέξι ελάχιστες σε κόστος διαδρομές κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης του κόστους συσχέτισης

Το κόστος συσχέτισης κατά μήκος μιας μονοδιάστατης ελάχιστης σε κόστος διαδρομής σε μια κατεύθυνση r , προσδιορίζεται αθροιστικά συναρτήσσει του τοπικού κόστους συσχέτισης της κάθε εικονοψηφίδας ($C(p,d)$), του ελάχιστου κόστους συσχέτισης της προηγούμενης εικονοψηφίδας της ίδιας διαδρομής, συμπεριλαμβανομένων και των ποινών P_1, P_2 (2). Το άθροισμα, τέλος, των επιμέρους κοστών δίνει το εκάστοτε συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης (3).

$$\begin{aligned}
 L_r(p,d) = & C(p,d) + \min(L_r(p-r,d), \\
 & L_r(p-r,d-1) + P_1, \\
 & L_r(p-r,d+1) + P_1, \\
 & \min_i L_r(p-r,i) + P_2)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d) \quad (3)$$

Σημειωτέον ότι, η διαδικασία πραγματοποιείται σε μια διάσταση (1D), όχι όμως κατά μήκος των επιτολικών γραμμών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του δυναμικού προγραμματισμού με επιβολή δέσμευσης διάταξης εικονοστοιχείων. Επομένως, η διαδικασία προσεγγίζει περισσότερο τη μέθοδο Scanline Optimization (Scharstein and Szeliski, 2002).

Μετά τον υπολογισμό των συσσωματωμένων τιμών κόστους συσχέτισης, προσδιορίζονται οι βέλτιστες ψηφιακές παραλλάξεις για τη συγκεκριμένη σκηνή, για τη συμπλήρωση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης (4), με τη μέθοδο Winner Takes All. Για κάθε εικονοψηφίδα επιλέγεται η παράλλαξη d_p που σχετίζεται με το μικρότερο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης. Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για κάθε εικονοψηφίδα, παράγεται ο πίνακας ψηφιακής παράλλαξης D (4).

$$D = \forall p | : \arg \min_{d_p} \left(\sum_{q \in N(p)} E_{data}(d_p) \right) \quad (4)$$

1.9.1. Συνάρτηση StereoSGBM (Semi Global Algorithm)

Η συνάρτηση StereoSGBM αποτελεί μια παραλλαγή του ημι-καθολικού αλγορίθμου η οποία υπολογίζει τα κόστη συσχέτισης με τη μέθοδο BT/SAD ή BT/AD εφαρμόζοντας τον ημι-καθολικό αλγόριθμο, ενώ η αναζήτηση των ομοιοτήτων εκτελείται σε οχτώ (8) διευθύνσεις.

Η εν λόγω μέθοδος (Birchfield and Tomasi, 1998), εφαρμόζει μια γραμμική παρεμβολή σε γειτονικές εικονοψηφίδες για τον προσδιορισμό του κόστους συσχέτισης μεταξύ των εικονοψηφίδων της εικόνας αναφοράς και αναζήτησης (5), κάνοντας χρήση της μεθόδου των απόλυτων διαφορών (AD) ή του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD). Θεωρώντας ως x_L την εκάστοτε εικονοψηφίδα της εικόνας αναφοράς, x_R κάθε εικονοψηφίδα της εικόνας αναζήτησης, I_L και I_R τις εντάσεις των αντίστοιχων εικονοψηφίδων, το κόστος συσχέτισης προσδιορίζεται ως εξής:

$$C_{BT}(x_L, x_R) = \min \{ \bar{d}(x_L, x_R, I_L, I_R), \bar{d}(x_R, x_L, I_R, I_L) \} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
\bar{d}(x_L, x_R, I_L, I_R) &= \max\{0, I_L(x_L) - I_{\max}, I_{\min} - I_L(x_L)\} \\
I_{\min} &= \min(I_R^-, I_R^+, I_R(x_R)) \\
I_{\max} &= \max(I_R^-, I_R^+, I_R(x_R)) \\
I_R^- &= (I_R(x_R) + I_R(x_R - 1))/2 \\
I_R^+ &= (I_R(x_R) + I_R(x_R + 1))/2
\end{aligned} \tag{6}$$

1.9.2. Παράμετροι αλγορίθμου SGM

Οι παράμετροι που συμμετέχουν σε αυτή τη συνάρτηση είναι:

- **min_disparity:** Ορίζει την ελάχιστη ψηφιακή παράλλαξη, με προκαθορισμένη τιμή μηδέν (0).
- **number_of_disparities:** Ορίζει το εύρος των ψηφιακών παραλλάξεων (διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης παράλλαξης, εντός του παραθύρου αναζήτησης) μέσα στο οποίο αναζητείται η βέλτιστη τιμή της. Η εν λόγω παράμετρος περιορίζει την αναζήτηση των ομολογιών σε ένα τμήμα των επιτολικών ευθειών, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον υπολογιστικό χρόνο. Η τιμή της πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.
- **SAD_BT_window_size:** Οριζόντια διάσταση του ψηφιακού παραθύρου για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης (ή του συσσωματωμένου κόστους συσχέτισης) με τη μέθοδο BT. Η μέθοδος BT εφαρμόζεται κυρίως σε επίπεδο εικονοψηφίδων, όμως υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της μέσω τετραγωνικών ψηφιακών παραθύρων (περιττής διάστασης) περί την κεντρική εικονοψηφίδα ενδιαφέροντος. Επομένως, οι τιμές εισόδου για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης σε επίπεδο εικονοψηφίδων είναι 1, ενώ για επίπεδο ψηφιακών παραθύρων είναι 5, 7, 9 κλπ. Η επιλογή της διάστασης του παραθύρου παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο εκτέλεσης καθώς και στην ποιότητα του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.
- **pre_filter_cap:** Η περικοπτόμενη τιμή για τις αρχικές εικόνες στο στάδιο της προ-επεξεργασίας. Ο αλγόριθμος υπολογίζει αρχικά την πρώτη παράγωγο του κάθε εικονοστοιχείου με το φίλτρο Sobel κατά τη διεύθυνση x και στη συνέχεια εντάσσει αυτή την τιμή στο κλειστό διάστημα $[-pre_FilterCap, +pre_FilterCap]$.
- **uniqueness_ratio:** Ελάχιστο ποσοστό επί τοις εκατό που απέχει το ελάχιστο (βέλτιστο) συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης από το αμέσως επόμενο. Η επιβολή αυτής της δέσμευσης βοηθά κυρίως σε περιοχές με επαναλαμβανόμενα πρότυπα ή έλλειψη υφής

ώστε το ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης να μπορεί να είναι πιο διακριτό. Αύξηση της τιμής συνεπάγεται αύξηση των κενών στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

- **P1, P2:** Όροι που αποτελούν τις δεσμεύσεις ομαλότητας της συνάρτησης ενέργειας κατά τον Hirschmuller. Ο όρος P1 αφορά γειτονικά εικονοστοιχεία των οποίων η διαφορά των ψηφιακών παραλλάξεων δεν είναι μεγαλύτερη από μια εικονοψηφίδα, ενώ ο όρος P2 αφορά εικονοστοιχεία των οποίων η διαφορά ξεπερνά τη μια εικονοψηφίδα. Σημειώνεται πως όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των P1 και P2 τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιρροή τους κατά την εξαγωγή του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, καθώς καθιστούν πιο ομαλό το αποτέλεσμα. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να ισχύει $P2 > P1$.
- **speckle_window_size:** Οριζόντια διάσταση ψηφιακού παραθύρου για την ανίχνευση θορύβου (π.χ. στιγμάτων) ή ακραίων τιμών (peaks) στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Δεν υπάρχει περιορισμός στην τιμή εισόδου, καθώς το χρησιμοποιούμενο ψηφιακό παράθυρο δεν είναι τετραγωνικό.
- **speckle_range:** Εκφράζει τη μέγιστη διαφορά της ψηφιακής παράλλαξης εντός του ψηφιακού παραθύρου speckle_Window_Size που θεωρείται θόρυβος.
- **disp12maxdiff:** Μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά (σε ακέραιες μονάδες pixel) μεταξύ των εικονοστοιχείων των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης που αντιστοιχούν στην εικόνα αναφοράς και στην εικόνα αναζήτησης κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Με την αύξηση της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου, τα πιθανά κενά στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης από αναντιστοιχίες ή αποκρύψεις συμπληρώνονται μέσω παρεμβολής. Έτσι, τα αποτελέσματα υπό την έννοια αυτή βελτιώνονται καθώς τα επιτρεπόμενα όρια κατά την εφαρμογή του ελέγχου αμφίδρομης συμβατότητας είναι πιο ελαστικά (Μαλτέζος, 2013).

Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος προσφέρει έναν ικανοποιητικό συνδυασμό ακρίβειας και υπολογιστικού χρόνου και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Στη βιβλιογραφία καταδεικνύεται ως ιδιαίτερα αποτελεσματικός, για τη συνταύτιση εναέριων εικόνων σε αστικές περιοχές (Hirschmüller, 2011). Ωστόσο, ανάλογα με το είδος της σκηνής παρουσιάζει προβλήματα κυρίως στα όρια των αντικειμένων και σε σημεία που παρουσιάζουν ελλιπή υφή.

2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1. Στόχοι

Οι στόχοι που τέθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- Παραγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης με το βέλτιστο συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων του ημικαθολικού αλγορίθμου.
- Παραγωγή ορθοφωτογραφιών για τις περιοχές για τις οποίες παρήχθησαν χάρτες ψηφιακής παράλλαξης.
- Έλεγχος των παραγόμενων προϊόντων, και συγκριτική θεώρηση της απόδοσης της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου και ορθοεικόνας, σε σχέση με τη χρήση δεδομένων σάρωσης με LIDAR για τον ίδιο σκοπό.

2.2. Δεδομένα και χαρακτηριστικά τους

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, καλύπτουν μια ζώνη του βόρειου τμήματος της νήσου Μήλου (Εικόνα 2.1). Προήλθαν από την αποστολή σάρωσης με το σύστημα LIDAR ALS50-II της εταιρίας Leica Geosystems, υπέρ του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), από το Συμβούλιο Ερευνών Φυσικού Περιβάλλοντος (Natural Environment Research Council – NERC) του Ηνωμένου Βασιλείου, τα οποία έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα προϊόντα που προέκυψαν από την επεξεργασία αυτών (Φράγκος,2013).

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αεροφωτογραφίες που λήφθηκαν παράλληλα με τη σάρωση, με την ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format Leica RCD105, τα ονομαστικά και βαθμονομημένα χαρακτηριστικά της οποίας αναγράφονται στον Πίνακα 2.1. Η κλίμακα των εικόνων είναι περίπου 1:42000, η λήψη πραγματοποιήθηκε από ύψος πτήσης H=2500m, συνεπώς το μέγεθος του εικονοστοιχείου στο έδαφος είναι περίπου 0,30 m. Το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των εικόνων είναι της τάξης του 60%. Ακόμη, αξιοποιήθηκαν οι εξωτερικοί προσανατολισμοί των εικόνων, όπως προέκυψαν από επίλυση αεροτριγωνισμού, με

φωτοσταθερά που μετρήθηκαν στο DSM που παράχθηκε από τα δεδομένα σάρωσης με το σύστημα LIDAR.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά ψηφιακής φωτομηχανής Leica RCD105

Ανάλυση (ονομαστική)	7216 x 5412 (39 Mega-pixels)
Ανάλυση (βαθμονόμηση)	7212 x 5408
Διάσταση CCD (βαθμονόμηση)	49,0416 mm x 36,7744 mm
Διάσταση pixel (βαθμονόμηση)	6,8 μm
Εστιακή απόσταση (c) (ονομαστική)	60 mm
Εστιακή απόσταση (c) (βαθμονόμηση)	59,799 mm
Ακτινική διαστροφή (βαθμονόμηση)	$k_0=8,57325 \times 10^{-3}$ $k_1=-2,01969 \times 10^{-8}$ $k_2=5,13135 \times 10^{-11}$
Απόκλιση πρωτεύοντος σημείου (βαθμονόμηση)	$x_0=-0,0025$ mm $y_0=-0,3247$ mm
FOV	44.2° x 34.0°

Επιπλέον, για σύγκριση και έλεγχο των αποτελεσμάτων της εφαρμογής, αξιοποιήθηκαν τα προϊόντα επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης με το σύστημα LIDAR. Τα εν λόγω προϊόντα είναι ένα νέφος σημείων μέσης πυκνότητας 2.5 σημείων/m², και μέσης απόστασης σημείων 0.63m, από το οποίο προέκυψαν ένα ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM) με μέγεθος εδαφοψηφίδας 1 m, καθώς και μια ορθοεικόνα κλίμακας 1:5000, και χωρικής διακριτικής ικανότητας 0.50 m. Σημειώνεται ότι τα προϊόντα αυτά αναφέρονται στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84, που χρησιμοποιεί την παγκόσμια μερκατορική προβολή (UTM zone 35N), ενώ τα υψόμετρα έχουν επιφάνεια αναφοράς το ελλειψοειδές GRS80. Η τιμή της αποχής του γεωειδούς, όπως προσδιορίστηκε στην περιοχή μελέτης για τις ανάγκες προηγούμενης εργασίας (Φράγκος, 2013), είναι ίση με 40 m.

Τέλος, για επιπλέον έλεγχο τον προϊόντων, χρησιμοποιήθηκε τμήμα ψηφιακής ορθοφωτογραφίας της πρώην Κτηματολόγιο ΑΕ, με μέγεθος εδαφοψηφίδας 0.50m.



Εικόνα 2.1: Περιοχή εργασίας στο βόρειο τμήμα της νήσου Μήλου (υπόβαθρο Google Earth)

2.3. Προεργασία και προγραμματισμός μετρήσεων

Για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν παραπάνω, κρίθηκε αναγκαία η εκτέλεση επίγειων μετρήσεων φωτοσταθερών σημείων, με στόχο την αξιοποίησή τους στη γεωαναφορά των

μοντέλων που θα παραχθούν (disparity map) καθώς και για τον έλεγχο των προϊόντων που θα προκύψουν.

Πριν τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκε μια σειρά εργασιών, που αποσκοπούσε αφενός στην εξοικείωση με την τεχνική της πυκνής συνταύτισης, αφετέρου στην επιλογή της καταλληλότερης περιοχής για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, και στο βέλτιστο προγραμματισμό των μετρήσεων, αξιοποιώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία από προηγούμενη εργασία. Οι εν λόγω εργασίες παρατίθενται παρακάτω συνοπτικά, καθώς τα μετέπειτα στάδια επεξεργασίας των μετρήσεων συνιστούν την ουσία της παρούσης διπλωματικής:

1. Επιλογή τεσσάρων αεροφωτογραφιών από το σύνολο των διατιθέμενων, που αποτέλεσαν την ευρύτερη περιοχή μελέτης.
2. Επιτολική επανασύσταση των εικόνων, χρησιμοποιώντας τους εξωτερικούς προσανατολισμούς από προηγούμενη εργασία. Με οπτικό έλεγχο των κανονικοποιημένων εικόνων, διαπιστώθηκε όχι ικανοποιητική ταύτιση των επιτολικών ευθειών σε όλη την έκταση των εικόνων.
3. Παραγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης από τις κανονικοποιημένες εικόνες, οι οποίοι, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω μη ικανοποιητικής επανασύστασης, δεν απέδωσαν ορθά το ανάγλυφο της περιοχής. Σημειωτέον ότι μια επιπλέον τεχνική δυσκολία για την απόδοση του αλγορίθμου συνταύτισης, δημιούργησε η κακή ραδιομετρία των εικόνων, καθώς σε κάποια σημεία ήταν θολές, αλλά και οι μεταξύ τους ραδιομετρικές διαφορές.
4. Επίλυση σχετικού προσανατολισμού, και συνόρθωση του μπλοκ των εικόνων ως free model (με δέσμευση επτά παραμέτρων που ορίζουν σύστημα αναφοράς, εν προκειμένω αυθαίρετο, πραγματοποιήθηκε συνόρθωση δέσμης χωρίς φωτοσταθερά, θεωρώντας μηδενικές τιμές για όλα τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της αριστερής εικόνας και αυθαίρετη τιμή στην κατά x συνιστώσα της βάσης), επιτολική επανασύσταση αυτών και εκ νέου παραγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης. Τα αποτελέσματα ήταν συγκριτικά καλύτερα, αλλά και πάλι ο αλγόριθμος είχε αστοχίες.
5. Επιλογή μιας ζώνης κατά μήκος των τεσσάρων εικόνων, όπου ο αλγόριθμος απέδωσε σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, για να παραχθεί ένα ενιαίο μοντέλο.
6. Προσπάθεια εύρεσης υποψήφιων φωτοσταθερών σημείων στους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης. Ωστόσο, κατέστη εξαιρετικά δύσκολο, να διακριθούν σημεία που ενδείκνυνται για επίγειες μετρήσεις, δηλαδή σημεία χαμηλού ύψους, παραδείγματος χάριν μάντρες. Εντοπίστηκαν μόνο κτίσματα, τα οποία όμως αντενδείκνυνται αφενός λόγω ύψους, που εν γένει εισάγει περισσότερα σφάλματα και λόγω αδυναμίας πρόσβασης σε αυτά, αφετέρου διότι τα όρια τους ήταν αρκετά παραμορφωμένα στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, ώστε να μπορούν να σκοπευθούν, για τις ανάγκες μετέπειτα εργασιών ελέγχου κλπ. Εντοπισμός φωτοσταθερών σημείων στεροσκοπικά

στο συνορθωμένο μοντέλο (free model), παράλληλα έλεγχος τους στο Google Earth και επισήμανσή τους στην ορθοφωτογραφία του Κτηματολογίου.

7. Οι θέσεις των φωτοσταθερών ορίστηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν όλη την περιοχή, για την επίλυση του αεροτριγωνισμού, ενώ πάρθηκαν και επιπλέον σημεία, στη ζώνη που επιλέχθηκε ως περιοχή η οποία προσφέρεται για εξαγωγή χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, για γεωαναφορά και έλεγχο.

2.4. Μετρήσεις

Για τις ανάγκες της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε μια σειρά επίγειων μετρήσεων με χρήση του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS), με τη μέθοδο του κινηματικού απόλυτου εντοπισμού (RTK), και χρήση του οργάνου Leica 1200 της εταιρίας Leica Geosystems που παρέχει οριζοντιογραφική ακρίβεια 10mm+1ppm και υψομετρική 20mm+1ppm. Με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται προσδιορισμός της θέσης του δέκτη σε πραγματικό χρόνο, συνεπώς, υπολογίζονται απευθείας οι γεωδαιτικές του συντεταγμένες (X,Y,Z). Σημειώνεται ότι στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένες είναι το ΕΓΣΑ 87, και τα υψόμετρα είναι ορθομετρικά, καθώς οι διορθώσεις για τον προσδιορισμό θέσης λήφθηκαν από το δίκτυο σταθμών RTK της εταιρίας Metrica.

Μετρήθηκαν σαράντα τέσσερα (44) σημεία, με ακρίβεια μέτρησης 1-3 cm, κατά κύριο λόγο μάντρες και γενικώς σημεία σχετικά χαμηλού ύψους (έως 1.5-2 m το μέγιστο), και ελάχιστες στέγες κτιρίων καθώς εν γένει αποφεύχθηκαν αφενός, διότι το μεγάλο ανάγλυφο δημιουργεί μεγαλύτερες εκτροπές λόγω αναγλύφου στις εικόνες, δυσχεραίνοντας τη σκόπευση κατά την τρίτη διάσταση (ο λόγος Β/Η δεν είναι πολύ ευνοϊκός, συνεπώς εισάγει περισσότερα σφάλματα), αφετέρου λόγω αδυναμίας πρόσβασης σε αυτά. Εφόσον το μπλοκ των εικόνων είχε συνορθωθεί πριν τις μετρήσεις ως free model, είχαν δημιουργηθεί τα στερεομοντέλα, υπήρχε η δυνατότητα να γίνει ένας σχετικός έλεγχος επιτόπου για να διαπιστωθεί εάν πράγματι τα σημεία που μετρήθηκαν μπορούσαν να σκοπευθούν στερεοσκοπικά. Σε αντίθετη περίπτωση, έπρεπε να μετρηθούν νέα σημεία.

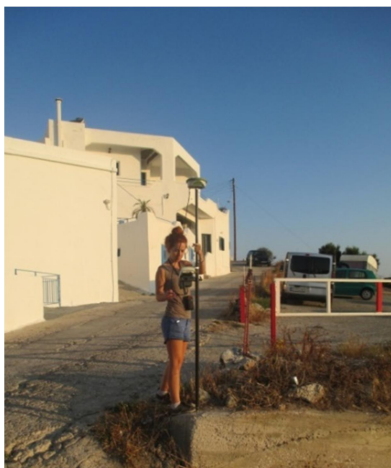
Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες της εφαρμογής θα αρκούσε μικρότερο πλήθος μετρήσεων, ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν πλεονάζουσες παρατηρήσεις για ενδεχόμενο λάθους, αστοχίας ή ανάγκης συλλογής επιπλέον δεδομένων σε μεταγενέστερο χρόνο, που δε θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί, καθώς και για να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για μετέπειτα εργασίες.



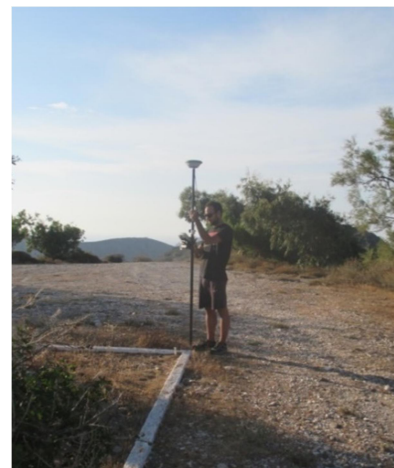
(α)



(β)



(γ)



Εικόνα 2.2: (α) Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, (β) Κατανομή φωτοσταθερών στην ορθοφωτογραφία της Κτηματολόγιο Α.Ε. (γ) Εκτέλεση μετρήσεων

Πίνακας 2.2: Συντεταγμένες μετρηθέντων σημείων

α/α	X	Y	Z	α/α	X	Y	Z
1	538077.4748	4066689.0810	153.182	25CV	539420.2018	4066501.2868	57.438
1CV3	537959.6658	4066611.5082	150.760	27	539280.8799	4065877.3007	120.911
1CV4	537957.6478	4066610.5702	150.968	27CV	539279.4209	4065878.9634	120.04
1cv1	537911.9531	4066626.5761	149.911	30	539379.1225	4065118.7308	65.514
1cv2	37912.167	4066626.8473	149.934	30CV	539379.5093	4065118.0348	65.472
3	537818.6634	4066244.1486	167.308	31	537919.6950	4065947.0585	162.330
3cv	537769.0522	4066269.3365	169.915	31CV3	537941.0639	405972.4405	162.307
4	537720.7865	4065725.4481	142.336	31cv1	537918.2353	4065946.3245	161.457
4CV	537719.2087	4065720.9063	141.988	31cv2	537917.6001	4065945.2280	162.142
6	537795.2358	4065174.8308	138.703	32	538015.7827	4066140.5147	159.290
6cv	537787.2705	4065171.7813	139.097	32cv	538012.5645	4066141.8809	159.100
8	538023.8887	4066323.2350	139.877	33	537708.1724	4066116.8782	167.187
9	538131.3826	4066282.9056	139.791	33cv	537756.0838	4066097.0899	164.078
10	538334.6447	4066132.8710	126.061	34	538389.2443	4065797.6704	125.647
10cv	538334.2907	4066133.9507	126.113	34CV	538390.8330	4065807.6458	125.530
11	538251.8878	4065183.0257	117.805	35	537647.6600	4066052.8354	173.583
11cv	538257.9761	4065180.4813	117.658	35cv	537645.3590	4066056.7894	171.804
12	538483.1603	4066549.3520	148.865	36	538767.0291	4066154.8730	119.625
12CV1	538452.6116	4066570.5024	149.099	36CV	538783.3965	4066162.6902	120.789
12CV2	538451.2600	4066576.5244	149.368	37	538738.0801	4065774.6656	120.319
15	538572.5604	4065907.7418	124.690	37CV	538735.4640	4065772.2125	122.426
15CV	538572.2605	4065907.4883	124.696	38	538406.6461	4066408.1944	149.949
16	538642.1559	4065944.3618	125.705	38CV	538400.6491	4066411.4998	149.963

α/α	X	Y	Z
16CV	538636.6391	4065943.3381	125.635
17	53852.9560	4065399.4857	130.271
17cv	538528.8322	4065392.1825	129.798
18	538581.5792	4065388.4158	127.071
18cv	538582.2953	4065387.0591	127.031
21	539056.1828	4066534.0372	182.958
21CV	539052.4445	4066538.9397	182.970
22	539025.7096	4066188.9794	117.298
22CV	539063.5534	4066216.5494	116.484
23	538931.1640	4066056.2858	135.824
23CV	538929.5534	4066039.7660	135.312
25	539420.5926	4066500.9670	57.445

α/α	X	Y	Z
39	539256.5047	4066171.4005	100.847
40	539095.5408	4066024.5979	128.097
40CV	539113.9176	4066034.3780	129.514
41	539007.715	4065781.1214	163.339
41cv	539011.9545	4065768.6684	162.908
42	538305.8901	4065952.4258	151.045
42cv	538249.7541	4065954.5409	149.961
43	538114.5353	4065700.5081	180.870
43CV	538120.0635	4065697.7800	180.865
44	537885.9603	4065855.5310	163.518
44cv	537881.4545	4065849.5468	163.824

2.5. Επίλυση αεροτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση

Για την επίλυση του αεροτριγωνισμού των τεσσάρων εικόνων, χρησιμοποιήθηκαν 9 φωτοσταθερά ομοιόμορφα κατανεμημένα περιμετρικά του μπλοκ, και 18 σημεία ελέγχου.

Κατά την επίλυση του αεροτριγωνισμού στον φωτογραμμετρικό σταθμό Photomod, δοθέντων των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού, και συγκεκριμένα της ακτινικής διαστροφής, από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης από προηγούμενη εργασία (Φράγκος, 2013), διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων γινόταν χειρότερη. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι λύνοντας των α/τ μόνο με 4 φωτοσταθερά, τα σφάλματα δεν ήταν πολύ ικανοποιητικά πλην όμως σχετικά αναμενόμενα (δηλαδή έως 1 m στο Z, και κάτω από μέτρο οριζοντιογραφικά) ενώ με σκόπευση μόλις ενός επιπλέον σημείου, τα αποτελέσματα ξεπερνούσαν κατά πολύ τα αποδεκτά όρια (έως και 6m στο Z).

Με ακριβέστερη σκόπευση των σημείων με κατάλληλο εξοπλισμό (3D οθόνη και ανάλογα γυαλιά) στο Photomod, και εκ νέου επίλυση του αεροτριγωνισμού, τα σφάλματα των σημείων ελέγχου ήταν εντός των αποδεκτών ορίων (καλύτερα από 30 cm οριζοντιογραφικά και μέχρι 40 cm υψομετρικά). Ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί αυτοβαθμονόμηση για να διαπιστωθεί τυχόν απόκλιση του εσωτερικού προσανατολισμού του πιστοποιητικού βαθμονόμησης της μηχανής από το σωστό, για τη συγκεκριμένη λήψη, μοντέλο κεντρικής προβολής, στην ουσία να διαπιστωθεί το ενδεχόμενο το εν λόγω πιστοποιητικό να μην αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη μηχανή, άρα να μην συνάδει με τη γεωμετρία της συγκεκριμένης λήψης.

Χρησιμοποιώντας 27 σημεία ως φωτοσταθερά, πραγματοποιήθηκε μια αρχική συνόρθωση του μπλοκ των εικόνων, με τη μέθοδο της δέσμης με αυτοβαθμονόμηση. Οι αρχικές τιμές επιλέχθηκαν όλες μηδενικές (στόχος ήταν να δοθούν σε όλα τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού μηδενικές αρχικές τιμές πλην της σταθεράς της μηχανής, όμως ο φωτογραμμετρικός σταθμός Photomod στον οποίο εκτελέστηκε ο αεροτριγωνισμός, ορίζει ως παραμέτρους της αυτοβαθμονόμησης τις διαφορικές τιμές των διορθώσεων των στοιχείων του εσωτερικού, οπότε δόθηκαν σε όλες τις παραμέτρους μηδενικές διορθώσεις).

Πίνακας 2.3: Εσωτερικός προσανατολισμός μηχανής, πριν και μετά την αυτοβαθμονόμηση

Εσωτερικός προσανατολισμός (πιστοποιητικό βαθμονόμησης)	Εσωτερικός προσανατολισμός (μετά την αυτοβαθμονόμηση)
$c = 59.7990 \text{ mm}$	$c = 60.2159 \text{ mm}$
$x_o = -0.0025 \text{ mm}$	$x_o = -0.2237 \text{ mm}$
$y_o = -0.3247 \text{ mm}$	$y_o = -0.3247 \text{ mm}$
$k_0 = 8.57325\text{E-}03$	$k_0 = 0$
$k_1 = -2.01969\text{E-}05$	$k_1 = -1.641736\text{e-}05$
$k_2 = 5.13135\text{E-}09$	$k_2 = 0$

Σημειώνεται ότι στη διαδικασία αυτοβαθμονόμησης ορίστηκε $k_0=0$ με αντίστοιχη διαφοροποίηση της τιμής της σταθεράς της μηχανής (απορρόφηση του γραμμικού όρου της ακτινικής διαστρόφης από τη σταθερά της μηχανής).

Παρατηρήθηκε, επιπλέον, ότι η τελική τιμή του συντελεστή k_2 είναι μηδενική. Ωστόσο, ο νέος εσωτερικός προσανατολισμός κρίθηκε σωστός, καθώς χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός πλεοναζουσών και αξιόπιστων παρατηρήσεων.

Για τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν ως φωτοσταθερά για την αυτοβαθμονόμηση, υπολογίστηκαν τα απομείνοντα σφάλματα, τα οποία προκύπτουν από τις διαφορές μεταξύ των μετρήσεων (GPS) και των διορθωμένων συντεταγμένων που υπολογίζονται βάσει των παραμέτρων της συνόρθωσης. Το μέγεθος των σφαλμάτων χαρακτηρίζει την ακρίβεια της συνόρθωσης, εν προκειμένω και την ακρίβεια με την οποία προσδιορίστηκαν τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής. Τα εν λόγω σφάλματα είναι η μέση τιμή της μετάθεσης των σημείων κατά X, Y και Z, που εκφράζει το συστηματικό σφάλμα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της θέσης τους κατά τις τρεις διαστάσεις, αλλά και το συνολικό, που περιλαμβάνει τόσο τα τυχαία, όσο και τα συστηματικά σφάλματα, καθώς επίσης, και η τυπική απόκλιση που αποτελεί δείκτη μόνο των τυχαίων σφαλμάτων, και προκύπτει αν οι μετρήσεις απαλλαχθούν από τα συστηματικά τους σφάλματα. Στην περίπτωση σύγκρισης μεταξύ δυο σετ μετρήσεων, εκ των οποίων το ένα θεωρείται σταθερό, δηλαδή προσδιορισμένο με μεγαλύτερη ακρίβεια (εν προκειμένω, ως σταθερές, δηλαδή ορθές, λαμβάνονται οι επίγειες μετρήσεις, με τις οποίες συγκρίνονται οι συνορθωμένες συντεταγμένες των σημείων), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$$

όπου v η διαφορά του εναπομείναντος σφάλματος της μέτρησης x_i από το μέσο εναπομείνον σφάλμα, δηλαδή το συστηματικό σφάλμα κατ' αυτή τη διεύθυνση, και n το πλήθος των παρατηρήσεων. Όσον αφορά το RMS και το συστηματικό σφάλμα, προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (i_{j_{calc}} - i_{j_{ground}})^2}{N}}, \quad \text{Systematic Error}_i = \frac{\sum_{j=1}^N (i_{j_{calc}} - i_{j_{ground}})}{N}$$

όπου αθροίζονται οι διαφορές των συντεταγμένων των δυο σετ μετρήσεων, συγκεκριμένα στην προκειμένη περίπτωση $i_{j_{calc}}$ είναι οι συνορθωμένες συντεταγμένες και $i_{j_{ground}}$ οι επίγειες μετρήσεις, ενώ N είναι και πάλι το πλήθος των παρατηρήσεων. (Πίνακας 2.4).

Πίνακας 2.4: Σφάλματα φωτοσταθερών κατά την αυτοβαθμονόμηση

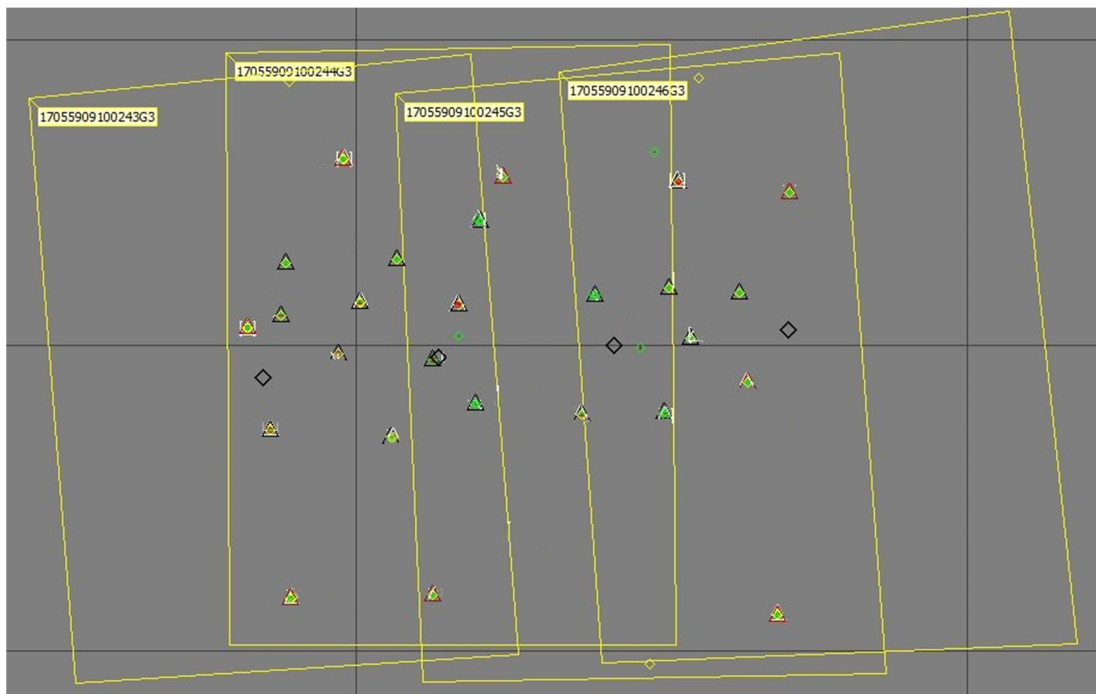
RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
0.034	0.038	0.006	0.051
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
0.034	0.039	0.006	0.052

Στη συνέχεια με το διορθωμένο εσωτερικό προσανατολισμό, α-priori ακρίβεια των μετρήσεων 10 cm, και ακρίβεια σκόπευσης στην εικόνα 1 pixel, δηλαδή 6.8 μm, πραγματοποιήθηκε μια ακόμη επίλυση του αεροτριγωνισμού για τις τέσσερις εικόνες, με λιγότερα φωτοσταθερά για να υπάρξει η δυνατότητα ελέγχου της συνόρθωσης.

Η επίλυση έγινε με τη μέθοδο της δέσμης, και χρήση 9 φωτοσταθερών κατανεμημένων ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του μπλοκ, και 18 σημείων ελέγχου, επίσης επιλεγμένων έτσι ώστε να καλύπτουν όλη την περιοχή του μοντέλου για να μπορεί να γίνει πλήρης έλεγχος (Εικόνα 2.3).

Πίνακας 2.5: Εξωτερικοί προσανατολισμοί εικόνων

Εικόνα	X_o (m)	Y_o (m)	Z_o (mm)	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
243	537693.8560	4065894.3096	2529.151	0.608	-0.335	-85.425
244	538269.7979	4065961.0669	2526.962	1.099	-0.526	-89.517
245	538845.0073	4065998.2610	2524.540	-1.714	-0.865	-86.678
246	539415.5740	4066052.1697	2528.372	-0.758	-0.772	-85.005



Εικόνα 2.3: Κατανομή των σημείων που συμμετέχουν στον α/τ. Με μαύρους ρόμβους συμβολίζονται τα κέντρα λήψης, με κόκκινα τρίγωνα τα φωτοσταθερά, και με μαύρα τρίγωνα τα σημεία ελέγχου

Τόσο για τα σημεία που συμμετείχαν στη συνόρθωση (φωτοσταθερά), όσο και για εκείνα που προσδιορίστηκαν κατόπιν αυτής από τις παραμέτρους της αεροτριγωνισμού (σημεία ελέγχου),

πραγματοποιήθηκε έλεγχος των αποτελεσμάτων, με υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, της μέσης μετάθεσης και της τυπικής απόκλισης κατά τις τρεις διαστάσεις καθώς και τα συνολικά σφάλματα.

Πίνακας 2.6: Σφάλματα φωτοσταθερών κατά την τελική επίλυση του αεροτριγωνισμού

Τελική επίλυση – Σφάλματα φωτοσταθερών			
RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
0.032	0.021	0.006	0.039
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
0.034	0.022	0.006	0.041
Τελική επίλυση – Σφάλματα σημείων ελέγχου			
RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
0.207	0.206	0.483	0.564
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
0.199	0.212	0.452	0.538

Στην προκειμένη περίπτωση, τόσο στη συνόρθωση με αυτοβαθμονόμηση, όσο και στην τελική επίλυση, επειδή το συστηματικό σφάλμα των μετρήσεων κρίθηκε αμελητέο, παρατηρήθηκε εύλογα, σχεδόν ταύτιση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και της τυπικής απόκλισης, που σημαίνει πρακτικά ότι τα σφάλματα των μετρήσεων έχουν τυχαίο χαρακτήρα.

Παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση στα αποτελέσματα των σφαλμάτων των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου, τα μεν πρώτα δεν ξεπερνούν τα 3cm, ενώ τα δεύτερα είναι της τάξης των 20-50cm, γεγονός που δείχνει ότι κατά τη συνόρθωση το σύστημα εξαναγκάστηκε να προσαρμόσει τη λύση στα φωτοσταθερά, συνεπώς, τα σημεία ελέγχου είναι πιο ενδεικτικά για την ακρίβεια της συνόρθωσης. Τα σφάλματα των σημείων ελέγχου είναι εντός του αποδεκτού ορίου, καθώς δεδομένης της ανάλυσης των αρχικών εικόνων, δηλαδή του μεγέθους του pixel των 30cm, δε θα μπορούσε να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια από αυτήν.

Ακόμη, ένας επιπλέον δείκτης της ακρίβειας της συνόρθωσης είναι η τιμή σ_0 , που υπολογίζει το λογισμικό Photomod για τη συνόρθωση κατά δέσμες. Στην περίπτωση που η τιμή του σ_0 είναι κοντά στη μονάδα ($\pm 30\%$), η a-priori εκτίμηση των βαρών ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και οι παρατηρήσεις δεν περιέχουν σημαντικά συστηματικά σφάλματα.

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N_t + N_g} \left(\sum_{i=1}^{N_t} \left[\left(\frac{\Delta x_i^{im}}{s_{x_i}^{im}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i^{im}}{s_{y_i}^{im}} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^{N_g} \left[\left(\frac{\Delta X_i^g}{s_{X_i}^g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_i^g}{s_{Y_i}^g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta Z_i^g}{s_{Z_i}^g} \right)^2 \right] \right)$$

Ο δείκτης σ_0 υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση και είναι συνάρτηση του πλήθους των παρατηρήσεων, της a-priori ακρίβειας αυτών καθώς και των απομενόντων σφαλμάτων τους μετά τα συνόρθωση, στην εικόνα ($Nt, S^{im}, \Delta X^g, \Delta Y^g, \Delta Z^g$) και στο έδαφος ($Ng, S^g, \Delta x^{im}, \Delta y^{im}$) αντίστοιχα. Αν τα εναπομένοντα σφάλματα ($\Delta X^g, \Delta Y^g, \Delta Z^g, \Delta x^{im}, \Delta y^{im}$) είναι κοντά στην a-priori ακρίβεια που τέθηκε (S^{im}, S^g) τότε οι αντίστοιχοι όροι αναμένεται να είναι κοντά στη μονάδα. Συνεπώς, αν το σ_0 προκύψει μεγαλύτερο της μονάδας, αυτό σημαίνει πρακτικά ότι υπερεκτιμήθηκαν οι a-priori ακρίβειες των μετρήσεων, ενώ αντίθετα αν το σ_0 προκύψει μικρότερο της μονάδας, η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν καλύτερη από αυτή που τέθηκε, όπως συνέβη και στην προκειμένη περίπτωση, όπου προέκυψε $\sigma_0=0.417$



Εικόνα 2.4: Συνορθωμένο μπλοκ εικόνων στο περιβάλλον του λογισμικού Photomod

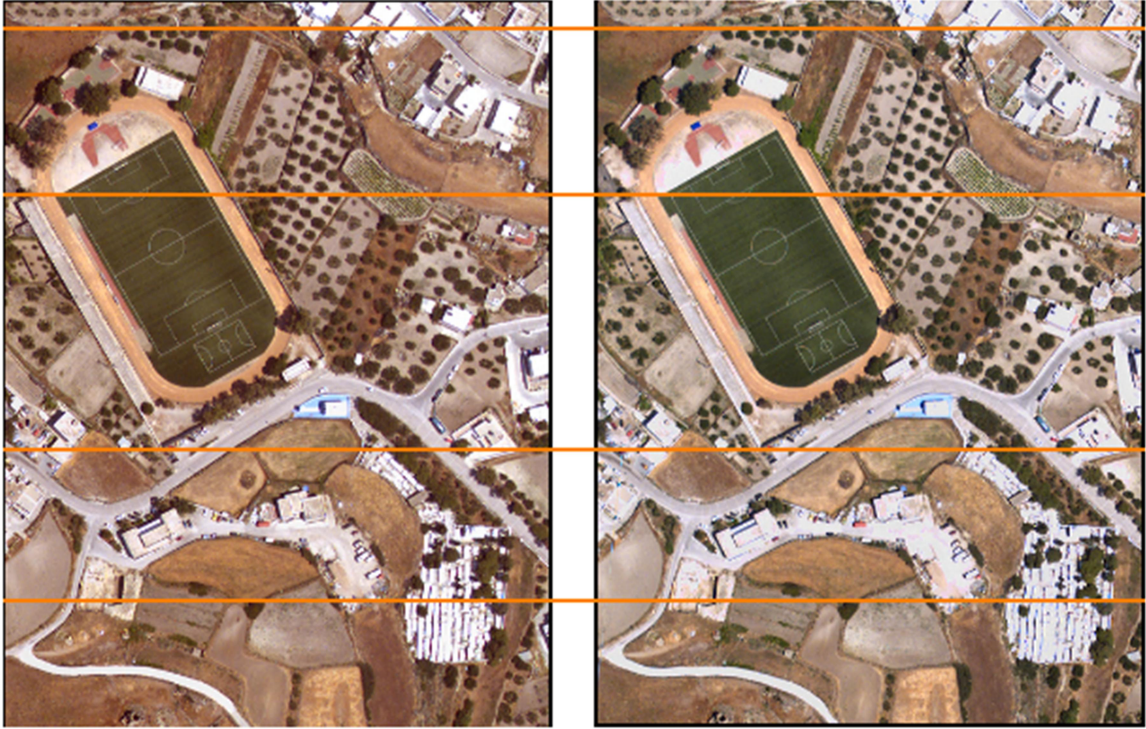
2.6. Επιπολική επανασύσταση εικόνων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε επιπολική επανασύσταση των εικόνων, ώστε να διευκολυνθεί η συνταύτιση των σημείων κατά την παραγωγή των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης. Για την κανονικοποίηση των εικόνων απαιτούνται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής καθώς και τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού κάθε στερεοζεύγους ή εναλλακτικά ο εξωτερικός προσανατολισμός της κάθε εικόνας. Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε περιβάλλον Matlab (Αδάμ,

2011), με στοιχεία εισόδου τον εσωτερικό προσανατολισμό της μηχανής (Πίνακας 2.3), και τους εξωτερικούς προσανατολισμούς των εικόνων (Πίνακας 2.5), όπως προέκυψαν από την επίλυση του αεροτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση.

Σημειωτέον ότι η βέλτιστη επιλογή δεδομένων εισόδου για την επανασύσταση των εικόνων, είναι εν γένει ο σχετικός προσανατολισμός τους, και όχι οι εξωτερικοί, καθώς είναι προφανές ότι στη δεύτερη περίπτωση, εισάγονται σφάλματα από διαδικασίες που έχουν προηγηθεί (σφάλματα επίγειων μετρήσεων, σκόπευσης των φωτοσταθερών στις εικόνες, και σφάλματα επίλυσης αεροτριγωνισμού). Στην προκειμένη περίπτωση, κατόπιν σύγκρισης των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκαν πριν τις μετρήσεις, από τις επιπολικές εικόνες που προέκυψαν με χρήση του σχετικού προσανατολισμού, με τους αντίστοιχους χάρτες που δημιουργήθηκαν από τις κανονικοποιημένες εικόνες που προέκυψαν με χρήση των εξωτερικών προσανατολισμών, δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές ποιοτικές διαφορές, άρα οι διαδικασίες που προηγήθηκαν της επανασύστασης στη δεύτερη περίπτωση, δεν εισήγαγαν σημαντικά σφάλματα, συνεπώς δεν κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ο σχετικός προσανατολισμός αντί των εξωτερικών για την κανονικοποίηση των εικόνων.

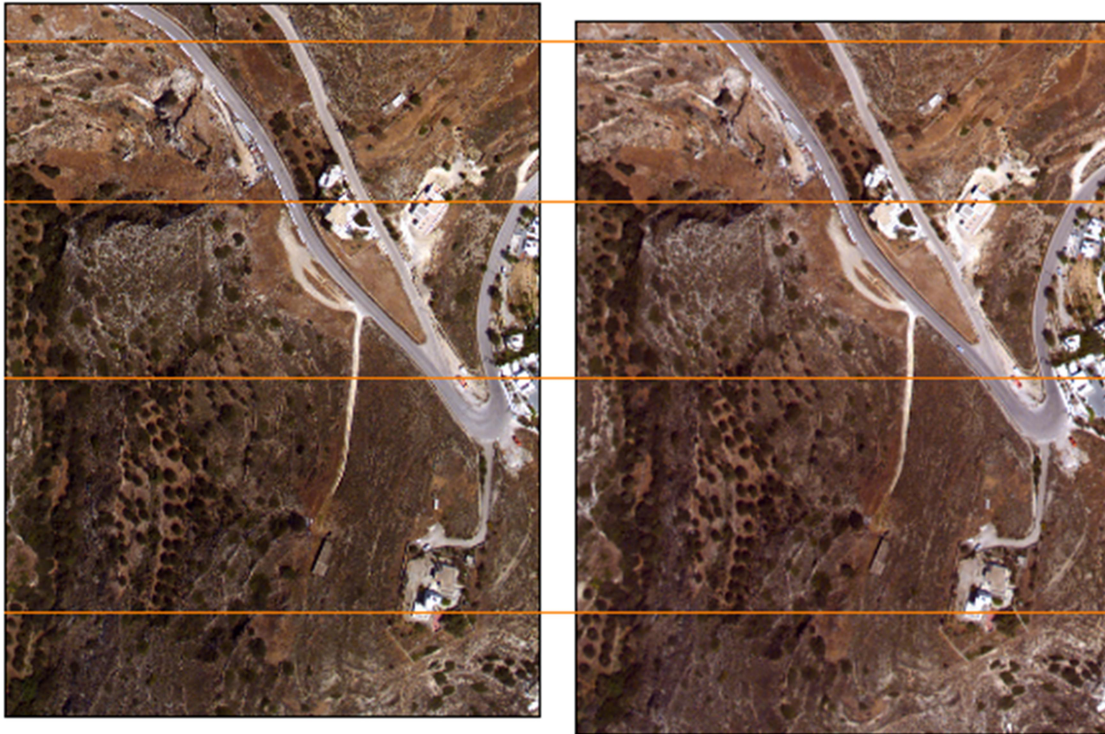
Για την αξιολόγηση της διαδικασίας της επιπολικής επανασύστασης, πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος σχεδιάζοντας στις κανονικοποιημένες εικόνες ενδεικτικά κάποιες επιπολικές ευθείες, οι οποίες αναμένεται θεωρητικά να συμπίπτουν και να περιλαμβάνουν τα ομόλογα σημεία.



Εικόνα 2.5: Στερεοζεύγος επιτολικών εικόνων 243-244



Εικόνα 2.6: Στερεοζεύγος επιτολικών εικόνων 244-245



Εικόνα 2.7: Στερεοζεύγος επιπολικών εικόνων 245-246

Επιπλέον, η διαδικασία της επανασύστασης ελέγχθηκε μετρώντας τις εικονοσυντεταγμένες για μια σειρά ζευγών ομόλογων σημείων, διάσπαρτων στις κανονικοποιημένες εικόνες. Ιδανικά οι γ εικονοσυντεταγμένες των ομόλογων σημείων πρέπει να ταυτίζονται, ή έστω να διαφέρουν ελάχιστα, ενώ εφόσον η διαδικασία εκτελείται με τον ίδιο τρόπο σε ολόκληρη την εικόνα, θα αρκούσε ένα μόνο σημείο για τον έλεγχο. Στην πράξη, σε κάποιες περιπτώσεις διαπιστώθηκε πράγματι να διαφέρουν πολύ λίγο, σε κάποιες άλλες, ωστόσο, περισσότερο. Καθίσταται σαφές εκ των αποτελεσμάτων, ότι υπάρχει συστηματική διαφορά στις γ εικονοσυντεταγμένες των δυο εικόνων, η οποία θα μπορούσε να διαπιστωθεί και με ένα μόνο σημείο, ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμο να μετρηθούν περισσότερα, καθώς ο οπτικός έλεγχος, με τη σχεδίαση των επιπολικών ευθειών, δεν έδειξε την ίδια συστηματικότητα παντού, αλλά κακή ευθυγράμμιση παρατηρήθηκε κυρίως στα άκρα των εικόνων.

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα ελέγχου εικονοσυντεταγμένων ομόλογων σημείων μετά την επιπολική επανασύσταση των εικόνων

		γ (pixels)	γ' (pixels)	$\gamma'-\gamma$
Στερεοζεύγος 243-244	Εικονοσημείο 1	52.4	53.8	1.4
	Εικονοσημείο 2	73.1	74.5	1.4
	Εικονοσημείο 3	97.2	98.6	1.4
	Εικονοσημείο 4	20.6	21.9	1.3
	Εικονοσημείο 5	57.1	58.6	1.5
Στερεοζεύγος 244-245				
	Εικονοσημείο 1	62.0	67.4	5.4
	Εικονοσημείο 2	79.4	84.7	5.3
	Εικονοσημείο 3	30.0	35.3	5.3
	Εικονοσημείο 4	14.5	20.0	5.5
	Εικονοσημείο 5	60.2	65.6	5.4
Στερεοζεύγος 245-246				
	Εικονοσημείο 1	72.8	69.2	-3.6
	Εικονοσημείο 2	27.5	23.9	-3.6
	Εικονοσημείο 3	76.1	72.6	-3.5
	Εικονοσημείο 4	45.9	42.4	-3.5
	Εικονοσημείο 5	47.1	43.6	-3.5

Η ακρίβεια της επιπολικής επανασύστασης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, οι κυριότεροι όμως είναι η ακρίβεια υπολογισμού του εξωτερικού και εσωτερικού προσανατολισμού, συμπεριλαμβανομένης της ακτινικής διαστρόφης του φακού, η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιείται για την απόδοση των τιμών φωτεινότητας των εικονοψηφίδων, αλλά και η ανάλυση των εικόνων.

2.7. Παραγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης

Με εφαρμογή του ημικαθολικού αλγορίθμου StereoSGBM (Stereo Semi Global Block Matching), σε γλώσσα προγραμματισμού Visual C++ της Microsoft, και χρήση της βιβλιοθήκης OpenCV, πραγματοποιήθηκε στέρεο συνταύτιση των κανονικοποιημένων εικόνων για την εξαγωγή πινάκων ψηφιακής παράλλαξης (disparity map). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλέχθηκε μεταξύ άλλων, επειδή από σχετική βιβλιογραφία και από πρακτική εφαρμογή στο πλαίσιο προηγούμενης εργασίας (Μαλτέζος, 2013), κρίθηκε κατάλληλος για εφαρμογές με εναέριες εικόνες, αλλά και απλούστερης λογικής σε σχέση με τους καθολικούς αλγορίθμους που παρουσιάζουν υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Η διαδικασία παραγωγής χάρτη ψηφιακής παράλλαξης εκτελείται προφανώς στο επικαλυπτόμενο τμήμα ζεύγους εικόνων. Ο πίνακας ψηφιακής παράλλαξης αντιστοιχεί στην αριστερή εικόνα του στερεοζεύγους (εικόνα αναφοράς), και περιέχει τις τιμές της κατά x συνιστώσας της ψηφιακής παράλλαξης για κάθε ζεύγος ομόλογων σημείων, οι οποίες ουσιαστικά αποτυπώνονται σε μια εικόνα με τόνους του γκρι, όπου δηλαδή, κάθε τόνος αντιστοιχεί στο υψόμετρο του εκάστοτε σημείου.

Καθότι οι εικόνες είναι πολύ μεγάλες και καθίσταται πολύ δύσκολο να παραχθεί ενιαίος πίνακας ψηφιακής παράλλαξης για όλη την περιοχή (αφενός λόγω αδυναμίας του προγράμματος να διαχειριστεί τόσο μεγάλες εικόνες, αφετέρου λόγω αδυναμίας του αλγορίθμου να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τόσο σύνθετο ανάγλυφο τέτοιας έκτασης), η διαδικασία εφαρμόστηκε τμηματικά, με στόχο τα παραγόμενα μοντέλα να συνενωθούν εν τέλει σε ένα ενιαίο. Για να καταστεί αυτό δυνατό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην εξασφάλιση επαρκούς επικάλυψης μεταξύ των διαδοχικών μοντέλων.

Κατόπιν μιας σειράς δοκιμών που πραγματοποιήθηκε πριν τις μετρήσεις, επιλέχθηκε το βέλτιστο μέγεθος μάσκας, δηλαδή παραθύρου αναφοράς συνεπώς και αναζήτησης κατά το στάδιο της συνταύτισης (προαπαιτούμενο του λογισμικού στο οποίο εκτελέστηκε η συνταύτιση, είναι οι εικόνες του στερεοζεύγους να είναι ιδίων διαστάσεων), καθώς και η βέλτιστη περιοχή εργασίας. Η περιοχή που καλύπτουν οι εικόνες, χαρακτηρίζεται από μεταβαλλόμενο ανάγλυφο, με έντονες αλλαγές κλίσης στο έδαφος, καθώς παρατηρούνται από ήπιες πεδινές εκτάσεις, μέχρι σχετικά έντονοι ορεινοί σχηματισμοί, που δημιουργούν μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Έντονες εναλλαγές παρουσιάζει επίσης και στην κάλυψη γης, καθώς εντός της περιοχής εντοπίζονται από αγροτικές εκτάσεις μέχρι πυκνοδομημένος αστικός ιστός. Επιλέχθηκε, λοιπόν, μια ζώνη κατά μήκος και των τεσσάρων εικόνων, που να παρουσιάζει αρκετές εναλλαγές αναγλύφου ώστε να εξετασθεί πόσο διαφορετικά επιδρά ο αλγόριθμος ανάλογα με τη μορφολογία της περιοχής στην οποία εφαρμόζεται.

Με διαδοχική μετακίνηση της μάσκας κατά μήκος της ζώνης, περικοπή του περιλαμβανομένου τμήματος στην εικόνα αναφοράς (με χρήση του λογισμικού Photoshop), και εν συνεχεία εύρεση και περικοπή της αντίστοιχης περιοχής στην εικόνα αναζήτησης, δημιουργήθηκαν δεκατρία ζεύγη εικόνων, διαστάσεων 1355x1615 pixels, δηλαδή περίπου 400x500 m. Σε κάθε μοντέλο πραγματοποιήθηκε συνταύτιση και μέσω αυτής εξαγωγή του αντίστοιχου χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Λόγω αποχής από την ιδανική ευθυγράμμιση που θα έπρεπε θεωρητικά να έχουν οι εικόνες μετά την επιπολική επανασύστασή τους, η οποία υπό ιδανικές συνθήκες θα ελαχιστοποιούσε το χρόνο και την περιοχή αναζήτησης ομολογιών κατά την συνταύτιση, χρειάστηκε να γίνουν μετακινήσεις της μάσκας στην εικόνα αναζήτησης, τόσο κατά τη x , όσο και κατά την y διεύθυνση, ώστε να περιληφθεί εντός αυτής η αντίστοιχη περιοχή της εικόνας αναφοράς. Επειδή αυτό δεν κατέστη παντού δυνατό, σε ορισμένες

περιπτώσεις οι εικόνες αναφοράς και αναζήτησης παρουσίαζαν διαφορές, ο αλγόριθμος αδυνατούσε να βρει ομοιογένειες, και αυτό εν τέλει αποτυπώθηκε στον παραγόμενο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης με κενά (μαύρες περιοχές).

Βασικό στάδιο κατά την εξαγωγή των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης είναι η επιλογή των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων του αλγορίθμου. Είναι σαφές ότι δεν έχουν όλες οι παράμετροι εξίσου σημαντική επίδραση. Με εναλλαγή των τιμών των παραμέτρων `number_Of_Disparities`, `pre_Filter_Cap`, `P1`, `P2`, και `disp12MaxDiff` παρατηρήθηκε σημαντικότερη διαφοροποίηση στον παραγόμενο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Επίσης, η επίδραση του αλγορίθμου είναι δυναμική, δηλαδή διαφοροποιείται με ανάλογη διαφοροποίηση των τιμών των παραμέτρων του. Υπ' αυτή την έννοια, είναι προφανές ότι δεν υπάρχουν ιδανικές τιμές για την κάθε παράμετρο, αλλά η επίδραση της κάθε παραμέτρου καθώς και όλων σε συνδυασμό διαφοροποιείται ανάλογα με το ανάγλυφο της περιοχής όπου εφαρμόζεται. Συνεπώς το στάδιο της παραμετροποίησης κρίνεται καθοριστικής σημασίας στη διαδικασία εξαγωγής χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, ώστε ο αλγόριθμος να αποδώσει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Σημειωτέον ότι, κατά τη δημιουργία των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης, είναι πολύ σημαντικό η μετακίνηση της μάσκας για την οριοθέτηση των διαδοχικών μοντέλων, να γίνεται με γνώμονα την εξασφάλιση επαρκούς επικάλυψης μεταξύ αυτών, ώστε να καταστεί δυνατή η εύρεση κοινών σημείων κατά το στάδιο της συνένωσης.

Εντός της επιλεγμένης ζώνης δημιουργήθηκαν συνολικά δεκατρείς (13) χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (Παράρτημα), οι οποίοι κατόπιν 3D ανακατασκευής (Κεφάλαιο 2.13), συνενώθηκαν ως νέφη σημείων με εφαρμογή του ICP (Κεφάλαιο 2.18). Τα αποτελέσματα, ωστόσο, δεν ήταν πολύ ικανοποιητικά, καθώς διαπιστώθηκε συστηματική μετάθεση των δυο μοντέλων σε ορισμένα σημεία των ενώσεων. Εφόσον, λοιπόν, ύστερα από μια σειρά δοκιμών τα αποτελέσματα δε βελτιώθηκαν, κρίθηκε καλύτερο οι περαιτέρω εργασίες για την εξαγωγή των τελικών προϊόντων να γίνουν σε μεμονωμένα μοντέλα και όχι σε ένα ενιαίο, όπως ήταν ο αρχικός στόχος.

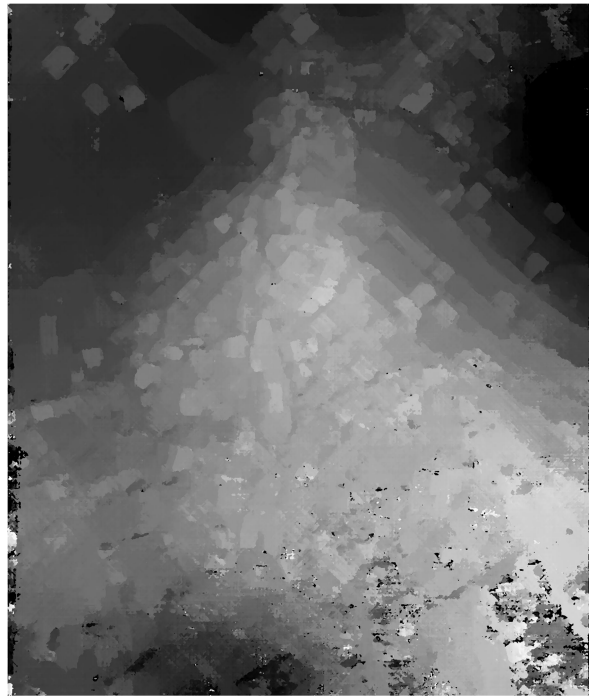
2.8. Επιλογή περιοχής εργασίας

Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν τρία ενδεικτικά μοντέλα, από δυο διαφορετικά στερεοζεύγη, σε περιοχές που παρουσιάζουν διαφορετικό ανάγλυφο, ώστε να φανεί πόσο διαφορετικά επέδρασε ο αλγόριθμος, τι συνεπάγεται αυτό για τα μετέπειτα στάδια επεξεργασίας, καθώς και πως αποτυπώνεται στα τελικά προϊόντα. Παρακάτω παρατίθενται οι αρχικές εικόνες, οι

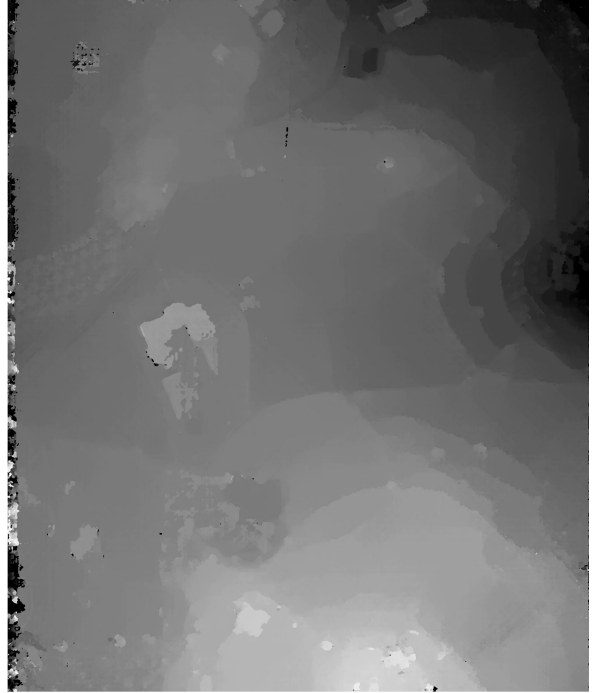
χάρτες ψηφιακής παράλλαξης καθώς και οι τιμές των παραμέτρων από το συνδυασμό των οποίων προέκυψαν τα τελικά μοντέλα.

Σημειώνεται ότι η ανάλυση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης είναι ίδια με την ανάλυση της αρχικής εικόνας από την οποία δημιουργήθηκε, δηλαδή όσο το μέγεθος του pixel της, επομένως 30 cm.

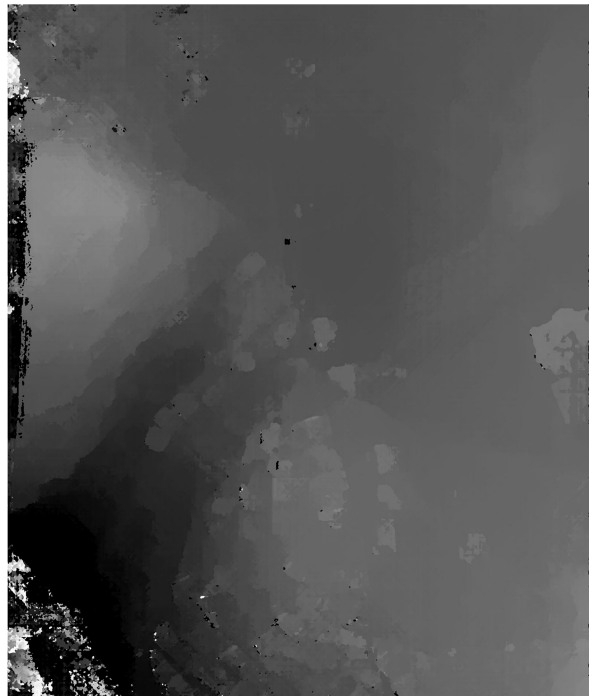
Για την αξιολόγηση της ποιότητας του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, πραγματοποιήθηκε ένας ενδεικτικός οπτικός έλεγχος για να διαπιστωθεί πόσο πιστά έχουν αποδοθεί στο μοντέλο τα απεικονιζόμενα στην αριστερή εικόνα αντικείμενα.



Εικόνα 2.8: Αρχική εικόνα περιοχής με αμιγώς αστική κάλυψη και πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 244-245



Εικόνα 2.9: Αρχική εικόνα αγροτικής περιοχής και πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 243-244



Εικόνα 2.10: Αρχική εικόνα αγροτικής περιοχής με αραιή δόμηση και πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε από το στερεομοντέλο 243-244

Πίνακας 2.8: Τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση

	Αστική περιοχή	Αγροτική περιοχή	Αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση
minDisparity	0*16	0*16	0*16
Number_Of_Disparities	3*16	3*16	5*16
SAD_BT_WindowSize	3	3	3
preFilterCap	3500	1300	3800
uniquenessRatio	1	1	1
P1, P2	10, 100	10, 100	10, 100
speckleWindowSize	0	0	0
speckleRange	0	0	0
disp12MaxDiff	50	15	15

2.9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με διαφοροποίηση των τιμών των παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε η επιλογή των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων σε κάθε περιοχή που εφαρμόζεται, είναι εξαιρετικά σημαντική, για το σκοπό αυτό έπρεπε να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως ανάγλυφο και κάλυψη γης και να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός τιμών με γνώμονα την όσο το δυνατόν πιο πιστή απόδοση του αντικειμένου.

- Σημαντική κρίνεται η επιρροή της παραμέτρου SAD_BT_window_size, καθώς η μεταβολή της τιμής της επηρεάζει την εκτέλεση της μεθόδου κόστους συσχέτισης BT.
- Σημειώνεται πως η κλίμακα των τόνων του γκρι κατά την εξαγωγή κάθε χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, εξαρτάται από την ελάχιστη και μέγιστη ψηφιακή παράλλαξη για την συγκεκριμένη εικόνα όπου εκτελέσθηκε ο αλγόριθμος.
- Η παράμετρος preFilterCap φαίνεται να αποδίδει καλύτερα σε χαμηλότερες τιμές όταν το ανάγλυφο είναι πιο ομαλό, χωρίς απότομες εναλλαγές και κλίσεις εδάφους. Αντίθετα, σε περιπτώσεις έντονου και έντονου αναγλύφου, πιο μεγάλες τιμές κρίνονται καταλληλότερες.
- Η παράμετρος Number_Of_Disparities για τιμές μεγαλύτερες από 4*16, επηρεάζει μόνο τη φωτεινότητα του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, αυξάνοντάς την. Οπότε στις περισσότερες περιπτώσεις διατηρήθηκε σταθερή (συνήθως 3*16), αλλά για την περαιτέρω αξιοποίησή της γινόταν μετάθεση της μάσκας της δεξιάς εικόνας.
- Πρόβλημα θορύβου στους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης υπήρχε, ειδικά στην αστική περιοχή, επομένως οι παράμετροι speckle_window_size, και speckle_range, θα αναμενόταν να έχουν σημαντική επίδραση, βελτιώνοντας μάλιστα το αποτέλεσμα. Στην

πράξη, ωστόσο, όχι μόνο δε μείωσε τον ήδη υπάρχοντα θόρυβο, απεναντίας τον αύξησε (εμφάνιση περισσότερων μαύρων pixels). Όσο μεγαλύτερη διάσταση δοθεί στο παράθυρο αναζήτησης, τόσο αυξάνονται τα μαύρα στίγματα, ενώ για σταθερή διάσταση του παραθύρου, δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μεταβολή με εναλλαγή των τιμών της διαφοράς της ψηφιακής παράλλαξης (speckle range). Επομένως, περισσότερο φαίνεται να επηρεάζει η διάσταση του παραθύρου και όχι η τιμή της διαφοράς, και επειδή η επίδρασή του στην ποιότητα του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης είναι αρνητική, προτιμήθηκε να μη χρησιμοποιηθούν οι εν λόγω παράμετροι.

- Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου `disp12maxdiff` συνέβαλε στην βελτίωση της εικόνας του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης από προβλήματα που οφείλονταν σε αποκρύψεις ή αναντιστοιχίες κατά τη συσχέτιση των εικόνων, καθώς επίσης και από προβλήματα που δημιουργεί η εφαρμογή της μεθόδου κόστους συσχέτισης που, όπως φάνηκε, ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητη κοντά στα όρια των αντικειμένων.
- Χαμηλές τιμές της παράμετρου `pre_filter_cap`, θεωρητικά διατηρούν το θόρυβο σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, μετά από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι στις συγκεκριμένες περιοχές, η εφαρμογή μικρών τιμών προκάλεσε αύξηση του θορύβου, ενώ οι πιο υψηλές βελτίωσαν το αποτέλεσμα (μέχρι περίπου την τιμή 4500, καθώς πιο μεγάλες τιμές οδηγούν σε απώλεια πληροφορίας, και παραμόρφωση των αντικειμένων).
- Οι διαστάσεις του παραθύρου `SAD_BT_WindowSize` πήρε τέτοιες τιμές, ώστε οι αντίστοιχοι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης να είναι συγχρόνως ομαλοί αλλά και ακριβείς.
- Επιπλέον, οι τιμές των παραμέτρων `P1`, `P2` συνετέλεσαν στην ομαλότητα του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης αλλά και στην καλύτερη απόδοση στις περιοχές με έντονες ασυνέχειες βάθους (για παράδειγμα στα περιγράμματα των κτιρίων).

2.10. Συγκριτική θεώρηση αποτελεσμάτων αλγορίθμου στις διάφορες περιοχές

Μια πρώτη εκτίμηση της ποιότητας των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης, μπορεί να γίνει με οπτικό έλεγχο, κάνοντας μια εκτίμηση του ποσοστού των συνταυτισμένων σημείων και των αποκρύψεων, αλλά και εξετάζοντας πόσο πιστά αποδίδονται τα αντικείμενα της αριστερής εικόνας κάθε στερεοζεύγους στον αντίστοιχο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

Στις περιοχές με πιο ήπια τοπογραφία ο αλγόριθμος απέδωσε αρκετά πιστά το ανάγλυφο της περιοχής στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, συνεπώς τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά καλύτερα. Αντίθετα, στην αμιγώς αστική περιοχή, που είναι πιο πυκνοδομημένη και πιο σύνθετη η σκηνή, ο αλγόριθμος έχει αστοχήσει περισσότερο, καθώς κατέστη πιο δύσκολο να

περιγράψει με σαφήνεια τα κτίρια (ασάφεια στις ακμές, παραμορφωμένα αντικείμενα, οι ευθείες έχουν γίνει καμπύλες), τα όρια των δρόμων και τις περιοχές με βλάστηση, με συνέπεια μεγαλύτερη απώλεια πληροφορίας, αστοχία όπου υπήρχε μεγάλη ασυνέχεια βάθους, και συσσώρευση περισσότερων σημείων που έχουν συνταυτιστεί λάθος, στα οποία έχει αποδοθεί, δηλαδή, εσφαλμένη τιμή υψομέτρου (outliers).

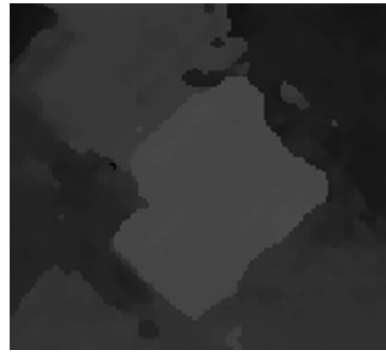
2.11. Δυσκολίες διαδικασίας συνταύτισης – Αστοχίες αλγορίθμου

- Σφάλματα κατά την επιπολική επανασύσταση δυσχεραίνουν τη διαδικασία της συνταύτισης, εφόσον συνεπάγονται ατελή ευθυγράμμιση των εικόνων, δυσκολία στη σωστή τοποθέτηση της μάσκας στη βέλτιστη θέση της εικόνας αναζήτησης, κατ' επέκταση αδυναμία εύρεσης ομολογιών για όλα τα σημεία της εικόνας αναφοράς και δημιουργία κενών, ή εσφαλμένων αντιστοιχιών στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.
- Οι ραδιομετρικές διαφορές στις δυο εικόνες δεν ήταν αμελητέες, γεγονός που αποτέλεσε έναν επιπλέον παράγοντα που επέδρασε αρνητικά στη διαδικασία συνταύτισης. Επιπλέον, στις εικόνες παρατηρήθηκαν ραδιομετρικές παραμορφώσεις, όπως θόλωμα, καμένα pixels, που δε βοήθησαν στην καλή εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων SAD και BT.
- Εντοπίστηκαν άσπρες περιοχές κοντά σε ασυνέχειες βάθους, και μαύρες περιοχές εκεί που υπήρχαν αποκρύψεις ή γενικότερα αναντιστοιχίες κατά τη συνταύτιση. Μαύρα pixels υποδηλώνουν ύπαρξη αποκρύψεων, λάθος ψηφιακή παράλλαξη ή αδυναμία εύρεσης ομολογίας στη δεξιά εικόνα. Όλα αυτά μπορεί να οφείλονται στο έντονο ανάγλυφο που συνθέτει ειδικά το πυκνοδομημένο αστικό τοπίο, δημιουργώντας προοπτικές παραμορφώσεις που συνεπάγονται αποκρύψεις και σκιές, και δυσχεραίνουν τη διαδικασία της συνταύτισης.
- Διαπιστώθηκε απώλεια πληροφορίας στις απότομες εναλλαγές του αναγλύφου για παράδειγμα στις ακμές των αντικειμένων (Εικόνα 2.11). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιοχές αυτές κάποια σημεία συνταυτίστηκαν με την ψηφιακή παράλλαξη του αντικειμένου στο εμπροσθεν μέρος της σκηνής, ενώ τα υπόλοιπα συνταυτίστηκαν με τα σημεία στο πίσω μέρος της σκηνής. Κατά συνέπεια τα όρια των αντικειμένων αλλοιώθηκαν και χάθηκε ένα μέρος της πληροφορίας της περιοχής.
- Αδυναμία εύρεσης ομολογιών σε περιοχές με αποκρύψεις, η οποία αποτυπωνόταν στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης είτε με κενά, είτε με εσφαλμένες αντιστοιχίσεις σημείων, δηλαδή εσφαλμένη απόδοση υψομέτρων (παραδειγματος χάριν, οι σκιές που εντοπίζονταν στις πλαϊνές περιοχές των κτιρίων, στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης αποτυπώνονταν ως προεκτάσεις της οροφής (Εικόνα 2.14)).

- Επαναλαμβανόμενα πρότυπα δυσχεραίνουν τη διαδικασία συνταύτισης, ο αλγόριθμος δυσκολεύεται να διαχωρίσει τις επιφάνειες, και τις εκλαμβάνει ως μια ενιαία (παραδείγματος χάριν γειτονικές οροφές κτιρίων, φυλλώματα δέντρων).
- Σε ορισμένες περιοχές με απότομες αλλαγές στο ανάγλυφο ο αλγόριθμος έχει χάσει την ασυνέχεια βάθους (π.χ. θεωρώντας το κτίριο και τμήμα του εδάφους μπροστά από αυτό ως ενιαίο υψομετρικά επίπεδο) (Εικόνα 2.12)
- Αντικείμενα με ελλiptή υφή (πχ στέγη κτιρίου) δημιουργούν ασυνέχειες στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, οι οποίες αποτυπώνεται με παραμορφωμένες ακμές, και τραβηγμένα όρια (Εικόνα 2.13).
- Οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που προέκυψαν παρουσίασαν προβλήματα κυρίως σε περιοχές κοντά στα όρια των αντικειμένων, λόγω της χρήσης των παραμετρικών μεθόδων που αποτελεί χαρακτηριστική αδυναμία τους.



(α)

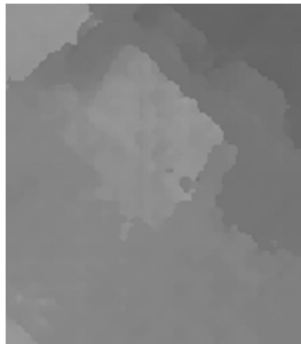


(β)

Εικόνα 2.11: (α) Αρχική εικόνα (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2.12: (α) Αρχική εικόνα (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (γ) Νέφος σημείων



(α)



(β)

Εικόνα 2.13: (α) Αρχική εικόνα (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης



(α)



(β)

Εικόνα 2.14: (α) Αρχική εικόνα (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης

Σημειώνεται ότι, πρακτικά οι αστοχίες στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης οδηγούν στη δημιουργία περισσότερων outliers, σημείων δηλαδή, που φέρουν λάθος υψομετρική πληροφορία, συνιστώντας θόρυβο στο παραγόμενο μοντέλο, δυσχεραίνοντας τη διαδικασία της γεωαναφοράς του (με ενδεχόμενη λάθος σκόπευση των φωτοσταθερών και λάθος εκτέλεση του μετασχηματισμού), με απόρροια την εξαγωγή κακής ποιότητας DTM, άρα και κακής ποιότητας ορθοφωτογραφίας.

2.12. Ποιότητα ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από πυκνή συνταύτιση σημείων

Η ποιότητα ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την οριζοντιογραφική και την υψομετρική ακρίβεια. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια εξαρτάται άμεσα από την αντίστοιχη ακρίβεια των δεδομένων από τα οποία παράχθηκε το μοντέλο (στην περίπτωση της πυκνής συνταύτισης, από την ανάλυση των αρχικών εικόνων). Σε κλασικές

φωτογραμμετρικές εφαρμογές, για τη δημιουργία του DTM πραγματοποιούνται μετρήσεις επί των στερεομοντέλων, που δημιουργούνται με την επίλυση του αεροτριγωνισμού, η αβεβαιότητα της οποίας, συνεπώς, συσσωρεύεται στο παραγόμενο μοντέλο. Τόσο η αβεβαιότητα των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών, όσο και η αβεβαιότητα μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων των σημείων που συμμετέχουν στη συνόρθωση, συνιστούν παράγοντες που δημιουργούν σφάλμα στον προσδιορισμό της απόλυτης θέσης του στερεομοντέλου στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, το οποίο εν τέλει, μεταφράζεται σε οριζοντιογραφική αβεβαιότητα στο παραγόμενο ψηφιακό μοντέλο. Όλα αυτά ασφαλώς επηρεάζουν και την υψομετρική ακρίβεια που κυρίως μας ενδιαφέρει.

Κατ' αντιστοιχία, η υψομετρική ακρίβεια ενός μοντέλου αναγλύφου σχετίζεται με την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων, είναι όμως και άμεσα συνυφασμένη με τη διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή του. Με την κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία, η υψομετρική αβεβαιότητα στην απόλυτη θέση των στερεομοντέλων από τον α/τ, η αβεβαιότητα εκτίμησης της τρίτης διάστασης από τους αλγορίθμους αυτόματης εύρεσης ομοιοτήτων, καθώς και τα σφάλματα κατά τη διόρθωση του αυτόματα εξαχθέντος DSM, ευθύνονται κατά κύριο λόγο για τις υψομετρικές αποκλίσεις και ελλείψεις του μοντέλου.

Στην περίπτωση εξαγωγής DSM μέσω πυκνής συνταύτισης σημείων, δεν υφίσταται τέτοια συσσώρευση σφαλμάτων λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης, όσον αφορά τη συλλογή της υψομετρικής πληροφορίας, ωστόσο αν και εν γένει μπορεί να αποφευχθεί, υπάρχει η πιθανότητα να συμπεριληφθεί στην ευρύτερη διαδικασία, η επίλυση του α/τ, μέσω της χρήσης των εξωτερικών προσανατολισμών των εικόνων ως στοιχείων εισόδου για την επιπολική επανασύσταση τους, με την αβεβαιότητα που η εν λόγω διαδικασία συνεπάγεται. Επιπλέον, στο μοντέλο υπεισέρχεται και η αβεβαιότητα του μετασχηματισμού που πραγματοποιήθηκε για τη γεωαναφορά του. Παρόλα αυτά, ακόμη και συμπεριλαμβάνοντας τους εξωτερικούς προσανατολισμούς, η διαδικασία παραγωγής μοντέλου αναγλύφου μέσω πυκνής συνταύτισης εξακολουθεί να είναι κατά βάση μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, και συνεπώς, περιορίζεται μια σημαντική πηγή σφαλμάτων που είναι ο ανθρώπινος παράγοντας.

Άρα στα παραγόμενα μοντέλα, οι καθοριστικοί, για την τελική ακρίβεια, παράγοντες, σε μια ιδανική και πλήρως αυτοματοποιημένη εφαρμογή, είναι η ανάλυση των αρχικών εικόνων, το ανάγλυφο του αντικειμένου που απεικονίζουν, και βεβαίως, η αβεβαιότητα των αλγορίθμων συνταύτισης που εφαρμόζονται.

2.13. 3D ανακατασκευή – Γεωαναφορά

Η αξιολόγηση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης που έχει προκύψει από κάποιον αλγόριθμο συσχέτισης μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους, όπως για παράδειγμα με τη χρήση δεικτών (ποσοστό κακώς συνταυτισμένων σημείων, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των ψηφιακών παραλλάξεων που προσδιόρισε ο αλγόριθμος, και των αντίστοιχων που προέκυψαν από δεδομένα υψηλής ακρίβειας, π.χ. με σαρωτή), με οπτικό έλεγχο ή πιο πρακτικά με ανακατασκευή του αντικειμένου και σύγκρισή του με κάποιο ήδη υπάρχον ψηφιακό μοντέλο επιφανείας του ή νέφος σημείων από συστήματα LIDAR ή επίγειους σαρωτές.

Οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης, που προέκυψαν μέσω πυκνής συνταύτισης σημείων, αποτελούν στην ουσία τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας των αντίστοιχων περιοχών, στο σύστημα της βάσης λήψης των εικόνων, τα οποία επομένως, σε σχέση με μοντέλα προσανατολισμένα σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα έχουν διαφορετική κλίμακα, προσανατολισμό και θέση. Ως εκ τούτου, για να καταστεί δυνατός ο έλεγχος των παραχθέντων μοντέλων, μέσω σύγκρισης με τα αντίστοιχα που δημιουργήθηκαν κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης με το σύστημα Lidar, πρέπει τα μοντέλα να βρίσκονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Εφόσον το σύστημα αναφοράς των επίγειων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι το ΕΓΣΑ 87, και δεδομένου ότι τα φωτοσταθερά αυτά θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα στάδια, προτιμήθηκε τα τελικά προϊόντα να έχουν αυτό ως σύστημα αναφοράς, συνεπώς και ο έλεγχος να πραγματοποιηθεί στο ίδιο σύστημα, άρα και το υπάρχον μοντέλο από LIDAR να μετασχηματιστεί στο ΕΓΣΑ 87.

Σε πρώτη φάση το μοντέλο από πυκνή συνταύτιση μετασχηματίστηκε από το σύστημα της βάσης λήψης των εικόνων στο ΕΓΣΑ 87, και εν συνεχεία, το μοντέλο από LIDAR μετασχηματίστηκε από το WGS84 στο ΕΓΣΑ 87. Στην πρώτη περίπτωση η μετατροπή του συστήματος πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή 3D μετασχηματισμού ομοιότητας, δηλαδή ενός 7-παραμετρικού μετασχηματισμού ο οποίος περιλαμβάνει τρεις (3) μεταθέσεις, τρεις (3) στροφές και μία (1) κλίμακα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το μετασχηματισμό του μοντέλου από LIDAR περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3.4).

Σημειωτέον ότι, η ανακατασκευή του μοντέλου και η γεωαναφορά του κρίθηκαν απαραίτητα όχι μόνο για να καταστεί δυνατή μια σειρά ελέγχων, για την αξιολόγηση της ποιότητας που επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης, αλλά και για την αξιοποίησή του ως ψηφιακού μοντέλου επιφανείας στην παραγωγή ορθοφωτογραφιών.

Η 3D ανακατασκευή του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, είναι ουσιαστικά η διαδικασία μετάβασης από εικόνα (raster μορφή) σε νέφος σημείων (point cloud). Εφόσον, μάλιστα, κάθε

3D σημείο αντιστοιχεί σε γνωστό εικονοσημείο, είναι δυνατόν να αποδοθεί και τιμή χρώματος (RGB) στο νέφος. Η διαδικασία ανακατασκευής πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab (Μαλτέζος, 2013), ενώ για την οπτικοποίηση του παραγόμενου μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά κατάλληλα για την επεξεργασία αντίστοιχων προϊόντων, (Geomagic, CloudCompare). Με δεδομένα εισόδου το χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, από τον οποίο για κάθε pixel, δηλαδή κάθε θέση (x,y) λαμβάνεται η τιμή του τόνου του γκριζου, που αντιστοιχεί στη ψηφιακή παράλλαξη, δηλαδή στο υψόμετρο (ανηγμένο σε μια αυθαίρετη υψομετρική κλίμακα), καθώς και την αρχική εικόνα από την οποία για κάθε θέση λαμβάνεται η τιμή του χρώματος (RGB), δημιουργείται ένα νέφος σημείων (κάθε σημείο του οποίου φέρει την υψομετρική πληροφορία του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης και τη ραδιομετρική πληροφορία της αρχικής εικόνας), δηλαδή, ένα 3D μοντέλο της περιοχής στο σύστημα της βάσης λήψης των εικόνων.

Στο σημείο αυτό, κρίθηκε σκόπιμο να καθαριστεί το νέφος από τα χονδροειδή σφάλματα (outliers), που οφείλονται σε αστοχίες κατά την εξαγωγή του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Πρόκειται για σημεία τα οποία δε συνταύτιστηκαν σωστά, και αποδόθηκαν σε λάθος υψόμετρο, με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται από το κυρίως σώμα του νέφους, τα οποία σχηματίζουν μαύρες περιοχές στα πλαϊνά των μοντέλων και άσπρα ή μαύρα στίγματα διάσπαρτα σε όλη την υπόλοιπη έκταση, συνιστώντας θόρυβο. Τα εν λόγω σημεία έγιναν αντιληπτά με απλό οπτικό έλεγχο του παραχθέντος νέφους, και συνεπώς διαγράφηκαν ως εσφαλμένη πληροφορία.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2.15: (α) Αρχική εικόνα (β) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (γ) Νέφος σημείων κατόπιν ανακατασκευής του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, στα άκρα του οποίου εντοπίζονται outliers.

Η γεωαναφορά του 3D μοντέλου, που προέκυψε με ανακατασκευή του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, πραγματοποιήθηκε με εκτέλεση ενός 3D μετασχηματισμού ομοιότητας, που επιλύθηκε με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων σε περιβάλλον Matlab (Μαλτέζος, 2014). Για τον προσδιορισμό των επτά (7) αγνώστων παραμέτρων του μετασχηματισμού ($k, X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, K$), απαιτείται η εύρεση τουλάχιστον τριών (3) κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς (καθώς κάθε σημείο που σκοπεύεται στο μοντέλο δίνει τρεις εξισώσεις παρατήρησης, X, Y, Z). Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σημεία γνωστών συντεταγμένων, ώστε να υπάρχει και έλεγχος της ακρίβειας του μετασχηματισμού. Οι εξισώσεις παρατήρησης δεν είναι γραμμικές ως προς τους αγνώστους, συνεπώς για τη γραμμικοποίησή τους απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές για τις άγνωστες παραμέτρους. Στην προκειμένη περίπτωση, ως αρχικές τιμές δόθηκαν για τις μεταθέσεις, τιμές που προσεγγίζουν τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών, για τις στροφές, μηδενικές τιμές και τέλος, μοναδιαία κλίμακα.

Σημειωτέον ότι στόχος ήταν, η γεωαναφορά να πραγματοποιηθεί με χρήση των επίγειων μετρήσεων (φωτοσταθερών μετρημένων με GPS), ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση

σφαλμάτων από προηγούμενες διαδικασίες (επίλυση αεροτριγωνισμού). Ωστόσο αυτό δεν κατέστη δυνατό, καθώς ελάχιστα εξ αυτών ήταν ορατά, στις περιοχές που επιλέχθηκαν, και μπορούσαν να εντοπισθούν με ευκρίνεια και να σκοπευθούν με ακρίβεια, ενώ ακόμη και αυτά που ήταν αρκετά ευδιάκριτα, δεν ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις ούτε ως προς το πλήθος των αναγκαίων παρατηρήσεων, ούτε ως προς την κατανομή τους, για τον ασφαλή προσανατολισμό του μοντέλου στο χώρο. Συνεπώς, η διαδικασία εντοπισμού και επιλογής φωτοσταθερών πραγματοποιήθηκε αντίστροφα, εντοπίστηκαν δηλαδή, στο μοντέλο σημεία ευδιάκριτα, περιμετρικά κατανεμημένα σε όλη την περιοχή, των οποίων οι γεωδαιτικές συντεταγμένες προσδιορίστηκαν με εμπροσθοτομία στο προσανατολισμένο μπλοκ εικόνων που δημιουργήθηκε με τον αεροτριγωνισμό.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα σφάλματα που υπολογίστηκαν από τη συνόρθωση των παρατηρήσεων του μετασχηματισμού της γεωαναφοράς, για τις τρεις περιοχές που επιλέχθηκαν, δηλαδή, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και η τυπική απόκλιση, ενώ δεν παρατηρήθηκε η ύπαρξη συστηματικού σφάλματος.

Πίνακας 2.9: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα όπως υπολογίστηκε για το μετασχηματισμό κάθε περιοχής

Αστική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.225	0.153	2.084	2.101
Αγροτική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.584	0.946	1.192	1.630
Αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.174	0.156	0.898	0.928

Είναι σαφές ότι μεγαλύτερη αβεβαιότητα παρατηρείται κατά την τρίτη διάσταση, παρότι δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο στάδιο εντοπισμού και σκόπευσης των φωτοσταθερών καθώς η μορφή του νέφους σημείων όσο και οι αστοχίες κατά την εξαγωγή των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης καθιστούσαν εν γένει δύσκολη τη σκόπευση των σημείων (παρότι το νέφος είχε προηγουμένως καθαριστεί από outliers, η απόδοση των υψομέτρων δεν ήταν παντού το ίδιο αξιόπιστη, για παράδειγμα σημεία που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο, όπως είναι η οροφή ενός κτίσματος, ενώ θα αναμενόταν να έχουν ίδιο υψόμετρο, που αποτυπώνεται με τον τόνο του γκρι στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, παρόλα αυτά πρακτικά εντοπίστηκε απόκλιση της τάξης των λίγων μέτρων σε γειτονικά pixel).

Παρακάτω παρατίθενται και οι τιμές των παραμέτρων του μετασχηματισμού μαζί με τα a-posteriori τυπικά τους σφάλματα καθώς και το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους, που αποτελεί ένδειξη της ακρίβειας του μετασχηματισμού.

Πίνακας 2.10: Τιμές παραμέτρων μετασχηματισμού και τυπικά σφάλματα

Παράμετροι μετασχηματισμού και a-posteriori σφάλματα	Αστική περιοχή		Αγροτική περιοχή		Αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση	
	X_0 (m)	538619.2622	±1.201	537834.6087	± 1.553	537587.5325
Y_0 (m)	4066203.2166	± 1.153	4066137.0071	±1.550	4066103.3762	±0.970
Z_0 (m)	147.3859	±1.639	169.949	±2.735	161.327	± 1.759
Ω (grad)	-5.5883	±0.0145	-0.0078	± 0.0105	4.8035	±0.0052
Φ (grad)	0.8013	±0.0050	-7.8132	± 0.0046	-1.3063	±0.0036
K (grad)	-104.0	± 0.0046	-306.6	±0.0042	-107.3	±0.0027
k	-0.282	±0.001	-0.271	±0.0011	-0.2713	±7.3560e-04
a-posteriori σφάλμα της μονάδας βάρους σ_0	1.661		1.458		0.830	

2.14. Προετοιμασία DTM για παραγωγή ορθοεικόνας

Το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, ως γνωστόν, είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση της επιφάνειας του αντικειμένου, που πρακτικά αποτυπώνεται με ένα σύνολο σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (X,Y,Z), το οποίο προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια. Ο πίνακας ψηφιακής παράλλαξης αποτελεί εν προκειμένω μια αντίστοιχη αναπαράσταση, προσφέροντας μάλιστα πολύ πυκνή πληροφορία.

Ο πίνακας ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκε μέσω πυκνής συνταύτισης σημείων, και αποτελεί ουσιαστικά το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας της περιοχής, έχει την ίδια ανάλυση με την αρχική εικόνα. Κατά συνέπεια η απόσταση των σημείων του νέφους στο έδαφος, καθορίζεται από το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας, δηλαδή 30cm, βάσει της οποίας προκύπτει η πυκνότητα του νέφους που είναι περίπου 11 σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο.

Για την παραγωγή ορθοεικόνων με χρήση των μοντέλων επιφανείας (DSM) που παρήχθησαν μέσω πυκνής συνταύτισης, εισήχθησαν στο λογισμικό ERDAS IMAGINE τα γεωαναφερμένα νέφη σημείων, που έπρεπε καταρχάς να μετατραπούν σε raster μορφή (rasterization).

Κατά το στάδιο αυτό ορίστηκε το βήμα του DTM, που εν προκειμένω δεδομένης της απόστασης των σημείων του νέφους δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 30 cm. Ιδανική τιμή για το βήμα δεν υπάρχει, καθώς εξαρτάται από το ανάγλυφο της περιοχής για την οποία πρόκειται να παραχθεί ορθοφωτογραφία, για παράδειγμα σε περιοχές με πιο ήπιο ανάγλυφο, χωρίς έντονες αλλαγές κλίσης, ένα πιο μεγάλο βήμα είναι ικανοποιητικό, ενώ αντίθετα σε αστική περιοχή, όπου υπάρχει πολύ πυκνή πληροφορία, και ανάγλυφο που έχει έντονες και απότομες διακυμάνσεις κρίνεται καταλληλότερο ένα πιο μικρό βήμα.

Το πρόγραμμα δίνει κάποιες προκαθορισμένες τιμές για το βήμα, οι οποίες εκ του αποτελέσματος που απέδωσε η χρήση του ψηφιακού μοντέλου με το επιλεγμένο βήμα, κατά την εξαγωγή των ορθοεικόνων σε επόμενο στάδιο, αξιολογήθηκαν ως σωστές, συνεπώς δεν κρίθηκε σκόπιμο να δοθούν άλλες τιμές. Στην περίπτωση της αστικής περιοχής πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών με μικρότερο βήμα, ώστε να αποδοθεί καλύτερα η πολύ πυκνή πληροφορία που υπάρχει, χωρίς ωστόσο αξιοσημείωτη βελτίωση του αποτελέσματος, συνεπώς, και πάλι διατηρήθηκε η αρχική τιμή που δόθηκε από το πρόγραμμα.

Πίνακας 2.11: Βήμα DTM για τις τρεις περιοχές για τις οποίες θα παραχθεί ορθοφωτογραφία

	Αστική περιοχή	Αγροτική περιοχή	Αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση
Βήμα DTM	38cm	40cm	34cm

Σημειώνεται ότι, με γνώμονα την παραγωγή ορθοεικόνας με τη βέλτιστη δυνατή χωρική διακριτική ικανότητα βάσει προδιαγραφών, τα δεδομένα που διατίθενται, δηλαδή οι αρχικές εικόνες κλίμακας περίπου 1:42000, είναι κατάλληλα για την εξαγωγή ορθοφωτογραφίας εδαφοψηφίδας 50 cm (όπως προκύπτει από την εμπειρική σχέση $D_{o/\phi}=1.5 \cdot D_{a/\phi}$), και κλίμακας εκτύπωσης 1:5000 (από εμπειρική σχέση $D_{o/\phi}=100\mu\text{m} \cdot k_{\text{εκτύπωσης}}$), η ακρίβεια μέτρησης επί της οποίας βάσει διακριτικής ικανότητας είναι 1.25 m (0.25 mm στην κλίμακα).

Επίσης βάσει προδιαγραφών, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο απαιτείται για την παραγωγή ορθοεικόνας με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά, πρέπει να παρουσιάζει βήμα συλλογής 0.5-2 mm στην κλίμακα της ορθοφωτογραφίας (1:5000). Βάσει του εμπειρικού αυτού κανόνα και με επιλογή της μέσης τιμής του 1.5 mm, το βήμα του DTM υπολογίζεται σε 7.5 m.

Είναι σαφές ότι το προϊόν της πυκνής συνταύτισης, είναι μακράν πιο λεπτομερές, ξεπερνώντας κατά πολύ τις προδιαγραφές των κλασικών μεθόδων.

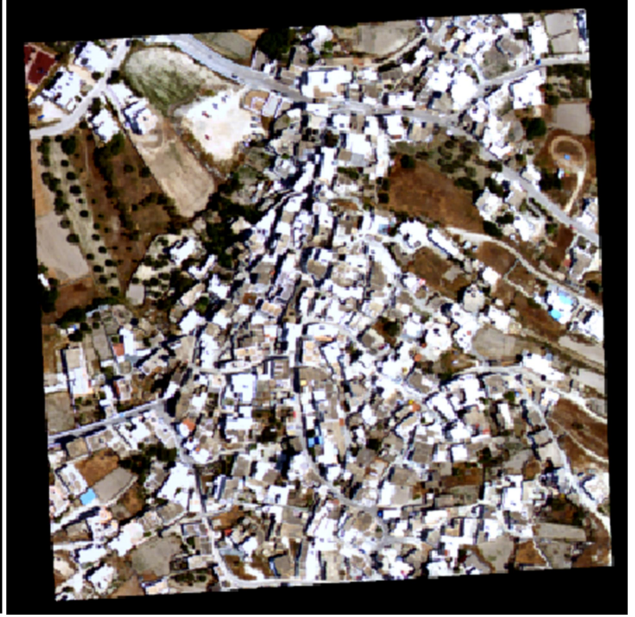
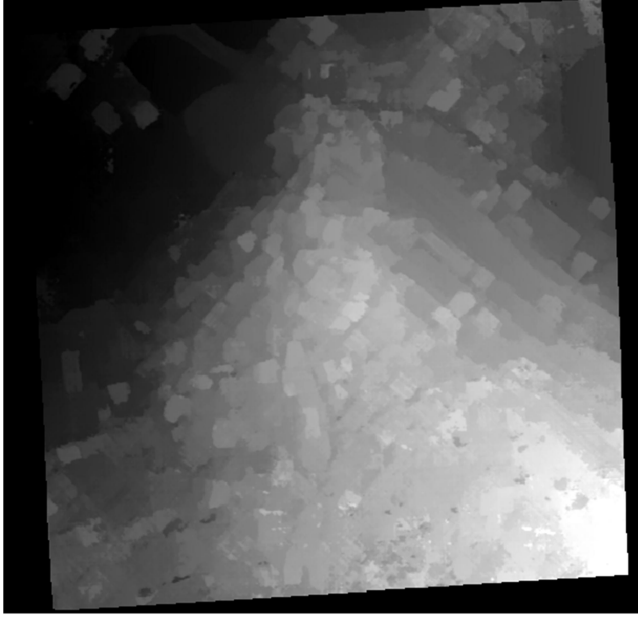
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ποιότητα ενός μοντέλου επιφανείας εξαρτάται από την ακρίβειά του (απόλυτη ακρίβεια), και από την πιστότητα αναπαράστασης του αναγλύφου (σχετική ακρίβεια).

2.15. Σύνταξη ορθοεικόνας

Με αρχικά δεδομένα τις εικόνες, στοιχεία εισόδου, τον εσωτερικό προσανατολισμό, όπως προσδιορίστηκε από αυτοβαθμονόμηση, τον εξωτερικό προσανατολισμό κάθε εικόνας, καθώς και το αντίστοιχο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, εκτελέστηκε στο περιβάλλον του λογισμικού ERDAS IMAGINE η διαδικασία της ορθοαναγωγής.

Με βάση τις ακρίβειες που επετεύχθησαν κατά τον α/τ, μπορούμε να κάνουμε μια προσεγγιστική εκτίμηση της ακρίβειας που αναμένεται να έχει το τελικό προϊόν, λαμβάνοντας υπόψη ότι στην τελική ακρίβεια υπεισέρχονται και τα σφάλματα του μοντέλου αναγλύφου. Ακόμη είναι σαφές ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί η ακρίβεια της αρχικής δηλαδή, δηλαδή 1:3000 (μέγεθος εδαφοψηφίδας 30 cm). Κατά συνέπεια, εφόσον τα σφάλματα του α/τ είναι μέχρι 50 cm, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι στην ορθοφωτογραφία αναμένεται μια ακρίβεια της τάξης του 1:5000, άρα το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της ορθοεικόνας θα είναι της τάξης των 50 cm (βάσει του εμπειρικού τύπου $D_{o/\phi} = 100\mu\text{m} * k_{\text{εκτύπωσης}}$).

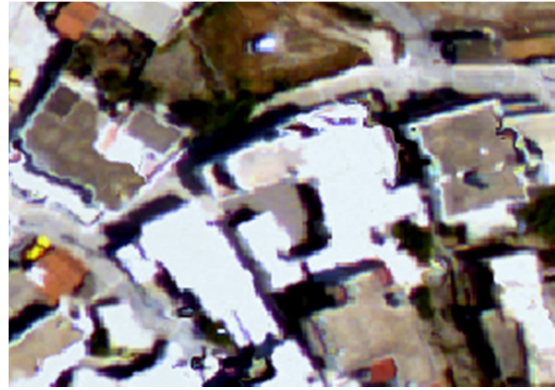
Για τη ραδιομετρική παρεμβολή, που πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό του χρώματος κάθε εικονοστοιχείου της ανηγμένης εικόνας, εφαρμόζεται διγραμμική παρεμβολή στην αρχική εικόνα. Με τη μέθοδο αυτή, η τιμή του χρώματος που αποδίδεται στην εκάστοτε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας, υπολογίζεται από τις τιμές των τόνων των τεσσάρων γειτονικών ψηφίδων της αρχικής εικόνας, με βάρη ανάλογα της απόστασης. Η διαδικασία αυτή είναι υπολογιστικά περισσότερο απαιτητική από τη μέθοδο του πλησιέστερου γείτονα και λιγότερο από τη δικυβική παρεμβολή, ενώ μεταβάλλει τα ραδιομετρικά δεδομένα της αρχικής εικόνας, καθώς παρεμβάλλει σε τέσσερις τόνους, χωρίς να δημιουργεί, ωστόσο, ανωμαλίες στις ακμές, όπως συμβαίνει με την πρώτη μέθοδο.



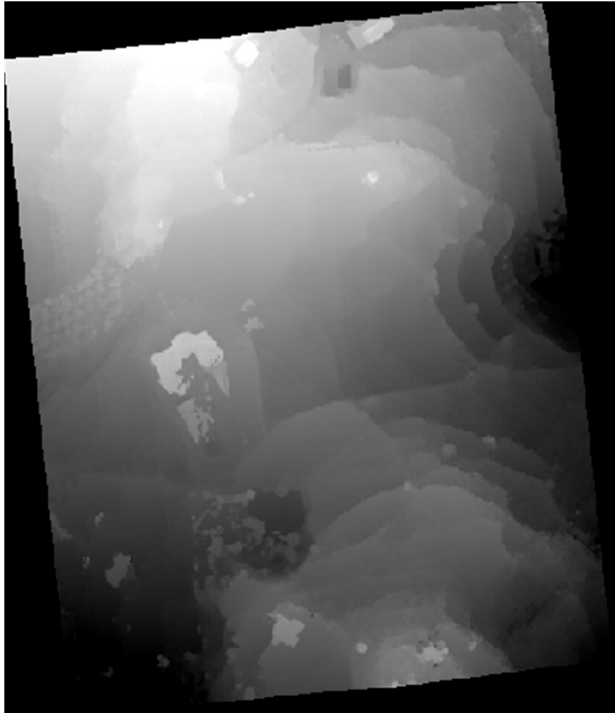
(α)



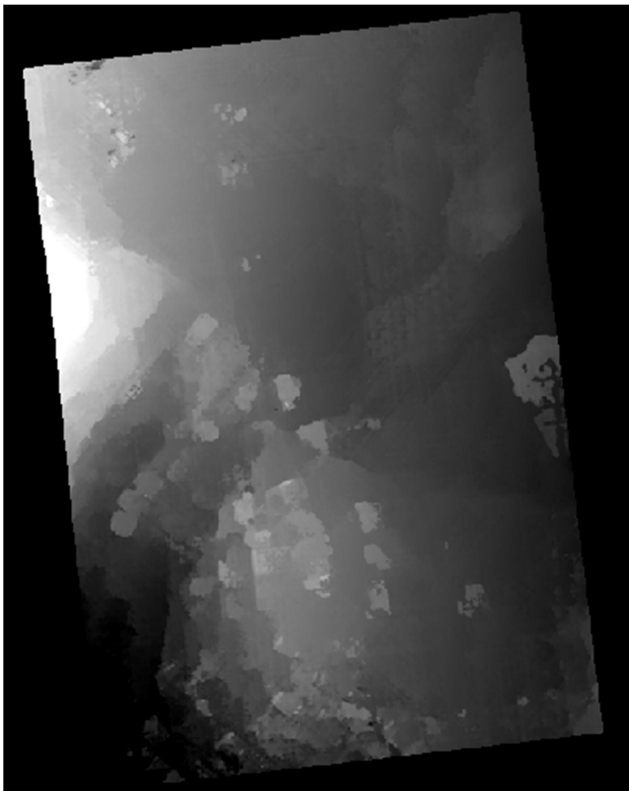
(β)



(γ)



(δ)



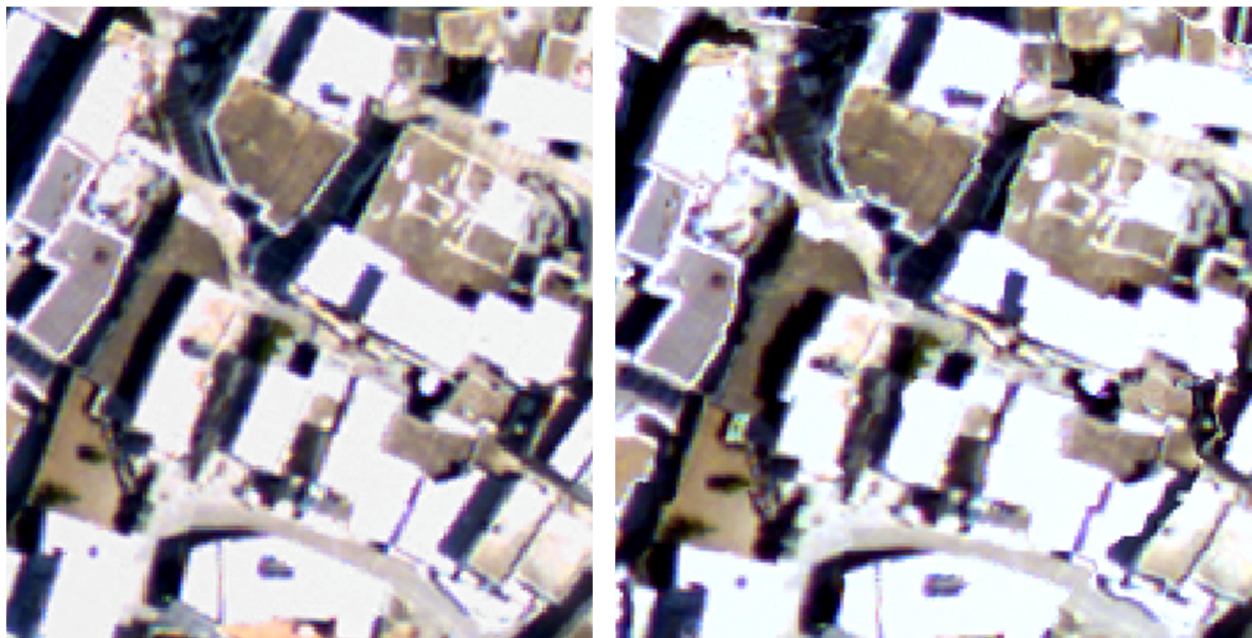
(ε)

Εικόνα 2.16: Ψηφιακό μοντέλο όπως προέκυψε μετά από rasterization του γεωαναφερμένου νέφους από πυκνή συνταύτιση και αντίστοιχες ορθοεικόνες για (α) την αστική περιοχή, (δ) την αγροτική περιοχή και (ε) την αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση, τμήμα ορθοεικόνας της

αστικής περιοχής όπου (β) το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, (δ) εντοπίστηκαν προβλήματα

Στην ορθοεικόνα που παρήχθη για την αστική περιοχή, εντοπίστηκαν προβλήματα στα σημεία με έντονο ανάγλυφο και πυκνή πληροφορία, τα οποία προφανώς οφείλονται σε χονδροειδή σφάλματα του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, δηλαδή σε αστοχίες και λάθη κατά την εξαγωγή του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης. Όπως και στις ορθοεικόνες των άλλων δυο περιοχών (αγροτικής και αγροτικής με αραιή δόμηση), έτσι και στην περίπτωση του αστικού τοπίου, όπου η δόμηση είναι πιο αραιή και η τοπογραφία πιο ήπια, χωρίς απότομες κλίσεις, ο αλγόριθμος απέδωσε πιο πιστά το ανάγλυφο, και αυτό αποτυπώθηκε στην παραχθείσα ορθοεικόνα, με ένα ποιοτικά και οριζοντιογραφικά ορθό αποτέλεσμα. Στις περιοχές, όμως, με πιο πυκνό και σύνθετο ανάγλυφο, εντοπίστηκε ακτινική μετατόπιση στις οριζοντιογραφικές θέσεις και παραμόρφωση στα όρια των υπερκείμενων της επιφάνειας του εδάφους αντικειμένων, π.χ. κτιρίων ή άλλων τεχνικών έργων, τα οποία προφανώς περιγράφονται ελλιπώς από το χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

Είναι σαφές ότι όσο πιο έντονο είναι το ανάγλυφο του αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερη και η εκτροπή λόγω αναγλύφου που υφίσταται στην αρχική εικόνα, γεγονός που δυσχεραίνει την εύρεση της σωστής ομολογίας κατά το στάδιο της συνταύτισης των εικόνων του στερεοζεύγους, δημιουργώντας μεγαλύτερη αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του σωστού υψομέτρου στο μοντέλο επιφάνειας, με απότοκο όλων των παραπάνω, την εσφαλμένη οριζοντιογραφική θέση και απόδοση των σχημάτων στο τελικό προϊόν.



Εικόνα 2.17: Αρχική και ανηγμένη εικόνα για τμήμα της αστικής περιοχής, όπου παρατηρήθηκαν έντονες παραμορφώσεις

Σημειώνεται ότι, στις περιοχές της ορθοφωτογραφίας όπου εντοπίστηκαν ποιοτικά προβλήματα, θα μπορούσαν ενδεχομένως, να συλλεχθούν χειροκίνητα γραμμές αλλαγή κλίσης για τη βελτίωση του αποτελέσματος, ωστόσο, αφενός δεν επρόκειτο για μικρές τοπικές αδυναμίες, αλλά για γενικευμένη παραμόρφωση των αντικειμένων, αφετέρου, ο στόχος ήταν μέσω της εφαρμογής να διαπιστωθούν τυχόν αδυναμίες της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης.

2.16. Έλεγχος ποιότητας ορθοεικόνας

Η ποιότητα της ορθοφωτογραφίας διαπιστώθηκε με δυο τρόπους, με οπτικό και γεωμετρικό έλεγχο. Ο οπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με απλή παρατήρηση, σύγκριση της ανηγμένης εικόνας με την αρχική, για να διαπιστωθούν τυχόν παραμορφώσεις στα απεικονιζόμενα αντικείμενα, ενώ ο γεωμετρικός έλεγχος έχει στόχο την εκτίμηση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας του τελικού προϊόντος, ενώ εξετάστηκε και το ενδεχόμενο ύπαρξης συστηματικής οριζοντιογραφικής μετατόπισης των αντικειμένων στην ορθοεικόνα.

Ο οριζοντιογραφικός έλεγχος, ιδανικά, γίνεται με χρήση εξωγενών παρατηρήσεων, που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο με επίγειες μεθόδους, και ικανοποιητική ακρίβεια, ώστε να θεωρούνται ορθές, καθώς επίσης, είναι ανεξάρτητες της φωτογραμμετρικής διαδικασίας που έχει προηγηθεί (εφόσον δε συμμετείχαν στην επίλυση του αεροτριγωνισμού). Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα σημεία ελέγχου μορφώνουν ένα δίκτυο παρατηρήσεων που δε μεταφέρει τυχόν σφάλματα από τη φωτογραμμετρική διαδικασία, που εφαρμόστηκε έως το στάδιο της ορθοαναγωγής, με συνέπεια ο έλεγχος της θέσης τους στην ανηγμένη εικόνα να καταδεικνύει τυχόν οριζοντιογραφικές αποκλίσεις από τη σωστή θέση. Η ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων αυτών μέσω στατιστικών δεικτών, όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, το συστηματικό σφάλμα και η τυπική απόκλιση, δίνει μια εκτίμηση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας της ψηφιακής ορθοεικόνας και κατ' επέκταση, της διαδικασίας μέσω της οποίας παράχθηκε.

Σημειωτέον ότι, αν η φωτογραμμετρική διαδικασία που έχει προηγηθεί της δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας, θεωρείται ορθή, χωρίς σημαντικά σφάλματα, (δηλαδή οι εξωτερικοί προσανατολισμοί δεν εισάγουν μεγάλα σφάλματα), τότε ό,τι παραμορφώσεις ή συστηματικά σφάλματα εντοπίζονται στην ορθοφωτογραφία, οφείλονται σε ατέλειες του ψηφιακού μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο, συνεπώς, ελέγχεται ουσιαστικά η ποιότητα του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, δηλαδή εν προκειμένω πρακτικά, η ποιότητα των αποτελεσμάτων της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης.

Σημειώνεται πως δεν κατέστη εφικτό να αξιοποιηθούν ως σημεία ελέγχου τα φωτοσταθερά που μετρήθηκαν επίγεια με GPS και δε χρησιμοποιήθηκαν στη συνόρθωση του α/τ, καθώς όπως και για τη γεωαναφορά των μοντέλων, τα διαθέσιμα σημεία από τις επίγειες μετρήσεις, ήταν πολύ λίγα και όχι ικανοποιητικά κατανομημένα στις περιοχές για τις οποίες επιλέχθηκε να παραχθούν ορθοφωτογραφίες. Συνεπώς, ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τυχαία σημεία, των οποίων οι γεωδαιτικές συντεταγμένες προσδιορίστηκαν με εμπροσθοτομία στο γεωαναφερμένο μπλοκ εικόνων (προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν τα ίδια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν ως φωτοσταθερά κατά το στάδιο της γεωαναφοράς).

Οι θέσεις των σημείων ελέγχου, επιλέχθηκαν με γνώμονα την κάλυψη όλης της έκτασης της εικόνας. Προτιμήθηκαν σημεία πάνω στο φυσικό έδαφος και προφανώς αποφεύχθηκαν σημεία που έχουν υποστεί παραμόρφωση. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε σκόπευση των εν λόγω σημείων τόσο στην ορθοφωτογραφία, όσο και στο προσανατολισμένο με α/τ μοντέλο, και από τις διαφορές των δυο σετ μετρήσεων προσδιορίστηκαν τα σφάλματα, που παρατίθενται στον Πίνακα 2.12.

Πίνακας 2.12: Εκτίμηση οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών

Αστική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	3.570	0.981	3.702
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	2.461	-0.128	2.464
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	2.726	1.025	2.912
Αγροτική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.900	0.653	1.112
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	0.223	0.313	0.384
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	0.889	0.584	1.063
Αγροτική περιοχή με αραιή δόμηση	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.402	0.406	0.571
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	-0.179	0.007	0.179
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	0.368	0.415	0.554

Βασικός δείκτης για την εκτίμηση του συνολικού σφάλματος του τελικού προϊόντος, είναι το στατιστικό μέγεθος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, που αποτελεί μια ποσοτικοποίηση του συνόλου των συστηματικών και τυχαίων αποκλίσεων των δύο dataset, μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται σύγκριση, και στην ιδανική περίπτωση της απουσίας συστηματικών σφαλμάτων (και για μεγάλο πλήθος παρατηρήσεων), η τιμή του ισούται με την τιμή της τυπικής απόκλισης $\sigma_{\Delta S}$.

Εφόσον ο έλεγχος της ορθοφωτογραφίας πραγματοποιήθηκε με σημεία που έχουν εμπλακεί στη φωτογραμμετρική διαδικασία, τα σφάλματα που υπολογίστηκαν παραπάνω, εμπεριέχουν και την αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης των σημείων με εμπροσθοτομία (εκ των πραγμάτων φέρουν, δηλαδή, τα σφάλματα του α/τ).

Επισημαίνεται ξανά ότι το μοντέλο της αστικής περιοχής δημιουργήθηκε από διαφορετικό στερεοζεύγος σε σχέση με την αγροτική περιοχή και την αγροτική με αραιή δόμηση. Σε αντίθετη περίπτωση δε θα ήταν λογική η ύπαρξη τόσο μεγάλου συστηματικού σφάλματος μόνο σε αυτήν, ανεξάρτητα από την κάλυψη της περιοχής.

Επιπλέον, τα σφάλματα που υπολογίστηκαν είναι στα όρια των σφαλμάτων του α/τ (είναι προφανώς μεγαλύτερα, αλλά εμπεριέχουν και το σφάλμα προσδιορισμού της θέσης των σημείων ελέγχου με εμπροσθοτομία, και σφάλματα όλων των επόμενων διαδικασιών, οπότε αν δεν υπήρχαν αυτά θα ήταν της ίδιας τάξης με τα σφάλματα του α/τ). Ως εκ τούτου, ο έλεγχος έδωσε απλώς μια εκτίμηση, ίσως μάλιστα μόνο της τάξης μεγέθους, της ακρίβειας της ορθοφωτογραφίας, και όχι της πραγματικής ακρίβειας που επετεύχθη, ενώ από το γεγονός ότι η εκτιμώμενη αυτή ακρίβεια προσεγγίζει την ακρίβεια του α/τ, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η διαδικασία που μεσολάβησε από τον προσανατολισμό του μπλοκ των εικόνων, μέχρι την παραγωγή της ορθοεικόνας, δεν χειροτέρευσε κατά πολύ την αρχική ακρίβεια.

2.17. Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης (Median filter)

Η διαδικασία πυκνής συνταύτισης, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, μπορεί να οδηγήσει τοπικά σε χονδροειδώς λανθασμένες ομολογίες (χονδροειδή σφάλματα στις τιμές παράλλαξης), καθώς και να δημιουργήσει κενά σε περιοχές με αποκρύψεις. Η εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης κρίνεται κατάλληλη σε τέτοιες περιπτώσεις, για την εξάλειψη των χονδροειδών αναντιστοιχιών που προέκυψαν, ενώ καθίσταται δυνατή και η κάλυψη των κενών που έχουν δημιουργηθεί στο χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, αξιοποιώντας την πληροφορία από τα γειτονικά pixel.

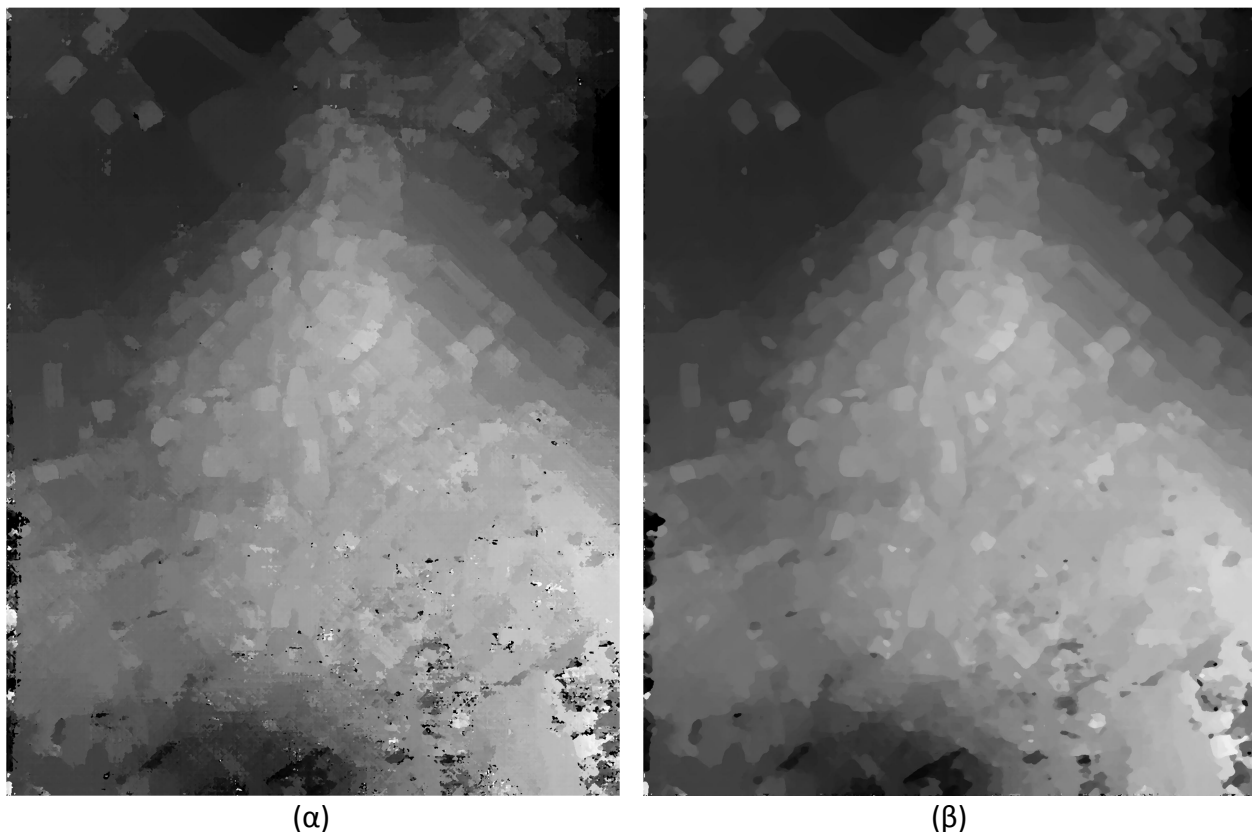
Μετά την παραγωγή των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης και πριν τη συνένωσή τους σε ένα ενιαίο μοντέλο, δοκιμάστηκε η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, σε περιβάλλον Matlab, για την εξάλειψη των στιγμάτων αλλά και των περιοχών που περιέχουν ακραίες τιμές (σημεία με άκυρες ψηφιακές παραλλάξεις, δηλαδή λάθος τιμές υψομέτρου - outliers).

Κατά την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, με χρήση παραθύρου (μάσκας) συγκεκριμένης διάστασης, που διατρέχει όλη την εικόνα, γίνεται ιεράρχηση των στοιχείων του εκάστοτε παραθύρου σε αύξουσα σειρά τιμών έντασης και λαμβάνεται η τιμή του μεσαίου ως το νέο κεντρικό στοιχείο. Το εν λόγω φίλτρο είναι κατάλληλο για αφαίρεση μεμονωμένου θορύβου, αφού εξαλείφει τις ακραίες τιμές, επιτυγχάνοντας έτσι εξομάλυνση της εικόνας, με διατήρηση ωστόσο των ακμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εκάστοτε τιμή έντασης στη νέα εικόνα, είναι πιο αντιπροσωπευτική του παραθύρου τιμών από το οποίο έχει προέλθει, εφόσον

λαμβάνεται ως η μεσαία από μια σειρά τιμών που δεν έχουν εν γένει μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, ενώ αντίθετα οι ακραίες τιμές εκλαμβάνονται ως θόρυβος και γι' αυτό αγνοούνται και εξουδετερώνονται.

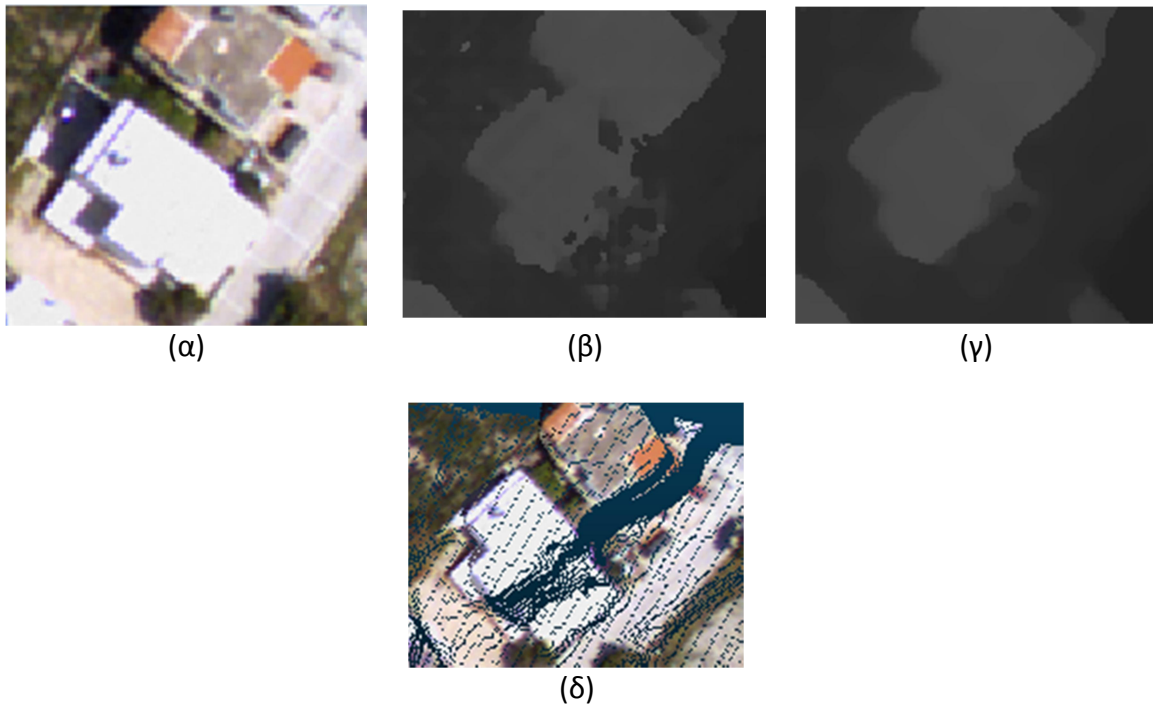
Προτιμήθηκε η εφαρμογή του συγκεκριμένου, σε σχέση με άλλα φίλτρα εξομάλυνσης, όπως για παράδειγμα το φίλτρο του μέσου όρου, καθώς στην περίπτωση εφαρμογής φίλτρου μέσου όρου, η νέα τιμή προκύπτει από όλες τις τιμές του παραθύρου λαμβανομένων υπόψη και των πολύ ακραίων που αποτελούν ενδείξεις θορύβου, ενώ ενδέχεται οι νέες τιμές που θα αποδοθούν στα pixel της εξομαλυμένης εικόνας, να μην αποτελούν τιμές της αρχικής, καθώς είναι αποτέλεσμα της μαθηματικής πράξης προσδιορισμού μιας προσεγγιστικής μέσης τιμής των υφιστάμενων pixel.

Σημειωτέον, ότι σημαντικό ρόλο παίζει το μέγεθος του φίλτρου στο βαθμό εξομάλυνσης που θα επιτευχθεί και κατά συνέπεια στην πληροφορία που ενδεχομένως χαθεί. Στην παρούσα εφαρμογή, πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών εφαρμόζοντας μάσκες διαστάσεων από 3x3 έως 9x9.



Εικόνα 2.18: Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (α) αρχικός (β) με εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής 9x9

Με την εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης στον αρχικό χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, βελτιώθηκε συνολικά το θέμα του θορύβου, ωστόσο, τοπικά παρατηρήθηκε απώλεια πληροφορίας από όρια κτιρίων που εξομαλύνθηκαν αρκετά, χάνοντας το ακριβές τους σχήμα. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα, οι ευθείες τείνουν να γίνουν καμπύλες, ενώ γειτονικά κτίρια και η περιοχή με βλάστηση που μεσολαβεί, έχουν ληφθεί εσφαλμένα ως ενιαίο επίπεδο.



Εικόνα 2.19: (α) Αρχική εικόνα (β) Αρχικός πίνακας ψηφιακής παράλλαξης (γ) Πίνακας ψηφιακής παράλλαξης με εφαρμογή φίλτρου 9x9 (δ) Νέφος σημείων

Με τους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που υπέστησαν εξομάλυνση με φίλτρο 9x9 (καθώς οι μικρότερες διαστάσεις φίλτρου φάνηκε να έχουν πολύ μικρή επίδραση) επιχειρήθηκε να παραχθούν εκ νέου ορθοφωτογραφίες, ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες από τους αρχικούς χάρτες ψηφιακής παράλλαξης. Τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν σε κάποιες περιοχές, όπου είχαν εντοπιστεί προβλήματα, δεν βελτιώθηκαν, όμως, σημαντικά.



(α)

(β)

Εικόνα 2.20: Ορθοφωτογραφία που προέκυψε από τον χάρτη ψηφιακής παράλλαξης (α) χωρίς φίλτρο (β) με φίλτρο

2.18. Ένωση πινάκων ψηφιακής παράλλαξης – ICP

Με στόχο τη δημιουργία ενιαίου μοντέλου της περιοχής, πραγματοποιήθηκε συνένωση των επιμέρους νεφών σημείων, που δημιουργήθηκαν με ανακατασκευή των εξομαλυμένων πινάκων ψηφιακής παράλλαξης, στο περιβάλλον του λογισμικού Geomagic, με εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου πλησιέστερου σημείου (Iterative Closest Point – ICP), με την οποία αντιστοιχίζονται σημεία του ενός σημειοσυνόλου με σημεία του δεύτερου, στο κοινό τους κομμάτι. Στόχος του εν λόγω αλγορίθμου είναι ο προσδιορισμός της κατάλληλης στροφής και μετάθεσης μεταξύ των δυο νεφών, που ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των ομόλογων σημείων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρειάζεται αρχική εκτίμηση της στροφής και μετάθεσης μεταξύ των δύο νεφών, το οποίο πρακτικά επιτυγχάνεται με τον εντοπισμό και τη σκόπευση τουλάχιστον τριών ομόλογων σημείων στα δυο νέφη. Με τις παρατηρήσεις αυτές, πραγματοποιείται μια αρχική επίλυση (manual registration), ουσιαστικά εφαρμόζεται ένας 7-παραμετρικός μετασχηματισμός. Τα νέφη προσανατολίζονται στο ίδιο σύστημα, μέσω επιβολής τριών στροφών, τριών μεταθέσεων, και κοινής κλίμακας. Στην προκειμένη περίπτωση τα μοντέλα βρίσκονται στο ίδιο σύστημα, αυτό της βάσης λήψης, επομένως έχουν την ίδια κλίμακα, άρα απομένει να προσδιοριστούν προσεγγιστικές τιμές για τις παραμέτρους στροφής και μετάθεσης. Η διαδικασία του manual registration εκτελείται διαδοχικά για όλα τα

μοντέλα, θεωρώντας ως «σταθερό» (fixed) κάθε φορά το ένα σημειοσύνολο, (το αρχικό μοντέλο στο σύστημα του οποίου θα μετασχηματιστούν τα υπόλοιπα, τα οποία προστίθενται διαδοχικά), και ως «κινούμενο» (floating) το εκάστοτε μοντέλο που προσανατολίζεται για να συνενωθεί με τα προηγούμενα, σκοπεύοντας κοινά σημεία επαρκούς αριθμού και κατάλληλης κατανομής. Σε περιπτώσεις σχετικά μικρής επικάλυψης, ή αδυναμίας εύρεσης επαρκώς καταμεμημένων σημείων, σκοπεύθηκαν περισσότερα των ελάχιστων απαιτούμενων, για να ισχυροποιηθεί το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού. Εν συνεχεία, με τα αποτελέσματα της αρχικής αυτής επίλυσης, εκτελείται ο τελικός μετασχηματισμός (global registration) συνολικά για όλα τα νέφη.

Κριτήριο της ακρίβειας που επιτυγχάνεται είναι η μέση απόσταση των τελικών πλησιέστερων σημείων (ομόλογων σημείων που έχουν αντιστοιχιστεί) μετά το πέρας της συνένωσης, καθώς και η τυπική απόκλιση της μέσης απόστασης. Ως κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιείται ένα κατώφλι για το μέγεθος της μεταβολής του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ δυο διαδοχικών επαναλήψεων, ενώ ορίζεται και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που επιθυμείται να πραγματοποιηθούν. Το σύστημα, επομένως, συγκλίνει είτε όταν οι αποστάσεις μεταξύ των δυο datasets είναι μικρότερες από το όριο που ορίστηκε, είτε όταν ολοκληρωθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος επαναλήψεων.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι βασική προϋπόθεση για την ορθή εκτέλεση του μετασχηματισμού, είναι η επαρκής επικάλυψη των νεφών, η οποία εξασφαλίστηκε κατά το στάδιο παραγωγής των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης.



Εικόνα 2.21: Συνενωμένο μοντέλο περιοχής εργασίας

Εντός της αρχικά επιλεχθείσας ζώνης εξήχθησαν συνολικά δεκατρείς (13) χάρτες ψηφιακής παράλλαξης, οι οποίοι συνενώθηκαν σε ένα ενιαίο μοντέλο (Εικόνα). Η συνένωση των πινάκων ψηφιακής παράλλαξης που δημιουργήθηκαν από τα στερεομοντέλα 243-244, και 245-246, απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, εν αντιθέσει με τη συνένωση των μοντέλων από το μεσαίο στερεοζεύγος, 244-245, η οποία δεν είχε την ίδια επιτυχία. Τα στατιστικά αποτελέσματα του μετασχηματισμού, κατά την αρχική επίλυση στα επιμέρους μοντέλα (manual registration), που είναι η μέση απόσταση μεταξύ των ομόλογων σημείων στα δυο νέφη, καθώς και η τυπική της απόκλιση, όπως προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα δεν ξεπερνούσαν στη δυσμενέστερη περίπτωση τα 3-4 pixel, που αντιστοιχούν σε απόσταση της τάξης του ενός μέτρου περίπου στο έδαφος, ενώ στην τελική επίλυση τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα από 3 pixel (Average distance: 2.6pixel, Standard Deviation: 2.4pixel), δηλαδή 60-80cm. Παρόλα αυτά από τον οπτικό έλεγχο διαπιστώθηκε ότι η συνένωση δεν απέδωσε σε ορισμένα σημεία, όπου υπήρχε συστηματική μετάθεση των δυο μοντέλων στο σημείο της ένωσης, ενώ στις εν λόγω περιοχές εντοπίστηκαν και διπλά αντικείμενα.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2.22: Λάθη κατά τη συνένωση των μοντέλων (α), (β) κακή ευθυγράμμιση, (γ) διπλά αντικείμενα

Επιχειρήθηκε να πραγματοποιηθεί πύκνωση των μοντέλων του στερεοζεύγους 244-245, όπου η συνένωση δεν εκτελέστηκε σωστά, ώστε τα επιμέρους νέφη να παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικάλυψη, ώστε να διευκολυνθεί η εύρεση ομόλογων σημείων για το μετασχηματισμό. Ωστόσο, ούτε η προσπάθεια αυτή απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα, και εφόσον μετά από μια σειρά επιπλέον δοκιμών η ποιότητα της συνένωσης δε βελτιώθηκε σημαντικά, κρίθηκε, ασφαλέστερο, οι περαιτέρω εργασίες για την εξαγωγή των τελικών προϊόντων να γίνουν σε

μεμονωμένα μοντέλα και όχι σε ένα ενιαίο όπως ήταν ο αρχικός στόχος, και μάλιστα να χρησιμοποιηθούν οι αρχικοί χάρτες ψηφιακής παράλλαξης χωρίς, δηλαδή, την εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης, αφού οδηγούσε σε απώλεια πληροφορίας.

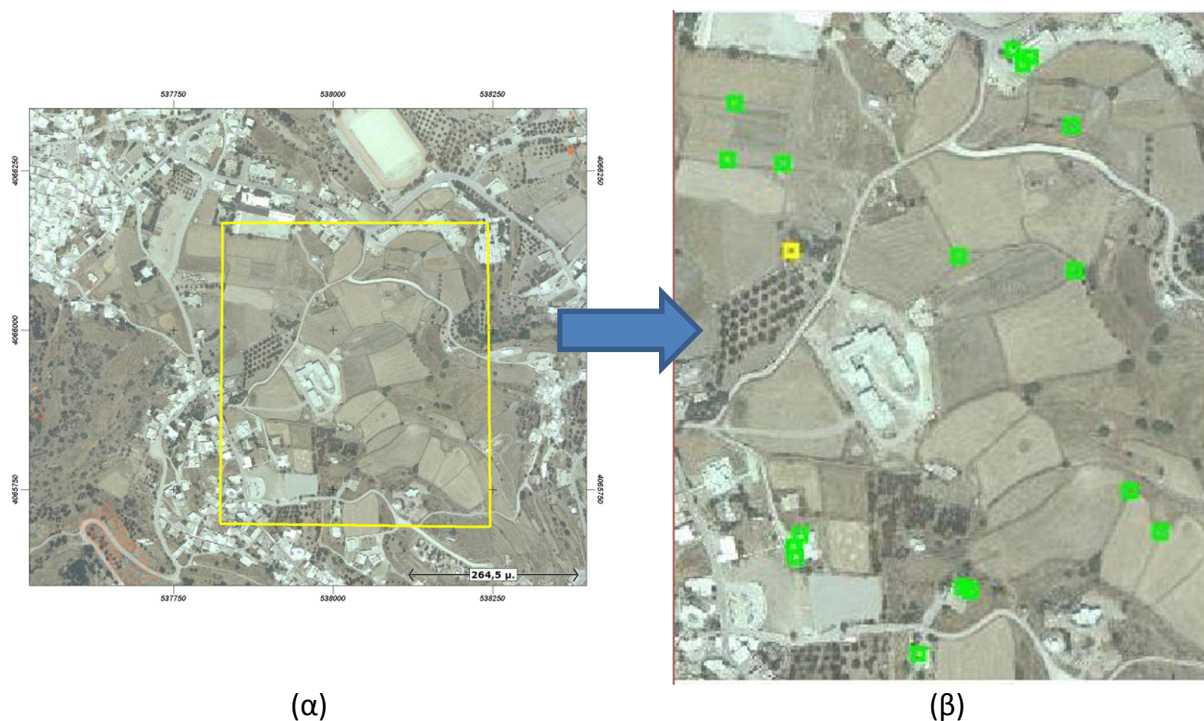
3. ΕΛΕΓΧΟΙ

3.1. Έλεγχοι και σύγκριση με άλλα προϊόντα

Μετά το πέρας της εφαρμογής, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν κάποιοι έλεγχοι για να καταστεί δυνατή μια πιο αντικειμενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής και εκτίμηση της ακρίβειας που επετεύχθη, καθώς και μια γενικότερη αξιολόγηση της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν τόσο τα διαθέσιμα δεδομένα από τη σάρωση με το σύστημα LIDAR, όσο και το αντίστοιχο προϊόν ορθοαναγωγής της πρώην Κτηματολόγιο Α.Ε. Οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά για δυο από τα τρία μοντέλα, και συγκεκριμένα αυτά της αγροτικής και της αστικής περιοχής.

3.2. Σύγκριση ορθοεικόνας από πυκνή συνταύτιση με ορθοφωτογραφία Κτηματολογίου

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ορθοεικόνας που δημιουργήθηκε με χρήση του μοντέλου επιφάνειας από πυκνή συνταύτιση (disparity map), με την αντίστοιχη ορθοφωτογραφία της ΕΚΧΑ Α.Ε. (πρώην Κτηματολόγιο), κλίμακας 1:5000 και εδαφοψηφίδας 0.50m. Για τη διαπίστωση ενδεχόμενης μετάθεσης μεταξύ των δυο προϊόντων και την ποσοτικοποίηση της, εντοπίστηκε και μετρήθηκε και στα δύο υπόβαθρα ένα σετ σημείων ελέγχου, επαρκούς πλήθους και κατανομής. Από τις διαφορές των συντεταγμένων των δυο σετ μετρήσεων, υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μέση οριζοντιογραφική μετάθεσή τους και η τυπική της απόκλιση.



Εικόνα 3.1: (α) Ορθοφωτογραφία Κτηματολογίου (β) Θέσεις σημείων ελέγχου

Πίνακας 3.1: Έλεγχος οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ της ορθοεικόνας, που δημιουργήθηκε με χρήση του μοντέλου από πυκνή συνταύτιση και της αντίστοιχης από την ΕΚΧΑ Α.Ε.

Αγροτική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	0.83	0.84	1.18
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	0.45	0.43	0.62
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
0.72	0.75	1.04	

Ως γνωστόν, η ακρίβεια που εν γένει χαρακτηρίζει ένα προϊόν, σχετίζεται με τους εξής τρεις παράγοντες: την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων, την αβεβαιότητα των διαδικασιών που έχουν προηγηθεί της δημιουργίας του, καθώς και την αβεβαιότητα της ίδιας της διαδικασίας μέσω της οποίας δημιουργήθηκε. Για να καταστεί δυνατή, επομένως η εκτίμηση της ακρίβειας της ορθοφωτογραφίας του Κτηματολογίου εν προκειμένω, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αντίστοιχοι παράγοντες που επέδρασαν καθοριστικά σε αυτήν. Η συστηματική μετάθεση που παρατηρήθηκε μεταξύ των δυο υποβάθρων, δεν κρίθηκε σημαντική. Είναι σαφές ότι τα δυο

υπόβαθρα δε θα μπορούσαν να ταυτιστούν, δεδομένου ότι έχουν προκύψει από διαφορετικά αρχικά δεδομένα (αναλογικές α/φ κλίμακας περίπου 1:20.000 με εδαφοψηφίδα 30-40 cm, ανάλογα με την ανάλυση σάρωσης), και διαφορετικές μεθόδους, που καθεμία, ασφαλώς, εισάγει κάποια σφάλματα στο τελικό προϊόν, τα οποία δεν καθίσταται εύκολο εν γένει να ποσοτικοποιηθούν.

Το ψηφιακό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας του Κτηματολογίου έχει δημιουργηθεί με κλασικές φωτογραμμετρικές μεθόδους, συνεπώς εμπεριέχει σφάλματα επίλυσης α/τ, και αυτόματης συλλογής DTM, τα οποία συσσωρεύονται στην ορθοφωτογραφία και η επίδραση τους σε αυτήν δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ως εκ τούτου καθίσταται σαφές πως δεν είναι ασφαλές να εκλάβουμε το εν λόγω προϊόν ως ορθό, για τον έλεγχο της ακρίβειας της παραχθείσας ορθοφωτογραφίας. Συνεπώς, ο παραπάνω έλεγχος αποσκοπεί μόνο σε μια εκτίμηση της σχετικής ακρίβειας που έχει επιτευχθεί στο τελικό προϊόν της παρούσας εφαρμογής.

3.3. Έλεγχοι με προϊόντα σάρωσης από το σύστημα LIDAR

Όπως έχει προαναφερθεί, για να υπάρξει ουσιαστικός έλεγχος ενός προϊόντος επιβάλλεται η ύπαρξη δεδομένων ακριβείας ή έστω δεδομένων μιας τάξης μεγέθους καλύτερης ακρίβειας. Σημειώνεται ότι τα προϊόντα από τη σάρωση με το σύστημα LIDAR φέρουν την αβεβαιότητα των αρχικών δεδομένων σάρωσης, των διαδικασιών επεξεργασίας τους, καθώς και των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή τους, συνεπώς δεν μπορούν να θεωρηθούν ορθά, οπότε και σε αυτή την περίπτωση, οι έλεγχοι έχουν μόνο ενδεικτικό χαρακτήρα.

3.4. Αλλαγή συστήματος αναφοράς

Για τις ανάγκες των ελέγχων και συγκρίσεων των προϊόντων πυκνής συνταύτισης με τα αντίστοιχα από τα δεδομένα σάρωσης με LIDAR, χρειάστηκε καταρχάς να μετασχηματιστεί το DSM/LIDAR από το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS84 (που χρησιμοποιεί την παγκόσμια μερκατορική προβολή (UTM zone 35N)), στο ΕΓΣΑ 87 (που χρησιμοποιεί την εγκάρσια μερκατορική προβολή). Ο μετασχηματισμός μεταξύ των δυο συστημάτων εκτελέστηκε αυτόματα στο λογισμικό ERDAS IMAGINE, με αλλαγή προβολής (reprojection) οριζοντιογραφικά, και μετάθεση των υψομέτρων κατά την τιμή της αποχής του γεωειδούς

στην περιοχή, ώστε να γίνει μετατροπή των υψομέτρων από γεωμετρικά (ως προς το ελλειψοειδές GRS80), σε ορθομετρικά (με υψομετρική αφετηρία τη ΜΣΘ) ($H=h-N$).

Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι, προφανώς, όσο και του αρχικού μοντέλου, δηλαδή 1m, ενώ για την επαναδειγματοληψία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής.

3.5. Προσδιορισμός της αποχής του γεωειδούς

Η τιμή της αποχής του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης προσδιορίστηκε, για τις ανάγκες προηγούμενης εργασίας (Φράγκος, 2013), μετρώντας στο περιβάλλον του ArcGIS το υψόμετρο του μοντέλου αναγλύφου από LIDAR, με παρεμβολή σε δώδεκα (12) σημεία εντός του θαλάσσιου τμήματος. Βρέθηκε ότι παρουσιάζει μέση τιμή υψομέτρου γεωειδούς 39,9 m, και δεδομένου ότι η ΜΣΘ στην περιοχή είναι η επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέτρων, επιλέχθηκε εν τέλει ως τιμή διόρθωσης των γεωμετρικών υψομέτρων των δεδομένων LiDAR η τιμή $N=40m$.

Είναι προφανές, ωστόσο, ότι η προσδιορισθείσα, με την παραπάνω διαδικασία, τιμή υψομέτρου γεωειδούς εμπεριέχει την αβεβαιότητα του μοντέλου από LIDAR, καθώς είναι πιθανή η ύπαρξη συστηματικού σφάλματος από τη διαδικασία βαθμονόμησης του LIDAR κλπ. Επίσης, είναι σαφές ότι υπάρχει δυσκολία στο εντοπισμό και τη σκόπευση των σημείων στην ακτογραμμή. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμος ο επαναπροσδιορισμός της τιμής του, με μεγαλύτερη ακρίβεια, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες επίγειες μετρήσεις. Σημαντική δυσκολία προκάλεσε, ωστόσο, το γεγονός ότι δεν ήταν εύκολη η οπτική αναγνώριση των φωτοσταθερών στο DSM από LIDAR, καθώς τα σημεία που μετρήθηκαν με GPS, ήταν ως επί το πλείστον σημεία χαμηλού ύψους, (π.χ. μάντρες), που δεν ήταν διακριτά στο μοντέλο. Σκοπεύθηκαν, λοιπόν, τέσσερα φωτοσταθερά, για τα οποία προσδιορίστηκε η μέση υψομετρική διαφορά τους σε σχέση με τις επίγειες μετρήσεις, η τυπική απόκλιση αυτής, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Πίνακας 3.2: Προσδιορισμός αποχής γεωειδούς με χρήση των επίγειων μετρήσεων

RMSE Z (m)	Συστηματικό σφάλμα Z (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)
27.669	27.667	0.316

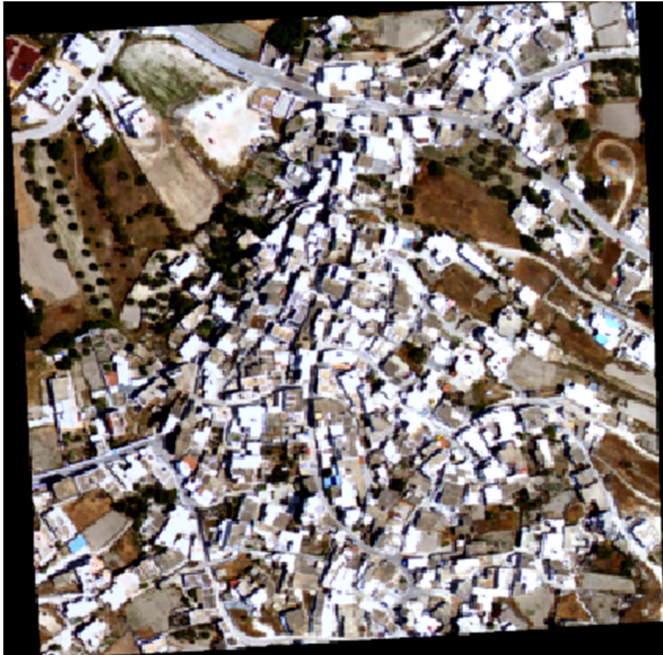
Σημειώνεται ότι, η απόκλιση που παρατηρήθηκε μεταξύ της αρχικής ($N=40m$) και της επαναπροσδιορισμένης τιμής ($N = 27.7 m$) δεν είναι αμελητέα. Έγινε ωστόσο δεκτή, καθώς τα

δεδομένα μέσω των οποίων υπολογίστηκε εκ νέου η αποχή γεωειδούς ήταν πιο αξιόπιστα και προσδιορισμένα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Συνεπώς, η τιμή των 27.7 m, θεωρήθηκε η σωστή αποχή του γεωειδούς στην περιοχή, και συνεπώς, τη νέα τιμή διόρθωσης των γεωμετρικών υψομέτρων του μοντέλου από LIDAR. Δεδομένου ότι στη διαδικασία προσδιορισμού της εν λόγω τιμής, η μόνη πηγή σφαλμάτων είναι η αβεβαιότητα μέτρησης με το GPS, αναμένεται τόσο ο μετασχηματισμός του DSM/LIDAR στο ΕΓΣΑ 87, όσο και οι μετέπειτα έλεγχοι, να εκτελεστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια.

3.6. Παραγωγή ορθοεικόνων με χρήση του DSM των δεδομένων σάρωσης με LIDAR

Με δεδομένα τις αρχικές εικόνες, με αριθμό 243 και 244, τον εσωτερικό και τους εξωτερικούς προσανατολισμούς που προσδιορίστηκαν από τον α/τ με αυτοβαθμονόμηση, καθώς και τα αντίστοιχα ψηφιακά μοντέλα από το σύστημα LIDAR, δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού ERDAS IMAGINE, οι ορθοεικόνες για την αγροτική και την αστική περιοχή αντίστοιχα. Για το μέγεθος της εδαφοψηφίδας το πρόγραμμα ορίζει αυτόματα ως προκαθορισμένη τιμή 29cm, ενώ, για τη ραδιομετρική παρεμβολή που πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό του χρώματος κάθε εικονοψηφίδας της ανηγμένης εικόνας, εφαρμόζεται διγραμμική παρεμβολή στην αρχική εικόνα.



(α)



(β)



(γ)

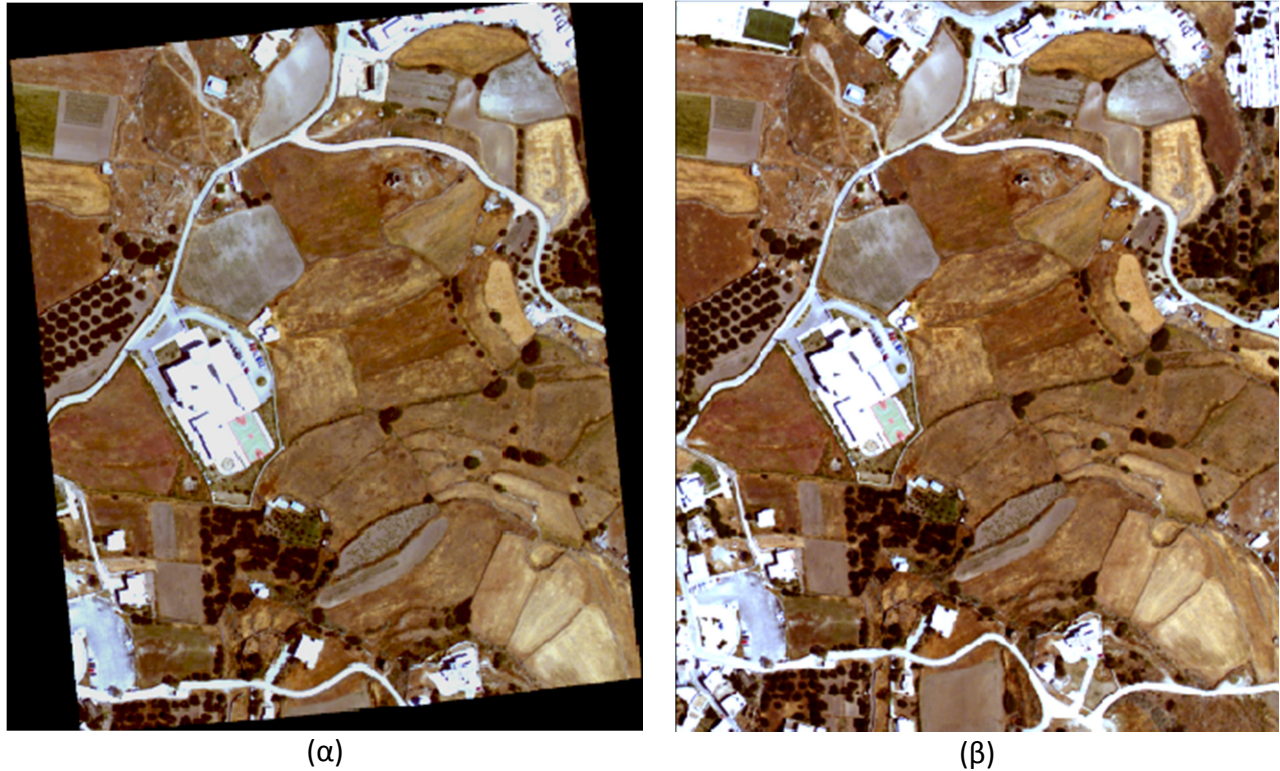


(δ)



(ε)

Εικόνα 3.2: Ορθοεικόνα αστικής περιοχής με DSM (α) από πυκνή συνταύτιση (β) από LIDAR, (γ) τμήμα αρχικής εικόνας αστικής περιοχής, τμήμα αντίστοιχης ορθοεικόνας με DSM (δ) από πυκνή συνταύτιση (ε) από LIDAR



Εικόνα 3.3: Ορθοεικόνα αγροτικής περιοχής με DSM (α) από πυκνή συνταύτιση (β) από LIDAR

3.7. Οριζοντιογραφικός έλεγχος ορθοεικόνας με DSM από LIDAR

Για τον οριζοντιογραφικό έλεγχο των προϊόντων ορθοαναγωγής που δημιουργήθηκαν με χρήση του DSM από τα δεδομένα σάρωσης με LIDAR, χρησιμοποιήθηκαν σημεία ελέγχου μετρημένα στο στερεομοντέλο που δημιουργήθηκε από τον α/τ. Εφόσον τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν εμπλακεί στη φωτογραμμετρική διαδικασία, τα σφάλματα που υπολογίστηκαν, εμπεριέχουν και την αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης των σημείων με εμπροσθοτομία (φέρουν τα σφάλματα του α/τ). Συνεπώς, με τον έλεγχο που πραγματοποιήθηκε, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την «απόλυτη» ακρίβεια της ορθοεικόνας.

Πίνακας 3.3: Εκτίμηση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών από DSM/LIDAR για την αγροτική και την αστική περιοχή

Αγροτική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	1.44	0.90	1.70
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	1.40	0.33	1.44
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	0.31	0.86	0.92
Αστική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	3.67	0.57	3.71
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	3.60	0.19	3.60
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	0.73	0.55	0.92

Ο έλεγχος της οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών από DSM/LIDAR έδειξε ότι το συνολικό σφάλμα είναι περίπου ίδιας τάξης (ειδικά στην περίπτωση της αστικής περιοχής) με το αντίστοιχο των ορθοφωτογραφιών από πυκνή συνταύτιση. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως το σφάλμα έχει συστηματικό χαρακτήρα που μπορεί ενδεχομένως να οφείλεται στην αβεβαιότητα του μετασχηματισμού του συστήματος αναφοράς του DSM/LIDAR.

Θα μπορούσε ενδεχομένως να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση του DSM/LIDAR για την εξαγωγή ορθοφωτογραφιών, είχε σημαντικότερη επίδραση στην ποιότητα του τελικού προϊόντος και όχι τόσο στην ακρίβεια, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από τη χρήση του DSM από πυκνή συνταύτιση για τον ίδιο σκοπό.

3.8. Σύγκριση μεταξύ των ορθοεικόνων με DSM από πυκνή συνταύτιση και LIDAR

Τα αποτελέσματα της ορθοαναγωγής που πραγματοποιήθηκε με χρήση του ψηφιακού μοντέλου από LIDAR, είναι σε γενικές γραμμές ικανοποιητικά από άποψη ποιότητας. Η ορθοεικόνα που παρήχθη για την αστική περιοχή παρουσιάζει κάποιες παραμορφώσεις, πλην όμως συνολικά το αποτέλεσμα είναι πολύ καλύτερο σε σύγκριση με την ορθοεικόνα που δημιουργήθηκε με το μοντέλο πυκνής συνταύτισης για την ίδια περιοχή (Εικόνα 3.2). Για την αγροτική περιοχή τα αποτελέσματα ορθοαναγωγής με τα δυο μοντέλα επιφανείας είναι εξίσου ικανοποιητικά, και δε διαπιστώθηκε αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ τους (Εικόνα 3.3).

Με την παραπάνω σύγκριση, επιτυγχάνεται ουσιαστικά μια εκτίμηση της ποιότητας των DSM που δημιουργήθηκαν με τις δυο διαδικασίες, και κατ' επέκταση πραγματοποιείται μια συγκριτική θεώρηση των ίδιων των διαδικασιών παραγωγής μοντέλου επιφανείας, με την τεχνική της πυκνής συνταύτισης, και με αξιοποίηση δεδομένων (υψηλής ακρίβειας) από σάρωση με LIDAR αντίστοιχα.

Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι παρότι το μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω πυκνής συνταύτισης είναι πολύ πιο πυκνό (παρουσιάζει τετραπλάσια πυκνότητα) σε σχέση με το αντίστοιχο από LIDAR, είχε ωστόσο ελλείψεις που κατέστησαν λιγότερο αποδοτική την εφαρμογή του στην περιοχή με έντονο ανάγλυφο. Αντίθετα, το μοντέλο από LIDAR απέδωσε με μεγαλύτερη πληρότητα και πιστότητα τα σχήματα, και τις ακμές των αντικειμένων.

Σημειωτέον, ότι η ποσοτικοποίηση των διαφορών των δυο ορθοεικόνων, με προσδιορισμό της οριζοντιογραφικής τους απόκλισης κρίνεται άνευ ουσίας, εφόσον κανένα εκ των δυο προϊόντων δεν μπορεί να θεωρηθεί ορθό, και μάλιστα δεδομένου ότι οι διαδικασίες παραγωγής των μοντέλων αναγλύφου, που χρησιμοποιήθηκαν, είναι διαφορετικές, τα σφάλματα που συσσωρεύονται στα τελικά προϊόντα λόγω αυτών, δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα.

Παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε ένας σχετικός οριζοντιογραφικός έλεγχος των δυο προϊόντων καθαρά ενδεικτικού χαρακτήρα. Παρατηρείται ότι η απόκλιση των δυο υποβάθρων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε τυχαία σφάλματα, που μπορεί να σχετίζονται με λάθη κατά τη σκόπευση, με τις διαφορετικές παραμορφώσεις που παρουσιάζουν οι δυο ορθοεικόνες, καθώς και με σφάλματα κατά την αλλαγή του συστήματος αναφοράς του DSM/LIDAR.

Πίνακας 3.4: Ποσοτικοποίηση οριζοντιογραφικής απόκλισης των ορθοφωτογραφιών με DSM από LIDAR και DSM από πυκνή συνταύτιση

Αγροτική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	1.77	0.77	1.93
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	1.46	0.07	1.46
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	1.02	0.78	1.29
Αστική περιοχή	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	Συνολικό RMSE (m)
	5.64	1.29	5.79
	Συστηματικό σφάλμα X (m)	Συστηματικό σφάλμα Y (m)	Συνολικό συστηματικό σφάλμα (m)
	-2.55	-0.08	2.56
	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	$\sigma_{\Delta S}$ (m)
	5.30	1.36	5.48

3.9. Σύγκριση μοντέλου αναγλύφου από πυκνή συνταύτιση με το αντίστοιχο από LIDAR

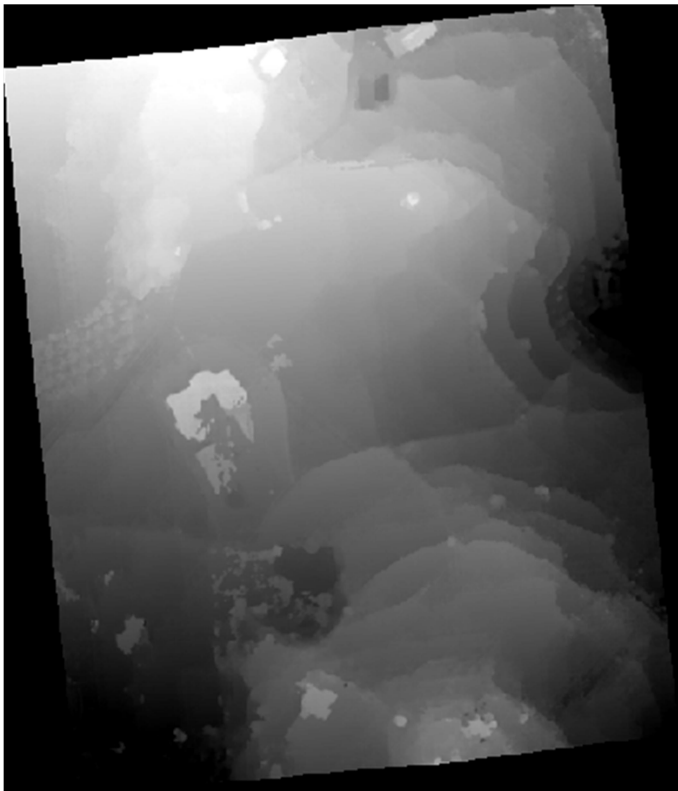
Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δυο μοντέλων αναγλύφου, για την αστική και την αγροτική περιοχή. Επισημαίνεται ότι το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM) από LIDAR έχει εδαφοψηφίδα 1 m, και το αντίστοιχο νέφος σημείων έχει πυκνότητα ίση με 2.5 σημεία/m². Τα αντίστοιχα μοντέλα από πυκνή συνταύτιση έχουν εδαφοψηφίδα 38 cm στην αστική περιοχή και 40 cm στην αγροτική, ενώ η πυκνότητα των αντίστοιχων νεφών είναι 11 σημεία/m².

3.9.1. Ποιοτικός έλεγχος

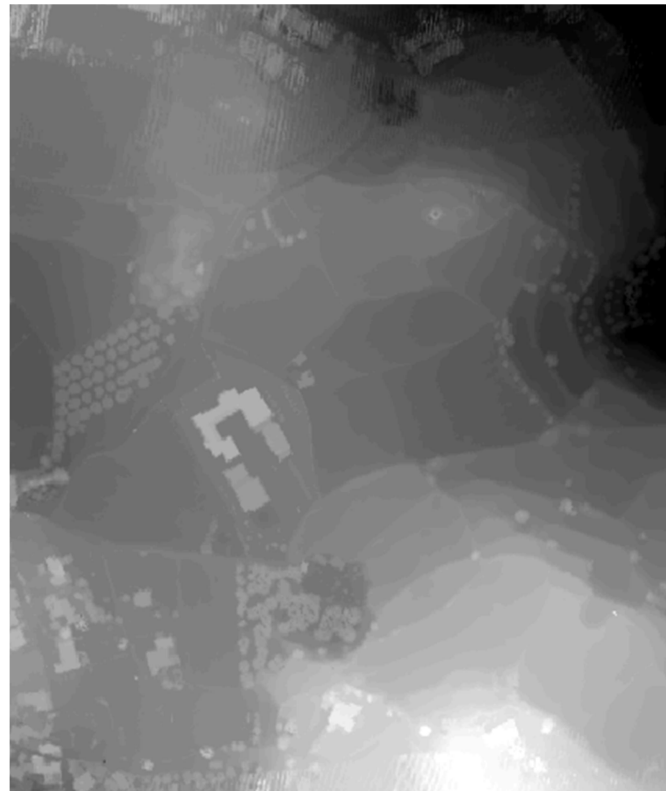
Με οπτικό έλεγχο των δυο μοντέλων αναγλύφου διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο που δημιουργήθηκε με την τεχνική της πυκνής συνταύτισης σημείων είναι εμφανώς πιο πυκνό, και αποδίδει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα αντικείμενα. Σε ορισμένα σημεία, ωστόσο, τα όρια και τα σχήματα των αντικειμένων δεν είναι σαφώς ορισμένα, έχουν αμβλυνθεί σημαντικά, ενώ άλλα δεν έχουν αποδοθεί καθόλου, επομένως έχει χαθεί πληροφορία (Εικόνα 3.5(β)).

Αντίθετα, το μοντέλο από LIDAR έχει αποδώσει πιο πιστά τα σχήματα, περιγράφοντας, συνεπώς με μεγαλύτερη πληρότητα τα αντικείμενα (Εικόνα 3.5(γ)).

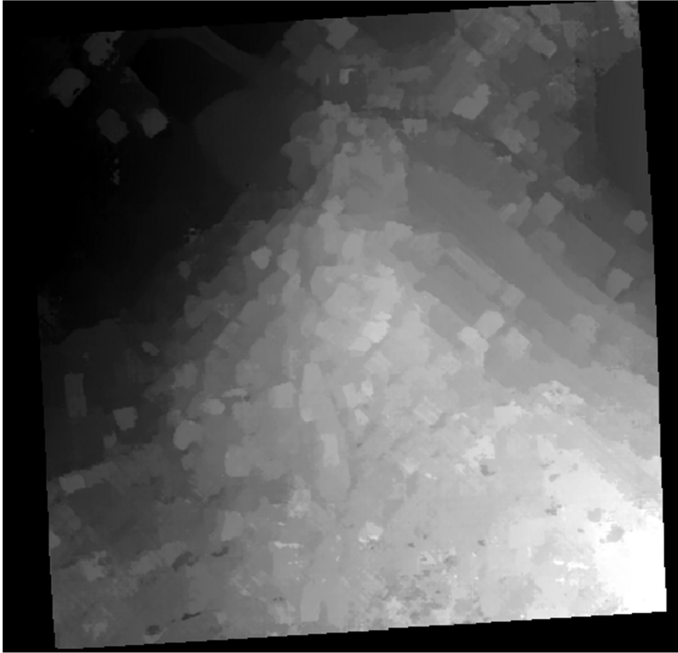
Μέσω αυτής της σύγκρισης, γίνονται εμφανείς οι αδυναμίες της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης, καθώς σε περιοχές με ελλειπή υφή, και με απότομες εναλλαγές στο ανάγλυφο (πχ στα όρια των αντικειμένων) ο αλγόριθμος αδυνατεί να βρει σωστές αντιστοιχίες και αλλοιώνει ή χάνει πληροφορία (Εικόνα 3.5).



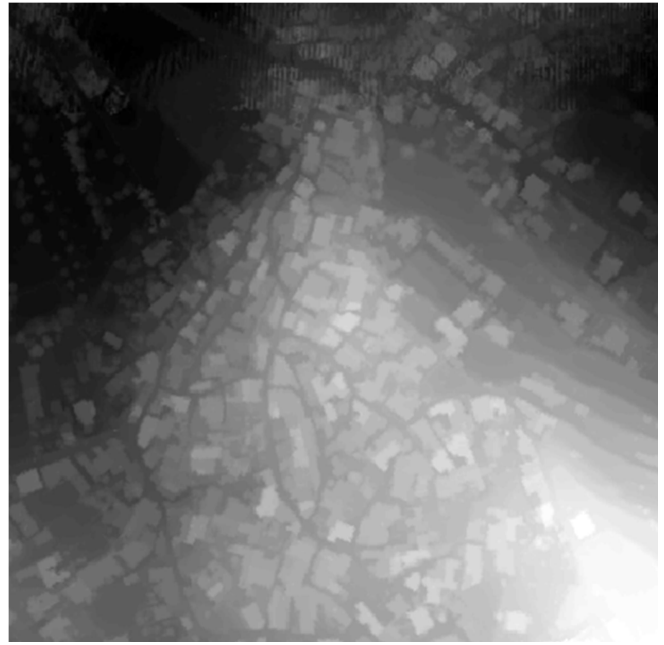
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 3.4: Μοντέλο αναγλύφου (α), (γ) από πυκνή συνταύτιση, (β), (δ) από LIDAR



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 3.5: Τμήμα (α) αρχικής εικόνας, και ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από (β) πυκνή συνταύτιση, (γ) από LIDAR

3.9.2. Ποσοτικός έλεγχος

Η ποσοτικοποίηση της απόκλισης που παρουσιάζουν τα δυο μοντέλα αναγλύφου, πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των δυο νεφών σημείων, με εφαρμογή της μεθόδου Cloud to cloud with height function, στο περιβάλλον του λογισμικού Cloud Compare.

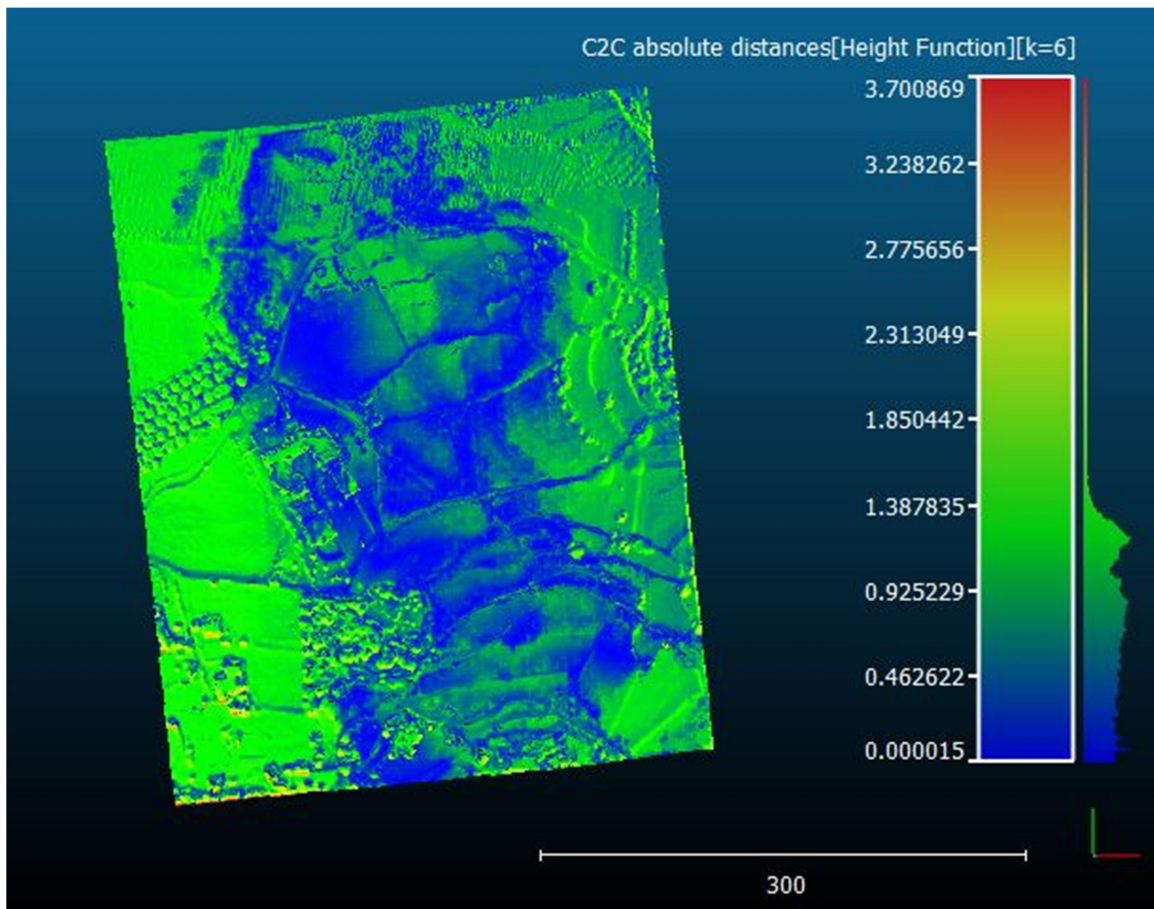
Επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί τα συγκρινόμενα νέφη να είναι κατά προσέγγιση έστω, προσανατολισμένα μεταξύ τους, πραγματοποιήθηκε, αρχικά, στο περιβάλλον του λογισμικού Geomagic, συνένωση των νεφών με τη μέθοδο του πλησιέστερου σημείου (ICP), μέσω της οποίας προσδιορίστηκε η σχετική στροφή και μετάθεση που παρουσιάζουν (η κλίμακα είναι η ίδια, καθώς και τα δυο έχουν ως σύστημα αναφοράς το ΕΓΣΑ 87).

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα ICP για τις δυο περιοχές

	Average distance (pixel)	Standard Deviation (pixel)
Αγροτική περιοχή	1.4	0.9
Αστική περιοχή	1.9	1.7

Εν συνεχεία, με εφαρμογή της μεθόδου Cloud to cloud with height function με έξι (6) σημεία, προσδιορίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων των δυο, προσανατολισμένων πλέον, νεφών. Η διαδικασία εκτελείται υπολογίζοντας για κάθε σημείο του δεύτερου νέφους, την απόσταση του από ένα τοπικό μοντέλο αποστάσεων που προσαρμόζεται στα σημεία του πρώτου (νέφος αναφοράς). Το νέφος αναφοράς προσεγγίζεται τοπικά από μια συνάρτηση που έχει τη μορφή $z=ax+by+cx^2+dy^2+exy$, οι συντελεστές της οποίας προσδιορίζονται κάθε φορά από έξι (6) γειτονικά σημεία. Η μοντελοποίηση της εν λόγω συνάρτησης αποτελεί την επιφάνεια αναφοράς ως προς την οποία υπολογίζεται η απόσταση του εκάστοτε ομόλογου σημείου του δεύτερου νέφους.

Οι υπολογισμένες αποστάσεις οπτικοποιούνται με χρήση μιας χρωματικής κλίμακας, κατάλληλα προσαρμοσμένης στο μοντέλο, ώστε να γίνεται άμεσα αντιληπτό που υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση. Τέλος, προσδιορίζονται η μέση απόσταση μεταξύ των δυο μοντέλων και η τυπική της απόκλιση.



Εικόνα 3.6: Προσδιορισμός απόκλισης μοντέλων για την αγροτική περιοχή

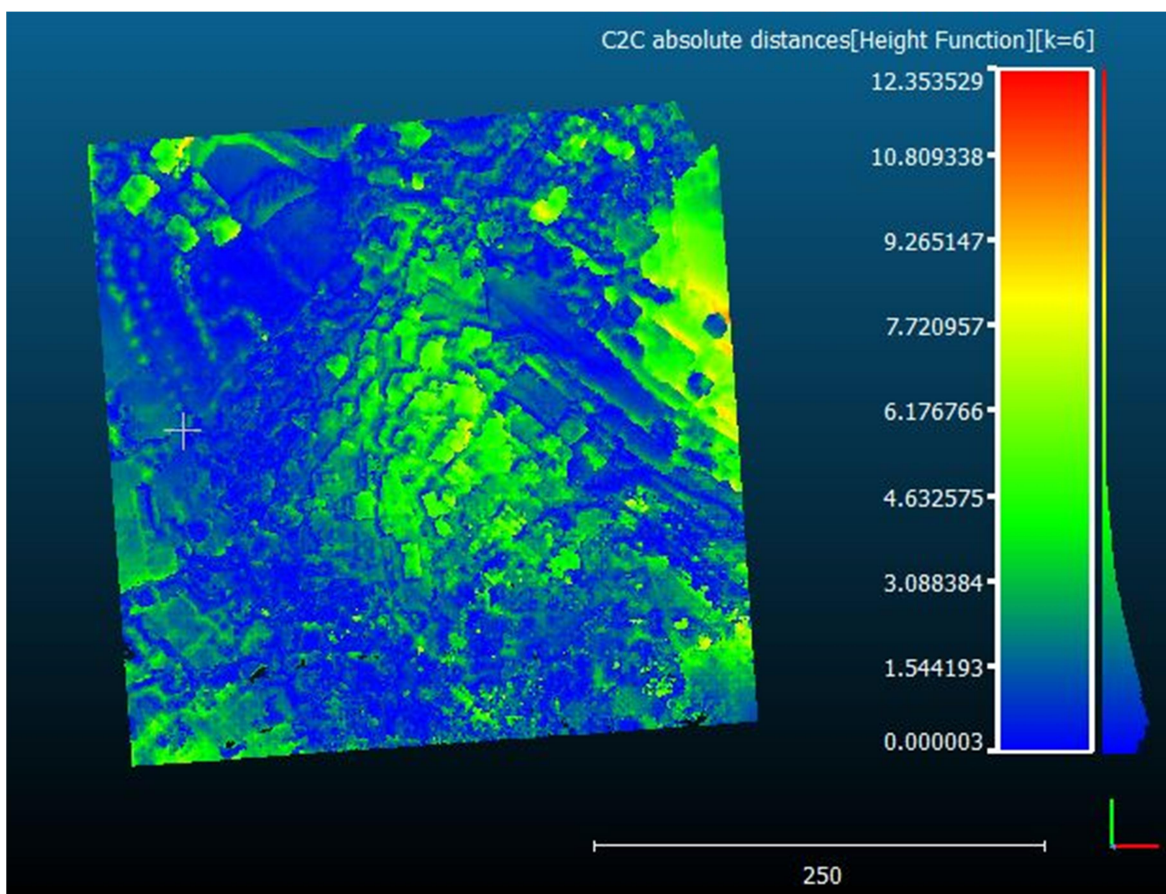
Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα C2C για τις δυο περιοχές

	Average distance (m)	Standard Deviation (m)
Αγροτική περιοχή	0.04	0.39
Αστική περιοχή	1.52	1.90

Σημειώνεται ότι στις Εικόνες 3.6 και 3.7 απεικονίζονται οι απόλυτες τιμές των διαφορών μεταξύ των δυο σημειοσυνόλων. Ομοίως, η τιμή του μέσου όρου (Average distance) στον Πίνακα 3.6 αφορά στις απόλυτες διαφορές των δυο νεφών.

Είναι σαφές ότι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται εκεί που το ανάγλυφο είναι πιο έντονο, γεγονός που κρίνεται λογικό εφόσον σε εκείνα τα σημεία εντοπίζονται προβλήματα στους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης.

Στην αγροτική περιοχή, η σύγκριση έδειξε ότι τα δυο μοντέλα προσαρμόζονται πολύ καλά, καθώς η μεταξύ τους απόσταση δεν ξεπερνά τα τέσσερα μέτρα στη χειρότερη περίπτωση που παρατηρήθηκε σε πολύ λίγα σημεία.



Εικόνα 3.7: Προσδιορισμός απόκλισης μοντέλων για την αστική περιοχή

Στο μοντέλο της αστικής περιοχής από πυκνή συνταύτιση, είχαν εντοπιστεί αρκετά προβλήματα, όπως έλλειψη πληροφορίας, παραμορφωμένα αντικείμενα και θόρυβος λόγω εσφαλμένων συνταυτίσεων (outliers). Σημειώνεται, επίσης, ότι ο θόρυβος δεν εξαλείφθηκε εφόσον προτιμήθηκε να μην εφαρμοστεί φίλτρο, ούτε διαγράφηκε πλήρως κατά τον καθαρισμό του νέφους, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνει, στο στάδιο αυτό, τη διαδικασία της σύγκρισης. Αποτελεί, ωστόσο, ένδειξη της ποιότητας του μοντέλου, καθώς δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων, εντοπίστηκαν στα σημεία όπου η απότομη εναλλαγή του αναγλύφου δημιούργησε προβλήματα κατά τη συνταύτιση, δηλαδή άκυρες ψηφιακές παραλλάξεις που εμφανίζονται ως θόρυβος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε η ημι-καθολική μέθοδος πυκνής συνταύτισης σημείων (dense matching) για την εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, με κριτήρια τη (βέλτιστη) ακρίβεια, ταχύτητα και οικονομία. Επισημαίνονται τα εξής:

1. Με την εν λόγω τεχνική επιτυγχάνεται συλλογή πολύ πυκνής πληροφορίας. Ο καθοριστικός παράγοντας για την πυκνότητα, άρα για την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου, είναι η ανάλυση της αρχικής εικόνας.
2. Καθοριστικής σημασίας κρίνεται η επιλογή του αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί, και των τιμών των παραμέτρων του.
3. Η διαδικασία πυκνής συνταύτισης γίνεται αυτόματα, ο χρήστης καθορίζει τις τιμές των παραμέτρων, ελέγχει και αξιολογεί τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την εξαγωγή ενός χάρτη ψηφιακής παράλλαξης είναι πολύ μικρός, γεγονός που αποτελεί ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα της διαδικασίας, καθώς καθιστά δυνατή την εκτέλεση όσων επαναλήψεων χρειάζονται, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.
4. Η τεχνική της πυκνής συνταύτισης δίνει τη δυνατότητα, (με το κόστος του φωτογραφικού εξοπλισμού), να προσδιοριστεί πυκνή 3D πληροφορία από τις επικαλυπτόμενες περιοχές των εικόνων. Δεν απαιτούνται συνεπώς, πρόσθετα δεδομένα. Σημειώνεται ότι απαιτούνται τουλάχιστον δυο εικόνες, καθώς πρόκειται για στερεοσυνταύτιση, ενώ η ανάλυση των εικόνων καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εργασίας. Όσο πιο υψηλή ανάλυση, τόσο πιο ποιοτικό προφανώς το αποτέλεσμα, με ανάλογη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.
5. Για την πλήρη περιγραφή της επιφάνειας ενός αντικειμένου απαιτείται πολύ μεγάλο πλήθος σημείων, άρα τεράστιος αποθηκευτικός χώρος. Το παραγόμενο από πυκνή συνταύτιση ψηφιακό μοντέλο καταλαμβάνει μικρότερο χώρο μια εικόνα υψηλής ανάλυσης.
6. Ακόμη και σε περιοχές, που ο αλγόριθμος αστοχεί και αυτό αποτυπώνεται με σφάλματα κατά το στάδιο της ορθοαναγωγής, μπορεί το αποτέλεσμα να βελτιωθεί εάν το παραγόμενο μοντέλο συμπληρωθεί με γραμμές αλλαγής κλίσης που θα συλλεχθούν χειροκίνητα ή με πρόσθετη πληροφορία, που έχει προκύψει, για παράδειγμα, με εξαγωγή των ακμών. Στόχος βέβαια είναι η αξιοποίηση της τεχνικής της πυκνής συνταύτισης για εξαγωγή προϊόντων ορθοαναγωγής, παρακάμπτοντας τις κλασικές χρονοβόρες φωτογραμμετρικές διαδικασίες, ωστόσο, επειδή με τα έως τώρα δεδομένα, η τεχνική χωλαίνει σε ορισμένα σημεία, μπορεί να εφαρμοστεί συνδυαστικά

με άλλες μεθόδους, για την επίτευξη του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος. Εξάλλου, ακόμη, και σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, το κέρδος από άποψη υπολογιστικού χρόνου, απαιτούμενων ωρών εργασίας και οικονομικών πόρων εξακολουθεί να είναι σημαντικό.

7. Τα μοντέλα αναγλύφου που δημιουργούνται με την τεχνική της πυκνής συνταύτισης, μπορεί να είναι πλήρως ανεξάρτητα της κλασικής φωτογραμμετρικής διαδικασίας, και των σφαλμάτων που αυτή εισάγει, εφόσον για την επιπολική επανασύσταση των εικόνων, αρκεί η γνώση μόνο του σχετικού προσανατολισμού, ο οποίος μπορεί να επιλυθεί με την αυτόματη εύρεση ομόλογων σημείων μέσω συνταύτισης σημείων.
8. Με την τεχνική αυτή δύναται να εξαχθεί πυκνό DTM ακόμη και για εικόνες από μη βαθμονομημένες μηχανές καθώς και μη μετρητικές και μάλιστα χωρίς να υπάρχει καμία επιπλέον a-priori γνώση για το αντικείμενο. Με αυτό τον τρόπο η φωτογραμμετρία απαγκιστρώνεται – σε ορισμένες βέβαια περιπτώσεις και για συγκεκριμένα προβλήματα – από τη διαδικασία της βαθμονόμησης ή τη χρήση μετρικών μηχανών λήψης, αλλά και από την ανάγκη για φωτοσταθερά σημεία.
9. Υπάρχει ένα εύρος διαθέσιμων αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Οι τοπικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους, υστερούν όμως σε ακρίβεια. Είναι παρόλα αυτά αρκετά ευέλικτοι σε εικόνες με υψηλή ανάλυση και θεωρούνται επικρατέστεροι για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Οι καθολικοί αλγόριθμοι πετυχαίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα από άποψη ποιότητας και ακρίβειας, ωστόσο, λόγω μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, ενδέχεται συχνά να παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις. Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος συνιστά μια πολύ καλή εναλλακτική, καθώς μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα πετυχαίνοντας περίπου τα ίδια αποτελέσματα με τις καθολικές μεθόδους.
10. Παράγοντες όπως η γεωμετρία της λήψης, οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις και διαφορές μεταξύ των εικόνων του στερεοζεύγους, οι σκιές, η έλλειψη υψής κλπ, δυσχεραίνουν την εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων υπολογισμού κόστους συσχέτισης κατά τη διαδικασία πυκνής συνταύτισης, με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι συχνά, να αστοχούν. Είναι σαφές συνεπώς ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης, ώστε η τεχνική της πυκνής συνταύτισης σημείων να αντικαταστήσει στο μέλλον τα συστήματα LIDAR ή τους επίγειους σαρωτές που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή για την απόκτηση πυκνών και ταυτόχρονα ποιοτικών ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας

Εξάγεται, συνεπώς, το συμπέρασμα ότι παρότι το μοντέλο που δημιουργείται μέσω πυκνής συνταύτισης είναι πολύ πιο πυκνό (στην παρούσα εφαρμογή παρουσιάζει τετραπλάσια πυκνότητα) σε σχέση με το αντίστοιχο από LIDAR, παρουσιάζει προβλήματα που καθιστούν

λιγότερο αποδοτική την εφαρμογή του σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Η τεχνική της πυκνής συνταύτισης, επομένως, δίνει πολύ πυκνή πληροφορία, όμως με τα μέχρι τώρα δεδομένα των αλγορίθμων συσχέτισης και των παραμετρικών μεθόδων που αυτοί εφαρμόζουν, χάνουν πολλή πληροφορία στις ακμές των αντικειμένων, εν αντιθέσει με το σύστημα LIDAR (και τους επίγειους σαρωτές αντίστοιχα) που ακόμη και σε περιπτώσεις αραιής δειγματοληψίας αποδίδονται με μεγαλύτερη πληρότητα και πιστότητα τα σχήματα, τα όρια κλπ.

Ένας συνήθης τρόπος για τη βελτίωση της απόδοσης της στέρεο συνταύτισης των εικόνων, είναι η εφαρμογή φίλτρων. Τα φίλτρα εφαρμόζονται πριν την εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων, και έχουν στόχο την εξομάλυνση των αρχικών εικόνων, διατηρώντας παράλληλα τις ακμές των αντικειμένων (πχ LoG - Laplacian of Gaussian ή Sobel), καθώς και τη βελτίωση των αρχικών εικόνων ενισχύοντας την υφή τους, και μειώνοντας ταυτόχρονα τις έντονες ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικονοψηφίδων (Mean filter).

Επιπλέον, βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης, μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση επιπρόσθετης πληροφορίας για το αντικείμενο, εάν φυσικά υπάρχει, πχ αν με την εφαρμογή φίλτρου έχουν εξαχθεί οι ακμές. Ο συνδυασμός του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης και των ακμών, βοηθάει τις μεθόδους προσδιορισμού κόστους συσχέτισης να διαχωρίζουν καλύτερα τα όρια των αντικειμένων, περιορίζοντας κατά συνέπεια τις εσφαλμένες συνταυτίσεις και τα κενά στον χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Birchfield, S., Tomasi, C., 1998. A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling. IEEE Transactions on Pattern Analysis and
- Hartley, R., Zisserman, A., 2003. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd edition, Cambridge University Press.
- Heipke, C., 1992. Overview of image matching techniques. OEEPE Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations, Lausanne, pp. 173-191
- Hirschmüller, H., 2008. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2), pp. 328-41.
- Hirschmüller, H., 2011. Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications, Invited Paper at the Photogrammetric Week, September 2011 in Stuttgart, Germany, pp. 173-184.
- Kraus, K., 2010. Φωτογραμμετρία. Τόμος 1, Εκδόσεις ΤΕΕ.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013, Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z)
- Maltezos, E., Ioannidis, Ch., 2014. Orthoimage of Asclepieion at the Ancient Messene from UAV images applying Dense Image Matching, Lecture Notes in Computer Science Volume 8740, 2014, pp 70-79, 5th International Conference, EuroMed 2014, Limassol, Cyprus, November 3-8, 2014
- Scharstein, D., Szeliski, R., 2002. A taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. International Journal of Computer Vision, 47(1/2/3), pp.7-42, 2002
- Sebastian Dröppelmann, Moos Hueting, Sander Latour, Martijn van der Veen, 2010. Stereo Vision Using the OpenCV Library. 108
- The OpenCV Reference Manual 2.4.5.0, 2013
- CloudCompare User's Manual for version 2.1

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αδάμ, Κ., 2011. Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και από Μη Βαθμονομημένες Μηχανές. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Γεωργόπουλος, Α., 1998. Ψηφιακή Φωτογραμμετρία. Σπουδαστικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- Θεοφάνους, Α., 2004. Ανάπτυξη Προγράμματος για την Επιτολική Επανασύσταση Στερεοζεύγους. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Αθήνας
- Καρράς, Γ., 1998. Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία
- Καρφής, Α., 2009. Διερεύνηση Φωτογραμμετρικών Αυτοματισμών με Χρήση της Επιτολικής Γεωμετρίας. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- Κυπαρρίση, Β., 2011. Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Μαλτέζος, Ε., 2013. Εξαγωγή Πινάκων Ανομοιοτήτων Βάθους από Εναέριες Εικόνες μέσω Πυκνής Συνταύτισης Σημείων
- Πρόκος, Α., 2012. Δημιουργία Φωτογραμμετρικού Σαρωτή Laser με Χρήση Πρόσθετων Γεωμετρικών Δεσμεύσεων. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- Πρόκος, Α., Καρράς, Γ., 2008. Εισαγωγή στην Συνταύτιση Εικόνων. Σπουδαστικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Φλωρίδη Β., 2013. Προγραμματισμός, Εφαρμογή και Αξιολόγηση Μεθόδων Αυτόματης Πυκνής Συνταύτισης Εικόνας σε Στερεοζεύγη. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- Φράγκος, Π., 2013. Αρχές Λειτουργίας Εναέριων Σαρωτών LiDAR και Εφαρμογές τους στην Παραγωγή Φωτογραμμετρικών Προϊόντων. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Διαδικτυακές Πηγές

<http://vision.middlebury.edu/stereo/>

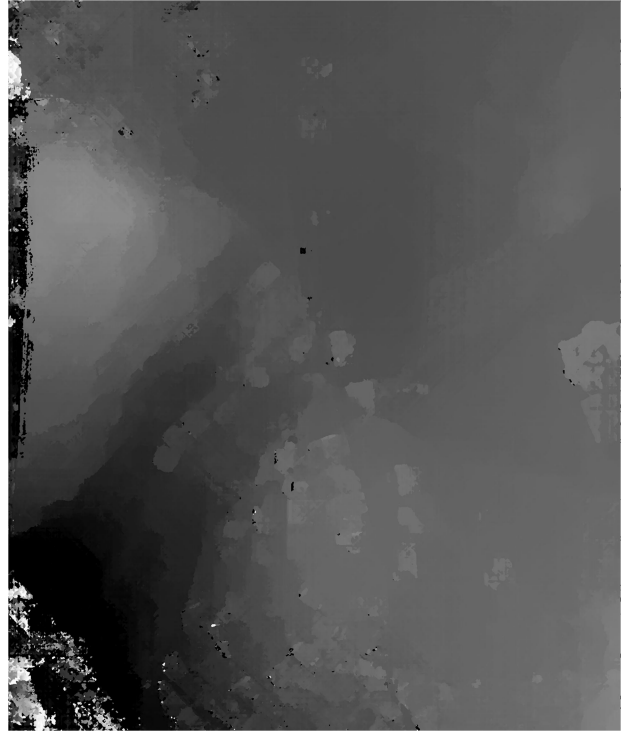
<http://www.cse.psu.edu/>

<https://maps.google.gr/>

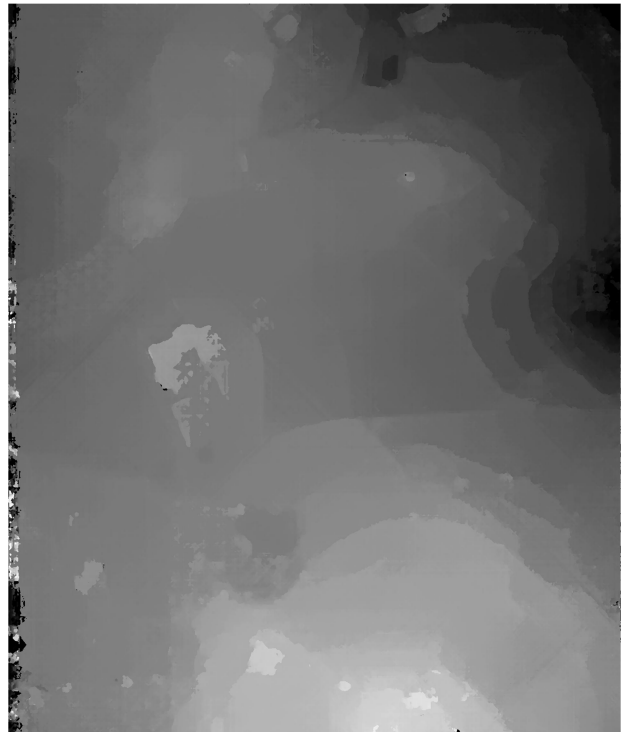
<http://www.ktimatologio.gr/Pages/Default.aspx>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

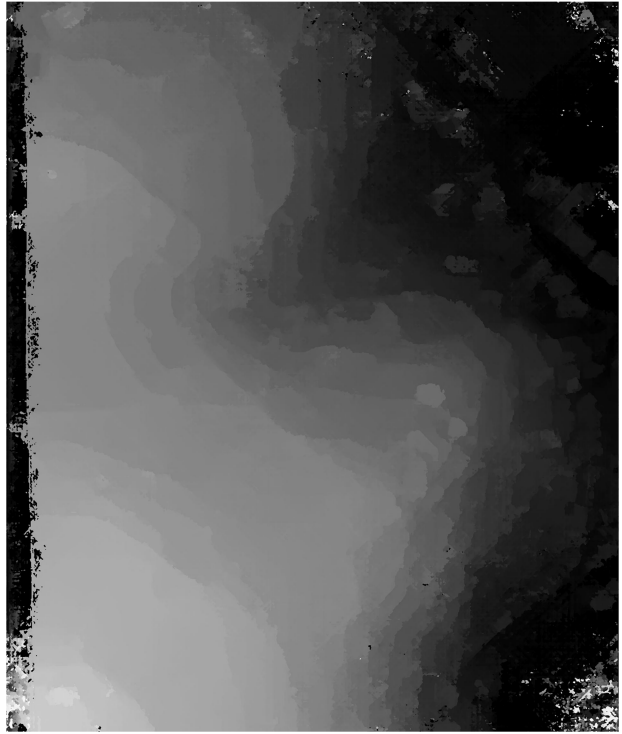
Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που εξήχθησαν εντός της περιοχής εργασίας



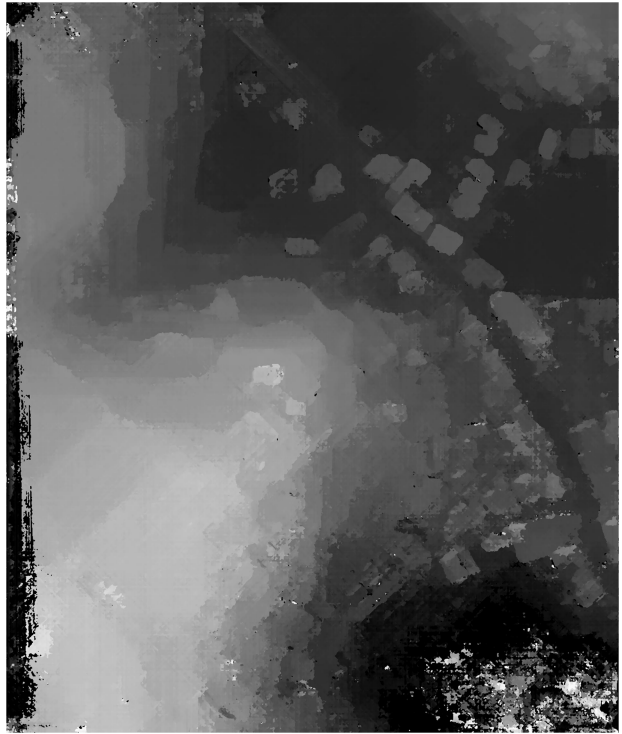
Εικόνα 1: Μοντέλο 3 στερεοζεύγους 243-244



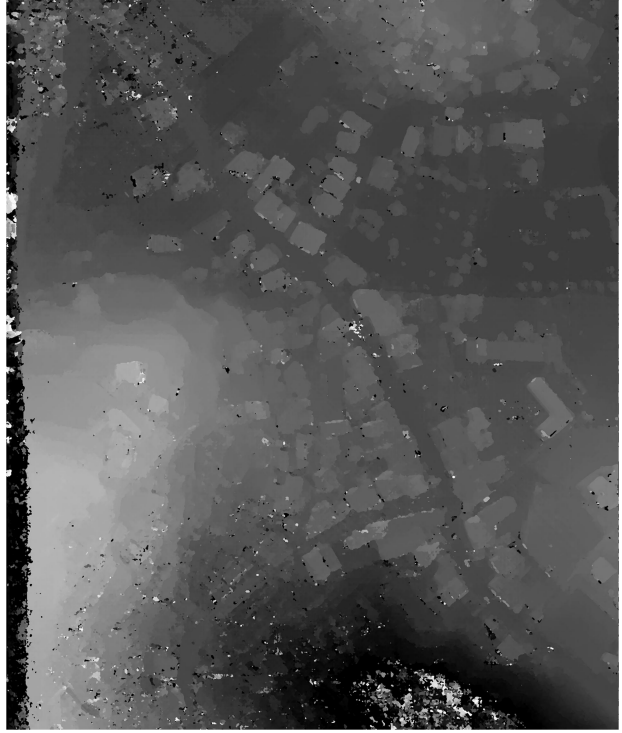
Εικόνα 2: Μοντέλο 2 στερεοζεύγους 243-244



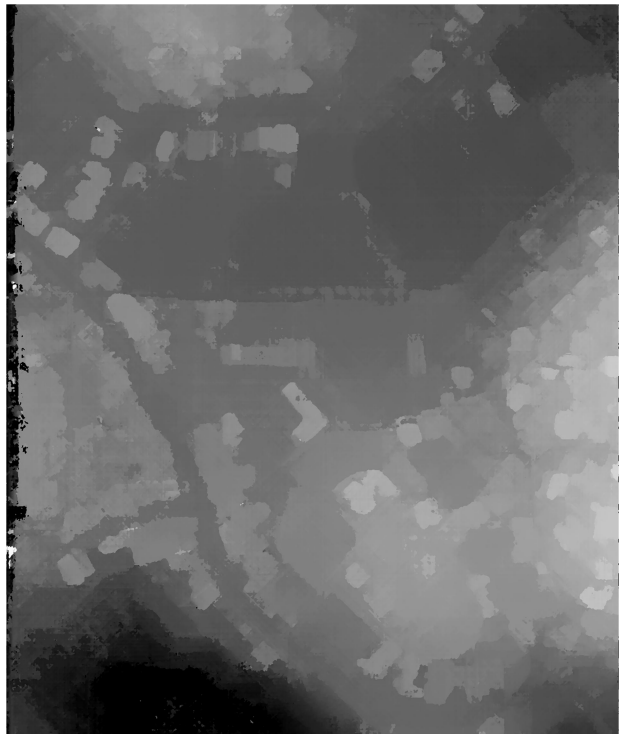
Εικόνα 3: Μοντέλο 1 στερεοζεύγους 243-244



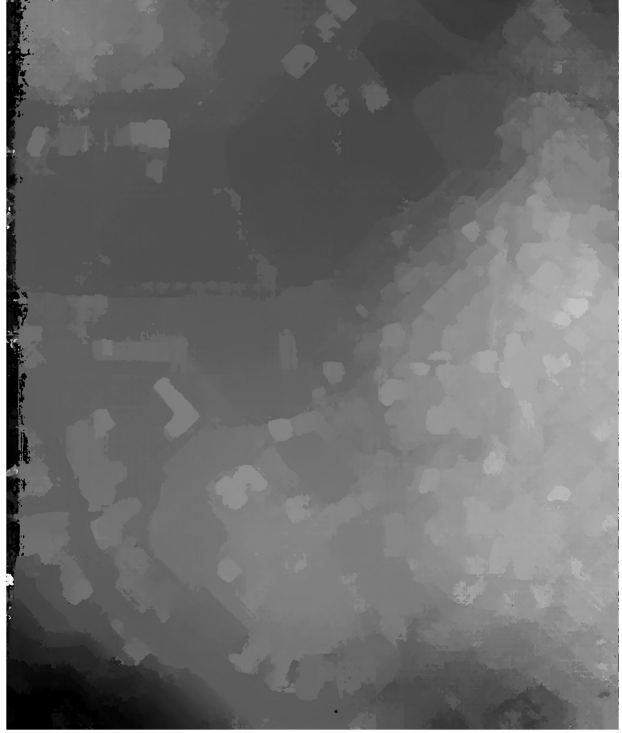
Εικόνα 4: Μοντέλο 3 στερεοζεύγους 244-245



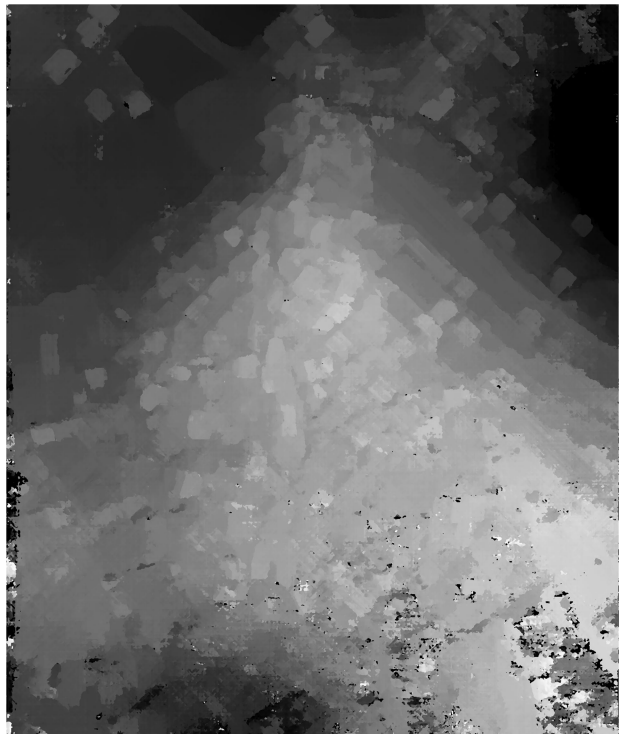
Εικόνα 5: Μοντέλο 2α στερεοζεύγους 244-245



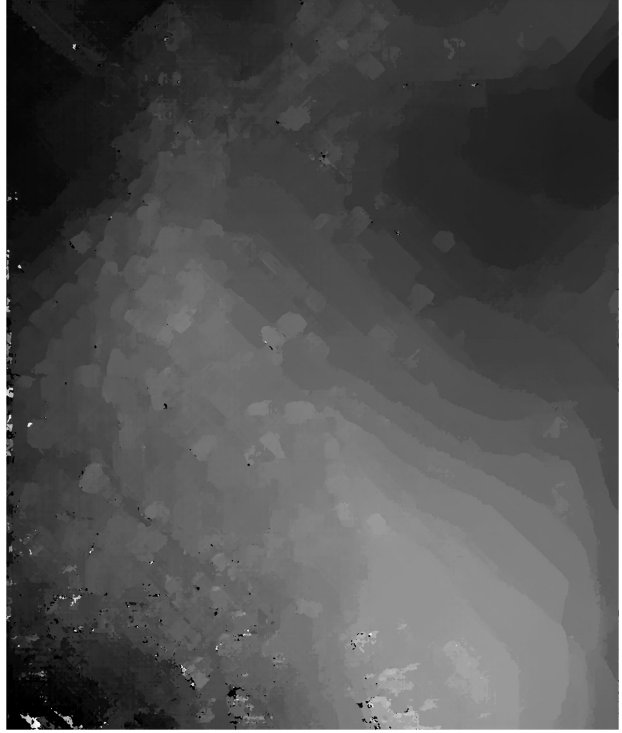
Εικόνα 6: Μοντέλο 2 στερεοζεύγους 244-245



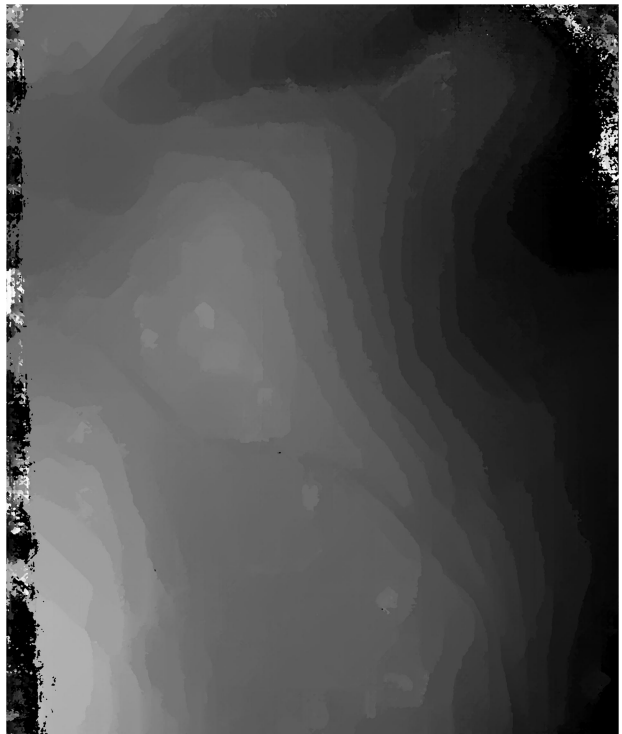
Εικόνα 7: Μοντέλο 1α στερεοζεύγους 244-245



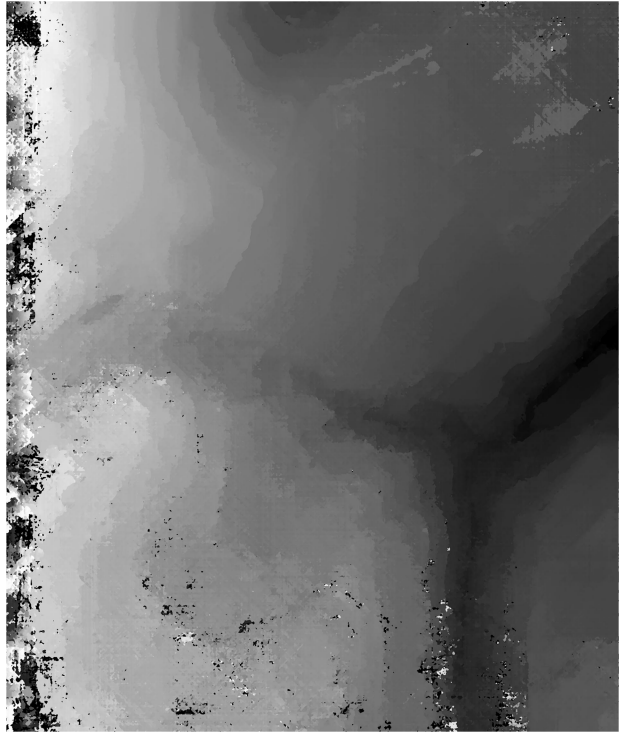
Εικόνα 8: Μοντέλο 1 στερεοζεύγους 244-245



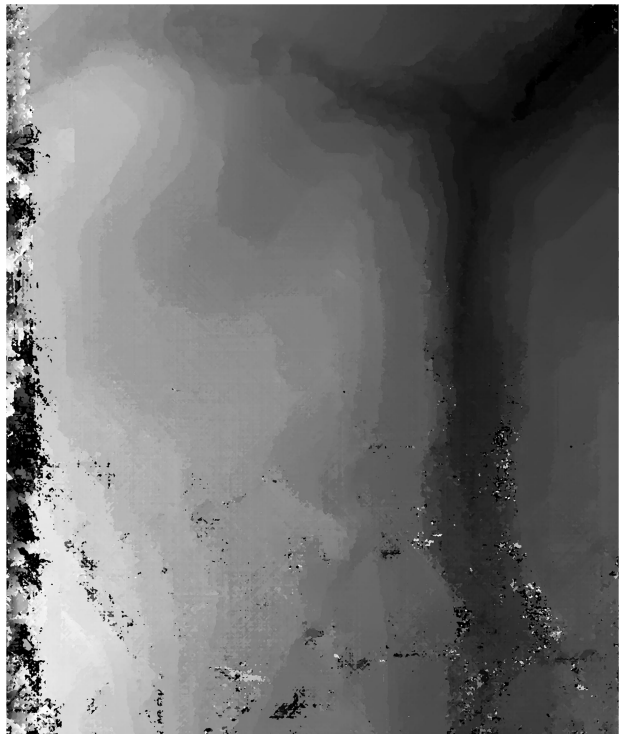
Εικόνα 9: Μοντέλο 3 στερεοζεύγους 245-246



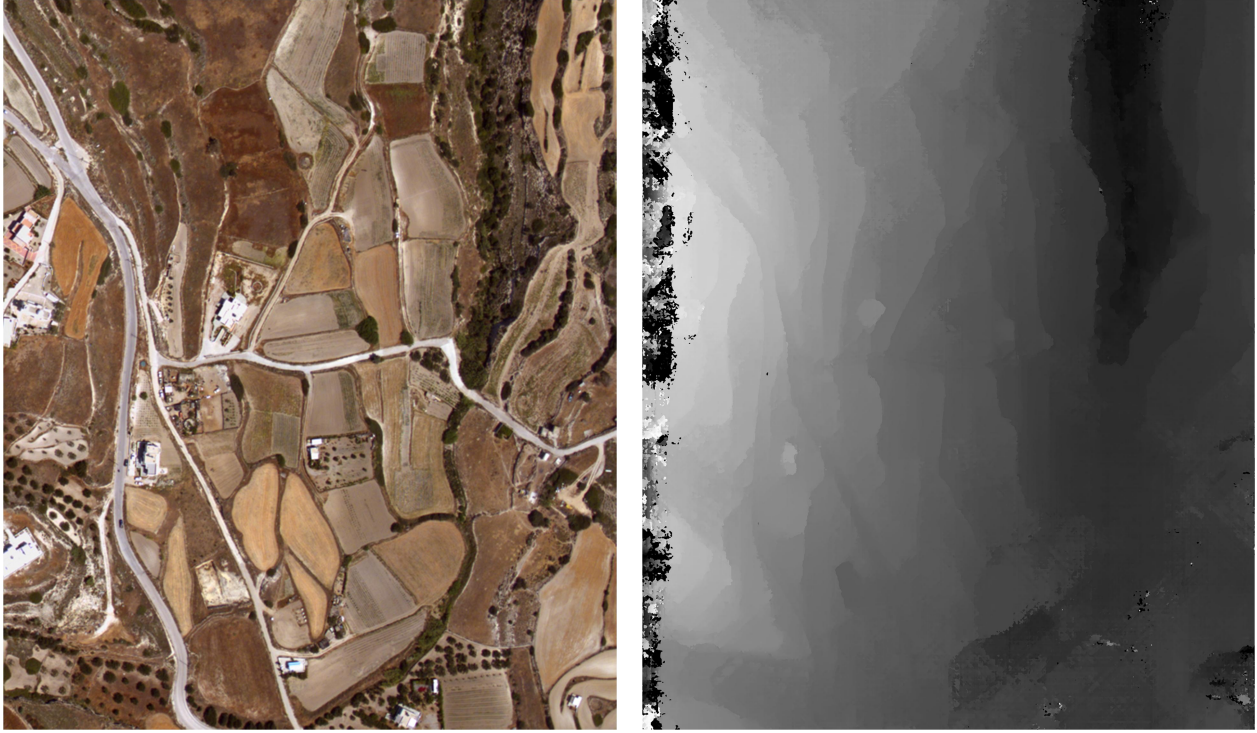
Εικόνα 10: Μοντέλο 2 στερεοζεύγους 245-246



Εικόνα 11: Μοντέλο 1 στερεοζεύγους 245-246



Εικόνα 12: Μοντέλο 1a στερεοζεύγους 245-246



Εικόνα 13: Μοντέλο 1b στερεοζεύγους 245-246