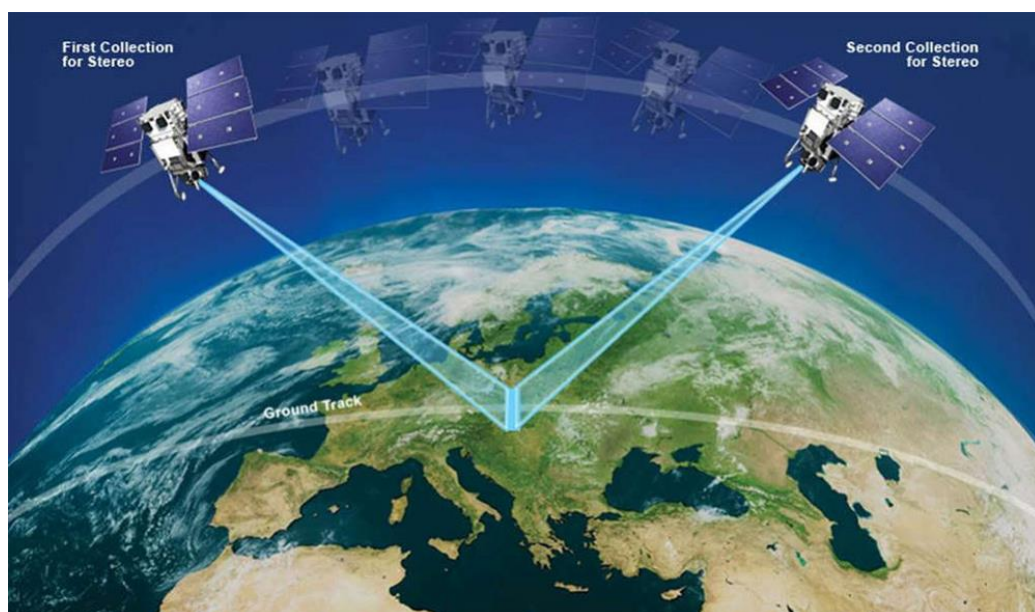




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Εξαγωγή Τρισδιάστατης Πληροφορίας από Δορυφορικές Εικόνες Πολύ Υψηλής Ανάλυσης



Εμμανουήλ Παπαδημητρίου
(ΑΜ: 19391084)

Επιβλέπων Καθηγητής
Λάζαρος Γραμματικόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ

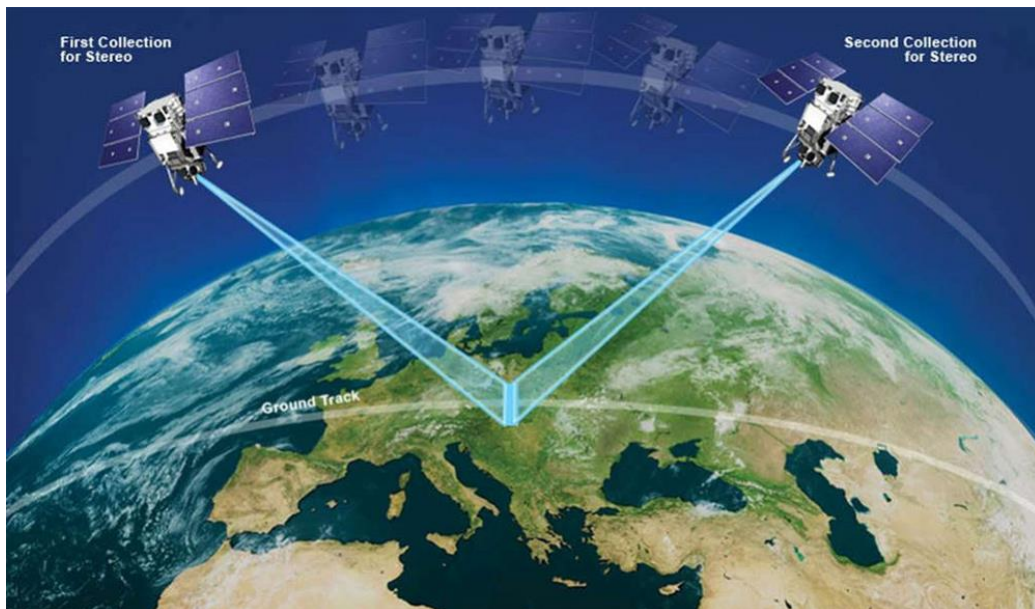
Αιγάλεω, Οκτώβριος 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING AND GEOINFORMATICS ENGINEERING
LABORATORY OF PHOTOGRAMMETRY

Diploma Thesis

Extraction of 3D Information from Very High Resolution Satellite Imagery



Emmanouil Papadimitriou
(Registration Number: 19391084)

Supervisor
Lazaros Grammatikopoulos, Associate Professor UNIWA

Aigaleo, October 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Εξαγωγή Τρισδιάστατης Πληροφορίας από Δορυφορικές Εικόνες Πολύ Υψηλής Ανάλυσης

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Επιβλέποντος Καθηγητή

Η διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

α/α	Όνοματεπώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή Υπογραφή
1.	Λάζαρος Γραμματικόπουλος (επιβλέπων)	Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ	
2.	Ελένη Πέτσα	Καθηγήτρια ΠΑΔΑ	
3.	Γεώργιος Σφήκας	Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ	

Ημερομηνία εξέτασης διπλωματικής εργασίας: 11/10/2024

Copyright© Εμμανουήλ Παπαδημητρίου, Οκτώβριος 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, 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. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

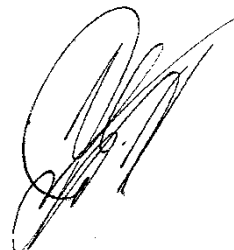
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Εμμανουήλ Παπαδημητρίου του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 19391084, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών

Εμμανουήλ Παπαδημητρίου



*And now, the end is near
And so I face the final curtain
My friend, I'll say it clear
I'll state my case, of which I'm certain*

*I've lived a life that's full
I've travelled each and every highway
And more, much more than this
I did it my way*

Frank Sinatra

"My Way"

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία αποτελεί το τελικό στάδιο ενός προσωπικού στόχου που ξεκίνησε από μια αυθόρμητη σκέψη μου να επανέλθω έπειτα από αρκετά χρόνια στα μαθητικά και φοιτητικά έδρανα, κάτι το οποίο έμελλε να είναι μια από τις καλύτερες αποφάσεις που έχω λάβει στη ζωή μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πρωτίστως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, την αμέριστη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά κυρίως για τις πολλές «φωτογραμμετρικές» συζητήσεις και συμβουλές του, οι οποίες με έκαναν να θέλω να ασχοληθώ περαιτέρω με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο το οποίο μέχρι πρότινος μου φαινόταν ακατόρθωτο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συναδέλφους και φίλους συμφοιτητές μου, καθώς και σε όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής με τους οποίους είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ σε αυτά τα ενίοτε απαιτητικά, αλλά υπέροχα πέντε χρόνια φοίτησης. Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Μαρία Πέτσα και Μάνο Ταουλαΐ, καθώς και στην Ζωή Δήμου για την συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη.

Ευχαριστώ πολύ το Ελληνικό Κέντρο Διαστήματος (ΕΛ.ΚΕ.Δ.) για την φιλοξενία και την ευγενική παραχώρηση των υπολογιστικών του συστημάτων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου, για την αγάπη και την ανιδιοτελή υποστήριξή τους σε κάθε απόφαση της ζωής μου.

Τέλος, οφείλω ξεχωριστές ευχαριστίες στην Κατερίνα, η οποία στήριζε εξ αρχής την όλη μου προσπάθεια και ήταν πάντοτε δίπλα μου σε κάθε επιτυχία και δυσκολία.

Μάνος Παπαδημητρίου,

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Περίληψη

Με την ανάπτυξη που έχει γίνει τις τελευταίες δεκαετίες στην τεχνολογία των δορυφόρων, οι δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης, οι οποίες είναι πλέον διαθέσιμες προς χρήση για το ευρύτερο κοινό, δίνουν μια ιδιαίτερα λεπτομερή απεικόνιση της γης από το διάστημα. Πέραν των χρήσεων τους για πληθώρα εφαρμογών, οι δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης είναι χρήσιμες και για την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας, δηλαδή την παραγωγή Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων (Digital Elevation Models, DEM). Η εξαγωγή των DEM από δορυφορικές εικόνες έχει γίνει ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως για εφαρμογές αστικού σχεδιασμού, παρακολούθησης του περιβάλλοντος, διαχείρισης φυσικών καταστροφών κ.α. Η δυνατότητα των δορυφόρων να καλύπτουν ιδιαίτερα μεγάλες εκτάσεις της γήινης επιφάνειας με μια μόνο διέλευση, επιτρέπει την γρηγορότερη παραγωγή DEM, με αρκετά καλή χωρική και υψομετρική ακρίβεια.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει τη διαδικασία της εξαγωγής υψομετρικής πληροφορίας από δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης των γνωστότερων εμπορικών δορυφορικών οίκων, όπως η Maxar Technologies, η AIRBUS Defense and Space και η Planet Labs, με στερεοζεύγη εικόνων από διαφορετικά περιβάλλοντα και τοποθεσίες.

Η μελέτη πραγματοποιείται σε δυο εμπορικά λογισμικά: το Catalyst Earth Professional της PCI Geomatics και το Metashape Professional της Agisoft. Τα λογισμικά υλοποιούν την πλήρη διαδικασία παραγωγής DEM, από την εύρεση χαρακτηριστικών σημείων και την συνταύτιση των εικόνων του στερεοζεύγους, μέχρι και την εξαγωγή των DEM. Οι διαδικασίες αυτές γίνονται με διαφορετικές μεθόδους και αλγορίθμους σε κάθε λογισμικό, η περιγραφή και η αξιολόγηση των οποίων αφορά το κύριο πρακτικό μέρος της εργασίας.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται συγκρίνοντας τα παραγόμενα DEM με υπόβαθρα αναφοράς το DTM από το Ελληνικό Κτηματολόγιο για περιοχές εντός Ελλάδος και το DTM από την αποστολή Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) της NASA για περιοχές εκτός Ελλάδος.

Λέξεις κλειδιά: Δορυφορικές εικόνες, Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα, Συνταύτιση δορυφορικών εικόνων, Τρισδιάστατη ανακατασκευή, PCI Geomatics Catalyst Earth, Agisoft Metashape Professional

Abstract

With the advancements that take place in satellite technology over the last decades, very high-resolution satellite images, which are now available for use by the general public, have given a very detailed representation of the earth from space. Beyond their use for numerous applications, very high-resolution satellite images are also useful for extracting elevation information, the Digital Elevation Models (DEM). The extraction of DEMs from satellite images has become very important, mostly for applications in urban planning, environmental monitoring, disaster management and more. The ability of the satellites to cover exceptionally large areas of the Earth's surface in just a single pass, allows for quicker DEM production, with fairly good spatial and vertical accuracy.

The present thesis examines the process of extracting elevation information from very high-resolution satellite images provided by well-known satellite companies, such as Maxar Technologies, AIRBUS Defense and Space and Planet Labs, using stereo pairs from different environments and locations.

The study is conducted using two commercial software platforms: Catalyst Earth Professional from PCI Geomatics and Metashape Professional from Agisoft. These software platforms implement the complete process of DEM generation, from feature point detection and stereo pair image matching, to the final extraction of the DEMs. These processes are carried out using different methods and algorithms in each software, where the description and evaluation of the processes form the main practical part of the thesis.

The evaluation is conducted by comparing the produced DEMs with reference basemaps the DTM from the Hellenic Cadastre for areas within Greece and the DTM from NASA's Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) for areas out of Greece.

Keywords: Satellite imagery, Digital Elevation Models, Satellite image matching, 3D reconstruction, PCI Geomatics Catalyst Earth, Agisoft Metashape Professional

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Πίνακας περιεχομένων.....	vi
Κατάλογος σχημάτων	ix
Κατάλογος πινάκων	xiii
Αλφαβητικό ευρετήριο όρων.....	xiv
Εισαγωγή	1
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	1
Σκοπός και στόχοι	1
Μεθοδολογία.....	1
Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	2
1. Βασικές έννοιες των δορυφορικών εικόνων.....	3
1.1. Ιστορική αναδρομή	3
1.1.1. Αεροφωτογραφίες.....	3
1.1.2. Δορυφορικές εικόνες	4
1.2. Τροχιές δορυφόρων παρατήρησης της γης	6
1.3. Χωρική και χρονική ανάλυση δορυφορικών εικόνων	7
1.3.1. Χωρική ανάλυση δορυφορικών εικόνων.....	7
1.3.2. Χρονική ανάλυση δορυφορικών εικόνων	8
1.4. Αισθητήρες δορυφόρων παρατήρησης της γης.....	9
1.4.1. Σαρωτές τύπου Whiskbroom.....	9
1.4.2. Σαρωτές τύπου Pushbroom	10
1.5. Διαδικασία λήψης στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων	11
1.5.1. Λήψεις κατά μήκος της ίδιας τροχιάς του δορυφόρου (Along-track).....	11
1.5.2. Λήψεις μέσω διαδοχικών τροχιών του δορυφόρου (Across-track).....	11
1.6. Δορυφόροι με δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικών εικόνων	12
1.6.1. AIRBUS Defense and Space	12
1.6.2. Maxar Technologies	14
1.6.3. Planet Labs	15
2. Προσανατολισμός και συνταύτιση δορυφορικών εικόνων	16
2.1. Εντοπισμός χαρακτηριστικών και συνταύτιση δορυφορικών εικόνων	16
2.1.1. Multi-View Stereo (MVS).....	16

2.1.2. Normalized Cross Correlation (NCC)	16
2.1.3. Semi-Global Matching (SGM)	17
2.2. Προσανατολισμός δορυφορικών εικόνων.....	18
2.2.1. Rational Polynomial Coefficients (RPC)	18
2.2.2. Μέθοδος δέσμης (Bundle Adjustment)	19
3. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα.....	19
3.1. Βασικές έννοιες των Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων.....	19
3.1.1. Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) και Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) .	20
3.2. Πηγές και χρήσεις Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων	20
3.3. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα παγκόσμιας κάλυψης	21
3.3.1. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	21
3.3.2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) .	22
3.4. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα τοπικής κάλυψης.....	22
4. Περιοχές μελέτης και σύνολο δεδομένων	23
4.1. Εικόνες από AIRBUS	24
4.2. Εικόνες από Maxar Technologies	29
4.3. Εικόνες από Planet Labs	38
5. Παραγωγή Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων σε εμπορικά λογισμικά	40
5.1. Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων και διόρθωση αποτελεσμάτων.....	40
5.1.1. Μετατροπή αρχείων εικόνων	41
5.1.2. Εύρεση φωτοσταθερών σημείων.....	41
5.1.3. Διόρθωση αποτελεσμάτων	41
5.2. Catalyst Earth Professional	42
5.2.1. Εφαρμογή σε εικόνες της AIRBUS.....	44
5.2.2. Εφαρμογή σε εικόνες της Maxar Technologies	50
5.2.3. Εφαρμογή σε εικόνες της Planet Labs.....	58
5.3. Metashape Professional.....	60
5.3.1. Εφαρμογή σε εικόνες της AIRBUS.....	61
5.3.2. Εφαρμογή σε εικόνες της Maxar Technologies	66
5.3.3. Εφαρμογή σε εικόνες της Planet Labs.....	72
5.4. Μετατροπή DSM σε DTM.....	73
5.4.1. Catalyst Earth Professional DSM2DTM	73
5.4.2. Ταξινόμηση Point cloud στο Metashape Professional	78
5.5. Αξιολόγηση παραγόμενων DTM	81
5.5.1. Χάρτης διαφορών DTM	81

5.5.2. Υψομετρικό προφίλ διαδρομής	91
6. Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων.....	100
6.1. Σύγκριση λογισμικών.....	100
6.2. Σύγκριση μεθόδων εξαγωγής DEM.....	100
6.3. Σύγκριση along-track με across-track στερεοζεύγη εικόνων.....	101
7. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	101
7.1. Συμπεράσματα	101
7.2. Μελλοντική έρευνα.....	102
Βιβλιογραφία - Αναφορές - Διαδικτυακές πηγές.....	103

Κατάλογος σχημάτων

Εικόνα εξωφύλλου: Στερεοσκοπική παρατήρηση σε δορυφορική τροχιά (πηγή: Maxar)	
Σχήμα 1.1: Ο Gaspard-Felix Tournachon (a) και η πρώτη ιστορικά αεροφωτογραφία στην Μονμάρτη του Παρισιού το 1858 (b) [1]	3
Σχήμα 1.2: Αεροσκάφος με αεροφωτομηχανή (a) και αεροφωτογραφία (b) κατά τη διάρκεια του 1 ^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου [2], [3]	3
Σχήμα 1.3: Η πρώτη δορυφορική εικόνα χωρικής ανάλυσης κάτω του ενός μέτρου από τον IKONOS-2 στις 12/10/1999 στην περιοχή της Washington DC, USA [4].....	4
Σχήμα 1.4: Προβολή δορυφορικών εικόνων (a) και τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων (b) στο Google Earth	5
Σχήμα 1.5: Δορυφόροι CubeSat (a) και τα μεγέθη τους (b) [5].....	5
Σχήμα 1.6: Γεωστατική (a), χαμηλή (b) και ηλιοσύγχρονη τροχιά (c) [6]	6
Σχήμα 1.7: Σύγκριση ηλιοσύγχρονων τροχιών με κλίση 97.79° (a) και 47° (b) από τον ισημερινό [7].....	7
Σχήμα 1.8: Σύγκριση χωρικών αναλύσεων από διαφορετικούς δορυφόρους [9]	8
Σχήμα 1.9: Σαρωτής τύπου Whiskbroom [10].....	9
Σχήμα 1.10: Σαρωτής τύπου Pushbroom [10]	10
Σχήμα 1.11: Γραμμικοί αισθητήρες ενιαίου μήκους (a), με μεταξύ τους επικάλυψη (b) και παράλληλης διάταξης (c) [11].....	10
Σχήμα 1.12: Αναπαράσταση along-track στερεοσκοπικής λήψης [12].....	11
Σχήμα 1.13: Αναπαράσταση across-track στερεοσκοπικής λήψης [13]	12
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση εδάφους (A) από DSM, DTM (B) και NVS [22].....	20
Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση της αποστολής SRTM στο διαστημικό λεωφορείο Endeavour...22	
Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση της αποστολής ASTER (a) [25] και παγκόσμια κάλυψη υψομετρικής πληροφορίας από το GDEM της NASA (b) [26].....	22
Σχήμα 4.1: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου SPOT 6 από την περιοχή Kouta Bouyya, Τζιμπουτί.....	24
Σχήμα 4.2: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - SPOT 6	24
Σχήμα 4.3: Στερεοζεύγος εικόνων των δορυφόρων Pleiades 1A και Pleiades 1B από την περιοχή της Ανατολικής Κρήτης, Ελλάδα	26
Σχήμα 4.4: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - Pleiades 1A και Pleiades 1B.....	26
Σχήμα 4.5: Τριπλό στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου Pleiades Neo 4 από την περιοχή της Marseille, Γαλλία	27
Σχήμα 4.6: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή τριπλού στερεοζεύγους - Pleiades Neo 4	28
Σχήμα 4.7: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου IKONOS-2 από την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, Ελλάδα.....	29
Σχήμα 4.8: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - IKONOS-2.....	29
Σχήμα 4.9: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου GeoEye-1 από την περιοχή του Vancouver, Καναδάς	30
Σχήμα 4.10: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - GeoEye-1	31
Σχήμα 4.11: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-1 από την περιοχή Néoules, Γαλλία	32
Σχήμα 4.12: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-1	32
Σχήμα 4.13: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-2 από την περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής, Ελλάδα	34
Σχήμα 4.14: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-2	34

Σχήμα 4.15: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 από την περιοχή Sardinia, Ιταλία	36
Σχήμα 4.16: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-3	36
Σχήμα 4.17: Στερεοζεύγος εικόνων των δορυφόρων SkySat SSC3 και SkySat SSC12 από την περιοχή Seia, Πορτογαλία.....	38
Σχήμα 4.18: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - SkySat SSC3 και SkySat SSC12	38
Σχήμα 5.1: Χρωματική κλίμακα αναπαράστασης υψομέτρων Atlas Shader του λογισμικού Global Mapper	40
Σχήμα 5.2: Διαδικασία αυτόματης εξαγωγής GCPs και TPs σε στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων στο OrthoEngine	43
Σχήμα 5.3: Διαδικασία επεξεργασίας εσφαλμένων περιοχών σε DSM στο Focus.....	44
Σχήμα 5.4: Κατανομή των TPs (+) του στερεοζεύγους από τον δορυφόρο SPOT 6.....	45
Σχήμα 5.5: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - SPOT 6.....	45
Σχήμα 5.6: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - SPOT 6.....	46
Σχήμα 5.7: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - Pleiades	46
Σχήμα 5.8: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - Pleiades	47
Σχήμα 5.9: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) – Pleiades.....	47
Σχήμα 5.10: Κατανομή των TPs (+) - Pleiades Neo	48
Σχήμα 5.11: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo.....	49
Σχήμα 5.12: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo.....	49
Σχήμα 5.13: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - IKONOS-2	50
Σχήμα 5.14: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2	51
Σχήμα 5.15: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2	51
Σχήμα 5.16: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - GeoEye-1	52
Σχήμα 5.17: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1	53
Σχήμα 5.18: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1	53
Σχήμα 5.19: Κατανομή των TPs (+) - WorldView-1	54
Σχήμα 5.20: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-1	54
Σχήμα 5.21: Διόρθωση DSM της μεθόδου SGM - WorldView-1	54
Σχήμα 5.22: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - WorldView-2.....	55
Σχήμα 5.23: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2.....	56
Σχήμα 5.24: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2	56
Σχήμα 5.25: Κατανομή των TPs (+) – WorldView-3.....	57
Σχήμα 5.26: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-3	57
Σχήμα 5.27: Κατανομή των TPs (+) - SkySat.....	58
Σχήμα 5.28: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - SkySat	59
Σχήμα 5.29: Διόρθωση DSM της μεθόδου SGM - SkySat	59
Σχήμα 5.30: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - SPOT 6	61
Σχήμα 5.31: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - SPOT 6	61
Σχήμα 5.32: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SPOT 6.....	61
Σχήμα 5.33: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SPOT 6...62	62
Σχήμα 5.34: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο – Pleiades	62
Σχήμα 5.35: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - Pleiades.....	62
Σχήμα 5.36: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades	63
Σχήμα 5.37: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades ..63	63
Σχήμα 5.38: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - Pleiades Neo	64
Σχήμα 5.39: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - Pleiades Neo	64
Σχήμα 5.40: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades Neo	65

Σχήμα 5.41: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades Neo	65
Σχήμα 5.42: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - IKONOS-2	66
Σχήμα 5.43: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - IKONOS-2	66
Σχήμα 5.44: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - IKONOS-2	66
Σχήμα 5.45: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - IKONOS-2	67
Σχήμα 5.46: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - GeoEye-1	67
Σχήμα 5.47: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - GeoEye-1	67
Σχήμα 5.48: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - GeoEye-1	68
Σχήμα 5.49: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - GeoEye-1	68
Σχήμα 5.50: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-1	68
Σχήμα 5.51: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-1	69
Σχήμα 5.52: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-1	69
Σχήμα 5.53: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-2	69
Σχήμα 5.54: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-2	69
Σχήμα 5.55: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-2	70
Σχήμα 5.56: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-2	70
Σχήμα 5.57: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-3	71
Σχήμα 5.58: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-3	71
Σχήμα 5.59: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-3	71
Σχήμα 5.60: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - SkySat	72
Σχήμα 5.61: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - SkySat	72
Σχήμα 5.62: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SkySat SSC3 και SkySat SSC12	72
Σχήμα 5.63: Διαδικασία μετατροπής DSM σε DTM στο πρόγραμμα DSM2DTM - Catalyst Earth Professional	73
Σχήμα 5.64: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades	74
Σχήμα 5.65: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo	74
Σχήμα 5.66: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2	75
Σχήμα 5.67: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1	75
Σχήμα 5.68: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-1	76
Σχήμα 5.69: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2	76
Σχήμα 5.70: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - SkySat	77
Σχήμα 5.71: Διαδικασία ταξινόμησης Point cloud για τη μετατροπή του DSM σε DTM - Metashape Professional	78
Σχήμα 5.72: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - Pleiades	78
Σχήμα 5.73: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - Pleiades Neo	79
Σχήμα 5.74: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - IKONOS-2	79
Σχήμα 5.75: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - GeoEye-1	79
Σχήμα 5.76: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - WorldView-1	80
Σχήμα 5.77: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - WorldView-2	80
Σχήμα 5.78: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - SkySat	80
Σχήμα 5.79: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - SPOT 6	82

Σχήμα 5.80: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - Pleiades	83
Σχήμα 5.81: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - Pleiades Neo	84
Σχήμα 5.82: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - IKONOS-2	85
Σχήμα 5.83: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - GeoEye-1	86
Σχήμα 5.84: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-1	87
Σχήμα 5.85: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-2	88
Σχήμα 5.86: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-3	89
Σχήμα 5.87: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - SkySat	90
Σχήμα 5.88: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - SPOT 6	91
Σχήμα 5.89: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - Pleiades	92
Σχήμα 5.90: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - Pleiades Neo	93
Σχήμα 5.91: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - IKONOS-2	94
Σχήμα 5.92: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - GeoEye-1	95
Σχήμα 5.93: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-1	96
Σχήμα 5.94: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-2	97
Σχήμα 5.95: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-3	98
Σχήμα 5.96: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - SkySat	99

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της AIRBUS	13
Πίνακας 1.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της Maxar Technologies	14
Πίνακας 1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της Planet Labs	15
Πίνακας 2.1: Παράδειγμα με τις τιμές των RPC από εικόνα του δορυφόρου WorldView-3 .	18
Πίνακας 4.1: Σύνοψη χωρικής ανάλυσης και χρονικής διαφοράς μεταξύ λήψεων των δορυφορικών εικόνων	23
Πίνακας 4.2: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου SPOT 6 από την περιοχή της Kouta Bouyya, Τζιμπουτί	24
Πίνακας 4.3: Μεταδεδομένα εικόνων των δορυφόρων Pleiades 1A και Pleiades 1B από την περιοχή της Ανατολικής Κρήτης, Ελλάδα	26
Πίνακας 4.4: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου Pleiades Neo 4 από την περιοχή της Marseille, Γαλλία.....	28
Πίνακας 4.5: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου IKONOS-2 από την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, Ελλάδα.....	30
Πίνακας 4.6: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου GeoEye-1 από την περιοχή του Vancouver, Καναδάς	31
Πίνακας 4.7: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-1 από την περιοχή της Νέουλης, Γαλλία.....	32
Πίνακας 4.8: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-2 από την περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής, Ελλάδα.....	34
Πίνακας 4.9: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 από την περιοχή της Sardinia, Ιταλία	36
Πίνακας 4.10: Μεταδεδομένα εικόνων των δορυφόρων SSC3 και SSC12 (SkySat) από την περιοχή της Seia, Πορτογαλία	39
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - SPOT 6.....	44
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - Pleiades	46
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - Pleiades Neo 4	48
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - IKONOS-2	50
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας χειροκίνητων GCPs και αλγορίθμων εξαγωγής TPs - GeoEye-1	52
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - WorldView-1	53
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - WorldView-2.....	55
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - WorldView-3	57
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - SkySat SSC3 και SkySat SSC12	58
Πίνακας 5.10: Συνοπτικά αποτελέσματα σημείων, επιφανειών και υψομετρικό εύρος από την παραγωγή DEM στο Metashape Professional	60
Πίνακας 5.11: Ελάχιστες, μέγιστες και επικρατούσες υψομετρικές διαφορές των παραγόμενων DEM από τα υπόβαθρα αναφοράς.....	90

Αλφαβητικό ευρετήριο όρων

CCD:	Charged Coupled Device
DTM:	Digital Terrain Model
DEM:	Digital Elevation Model
DSM:	Digital Surface Model
GCPs:	Ground Control Points
GSD:	Ground Sample Distance
MVS:	Multi-View Stereo
NCC:	Normalized Cross Correlation
RPC:	Rational Polynomial Coefficient
SfM:	Structure from Motion
SGM:	Semi-Global Matching
TPs:	Tie Points
ΓΣΑ:	Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
ΨΜΕ:	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους / Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας
ΨΥΜ:	Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο

Εισαγωγή

Οι δορυφορικές εικόνες κατέχουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην παρατήρηση της γης εδώ και αρκετές δεκαετίες, καθώς καθιστούν αρκετά πιο γρήγορη και σε πολλές περιπτώσεις πιο οικονομική την κάλυψη μεγάλων εκτάσεων στην γήινη επιφάνεια σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως η αεροφωτογράφιση με αεροσκάφη ή μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAV). Η χωρική ανάλυση που έχουν πλέον οι περισσότεροι νέοι δορυφορικοί δέκτες είναι κάτω του ενός μέτρου, γεγονός το οποίο επιτρέπει την ιδιαίτερα αναλυτική απεικόνιση περιοχών της γήινης επιφάνειας.

Ιδιαίτερα ραγδαία ανάπτυξη υπάρχει επίσης σε τεχνικές και αλγορίθμους οι οποίοι μέσω εικόνων έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν πληροφορία για το βάθος εάν πρόκειται για επίγειες εικόνες και υψόμετρο για εναέριες ή δορυφορικές εικόνες. Η χρήση προηγμένων μεθόδων επεξεργασίας εικόνας, οι αλγόριθμοι εύρεσης χαρακτηριστικών και συνταύτισης εικόνων έχει ως αποτέλεσμα την ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων μεγάλης ακρίβειας με εφαρμογές σε τομείς όπως ο αστικός σχεδιασμός, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος κ.α.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρου (DEM) χρησιμοποιώντας ως δεδομένα στερεοζεύγη δορυφορικών εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης με επαρκή μεταξύ τους επικάλυψη. Η έρευνα εστιάζει σε τεχνικές εκτίμησης υψομέτρων και ανακατασκευής 3D μοντέλων με χρήση φωτογραμμετρικών και στερεοσκοπικών μεθόδων.

Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη εξετάζει τις δυνατότητες, τα πλεονεκτήματα και τυχόν αδυναμίες αλγορίθμων και τεχνικών για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων επιφανείας και εδάφους σε διαφορετικά περιβάλλοντα, από διαφορετικούς αισθητήρες δορυφόρων, ενώ επίσης αξιολογούνται και αναλύονται εκτενώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των σύγχρονων μεθόδων παραγωγής DEM από δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης μέσω εξειδικευμένων εμπορικών λογισμικών, και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκειμένου να προσδιοριστούν οι μέθοδοι εκείνες με την μέγιστη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

Μεθοδολογία

Το θέμα της εργασίας προσεγγίστηκε αρχικά πραγματοποιώντας μια εκτεταμένη μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τις δορυφορικές εικόνες, τις μεθόδους προσανατολισμού και συνταύτισής τους, καθώς και για τα DEM.

Στη συνέχεια, συλλέχθηκαν τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για το πρακτικό κομμάτι της εργασίας, τα οποία αποτελούνται από δορυφορικές εικόνες από δορυφορικά συστήματα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών οίκων Maxar Technologies, AIRBUS Defense and Space και Planet Labs.

Χρησιμοποιώντας τα εμπορικά λογισμικά Catalyst Earth Professional της PCI Geomatics και Metashape Professional της Agisoft, τα οποία εφαρμόζουν τεχνικές στερεοσκοπικής απεικόνισης και αλγορίθμους πολυεικονικής συνταύτισης, αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν για τη δημιουργία DEM.

Τέλος, πραγματοποιείται μια εκτενής σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν, ενώ αξιολογούνται ως προς την ποιότητα και την ύπαρξη σφαλμάτων με βάση υπόβαθρα αναφοράς.

Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε συνολικά επτά κεφάλαια, όπως παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά.

Στο Κεφάλαιο 1 αναλύονται βασικές έννοιες των δορυφορικών εικόνων, ξεκινώντας από μια συνοπτική ιστορική αναδρομή των δορυφόρων παρατήρησης της γης, τις τροχιές τους, τη χωρική και χρονική τους ανάλυση, όπως επίσης και λεπτομέρειες για τους αισθητήρες που διαθέτουν και τη διαδικασία στερεοσκοπικών λήψεων.

Το Κεφάλαιο 2 είναι αφιερωμένο στην επεξήγηση της διαδικασίας του προσανατολισμού και της συνταύτισης των δορυφορικών εικόνων, αναλύοντας μεθόδους και αλγορίθμους μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρεται στα DEM, τις βασικές τους έννοιες, πηγές και χρήσεις τους, ενώ αναφέρονται επίσης τα υπόβαθρα αναφοράς που θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του πρακτικού μέρους.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το σύνολο των δεδομένων το οποίο θα αποτελέσει τη δομή του πρακτικού μέρους της εργασίας.

Το Κεφάλαιο 5 αφορά την εφαρμογή των μεθόδων εξαγωγής DEM σε διαφορετικά λογισμικά, με διαφορετικές μεθόδους και αλγορίθμους.

Στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται μια αναλυτική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από κάθε λογισμικό και κάθε μέθοδο, πραγματοποιώντας ταυτόχρονα μια αξιολόγηση με βάση υπόβαθρα αναφοράς υψομέτρων.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη και προτείνονται θέματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

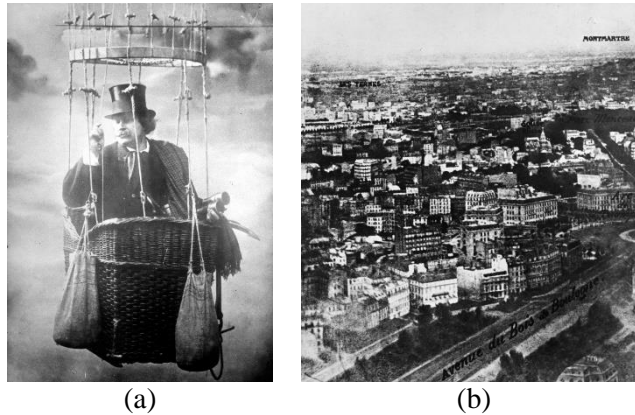
1. Βασικές έννοιες των δορυφορικών εικόνων

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες γύρω από τις δορυφορικές εικόνες, ξεκινώντας με μια σύντομη ιστορική αναδρομή των δορυφόρων παρατήρησης της γης και των δορυφορικών εικόνων. Στη συνέχεια αναφέρονται πληροφορίες σχετικές με τους αισθητήρες που είναι εξοπλισμένοι αυτοί οι δορυφόροι, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσων έχουν τη δυνατότητα στερεοσκοπικών λήψεων εικόνων με σκοπό την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας από αυτές.

1.1. Ιστορική αναδρομή

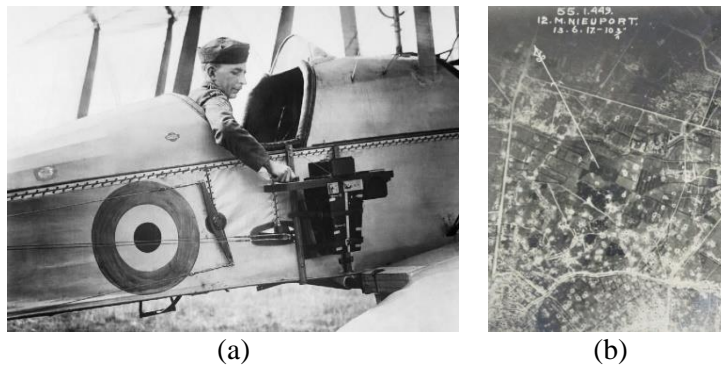
1.1.1. Αεροφωτογραφίες

Η παρατήρηση και η απεικόνιση της γης από μεγάλο ύψος απασχολούσε την ανθρωπότητα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και από την αρχαιότητα. Καθώς η τεχνολογία εξελισσόταν, η αρχή έγινε το 1858 από τον Γάλλο φωτογράφο και χειριστή αερόστατου Gaspard-Felix Tournachon, γνωστός και ως “Nadar”, ο οποίος θεωρείται ο εμπνευστής της αεροφωτογράφισης (aerial photography), λαμβάνοντας την πρώτη αεροφωτογραφία στο Παρίσι από ύψος περίπου 520 μέτρων [1].



Σχήμα 1.1: Ο Gaspard-Felix Tournachon (a) και η πρώτη ιστορική αεροφωτογραφία στην Μονμάρτη του Παρισιού το 1858 (b) [1]

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, τα αεροσκάφη ήρθαν στο προσκήνιο και μαζί με αυτά ήρθαν και μεγαλύτερες δυνατότητες ως προς τις αεροφωτομηχανές που μπορούν να αποτυπώσουν τη γη από μεγαλύτερο υψόμετρο. Η κύρια χρήση των αεροφωτογραφιών από αεροσκάφη εκείνη την εποχή ήταν καθαρά στρατιωτική, καθώς κατά τη διάρκεια του 1^{ου} και του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου οι εικόνες που λάμβαναν ήταν ιδιαίτερης σημασίας για τις θέσεις και τις κινήσεις των εχθρικών δυνάμεων.



Σχήμα 1.2: Αεροσκάφος με αεροφωτομηχανή (a) και αεροφωτογραφία (b) κατά τη διάρκεια του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου [2], [3]

1.1.2. Δορυφορικές εικόνες

Στα μέσα περίπου του 20^{ου} αιώνα, πιο συγκεκριμένα το 1956, η τότε Σοβιετική Ένωση έβαλε σε τροχιά τον πρώτο δορυφόρο στην ιστορία, με την ονομασία Sputnik, ο οποίος δεν διέθετε κάποιον αισθητήρα ή φωτογραφική μηχανή, ωστόσο έθεσε τα θεμέλια για την νέα διαστημική εποχή. Έκτοτε, ξεκίνησε ένας ιδιαίτερα έντονος ανταγωνισμός για την κυριαρχία στο διάστημα, με την τότε Σοβιετική Ένωση και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (ΗΠΑ) ως κυρίαρχες δυνάμεις, να εκτοξεύουν εκατοντάδες δορυφόρους τις επόμενες δεκαετίες, κυρίως λόγω του Ψυχρού Πολέμου, όπου η ανάκτηση οποιουδήποτε είδους πληροφορίας και δη οπτικής ήταν εξέχουσας σημασίας.

Μέχρι και τις αρχές τις δεκαετίας του 1970 οι δορυφόροι προορίζονταν αποκλειστικά και μόνο για κυβερνητικούς, στρατιωτικούς και μετεωρολογικούς σκοπούς, ώσπου το 1972 ξεκινάει το πρόγραμμα δορυφόρων Landsat από την NASA, το οποίο θα αποτελούσε την αρχή για την αποστρατικοποίηση των δορυφόρων και την διαθεσιμότητα των δορυφορικών εικόνων, αρχικά προς το ευρύτερο επιστημονικό κοινό, ενώ μέχρι και σήμερα αποτελεί την μακροβιότερη σειρά δορυφόρων παρατήρησης της γης. Μερικά χρόνια αργότερα, συγκεκριμένα το 1986 τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος SPOT 1 από την Γαλλική Υπηρεσία Διαστήματος (Centre National D'Etudes Spatiales, CNES), ο οποίος ήταν ιστορικά ο πρώτος δορυφόρος με τη δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικών εικόνων. Λόγω του ότι η χωρική ανάλυση που διέθεταν οι εμπορικοί δορυφόροι εκείνη την εποχή ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (80 m για τους δορυφόρους Landsat 1-3 και 10 m για τους δορυφόρους SPOT 1-3) οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνταν κυρίως για μικρής κλίμακας μελέτες ως προς τη βλάστηση, τις χρήσεις γης και το περιβάλλον, ενώ το μικρό πλήθος φασματικών καναλιών περιόριζε αρκετά τη χρησιμότητα των εικόνων.

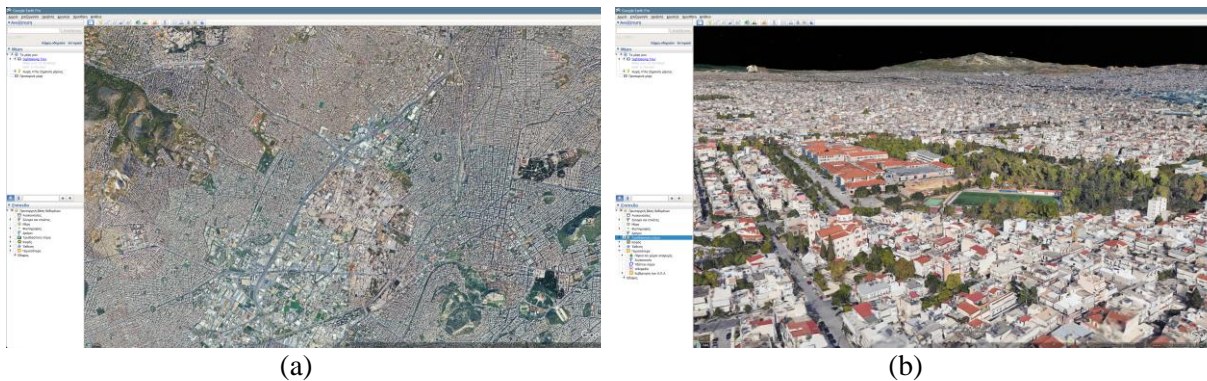
Καθώς η τεχνολογία αναπτυσσόταν ραγδαία και οι δορυφόροι εξοπλίζονταν με νέας γενιάς αισθητήρες, αυξανόταν και η χωρική ανάλυση, περνώντας από την χαμηλή, στην μέτρια και στην υψηλή χωρική ανάλυση, με ιδιαίτερα σημαντικό ορόσημο την εκτόξευση του δορυφόρου IKONOS το 1999, ο οποίος ήταν ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος με χωρική ανάλυση κάτω του ενός μέτρου (3.20 m στο πολυφασματικό και 0.82 m στο παγχρωματικό κανάλι). Επιπλέον, η προσθήκη φασματικών καναλιών πέραν του ορατού φάσματος (Shortwave Infrared, Thermal) έδωσε επιπλέον δυνατότητες για την αξιοποίηση των δορυφορικών εικόνων.



Σχήμα 1.3: Η πρώτη δορυφορική εικόνα χωρικής ανάλυσης κάτω του ενός μέτρου από τον IKONOS-2 στις 12/10/1999 στην περιοχή της Washington DC, USA [4]

Από τα μέσα της δεκαετίας του 2000 είχε ξεκινήσει η διάθεση των δορυφορικών εικόνων προς το ευρύ κοινό με την υπηρεσία Google Earth από την Google, η οποία παρείχε δωρεάν συνενωμένα ορθομωσαϊκά δορυφορικών εικόνων από διάφορους δορυφορικούς οίκους, ενώ είχε τη δυνατότητα να λειτουργήσει και ως Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (Geographic Information System, GIS). Οι εικόνες αποτελούνταν από ιστορικές δορυφορικές εικόνες της

δεκαετίας του 1980, μέχρι και σχετικά πρόσφατες εικόνες των πιο σύγχρονων για την εποχή δορυφόρων, μόνο για προβολή, χωρίς να μπορεί να γίνει κάποια επεξεργασία στις εικόνες, ενώ μεταγενέστερα παρείχε και τρισδιάστατα μοντέλα πόλεων, από δορυφορικές εικόνες σε συνδυασμό με λήψεις από μη στελεχωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles, UAV).

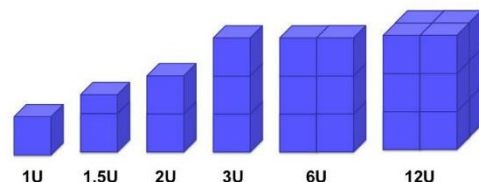


Σχήμα 1.4: Προβολή δορυφορικών εικόνων (a) και τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων (b) στο Google Earth

Οι δορυφόροι παρατήρησης της γης με πολύ υψηλής ανάλυσης αισθητήρες έχουν πλέον οικειοποιηθεί από όλους τους δορυφορικούς οίκους, όπως η DigitalGlobe (νυν Maxar Technologies) η AIRBUS κ.α., με το μέγεθος της εικονομηφίδας να βρίσκεται μεταξύ 0.30 m και 0.50 m. Σημαντική εξέλιξη είναι η αύξηση του σμήνους των δορυφόρων ανά δορυφορικό οίκο, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να λαμβάνονται εικόνες από την ίδια περιοχή ενδιαφέροντος ακόμα και περισσότερες από μια φορές την ημέρα.

Η αυξανόμενη ανάγκη για δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης ωστόσο, ασκεί μεγάλη οικονομική πίεση στους δορυφορικούς οίκους, καθώς για την ανάπτυξη και την τοποθέτηση σε τροχιά ενός δορυφορικού συστήματος χρειάζονται αρκετά χρόνια έρευνας και πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια. Επιπλέον, δεν ήταν λίγες οι περιπτώσεις όπου πολλοί δορυφόροι δεν μπόρεσαν να περάσουν την γήινη ατμόσφαιρα λόγω δυσλειτουργιών κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης (IKONOS-1 το 1999, Pleiades Neo 5 και Pleiades Neo 6 το 2022) ή δεν κατάφεραν να μείνουν σε τροχιά (WorldView-4 το 2019), προκαλώντας έτσι μεγάλα οικονομικά προβλήματα στις εταιρείες.

Προκειμένου να μειωθεί το κόστος του φορτίου κατά την εκτόξευση, αρκετές εταιρείες στο χώρο της διαστημικής σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια νέα γενιά μικροδορυφόρων, γνωστοί και ως CubeSats. Το μέγεθος αυτών των δορυφόρων ορίζεται με τη μονάδα «one unit» ή 1U, το οποίο αντιστοιχεί σε διαστάσεις 0.1 m x 0.1 m x 0.1 m ($\Pi \times B \times Y$) και επεκτείνεται σε μεγαλύτερα μεγέθη όπως 1.5U, 2U, 3U, 6U και 12U [5].



Σχήμα 1.5: Δορυφόροι CubeSat (a) και τα μεγέθη τους (b) [5]

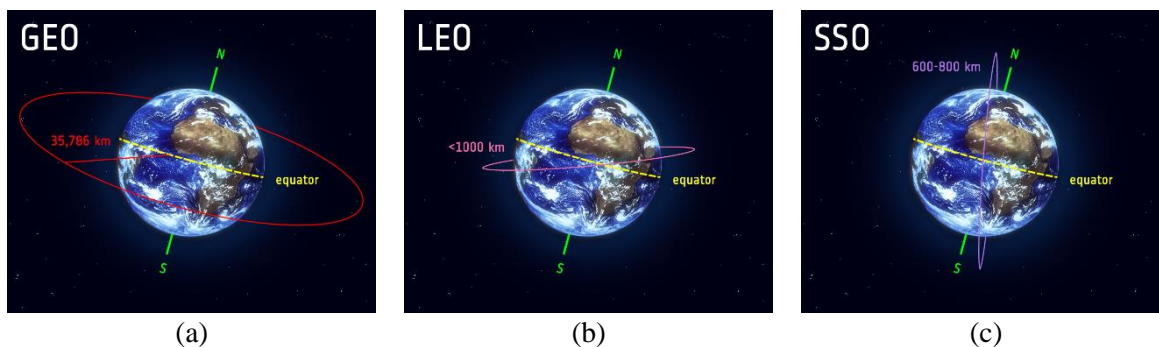
Στο εγγύς μέλλον αναμένεται αύξηση του πλήθους των δορυφόρων παρατήρησης της γης, καθώς υπάρχει ολοένα και περισσότερη ζήτηση δορυφορικών εικόνων, ενώ δεν αποκλείεται να υπάρξουν και εμπορικοί δορυφόροι οι οποίοι θα λαμβάνουν εικόνες με ιδιαίτερα υψηλή χωρική ανάλυση, η οποία θα φτάνει μέχρι και τα 0.10 m.

1.2. Τροχιές δορυφόρων παρατήρησης της γης

Οι τροχιές που πραγματοποιούν οι δορυφόροι παρατήρησης της γης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες βάσει των παρακάτω χαρακτηριστικών τους [6]:

- **Υψόμετρο**

- **Γεωστατική τροχιά (Geostationary orbit, GEO):** Οι τροχιά αυτού του είδους αφορά δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση 35,786 km από την επιφάνεια της γης, ενώ η ταχύτητα με την οποία περιστρέφονται ταιριάζει με εκείνη της γης. Σε αυτή την τροχιά βρίσκονται συνήθως μετεωρολογικοί δορυφόροι παρατήρησης του καιρού ή δορυφόροι ανίχνευσης πυρκαγιών.
- **Μεσαία γήινη τροχιά (Medium Earth Orbit, MEO):** Η μεσαία γήινη τροχιά χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον από Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) όπως το Ευρωπαϊκό σύστημα Galileo και το Αμερικανικό GPS, ενώ η απόσταση από την γήινη επιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ 2,000 km και 35,000 km.
- **Χαμηλή γήινη τροχιά (Low Earth Orbit, LEO):** Η χαμηλή γήινη τροχιά με απόσταση περίπου 200 km έως 2,000 km από την επιφάνεια της γης είναι η επιθυμητή τροχιά για δορυφόρους παρατήρησης της με την πλειονότητα αυτών να βρίσκονται μεταξύ 400 km και 800 km περίπου. Η εγγύτητά στη γήινη επιφάνεια επιτρέπει τη λήψη δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης και τις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, ενώ σε αυτό το ύψος τροχιάς οι δορυφόροι χρειάζονται περίπου 90 λεπτά για να πραγματοποιήσουν μια πλήρη περιστροφή γύρω από τη γη.

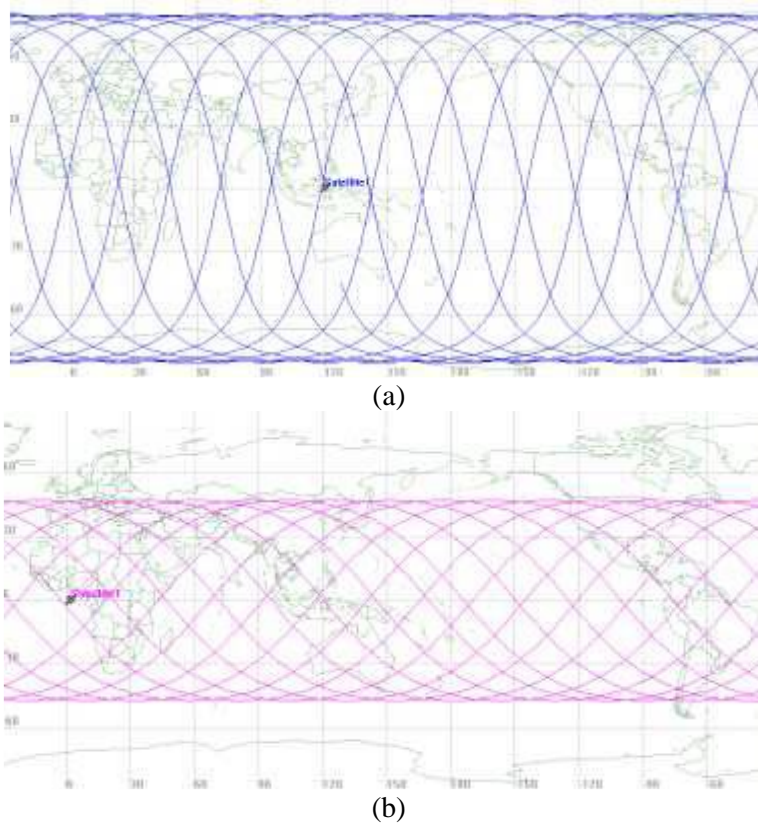


Σχήμα 1.6: Γεωστατική (a), χαμηλή (b) και ηλιοσύγχρονη τροχιά (c) [6]

- **Κλίση από τον ισημερινό**

- **Ισημερινή τροχιά (Equatorial Orbit):** Σε αυτή την τροχιά οι δορυφόροι βρίσκονται παράλληλα με τον ισημερινό της γης, οπότε και η κλίση από τον ισημερινό είναι μηδενική και σε απόσταση ίση με εκείνη της γεωστατικής τροχιάς (GEO).
- **Πολική τροχιά (Polar Orbit):** Η πολική τροχιά αφορά δορυφόρους οι οποίοι κινούνται από τον βορρά προς το νότο αντί από την δύση προς την ανατολή, ενώ έχουν διέλευση από τους πόλους της γης συνήθως με μια απόκλιση της τάξης των 20° με 30° και σε απόσταση 200 km έως 1,000 km από την επιφάνεια της γης.

- **Ηλιοσύγχρονη τροχιά (Sun-Synchronous Orbit, SSO):** Η ηλιοσύγχρονη τροχιά αποτελεί ένα είδος πολικής τροχιάς, όπου οι δορυφόροι που εκτελούν τη συγκεκριμένη τροχιά είναι συγχρονισμένοι με τον ήλιο, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι θα έχουν πέρασμα π.χ. από την Αθήνα κάθε μέρα περίπου στις μεσημβρινές ώρες. Προκειμένου οι δορυφόροι παρατήρησης της γης να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη της γήινης επιφάνειας, η τροχιά που ακολουθούν έχει συνήθως κλίση μεταξύ 93° και 99° από τον ισημερινό. Η συγκεκριμένη τροχιά είναι εκείνη που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι οπτικοί δορυφόροι παρατήρησης της γης οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με παθητικούς αισθητήρες, δηλαδή δεν εκπέμπουν κάποιου είδους ακτινοβολία η οποία επιστρέφει στον αισθητήρα και λαμβάνονται τα δεδομένα.



Σχήμα 1.7: Σύγκριση ηλιοσύγχρονων τροχιών με κλίση 97.79° (a) και 47° (b) από τον ισημερινό [7]

1.3. Χωρική και χρονική ανάλυση δορυφορικών εικόνων

Ο ρόλος των δορυφορικών εικόνων είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην παρατήρηση της γης για πολλές επιστημονικές και πρακτικές εφαρμογές, ωστόσο κάθε εφαρμογή απαιτεί να πληρούνται κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές. Η χρησιμότητα των δορυφορικών εικόνων εξαρτάται από δυο πολύ βασικούς παράγοντες, την χωρική και την χρονική ανάλυση. Από αυτούς τους παράγοντες καθορίζεται το επίπεδο πληροφορίας, όπως και η συχνότητα παρατήρησης μιας συγκεκριμένης περιοχής.

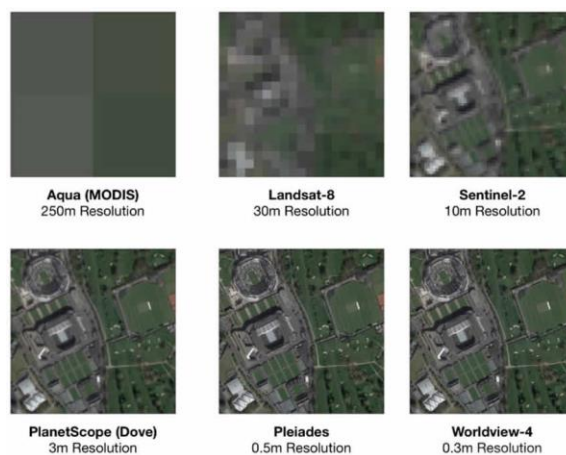
1.3.1. Χωρική ανάλυση δορυφορικών εικόνων

Η χωρική ανάλυση ή χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) είναι το μέγεθος της ελάχιστης επιφάνειας που μπορεί να διακρίνει ένας δορυφορικός αισθητήρας [8] και αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη παράμετρο που αφορά τις δορυφορικές εικόνες, δηλαδή το επίπεδο της πληροφορίας που μπορεί να διακριθεί μεταξύ διαδοχικών εικονοψηφίδων (pixel). Υψηλότερη χωρική ανάλυση σημαίνει μικρότερο μέγεθος pixel στην εικόνα, όπου για παράδειγμα σε

εικόνα με χωρική ανάλυση 1 m μπορούν να διακριθούν αντικείμενα μέχρι και 1 m στις διαστάσεις i,j της εικόνας.

Οι δορυφορικές εικόνες χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες βάσει της χωρικής τους ανάλυσης ως εξής:

- **Χαμηλή ανάλυση (Low Resolution):** Εικόνες με μέγεθος εδαφοψηφίδας άνω των 30 m/pixel, από δορυφόρους όπως παλαιότερες εκδόσεις της σειράς δορυφόρων Landsat, ή και από δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά
- **Μέτρια ανάλυση (Medium Resolution):** Εικόνες με μέγεθος εδαφοψηφίδας μεταξύ 5 και 30 m/pixel, από δορυφόρους όπως η νεότερη γενιά των δορυφόρων Landsat, οι δορυφόροι SPOT 1, 2, 3 και οι δορυφόροι Sentinel 2 του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus
- **Υψηλή ανάλυση (High Resolution):** Εικόνες με μέγεθος εδαφοψηφίδας μεταξύ 1 και 5 m/pixel, από δορυφόρους όπως ο SPOT 6, οι RapidEye και το σμήνος μικροδορυφόρων PlanetScope
- **Πολύ υψηλή ανάλυση (Very High Resolution):** Εικόνες με μέγεθος εδαφοψηφίδας μικρότερο από 1 m/pixel, από δορυφόρους όπως ο IKONOS, ο Quickbird και τα δορυφορικά συστήματα SkySat, WorldView, Pleiades και Pleiades Neo



Σχήμα 1.8: Σύγκριση χωρικών αναλύσεων από διαφορετικούς δορυφόρους [9]

Η υψηλή και πολύ υψηλή χωρική ανάλυση στις δορυφορικές εικόνες είναι εξέχουσας σημασίας για αναλύσεις ακριβείας και εφαρμογές ανάδειξης λεπτομερειών, όπως ο εντοπισμός αντικειμένων σε αστικό περιβάλλον, επισημάνση οδικού δικτύου και η γεωργία ακριβείας.

1.3.2. Χρονική ανάλυση δορυφορικών εικόνων

Η χρονική ανάλυση (temporal resolution) των δορυφορικών εικόνων αφορά ουσιαστικά στον χρόνο τον οποίο χρειάζεται ένας δορυφόρος για να διαβεί από την ίδια περιοχή παρατήρησης. Για τους δορυφόρους παρατήρησης της γης οι οποίοι ως επί το πλείστον βρίσκονται σε χαμηλή γήινη τροχιά (LEO), η χρονική ανάλυση ανά δορυφόρο συνήθως είναι λίγο παραπάνω από μια ημέρα. Ωστόσο, λόγω του ότι πλέον οι δορυφορικοί οίκοι διαθέτουν περισσότερους από έναν δορυφόρους με παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων, η χρονική ανάλυση μπορεί να φτάσει ακόμα και τις τέσσερις ή πέντε φορές ημερησίως.

1.4. Αισθητήρες δορυφόρων παρατήρησης της γης

Οι αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένοι οι δορυφόροι παρατήρησης της γης έχουν κάποια παρεμφερή χαρακτηριστικά με εκείνα των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, όπως η λήψη της ηλεκτρομαγνητικής (H/M) ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος του ορατού και μη φάσματος και η κατανομή των εικονοστοιχείων (pixels) στον αισθητήρα. Ωστόσο, το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η λήψη των εικόνων είναι ιδιαίτερα αντίξοο, καθώς υπάρχουν χαρακτηριστικά όπως η εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα με την οποία κινούνται οι δορυφόροι (περίπου 7.5 km/sec σε υψόμετρο 600 km από την γήινη επιφάνεια) και οι συνθήκες του διαστήματος είναι ιδιαίτερα δύσκολες (ακραίες θερμοκρασίες, υπέρμετρη έκθεση σε ακτινοβολία κ.α.) για έναν συμβατικό αισθητήρα που λειτουργεί στη γη.

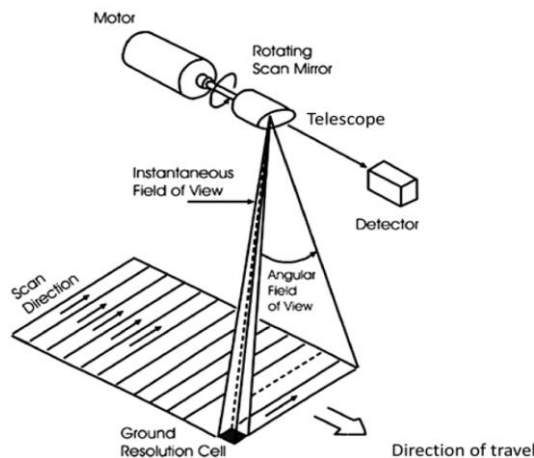
Η κύρια διάκριση των αισθητήρων που βρίσκονται στους δορυφόρους παρατήρησης της γης γίνεται με βάση τον τρόπο που λαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίζοντάς τους σε ενεργητικούς και παθητικούς αισθητήρες. Οι ενεργητικοί αισθητήρες αφορούν ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (Synthetic Aperture Radar, SAR).

Ωστόσο, οι περισσότεροι δορυφόροι παρατήρησης της γης και δη οι οπτικοί, είναι εξοπλισμένοι με παθητικούς αισθητήρες, οι οποίοι έχουν ανάγκη το ηλιακό φως για να καταγράψουν την πληροφορία. Οι οπτικοί δορυφόροι διαθέτουν ανάλογα με την εφαρμογή και την ηλικία τους διαφορετικούς τύπους σαρωτών και αισθητήρων, ωστόσο εκείνοι που συναντώνται στους περισσότερους δορυφόρους και θα αναλυθούν παρακάτω, είναι οι Whiskbroom, και οι Pushbroom σαρωτές.

1.4.1. Σαρωτές τύπου Whiskbroom

Οι σαρωτές τύπου Whiskbroom χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο μπροστά από το τηλεσκόπιο με το οποίο είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος. Η σάρωση πραγματοποιείται κατά πλάτος της κίνησης του δορυφόρου, δηλαδή κάθετα στην πορεία της τροχιάς του [10].

Ο αισθητήρας διαθέτει μόνο ένα εικονοστοιχείο, όπου σε συνδυασμό με την περιστροφική κίνηση του κατόπτρου πραγματοποιεί τη σάρωση στο έδαφος, με την ολοκληρωμένη γραμμική λήψη να γίνεται ιδιαίτερα γρήγορα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και για τις επόμενες γραμμές που θα σαρώσει ο αισθητήρας στην κίνηση του δορυφόρου (**Σχήμα 1.9**), ενώ η τελική εικόνα αποτελείται από τη συνένωση όλων των σαρώσεων του εδάφους [11].



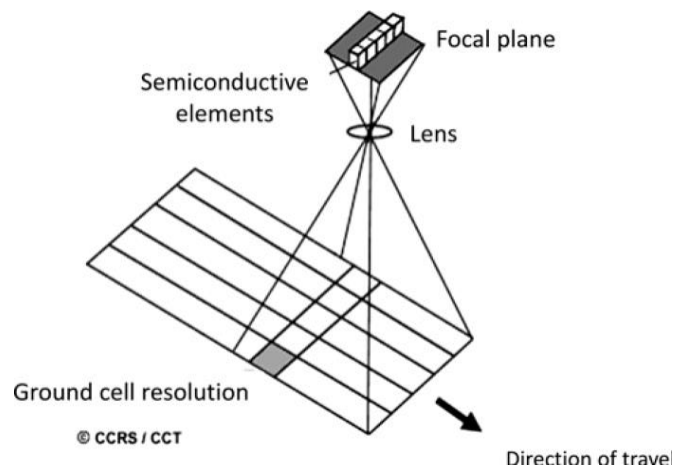
Σχήμα 1.9: Σαρωτής τύπου Whiskbroom [10]

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτού του είδους οι σαρωτές συναντώνται ως επί το πλείστον σε δορυφόρους παλαιότερης τεχνολογίας, όπως η σειρά δορυφόρων Landsat, μέχρι και τον Landsat-7. Σημαντικά μειονεκτήματα αυτού του είδους σαρωτών είναι η χαμηλή χωρική

ανάλυση, το γεγονός ότι αποτελούνται από πολλά μηχανικά κινούμενα μέρη, επομένως φθείρονται ευκολότερα με την πάροδο του χρόνου, η δυσκολία βαθμονόμησής τους, ενώ η περίπλοκη γεωμετρία της εικόνας δεν έχει άμεση μετρητική ικανότητα [11].

1.4.2. Σαρωτές τύπου Pushbroom

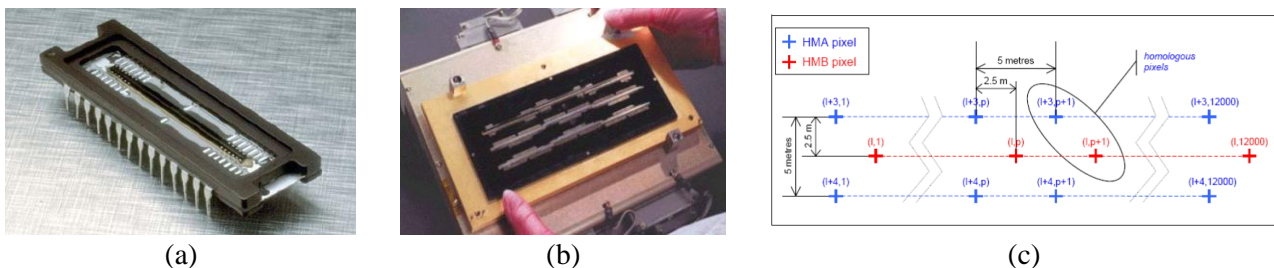
Σε αντίθεση με τους σαρωτές Whiskbroom, οι Pushbroom σαρωτές δεν διαθέτουν περιστρεφόμενο κάτοπτρο, αλλά αποτελούνται από έναν ή και περισσότερους σταθερά τοποθετημένους γραμμικούς αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται στο εστιακό επίπεδο του φακού και κάθετα στην τροχιά του δορυφόρου, ενώ έχουν λιγότερα κινούμενα μηχανικά μέρη [10] (Σχήμα 1.10), με τη σάρωση να πραγματοποιείται ταυτόχρονα για ολόκληρη τη σειρά των εικονοστοιχείων, κατά μήκος της κίνησης του δορυφόρου.



Σχήμα 1.10: Σαρωτής τύπου Pushbroom [10]

Οι γραμμικοί αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένοι οι σαρωτές Pushbroom έχουν ανά περίπτωση διαφορετική διάταξη η οποία μπορεί να είναι ως εξής [11]:

- ένας γραμμικός αισθητήρας ενιαίου μήκους (Σχήμα 1.11a)
- γραμμικοί αισθητήρες οι οποίοι αποτελούνται από σύνδεση επιμέρους γραμμικών αισθητήρων με ελάχιστη μεταξύ τους επικάλυψη (Σχήμα 1.11b)
- γραμμικοί αισθητήρες με συνδυασμό δυο παράλληλων τοποθετημένων γραμμικών αισθητήρων, με μεταξύ τους μετατόπιση κατά μισό φωτοευαίσθητο σημείο, γεγονός το οποίο αυξάνει την ανάλυση της εικόνας (Σχήμα 1.11c)



Σχήμα 1.11: Γραμμικοί αισθητήρες ενιαίου μήκους (a), με μεταξύ τους επικάλυψη (b) και παράλληλης διάταξης (c) [11]

Τα πλεονεκτήματα των σαρωτών Pushbroom έναντι των σαρωτών Whiskbroom είναι ότι χρησιμοποιούν λιγότερα κινούμενα μηχανικά μέρη, έχουν αρκετά καλύτερη ανάλυση εικόνας, η σάρωση γίνεται γρηγορότερα και πιο αποδοτικά, ενώ αποτελούν νεότερη τεχνολογία και για το λόγο αυτό εξοπλίζουν όλα τα νεότερα δορυφορικά συστήματα.

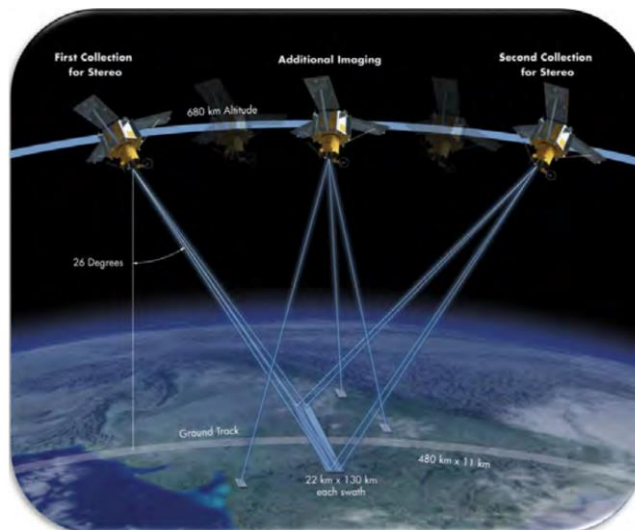
1.5. Διαδικασία λήψης στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων

Η λήψη στερεοσκοπικών εικόνων από δορυφόρους είναι μια διαδικασία η οποία ξεκίνησε να χρησιμοποιείται αρχικά με τον δορυφόρο SPOT 1 και στη συνέχεια πολλοί νεότεροι δορυφόροι υιοθέτησαν αυτού του είδους τη λειτουργία, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη λόγω της κάλυψης μεγάλων εκτάσεων που προσφέρουν οι δορυφορικές εικόνες. Η διαδικασία της στερεοσκοπικής λήψης πραγματοποιείται με δυο τρόπους.

1.5.1. Λήψεις κατά μήκος της ίδιας τροχιάς του δορυφόρου (Along-track)

Η συλλογή του στερεοζεύγους των εικόνων γίνεται από συγκεκριμένους δορυφόρους πάνω στην ίδια τροχιά, με διαφορετικές γωνίες λήψης, με τη χρονική διαφορά μεταξύ των εικόνων να είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων.

Μια από τις τεχνικές για αυτού του είδους τις στερεοσκοπικές λήψεις είναι ο δορυφόρος να διαθέτει αισθητήρα με δύο ή περισσότερα οπτικά συστήματα και ενώ κινείται ο δορυφόρος, να γίνονται ταυτόχρονα εμπρόσθιες, οπίσθιες ή και κατακόρυφες (ναδρικές) λήψεις. Μια άλλη και πιο διαδεδομένη παλαιότερα τεχνική είναι η περιστροφή του αισθητήρα κατά την κίνηση του δορυφόρου, αρχικά προς τα μπροστά όταν αυτός βρίσκεται πριν την περιοχή λήψης και στη συνέχεια κατακόρυφα ή και προς τα πίσω όταν περνάει ακριβώς από πάνω ή μετά την περιοχή λήψης [11].



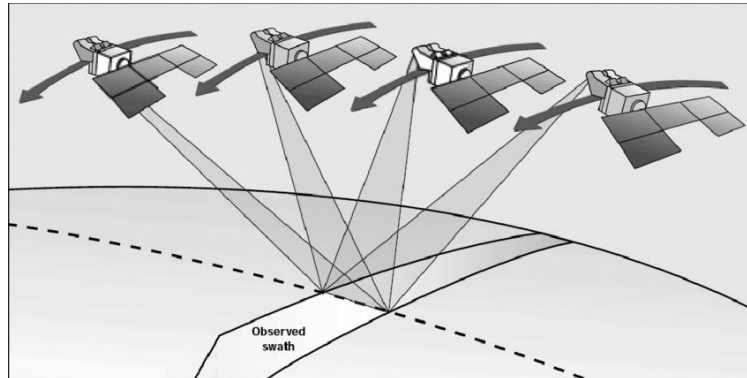
Σχήμα 1.12: Αναπαράσταση along-track στερεοσκοπικής λήψης [12]

Η στερεοσκοπική λήψη από την ίδια τροχιά του δορυφόρου χρησιμοποιείται πλέον σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, ενώ ιδιαίτερα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ομοιομορφία στη ραδιομετρία των εικόνων και η ομαλή μεταβολή των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού [11]. Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός ότι με αυτή τη μέθοδο το στερεοζεύγος λαμβάνεται με ακριβώς τις ίδιες καιρικές συνθήκες, ενώ το μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων εγγυάται ότι δεν θα υπάρξουν σημαντικές αλλαγές στην περιοχή μελέτης.

1.5.2. Λήψεις μέσω διαδοχικών τροχιών του δορυφόρου (Across-track)

Η λήψη του στερεοζεύγους των εικόνων γίνεται από διαφορετικές τροχιές του ίδιου δορυφόρου, μέθοδο την οποία ακολουθούσαν κυρίως τα παλαιότερα δορυφορικά συστήματα. Οι συλλογή των εικόνων πραγματοποιείται είτε με κάθετη λήψη ως προς τη τροχιά του δορυφόρου, είτε με περιστροφή των αισθητήρων προς την περιοχή ενδιαφέροντος [11]. Αυτή

η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε πέρασμα του δορυφόρου από την περιοχή ενδιαφέροντος μέχρι να έχει ληφθεί το απαραίτητο πλήθος εικόνων, με τις απαραίτητες γωνίες λήψης.



Σχήμα 1.13: Αναπαράσταση across-track στερεοσκοπικής λήψης [13]

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι λαμβάνονται εικόνες με κατάλληλη αναλογία βάσης προς ύψος (Base to Height ratio, B/H) και γωνίες οι οποίες είναι ιδανικές για τον προσδιορισμό υψομέτρων εδάφους [13]. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι εικόνες λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, γεγονός το οποίο ενέχει την ύπαρξη μεγάλων ραδιομετρικών αποκλίσεων και τη δυσκολία της συνταύτισης των εικόνων του στερεοζεύγους λόγω διαφορετικών συνθηκών στις λήψεις (φωτεινότητα, φυτοκάλυψη, νεφοκάλυψη κ.α.).

1.6. Δορυφόροι με δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικών εικόνων

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι επί του παρόντος εν ενεργεία (εκτός του IKONOS-2) δορυφόροι παρατήρησης της γης με δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικών εικόνων, μαζί με μια σύντομη περιγραφή των τεχνικών τους χαρακτηριστικών.

1.6.1. AIRBUS Defense and Space

Η AIRBUS, πέραν από την ιδιαίτερα ισχυρή και πολυετή παρουσία της στο χώρο των αεροσκαφών, αποτελεί μια από τις κορυφαίες εταιρείες κατασκευής δορυφόρων. Η AIRBUS αποτελείται από δορυφόρους τηλεπικοινωνιακούς, στρατιωτικούς, ερευνητικούς και παρατήρησης της γης. Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται από την AIRBUS στα πλαίσια της παρούσας μελέτης είναι ο SPOT 6, οι Pleiades 1A και Pleiades 1B και οι Pleiades Neo 3 και Pleiades Neo 4.

Στον **Πίνακα 1.1** παρουσιάζονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων δορυφόρων.

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της AIRBUS

Δορυφόρος	SPOT 6	Pleiades 1A - Pleiades 1B	Pleiades Neo 3 - Pleiades Neo 4
Ημερομηνία εκτόξευσης	09/09/2012	17/12/2011 (Pleiades 1A) 02/12/2012 (Pleiades 1B)	28/04/2021 (Pleiades Neo 3) 16/08/2021 (Pleiades Neo 4)
Υψόμετρο τροχιάς (km)	694	694	620
Περίοδος τροχιάς (min)	98.79	98.79	97.2
Κλίση τροχιάς ως προς τον ισημερινό	98.2°	98.2	97.9°
Κανάλια αισθητήρα	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 6 Πολυφασματικό
Ανάλυση αισθητήρα (m)	Παγχρωματικό: 1.50 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 6.00 m στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.50 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 2.00 m στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.30 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1.20 m στο ναδίρ
Πλάτος σάρωσης (km)	60.0 στο ναδίρ	20.0 στο ναδίρ	14.0 στο ναδίρ
Μέγιστη συλλεγείσα επιφάνεια σε ένα πέρασμα (30° off-nadir)	Mono: 120x120 km (2 λωρίδες) 60x180 km (3 λωρίδες) Stereo and Tri-Stereo: 60x60 km	Mono: 100x100 km Stereo and Tri-Stereo: 20x280 km	Mono: 100x100 km Stereo and Tri-Stereo: 20x280 km
Μέγιστος χρόνος επανεπισκευσιμότητας (ημέρες)	1 - 3	1 - 2	1 - 2
Γεωγραφική ακρίβεια (m)	10.0 χωρίς GCPs	<8.5 χωρίς GCPs	<3.5 χωρίς GCPs
Capacity (km ² /ημέρα)	3,000,000	700,000	1,000,000

1.6.2. Maxar Technologies

Η Maxar Technologies δημιουργήθηκε από την συνένωση των εταιρειών DigitalGlobe και MDA και αποτελεί μια από τις κορυφαίες εταιρείες στο χώρο της αεροδιαστημικής. Ως DigitalGlobe είχε μεγάλη επιτυχία με δορυφορικά συστήματα όπως ο IKONOS-2, ο GeoEye-1 και η σειρά δορυφόρων WorldView. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των μέχρι και σήμερα ενεργών δορυφόρων της Maxar Technologies [14].

Πίνακας 1.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της Maxar Technologies

Δορυφόρος	IKONOS-2	GeoEye-1	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
Ημερομηνία εκτόξευσης	24/09/1999	06/09/2008	18/09/2007	10/08/2009	13/08/2014
Υψόμετρο Τροχιάς (km)	681	681/770	496	770	617
Περίοδος τροχιάς (min)	98	98/100	95	100	97
Κλίση τροχιάς ως προς τον ισημερινό	98.1°	98.0°	97.2°	97.8°	98.0°
Κανάλια αισθητήρα	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό	1 Παγχρωματικό 8 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 8 Πολυφασματικό 8 SWIR 12 CAVIS
Ανάλυση αισθητήρα (m)	Παγχρωματικό: 0.82 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 3.20 στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.41/0.46 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1.65/1.84 στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.50 στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.46 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1.85 m στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.31 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1.24 στο ναδίρ SWIR: 3.70 στο ναδίρ CAVIS: 30.00 στο ναδίρ
Πλάτος σάρωσης Αισθητήρα (km)	11.3 στο ναδίρ	15.3/17.3 στο ναδίρ	17.7 στο ναδίρ	16.4 στο ναδίρ	13.1 στο ναδίρ
Μέγιστη συλλεγείσα επιφάνεια σε ένα πέρασμα (30° off-nadir)	Mono: 11x100 km	Mono: 44x112 km (3 λωρίδες) Stereo: 28x224 km (2 ζεύγη)	Mono: 111x112 km (6 λωρίδες) Stereo: 51x112 km (3 ζεύγη)	Mono: 138x112 km (8 λωρίδες) Stereo: 63x112 km (4 ζεύγη)	Mono: 66.5x112 km (5 λωρίδες) Stereo: 26.6x112 km (2 ζεύγη)
Μέγιστος χρόνος επανεπισκεψιμότητας (ημέρες)	3 at <30 off-nadir	2.3/2.6 at <30 off-nadir	1.7 at <1 m GSD	1.1 at <1 m GSD	1.0 at <1 m GSD
Οριζοντιογραφική ακρίβεια σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (CE90) (m)	15	5.0	<4.0 χωρίς GCPs	<3.5 χωρίς GCPs	<3.5 χωρίς GCPs
Μέγιστη συλλεγείσα επιφάνεια ημερησίως (km ² /ημέρα)	240,000	350,000/500,000	1,300,000	1,000,000	680,000

1.6.3. Planet Labs

Η Planet Labs είναι μια από τις νεότερες εταιρείες στο χώρο των δορυφορικών οίκων, ωστόσο το πρωτοποριακό που έχει καταφέρει είναι ότι έχει εκτοξεύσει μέχρι και σήμερα συνολικά 21 μικροδορυφόρους οι οποίοι έχουν το πλεονέκτημα λόγω του μικρού τους μεγέθους να είναι πολύ πιο οικονομικοί κατά την εκτόξευσή τους εντός των προωθητικών πυραύλων. Το αρνητικό σε αυτό το είδος δορυφόρων είναι η αρκετά μικρότερη διάρκεια ζωής, καθώς οι περισσότεροι δορυφόροι έχουν διάρκεια ζωής άνω των δεκαπέντε ετών εάν δεν υπάρξει κάποια δυσλειτουργία στην πορεία, ενώ οι δορυφόροι της Planet Labs έχουν σχεδιαστική διάρκεια ζωής έξι ετών. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μέχρι και σήμερα ενεργών δορυφόρων της Planet Labs [15], [16].

Πίνακας 1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων της Planet Labs

Δορυφόρος	SkySat-1 - Skysat-2	SkySat-3 - SkySat-15	SkySat-16 - SkySat-21
Ημερομηνία εκτόξευσης	21/11/2013 (SkySat-1)	SkySat-3 (22/09/2016) SkySat-4 - SkySat-7 (16/09/2016) SkySat-8 - SkySat-13 (31/10/2017)	SkySat-16 - SkySat-18 (13/06/2020) SkySat-19 - SkySat-21 (18/08/2020)
Υψόμετρο τροχιάς (km)	600	500 στην εκτόξευση, μείωση στα 450 στις αρχές του 2020	400
Περίοδος τροχιάς (min)	97	93	92
Κλίση τροχιάς ως προς τον ισημερινό	97.8° - 98.8°	97.56° - 98.3°	53.0°
Κανάλια αισθητήρα	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό	1 Παγχρωματικό 4 Πολυφασματικό
Ανάλυση αισθητήρα (m)	Παγχρωματικό: 0.86 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1.00 m στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.65 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 0.81 m στο ναδίρ	Παγχρωματικό: 0.57 στο ναδίρ Πολυφασματικό: 0.75 m στο ναδίρ
Πλάτος σάρωσης (km)	8 στο ναδίρ	5.9 στο ναδίρ	5.5 στο ναδίρ
Μέγιστος χρόνος επανεπισκεψιμότητας (days)	4-5 διελεύσεις ανά δορυφόρο, με 12 διελεύσεις ημερησίως για όλο το σμήνος		
Οριζοντιογραφική ακρίβεια (m)		<50.0 m (Basic) <10.0 m (Ortho)	
Capacity (km ² /day)		400,000	

2. Προσανατολισμός και συνταύτιση δορυφορικών εικόνων

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες και μέθοδοι, αρχικά για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών και τη συνταύτιση των δορυφορικών εικόνων και στη συνέχεια για τον προσανατολισμό τους.

2.1. Εντοπισμός χαρακτηριστικών και συνταύτιση δορυφορικών εικόνων

2.1.1. Multi-View Stereo (MVS)

Η διαδικασία του Multi-View Stereo είναι μια ιδιαίτερα σημαντική τεχνική στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών, η οποία έχει ως κύριο σκοπό την πυκνή πολυεικονική συνταύτιση και την λεπτομερή ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων από εικόνες διαφορετικών θέσεων λήψης. Βασική ιδέα του MVS είναι η εκτίμηση του βάθους για κάθε pixel των εικόνων, έτσι ώστε να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο της σκηνής. Λόγω του ότι οι εικόνες λαμβάνονται από διαφορετικές γωνίες, υπάρχουν οι προκλήσεις της διαφορετικής φωτεινότητας και των αποκρύψεων, τα οποία επιλύονται με συνταύτιση χαρακτηριστικών σε όλες τις εικόνες [17].

Η μέθοδος MVS βασίζεται στην αρχή της πολυεικονικής γεωμετρίας η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ διαφορετικών εικόνων που παρουσιάζουν την ίδια σκηνή. Θεμελιώδη έννοια της πολυεικονικής γεωμετρίας αποτελεί η επιπολική γεωμετρία, η οποία ορίζει τους περιορισμούς μεταξύ των ομόλογων σημείων στις εικόνες, βάσει της βαθμονόμησης της μηχανής, εξασφαλίζοντας ότι οι ομολογίες μεταξύ των pixel των εικόνων υπολογίζονται με ακρίβεια [17].

Η διαδικασία MVS προϋποθέτει οι μηχανές των εικόνων να είναι βαθμονομημένες, δηλαδή να είναι γνωστοί ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός τους. Μετά τη βαθμονόμηση ακολουθεί η αρατή συνταύτιση με αναζήτηση χαρακτηριστικών όπως γωνίες και ακμές για να πραγματοποιηθεί η συνταύτιση μεταξύ των εικόνων [17].

Ο αλγόριθμος για την τρισδιάστατη ανακατασκευή που ακολουθείται από την συγκεκριμένη τεχνική γίνεται δημιουργώντας μικρές παραλληλόγραμμες επιφάνειες, αλλιώς αποκαλούμενα patches, τα οποία καλύπτουν τις ορατές επιφάνειες των εικόνων. Ο αλγόριθμος αρχικά εξάγει αρατά χαρακτηριστικά σημεία τα οποία ταυτίζονται στις εικόνες για τη δημιουργία ενός αρχικού patch. Στη συνέχεια τα patches αυτά επεκτείνονται έτσι ώστε να καλύψουν γειτονικά pixel με χρήση τοπικής φωτομετρικής συνοχής (local photometric consistency) η οποία εγγυάται την ορθή αντιστοίχιση των pixel στο σύνολο των εικόνων, ακόμα και αν έχουν εναλλαγές στο χρώμα ή τη φωτεινότητα. Τέλος, ο αλγόριθμος φιλτράρει εσφαλμένα patches ή χονδροειδή σφάλματα χρησιμοποιώντας περιορισμούς στην ορατότητα (visibility constraints), όπου εξασφαλίζει ότι τα τρισδιάστατα σημεία είναι ορατά από τις σωστές θέσεις λήψης [17].

Αφού έχουν δημιουργηθεί τα patches, τελικό βήμα της τεχνικής MVS είναι η τρισδιάστατη ανακατασκευή του μοντέλου, όπου πραγματοποιείται μέσω μετατροπής των patches σε πολυγωνικά πλέγματα (meshes) τα οποία αναπαριστούν την επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου, πραγματοποιώντας επίσης μεθόδους βελτιστοποίησης των πλεγμάτων για την ομαλότερη και πιο ακριβή ανακατασκευή της τρισδιάστατης σκηνής που αποτυπώνεται [17].

2.1.2. Normalized Cross Correlation (NCC)

Οι επιφανειακές συνταυτίσεις ή area-based μέθοδοι συνταύτισης, αλλιώς αποκαλούμενες στη βιβλιογραφία ως correlation-like μέθοδοι, συνδυάζουν τη διαδικασία του εντοπισμού

χαρακτηριστικών (feature detection) με τη διαδικασία της συνταύτισης, χρησιμοποιώντας καθορισμένα μεγέθη παραθύρων αναζήτησης ή ακόμα και ολόκληρες εικόνες. Ένα μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι το ορθογώνιο παράθυρο, το οποίο για εικόνες οι οποίες έχουν παραμορφωθεί με πολύπλοκους μετασχηματισμούς, δεν καλύπτει τα ίδια μέρη της εικόνας αναφοράς και της προς εξέταση εικόνας [18].

Οι κλασικοί area-based μέθοδοι πραγματοποιούν την συνταύτιση μέσω των εντάσεων στις εικόνες, χωρίς κάποια συγκεκριμένη δομή, με αποτέλεσμα να είναι ευαίσθητες σε αλλαγές έντασης, θόρυβο, αλλαγή στον φωτισμό και στον τύπο του αισθητήρα [18].

Μια διαδεδομένη area-based μέθοδος είναι η Normalized Cross Correlation (NCC), η οποία αναζητεί τη μέγιστη συσχέτιση σε ένα ορισμένο παράθυρο αναζήτησης μεταξύ δυο εικόνων, όπου η αυτή ισοδυναμεί στο αντιστοιχιζόμενο σημείο. Ο υπολογισμός της συνταύτισης δυο υποψήφιων σημείων γίνεται μέσω της εξίσωσης 2.1 [18].

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1\sigma_2} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N ((g_1(i,j) - \bar{g}_1)(g_2(i,j) - \bar{g}_2))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_1(i,j) - \bar{g}_1)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_2(i,j) - \bar{g}_2)^2}}, \quad (2.1)$$

Όπου g_1, g_2 οι τιμές έντασης των υπό εξέταση pixel και \bar{g}_1, \bar{g}_2 οι μέσες τιμές έντασης των παραθύρων αναζήτησης.

2.1.3. Semi-Global Matching (SGM)

Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι Σύνολης Συνταύτισης (Global Matching) παρέχουν πολύ υψηλή ακρίβεια, με το κύριο τους μειονέκτημα να είναι ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος. Από την άλλη, οι local μέθοδοι είναι αρκετά πιο γρήγοροι, αλλά είναι επιρρεπείς σε πολλών ειδών σφάλματα. Μια προσέγγιση των βέλτιστων δυνατοτήτων από αυτές τις κατηγορίες αλγορίθμων συνταύτισης προσφέρει ο αλγόριθμος Semi-Global Matching.

Ο αλγόριθμος Semi-Global Matching (SGM) είναι μια μέθοδος πυκνής συνταύτισης (dense matching) η οποία αναπτύχθηκε από τον Hirschmuller το 2007. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην συνταύτιση αμοιβαίας πληροφορίας (Mutual Information, MI) που πραγματοποιείται pixel προς pixel σε μια εικόνα, προσεγγίζοντας έτσι έναν καθολικό (global) διδιάστατο περιορισμό εξομάλυνσης (2D smoothness constraint) συνδυάζοντας πολλούς μονοδιάστατους περιορισμούς (1D constraints) [19].

Για τις εικόνες που εισάγονται προκειμένου να γίνει η μεταξύ τους συνταύτιση θεωρείται ότι έχουν γνωστή επιπολική γεωμετρία, ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, όπως συμβαίνει με εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί από αισθητήρες pushbroom. Η γραμμική κίνηση έχει ως αποτέλεσμα οι επιπολικές ευθείες γίνονται υπερβολές (hyperbolas), λόγω της παράλληλης προβολής στην κατεύθυνση της κίνησης του αισθητήρα και την προοπτική προβολή ορθογώνια προς αυτήν [19].

Η διαδικασία του αλγορίθμου SGM ξεκινάει με τον υπολογισμό του κόστους συνταύτισης ανά pixel (pixelwise matching cost) επί των εικόνων μέσω της τεχνικής της αμοιβαίας πληροφορίας (Mutual Information, MI) η οποία αντισταθμίζει έντονες αποκλίσεις στη ραδιομετρία των εικόνων, ενώ η αναζήτηση της παράλλαξης απλοποιείται σε μια διάσταση κατά τον οριζόντιο άξονα. Το κόστος συνταύτισης υπολογίζεται συγκρίνοντας τις εντάσεις για κάθε pixel της αρχικής εικόνας με τα αντίστοιχα τους pixel της άλλης εικόνας [19].

Για τη μείωση του θορύβου κατά τη διαδικασία της συνταύτισης, ο SGM χρησιμοποιεί συγκέντρωση του κόστους συνταύτισης με βελτιστοποίηση πολλαπλών διαδρομών 8 ή 16 διευθύνσεων στην εικόνα, όπου για κάθε pixel εντός της διαδρομής, με το τελικό κόστος να είναι το άθροισμα όλων των διαδρομών [19].

Με το συγκεντρωμένο κόστος να είναι διαθέσιμο για κάθε pixel η παράλλαξη υπολογίζεται με προσεγγίζοντας την μέθοδο winner-takes-all, επιλέγοντας την παράλλαξη με το μικρότερο κόστος, ενώ είναι εφικτή η υποψηφιδική ακρίβεια (sub-pixel accuracy) εφαρμόζοντας μια πολυωνυμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού στα γειτονικά κόστη [19].

Ο αλγόριθμος SGM χρησιμοποιείται για υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατες ανακατασκευές κυρίως από εναέριες ή δορυφορικές εικόνες, για εκτίμηση βάθους και πλοήγηση σε real-time καταστάσεις όπως η αυτόνομη οδήγηση και η ρομποτική.

2.2. Προσανατολισμός δορυφορικών εικόνων

2.2.1. Rational Polynomial Coefficients (RPC)

Το μοντέλο των κλασματικών πολυωνυμικών συντελεστών RPC (Rational Polynomial Coefficients), γνωστό επίσης στη διεθνή βιβλιογραφία και ως Rational Polynomial Camera ή και Rational Function Model (RFM), υλοποιήθηκε με σκοπό να αποτελέσει ένα καθολικό μοντέλο το οποίο θα διευκόλυνε τη διαδικασία της γεωαναφοράς των δορυφορικών εικόνων, ανεξάρτητα από τον αισθητήρα που φέρει κάθε δορυφορικό σύστημα [20].

Οι συντελεστές αυτοί συνδέουν τις συντεταγμένες στις τρεις διαστάσεις του χώρου (X,Y,Z) με τις συντεταγμένες των δυο διαστάσεων στην εικόνα (r,c), όπου r,c οι γραμμές και στήλες της εικόνας αντίστοιχα.

Η συνάρτηση προβολής (projection function) \mathcal{P} ενός RPC μοντέλου εκφράζεται ως εξής [21]:

$$(r, c) = \mathcal{P}(X, Y, Z) = \left(\frac{a(X, Y, Z)}{b(X, Y, Z)}, \frac{e(X, Y, Z)}{f(X, Y, Z)} \right) \quad (2.2)$$

Η εξίσωση 2.2 έχει ως κύριο χαρακτηριστικό τα a, b, e, f , τα οποία είναι κυβικά πολώνυμα αποτελούμενα από 20 μεταβλητές και κάθε ένα από αυτά εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2.3.

$$p(X, Y, Z) = p_0 + p_1Z + p_2Y + p_3X + p_4ZY + p_5ZX + p_6YX + p_7Z^2 + p_8Y^2 + p_9X^2 + p_{10}ZYX + p_{11}Z^2Y + p_{12}Z^2X + p_{13}Y^2Z + p_{14}Y^2X + p_{15}ZX^2 + p_{16}YX^2 + p_{17}Z^3 + p_{18}Y^3 + p_{19}X^3, \quad (2.3)$$

όπου p_i η i -οστή μεταβλητή του p , με $p = a, b, e, f$.

Ο τριγωνισμός ενός σημείου σε μια ή περισσότερες δορυφορικές εικόνες μπορεί να πραγματοποιηθεί από τα RPC για κάθε εικόνα που περιέχει το σημείο αυτό, ωστόσο ακόμα και αν αναμένεται τα RPC να είναι αρκετά ακριβή, το σύστημά τους περιέχει σφάλματα τα οποία σχετίζονται με τις γωνίες που ορίζουν τον προσανατολισμό του αισθητήρα του δορυφόρου. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα το σημείο του χώρου να προβληθεί κατά δεκάδες pixel μακριά από την πραγματική του θέση στο επίπεδο της εικόνας, βάσει της συνάρτησης προβολής \mathcal{P} [21].

Επομένως, καθίσταται σαφές ότι τα RPC ενδέχεται να προκαλέσουν συστηματικά σφάλματα κατά τον τριγωνισμό ομόλογων σημείων από πολλαπλές εικόνες, υποβαθμίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ακρίβεια των 3D ανακατασκευών από δορυφορικές εικόνες.

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα με τις τιμές των RPC από εικόνα του δορυφόρου WorldView-3

lineNumCoef	lineDenCoef	sampNumCoef	sampDenCoef
+2.938309E-03	+1.000000E+00	-3.891091E-03	+1.000000E+00
-5.230395E-03	+4.081461E-06	+1.044661E+00	+1.942064E-03
-1.003644E+00	+1.467714E-03	-4.481061E-02	+2.337590E-04
+7.386231E-03	+2.953624E-05	-7.453380E-02	-5.450565E-04
-1.111434E-05	+1.215085E-08	-4.395027E-04	-1.431049E-07

-7.131906E-06	+0.000000E+00	+2.141858E-04	-4.393778E-07
+5.111830E-05	+1.926101E-08	-6.721220E-04	-4.032711E-07
-3.486536E-05	+4.564685E-08	+2.028463E-03	+3.685417E-06
-1.475484E-03	+2.158929E-06	-2.053011E-05	+0.000000E+00
-3.114684E-07	+0.000000E+00	-1.567002E-05	-2.715192E-07
-4.900708E-08	+0.000000E+00	-1.620403E-06	+0.000000E+00
+0.000000E+00	+0.000000E+00	+3.847547E-06	+2.146471E-08
-1.883686E-08	+0.000000E+00	-2.814592E-07	+0.000000E+00
+0.000000E+00	+0.000000E+00	-1.122174E-07	+0.000000E+00
-9.282680E-08	+0.000000E+00	-1.479629E-06	+0.000000E+00
-2.163911E-06	+0.000000E+00	+0.000000E+00	+0.000000E+00
+0.000000E+00	+0.000000E+00	-1.129012E-07	+0.000000E+00
+0.000000E+00	+0.000000E+00	+1.006676E-06	+0.000000E+00
+1.976470E-07	+1.034161E-07	-1.200133E-07	+0.000000E+00

2.2.2. Μέθοδος δέσμης (Bundle Adjustment)

Η μέθοδος δέσμης BA (Bundle Adjustment) αποτελεί μια μέθοδο βελτιστοποίησης στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς για τη συνόρθωση των παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και των σημείων του χώρου από πολλές εικόνες ταυτόχρονα, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) [21].

Η μέθοδος δέσμης απαιτεί κάποιες αρχικές τιμές για K σημεία του χώρου $\{X_k\}_{k=1,\dots,K}$ και τα αντίστοιχα σημεία τους επί των εικόνων x_{mk} σε M πλήθος εικόνων με συναρτήσεις προβολής $\{P_m\}_{m=1,\dots,M} : R^2 \rightarrow R^3$, όπου βρίσκει την βέλτιστη λύση ελαχιστοποιώντας το σφάλμα επαναπροβολής ως εξής [21]:

$$E(P_m, X_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \|x_{mk} - P_m(X_k)\|^2, \quad (2.4)$$

όπου X_k και P_m οι μεταβλητές προς συνόρθωση.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η οποία αφορά τις δορυφορικές εικόνες, η μέθοδος δέσμης χρησιμοποιείται για τη συνόρθωση των παραμέτρων των RPC τα οποία συνοδεύουν τις δορυφορικές εικόνες, διορθώνοντας σφάλματα που προκύπτουν από ανακρίβειες στην γωνία των δορυφόρων.

Πραγματοποιώντας την ελαχιστοποίηση του σφάλματος επαναπροβολής με τη μέθοδο δέσμης, τα σημεία του χώρου από πολλές εικόνες έχουν μικρότερο σφάλμα, το οποίο οδηγεί σε πιο ακριβείς τρισδιάστατες ανακατασκευές.

3. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στις βασικές θεωρητικές έννοιες γύρω από το κύριο μέρος που ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία, τα Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα.

3.1. Βασικές έννοιες των Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων

Ο όρος Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (ΨΥΜ) ή Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) (Digital Elevation Model, DEM), αναφέρεται στην ψηφιακή απεικόνιση υψομέτρων της γήινης επιφάνειας σε μορφή καννάβου (grid), ισοϋψών καμπυλών (contours), δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated Irregular Network, TIN) [22].

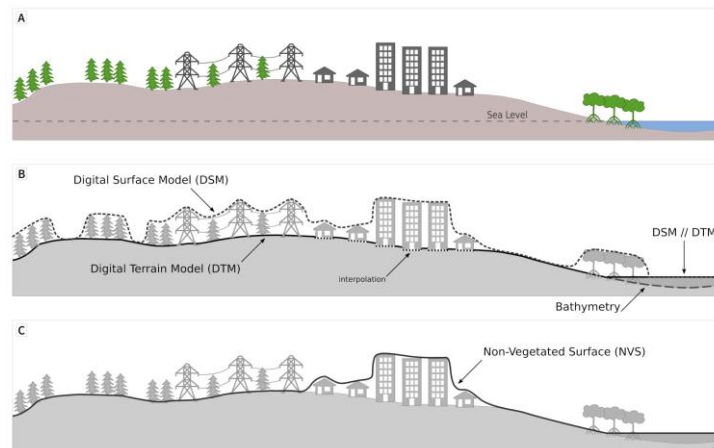
Το DEM αποτελεί μια γενικευμένη έννοια απεικόνισης της γήινης επιφάνειας η οποία έχει επικρατήσει να αναφέρεται σε οποιαδήποτε ψηφιακή απεικόνιση του εδάφους, ενώ για την πιο ακριβή του διάκριση χωρίζεται σε δυο κύριες υποκατηγορίες, το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (Digital Surface Model, DSM) και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model, DTM).

3.1.1. Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) και Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM)

Το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) απεικονίζει οτιδήποτε αποτυπώνεται στην γήινη επιφάνεια, είτε αυτό είναι φυσικό αντικείμενο (έδαφος, βλάστηση κ.α.), είτε τεχνητό αντικείμενο (κτήρια, γέφυρες, οδικό δίκτυο, κεραιές τηλεπικοινωνιών κ.α.).

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) αποτελεί παράγωγο του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας, καθώς απεικονίζει μόνο το γυμνό έδαφος (bare earth) και η δημιουργία του προϋποθέτει την αφαίρεση όλων των φυσικών και τεχνητών αντικειμένων που απεικονίζονται στο DSM.

Άλλο ένα παράγωγο του DSM είναι η επιφάνεια χωρίς φυτοκάλυψη (Non Vegetated Surface, NVS) η οποία προκύπτει αφαιρώντας μόνο τα φυσικά αντικείμενα του εδάφους, όπως δέντρα και γενικότερη βλάστηση.



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση εδάφους (A) από DSM, DTM (B) και NVS [22]

3.2. Πηγές και χρήσεις Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων

Τα DEM μπορούν να παραχθούν μέσω των ακόλουθων μεθόδων:

- **Επίγειες παρατηρήσεις:** Γίνονται άμεσες μετρήσεις στην ύπαιθρο με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, όπως γεωδαιτικούς σταθμούς και δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης (GNSS), όπου η υψομετρική πληροφορία προκύπτει με χωρική παρεμβολή.
- **Ψηφιοποίηση χαρτών:** Πρόκειται για μια από τις παλαιότερες μεθόδους δημιουργίας ΨΥΜ, όπου η υψομετρική πληροφορία εξάγεται μέσω χωρικής παρεμβολής
- **Εικόνες ραντάρ:** Πραγματοποιούνται λήψεις από εναέριους ή δορυφορικούς αισθητήρες ραντάρ (Synthetic Aperture Radar, SAR), οι οποίοι καταγράφουν το χρόνο ταξιδιού του σήματος το οποίο εκπέμπει στα μικροκύματα.
- **Αεροφωτογραφίες και εικόνες από UAV:** Λήψη εικόνων από επανδρωμένα και μη αεροσκάφη, εξοπλισμένα με εξειδικευμένες αεροφωτομηχανές ή ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης για τα UAV και κατάλληλα αδρανειακά συστήματα (Inertial Measurement Unit, IMU) και συστήματα εντοπισμού θέσης

(GNSS). Η εξαγόμενη υψομετρική πληροφορία βασίζεται στη στερεοσκοπική παράλλαξη των εικόνων.

- **Δορυφορικές εικόνες:** Λήψη στερεοζεύγους εικόνων από οπτικούς δορυφορικούς δέκτες παρατήρησης της γης, όπου πραγματοποιείται παρόμοια διαδικασία με τις αεροφωτογραφίες. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παραγωγή ΨΥΜ πολύ μεγάλων περιοχών, καθώς οι δορυφορικές εικόνες έχουν το πλεονέκτημα κάλυψης ιδιαίτερα μεγάλων περιοχών.

Οι σημαντικότερες χρήσεις των DEM είναι [23]:

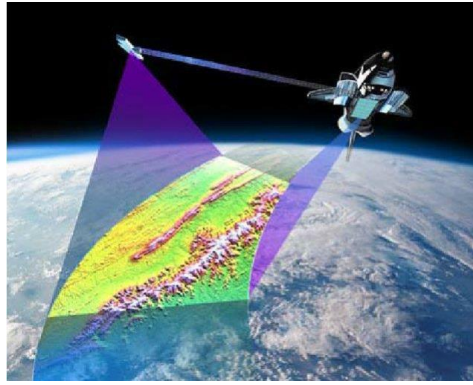
- **Τοπογραφικές αναλύσεις εδάφους:** Υπολογισμός υψομέτρου, κλίσης και προσανατολισμού του εδάφους, όπως επίσης μηκοτομές και κατά πλάτους τομές για την εκτίμηση όγκου σε έργα οδοποιίας και διαμόρφωσης του εδάφους.
- **Υδρολογικές μελέτες:** Προσδιορισμός λεκανών απορροής και εκτίμηση παροχής νερού κατά τη βροχόπτωση, της διάβρωση του εδάφους και μοντέλα πρόγνωσης πλημμυρών.
- **Διαχείριση περιβάλλοντος:** Διαχείριση δασών, οικοσυστημάτων και παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών που προκύπτουν από την κλιματική κρίση ή την αποψίλωση δασικών εκτάσεων.
- **Ανάλυση ορατότητας:** Ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή για εγκατάσταση κεραιών τηλεπικοινωνίας ή τοποθέτηση δασικών παρατηρητηρίων για εντοπισμό πυρκαγιών.
- Καθοδήγηση και αυτοκαθοδήγηση οχημάτων και αεροσκαφών, επανδρωμένων και μη
- Τρισδιάστατη απεικόνιση εδάφους και αστικών περιοχών σε εφαρμογές εικονικής (Virtual Reality, VR) και επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality, AR), με σκοπό τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων
- Διαδικασία ορθοαναγωγής εναέριων και δορυφορικών εικόνων

3.3. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα παγκόσμιας κάλυψης

Για τη δημιουργία μεγάλου εύρους DEM ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι διαστημικές αποστολές, καθώς η έκταση που καλύπτουν είναι κατά πολλές φορές μεγαλύτερη από εκείνη που θα μπορούσε να καλύψει ένα αεροσκάφος σε χαμηλότερο υψόμετρο. Στη συνέχεια αναφέρονται δυο από τις σημαντικότερες αποστολές για DTM παγκόσμιας κάλυψης, οι αποστολές SRTM και ASTER, τα δεδομένα των οποίων είναι ελεύθερα προς λήψη από το ευρύ κοινό.

3.3.1. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

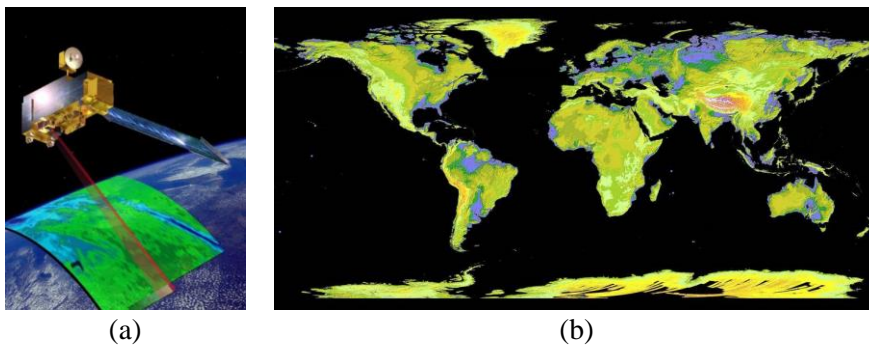
Η αποστολή Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ξεκίνησε με τη συνεργασία των ΗΠΑ, της Γερμανίας και της Ιταλίας, χρησιμοποιώντας ένα ειδικά διαμορφωμένο σύστημα ραντάρ τοποθετημένο στο διαστημικό λεωφορείο (Space Shuttle) Endeavour. Η αποστολή είχε διάρκεια έντεκα ημερών (11/02/2000 - 22/02/2000) και κατάφερε να συλλέξει 8.6 Terabytes δεδομένων SAR, καλύπτοντας σχεδόν το 80% της γήινης επιφάνειας (60° N έως 56° S) [24], [25]. Το αποτέλεσμα αυτής της αποστολής ήταν ένα παγκόσμιο DTM με αρχική χωρική ανάλυση 3 arcsec (90 m), ενώ με επόμενες εκδόσεις η χωρική ανάλυση έφτασε στα 1 arcsec (30 m) για όλο τον κόσμο. Η υψομετρική πληροφορία έχει ως ΓΣΑ το WGS84 και χρησιμοποιεί το γεωειδές Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) ως υψομετρικό μοντέλο αναφοράς [25].



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση της αποστολής SRTM στο διαστημικό λεωφορείο Endeavour

3.3.2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

Το Global Digital Elevation Model (GDEM) από την αποστολή Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) είναι το αποτέλεσμα μιας σύμπραξης μεταξύ των διαστημικών υπηρεσιών της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ το 2009. Σκοπός αυτής της συνεργασίας ήταν η δημιουργία ενός παγκόσμιου DTM (GDEM) χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα ASTER ο οποίος εξόπλιζε τον δορυφόρο Terra από την αποστολή Earth Observing System (EOS) της NASA [25].



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση της αποστολής ASTER (a) [25] και παγκόσμια κάλυψη υψομετρικής πληροφορίας από το GDEM της NASA (b) [26]

Η παραγωγή του GDEM έγινε μέσω στερεοσκοπικής επεξεργασίας 1,300,000 εικόνων από συνδυασμό του καναλιού 3B το οποίο λάμβανε οπίσθιες εικόνες με γωνία 28° και του καναλιού 3 (εγγύς υπέρυθρο) [26], [25]. Το τελικό προϊόν έχει χωρική ανάλυση 30 m και αποτελείται από 23,000 πινακίδες διαστάσεων $1^\circ \times 1^\circ$ και καλύπτει περιοχές μέχρι και 83° εκατέρωθεν του ισημερινού. Η κατακόρυφη ακρίβεια του ASTER είναι 20 m, ενώ όπως και με το SRTM, έχει ως ΓΣΑ το WGS84 και ως υψομετρικό μοντέλο αναφοράς το γεωειδές EGM96 [25], [26].

3.4. Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα τοπικής κάλυψης

Σε αντίθεση με τα DEM παγκόσμιας κάλυψης, τα DEM τοπικής κάλυψης συνήθως αφορούν εκτάσεις σε επίπεδο κρατών ή ακόμα μικρότερες περιοχές. Κυρίως για το λόγο ότι καλύπτουν μικρότερη έκταση, η χωρική τους ανάλυση είναι αρκετά υψηλότερη από εκείνη των DEM παγκόσμιας κάλυψης, η οποία μπορεί να φτάσει ακόμα σε επίπεδο μερικών εκατοστών του μέτρου.

Αυτού του είδους τα DEM συνήθως δεν παρέχονται δωρεάν προς το ευρύ κοινό όπως τα DEM παγκόσμιας κάλυψης και αποτελούν χωρικά υπόβαθρα αναφοράς, όπως το DTM του

Ελληνικού Κτηματολογίου, το οποίο έχει χωρική ανάλυση 2.00 m και καλύπτει όλο τον ελλαδικό χώρο, το οποίο προέκυψε από δεδομένα LIDAR.

4. Περιοχές μελέτης και σύνολο δεδομένων

Η πρακτική εφαρμογή της παρούσας μελέτης πραγματοποιείται με δεδομένα από τους δορυφόρους SPOT 6, Pleiades, Pleiades Neo, IKONOS-2, GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 και SkySat, όλων των προαναφερθέντων δορυφορικών οίκων (Maxar Technologies, AIRBUS Defense and Space και Planet Labs). Οι εικόνες που έχουν επιλεγεί έχουν διαφορετικό περιβάλλον (αστικό τοπίο, λοφώδες-ορεινό, επίπεδο-κοιλάδα ή και συνδυασμό αυτών), έτσι ώστε να δοκιμαστούν οι δυνατότητες των λογισμικών και των αλγορίθμων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Τα δεδομένα ως επί το πλείστον προέρχονται από το αποθετήριο αρχειακών δορυφορικών εικόνων Third Party Mission Dissemination Service του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA) [27], όπως επίσης και από τον κατάλογο Earth Observation Catalogue (EO-CAT) [28] του ίδιου οργανισμού. Εξαιρέσεις αποτελούν οι εικόνες από τους δορυφόρους Pleiades Neo και GeoEye-1, οι οποίες προμηθεύθηκαν ως δειγματικά δεδομένα (sample data) από την ιστοσελίδα της AIRBUS [29] και από εκπαιδευτική ιστοσελίδα της ESRI [30] αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποια από τα στερεοζεύγη των δορυφορικών εικόνων προέρχονται από κατά μήκος λήψεις (in-track stereo, in-track tri-stereo), δηλαδή από διαδοχικές λήψεις στην ίδια τροχιά του δορυφόρου με χρονική διαφορά μόλις μερικών δευτερολέπτων μεταξύ τους και από κατά πλάτος λήψεις (across-track stereo) οι οποίες έχουν χρονική διαφορά μεγαλύτερη από μια ημέρα, έως και μερικά έτη. Επίσης, οι μοναδικές εικόνες που βρέθηκαν από το σύνολο των δεδομένων με λήψη τριπλού στερεοζεύγους (in-track tri-stereo) ήταν από τον δορυφόρο Pleiades Neo. Οι πληροφορίες αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 4.1**.

Πίνακας 4.1: Σύνοψη χωρικής ανάλυσης και χρονικής διαφοράς μεταξύ λήψεων των δορυφορικών εικόνων

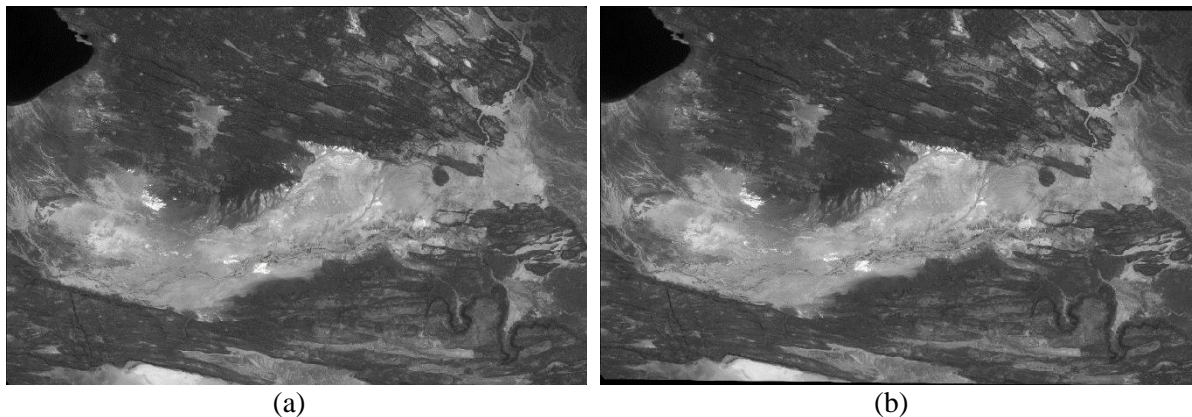
Δορυφόρος	Χωρική ανάλυση (m)	Stereo/Tristereo	Τύπος λήψης στερεοζεύγους	Χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων
SPOT 6	1.5	Stereo	In-track	14.6 δευτερόλεπτα
Pleiades	0.5	Stereo	Across-track	2 έτη, 7 μήνες, 2 ημέρες, 10 ώρες, 3 λεπτά, 22.125 δευτερόλεπτα
Pleiades Neo	0.3	Tristereo	Across-track	27.988847 δευτερόλεπτα / 9.995817 δευτερόλεπτα
IKONOS-2	0.8	Stereo	Across-track	10 μήνες, 19 ημέρες, 15 ώρες, 1 λεπτό
GeoEye-1	0.5	Stereo	In-track	1.08344 δευτερόλεπτα
WorldView-1	0.5	Stereo	In-track	46.297169 δευτερόλεπτα
WorldView-2	0.5	Stereo	Across-track	10 μήνες, 29 ημέρες, 14 ώρες, 55 λεπτά, 41.9 δευτερόλεπτα
WorldView-3	0.5	Stereo	Across-track	2 μήνες, 22 ημέρες, 2 ώρες, 53 λεπτά, 56.59 δευτερόλεπτα
SkySat	0.5	Stereo	Across-track	1 ημέρα, 6 λεπτά, 50 δευτερόλεπτα

4.1. Εικόνες από AIRBUS

- **Κουτα Βουγυα, Τζιμπουτί (SPOT 6)**

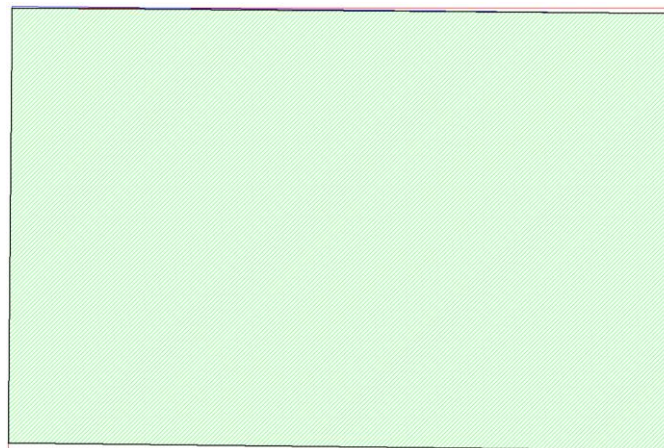
Το πρώτο στερεοζεύγος εικόνων προέρχεται από τον δορυφόρο SPOT 6 και απεικονίζει την ορεινή περιοχή Κουτα Βουγυα στο Τζιμπουτί. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από επίπεδη τοπογραφία σχεδόν χωρίς τεχνητές κατασκευές και βλάστηση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**, ενώ το υψόμετρο κυμαίνεται περίπου μεταξύ 230 m και 740 m, βάσει του SRTM DEM.

Το στερεοζεύγος των εικόνων έχει ληφθεί στις 03/09/2015 με τη χρονική διαφορά μεταξύ τους να είναι 14.6 sec. Οι γωνίες πρόσπτωσης είναι 11.11° για την πρώτη και 19.27° για την δεύτερη εικόνα, έχοντας μέγεθος εδαφοψηφίδας έπειτα από επαναδειγματοληψία (resampling) στα 1.54885 m και 1.63973 m αντίστοιχα. Οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες στο ΓΣΑ WGS84 / UTM Zone 38N.



Σχήμα 4.1: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου SPOT 6 από την περιοχή Κουτα Βουγυα, Τζιμπουτί

Οι εικόνες έχουν σχεδόν πλήρη επικάλυψη μεταξύ τους (98.43%) (**Σχήμα 4.2**), με το εμβαδόν της επικαλυπτόμενης περιοχής να είναι 2,309.3 km².



Σχήμα 4.2: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - SPOT 6

Ο

Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του SPOT 6, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

Πίνακας 4.2: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου SPOT 6 από την περιοχή της Κουτα Βουγυα, Τζιμπουτί

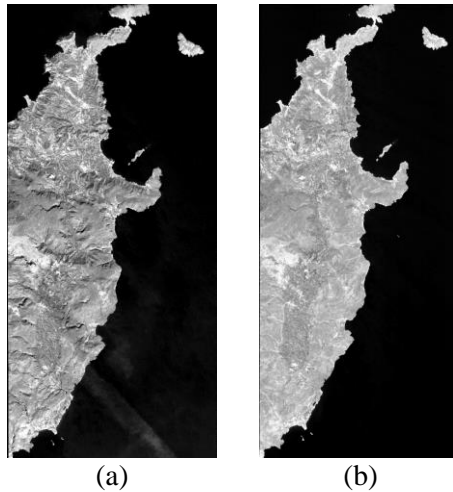
ID εικόνας	SPOT6_P_201509030717161	SPOT6_P_201509030717307
------------	-------------------------	-------------------------

Δορυφόρος	SPOT 6	
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	03/09/2015 07:17:16.1	03/09/2015 07:17:30.7
Γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	-2.005145°	-2.001707°
Γωνία κατά μήκος της τροχιάς	-9.420664°	-16.958085°
Γωνία πρόσπτωσης κατά πλάτος της τροχιάς	-3.20472599283°	-5.19402486231°
Γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος της τροχιάς	10.6768279839°	18.8528963699°
Γωνία πρόσπτωσης	11.107707°	19.267727°
Γωνία ηλιακής ανύψωσης	61.686334°	61.743533°
Γωνία θέασης	9.96635312298°	17.3837098704°
Πλάτος εικόνας (pixel)	37521	36233
Ύψος εικόνας (pixel)	24365	22917
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	1.54885	1.63973
Μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	2.12318542676	2.1980024286
Μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	2.22008359509	2.4366545719
Εμβαδόν εικόνας (km ²)	2,356.205	2,356.005
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS84 / UTM Zone 38N	

- **Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)**

Από τη νέα γενιά δορυφόρων Pleiades της AIRBUS επιλέχθηκε ένα σετ δυο ετεροχρονισμένων εικόνων από τους δορυφόρους Pleiades 1A στις 07/10/2013 και Pleiades 1B στις 10/05/2016, στην περιοχή της ανατολικής Κρήτης, με την μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι μεγαλύτερη από 2 έτη. Η περιοχή αποτελείται ως επί το πλείστον από ορεινό τοπίο (Σχήμα 4.3). Το υψόμετρο της περιοχής κυμαίνεται μεταξύ 0 m και 780m περίπου βάσει του SRTM DEM.

Οι γωνίες πρόσπτωσης είναι 22.49° για την πρώτη και 28.24° για την δεύτερη εικόνα, με μέγεθος εδαφοψηφίδας έπειτα από επαναδειγματοληψία στα 0.50 m. Οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες στο ΓΣΑ WGS84 / UTM Zone 35N, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται το αποτέλεσμα που θα προκύψει από στερεοζεύγος ετεροχρονισμένων εικόνων από διαφορετικούς δορυφόρους, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι ωστόσο με τον ίδιο αισθητήρα.



Σχήμα 4.3: Στερεοζεύγος εικόνων των δορυφόρων Pleiades 1A και Pleiades 1B από την περιοχή της Ανατολικής Κρήτης, Ελλάδα

Η επικαλυπτόμενη περιοχή των εικόνων είναι ιδιαίτερα μεγάλη (95.09%) (Σχήμα 4.4), με το εμβαδόν της να είναι 499.58 km².



Σχήμα 4.4: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - Pleiades 1A και Pleiades 1B

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων Pleiades 1A και Pleiades 1B, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

Πίνακας 4.3: Μεταδεδομένα εικόνων των δορυφόρων Pleiades 1A και Pleiades 1B από την περιοχή της Ανατολικής Κρήτης, Ελλάδα

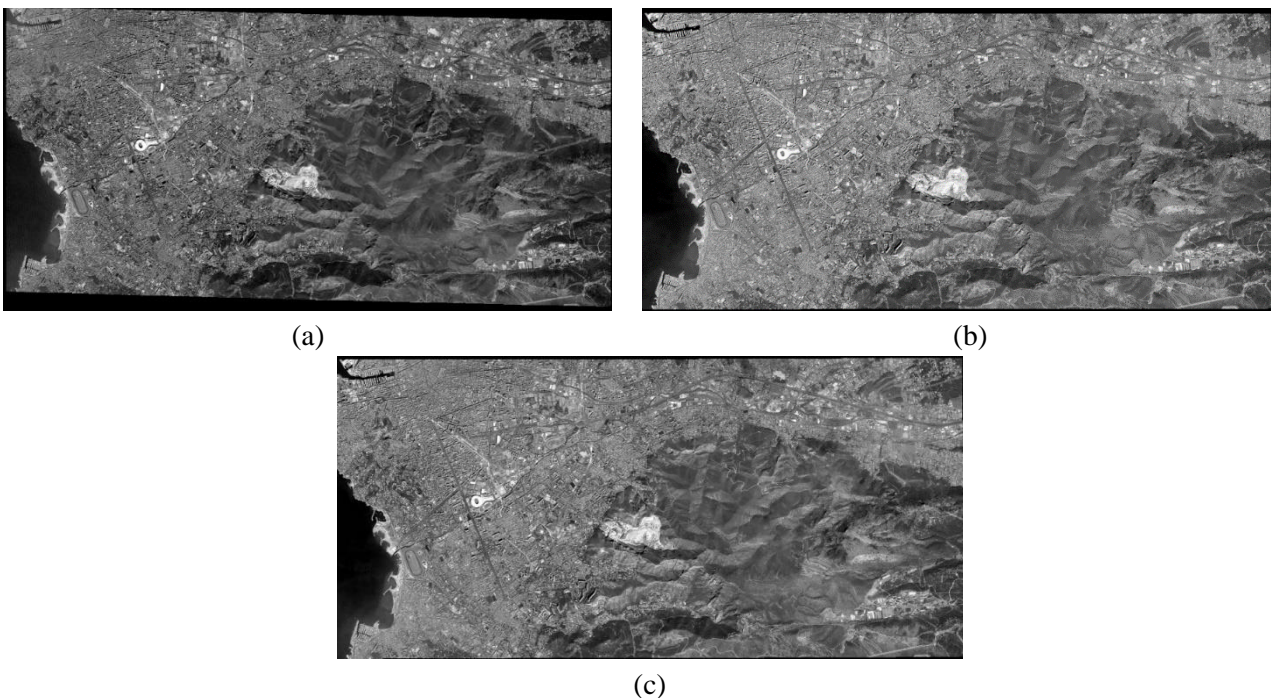
ID εικόνας	PHR1A_P_201310070920270	PHR1B_P_201605100853493
Δορυφόρος	Pleiades 1A	Pleiades 1B
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	07/10/2013 09:20:29.281	10/05/2016 08:53:51.406
Γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	19.692172°	-25.002816°
Γωνία κατά μήκος της τροχιάς	-4.646422°	-3.456330°
Γωνία πρόσπτωσης κατά πλάτος της τροχιάς	-22.7714505130733°	27.07584038106997°
Γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος της τροχιάς	0.7709680281060358°	8.369398555868598°
Γωνία πρόσπτωσης	22.493001°	28.242026°
Γωνία ηλιακής ανύψωσης	48.166671°	65.5231428°
Γωνία θέασης	20.41090665995186°	24.98336935795302°

Πλάτος εικόνας (pixel)	27122	25202
Ύψος εικόνας (pixel)	58752	56952
Μέγεθος εικονοπηφίδας (m)	0.5	0.5
Μέγεθος εδαφοπηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.7477321003909014	0.7834686410900542
Μέγεθος εδαφοπηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.820571003627359	0.8842538525128799
Εμβαδόν εικόνας (km ²)	497.3271	521.078
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS 84 / UTM Zone 35N	

- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**

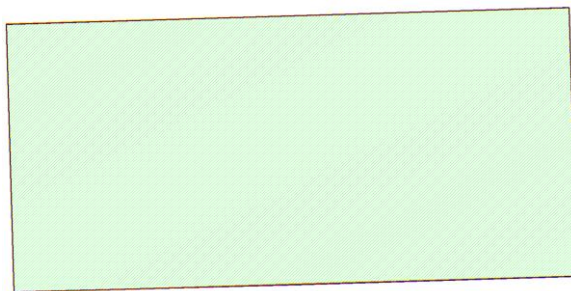
Από το ζεύγος δορυφόρων Pleiades Neo έχει επιλεχθεί ένα τριπλό στερεοζεύγος τριών επικαλυπτόμενων δορυφορικών εικόνων, οι οποίες απεικονίζουν την ευρύτερη περιοχή της Marseille στην Γαλλία στις 14/04/2023, με την μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι 28 δευτερόλεπτα (πρώτη εικόνα-δεύτερη εικόνα) και 10 δευτερόλεπτα (δεύτερη εικόνα-τρίτη εικόνα). Η περιοχή αποτελείται από αστικό και ορεινό περιβάλλον όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**, με το υψομετρικό εύρος να είναι μεταξύ 0 m και 625 m βάσει του SRTM DEM.

Οι γωνίες πρόσπτωσης είναι 14.01° για την πρώτη, 5.79° για τη δεύτερη και 12.37° για την τρίτη εικόνα, ενώ το μέγεθος της εδαφοπηφίδας είναι στα 0.30 m. Το ΓΣΑ των εικόνων είναι το WGS84 / UTM Zone 35N.



Σχήμα 4.5: Τριπλό στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου Pleiades Neo 4 από την περιοχή της Marseille, Γαλλία

Υπάρχει σχεδόν πλήρης επικάλυψη της περιοχής (90.03%) και από τις τρεις εικόνες (Σχήμα 4.6), με το εμβαδόν της επικαλυπτόμενης περιοχής να είναι 97.538 km².



Σχήμα 4.6: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή τριπλού στερεοζεύγους - Pleiades Neo 4

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του Pleiades Neo 4, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

Πίνακας 4.4: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου Pleiades Neo 4 από την περιοχή της Marseille, Γαλλία

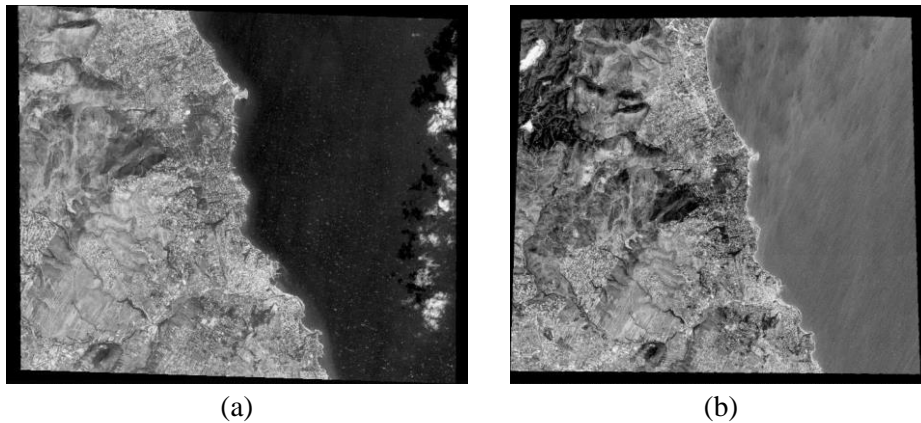
ID εικόνας	PNEO4_202304141036365	PNEO4_202304141037045	PNEO4_202304141037145
Δορυφόρος	Pleiades Neo 4		
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	14/04/2023 10:36:36.566018	14/04/2023 10:37:04.554865	14/04/2023 10:37:14.550682
Γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	-2.031337°	-2.023520°	-2.028532°
Γωνία κατά μήκος της τροχιάς	12.568832°	-4.845343°	-11.013971°
Γωνία πρόσπτωσης κατά πλάτος της τροχιάς	5.406334°	0.925828°	-0.700399°
Γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος της τροχιάς	-12.994101°	5.694342°	12.295246°
Γωνία πρόσπτωσης	14.013669°	5.794493°	12.326088°
Γωνία ηλιακής ανύψωσης	53.533393°	53.570602°	53.583778°
Γωνία θέασης	12.729908°	5.271362°	11.201529°
Πλάτος εικόνας (pixel)	44570	45600	44909
Ύψος εικόνας (pixel)	22210	22028	21570
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.3	0.3	0.3
Μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.309330	0.300812	0.305745
Μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.315850	0.301590	0.312527
Εμβαδόν εικόνας (km ²)	96.7845	96.7811	96.7901
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS 84 / UTM Zone 31N		

4.2. Εικόνες από Maxar Technologies

- **Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)**

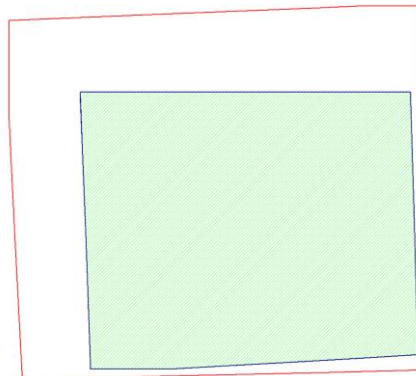
Από τον δορυφόρο IKONOS-2 επιλέχθηκε στερεοζεύγος εικόνων από την περιοχή της Ανατολικής Αττικής στην Ελλάδα, με ημερομηνίες λήψης 01/10/2007 για την πρώτη και 20/08/2008 για την δεύτερη εικόνα με τη μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι περίπου στους 8 μήνες. Η περιοχή αποτελείται από ορεινό τοπίο στα δυτικά και από έδαφος με πιο ομαλή κλίση πλησιάζοντας στην ακτογραμμή, με το υψόμετρο να κυμαίνεται μεταξύ 0 m και 752 m περίπου, σύμφωνα με το SRTM DEM.

Οι γωνίες πρόσπτωσης για τις εν λόγω εικόνες δεν είναι διαθέσιμες από τα μεταδεδομένα, ωστόσο το ΓΣΑ στο οποίο είναι γεωαναφεραμένες είναι το WGS84 / UTM Zone 34N.



Σχήμα 4.7: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου IKONOS-2 από την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, Ελλάδα

Η επικαλυπτόμενη περιοχή του στερεοζεύγους των εικόνων είναι σχετικά μεγάλη (60.27%) (Σχήμα 4.8), ενώ ισούται με το εμβαδόν της πρώτης εικόνας, το οποίο είναι 118.0972 km².



Σχήμα 4.8: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - IKONOS-2

Ο

Πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του IKONOS-2, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

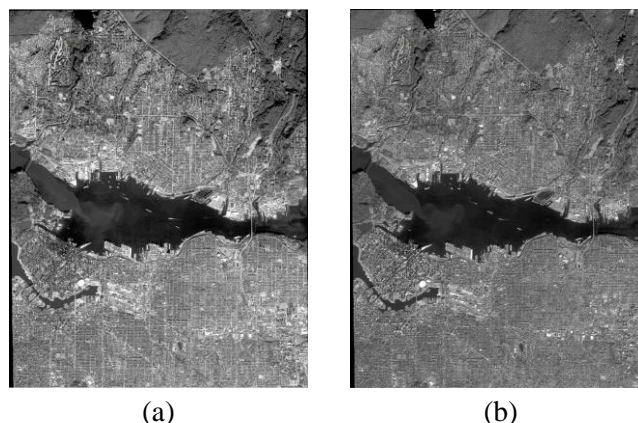
Πίνακας 4.5: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου IKONOS-2 από την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, Ελλάδα

ID εικόνας	po_2627659_pan_0000000	po_2627662_pan_0000000
Δορυφόρος	IKONOS-2	
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	01/10/2007 09:25:00	20/08/2008 09:26:00
Γωνία πρόσπτωσης κατά πλάτος της τροχιάς	78.45107°	68.55830°
Γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος της τροχιάς	211.6304°	350.9238°
Γωνία ηλιακής ανύψωσης	47.55692°	60.84626°
Πλάτος εικόνας (pixel)	12004	14768
Ύψος εικόνας (pixel)	9848	13268
Μέγεθος εικονοπηφίδας (m)	1.00	1.00
Εμβαδόν εικόνας (km²)	118.0972	195.9418
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS 84 / Zone 34N	

- **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**

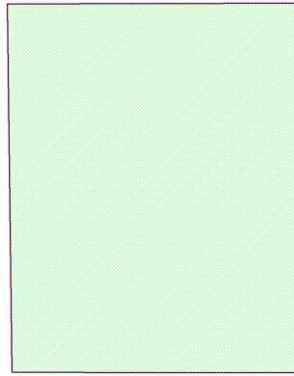
Το στερεοζεύγος εικόνων που αναπαριστά την περιοχή του Βανκούβερ στον Καναδά προέρχεται από τον δορυφόρο GeoEye-1 και λήφθηκε στις 19/10/2023 με τη χρονική διαφορά μεταξύ των εικόνων να είναι μόλις στα 1.08 δευτερόλεπτα. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από έντονο αστικό τοπίο με πολλά κτήρια και από ορεινό τοπίο στα πάνω μέρη των εικόνων, με το υψόμετρο να κυμαίνεται μεταξύ 0 m και 860 m περίπου, βάσει του SRTM DEM.

Οι γωνίες πρόσπτωσης των εικόνων είναι 24.0 για την πρώτη και 21.1 για τη δεύτερη εικόνα, ενώ είναι γεωαναφερμένες στο ΓΣΑ NAD83 / UTM Zone 10N.



Σχήμα 4.9: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου GeoEye-1 από την περιοχή του Vancouver, Καναδάς

Οι εικόνες έχουν πλήρη επικάλυψη μεταξύ τους (**Σχήμα 4.10**) με εμβαδόν επικαλυπτόμενης περιοχής 152.29 km².



Σχήμα 4.10: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - GeoEye-1

Ο

Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του GeoEye-1, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

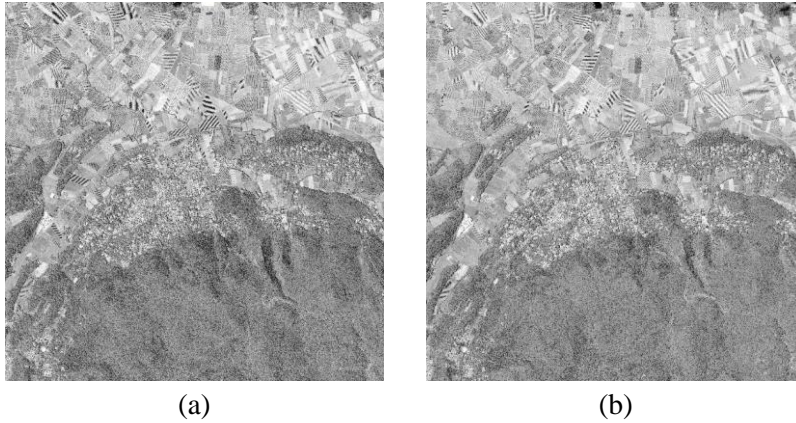
Πίνακας 4.6: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου GeoEye-1 από την περιοχή του Vancouver, Καναδάς

ID εικόνας	1050410004431500	1050410004411600
Δορυφόρος	GeoEye-1	
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	29/10/2013 19:31:09.601714	29/10/2013 19:30:10.685154
Μέση γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	-18.1°	-17.0°
Μέση γωνία κατά μήκος της τροχιάς	-16.0°	12.7°
Μέση γωνία πρόσπτωσης	24.0°	21.1°
Μέση γωνία ηλιακής ανύψωσης	26.9°	26.9°
Πλάτος εικόνας (pixel)	21936	21936
Ύψος εικόνας (pixel)	27772	27772
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.50	0.50
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.469	0.469
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.494	0.456
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας (m)	0.481	0.463
Εμβαδόν εικόνας (km²)	152.2898	152.2892
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	NAD83 / UTM Zone 10N	

- **Νέoules, Γαλλία (WorldView-1)**

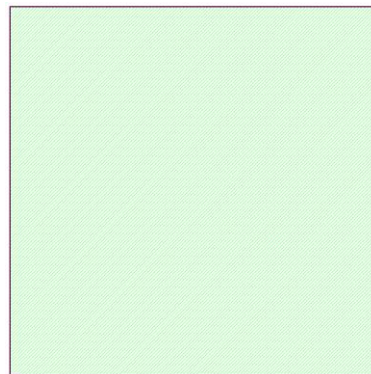
Από τον δορυφόρο WorldView-1 έχει επιλεγθεί στερεοζεύγος εικόνων από την περιοχή Νέoules στη Γαλλία με ημερομηνία λήψης 27/07/2020, και τη μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι στα 46.29 δευτερόλεπτα. Η περιοχή αποτελείται από επίπεδο και ορεινό τοπίο, με το υψομετρικό εύρος να κυμαίνεται μεταξύ 300 m και 570 m περίπου, σύμφωνα με το SRTM DEM.

Οι γωνίες πρόσπτωσης των εικόνων είναι 9.4° για την πρώτη και 29.6° για τη δεύτερη εικόνα, ενώ είναι γεωαναφερμένες στο ΓΣΑ WGS84 / UTM Zone 32N.



Σχήμα 4.11: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-1 από την περιοχή Νέoules, Γαλλία

Υπάρχει πλήρης επικάλυψη της περιοχής και από τις δυο εικόνες (**Σχήμα 4.12**) με εμβαδόν 25.023 km^2 .



Σχήμα 4.12: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-1

Ο

Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του WorldView-1, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

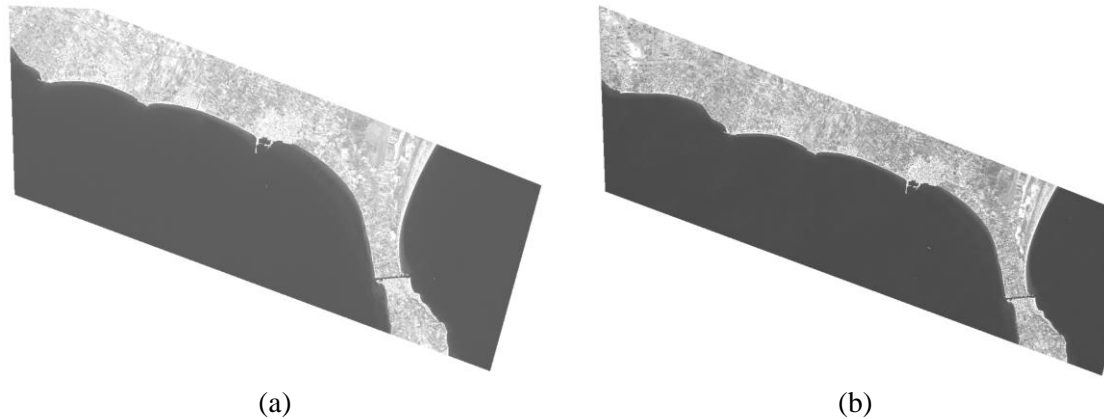
Πίνακας 4.7: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-1 από την περιοχή της Νέoules, Γαλλία

ID εικόνας	20JUL27133159-P2AS-014704751020_01_P002	20JUL27133246-P2AS-014704751020_01_P001
Δορυφόρος	WorldView-1	
Ημερομηνία και ώρα λήψης	27/07/2020	27/07/2020

(UTC)	13:31:59.971365	13:32:46.268534
Μέση γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	7.7°	5.9°
Μέση γωνία κατά μήκος της τροχιάς	5.4°	-29.1°
Μέση γωνία πρόσπτωσης	9.4°	29.6°
Μέση γωνία ηλιακής ανύψωσης	56.7°	56.6°
Πλάτος εικόνας (pixel)	10005	10005
Ύψος εικόνας (pixel)	10004	10004
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.50	0.50
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.506	0.687
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.515	0.584
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας (m)	0.510	0.634
Εμβαδόν εικόνας (km²)	25.02251	25.02251
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS84 / UTM Zone 32N	

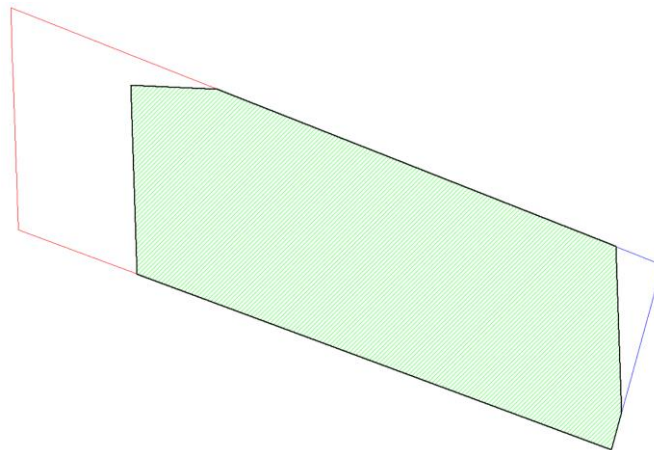
- Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)

Το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο WorldView-2 απεικονίζει την περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής με ημερομηνίες λήψης 14/09/2013 για την πρώτη και 14/08/2014 για τη δεύτερη εικόνα και τη μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι ακριβώς στους 11 μήνες. Η τοπογραφία της περιοχής χαρακτηρίζεται σχετικά επίπεδη, με το υψομετρικό εύρος να βρίσκεται περίπου μεταξύ 0 m και 70 m, βάσει του SRTM DEM. Οι γωνίες πρόσπτωσης των είναι 22.7 για την πρώτη και 20.5 για τη δεύτερη εικόνα, ενώ το ΓΣΑ που χρησιμοποιείται είναι το WGS84 / UTM Zone 34N.



Σχήμα 4.13: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-2 από την περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής, Ελλάδα

Η επικαλυπτόμενη περιοχή του στερεοζεύγους καλύπτει μεγάλο μέρος των εικόνων (76.57%) (**Σχήμα 4.14**) και έχει εμβαδόν 110.08 km².



Σχήμα 4.14: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-2

Ο

Πίνακας 4.8 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του WorldView-2, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

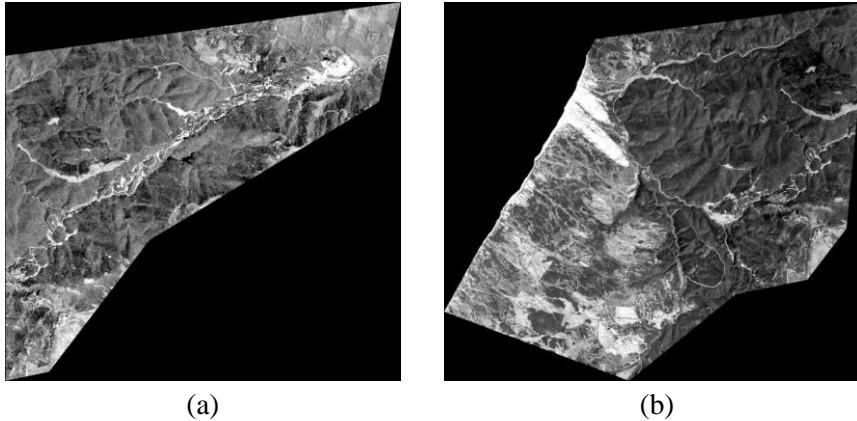
Πίνακας 4.8: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-2 από την περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής, Ελλάδα

ID εικόνας	13SEP14092954-P2AS-056762432010_01_P004	14AUG14092536-P2AS-056762432010_01_P003
Δορυφόρος	WorldView-2	

Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	14/09/2013 09:29:54.567666	14/08/2014 09:25:36.468628
Μέση γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	22.4°	19.3°
Μέση γωνία κατά μήκος της τροχιάς	-3.6°	-7.0°
Μέση γωνία πρόσπτωσης	22.7°	20.5°
Μέση γωνία ηλιακής ανύψωσης	51.4°	60.5°
Πλάτος εικόνας (pixel)	40352	35156
Ύψος εικόνας (pixel)	29188	24224
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.50	0.50
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.522	0.519
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.560	0.535
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας (m)	0.541	0.527
Εμβαδόν εικόνας (km ²)	294.4485	211.1899
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS84 / UTM Zone 34N	

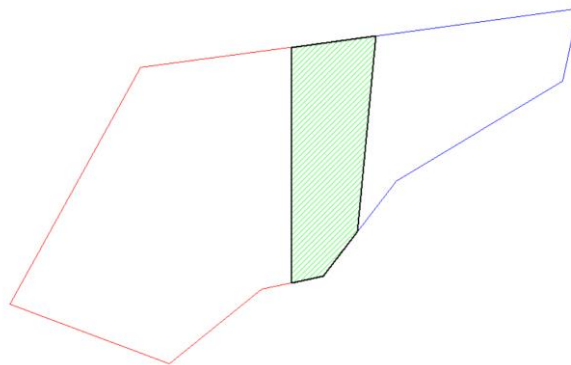
- **Sardinia, Ιταλία (WorldView-3)**

Για τον δορυφόρο WorldView-3 έχει επιλεγθεί στερεοζεύγος εικόνων από ορεινή περιοχή της Sardinia της Ιταλίας με ημερομηνία λήψης 17/05/2023 για την πρώτη και 18/08/2023 για τη δεύτερη εικόνα, με τη μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι λιγότερο από 3 μήνες. Οι γωνίες πρόσπτωσης των εικόνων είναι 8.3° και 12.8° αντίστοιχα, ενώ το υψόμετρο στην περιοχή είναι μεταξύ 0 m και 710 m περίπου με βάση το SRTM DEM. Το ΓΣΑ στο οποίο είναι γεωαναφερμένες οι εικόνες είναι το WGS84 / UTM Zone 32N.



Σχήμα 4.15: Στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 από την περιοχή Sardinia, Ιταλία

Η επικαλυπτόμενη περιοχή μεταξύ του στερεοζεύγους είναι αρκετά μικρή (10.27%) (**Σχήμα 4.16**) και ισούται με 17.032 km².



Σχήμα 4.16: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - WorldView-3

Ο

Πίνακας 4.9 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων του WorldView-3, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

Πίνακας 4.9: Μεταδεδομένα εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 από την περιοχή της Sardinia, Ιταλία

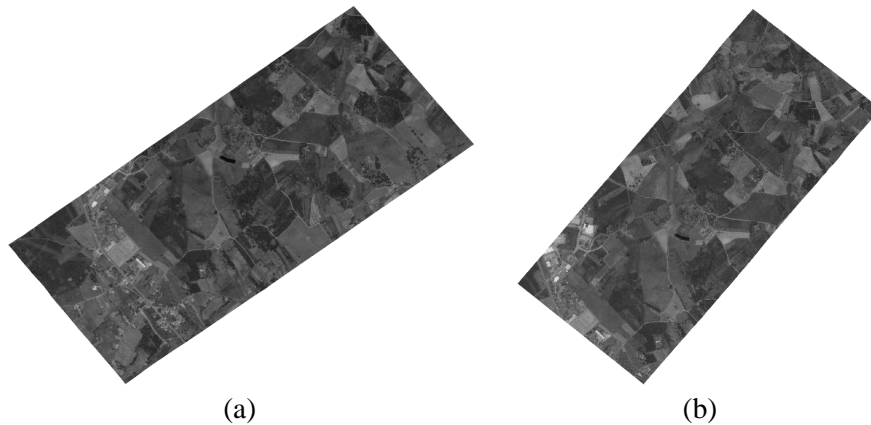
ID εικόνας	23MAY27102435-P2AS-050192281010_01_P002	23AUG18101831-P2AS-050192281010_01_P001
Δορυφόρος	WorldView-3	
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	27/05/2023 10:24:35.057108	18/08/2023 10:18:31.646829
Μέση γωνία κατά πλάτος της τροχιάς	-8.3°	2.0°

Μέση γωνία κατά μήκος της τροχιάς	-0.2°	-12.6°
Μέση γωνία πρόσπτωσης	8.3°	12.8°
Μέση γωνία ηλιακής ανύψωσης	68.1°	59.4°
Πλάτος εικόνας (pixel)	16436	20983
Ύψος εικόνας (pixel)	15709	18774
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.50	0.50
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά πλάτος της τροχιάς (m)	0.312	0.326
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας κατά μήκος της τροχιάς (m)	0.316	0.317
Μέσο μέγεθος εδαφοψηφίδας (m)	0.314	0.321
Εμβαδόν εικόνας (km ²)	64.5051	98.4732
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS84 / UTM Zone 32N	

4.3. Εικόνες από Planet Labs

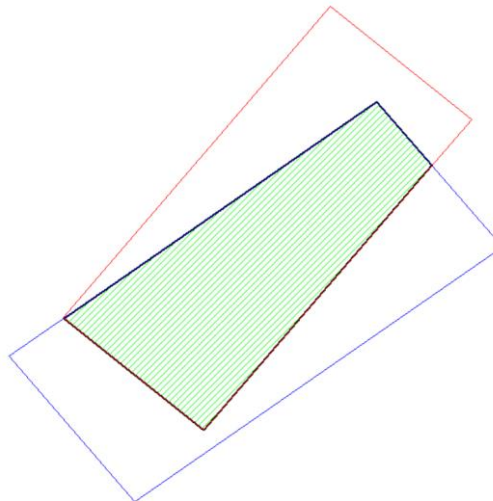
- **Seia, Πορτογαλία (SkySat)**

Τέλος, από την Planet Labs έχει επιλεγθεί στερεοζεύγος εικόνων από τους δορυφόρους SSC3 και SSC12 του σμήνους SkySat από την περιοχή της Seia στην Πορτογαλία. Οι εικόνες έχουν ληφθεί στις 14/07/2021 και στις 15/07/2021 αντίστοιχα, με τη μεταξύ τους χρονική διαφορά να είναι λίγο μεγαλύτερη από μια ημέρα, με τις γωνίες πρόσπτωσης να είναι 24.6° για την πρώτη και 17.4° για τη δεύτερη εικόνα. Το έδαφος είναι αρκετά επίπεδο με το υψομετρικό εύρος να είναι μεταξύ 430 m και 465 m σύμφωνα με το SRTM DEM, ενώ οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες στο ΓΣΑ WGS84 / UTM Zone 29N.



Σχήμα 4.17: Στερεοζεύγος εικόνων των δορυφόρων SkySat SSC3 και SkySat SSC12 από την περιοχή Seia, Πορτογαλία

Η επικαλυπτόμενη περιοχή αντιστοιχεί στο 49.5% του στερεοζεύγους (**Σχήμα 4.18**) με έκταση μόλις 3.536 km².



Σχήμα 4.18: Αποτύπωμα και επικαλυπτόμενη περιοχή στερεοζεύγους - SkySat SSC3 και SkySat SSC12

Ο

Πίνακας 4.10 παρουσιάζει τα βασικότερα μεταδεδομένα του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων SkySat SSC3 και SkySat SSC12, όπως αυτά παρέχονται μαζί με τις εικόνες.

Πίνακας 4.10: Μεταδεδομένα εικόνων των δορυφόρων SSC3 και SSC12 (SkySat) από την περιοχή της Seia, Πορτογαλία

ID εικόνας	20210714_105128_ssc3d1_0027	20210715_105818_ssc12d2_0033
Δορυφόρος	SSC3	SSC12
Ημερομηνία και ώρα λήψης (UTC)	14/07/2021 10:51:28	15/07/2021 10:58:18
Γωνία πρόσπτωσης	24.6°	17.4°
Γωνία ηλιακής ανύψωσης	60.8°	61.8°
Πλάτος εικόνας (pixel)	3338	2761
Ύψος εικόνας (pixel)	2703	2867
Μέγεθος εικονοψηφίδας (m)	0.8	0.8
Εμβαδόν εικόνας (km²)	5.77495	5.06434
Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς	WGS84 / UTM Zone 29N	

5. Παραγωγή Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων σε εμπορικά λογισμικά

Έχοντας αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια τις βασικές θεωρητικές έννοιες γύρω από το κύριο μέρος της διπλωματικής εργασίας και έχοντας παρουσιάσει το σύνολο των δεδομένων, στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται εκτενώς το πρακτικό κομμάτι, το οποίο αφορά την εφαρμογή της διαδικασίας εξαγωγής DEM από στερεοζεύγη δορυφορικών εικόνων.

Για τη δημιουργία ενός DEM απαιτείται ιδιαίτερα ισχυρή υπολογιστική ισχύς (CPU) για την παραγωγή, όπως επίσης και αρκετά μεγάλη χωρητικότητα μνήμης στην κάρτα γραφικών (GPU) για την όσο το δυνατόν ανεμπόδιστη οπτικοποίηση και περιήγηση του ΨΥΜ, ενώ είναι απαραίτητη μεγάλη χωρητικότητα σε σκληρό δίσκο για την αποθήκευση των δεδομένων, κατά προτίμηση τεχνολογίας SSD για μεγαλύτερη ταχύτητα ανάγνωσης και εγγραφής.

Το πρακτικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε σε υπολογιστικό σύστημα με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU): 13th Gen Intel® Core™ i7-13700K, 3400 MHz, 16 Cores, 24 Logical Processors
- Μνήμη RAM: 64 GB
- Επεξεργαστής Γραφικών (GPU): NVIDIA GeForce RTX 4070 SUPER 12 GB
- Λειτουργικό Σύστημα: Windows 11 Pro 64 bit

Για την παραγωγή των DEM χρησιμοποιήθηκαν δυο εμπορικά λογισμικά, το Catalyst Earth Professional της PCI Geomatics και το Metashape Professional της Agisoft, με σκοπό να πραγματοποιηθεί μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ τους.

Σημειώνεται πως η απεικόνιση των DEM πραγματοποιείται στο λογισμικό Global Mapper, ενώ οι υψομετρικές τιμές εμφανίζονται βάσει της χρωματικής κλίμακα Atlas Shader, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.1**, όπου η αύξηση των υψομέτρων γίνεται από το μπλε προς το κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 5.1: Χρωματική κλίμακα αναπαράστασης υψομέτρων Atlas Shader του λογισμικού Global Mapper

5.1. Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων και διόρθωση αποτελεσμάτων

Η παραγωγή των DEM προϋποθέτει ένα στάδιο προεπεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων, αφού κάθε δορυφορικός οίκος δίνει διαφορετικό μορφότυπο αρχείων εικόνων (.iml, .dim, .tiff, .jp2 κλπ) και μεταδεδομένων για κάθε εικόνα. Για το λόγο αυτό οι δορυφορικές εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν στο πρακτικό κομμάτι πρέπει να μετατραπούν σε αρχείο το οποίο αναγνωρίζεται ορθώς από το κάθε λογισμικό. Εξίσου σημαντικό στάδιο της προεπεξεργασίας είναι η εύρεση φωτοσταθερών σημείων στις εικόνες προκειμένου το αποτέλεσμα να έχει τη βέλτιστη χωρική ακρίβεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές που ακολουθούν χρησιμοποιούνται δορυφορικές εικόνες μόνο από το παγχρωματικό κανάλι κάθε δορυφόρου και όχι ο συνδυασμός πολυφασματικού-παγχρωματικού (pansharpened). Το παγχρωματικό κανάλι διατηρεί τη μέγιστη χωρική ανάλυση που μπορεί να αποδώσει κάθε δορυφόρος με αρκετά μικρότερο όγκο αρχείου σε σχέση με το pansharpened, γεγονός το οποίο μειώνει σημαντικά τους χρόνους επεξεργασίας στα λογισμικά.

5.1.1. Μετατροπή αρχείων εικόνων

Για την παραγωγή DEM στο Catalyst Earth το στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων πρέπει να μετατραπεί από τον τύπο αρχείου εικόνας που δίνεται μέσω του παρόχου, στον τύπο αρχείου PCI Geomatics Database File (PCIDSK ή .pix). Αυτός ο τύπος αρχείου έχει αποκλειστική χρήση για το συγκεκριμένο λογισμικό (χωρίς να είναι μη αναγνώσιμος από άλλα λογισμικά), καθώς μέσω αυτού γίνονται όλες οι απαραίτητες διεργασίες, από την ορθοαναγωγή εικόνων μέχρι και τη δημιουργία DEM. Τα αρχεία .imd και .dim τα οποία παρέχονται με τις δορυφορικές εικόνες και περιέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για αυτές είναι αναγνώσιμα από το Catalyst Earth, επομένως η μετατροπή αυτών σε αρχείο .pix είναι καθαρά για λόγους ευχρηστίας στις διαδικασίες του λογισμικού.

Στο λογισμικό Metashape Professional η μετατροπή του αρχείου των δορυφορικών εικόνων είναι πιο περίπλοκη διαδικασία, καθώς σε αντίθεση με το Catalyst Earth, το Metashape Professional δεν αναγνωρίζει τα αρχεία .imd και .dim των δορυφορικών εικόνων. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση της βιβλιοθήκης επεξεργασίας εικόνων ανοικτού κώδικα Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), η οποία είναι διαθέσιμη μέσω του λογισμικού ανοικτού κώδικα QGIS. Η διαδικασία αυτή αφορά τη χρήση του εργαλείου Translate, το οποίο μετατρέπει τα προαναφερθέντα αρχεία σε αρχείο εικόνας .tif που αναγνωρίζεται πλήρως από το Metashape Professional. Σημαντική είναι επίσης η μετονομασία των αρχείων που περιέχουν τα RPC κάθε δορυφορικής εικόνας σε αρχείο .txt το οποίο πρέπει να φέρει την ίδια ακριβώς ονομασία με το αρχείο εικόνας .tif συν το απόθεμα _rpc. Για παράδειγμα εάν η ονομασία της εικόνας είναι «pro_2627659_pan_0000000», τότε το αρχείο των RPC πρέπει να έχει την ονομασία «pro_2627659_pan_0000000_rpc.txt».

5.1.2. Εύρεση φωτοσταθερών σημείων

Προκειμένου η διαδικασία της παραγωγής των DEM να πραγματοποιηθεί με τη βέλτιστη χωρική ακρίβεια, έχουν χρησιμοποιηθεί φωτοσταθερά σημεία. Για τις εικόνες που απεικονίζουν περιοχές της Ελλάδας έχουν χρησιμοποιηθεί ως υπόβαθρο εικόνες LSO (Large Scale Orthophotos) από την Ελληνικό Κτηματολόγιο Α.Ε. Εξαιρέση αποτελεί η εικόνα του δορυφόρου GeoEye-1 από την περιοχή Vancouver του Καναδά, όπου δίνονταν μαζί με το δειγματικό σετ δεδομένων, αρχείο με συντεταγμένες και εικόνες μετρημένων φωτοσταθερών σημείων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα δυο εμπορικά λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν, μόνο το Catalyst Earth έχει τη δυνατότητα αυτόματης εξαγωγής φωτοσταθερών σημείων, βήμα το οποίο θα γίνει μόνο σε εικόνες οι οποίες απεικονίζουν περιοχές της Ελλάδας.

5.1.3. Διόρθωση αποτελεσμάτων

Σημαντικό κομμάτι της ορθής απεικόνισης, όπως επίσης και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις δοκιμές που ακολουθούν είναι η αφαίρεση των υδάτινων στοιχείων (θάλασσα, λίμνες, ποτάμια), καθώς λόγω έλλειψης υψούς στην επιφάνεια του νερού παρατηρούνται μεγάλες παραμορφώσεις όπως απότομες εξάρσεις ή βυθίσεις στα παραγόμενα DSM. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου γίνεται λανθασμένη εκτίμηση των υψομέτρων στα μοντέλα, επομένως πραγματοποιείται διόρθωση των παραγόμενων DSM χρησιμοποιώντας στο Catalyst Earth Professional πολύγωνο με την ακτογραμμή κάθε περιοχής, εφαρμόζοντας διάφορα φίλτρα εξομάλυνσης, ενώ για τα DSM από το Metashape Professional οι διορθώσεις πραγματοποιούνται στη διαδικασία επεξεργασίας του point cloud και του 3D μοντέλου.

5.2. Catalyst Earth Professional

Το λογισμικό Catalyst Earth Professional της PCI Geomatics αποτελεί μια ολιστική σουίτα εργαλείων ανάλυσης και επεξεργασίας για δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες από UAV και αεροσκάφη, όπως επίσης και εικόνες ραντάρ. Διαθέτει πληθώρα εργαλείων και εφαρμογών μεταξύ των οποίων και αυτό της εξαγωγής DEM από στερεοζεύγη δορυφορικών εικόνων.

Η διαδικασία εξαγωγής DSM από δορυφορικές εικόνες ξεκινάει δημιουργώντας νέο project για κάθε περιοχή μελέτης στο εργαλείο OrthoEngine. Αρχικά, εισάγεται το στερεοζεύγος των εικόνων για το οποίο θα παραχθεί το DEM σε μορφότυπο αρχείου .dim για τις εικόνες της AIRBUS, .imd για τις εικόνες από την Maxar Technologies και .tif για τις εικόνες από την Planet Labs, όπου το ΓΣΑ κάθε εικόνας αναγνωρίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια, ορίζεται η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια για τα φωτοσταθερά (GCPs) και τα σημεία σύνδεσης (TPs) για το κάθε project, όπου εν προκειμένω επιλέγεται η μέγιστη δυνατή, με την οριζοντιογραφική ακρίβεια να είναι 0.1 pixel για τα GCPs και 0.5 pixel για τα TPs και την υψομετρική ακρίβεια 0.01 m για τα GCPs και 1.00 m για τα TPs.

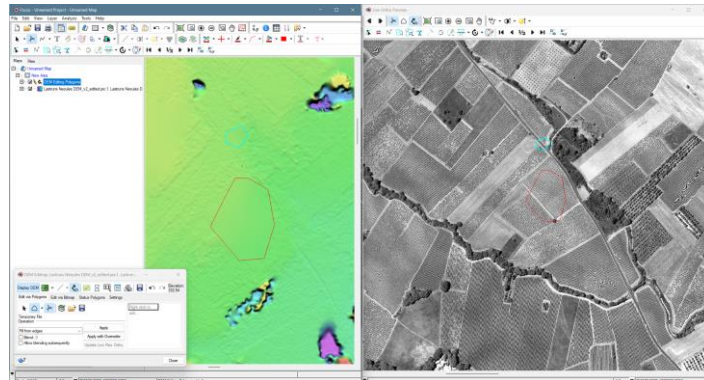
Επόμενο βήμα είναι η γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων με αυτόματη εξαγωγή GCPs χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο αναφοράς τις ορθοφωτογραφίες του Ελληνικού Κτηματολογίου (LSO με χωρική ανάλυση 0.25 m) και το αντίστοιχο DTM με χωρική ανάλυση 2.00 m για τις εικόνες που βρίσκονται εντός της Ελλάδας, ενώ για τις εικόνες από περιοχές εκτός Ελλάδας χρησιμοποιούνται μόνο TPs, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμο υπόβαθρο αναφοράς.

Προκειμένου να προκύψουν αμερόληπτα αποτελέσματα από τις διαδικασίες εξαγωγής GCPs και TPs, επιλέγονται οι ακόλουθοι παράμετροι για όλες τις δορυφορικές εικόνες. Αρχικά, το μέγιστο πλήθος GCPs ανά εικόνα ορίζεται στα 10,000 με ακτίνα αναζήτησης 100 pixels, εκτός από τη μέθοδο εύρεσης TPs FFTB, όπου η ακτίνα αναζήτησης ορίζεται στα 1,500 pixels, και ελάχιστη αποδεκτή αξιολόγηση (minimum acceptance score) 0.85.

Η διαδικασία της αυτόματης εξαγωγής GCPs απαιτεί την ορθοφωτογραφία και το DTM που θα χρησιμοποιηθούν ως υπόβαθρα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η επιθυμητή μέθοδος εξαγωγής GCPs μεταξύ των μεθόδων αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων SUSAN, GRID και Stereo Candidates, ενώ οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι συνταύτισης των εικόνων είναι οι FFTP και NCC. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος εντοπισμού χαρακτηριστικών SUSAN ο οποίος εντοπίζει γωνίες και ακμές, σε πολλές περιπτώσεις η εφαρμογή του ίσως να μην είναι σωστή. Ο λόγος είναι η ιδιότητα του, η οποία εντοπίζει μεν γωνίες σε κτήρια, δρόμους κ.α., αλλά έχοντας ως υπόβαθρο DTM (έδαφος) και όχι DSM (έδαφος μαζί με κτήρια, δρόμους κ.α.), ενδέχεται να οδηγήσει σε μεγάλο υψομετρικό σφάλμα για τα σημεία που εντοπίζει. Γενικότερα, παρατηρήθηκε ότι καλύτερα αποτελέσματα (μεγάλο πλήθος GCPs με χαμηλό σχετικό σφάλμα RMS) προκύπταν με χρήση των μεθόδων Stereo Candidates και FFTP, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι με αλγόριθμο συνταύτισης NCC και μεθόδους αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων SUSAN και GRID ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρες, ενώ έδιναν πολύ μεγάλο σφάλμα RMS και λιγότερα σημεία.

Υπάρχουν περιπτώσεις που το παραγόμενο DSM το οποίο προκύπτει έχει αστοχίες στον προσδιορισμό των υψομέτρων, κυρίως λόγω ύπαρξης υδάτινων στοιχείων όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ωστόσο, οι αστοχίες αυτές μπορούν να προκύψουν και από κακή υφή (texture) σε συγκεκριμένα μέρη των εικόνων ή από έλλειψη φωτοσταθερών ή σημείων σύνδεσης.

Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται διόρθωση των παραγόμενων DEM στο εργαλείο Focus, όπου με χρήση φίλτρων εξομάλυνσης διορθώνονται οι εσφαλμένες περιοχές.



Σχήμα 5.3: Διαδικασία επεξεργασίας εσφαλμένων περιοχών σε DSM στο Focus

5.2.1. Εφαρμογή σε εικόνες της AIRBUS

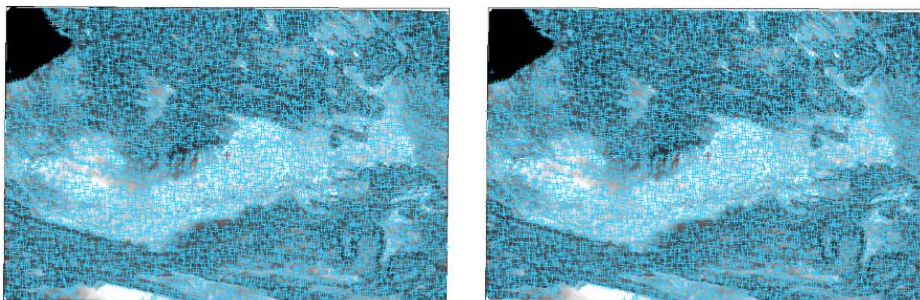
• Kouta Bouyya, Τζιμπουτί (SPOT 6)

Για την συγκεκριμένη περιοχή δεν υπάρχουν υπόβαθρα ορθοεικόνων ή DTM, επομένως παραλείπεται η διαδικασία της αυτόματης εύρεσης GCPs και γίνεται απευθείας αυτόματη αναζήτηση TP's στο στερεοζεύγος. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη σύγκριση διαφορετικών αλγορίθμων για την εξαγωγή TP's στο στερεοζεύγος εικόνων του SPOT 6.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TP's - SPOT 6

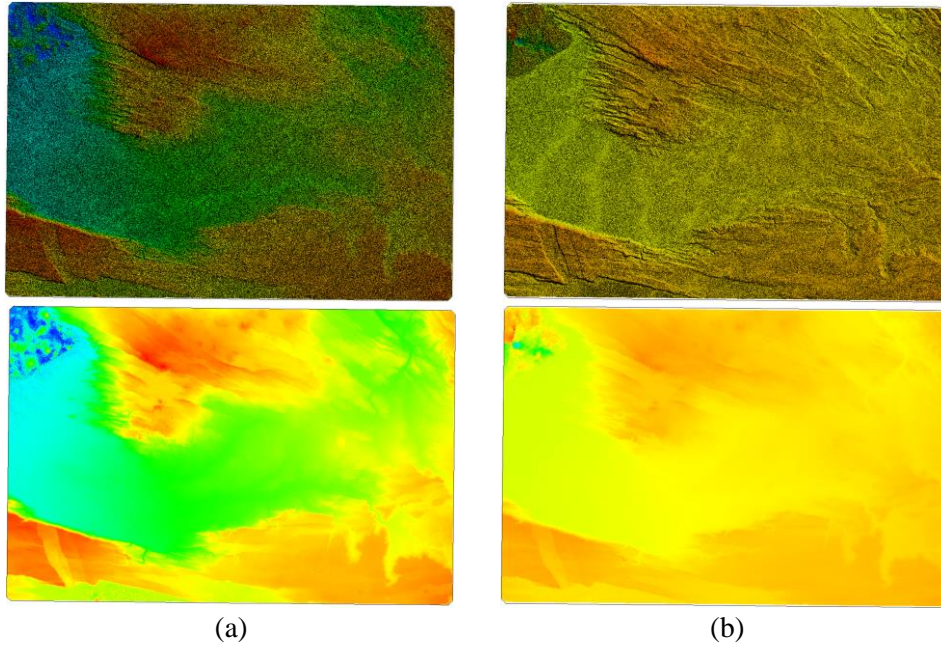
Αλγόριθμος	Πλήθος TP's	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
FFTb	1,685	0.087	0.020	0.004	0.08936
FFTP (SUSAN)	9,362	0.086	0.019	0.004	0.08816
FFTP (GRID)	9,372	0.096	0.022	0.005	0.09862
NCC (SUSAN)	8,258	0.196	0.044	0.010	0.20113
NCC (GRID)	4,565	1.212	0.048	0.010	1.21299

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιλέχθηκε η μέθοδος με το μικρότερο συνολικό σφάλμα RMS, όπου εν προκειμένω είναι αυτό του αλγορίθμου συνταύτισης FFTP με μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών SUSAN, με 9362 φωτοσταθερά σημεία και συνολικό σφάλμα RMS 0.08816 m. Η κατανομή των TP's στο στερεοζεύγος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.

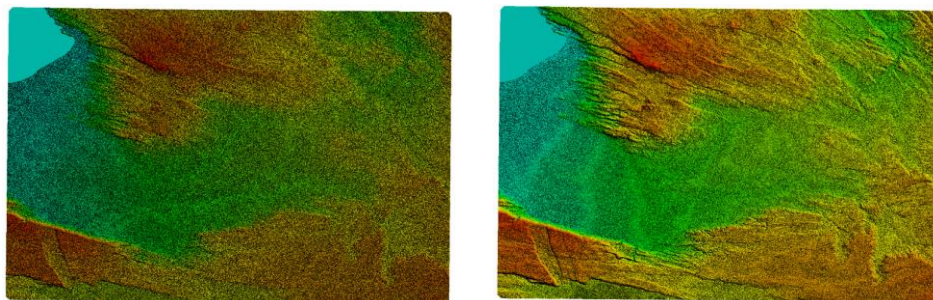


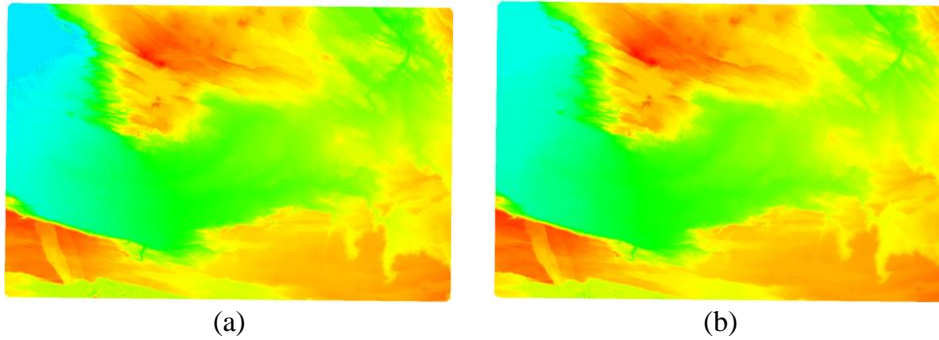
(a) (b)
Σχήμα 5.4: Κατανομή των TPs (+) του στερεοζεύγους από τον δορυφόρο SPOT 6

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρατηρείται ότι υπάρχει πρόβλημα με το εύρος των υψομέτρων στην περιοχή (**Σχήμα 5.5**), καθώς η χρωματική κλίμακα διαφέρει κατά πολύ μεταξύ των δυο μεθόδων. Το υψομετρικό εύρος με τη μέθοδο NCC κυμαίνεται μεταξύ 206 m και 753 m, ενώ με τη μέθοδο SGM από -480 m έως 1235 m. Οι τιμές υψομέτρων που προκύπτουν, ειδικά στην περίπτωση της μεθόδου SGM αποκλίνουν κατά πολύ από την πραγματικότητα και για αυτό ευθύνεται η ύπαρξη υδάτινων στοιχείων στο επάνω αριστερό μέρος της εικόνας.



Με τη διόρθωση των εσφαλμένων τιμών υψομέτρων στις περιοχές με υδάτινα σώματα, το υψομετρικό εύρος έχει διαμορφωθεί από 207 m έως 753 m με τη μέθοδο NCC και από 196 m έως 740 m με τη μέθοδο SGM (**Σχήμα 5.6**).





Σχήμα 5.6: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - SPOT 6

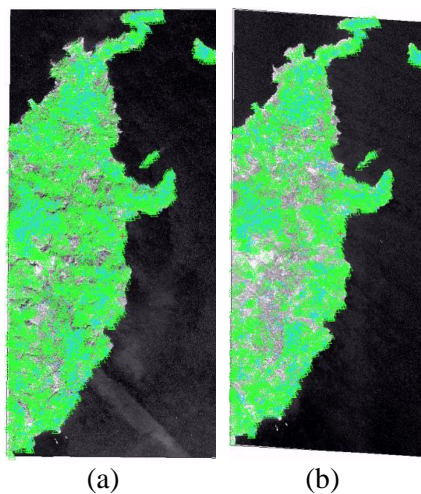
- **Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)**

Για την αυτόματη συλλογή φωτοσταθερών σημείων χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο αναφοράς ορθοφωτογραφία και ΨΜΕ της περιοχής από το Ελληνικό Κτηματολόγιο, ενώ πραγματοποιήθηκε και συλλογή σημείων σύνδεσης μεταξύ των εικόνων. Στον Πίνακας 5.2 παρουσιάζονται οι χωρικές ακρίβειες των μεθόδων εύρεσης GCPs και TPs.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - Pleiades

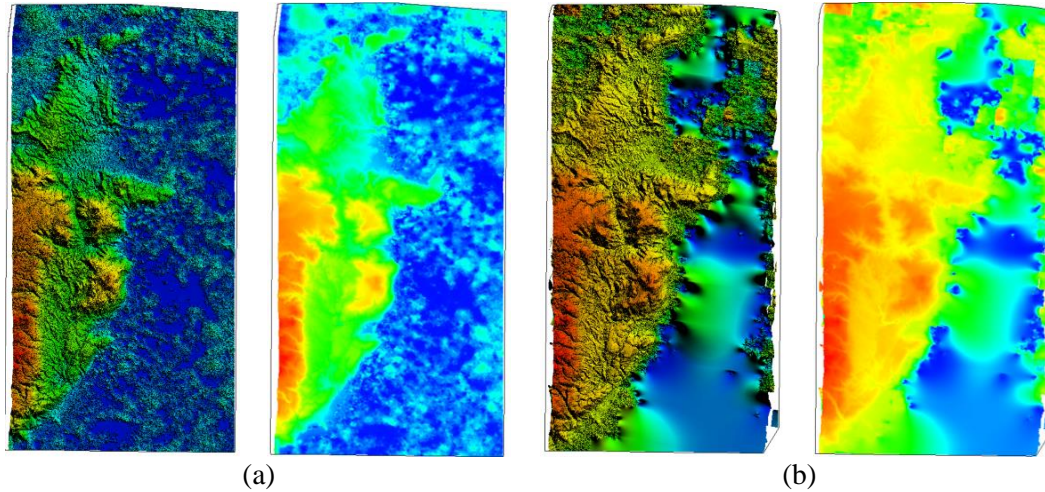
Διαδικασία	Αλγόριθμος	Πλήθος GCPs/TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
GCPs	Stereo Candidates	452	0.130	0.145	1.149	1.16539
	FFTP (SUSAN)	6,644	0.028	0.154	0.759	0.77497
	FFTP (GRID)	6,908	0.028	0.154	0.762	0.77791
	NCC (SUSAN)	1,263	0.039	0.198	1.364	1.37885
	NCC (GRID)	746	0.040	0.190	0.865	0.88652
TPs	FFTB	69	0.010	0.065	0.005	0.06595
	FFTP (SUSAN)	1,146	0.014	0.089	0.006	0.09029
	FFTP (GRID)	1,243	0.015	0.097	0.007	0.98402
	NCC (SUSAN)	571	0.020	0.131	0.009	0.13282
	NCC (GRID)	385	0.022	0.140	0.010	0.14207

Επιλέγεται τόσο για GCPs, όσο και για τα TPs ο αλγόριθμος συνταύτισης FFTP με την μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών SUSAN με 6,644 σημεία και συνολικό σφάλμα RMS 0.77497 m για τα GCPs και 1,146 σημεία με συνολικό σφάλμα RMS 0.09029 για τα TPs. Η κατανομή των GCPs και των TPs στο στερεοζεύγος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7.



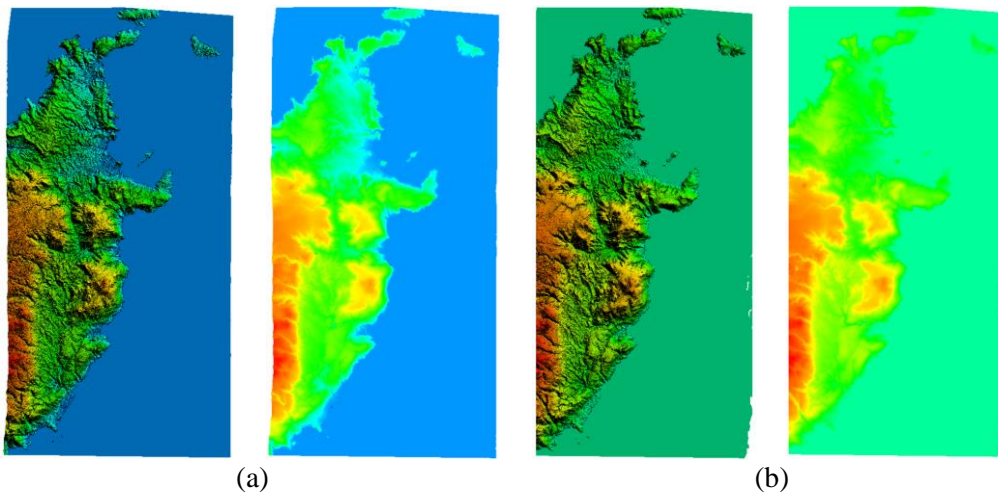
Σχήμα 5.7: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - Pleiades

Παρατηρείται όπως και στην εικόνα από τον SPOT 6 ότι και οι δυο αλγόριθμοι εξαγωγής παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στον προσδιορισμό των υψομέτρων στα υδάτινα σώματα, ιδιαίτερα στην περίπτωση του αλγορίθμου SGM (Σχήμα 5.8). Το υψομετρικό εύρος με τη μέθοδο NCC κυμαίνεται μεταξύ -32 m και 757 m, ενώ με τη μέθοδο SGM από -518 m έως 759 m.



Σχήμα 5.8: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - Pleiades

Πραγματοποιήθηκε διόρθωση χρησιμοποιώντας πολύγωνο της ελληνικής ακτογραμμής προκειμένου να απομονωθεί το μέρος των μοντέλων που απεικονίζει τη θάλασσα και τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ πιο ικανοποιητικά, ωστόσο υπάρχουν ακόμα κάποιες μικρές περιοχές με εσφαλμένα αρνητικά υψόμετρα, ειδικά στη μέθοδο SGM (Σχήμα 5.9). Το υψομετρικό εύρος έχει μεταβληθεί και κυμαίνεται μεταξύ -31 m και 757 m για την μέθοδο NCC, ενώ με την μέθοδο SGM από -100 m έως 737 m.



Σχήμα 5.9: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) – Pleiades

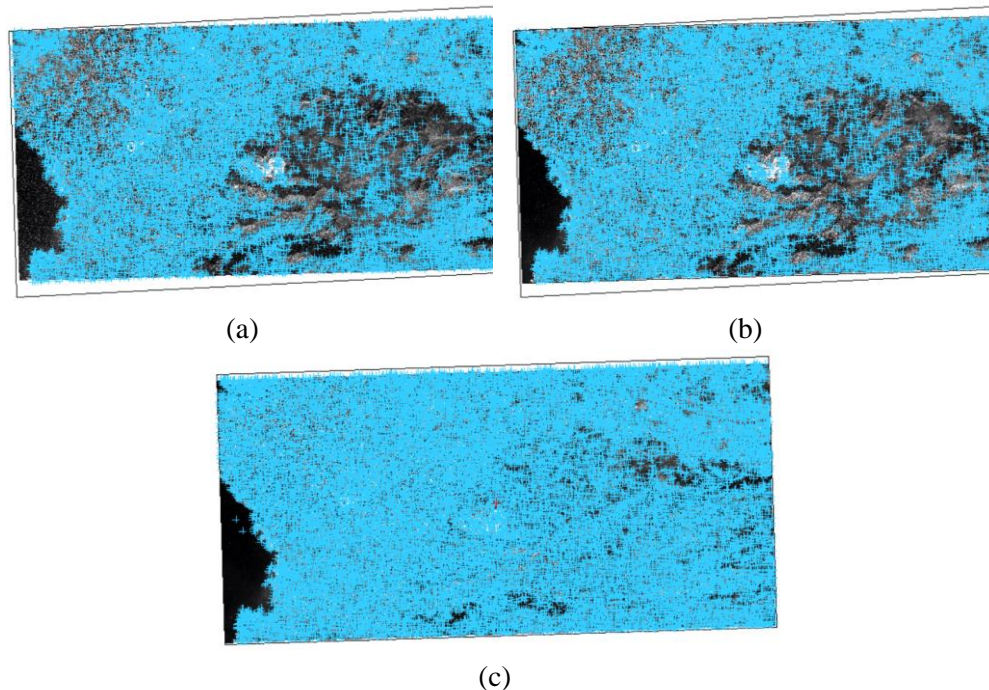
- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**

Καθώς δεν υπάρχει υπόβαθρο αναφοράς για τη συγκεκριμένη περιοχή, πραγματοποιείται απευθείας αναζήτηση TPs στο τριπλό στερεοζεύγος των εικόνων. Στον **Πίνακα 5.3** παρουσιάζονται οι χωρικές ακρίβειες των αλγορίθμων εξαγωγής σημείων σύνδεσης.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - Pleiades Neo 4

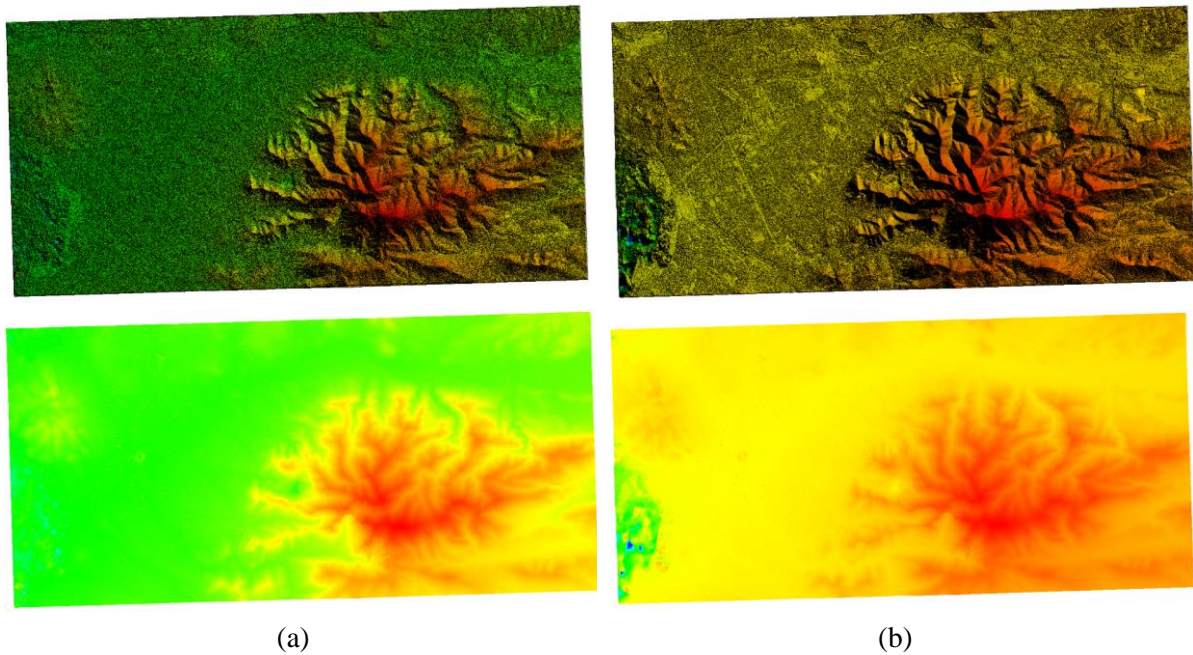
Αλγόριθμος	Πλήθος TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
FFTb	1,136	0.057	0.029	0.005	0.06415
FFTP (SUSAN)	20,217	0.051	0.029	0.005	0.05888
FFTP (GRID)	20,766	0.052	0.028	0.005	0.05927
NCC (SUSAN)	17,334	0.071	0.035	0.006	0.07938
NCC (GRID)	17,805	0.074	0.038	0.006	0.08340

Επιλέγεται ο αλγόριθμος συνταύτισης FFTP με τη μέθοδο αναζήτησης SUSAN, όπου βρέθηκαν 20,217 σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων του στερεοζεύγους, με συνολικό σφάλμα RMS 0.05888 m. Η κατανομή των TPs παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.10**.



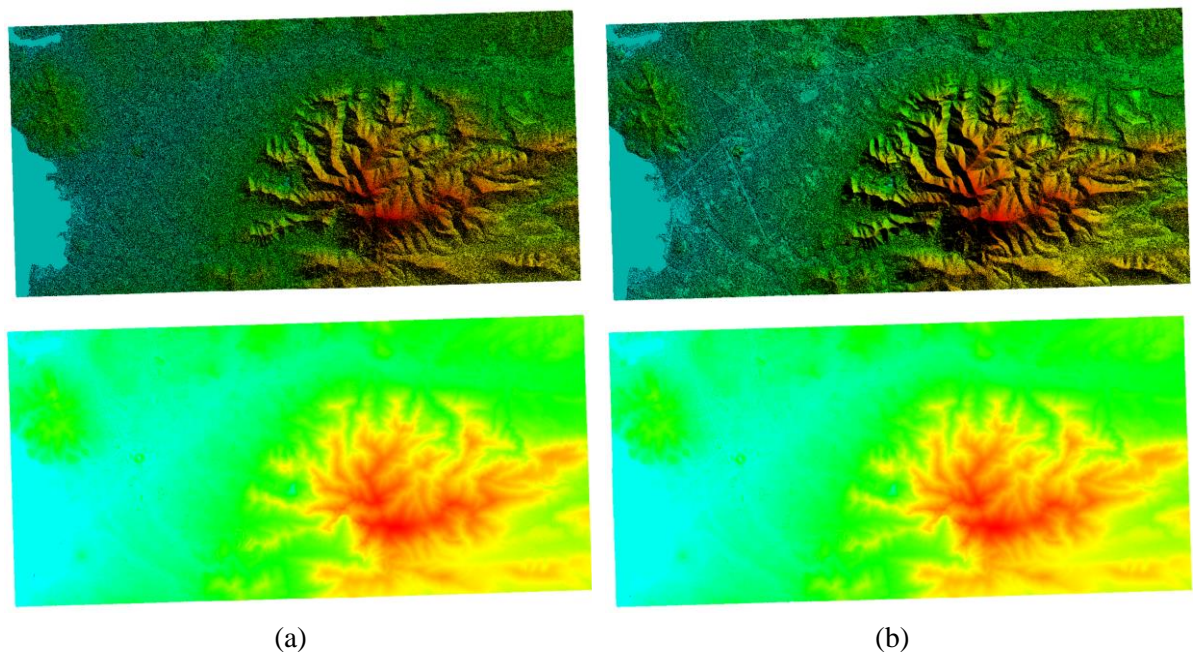
Σχήμα 5.10: Κατανομή των TPs (+) - Pleiades Neo

Οι εικόνες περιέχουν και περιοχές με υδάτινο στοιχείο (αριστερό μέρος των εικόνων), επομένως αναμένεται να υπάρξει μια λανθασμένη εκτίμηση των υψομέτρων σε εκείνη την περιοχή, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.11**. Το υψομετρικό εύρος με τη μέθοδο NCC κυμαίνεται μεταξύ -166 m και 644 m, ενώ με τη μέθοδο SGM από -549 m έως 645 m.



Σχήμα 5.11: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo

Η διόρθωση των περιοχών με τα εσφαλμένα υψόμετρα πραγματοποιείται με το πολύγωνο της ευρωπαϊκής ακτογραμμής, όπου απομονώνεται η περιοχή της θάλασσας και δίνεται μηδενικό υψόμετρο. Όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 5.12** η κατάσταση με τα προβληματικά υψόμετρα έχει εξομαλυνθεί, με τις δυο μεθόδους να έχουν παρεμφερές υψόμετρο εύρος, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ -50 m έως 644 m με την μέθοδο NCC και -52 m έως 643 m για την μέθοδο SGM.



Σχήμα 5.12: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo

5.2.2. Εφαρμογή σε εικόνες της Maxar Technologies

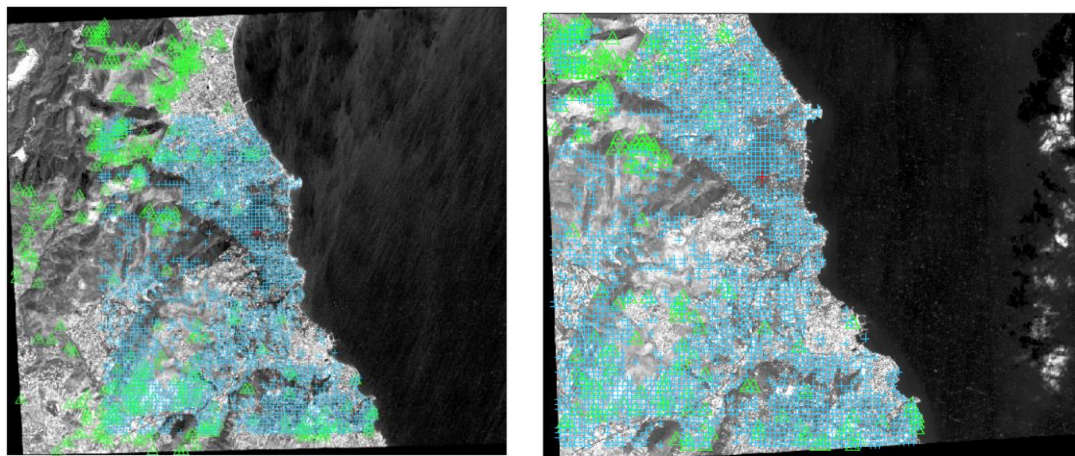
- Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)

Έχοντας τα απαραίτητα υπόβαθρα αναφοράς, πέραν της αναζήτησης σημείων σύνδεσης μεταξύ των εικόνων, πραγματοποιείται και αναζήτηση φωτοσταθερών σημείων. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι χωρικές ακρίβειες και για τις δυο διαδικασίες.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - IKONOS-2

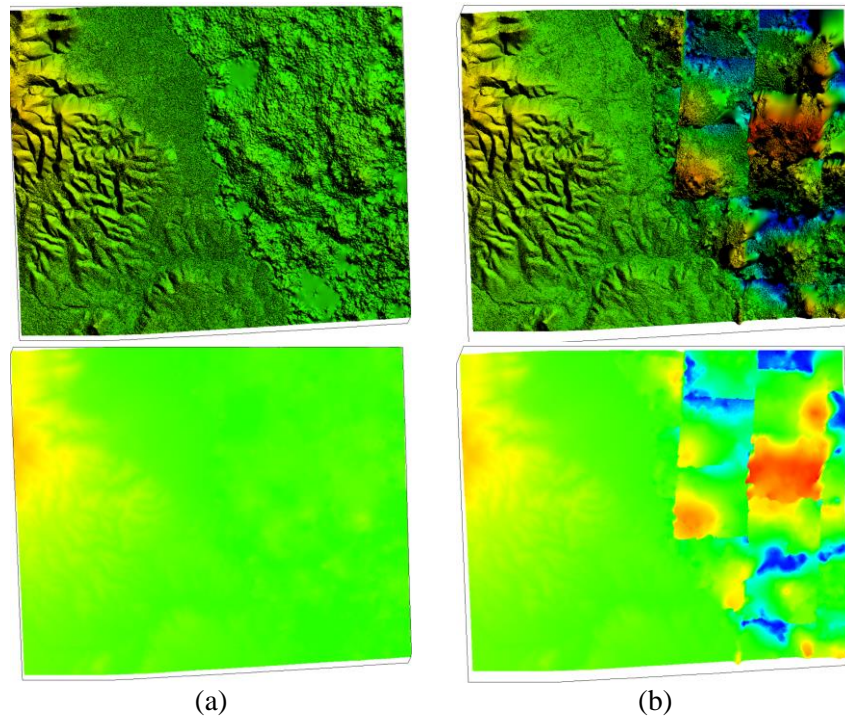
Διαδικασία	Αλγόριθμος	Πλήθος GCPs/TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
GCPs	Stereo Candidates	438	0.235	0.148	1.292	1.32151
	FFTP (SUSAN)	764	0.226	0.070	1.633	1.65005
	FFTP (GRID)	714	0.218	0.071	1.534	1.55104
	NCC (SUSAN)	30	0.255	0.068	3.966	3.97477
	NCC (GRID)	30	0.316	0.094	8.509	8.51538
	FFTB	320	0.104	0.005	0.009	0.10451
TPs	FFTP (SUSAN)	2,289	0.106	0.006	0.009	0.10655
	FFTP (GRID)	2,232	0.104	0.005	0.009	0.10451
	NCC (SUSAN)	237	0.178	0.009	0.015	0.17886
	NCC (GRID)	216	0.189	0.010	0.016	0.18994

Προκύπτει ότι καλύτερο αποτέλεσμα έδωσαν οι μέθοδοι Stereo Candidates για τα GCPs, με 438 σημεία και συνολικό σφάλμα RMS 1.32151 m και FFTP με μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων GRID για τα TPs, με 2,232 σημεία σύνδεσης και συνολικό σφάλμα RMS 0.10451 m. Η κατανομή τους στο στερεοζεύγος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13.



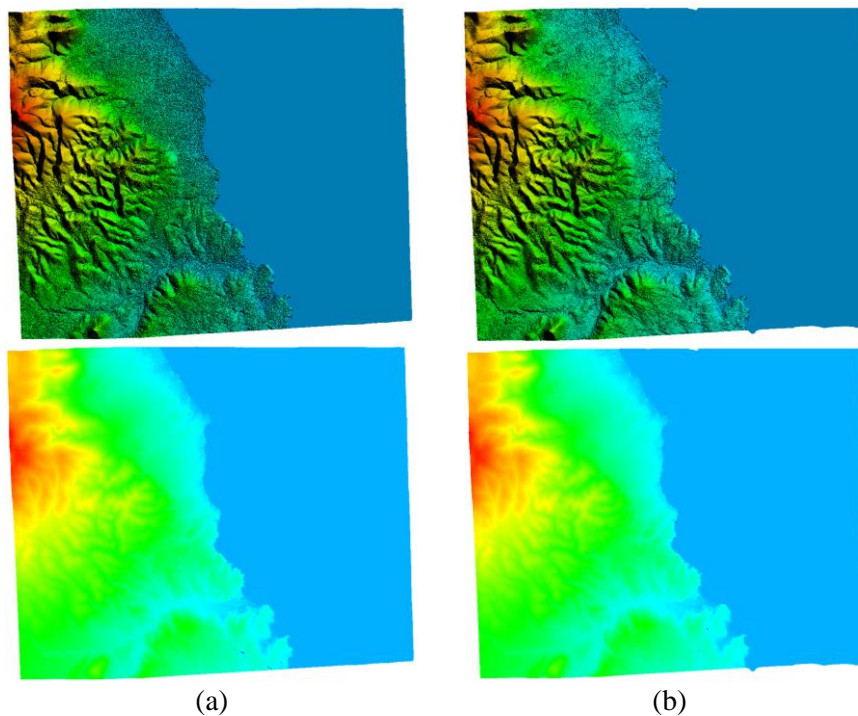
(a) (b)
Σχήμα 5.13: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - IKONOS-2

Τα εσφαλμένα υψόμετρα λόγω της θάλασσας παραμένουν, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, ειδικά με την μέθοδο SGM, όπου εν προκειμένω οι υψομετρικές τιμές είναι ακραίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Το εύρος των υψομέτρων με την μέθοδο NCC είναι μεταξύ -30 m και 748 m, ενώ με τη μέθοδο SGM από -539 m έως 1,591 m.



Σχήμα 5.14: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2

Σε αυτή την περίπτωση η διόρθωση με τη χρήση του πολυγώνου της ελληνικής ακτογραμμής και του ορισμού μηδενικού υψομέτρου στη θαλάσσια περιοχή άλλαξε κατά πολύ το υψομετρικό εύρος, καθώς πλέον τα DSM από τις δυο διαφορετικές μεθόδους σχεδόν ταυτίζονται με την μέθοδο NCC να είναι μεταξύ -29 m και 748 m και τη μέθοδο SGM να κυμαίνεται από -36 m έως 749 m.



Σχήμα 5.15: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2

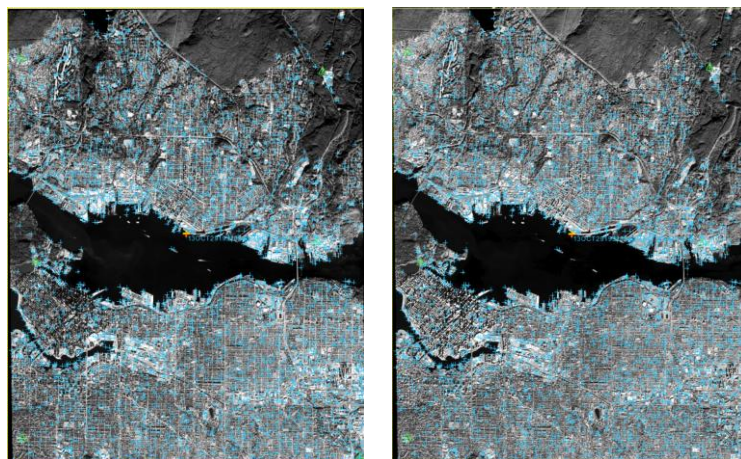
- **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**

Παρόλο που δεν υπάρχει διαθέσιμο υπόβαθρο για την αυτόματη εύρεση φωτοσταθερών σημείων, δίνονται χειροκίνητα οι συντεταγμένες για 6 σημεία για κάθε εικόνα στην περιοχή, ενώ πραγματοποιήθηκε αυτόματη εξαγωγή TP's, οι χωρικές ακρίβειες των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακας 5.5**.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας χειροκίνητων GCPs και αλγορίθμων εξαγωγής TP's - GeoEye-1

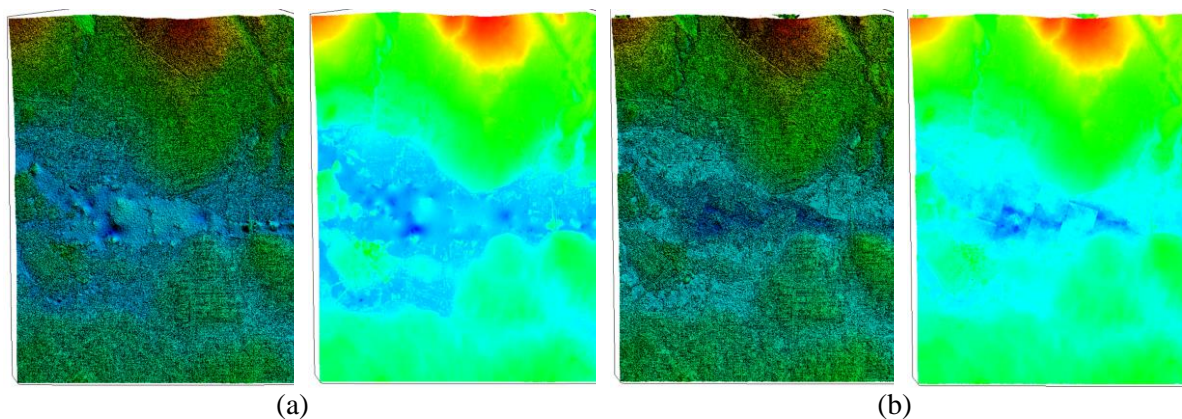
Διαδικασία	Αλγόριθμος	Πλήθος GCPs/TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
GCPs	Manual GCPs	12	0.004	0.005	0.002	0.00671
	FFTB	219	0.077	0.027	0.027	0.08594
TPs	FFTP (SUSAN)	3,064	0.055	0.019	0.019	0.06121
	FFTP (GRID)	1,898	0.057	0.020	0.020	0.06363
	NCC (SUSAN)	2,746	0.092	0.032	0.032	0.10253
	NCC (GRID)	2,408	0.111	0.038	0.038	0.12332

Το συνολικό σφάλμα RMS για τα 6 χειροκίνητα τοποθετημένα GCPs είναι 0.00671 m, ενώ για την αυτόματη εξαγωγή σημείων σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος συνταύτισης FFTP με τη μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων SUSAN, με συνολικά 3,064 σημεία στις εικόνες και συνολικό σφάλμα RMS 0.06121 m, η κατανομή των οποίων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.16**.



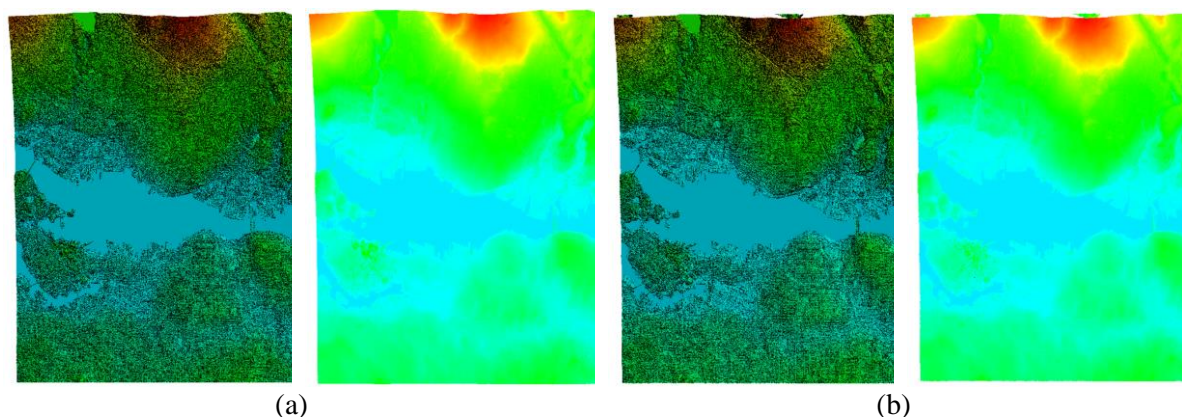
Σχήμα 5.16: Κατανομή των GCPs (Δ) και TP's (+) - GeoEye-1

Η ύπαρξη υδάτινου στοιχείου για ακόμα μια φορά δεν ευνοεί τη σωστή εκτίμηση των υψομέτρων, ενώ παρατηρείται ότι το υψομετρικό εύρος και των δυο μεθόδων προ της διόρθωσης δεν αποκλίνει ιδιαίτερα, με την μέθοδο NCC να έχει υψόμετρα από -42 m έως 852 m και την μέθοδο SGM από -55 m έως 850 m, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.17**.



Σχήμα 5.17: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1

Για τη διόρθωση των υψομέτρων στις περιοχές με νερό χρησιμοποιήθηκαν πολύγωνα τα οποία περιείχαν την ακτογραμμή, λίμνες και ποτάμια της περιοχής (Σχήμα 5.18). Το υψομετρικό εύρος που προκύπτει μετά τις διορθώσεις είναι από -39 m έως 852 m με τη μέθοδο NCC και από -55 m έως 850 m με τη μέθοδο SGM.



Σχήμα 5.18: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1

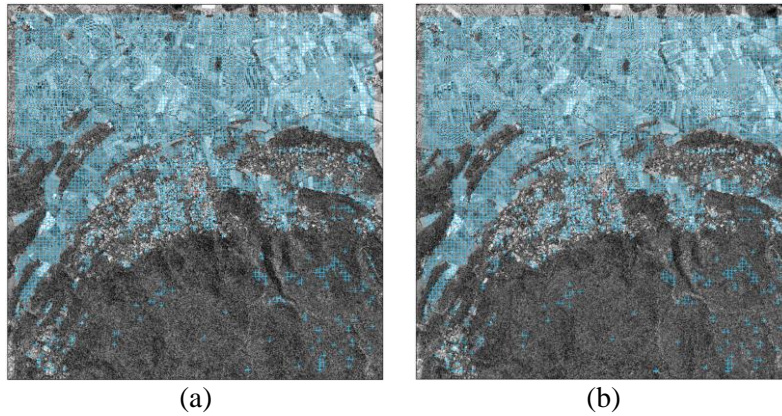
- **Νέουλες, Γαλλία (WorldView-1)**

Πραγματοποιείται απευθείας εύρεση ομολογιών μεταξύ του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων της περιοχής, μιας και δεν υπάρχει διαθέσιμο υπόβαθρο αναφοράς, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακας 5.6.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - WorldView-1

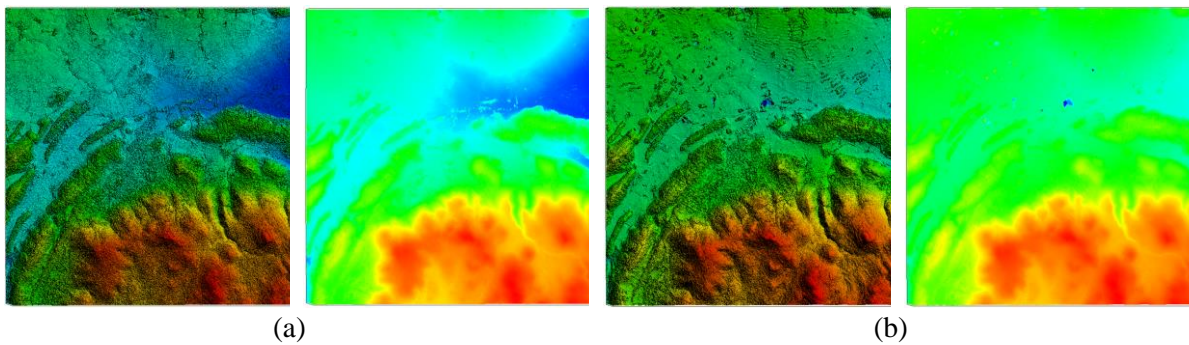
Αλγόριθμος	Πλήθος TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
FFTB	843	0.046	0.011	0.006	0.04768
FFTP (SUSAN)	4,285	0.044	0.010	0.006	0.04552
FFTP (GRID)	4,439	0.043	0.010	0.005	0.04443
NCC (SUSAN)	1,735	0.070	0.016	0.009	0.72367
NCC (GRID)	1,467	0.075	0.017	0.010	0.77549

Ο αλγόριθμος συνταύτισης FFTP με τη μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών GRID, δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα, με 4,439 σημεία και συνολικό σφάλμα RMS 0.04443 m. η κατανομή των σημείων σύνδεσης φαίνεται στο Σχήμα 5.19.



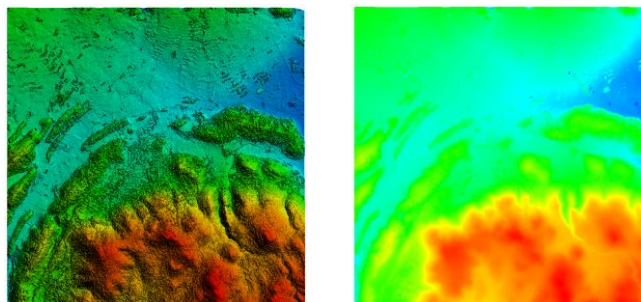
Σχήμα 5.19: Κατανομή των TPs (+) - WorldView-1

Καθώς η περιοχή δεν έχει σημαντικά υδάτινα σώματα, παρά μόνο ένα μικρό μέρος μιας λίμνης στο επάνω κεντρικό μέρος των εικόνων, δεν χρειάζεται ιδιαίτερη παρέμβαση στη διόρθωση των υψομέτρων, έχοντας υψομετρικό εύρος από 307 m έως 582 m για τη μέθοδο NCC και 286 m έως 580 m για τη μέθοδο SGM. Ωστόσο, παρατηρείται ότι με τη μέθοδο SGM έχουν προκύψει πολλές μικρές εξάρσεις και βυθίσεις (artifacts) σε περιοχή όπου πέραν κάποιων φυσικών ή τεχνητών χαρακτηριστικών (δέντρα, κτήρια) είναι κυρίως επίπεδη.



Σχήμα 5.20: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-1

Πραγματοποιώντας τη διόρθωση στις περιοχές με τα μεγαλύτερα προβλήματα στο DSM της μεθόδου SGM (Σχήμα 5.21) παρατηρείται ότι το υψομετρικό εύρος έχει διαμορφωθεί μεταξύ 300 m και 580 m.



Σχήμα 5.21: Διόρθωση DSM της μεθόδου SGM - WorldView-1

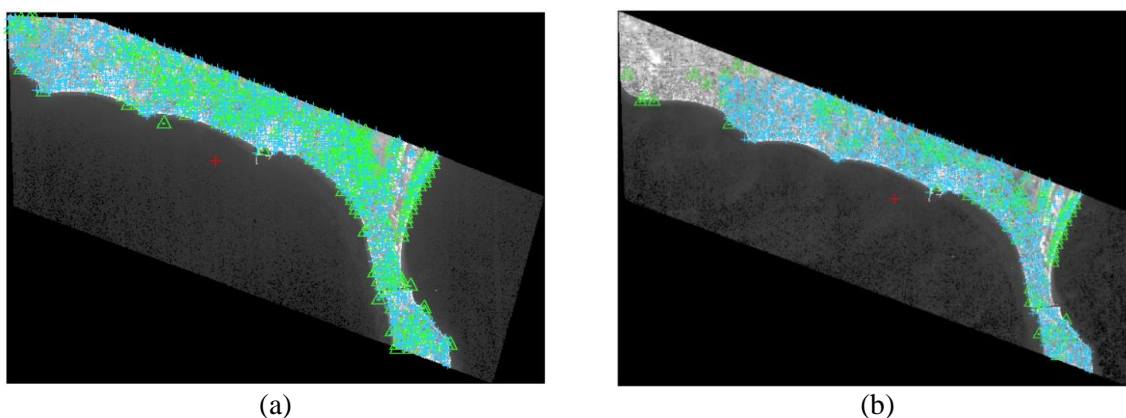
- Δυτική Χαλκιδική (WorldView-2)

Για την αυτόματη εύρεση των φωτοσταθερών σημείων στις εικόνες χρησιμοποιούνται τα διαθέσιμα υπόβαθρα αναφοράς, ενώ πραγματοποιείται επίσης αυτόματη εύρεση σημείων σύνδεσης, με τις χωρικές ακρίβειες των μεθόδων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.7**.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής GCPs και TPs - WorldView-2

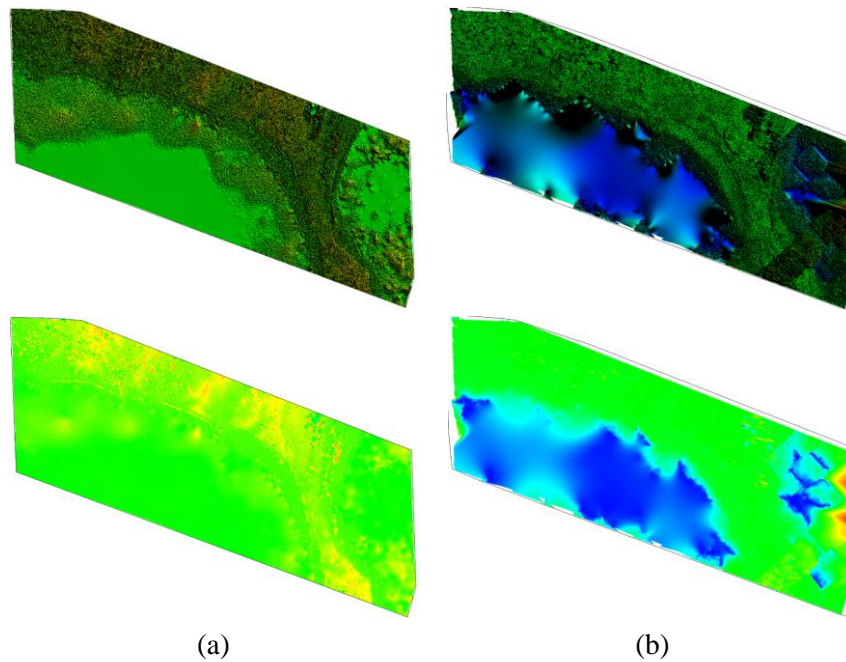
Διαδικασία	Αλγόριθμος	Πλήθος GCPs/TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
GCPs	Stereo Candidates	523	0.113	0.176	1.354	1.37006
	FFTP (SUSAN)	481	0.060	0.126	0.667	0.68144
	FFTP (GRID)	524	0.059	0.122	0.557	0.57325
	NCC (SUSAN)	58	0.084	0.189	1.480	1.49438
	NCC (GRID)	69	0.074	0.151	3.256	3.26034
	FFTB	113	0.042	0.057	0.027	0.07578
TPs	FFTP (SUSAN)	1,038	0.037	0.051	0.025	0.06779
	FFTP (GRID)	833	0.044	0.061	0.029	0.08061
	NCC (SUSAN)	713	0.059	0.081	0.039	0.10753
	NCC (GRID)	362	0.064	0.087	0.042	0.11588

Με τη χρήση του αλγορίθμου FFTP και τη μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών GRID βρέθηκαν 524 σημεία με το συνολικό σφάλμα RMS να είναι 0.57325 m. Πραγματοποιήθηκε επίσης αυτόματη εύρεση TPs, με τον συνδυασμό του αλγορίθμου FFTP και της μεθόδου αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων SUSAN να προκύπτουν 1,038 σημεία με συνολικό σφάλμα RMS 0.06779 m. Η κατανομή τους στο στερεοζεύγος παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.22**.



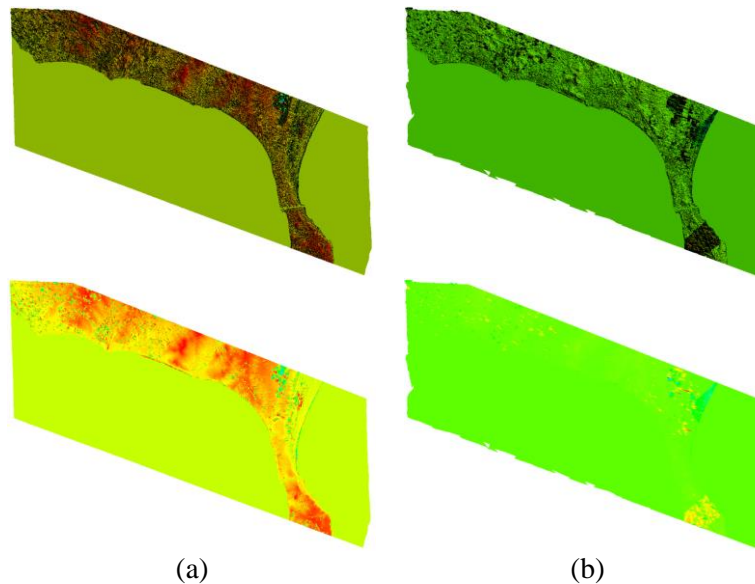
Σχήμα 5.22: Κατανομή των GCPs (Δ) και TPs (+) - WorldView-2

Το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό, ιδιαίτερα με όσα αποτελέσματα έχουν προκύψει από προηγούμενες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, υπήρχαν εξαιρετικά μεγάλες αστοχίες στον προσδιορισμό των υψομέτρων και με τις δυο μεθόδους, καθώς το υψομετρικό εύρος που προέκυψε ήταν από -81 m έως 143 m με τη μέθοδο NCC και -499 m έως 2,354 m με τη μέθοδο SGM (**Σχήμα 5.23**).



Σχήμα 5.23: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2

Η διόρθωση των λανθασμένων εκτιμήσεων των υψομέτρων που επηρεάζονται από τη θάλασσα γίνεται χρησιμοποιώντας πολύγωνο της ελληνικής ακτογραμμής, όπου και επιλύεται το εν λόγω πρόβλημα. Ωστόσο, παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ κακή εκτίμηση των υψομέτρων σε δυο χερσαίες περιοχές, στο επάνω και κάτω δεξιό μέρος του παραγόμενου DSM, ειδικά στην περίπτωση εξαγωγής με τη μέθοδο SGM. Το πρόβλημα αυτό ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν βρέθηκαν επαρκή φωτοσταθερά ή σημεία σύνδεσης στην περιοχή ή στην έλλειψη υφής των εικόνων. Το υψομετρικό εύρος που προέκυψε έπειτα από τη διόρθωση είναι από -40 m έως 58 m με τη μέθοδο NCC και -499 m έως 1,212 m με τη μέθοδο SGM



Σχήμα 5.24: Διόρθωση DSM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2

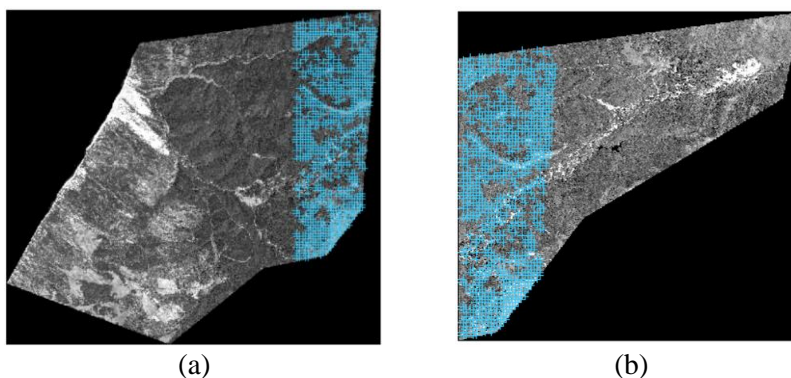
- **Sardinia, Ιταλία (WorldView-3)**

Για το στερεοζεύγος εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 πραγματοποιείται αυτόματη εύρεση ομολογιών στις εικόνες του στερεοζεύγους, με τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.8**.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - WorldView-3

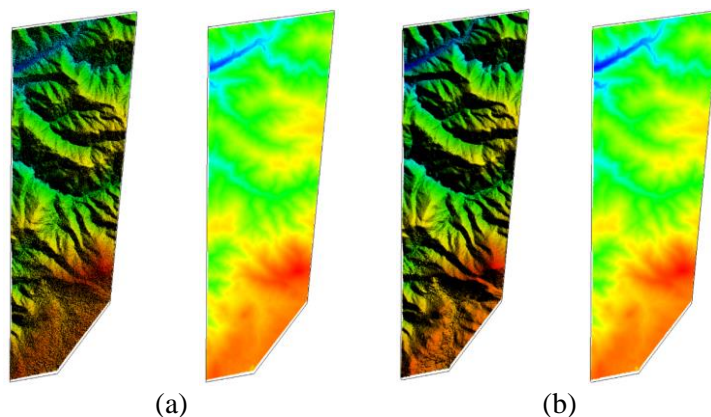
Αλγόριθμος	Πλήθος TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
FFTb	190	0.030	0.015	0.004	0.03378
FFTP (SUSAN)	864	0.027	0.014	0.004	0.03156
FFTP (GRID)	867	0.027	0.014	0.004	0.03068
NCC (SUSAN)	345	0.076	0.038	0.010	0.08556
NCC (GRID)	168	0.084	0.043	0.012	0.09513

Το καλύτερο αποτέλεσμα προέκυψε με τον αλγόριθμο FFTP και τη μέθοδο εύρεσης χαρακτηριστικών GRID, με 867 TPs και συνολικό σφάλμα RMS 0.03068 m, ενώ η κατανομή των σημείων σύνδεσης στις εικόνες του στερεοζεύγους παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.25**.



Σχήμα 5.25: Κατανομή των TPs (+) – WorldView-3

Από τον έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στα παραγόμενα DSM δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αστοχίες ή σφάλματα στα υψόμετρα. Το γεγονός ότι στις εικόνες δεν υπήρχε σχεδόν καθόλου υγρό στοιχείο, παρά μόνο μια περιοχή ενός ταμιευτήρα νερού στο κάτω μέρος της εικόνας δεν επηρέασε ιδιαίτερα το υψομετρικό εύρος, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 49 m και 606 m για την μέθοδο NCC και από 57 m έως 604 m με τη μέθοδο SGM (**Σχήμα 5.26**), ενώ φαίνεται πως δεν χρήζει κάποιας διόρθωσης.



Σχήμα 5.26: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - WorldView-3

5.2.3. Εφαρμογή σε εικόνες της Planet Labs

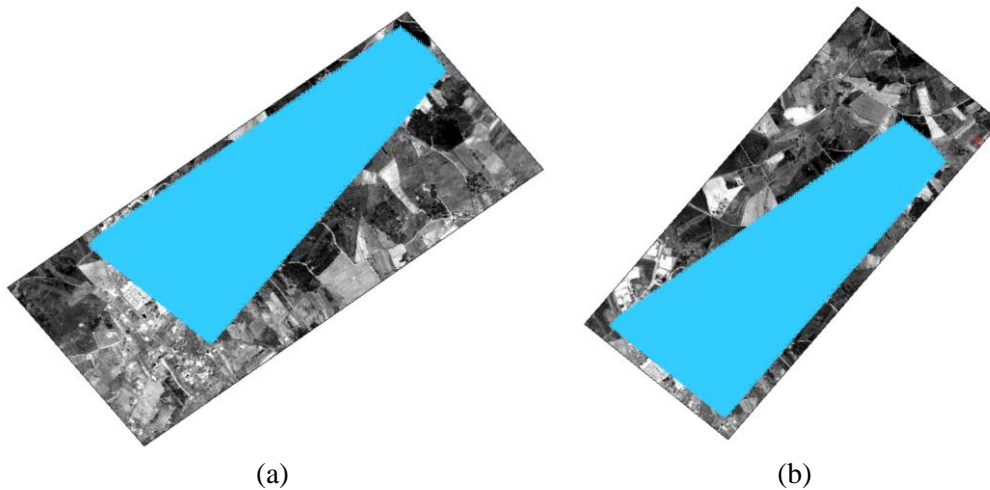
- **Seia, Πορτογαλία (SkySat)**

Το στερεοζεύγος των εικόνων από τους δορυφόρους SkySat δεν έχει υπόβαθρα αναφοράς, επομένως πραγματοποιείται απευθείας αναζήτηση ομολογιών. Τα αποτελέσματα με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.9**.

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα χωρικής ακρίβειας αλγορίθμων εξαγωγής TPs - SkySat SSC3 και SkySat SSC12

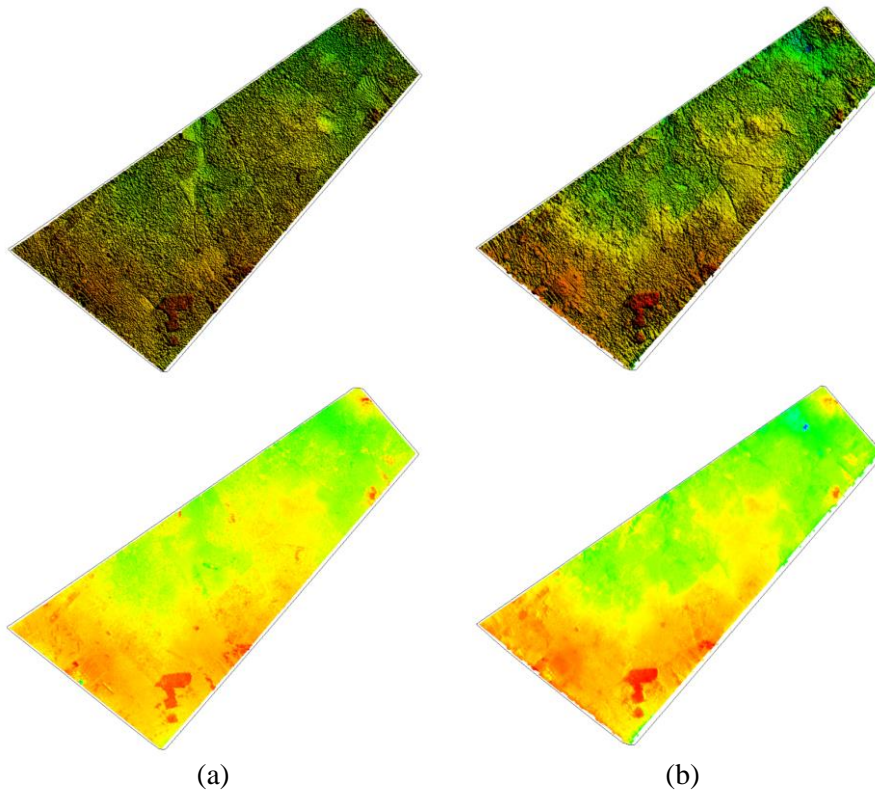
Αλγόριθμος	Πλήθος TPs	X RMS (m)	Y RMS (m)	Z RMS (m)	Συνολικό RMS (m)
FFTb	6,473	0.001	0.117	0.012	0.11762
FFTP (SUSAN)	3,884	0.001	0.055	0.006	0.05533
FFTP (GRID)	13,971	0.001	0.048	0.005	0.04827
NCC (SUSAN)	3,802	0.001	0.114	0.012	0.11463
NCC (GRID)	12,786	0.001	0.114	0.012	0.11463

Η βέλτιστη αναζήτηση ομολογιών έγινε με τον αλγόριθμο FFTP και τη μέθοδο αναζήτησης χαρακτηριστικών σημείων GRID, όπου βρέθηκαν 13,791 TPs, καλύπτοντας σχεδόν ολόκληρη την επικαλυπτόμενη περιοχή του στερεοζεύγους (**Σχήμα 5.27**), με συνολικό σφάλμα RMS 0.04827 m.



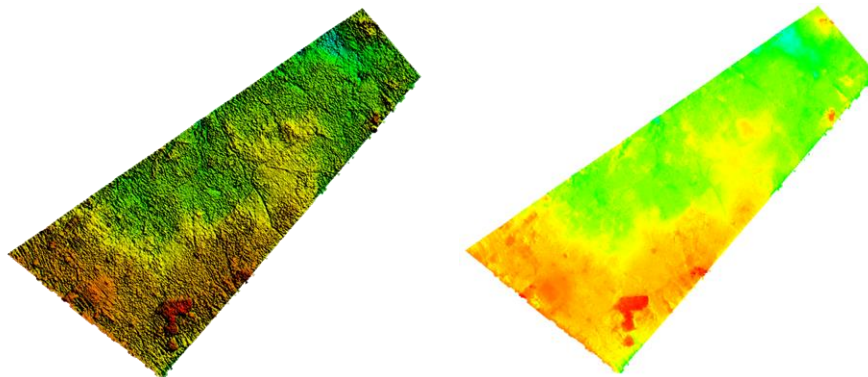
Σχήμα 5.27: Κατανομή των TPs (+) - SkySat

Η περιοχή δεν εμφανίζει καθόλου υδάτινο στοιχείο, επομένως δεν υπάρχουν μεγάλες αστοχίες στους προσδιορισμούς των υψομέτρων. Μοναδική παρέμβαση που θα γίνει είναι στο DSM της μεθόδου SGM, όπου εμφανίζεται μια μικρής κλίμακας βύθιση στο επάνω μέρος της εικόνας (**Σχήμα 5.28**). Το υψομετρικό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 423 m και 473 m με τη μέθοδο NCC και 429 m έως 468 m με τη μέθοδο SGM.



Σχήμα 5.28: Εξαγωγή DSM με την μέθοδο NCC (a) και SGM (b) - SkySat

Διορθώνοντας τη βύθιση στο DSM της μεθόδου SGM, το υψομετρικό εύρος είναι πλέον μεταξύ 431 και 468 m (Σχήμα 5.29).



Σχήμα 5.29: Διόρθωση DSM της μεθόδου SGM - SkySat

5.3. Metashape Professional

Το Metashape Professional της Agisoft είναι ένα λογισμικό το οποίο ειδικεύεται στην φωτογραμμετρική ανακατασκευή μέσω της μεθόδου MVS σε ψηφιακές εικόνες οι οποίες μπορεί να είναι αεροφωτογραφίες από UAV, επίγειες λήψεις, αλλά και δορυφορικές εικόνες.

Η εισαγωγή του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων στο λογισμικό πραγματοποιείται αφού προηγηθεί η διαδικασία της προεπεξεργασίας του μορφότυπου των εικόνων, όπως παρουσιάστηκε στην §5.1.1., έτσι ώστε να είναι πλήρως αναγνωρίσιμες και να μπορεί να αναγνωσθεί το αρχείο με τα RPC.

Για τον προσανατολισμό (alignment) του στερεοζεύγους των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της υψηλότερης ακρίβειας (Highest accuracy) η οποία τετραπλασιάζει το μέγεθος των εικόνων, δίνοντας έτσι πιο ακριβείς εκτιμήσεις θέσεων, ενώ έχει ενεργοποιηθεί η λειτουργία Guided image matching, η οποία ενδείκνυται για δορυφορικές εικόνες και ενισχύει το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων (key points) χωρίς να αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος επεξεργασίας. Ως μέγιστο πλήθος χαρακτηριστικών σημείων έχουν οριστεί 4,000 σημεία ανά MPixel επί της εικόνας και ως μέγιστο πλήθος σημείων σύνδεσης τα 100,000.

Η πύκνωση των σημείων σύνδεσης πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός πυκνού νέφους σημείων, το οποίο έχει ως πηγή τους χάρτες παράλλαξης (Depth maps) που έχουν δημιουργηθεί από την προηγούμενη διαδικασία. Επιλέγεται υψηλή ποιότητα (High quality) για την δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων, καθώς η επιλογή Ultra High είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Δίνεται επίσης η επιλογή για ομαλό φιλτράρισμα του βάθους (depth filtering), ενώ επιλέγεται να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός εμπιστοσύνης (confidence) για το νέφος σημείων.

Για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου επιλέγεται ως πηγή το πυκνό νέφος σημείων (point cloud) που δημιουργήθηκε προηγουμένως, με μέγιστο πλήθος επιφανειών στην επιλογή High (240,000).

Η εξαγωγή του DEM πραγματοποιείται με δεδομένα είτε τα point cloud, είτε το τρισδιάστατο μοντέλο, ορίζοντας το επιθυμητό ΓΣΑ και την χωρική ανάλυση του, η οποία από προεπιλογή είναι ρυθμισμένη να έχει τη μισή χωρική ανάλυση από εκείνη των εικόνων του στερεοζεύγους, δηλαδή εάν το στερεοζεύγος έχει χωρική ανάλυση 0.30 m, τότε το παραγόμενο DEM θα έχει χωρική ανάλυση 0.60 m.

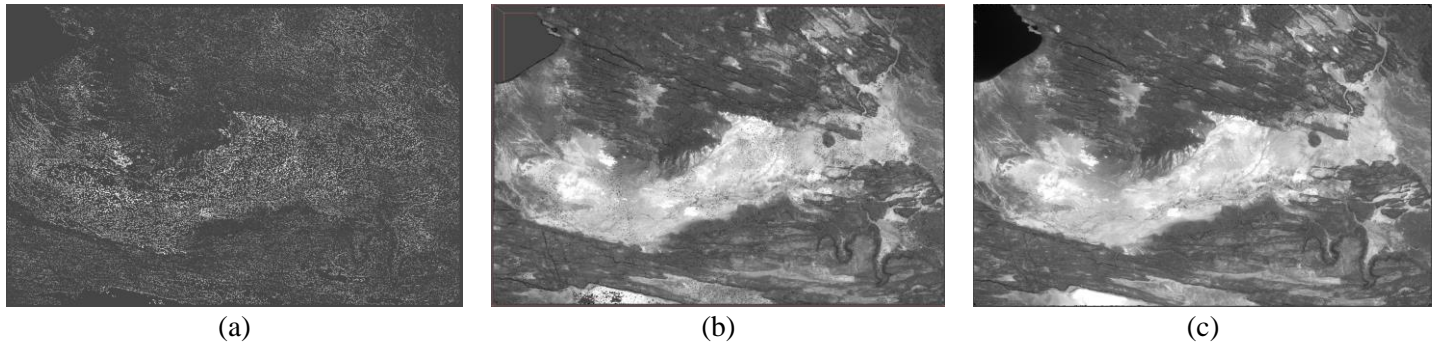
Πίνακας 5.10: Συνοπτικά αποτελέσματα σημείων, επιφανειών και υψομετρικό εύρος από την παραγωγή DEM στο Metashape Professional

Δορυφόρος	Σημεία σύνδεσης (TPs)	Σημεία Point Cloud	Επιφάνειες 3D μοντέλου	Υψομετρικό εύρος με Point Cloud (m)	Υψομετρικό εύρος με 3D μοντέλο (m)
SPOT 6	95,399	257,784,552	11,914,872	194-730	212-725
Pleiades	73,213	153,667,666	7,716,870	-38-753	-64-774
Pleiades Neo	99,784	367,128,967	64,362,232	-30-635	-17-634
IKONOS-2	24,756	18,224,514	1,771,310	-5-741	0-729
GeoEye-1	89,621	192,428,370	24,557,721	-42-829	-92-833
WorldView-1	19,669	29,976,791	2,556,614	341-626	340-625
WorldView-2	72,205	39,673,196	4,694,633	0-157	0-134
WorldView-3	44,348	17,893,912	2,370,178	102-659	104-656
SkySat	3,191	853,927	106,212	483-533	490-528

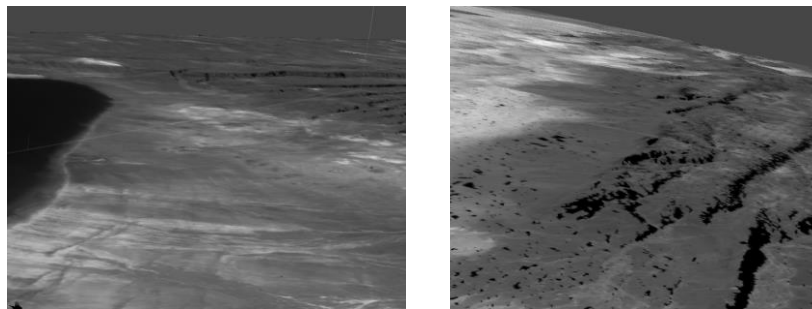
5.3.1. Εφαρμογή σε εικόνες της AIRBUS

- **Kouta Bouyya, Τζιμπουτί (SPOT 6)**

Στο στερεοζεύγος εικόνων από τον SPOT 6, βρέθηκαν μέσω της αραιής συνταύτισης 95,399 σημεία σύνδεσης, όπου προέκυψε νέφος σημείων μέσω πυκνώσης με 257,784,552 σημεία. Από τους χάρτες παράλλαξης που δημιουργήθηκαν παράχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο με 11,914,872 επιφάνειες, όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.30**.

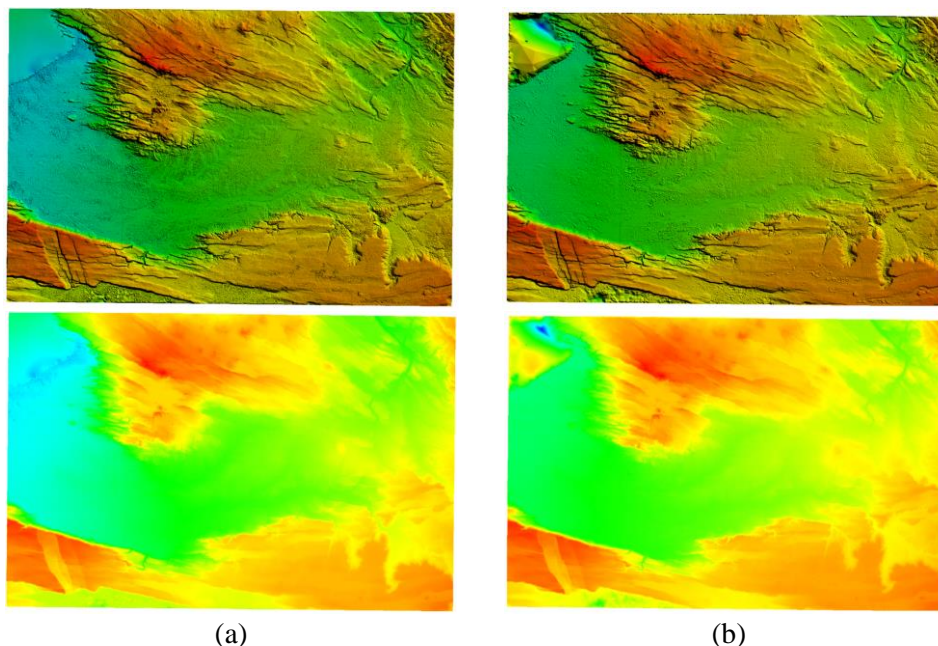


Σχήμα 5.30: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - SPOT 6

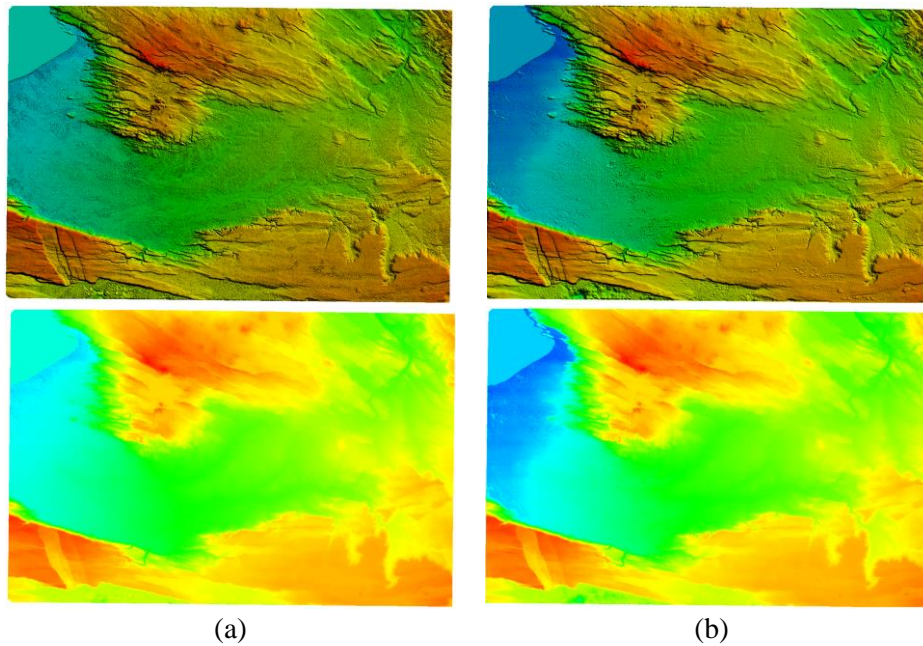


Σχήμα 5.31: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - SPOT 6

Πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις με τη διαγραφή σημείων στην περίπτωση του point cloud και επιφανειών στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου



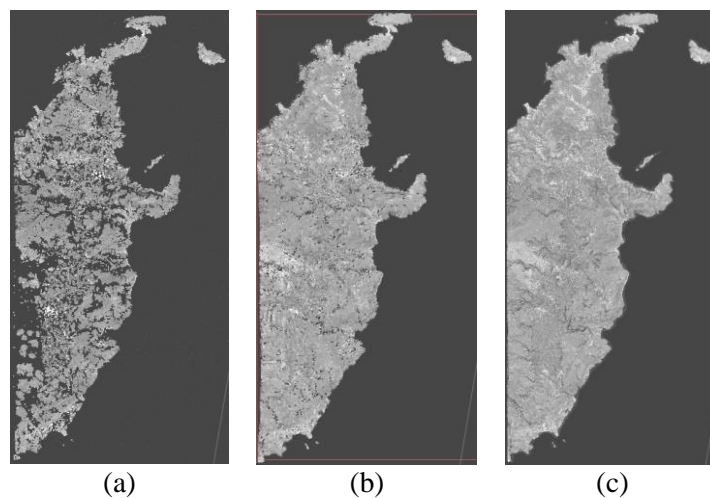
Σχήμα 5.32: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SPOT 6



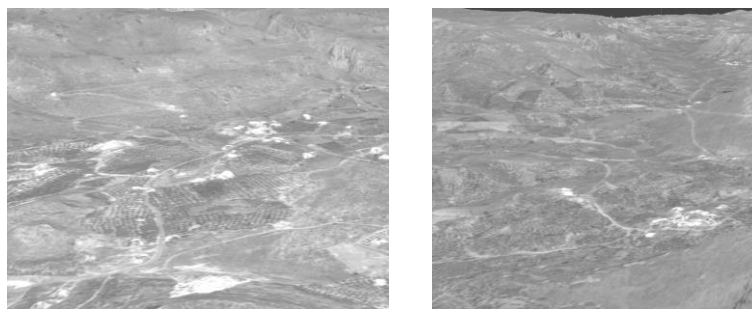
Σχήμα 5.33: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SPOT 6

- **Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)**

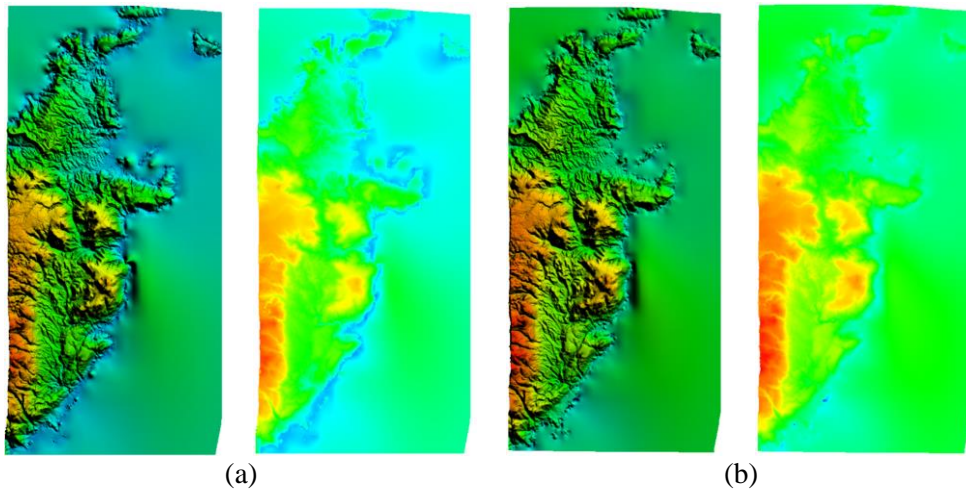
Για το στερεοζεύγος εικόνων των δορυφόρων Pleiades 1A και Pleiades 1B βρέθηκαν 73,213 TPs μέσω αραιής συνταύτισης και μέσω πυκνώσης αυτών προέκυψε ένα πυκνό νέφος 153,667,666 σημείων. Με χρήση των χαρτών παράλλαξης δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο 7,716,780 επιφανειών, όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.34**.



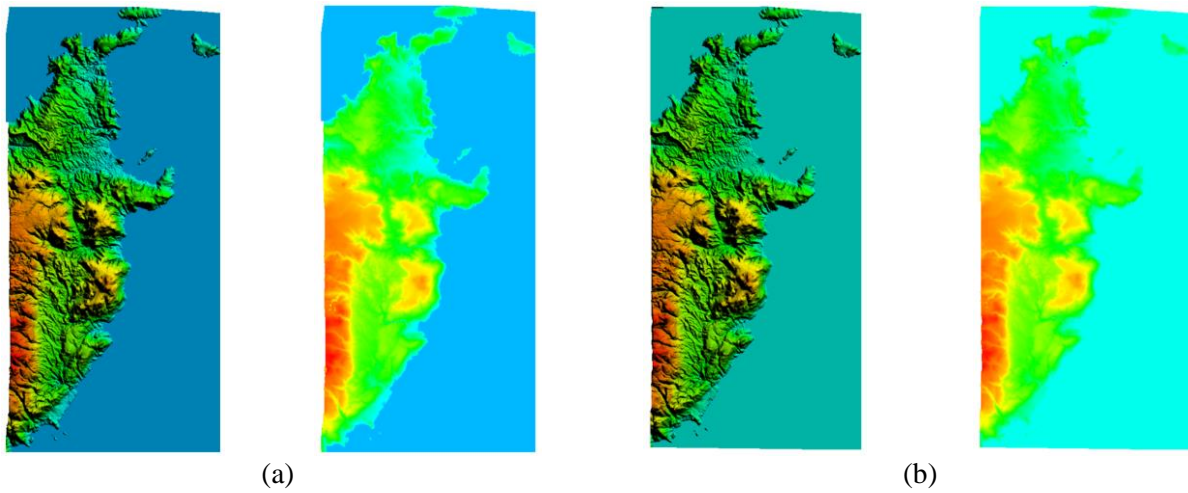
Σχήμα 5.34: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο – Pleiades



Σχήμα 5.35: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - Pleiades



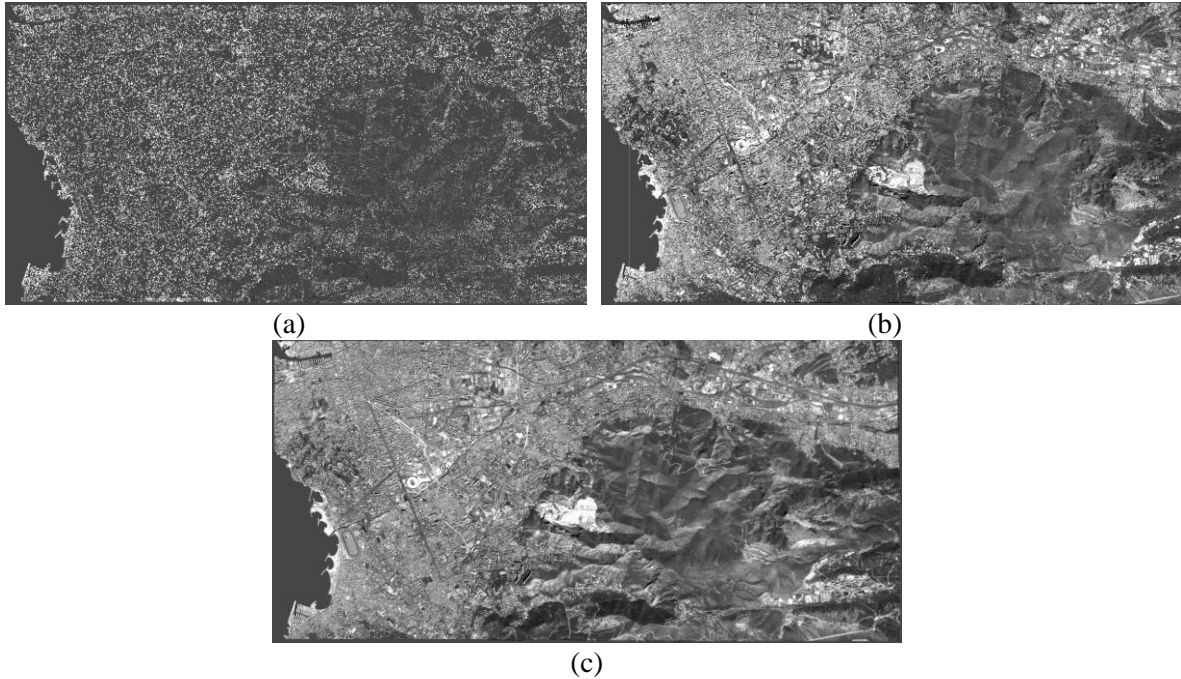
Σχήμα 5.36: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades



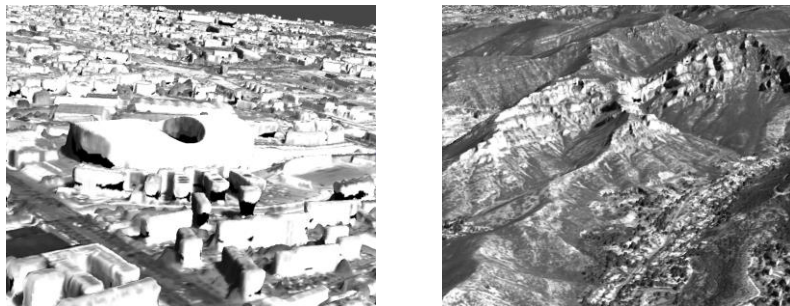
Σχήμα 5.37: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades

- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**

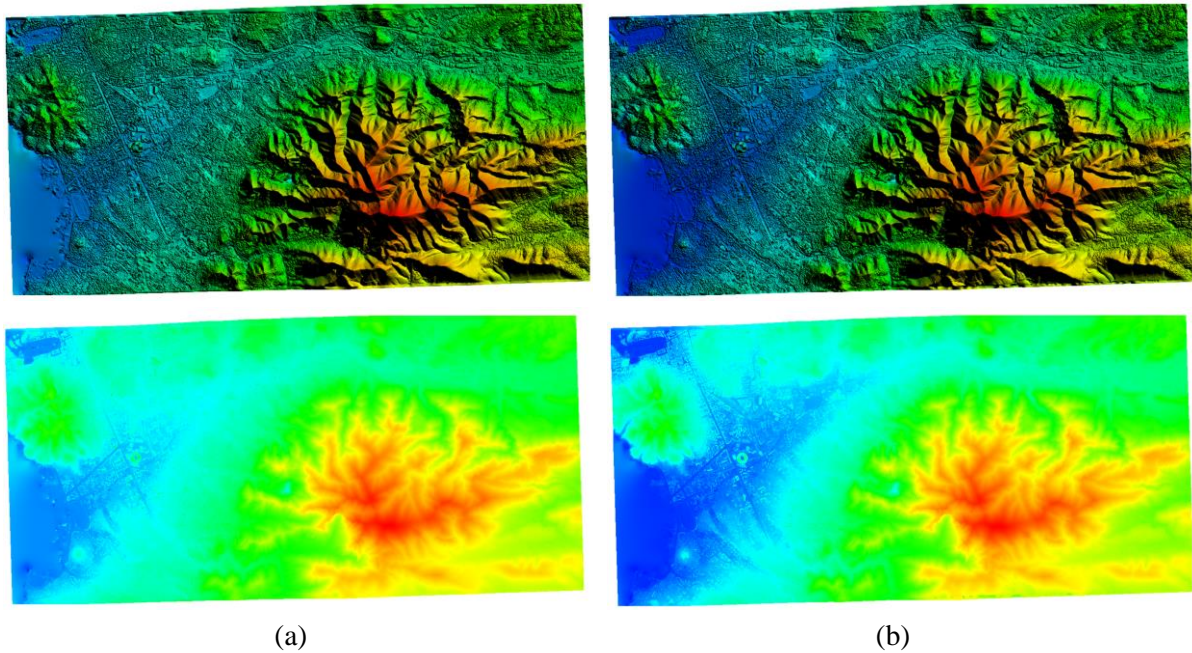
Στο τριπλό στερεοζεύγος των εικόνων του δορυφόρου βρέθηκαν 99,784 σημεία σύνδεσης μέσω αραιής συνταύτισης, ενώ με πύκνωση αυτών το πυκνό νέφος έχει συνολικά 367,128,967 σημεία. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο μέσω των χαρτών παράλλαξης με 64,362,232 επιφάνειες.



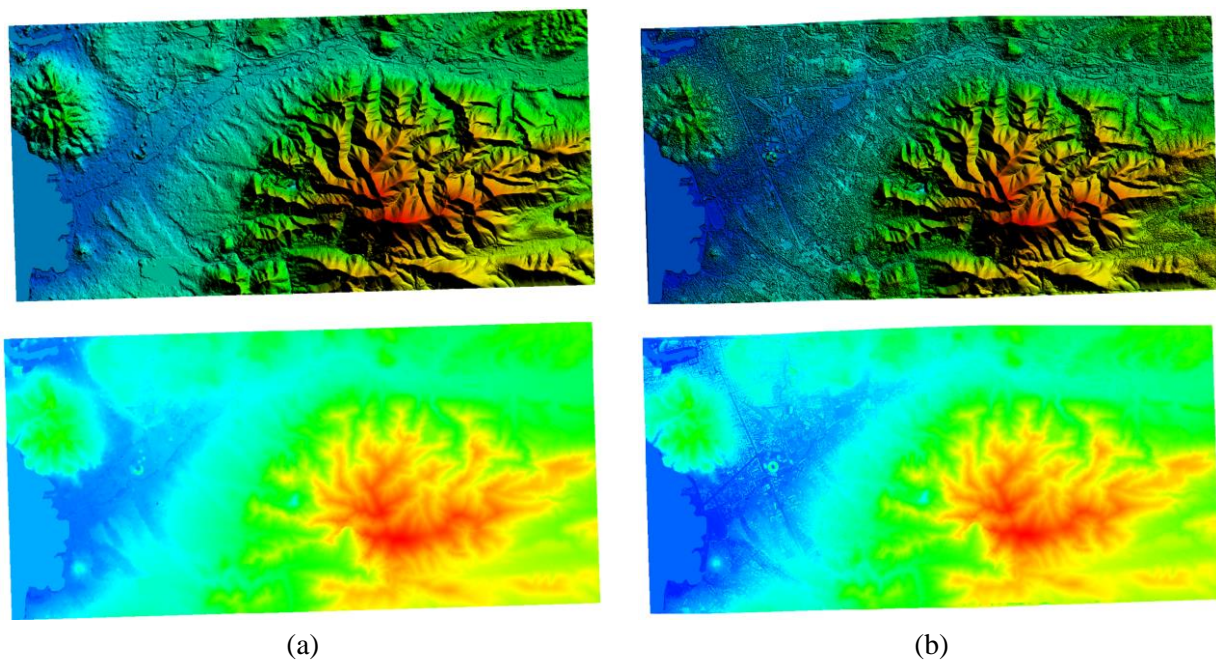
Σχήμα 5.38: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - Pleiades Neo



Σχήμα 5.39: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - Pleiades Neo



Σχήμα 5.40: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades Neo

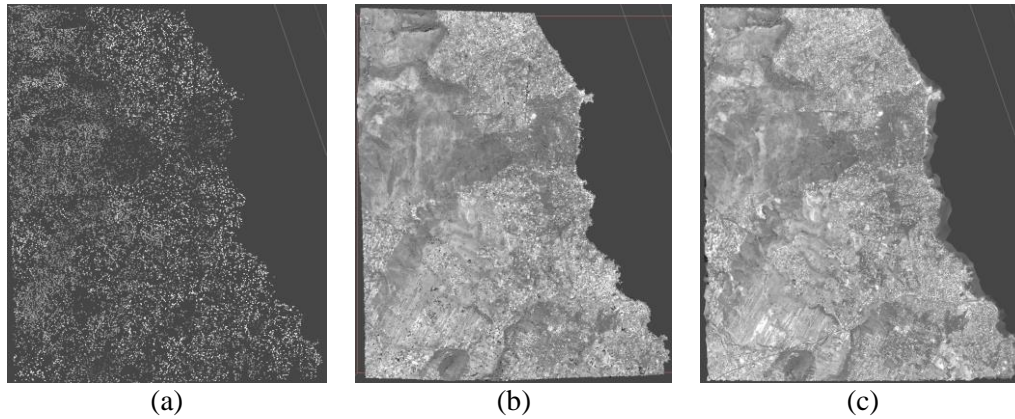


Σχήμα 5.41: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - Pleiades Neo

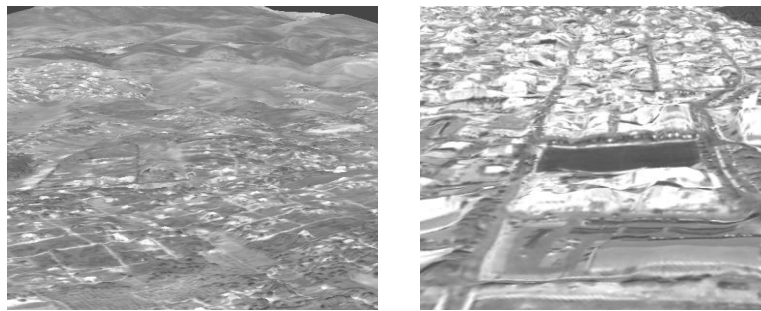
5.3.2. Εφαρμογή σε εικόνες της Maxar Technologies

- Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)

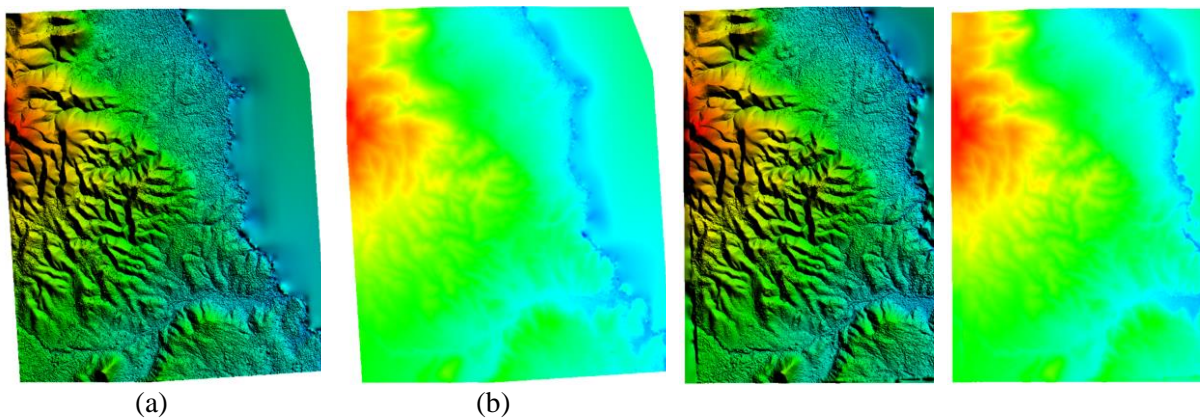
Με αραιή συνταύτιση του στερεοζεύγους των εικόνων του δορυφόρου IKONOS-2 προέκυψαν 24,756 TPs, όπου στη συνέχεια με πυκνή συνταύτιση δημιούργησαν ένα πυκνό νέφος από 18,224,514 σημεία. Το τρισδιάστατο μοντέλο που προέκυψε από τους χάρτες παράλλαξης έχει 1,771,310 επιφάνειες.



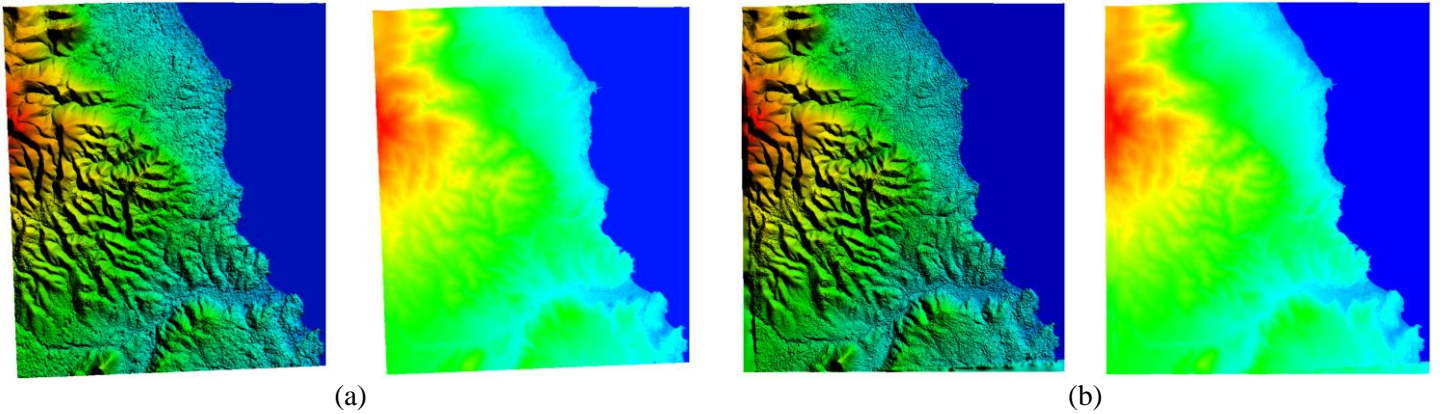
Σχήμα 5.42: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - IKONOS-2



Σχήμα 5.43: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - IKONOS-2



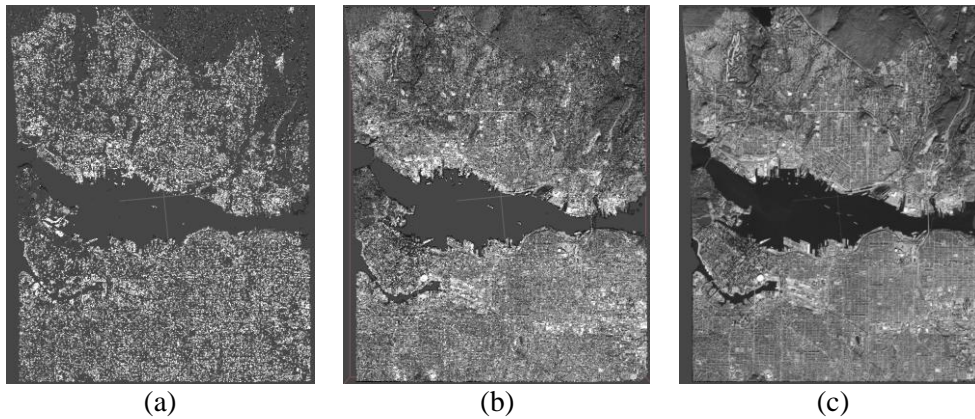
Σχήμα 5.44: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - IKONOS-2



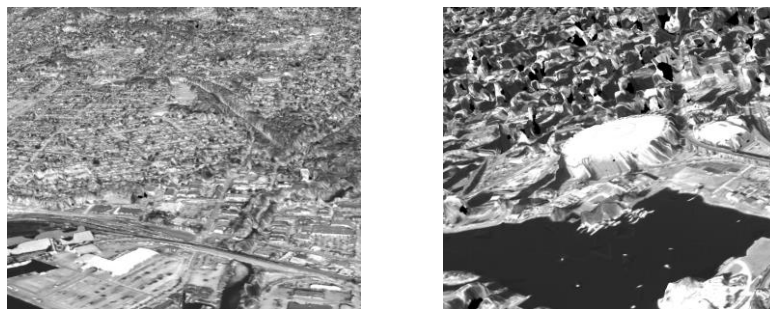
Σχήμα 5.45: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - IKONOS-2

- **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**

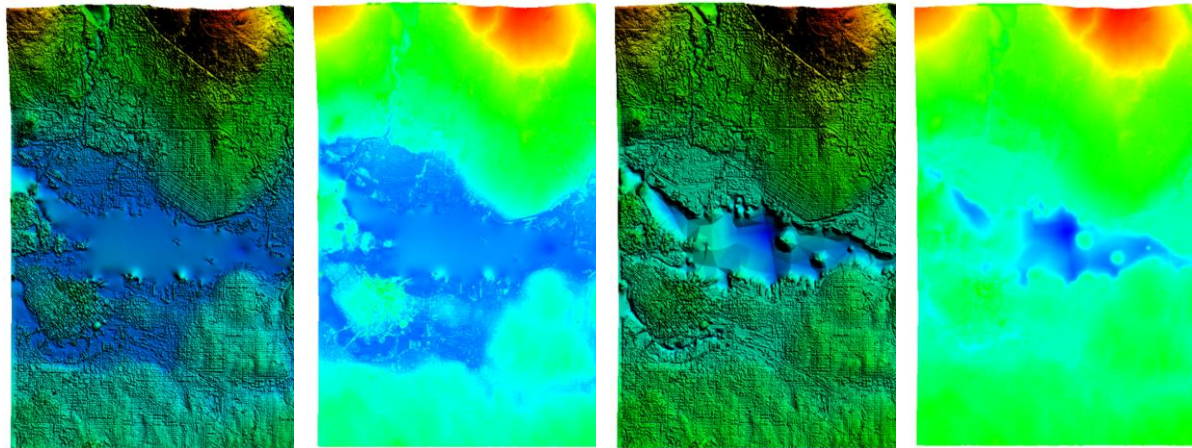
Στο στερεοζεύγος των εικόνων του δορυφόρου GeoEye-1 βρέθηκαν μέσω αραιής συνταύτισης 89,621 σημεία σύνδεσης, 192,428,370 σημεία μέσω πύκνωσης, ενώ με τους χάρτες παράλλαξης δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο με 24,557,721 επιφάνειες.



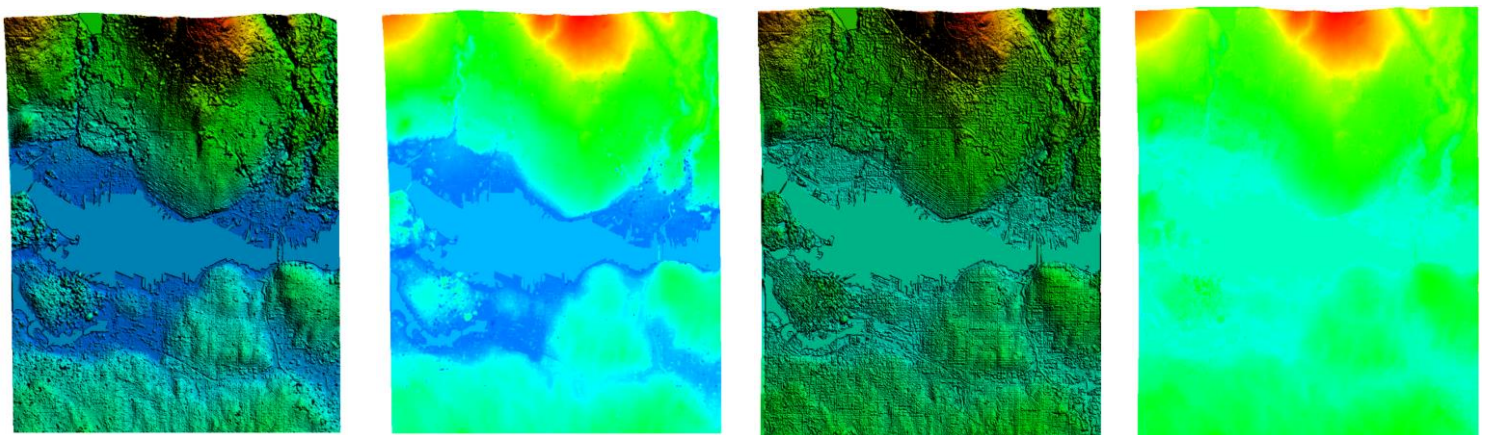
Σχήμα 5.46: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - GeoEye-1



Σχήμα 5.47: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - GeoEye-1



(a) (b)
Σχήμα 5.48: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - GeoEye-1



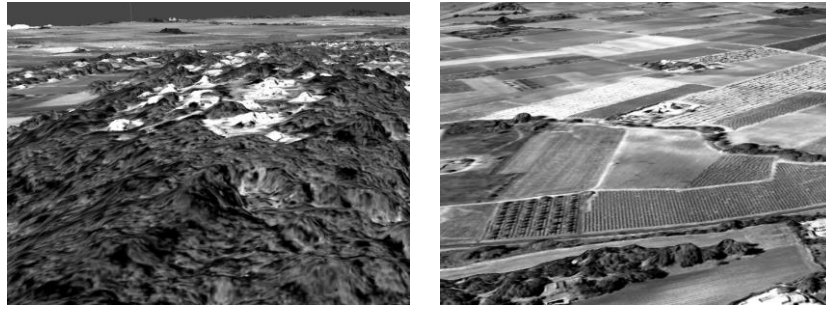
(a) (b)
Σχήμα 5.49: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - GeoEye-1

- **Νέoules, Γαλλία (WorldView-1)**

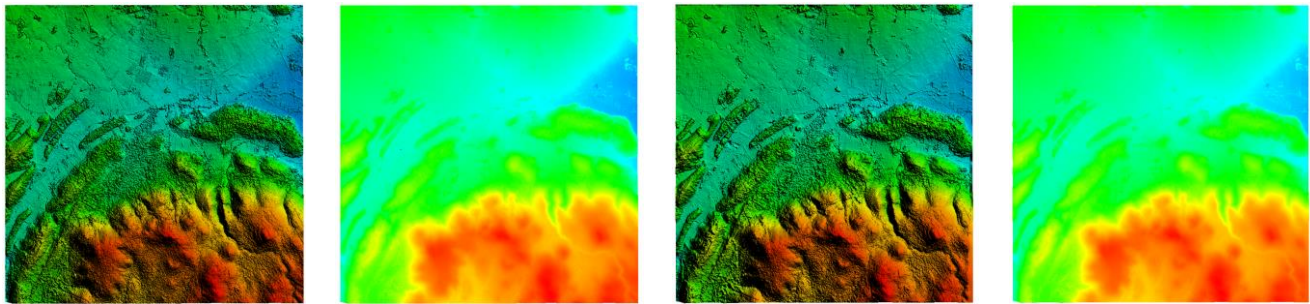
Στις εικόνες του δορυφόρου WorldView-1 βρέθηκαν μέσω αραιής συνταύτισης 19,669 TPs, τα οποία με πυκνή συνταύτιση έφτασαν τα 29,976,791 σημεία, ενώ δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο με 2,556,614 επιφάνειες από τους χάρτες παράλλαξης.



(a) (b) (c)
Σχήμα 5.50: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-1



Σχήμα 5.51: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-1



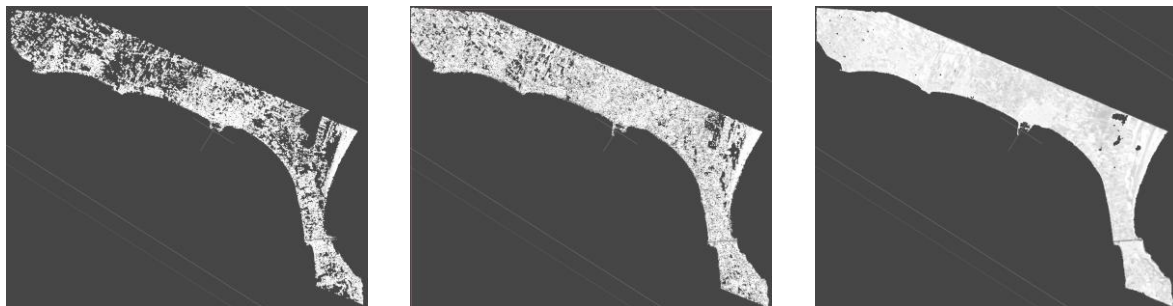
(a)

(b)

Σχήμα 5.52: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-1

- **Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)**

Μέσω αραιής συνταύτισης των εικόνων του δορυφόρου WorldView-2 βρέθηκαν 72,205 TPs, όπου με πυκνή συνταύτιση έφτασαν τα 39,673,196 σημεία, ενώ το τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω των χαρτών παράλλαξης έχει 4,694,633 επιφάνειες.



(a)

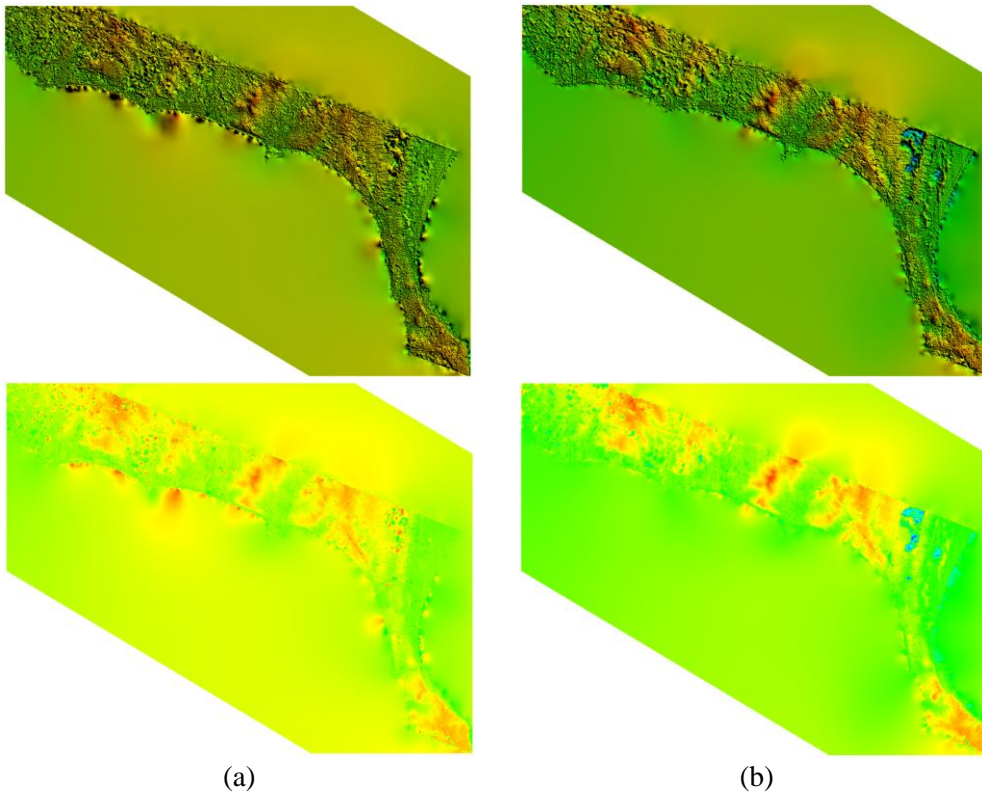
(b)

(c)

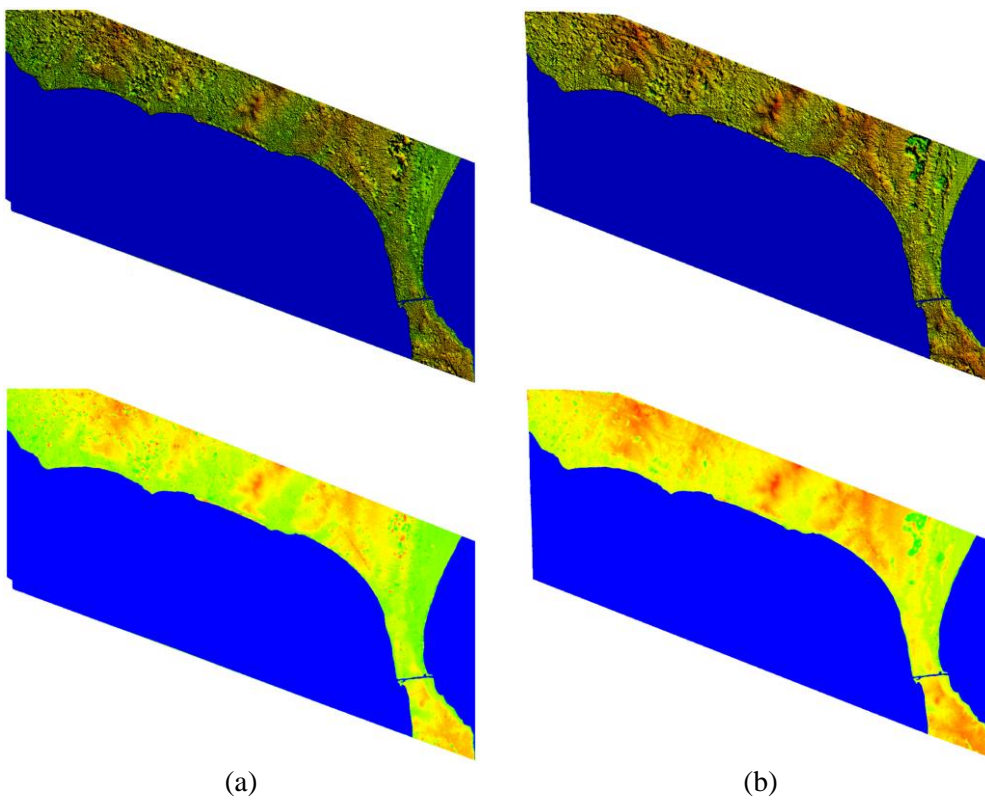
Σχήμα 5.53: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-2



Σχήμα 5.54: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-2



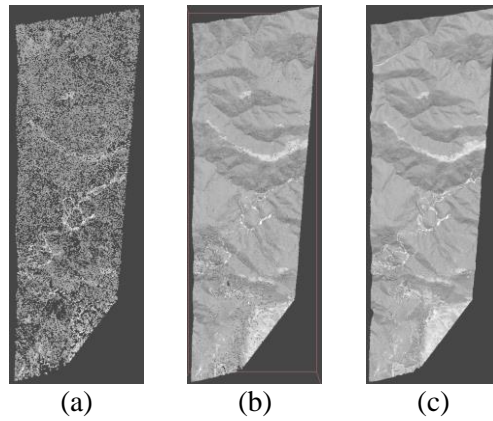
Σχήμα 5.55: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-2



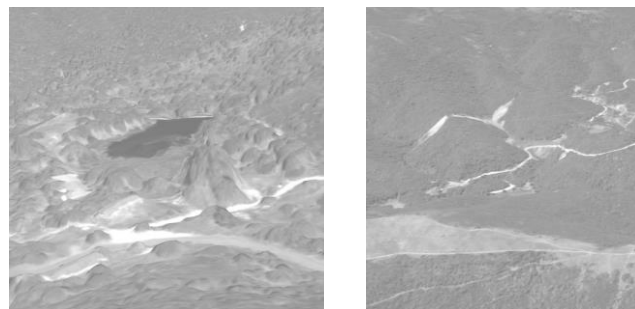
Σχήμα 5.56: Διόρθωση DSM των μεθόδων Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-2

- **Sardinia, Ιταλία (WorldView-3)**

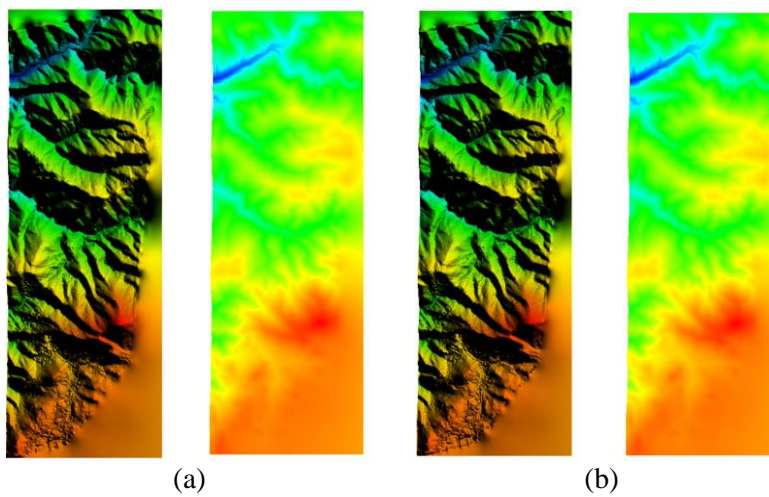
Στο στερεοζεύγος των εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 βρέθηκαν μέσω αραιής συνταύτισης 44,348 σημεία, 17,893,912 σημεία με πυκνή συνταύτιση και 2,370,178 επιφάνειες του τρισδιάστατου μοντέλου από τους χάρτες παράλλαξης.



Σχήμα 5.57: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - WorldView-3



Σχήμα 5.58: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - WorldView-3

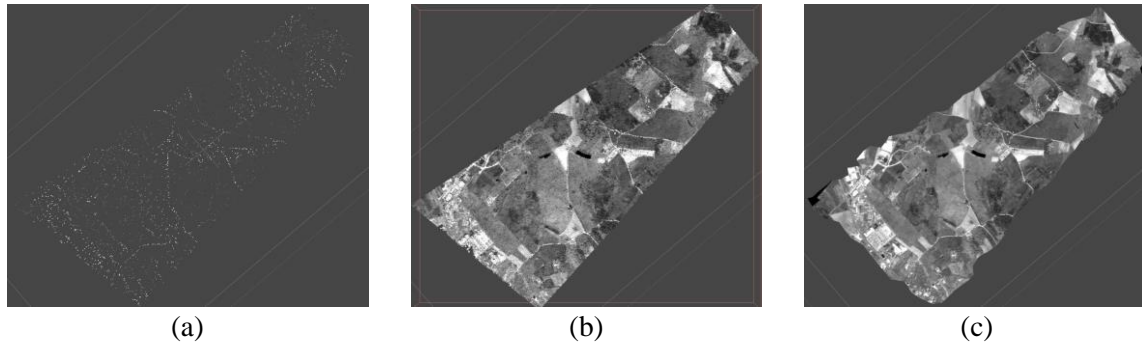


Σχήμα 5.59: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - WorldView-3

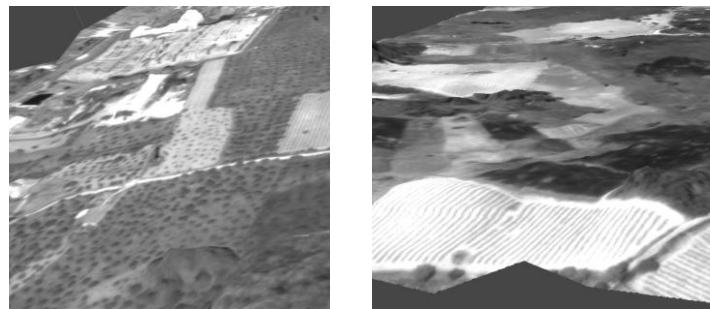
5.3.3. Εφαρμογή σε εικόνες της Planet Labs

- Seia, Πορτογαλία (SkySat)

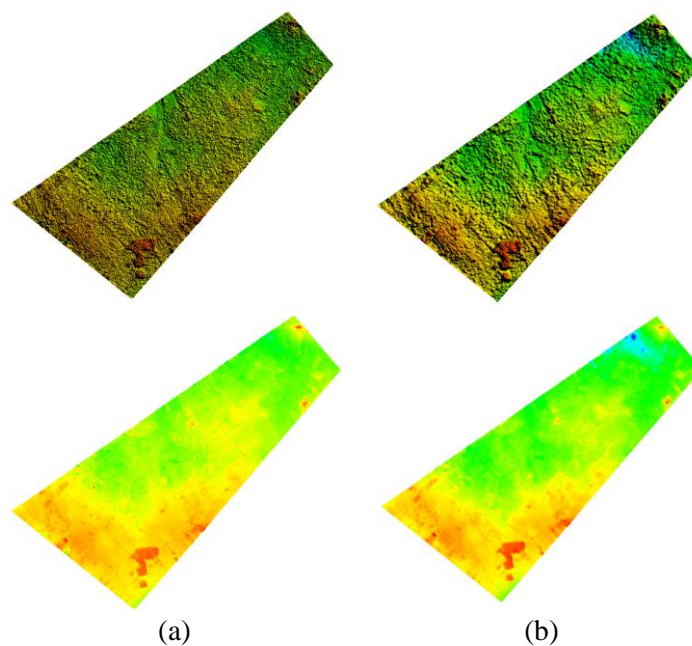
Τέλος, στις εικόνες των δορυφόρων SkySat SSC3 και SkySat SSC12 βρέθηκαν μέσω αραιής συνταύτισης 3,191 σημεία σύνδεσης, τα οποία έφτασαν τα 853,927 μέσω πύκνωσης και το τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε από τους χάρτες παράλλαξης έχει 106,212 επιφάνειες.



Σχήμα 5.60: TPs (a), Point Cloud (b) και 3D μοντέλο - SkySat



Σχήμα 5.61: Προοπτική προβολή 3D μοντέλου - SkySat



Σχήμα 5.62: Εξαγωγή DSM με Point Cloud (a) και 3D μοντέλο (b) - SkySat SSC3 και SkySat SSC12

5.4. Μετατροπή DSM σε DTM

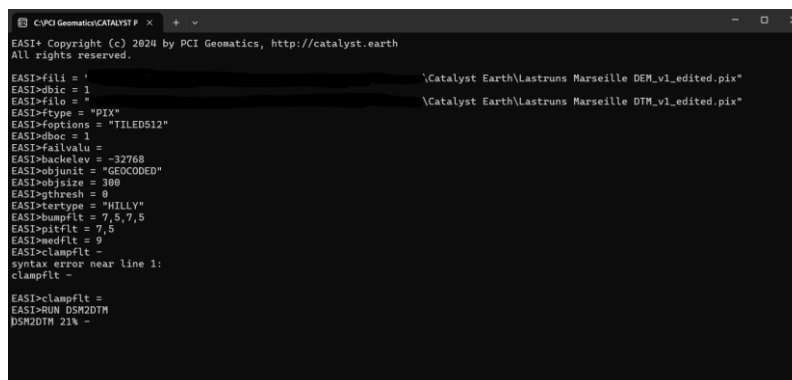
Το DSM που παράχθηκε από τα λογισμικά είναι χρήσιμο για πολλές εφαρμογές (τρισιδιάστατα μοντέλα πόλεων, true ortho κ.α.), ωστόσο μια αναπαράσταση του καθαρού εδάφους (DTM) χρησιμεύει σε περισσότερες εφαρμογές.

Η διαδικασία στο Metashape Professional γίνεται μέσω αυτόματης ταξινόμησης των point cloud, ενώ στο Catalyst Earth μέσω του εργαλείου DSM2DTM. Σημειώνεται πως λόγω του ότι η μετατροπή και στα δυο λογισμικά μεταβάλλει το μηδενικό ή σταθερό υψόμετρο που έχει οριστεί σε περιοχές με θάλασσα ή λίμνες, πραγματοποιείται εκ νέου διόρθωση αυτών των περιοχών.

Σημειώνεται πως το DSM από τα στερεοζεύγη εικόνων των δορυφόρων SPOT 6 και WorldView-3 δεν συμμετείχαν στις μετατροπές, καθώς η περιοχή που απεικονίζονται έχουν ελάχιστα έως καθόλου φυσικά ή τεχνητά αντικείμενα που εξέχουν του εδάφους.

5.4.1. Catalyst Earth Professional DSM2DTM

Η διαδικασία μετατροπής του DSM σε DTM στο Catalyst Earth πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού EASI και του εργαλείου DSM2DTM. Το εργαλείο αυτό υλοποιείται μέσω του κεντρικού command line των Windows και δίνει τη δυνατότητα να οριστούν συγκεκριμένες παράμετροι σχετικά με την μετατροπή του DSM σε DTM, χωρίς δυστυχώς να υπάρχει άμεση οπτική αλληλεπίδραση για την επεξεργασία που πραγματοποιείται. Η μετατροπή πραγματοποιείται με την εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης της επιφάνειας.



```

C:\PCI Geomatics\CATALYST P > EASI+ Copyright (c) 2024 by PCI Geomatics, http://catalyst.earth
All rights reserved.

EASI+fil1 = '          \Catalyst Earth\Lastruns Marseille DEM_v1_edited.pix'
EASI+dbic = 1
EASI+filo = '          \Catalyst Earth\Lastruns Marseille DTM_v1_edited.pix'
EASI+ftype = "PIXY"
EASI+options = "TILED512"
EASI+dboc = 1
EASI+failvalu =
EASI+backlev = -32768
EASI+objunit = "GEOCODED"
EASI+objsize = 300
EASI+gthresh = 0
EASI+tertype = "HILLY"
EASI+bumpflt = 7,5,7,5
EASI+pitflt = 7,5
EASI+medflt = 9
EASI+clampflt -
syntax error near line 1:
clampflt -

EASI+clampflt =
EASI-RUN DSM2DTM
DSM2DTM 21% -
  
```

Σχήμα 5.63: Διαδικασία μετατροπής DSM σε DTM στο πρόγραμμα DSM2DTM - Catalyst Earth Professional

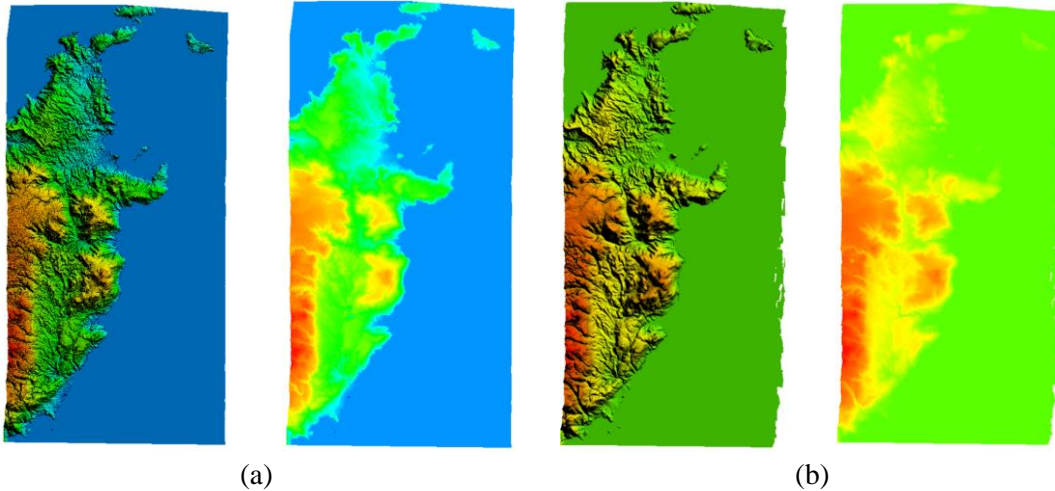
Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες παράμετροι που ορίζονται για την μετατροπή του DSM σε DTM στο εργαλείο DSM2DTM.

- **OBJUNIT:** Η παράμετρος αυτή αφορά τη διάμετρο (σε m) των φυσικών ή τεχνητών αντικειμένων που θα αφαιρεθούν (κτήρια, δέντρα κ.α.)
- **GTHRESH:** Ορισμός κλίσης της επιφάνειας για την οποία τα pixels κάτω από την τιμή αυτή θα θεωρούνται ως φυσικό έδαφος και δεν θα αφαιρούνται. Όσο μικρότερη η τιμή τόσο ενδέχεται να γίνει αφαίρεση φυσικών επιφανειών, ενώ μεγαλύτερη τιμή αφαιρεί κτήρια με όχι καλά ορισμένες ακμές
- **TERTYPE:** Ορισμός τοπογραφίας της περιοχής (επίπεδη, λοφώδης, ορεινή)
- **BUMPFLT:** Εφαρμογή φίλτρου αφαίρεσης εξάρσεων (bumps)
- **PITFLT:** Εφαρμογή φίλτρου αφαίρεσης βυθίσεων (pits)
- **MEDFLT:** Εφαρμογή κανονικού και υβριδικού φίλτρου μεσαίας τιμής. Το κανονικό φίλτρο μεσαίας τιμής εφαρμόζεται με αρνητικές τιμές, ενώ το υβριδικό με θετικές τιμές.

- **CLAMPFLT**: Εφαρμογή του φίλτρου clamp, το οποίο αποτελεί μια παραλλαγή του φίλτρου μέσου όρου. Ορίζεται ένα συγκεκριμένο ποσοστό επί του μεγέθους του pixel στο οποίο κάθε pixel δεν θα μπορεί να μεταβληθεί πέραν αυτού του ποσοστού.

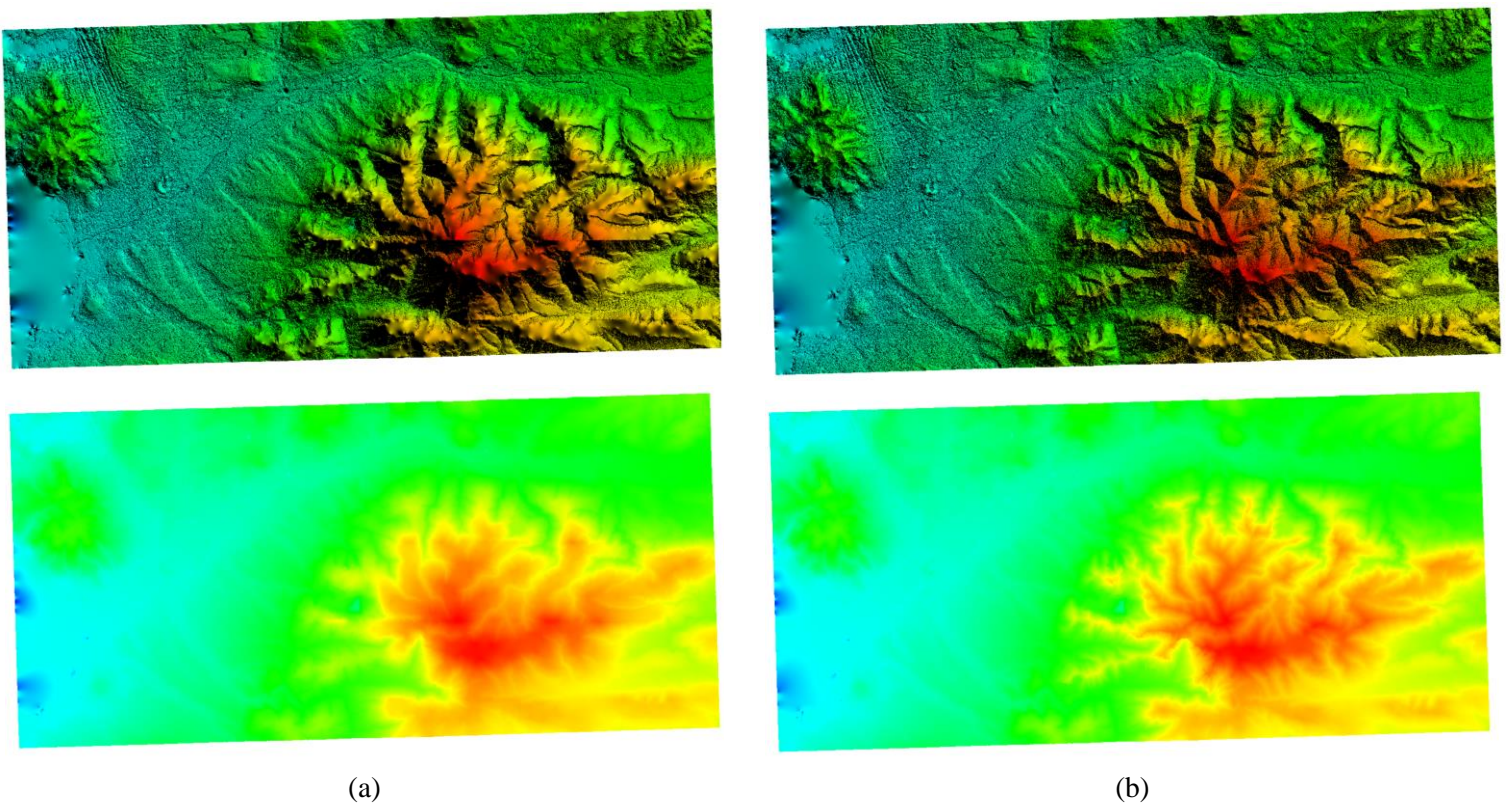
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μετατροπή των DSM σε DTM από το εργαλείο DSM2DTM του Catalyst Earth.

- **Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)**



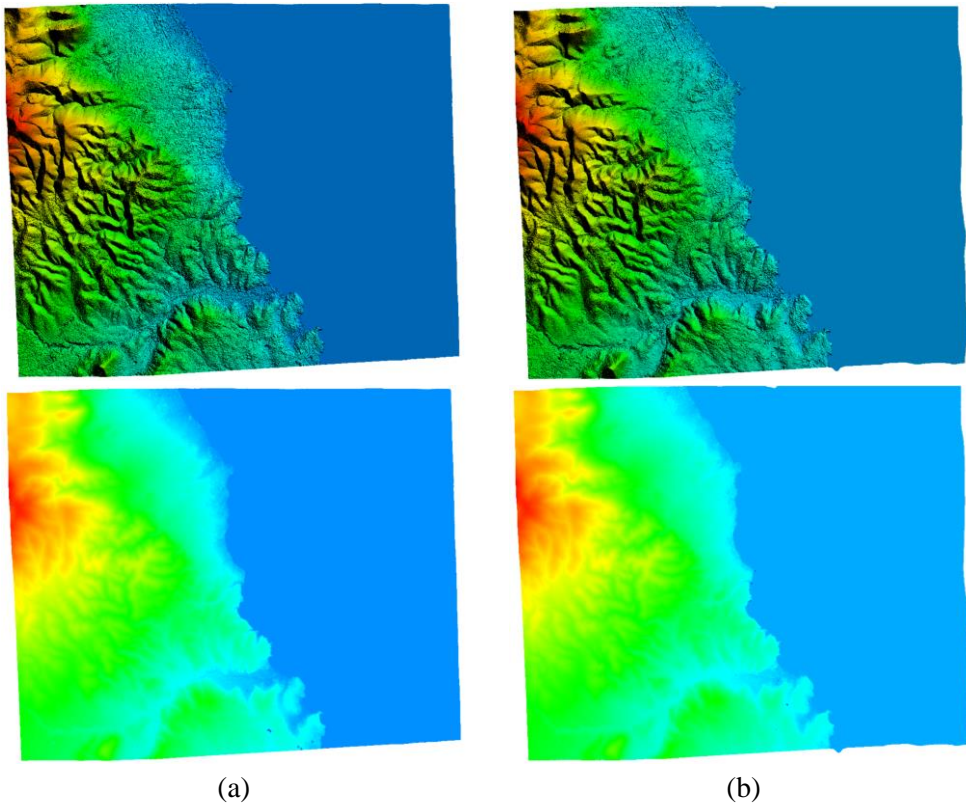
Σχήμα 5.64: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades

- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**



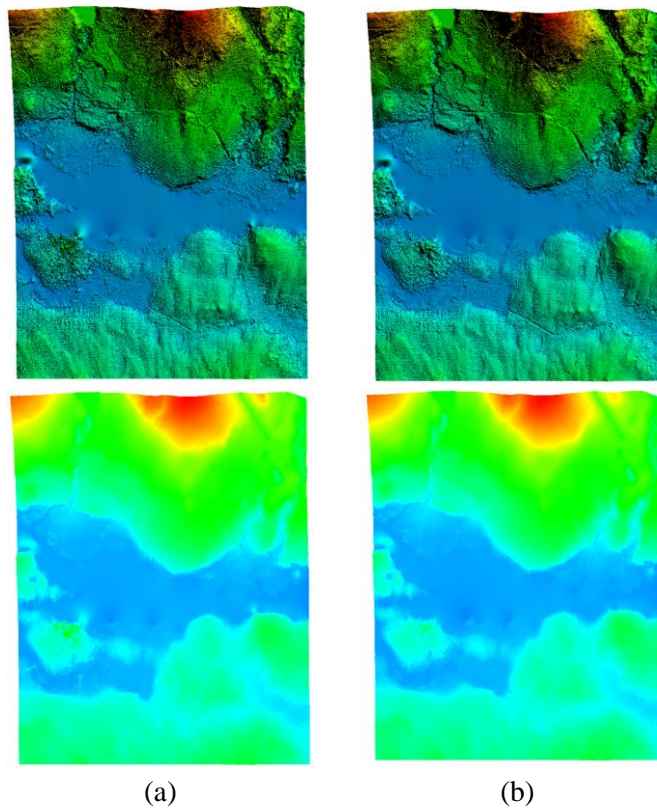
Σχήμα 5.65: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - Pleiades Neo

- Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)



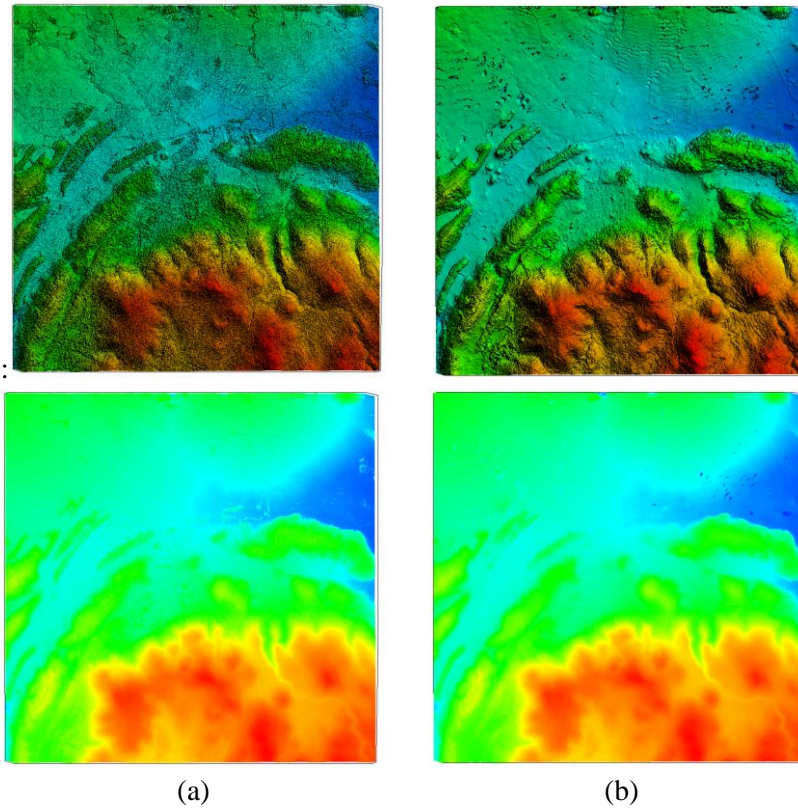
Σχήμα 5.66: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - IKONOS-2

- Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)



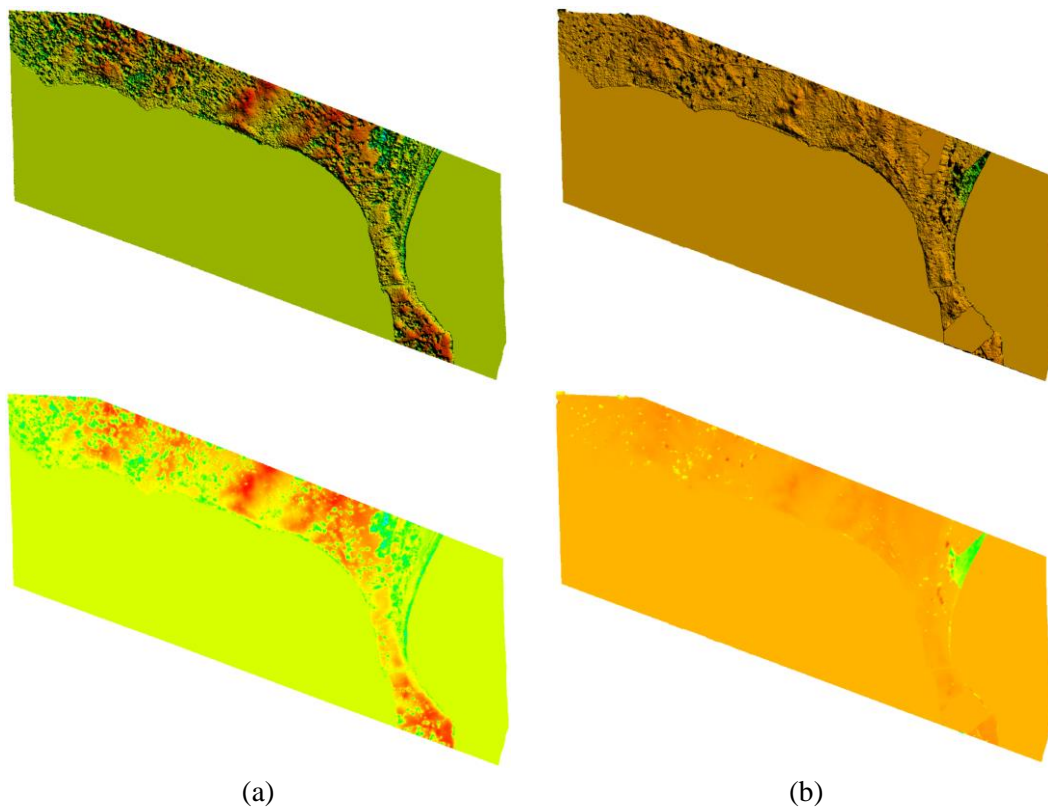
Σχήμα 5.67: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - GeoEye-1

- **Νέουλες, Γαλλία (WorldView-1)**



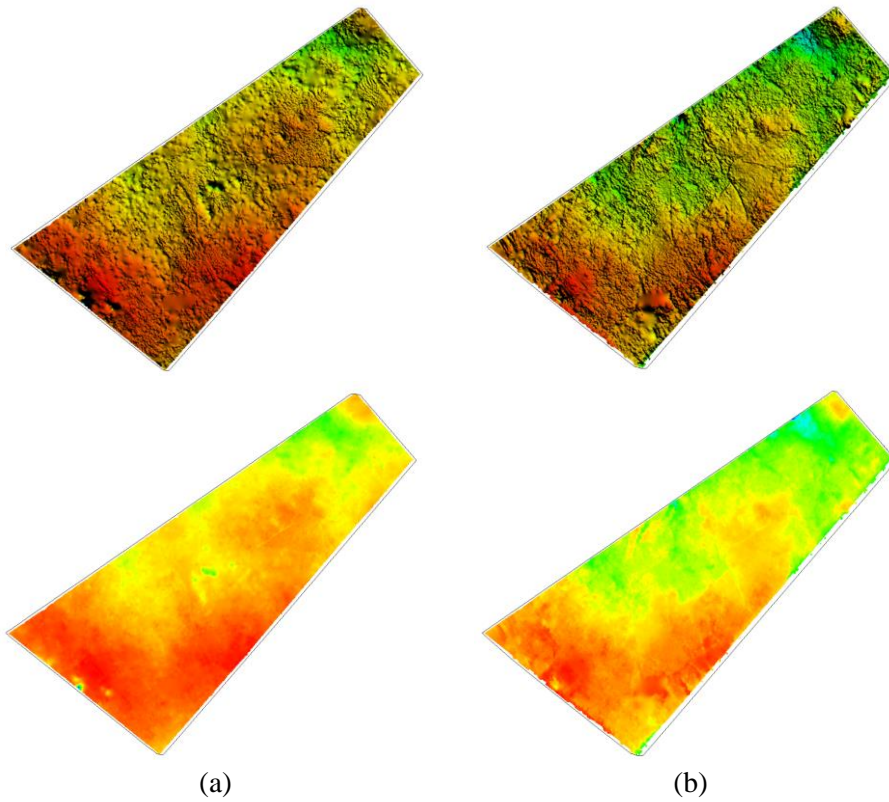
Σχήμα 5.68: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-1

- **Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)**



Σχήμα 5.69: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - WorldView-2

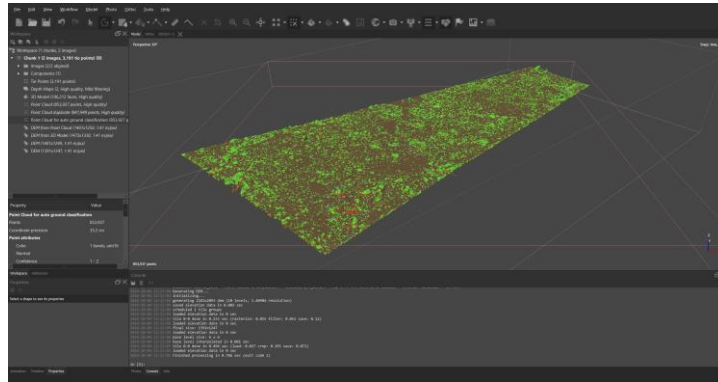
- Seia, Πορτογαλία (SkySat)



Σχήμα 5.70: Μετατροπή DSM σε DTM των μεθόδων NCC (a) και SGM (b) - SkySat

5.4.2. Ταξινόμηση Point cloud στο Metashape Professional

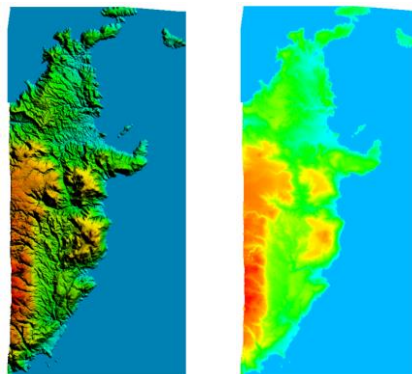
Η μετατροπή του DSM σε DSM στο Metashape Professional πραγματοποιείται μόνο με αυτόματη ή χειροκίνητη ταξινόμηση των point cloud που έχουν προκύψει, χωρίς δυστυχώς να υπάρχει παρόμοια διαδικασία και για το 3D Model, επομένως η επεξεργασία θα γίνει αποκλειστικά και μόνο για το DSM που προκύπτει από το point cloud αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει σχεδόν άμεση οπτική αλληλεπίδραση της επεξεργασίας, γεγονός το οποίο επιταχύνει την όλη διαδικασία.



Σχήμα 5.71: Διαδικασία ταξινόμησης Point cloud για τη μετατροπή του DSM σε DTM - Metashape Professional

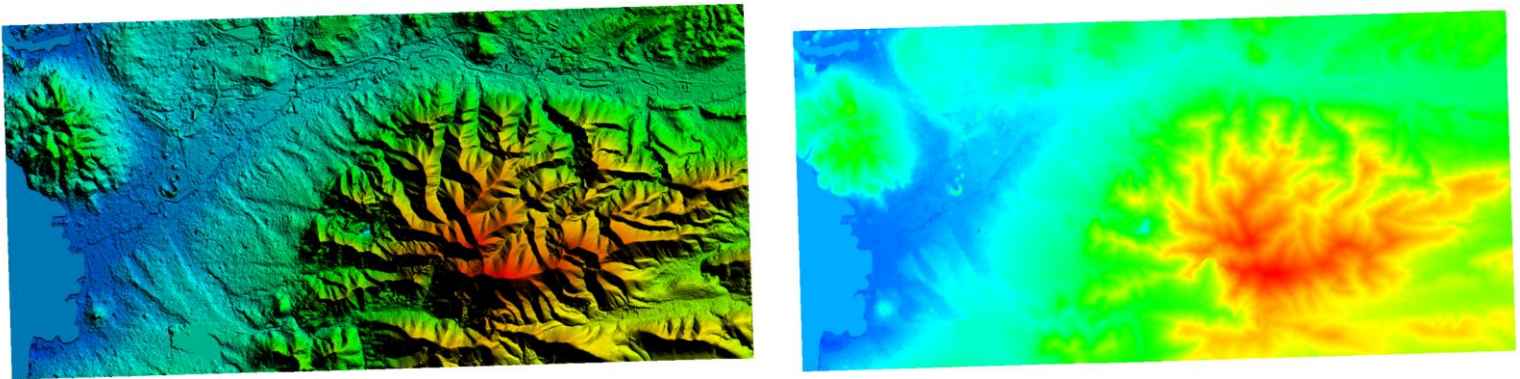
Η αυτόματη ταξινόμηση σημείων στο Metashape Professional αποτελείται από δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος το point cloud διαιρείται σε κελιά συγκεκριμένου μεγέθους (παράμετρος Cell size) και εντός των κελιών αυτών, επιλέγεται το χαμηλότερο σημείο που θα βρεθεί, ενώ πραγματοποιείται τριγωνισμός των σημείων αυτών ο οποίος δίνει την πρώτη εκτίμηση για τα σημεία που θα ταξινομηθούν ως έδαφος και θα αποτελούν το DTM. Στο δεύτερο μέρος της διαδικασίας τα σημεία αυτά ταξινομούνται στην τάξη των σημείων του εδάφους, με την προϋπόθεση τα σημεία αυτά έχουν μια ορισμένη απόσταση από το έδαφος (παράμετρος Max distance), μια ορισμένη γωνία μεταξύ του εδάφους και της γραμμής που ενώνει το κάθε σημείο με το έδαφος (παράμετρος Max angle) και μια ορισμένη κλίση του εδάφους (παράμετρος Max terrain slope) η οποία καθορίζει ουσιαστικά την τοπογραφία της περιοχής (ορεινή, λοφώδης ή επίπεδη). Η τελευταία παράμετρος που ορίζεται (Erosion radius) αφορά την ακτίνα της «διάβρωσης» που θα εφαρμοσθεί σε αντικείμενο το οποίο δεν θα ανήκει στην κατηγορία των σημείων του εδάφους.

- Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)



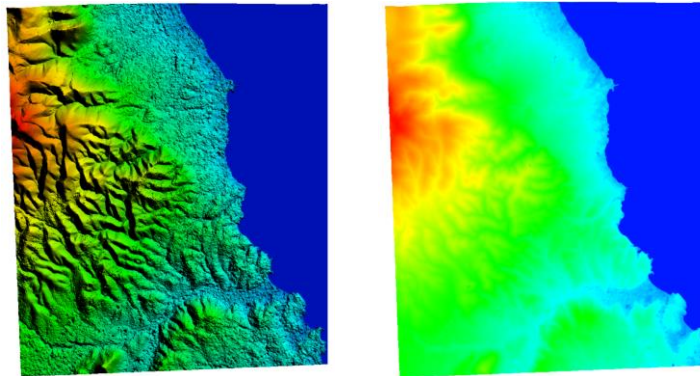
Σχήμα 5.72: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - Pleiades

- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**



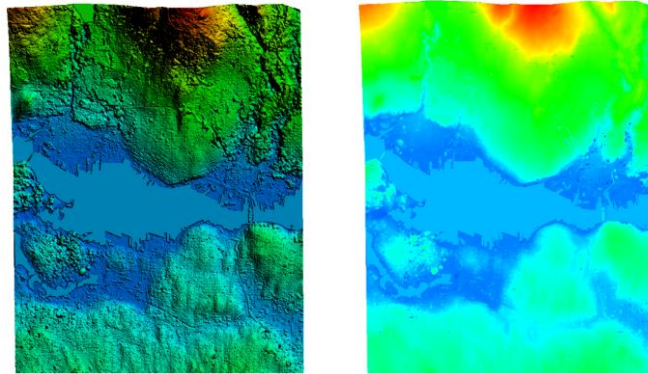
Σχήμα 5.73: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - Pleiades Neo

- **Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)**



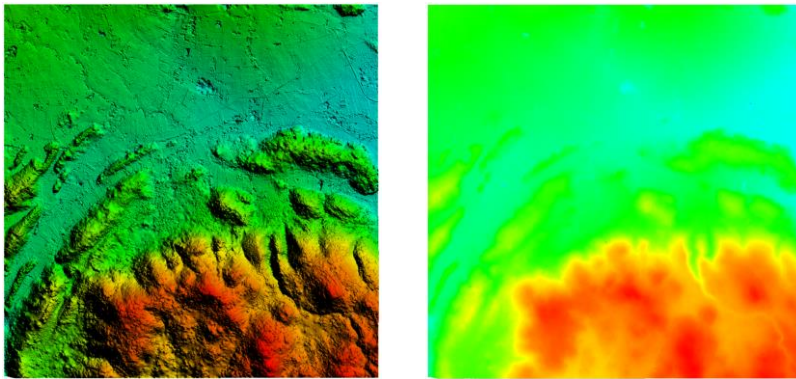
Σχήμα 5.74: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - IKONOS-2

- **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**



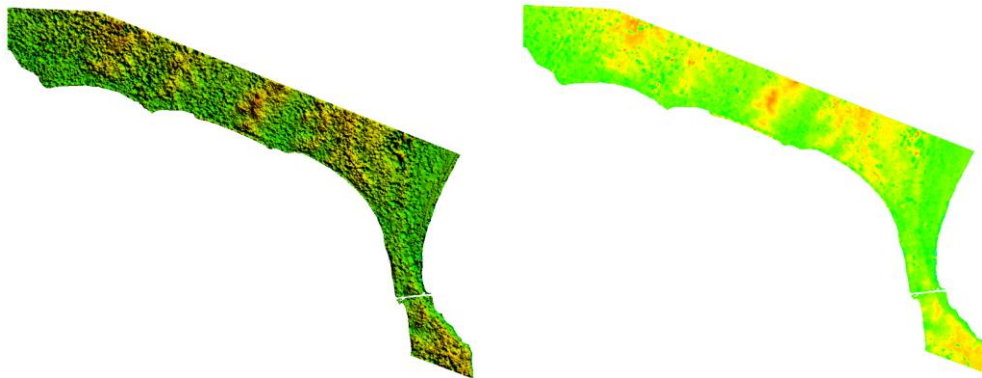
Σχήμα 5.75: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - GeoEye-1

- **Νέουλες, Γαλλία (WorldView-1)**



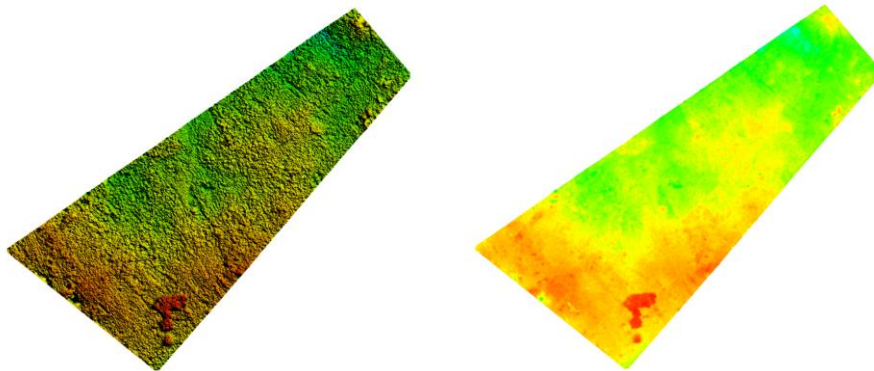
Σχήμα 5.76: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - WorldView-1

- **Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)**



Σχήμα 5.77: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - WorldView-2

- **Seia, Πορτογαλία (SkySat)**



Σχήμα 5.78: Μετατροπή DSM σε DTM με ταξινόμηση point cloud - SkySat

5.5. Αξιολόγηση παραγόμενων DTM

Έχοντας πραγματοποιήσει την μετατροπή των DSM σε DTM και με τα δυο λογισμικά, τελικό βήμα είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει για κάθε περιοχή. Ως υπόβαθρο αναφοράς χρησιμοποιείται το DTM του Ελληνικού Κτηματολογίου για τις περιοχές εντός Ελλάδος και για τις εκτός Ελλάδος περιοχές το DTM από την αποστολή SRTM της NASA. Η διαδικασία της αξιολόγησης αποτελείται αρχικά από την αφαίρεση του DTM υποβάθρου με το παραγόμενο DTM, προκειμένου να παρατηρηθεί η οποιαδήποτε διαφορά υπάρχει μεταξύ τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των DTM με δημιουργία τομών επί του εδάφους και μέσω των μηκοτομών που δημιουργούνται, ελέγχονται οι διαφορές που προκύπτουν.

Σημειώνεται ότι στην διαδικασία της αξιολόγησης δεν συμμετέχουν τα DSM που παρήχθησαν από το 3D μοντέλο στο Metashape Professional, καθώς δεν κατέστη εφικτή η μετατροπή από DSM σε DTM στο λογισμικό.

5.5.1. Χάρτης διαφορών DTM

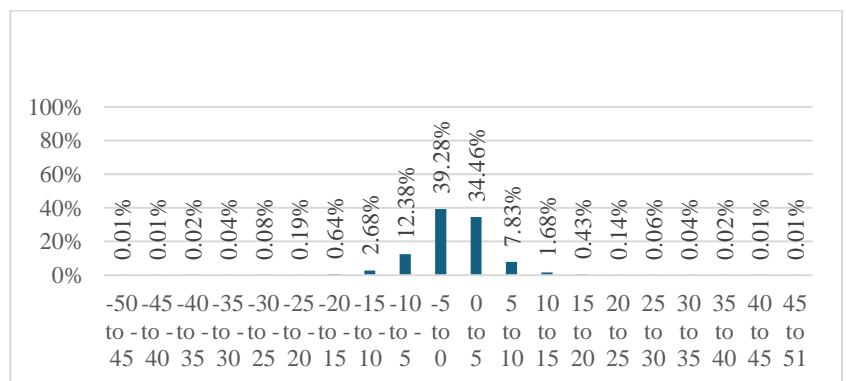
Ως πρώτο βήμα αξιολόγησης των παραγόμενων DTM είναι η δημιουργία χαρτών και διαγραμμάτων τα οποία θα απεικονίζουν τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των παραγόμενων από διαφορετικές μεθόδους DTM και των υποβάθρων αναφοράς, αφαιρώντας από το υπόβαθρο αναφοράς το παραγόμενο DTM ως εξής: $(DTM_{Reference} - DTM_{Image})$.

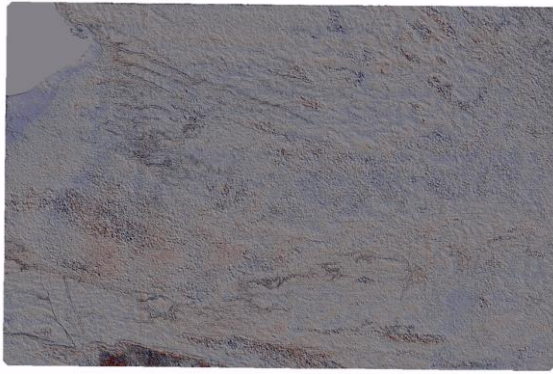
Πέραν της οπτικής αξιολόγησης στις διαφορές των υψομέτρων, πραγματοποιείται και μια στατιστική ανάλυση στα ιστογράμματα των διαφορών, για να διευκρινιστεί η συχνότητα στις τιμές των υψομετρικών διαφορών που προκύπτουν. Προκειμένου να αποφευχθούν οι πολύ ακραίες θετικές ή αρνητικές τιμές υψομετρικών διαφορών (χονδροειδή σφάλματα λόγω εγγύτητας στα όρια της εικόνας, θαλάσσιων περιοχών κ.λπ.), έχει οριστεί για όλες τις δοκιμές να εμφανίζεται η συχνότητα υψομετρικών διαφορών μεταξύ -50 m και 50 m, οι οποίες χωρίζονται σε 20 κλάσεις.

• Kouta Bouyya, Τζιμποντί (SPOT 6)

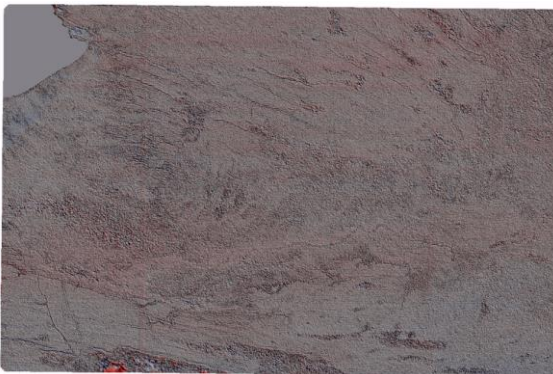
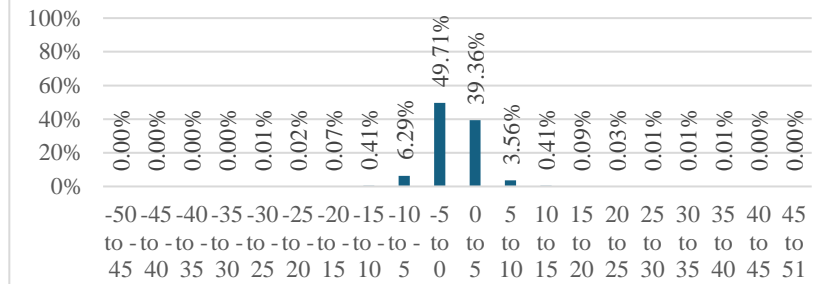
Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο SPOT 6, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -10 m έως -5 m (12.38%), 0 m έως 5 m (34.46%) και -5 m έως 0 m (39.28%)
- SGM: -10 m έως -5 m (6.29%), 0 m έως 5 m (39.36%) και -5 m έως 0 m (49.71%)
- Point Cloud: -10 m έως -5 m (13.00%), 0 m έως 5 m (27.83%) και -5 m έως 0 m (52.91%)

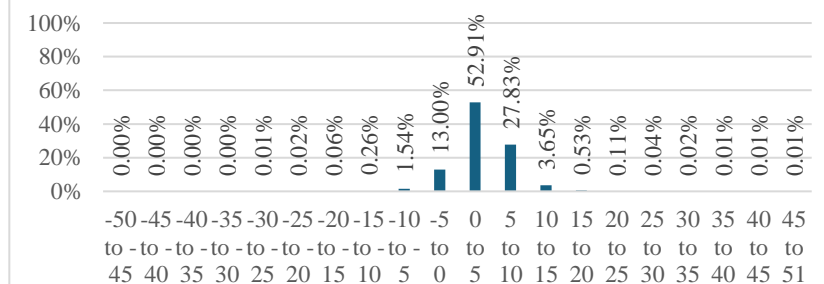




(a)



(b)



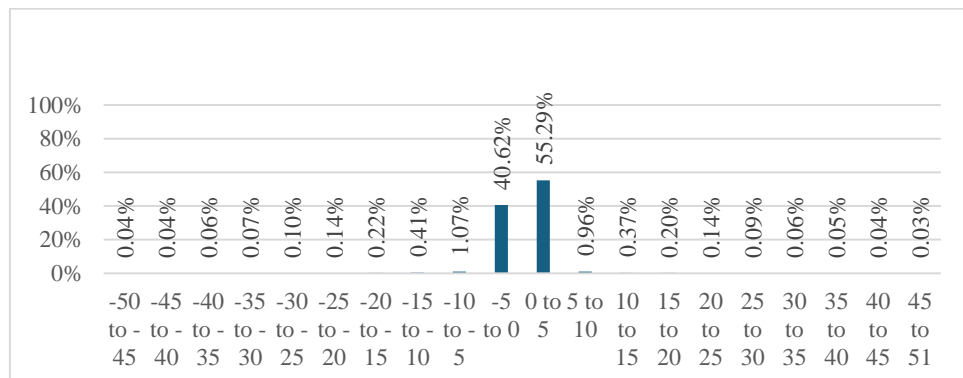
(c)

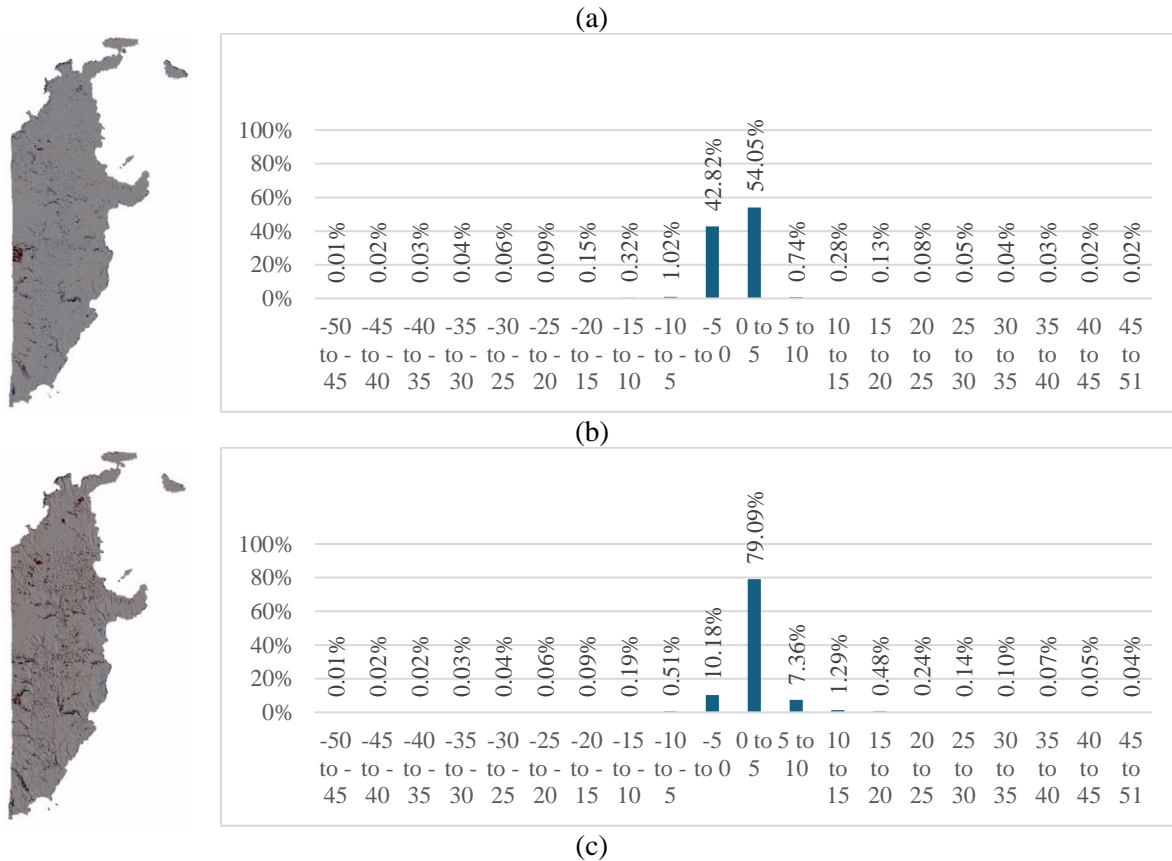
Σχήμα 5.79: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - SPOT 6

• Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τους δορυφόρους Pleiades, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -10 m έως -5 m (1.07%), -5 m έως 0 m (40.62%) και 0 m έως 5 m (55.29%)
- SGM: -10 m έως -5 m (1.02%), -5 m έως 0 m (42.82%) και 0 m έως 5 m (54.05%)
- Point Cloud: 5 m έως 10 m (7.36%), -5 m έως 0 m (10.18%) και 0 m έως 5 m (79.09%)



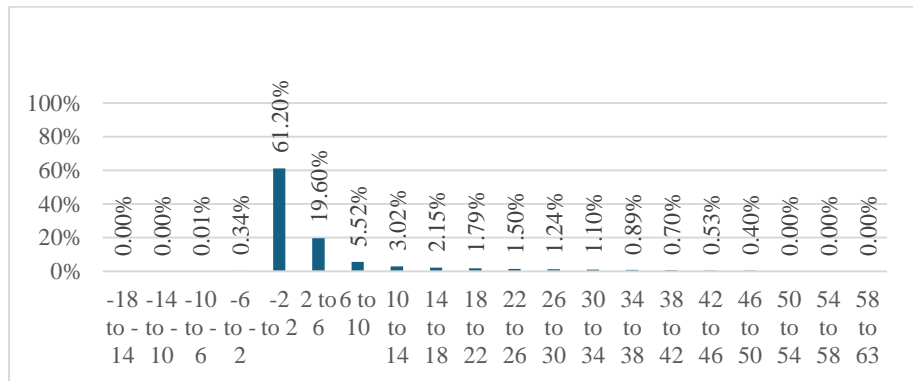
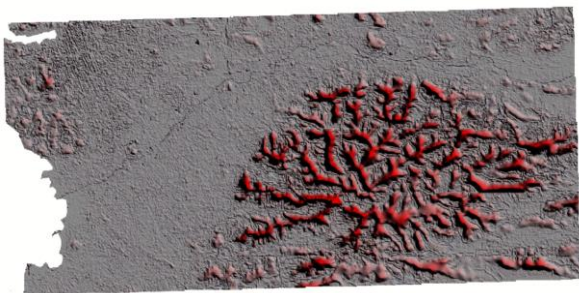


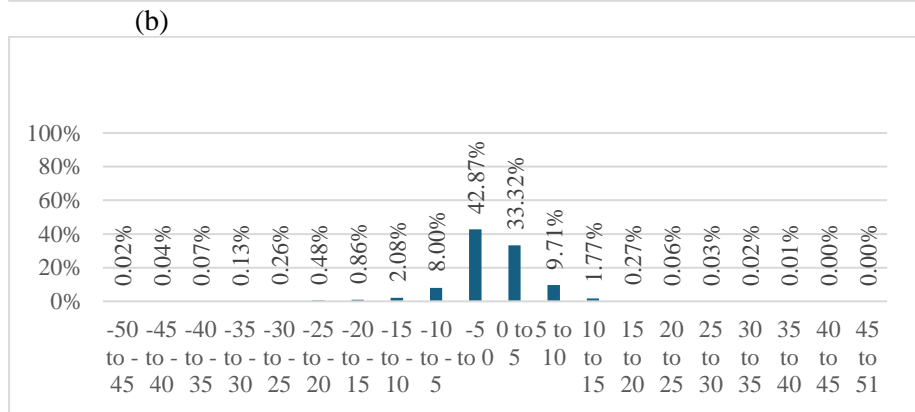
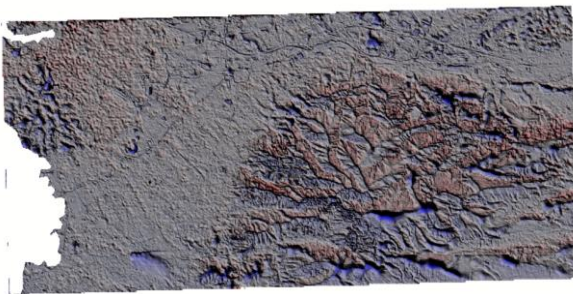
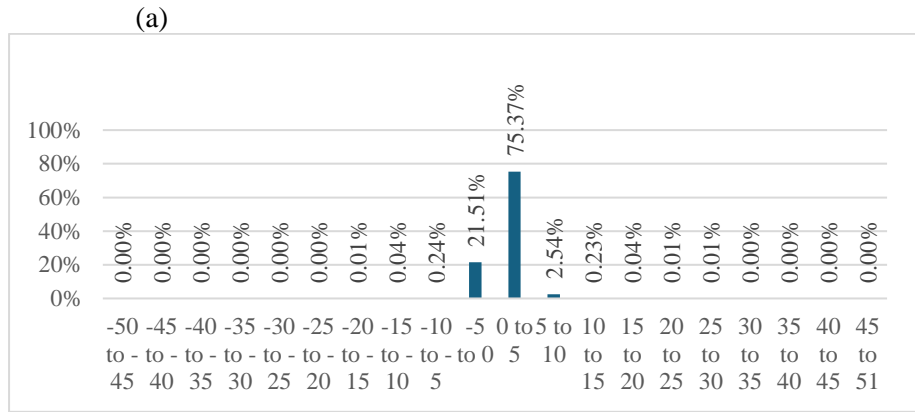
Σχήμα 5.80: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - Pleiades

• **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο Pleiades Neo, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: 6 m έως 10 m (5.52%), 2 m έως 6 m (19.60%) και -2 m έως 2 m (61.20%)
- SGM: 5 m έως 10 m (2.54%), -5 m έως 0 m (21.51%) και 0 m έως 5 m (75.37%)
- Point Cloud: 5 m έως 10 m (9.71%), 0 m έως 5 m (33.32%) και -5 m έως 0 m (42.87%)





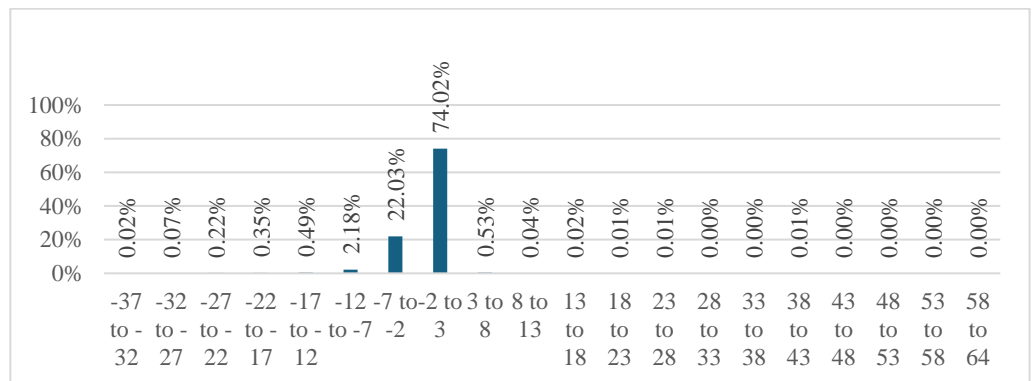
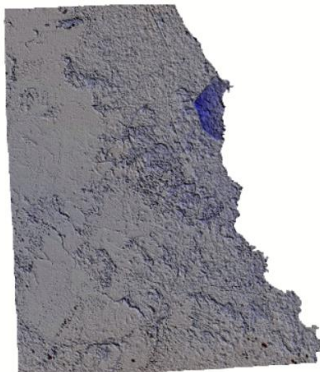
(c)

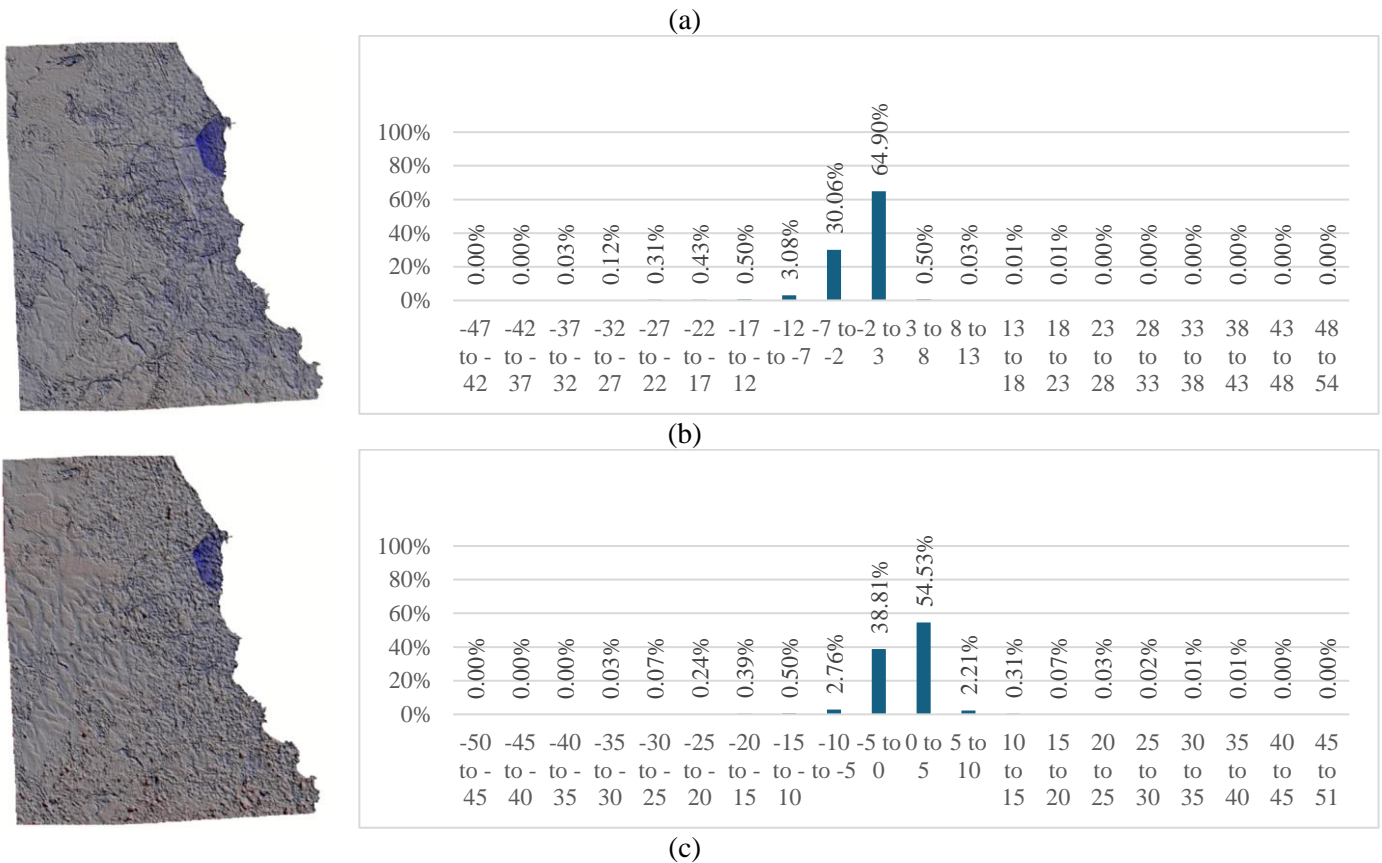
Σχήμα 5.81: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - Pleiades Neo

• Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο IKONOS-2, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -12 m έως -7 m (2.18%), -7 m έως -2 m (22.03%) και -2 m έως 3 m (74.02%)
- SGM: -12 m έως -7 m (3.08%), -7 m έως -2 m (30.06%) και -2 m έως 3 m (64.90%)
- Point Cloud: -10 m έως -5 m (2.76%), -5 m έως 0 m (38.81%) και 0 m έως 5 m (54.53%)



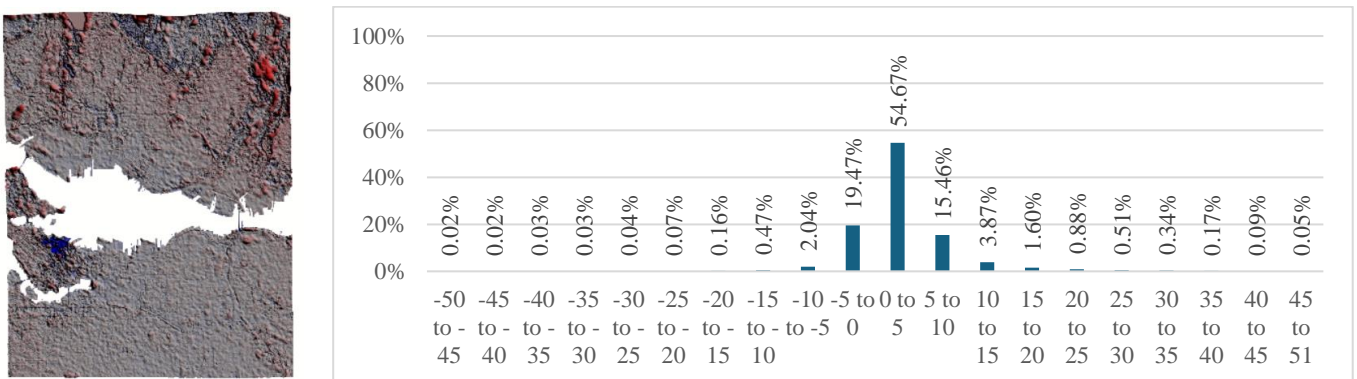


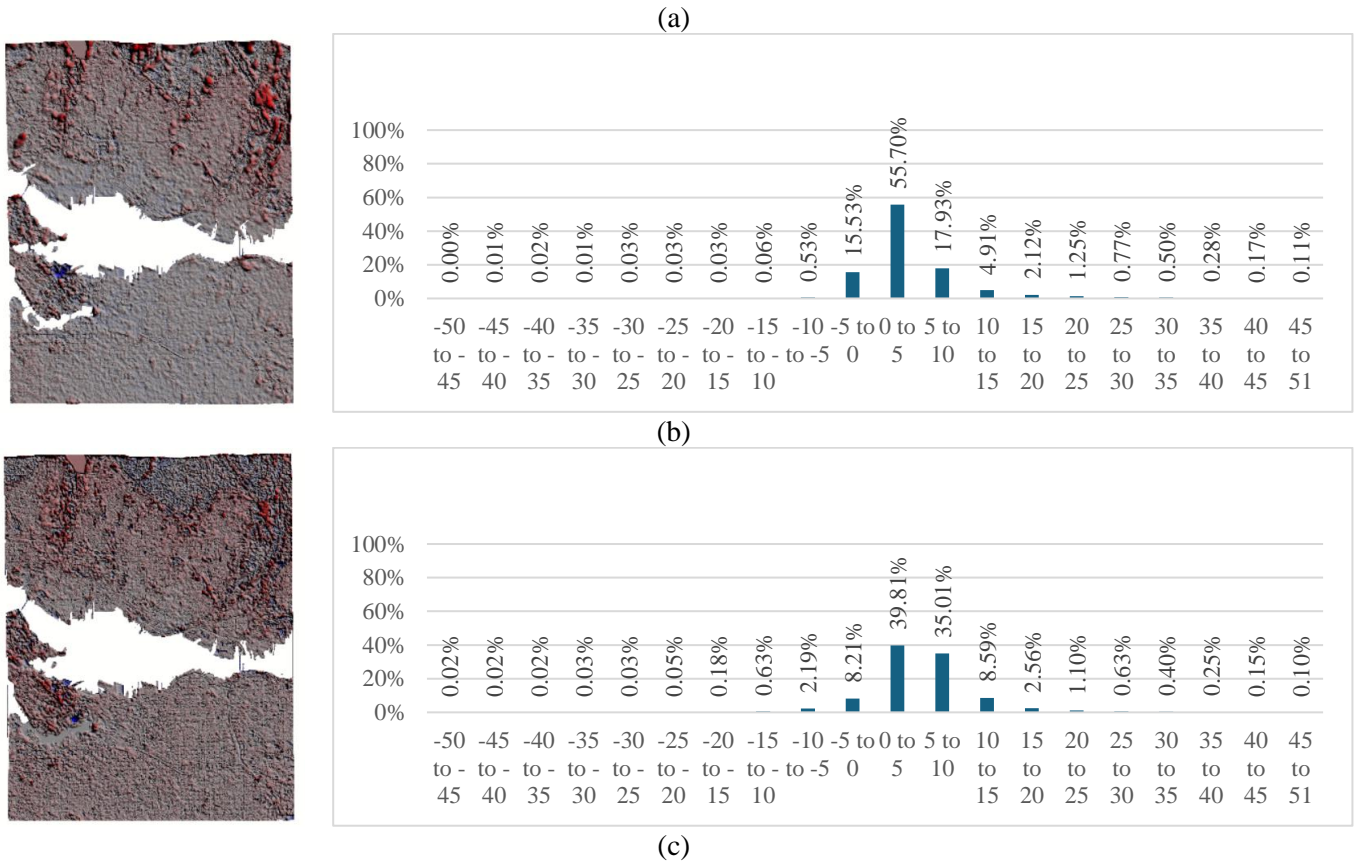
Σχήμα 5.82: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - IKONOS-2

• **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο GeoEye-1, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: 5 m έως 10 m (15.46%), -5 m έως 0 m (19.47%) και 0 m έως 5 m (54.67%)
- SGM: -5 m έως 0 m (15.53%), 5 m έως 10 m (17.93%) και 0 m έως 5 m (55.70%)
- Point Cloud: -5 m έως -0 m (8.21%), 5 m έως 10 m (35.01%) και 0 m έως 5 m (39.81%)



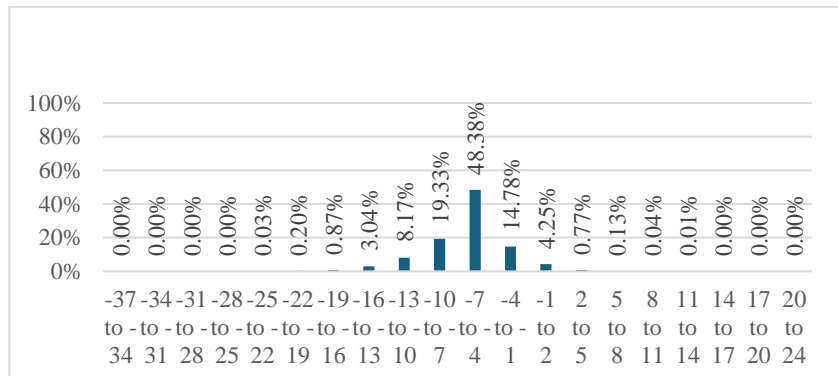
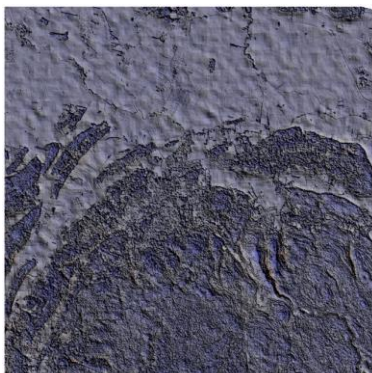


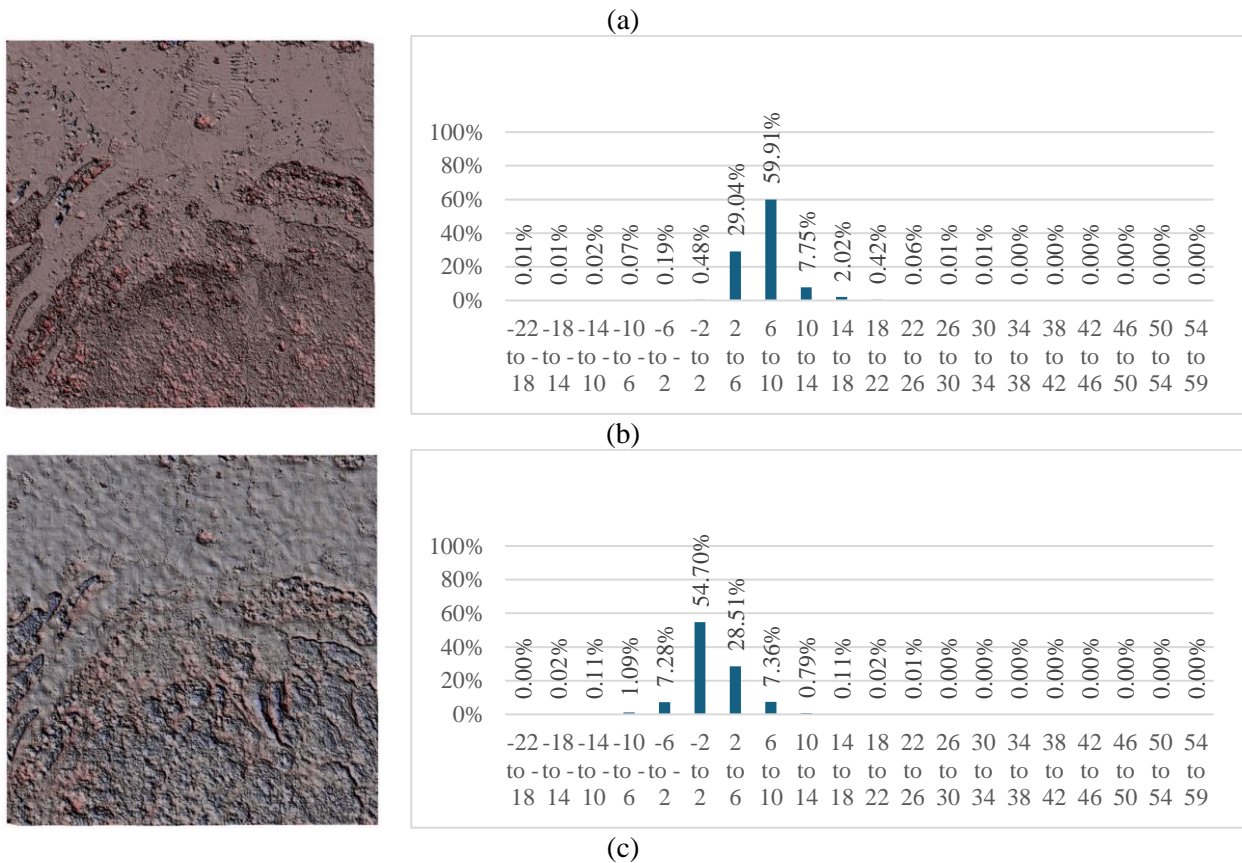
Σχήμα 5.83: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - GeoEye-1

• Νέουλες, Γαλλία (WorldView-1)

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο WorldView-1, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -4 m έως 1 m (14.78%), -10 m έως -7 m (19.33%) και -7 m έως 4 m (48.38%)
- SGM: 10 m έως 14 m (7.75%), 2 m έως 6 m (29.04%) και 6 m έως 10 m (59.91%)
- Point Cloud: 6 m έως 10 m (7.36%), 2 m έως 6 m (28.51%) και -2 m έως 2 m (54.70%)



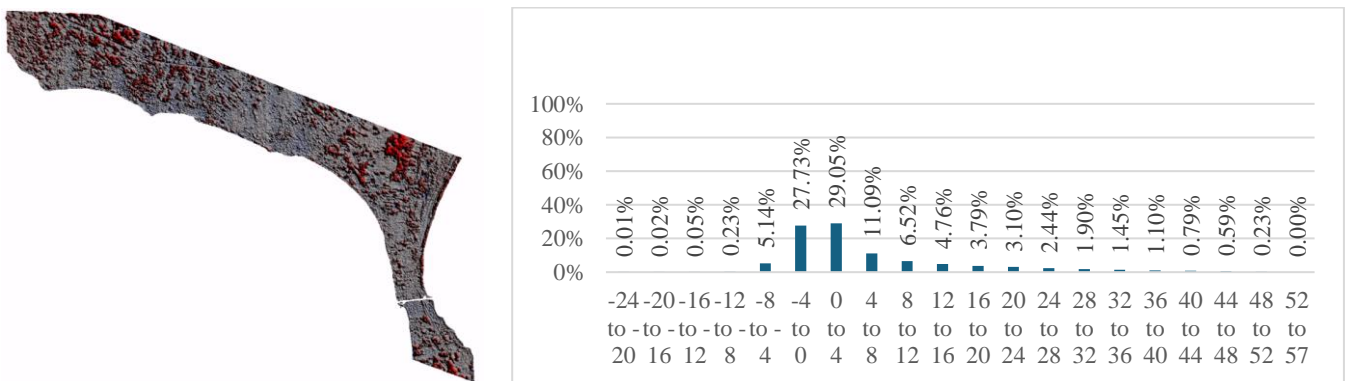


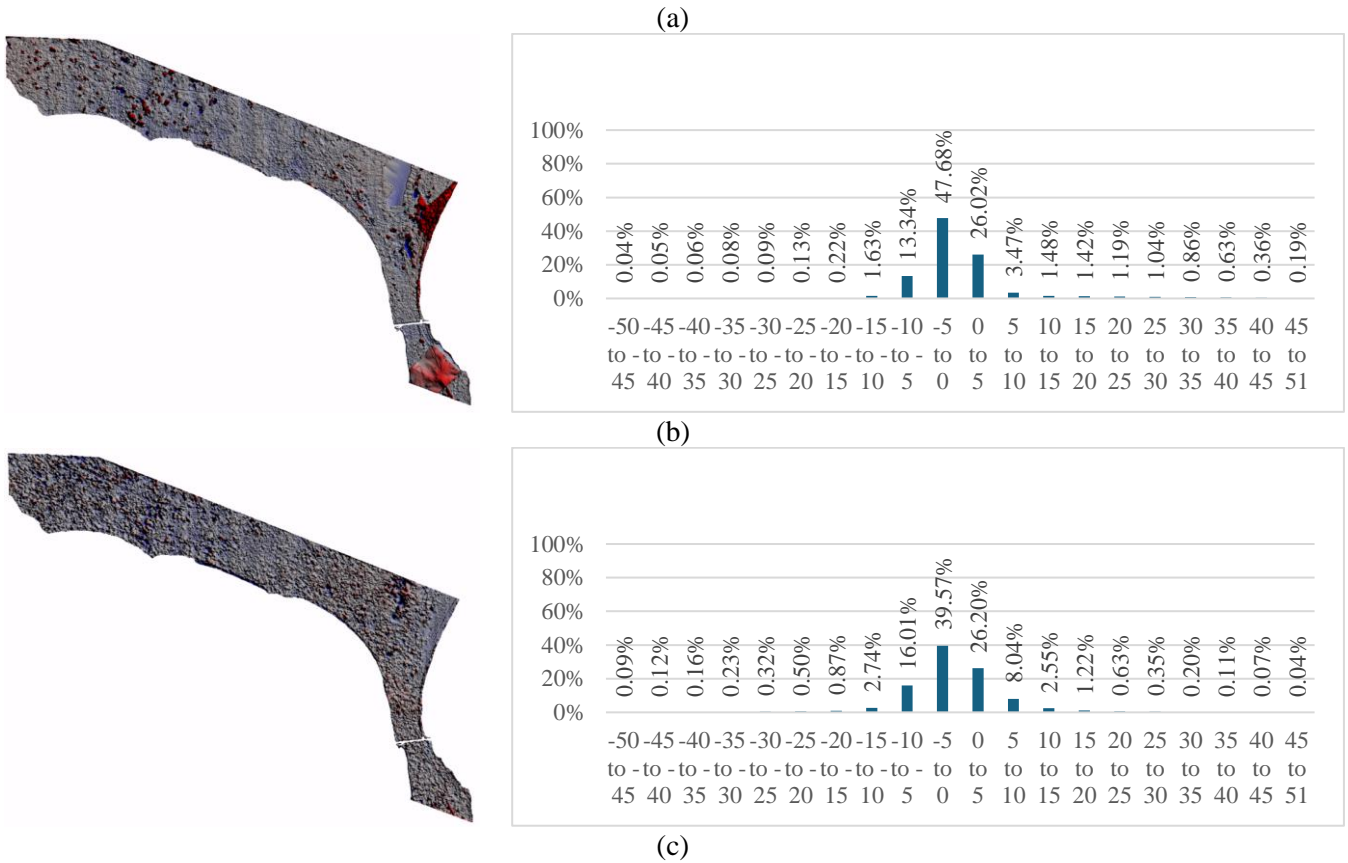
Σχήμα 5.84: Χάρτες και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-1

• Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο WorldView-2, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: 4 m έως 8 m (11.09%), -4 m έως 0 m (27.73%) και 0 m έως 4 m (29.05%)
- SGM: -10 m έως -5 m (13.34%), 0 m έως 5 m (26.02%) και -5 m έως 0 m (47.86%)
- Point Cloud: -10 m έως -5 m (16.01%), 0 m έως 5 m (26.20%) και -5 m έως 0 m (39.57%)



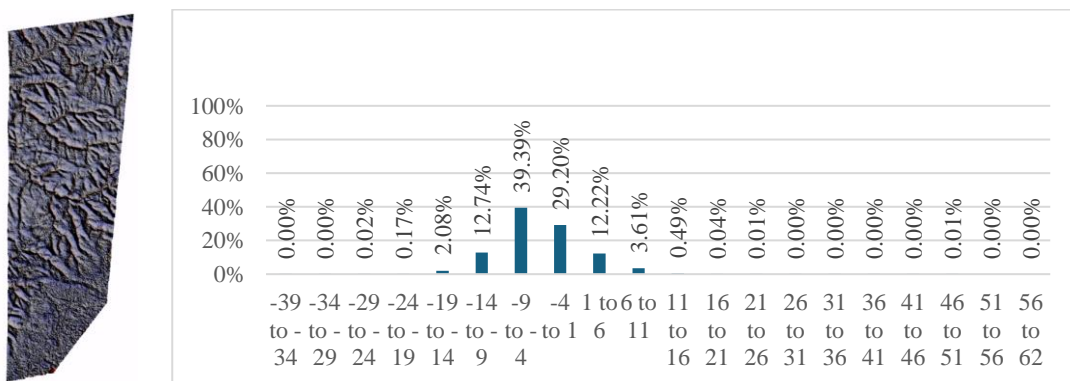


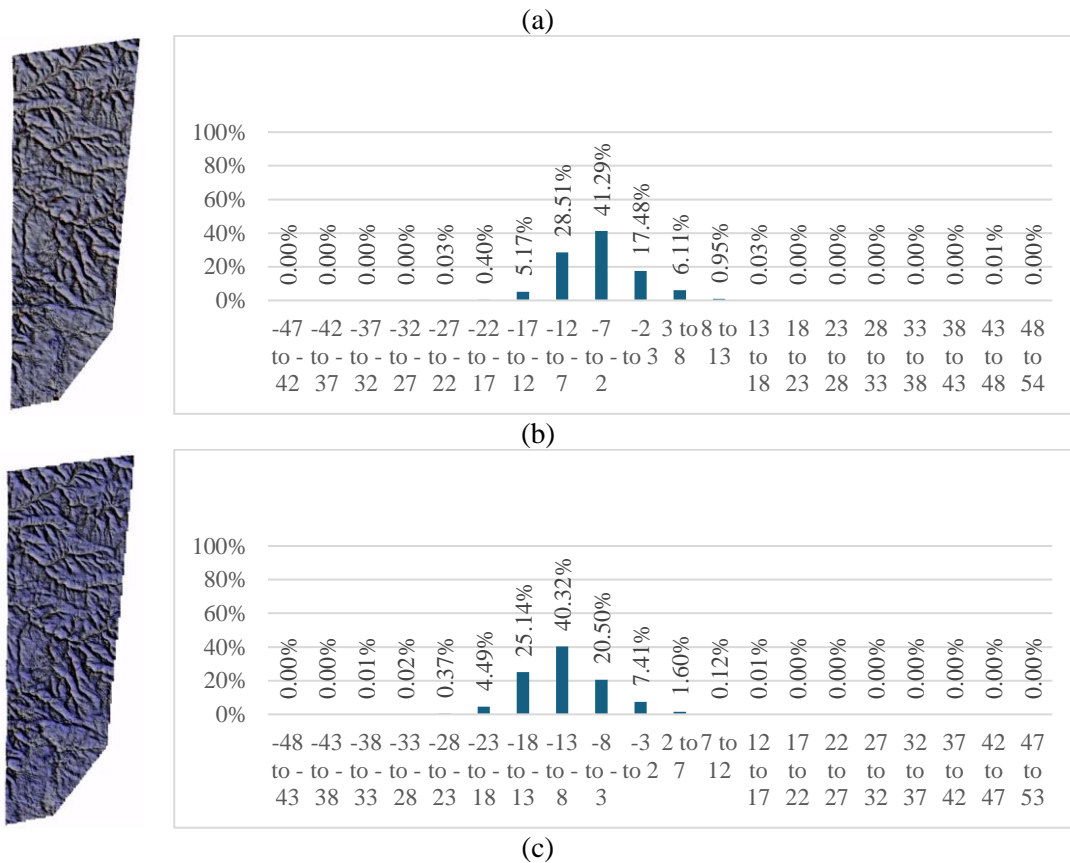
Σχήμα 5.85: Χάρτες και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο Κτηματολογίου. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-2

• **Sardinia, Ιταλία (WorldView-3)**

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τον δορυφόρο WorldView-3, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -14 m έως -9 m (12.74%), -4 m έως 1 m (29.20%) και -9 m έως 4 m (39.39%)
- SGM: -2 m έως -3 m (17.48%), -12 m έως -7 m (28.51%) και -7 m έως 2 m (41.29%)
- Point Cloud: -8 m έως -3 m (20.50%), -18 m έως -13 m (25.14%) και -13 m έως -8 m (40.32%)



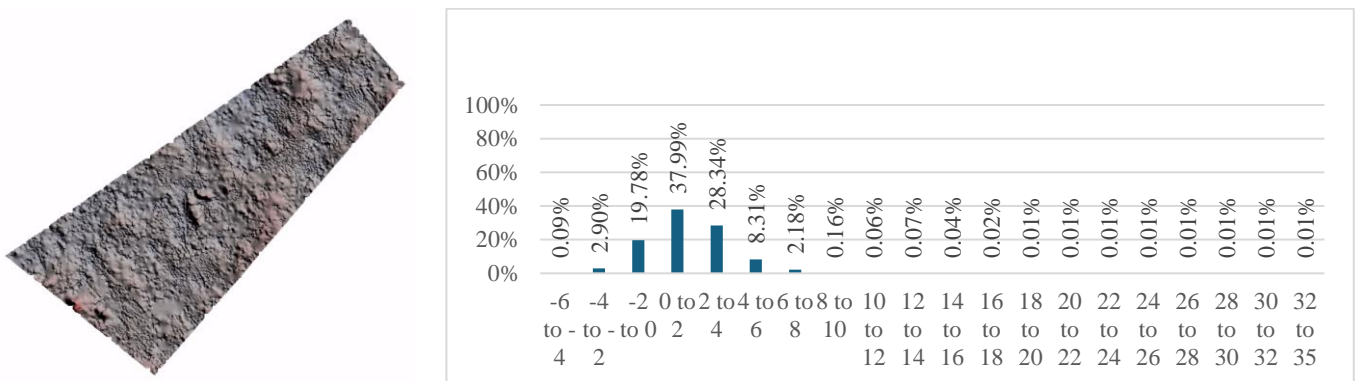


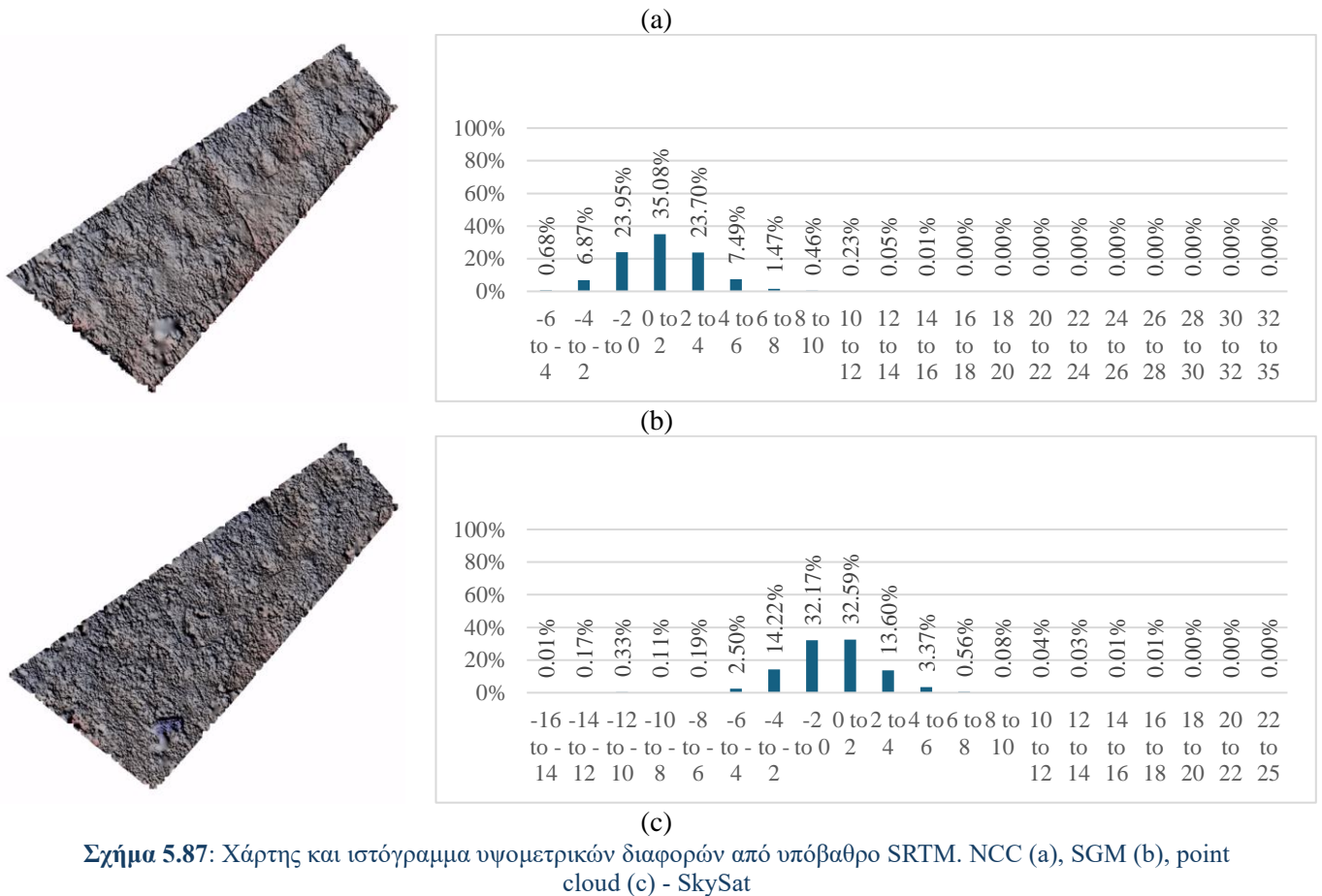
Σχήμα 5.86: Χάρτης και ιστόγραμμα υψομετρικών διαφορών από υπόβαθρο SRTM. NCC (a), SGM (b), point cloud (c) - WorldView-3

• **Seia, Πορτογαλία (SkySat)**

Για το στερεοζεύγος εικόνων από τους δορυφόρους SkySat, οι επικρατούσες υψομετρικές διαφορές για κάθε μέθοδο εξαγωγής DEM βρίσκονται στις εξής κλάσεις:

- NCC: -2 m έως 0 m (19.78%), 2 m έως 4 m (28.34%) και 0 m έως 2 m (37.99%)
- SGM: 2 m έως 4 m (23.70%), -2 m έως 0 m (23.95%) και 0 m έως 2 m (35.08%)
- Point Cloud: -4 m έως -2 m (14.22%), -2 m έως 0 m (32.17%) και 0 m έως 2 m (32.59%)





Στον **Πίνακα 5.11** παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέγιστες, οι ελάχιστες, καθώς και οι κλάσεις των επικρατέστερων υψομετρικών διαφορών μεταξύ των παραγόμενων DEM και των υποβάθρων αναφοράς.

Πίνακας 5.11: Ελάχιστες, μέγιστες και επικρατούσες υψομετρικές διαφορές των παραγόμενων DEM από τα υπόβαθρα αναφοράς

	NCC			SGM			Point Cloud		
	Min (m)	Max (m)	Mode	Min (m)	Max (m)	Mode	Min (m)	Max (m)	Mode
SPOT 6	-263	145	-5 m έως 0 m (39.28%)	-165	151	-5 m έως 0 m (49.71%)	-109	257	-5 m έως 0 m (52.91%)
Pleiades	-206	213	0 m έως 5 m (55.29%)	-218	407	0 m έως 5 m (54.05%)	-318	538	0 m έως 5 m (79.09%)
Pleiades Neo	-18	115	-2 m έως 2 m (61.20%)	-71	75	0 m έως 5 m (75.37%)	-104	91	-5 m έως 0 m (42.87%)
IKONOS-2	-36	53	-2 m έως 3 m (74.02%)	-46	54	-2 m έως 3 m (64.90%)	-79	715	0 m έως 5 m (54.53%)
GeoEye-1	-153	118	0 m έως 5 m (54.67%)	-52	121	0 m έως 5 m (55.70%)	-182	339	0 m έως 5 m (39.81%)
WorldView-1	-36	20	-7 m έως 4 m (48.38%)	-21	82	6 m έως 10 m (59.91%)	-22	76	-2 m έως 2 m (54.70%)
WorldView-2	-24	91	0 m έως 4 m (29.05%)	-264	444	-5 m έως 0 m (47.86%)	-104	81	-5 m έως 0 m (39.57%)
WorldView-3	-38	69	-9 m έως 4 m (39.39%)	-125	112	-7 m έως 2 m (41.29%)	-48	100	-13 m έως -8 m (40.32%)
SkySat	-5	34	0 m έως 2 m (37.99%)	-6	17	0 m έως 2 m (35.08%)	-15	22	0 m έως 2 m (32.59%)

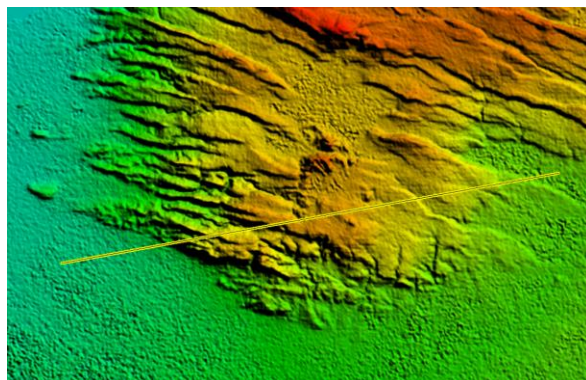
Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου σύγκρισης των παραγόμενων DEM, παρατηρήθηκε ότι οι επικρατούσες τιμές των υψομετρικών διαφορών βρίσκονται για όλες τις μεθόδους βρίσκονται αρκετά κοντά στο μηδέν, με τις περισσότερες να κυμαίνονται μεταξύ -5 m και 5 m.

Οι ακραίες ελάχιστες και μέγιστες υψομετρικές διαφορές προέκυψαν είτε από φυσικά ή τεχνητά αντικείμενα επί του εδάφους τα οποία δεν αποκόπηκαν κατά τη μετατροπή από DSM σε DTM, είτε από την ύπαρξη υδάτινων στοιχείων, όπου κάποια pixel παρέμειναν ακόμα και μετά την περικοπή των επιφανειών με λίμνες ή θάλασσα.

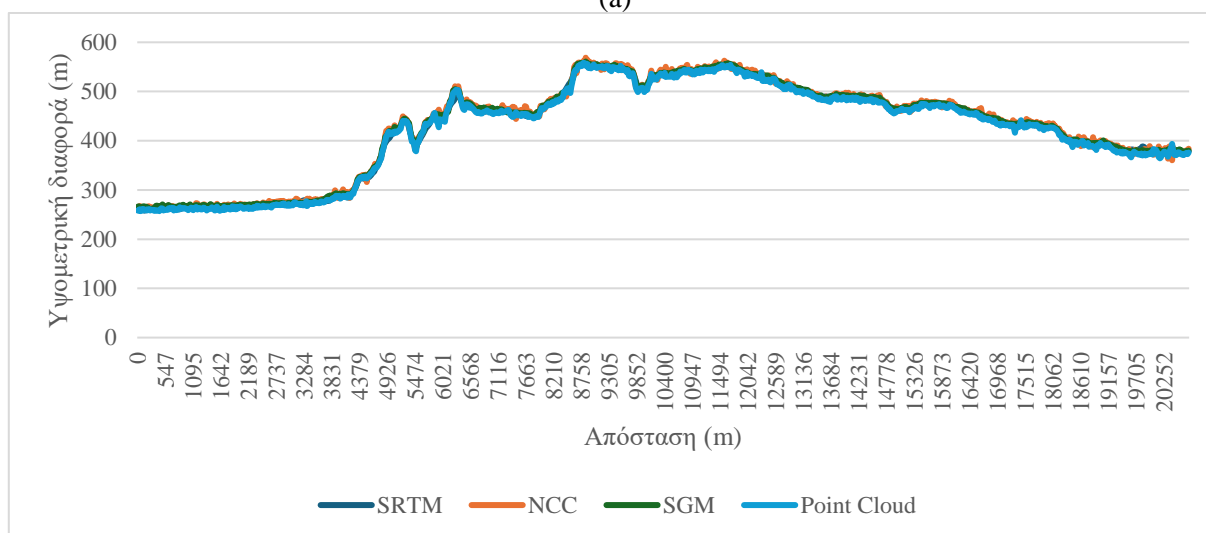
5.5.2. Υψομετρικό προφίλ διαδρομής

- **Kouta Bouyya, Τζιμπουτί (SPOT 6)**

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου SPOT 6 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 20.58 km, παρατηρείται ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ τους πλην ελάχιστων σημείων περίπου στη μέση (7,095 m - 8,514 m) και το τέλος της διαδρομής (19,867 m - 20,576 m). Η συγκεκριμένη περιοχή και ειδικά η διαδρομή που χαράχθηκε αποτελείται μόνο από έδαφος, χωρίς την ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών αντικειμένων.



(a)

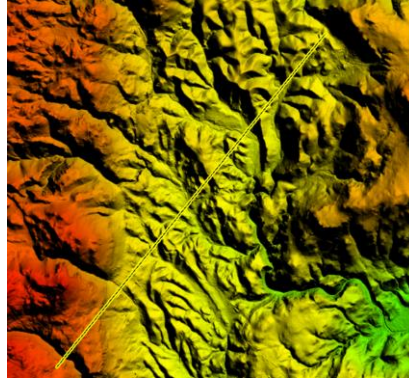


(b)

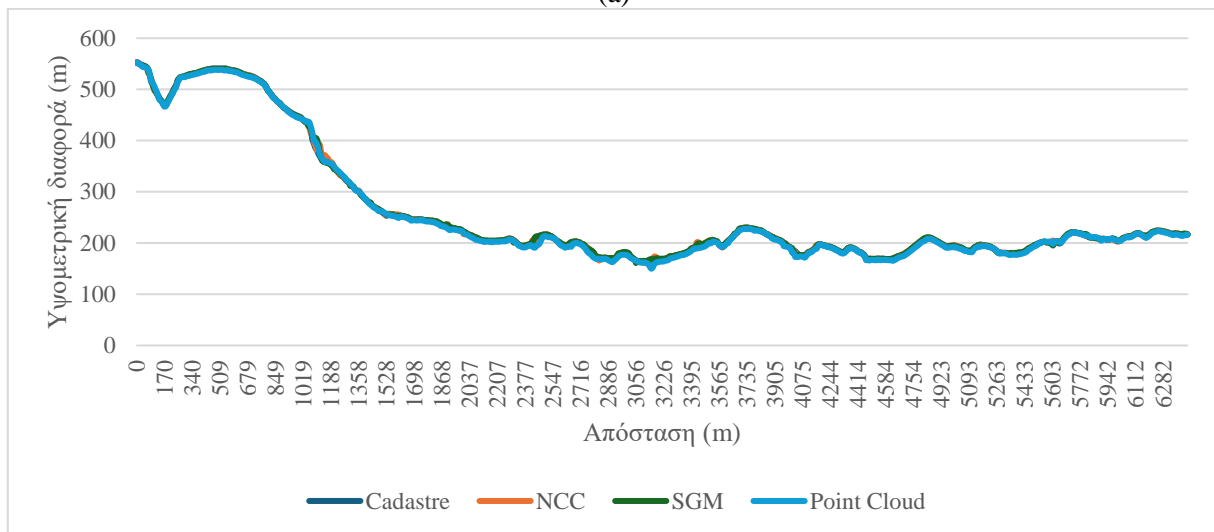
Σχήμα 5.88: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - SPOT 6

- Ανατολική Κρήτη, Ελλάδα (Pleiades)

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM των δορυφόρων Pleiades σε μια ευθεία γραμμή μήκους 6.38 km, παρατηρείται ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη διαδρομή που χαράχθηκε αποτελείται μόνο από έδαφος, χωρίς την ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών αντικειμένων.



(a)

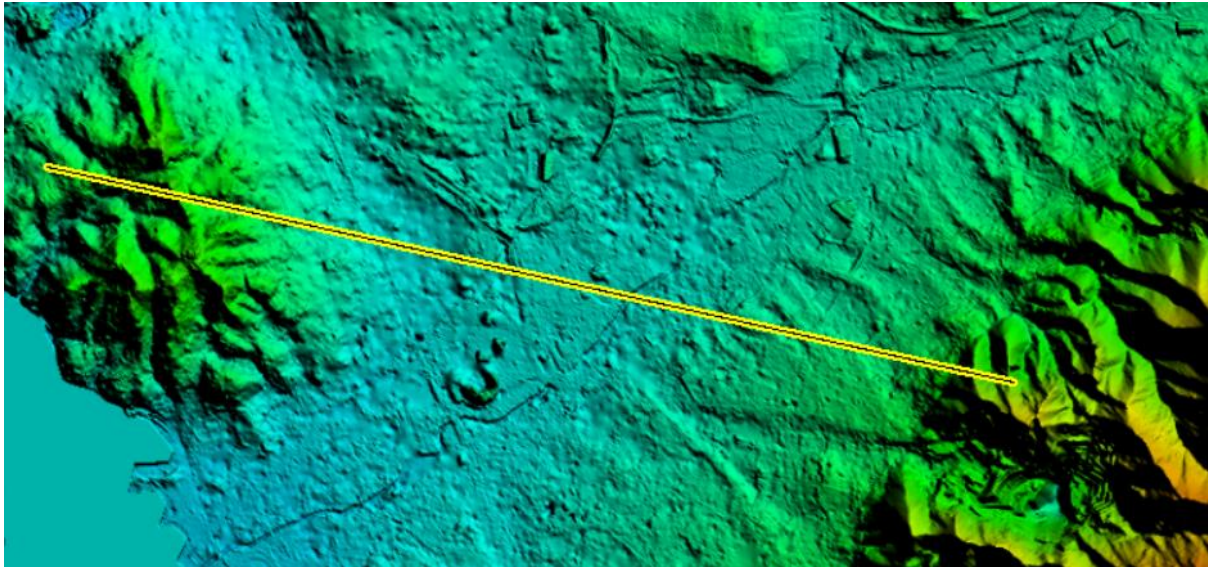


(b)

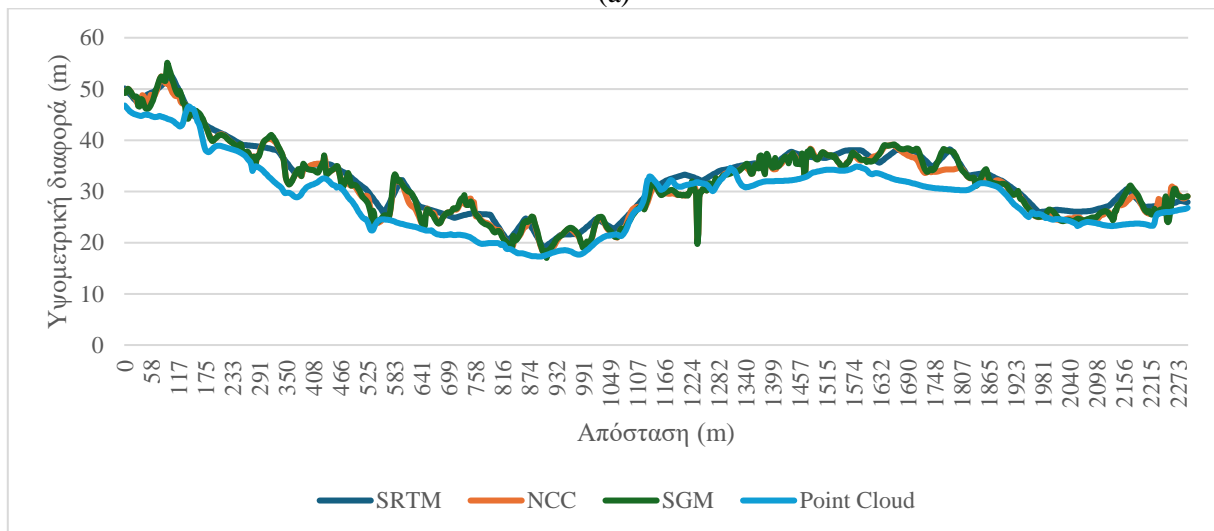
Σχήμα 5.89: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - Pleiades

- **Marseille, Γαλλία (Pleiades Neo)**

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου Pleiades Neo σε μια ευθεία γραμμή μήκους 2.27 km, παρατηρείται ότι υπάρχει αρκετή ανομοιογένεια μεταξύ τους σε πολλά σημεία της διαδρομής. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη περιοχή έχει έντονο αστικό περιβάλλον, το οποίο κατά την προσπάθεια αφαίρεσής του στην μετατροπή σε DTM δεν είχε το καλύτερο επιθυμητό αποτέλεσμα.



(a)

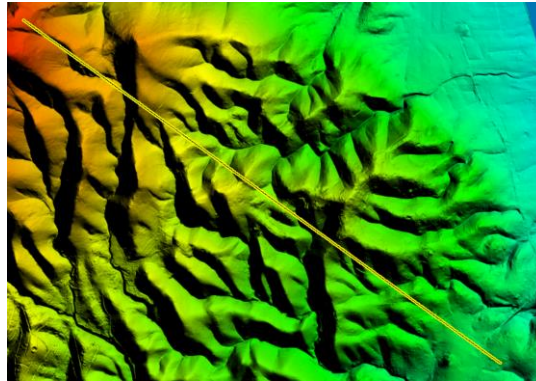


(b)

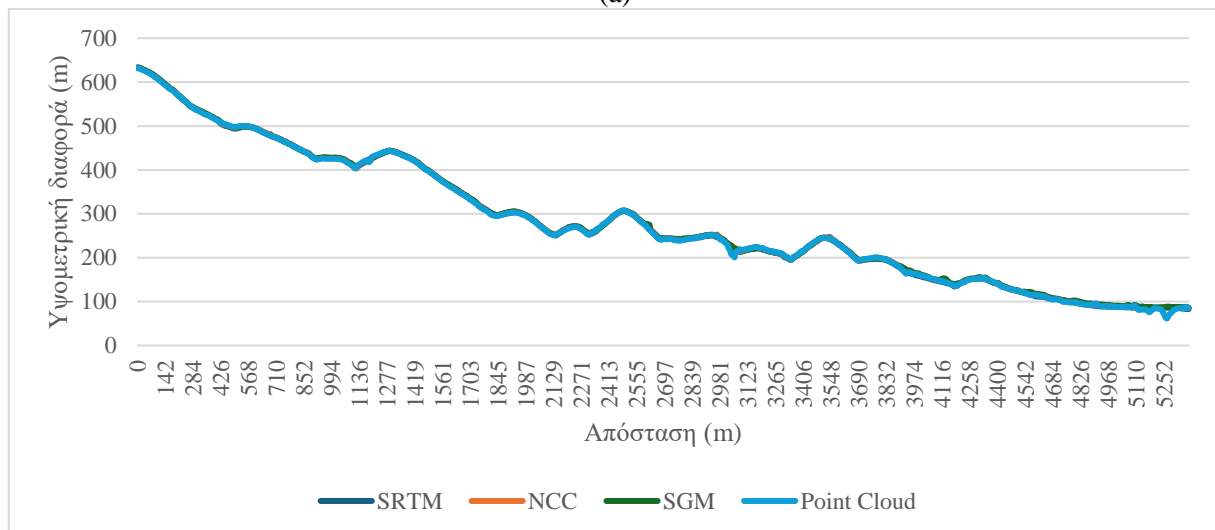
Σχήμα 5.90: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - Pleiades Neo

- Ανατολική Αττική, Ελλάδα (IKONOS-2)

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου IKONOS-2 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 5.34 km, παρατηρείται ότι υπάρχει σχεδόν τέλεια ταύτιση μεταξύ τους πλην ελάχιστων σημείων περίπου στη μέση (2,944m – 3,128 m) και το τέλος της διαδρομής (5,152 m – 5,336 m).



(a)

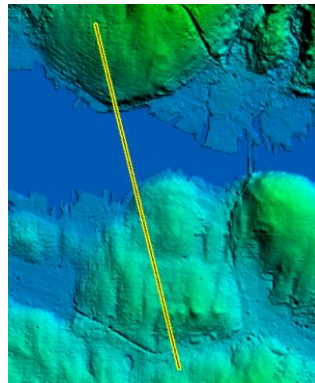


(b)

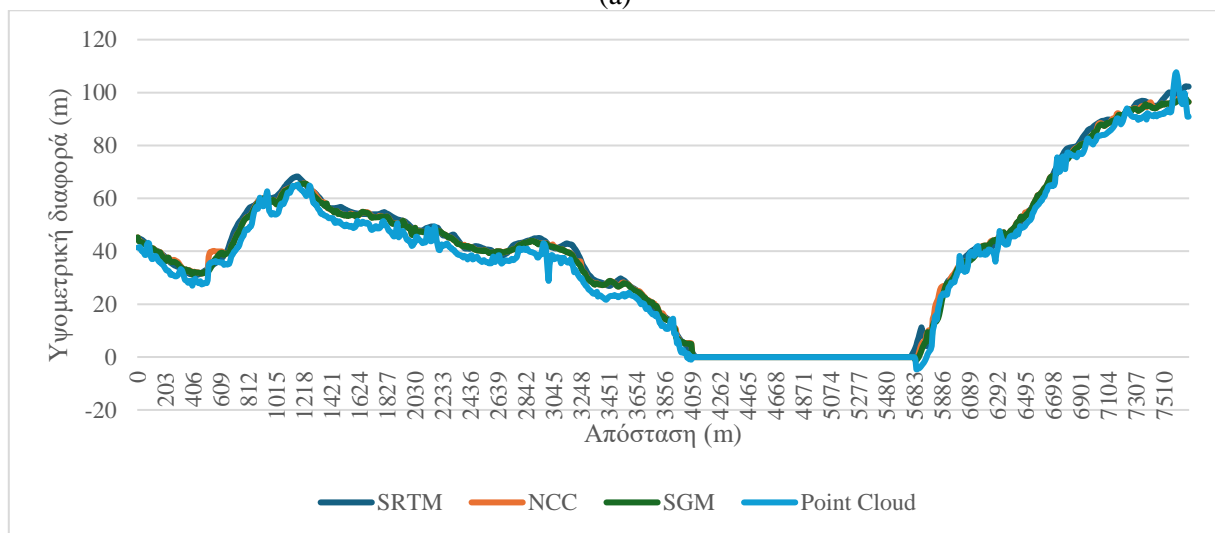
Σχήμα 5.91: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - IKONOS-2

- **Vancouver, Καναδάς (GeoEye-1)**

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου GeoEye-1 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 7.51 km, παρατηρείται ότι υπάρχει αρκετά καλή ταύτιση μεταξύ τους, ωστόσο το DEM από το Point Cloud του Metashape Professional έχει αρκετές εξάρσεις και βυθίσεις σχεδόν σε όλη τη διαδρομή, ενώ υπάρχει και μια μικρή κατακόρυφη μετατόπιση μέχρι 3 m έως 4 m περίπου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη περιοχή έχει έντονο αστικό περιβάλλον και ψηλά κτήρια, κάποια εκ των οποίων δεν μπόρεσαν να αποκοπούν πλήρως κατά τη μετατροπή του DSM σε DTM.



(a)

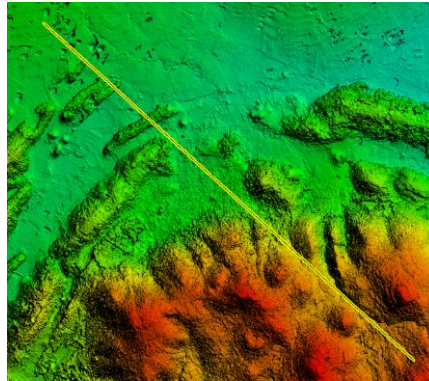


(b)

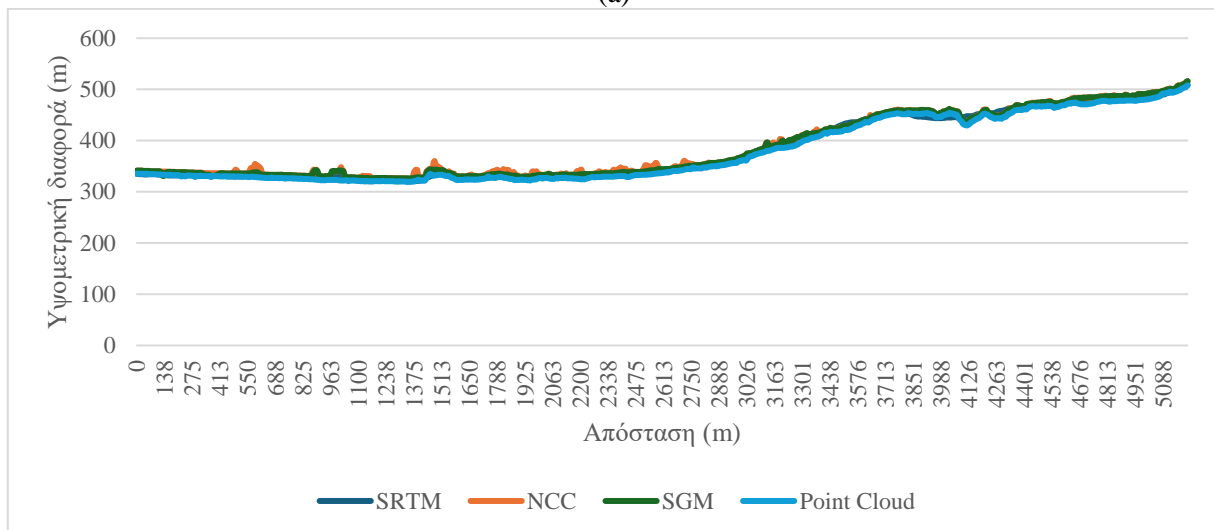
Σχήμα 5.92: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - GeoEye-1

- Νέoules, Γαλλία (WorldView-1)

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου WorldView-1 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 5.17 km, παρατηρείται ότι υπάρχει σχεδόν τέλεια ταύτιση μεταξύ τους πλην ελάχιστων σημείων περίπου στην αρχή (357 m - 1,248 m) και στη μέση (1,426 m - 2,852 m) από τα DEM των μεθόδων NCC και SGM.



(a)

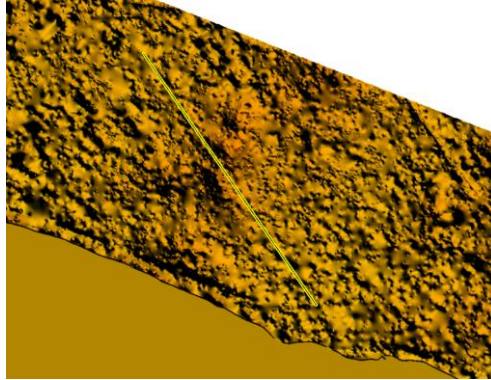


(b)

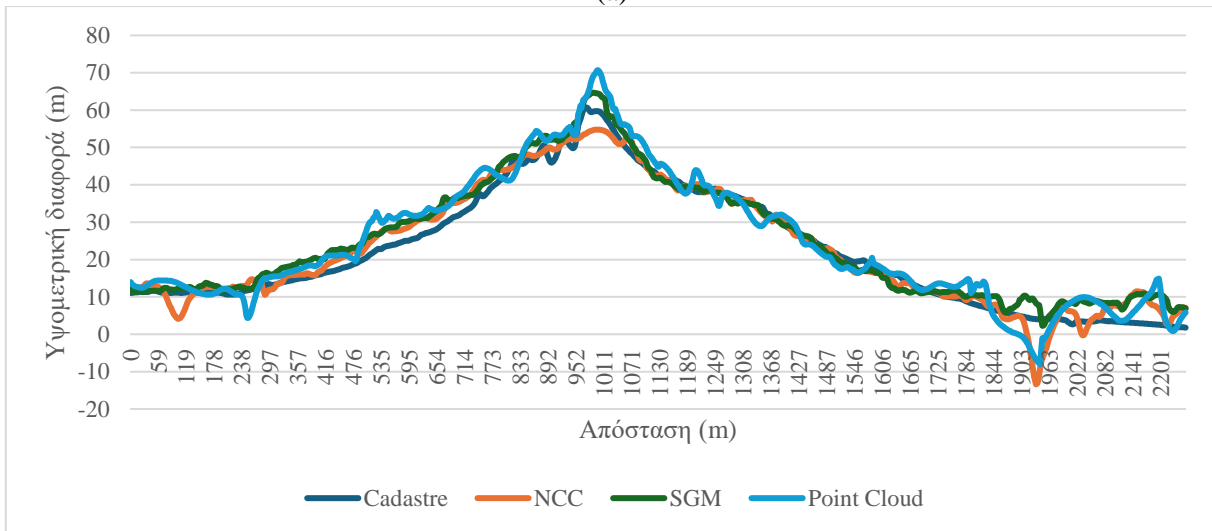
Σχήμα 5.93: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-1

- Δυτική Χαλκιδική, Ελλάδα (WorldView-2)

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου WorldView-2 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 2.24 km, παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη ανομοιογένεια μεταξύ τους σχεδόν σε ολόκληρη τη διαδρομή.



(a)

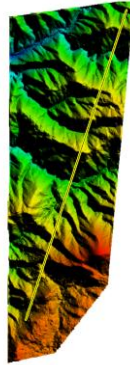


(b)

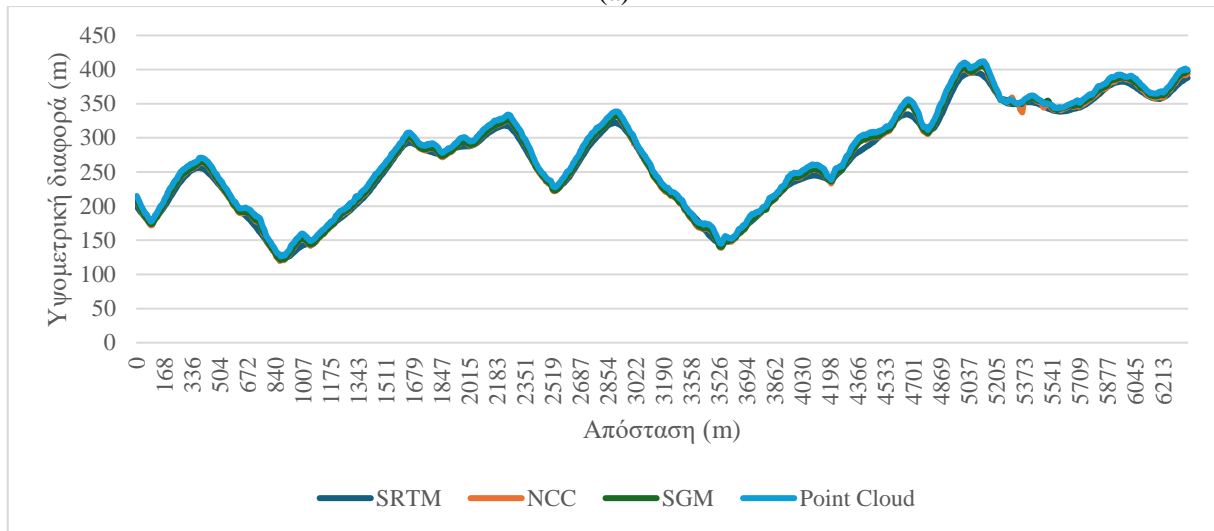
Σχήμα 5.94: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-2

- **Sardinia, Ιταλία (WorldView-3)**

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM του δορυφόρου WorldView-3 σε μια ευθεία γραμμή μήκους 6.31 km, παρατηρείται ότι τα υψομετρικά προφίλ ταυτίζονται πλήρως μεταξύ τους, εκτός από ένα σημείο προς το τέλος της διαδρομής (5,224 m - 5,441 m).



(a)

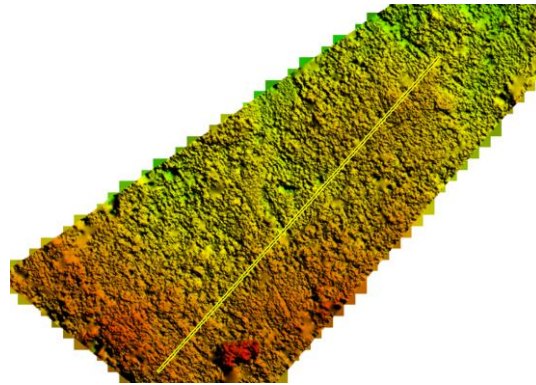


(b)

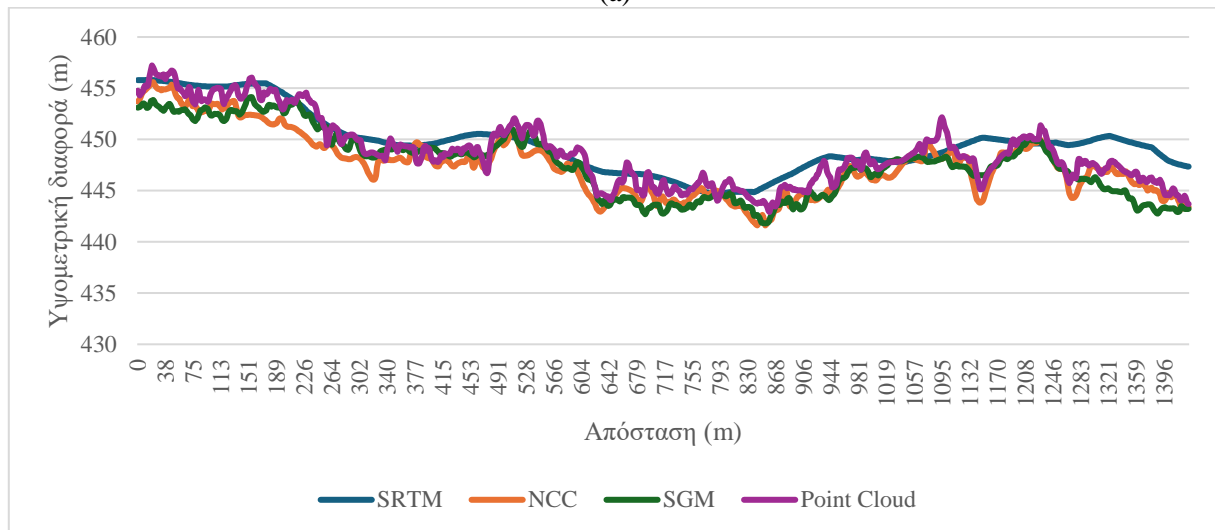
Σχήμα 5.95: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων - WorldView-3

- **Seia, Πορτογαλία (SkySat)**

Συγκρίνοντας τα υψομετρικά προφίλ των παραγόμενων DEM των δορυφόρων SkySat σε μια ευθεία γραμμή μήκους 1.39 km, παρατηρείται ότι τα υψομετρικά προφίλ δεν ταυτίζονται καλά μεταξύ τους. Ενώ φαίνεται να ακολουθούν σε κάποια μέρη της διαδρομής την πορεία του υποβάθρου, υπάρχουν πάρα πολλές εξάρσεις και βυθίσεις, οι οποίες προκύπτουν κυρίως από θόρυβο.



(a)



(b)

Σχήμα 5.96: Σύγκριση υψομετρικού προφίλ όλων των μεθόδων – SkySat

6. Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Έχοντας εξάγει κάθε δυνατό αποτέλεσμα με χρήση όλων των διαθέσιμων μεθόδων από τα δεδομένα των δορυφορικών εικόνων, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση μεταξύ των παραγόμενων DSM και DTM από τα δυο λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.

6.1. Σύγκριση λογισμικών

Όσον αφορά τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας από τα στερεοζεύγη των δορυφορικών εικόνων, αξίζει να αναφερθεί ότι και τα δυο έδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, χωρίς να προκύψει κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα κατά τη διάρκεια της όλης διαδικασίας.

Η διαδικασία είναι αρκετά πιο «οπτική» στο Metashape Professional, καθώς υπάρχει η δυνατότητα προβολής κάθε σταδίου που πραγματοποιείται, από την αραιή και την πυκνή συνταύτιση, τη δημιουργία του 3D μοντέλου μέχρι και την εξαγωγή του DEM, ενώ είναι εφικτή η οποιαδήποτε επεξεργασία σε point cloud ή 3D επιφάνειες. Στο Catalyst Earth Professional οι διαδικασίες που μπορούν να προβληθούν είναι η προβολή της κατανομής των GCPs και TPs στις εικόνες του στερεοζεύγους, η προβολή των επιπολικών εικόνων και η εξαγωγή του DEM, όπου εκεί είναι δυνατή και η επεξεργασία του.

Σχετικά με τη χρονική διάρκεια που χρειάστηκε για κάθε διαδικασία, ο χρόνος ποικίλει ανάλογα με την έκταση που καλύπτει το στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων, καθώς και από την χωρική τους ανάλυση. Η πλήρης διαδικασία, η οποία ξεκινάει με την μετατροπή των εικόνων στον κατάλληλο μορφότυπο και συνεχίζει με την εισαγωγή των εικόνων στα λογισμικά, την ενδιάμεση επεξεργασία τους (εύρεση ομολογιών/φωτοσταθερών, δημιουργία επιπολικών εικόνων, δημιουργία point cloud/3D mesh) και καταλήγει στην παραγωγή των DSM/DTM διήρκησε περίπου 2 ώρες για μικρές περιοχές, όπως αυτές των δορυφόρων WorldView-1, WorldView-3 και SkySat, ενώ έφτασε μέχρι και περίπου τις 12 ώρες για μεγάλες περιοχές όπως αυτές των δορυφόρων SPOT 6, Pleiades, Pleiades Neo.

6.2. Σύγκριση μεθόδων εξαγωγής DEM

Συγκρίνοντας τους αλγόριθμους και τις μεθόδους που ακολουθήθηκαν στην παρούσα μελέτη, παρατηρήθηκαν τα εξής:

Οι αλγόριθμοι NCC και SGM που χρησιμοποιεί το Catalyst Earth δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, ωστόσο υπάρχει αρκετός θόρυβος, ειδικά στην περίπτωση του NCC, ενώ αξίζει να αναφερθεί πως ο SGM έδωσε πολύ εσφαλμένα αρχικά αποτελέσματα (προ των διορθώσεων) συγκεκριμένα σε περιοχές με παρουσία νερού.

Η μέθοδος εξαγωγής DEM με χρήση point cloud και του 3D μοντέλου που προσφέρει το Metashape Professional έδωσαν σε γενικές γραμμές αρκετά καλύτερα αποτελέσματα τα οποία δεν είχαν το μέγεθος του θορύβου που είχαν εκείνα από το Catalyst Earth Professional. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε μέθοδος είχε διαφορετικό υψομετρικό εύρος σε κάθε περιοχή, το οποίο μπορεί να έφτανε ακόμα και τα μερικές δεκάδες μέτρα ανά περίπτωση.

Σαφώς, εάν υπήρχε διαθέσιμο υπόβαθρο αναφοράς DSM θα μπορούσαν να προκύψουν επιπλέον συμπεράσματα από τις συγκρίσεις, καθώς οι μετατροπές από DSM σε DTM ειδικά σε έντονα αστικά περιβάλλοντα με ψηλά κτήρια δεν είχαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση στο συγκεκριμένο θέμα. Ωστόσο, όσον αφορά τα DTM, σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα με τις μικρότερες υψομετρικές διαφορές σε σχέση με τα υπόβαθρα αναφοράς προέκυψαν από τη μέθοδο SGM του Catalyst Earth Professional.

6.3. Σύγκριση along-track με across-track στερεοζεύγη εικόνων

Σχετικά με το είδος του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων (along-track stereo και across-track stereo), φανερά καλύτερα αποτελέσματα παρήχθησαν από τις along-track stereo εικόνες. Γενικότερα, παρατηρήθηκε ότι τα στερεοζεύγη από along-track λήψεις (SPOT 6, Pleiades Neo, GeoEye-1 και WorldView-1) είχαν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικά μεγαλύτερο πλήθος GCPs και TPs και στα δυο λογισμικά, ενώ το συνολικό τους σφάλμα ήταν μικρότερο.

Στο αποτέλεσμα αυτό βοηθάει το γεγονός ότι στις along-track λήψεις οι παράμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων είναι παρεμφερείς, ενώ ιδιαίτερα σημαντική είναι η ομοιομορφία της ραδιομετρίας των εικόνων, καθώς το ότι λαμβάνονται με διαφορά μόλις μερικών δευτερολέπτων εγγυάται ότι δεν θα υπάρχουν έντονες αποκλίσεις μεταξύ των εικόνων.

7. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Με την ολοκλήρωση των συγκριτικών αναλύσεων για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται παρακάτω τα συμπεράσματα που εξάγονται βάσει των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει.

7.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαδικασία της εξαγωγής DEM από δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης, μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις μεθόδους και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στα εμπορικά λογισμικά Catalyst Earth Professional και Metashape Professional. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν πολύ αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση όλων των διαθέσιμων μεθόδων εξαγωγής DEM, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ τους ως προς την ποιότητα απόδοσης της υψομετρικής πληροφορίας και αξιολογήθηκαν έχοντας ως υπόβαθρο αναφοράς DTM από το Ελληνικό Κτηματολόγιο και το SRTM για να παρατηρηθούν οι οποιεσδήποτε αστοχίες ή λάθη.

Σχετικά με τα αποτελέσματα των DSM και DTM, αξίζει να αναφερθεί ότι όσα προέκυψαν ήταν αρκετά ικανοποιητικά, ωστόσο υπήρχαν και περιπτώσεις με αστοχίες σε σύγκριση με υπόβαθρα αναφοράς. Τα αίτια των αστοχιών ποικίλουν, καθώς κάθε στερεοζεύγος απεικονίζει διαφορετικό περιβάλλον και προέρχεται από διαφορετικό αισθητήρα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις και από διαφορετική εποχή. Σημαντική ήταν η περίπτωση της εξαγωγής DEM από τριπλό στερεοζεύγος (tri-stereo) δορυφορικών εικόνων, όπου η πρόσθετη ναυτική λήψη δίνει επιπλέον πληροφορία για περιοχές με έντονες αποκρύψεις όπως το αστικό περιβάλλον των εν λόγω εικόνων και έχει ως αποτέλεσμα DSM αρκετά πιο λεπτομερές σε σχέση με ένα απλό στερεοζεύγος.

Όσον αφορά τα εμπορικά λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, αξίζει να αναφερθεί ότι και τα δυο μπορούν να αποδώσουν πάρα πολύ καλά τη γήινη επιφάνεια, ενώ κάθε ένα είχε τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του.

Ωστόσο, πέραν των αστοχιών και των σφαλμάτων που μπορεί να προέκυψαν στην παρούσα μελέτη, αξίζει να σημειωθεί πως είναι πραγματικά εντυπωσιακό το μέγεθος της πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί από εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί από δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται εκατοντάδες χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης.

7.2. Μελλοντική έρευνα

Αξίζει να πραγματοποιηθεί μια πιο ενδελεχής έρευνα σχετικά με τους αλγόριθμους και τις μεθόδους που ακολουθήθηκαν στην παρούσα μελέτη, καθώς υπήρξαν περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα αντικρούονταν με τα όσα αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το αντικείμενο της παραγωγής DEM από δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης έχει μεγάλο περιθώριο εξέλιξης και βελτίωσης, καθώς αφενός οι περισσότεροι δορυφορικοί οίκοι έχουν προγραμματίσει στο άμεσο μέλλον την εκτόξευση νέων δορυφόρων με ανάλυση αισθητήρα κάτω από το ένα μέτρο και αφετέρου οι αλγόριθμοι με τους οποίους γίνεται η παραγωγή των ΨΥΜ γίνονται ολοένα και πιο αξιόπιστοι ως προς την ακρίβεια και την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, θα μπορούσε να υλοποιηθεί μια σύγκριση along-track και across-track στερεοζευγών στην ίδια περιοχή ενδιαφέροντος, όπως επίσης και σύγκριση στερεοζευγών stereo και tri-stereo, προκειμένου να εντοπισθούν τυχόν αδυναμίες και πλεονεκτήματα σε κάθε μέθοδο.

Όσον αφορά τα λογισμικά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πολλές μέθοδοι εξαγωγής DEM από δορυφορικές εικόνες, οι οποίες υλοποιούνται σε λογισμικά ανοικτού κώδικα. Το θετικό με τη χρήση λογισμικών ανοικτού κώδικα έναντι των εμπορικών λογισμικών είναι η διαφάνεια που υπάρχει σχετικά με τις μεθοδολογίες που ακολουθούνται σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Επίσης, υπάρχουν πλέον πολλοί state-of-the-art αλγόριθμοι εξαγωγής 3D από δορυφορικές εικόνες οι οποίοι χρησιμοποιούν νευρωνικά δίκτυα και τεχνικές μηχανικής μάθησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να αναβαθμίσουν κατά πολύ την όλη διαδικασία και ενδεχομένως να δώσουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις πιο συμβατικές μεθόδους.

Βιβλιογραφία - Αναφορές - Διαδικτυακές πηγές

- [1] The New Yorker, "The Origins of Aerial Photography," [Online]. Available: <https://www.newyorker.com/culture/photo-booth/origins-aerial-photography>. [Accessed September 2024].
- [2] Canadian Geographic, "Throwback Thursday: A history of aerial photography," [Online]. Available: <https://canadiangeographic.ca/articles/throwback-thursday-a-history-of-aerial-photography/>. [Accessed September 2024].
- [3] The National Archives, "Aerial Photography and the First World War," [Online]. Available: <https://blog.nationalarchives.gov.uk/aerial-photography-first-world-war/>. [Accessed September 2024].
- [4] Maxar, "IKONOS The first high-resolution commercial imaging satellite," [Online]. Available: <https://microsites.maxar.com/ikonos20/#first-image>. [Accessed September 2024].
- [5] NASA, "What are SmallSats and CubeSats?," [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/>. [Accessed September 2024].
- [6] European Space Agency, "Types of orbits," 30 March 2020. [Online]. Available: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits. [Accessed September 2024].
- [7] L. Qiao, C. Rizos and A. Dempster, "Design and Analysis of Satellite Orbits for the Garada Mission," in *International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium*, Sydney, NSW, Australia, 2011.
- [8] Γ. Α. Σκιάνης, Κ. Γ. Νικολακόπουλος and Δ. Α. Βαϊόπουλος, *Τηλεπισκόπηση*, Αθήνα: ΕΚΔΟΤΙΚΟΣ ΟΜΙΛΟΣ ΙΩΝ, 2012.
- [9] iptsat, "High and Very High Resolution Data," [Online]. Available: <https://www.iptsat.com/en/high-and-very-high-resolution-data/>. [Accessed September 2024].
- [10] D. Keith, "Coastal and Estuarine Waters: Optical Sensors and Remote Sensing for Management," in *Encyclopedia of Natural Resources - Water and Air - Vol II*, Taylor & Francis Group, 2014, p. 564.
- [11] Π. Δελτσίδης, "Ανάπτυξη Μοντέλου Γεωμετρικής Διόρθωσης Δορυφορικών Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης," Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2016.
- [12] EZ-pdh, "Satellite Photogrammetry," Ezekiel Enterprises, LLC, New Smyrna Beach, Florida, 2001.
- [13] A. O. Ok, "Accuracy Assessment of the DEM and Orthoimage Generated from ASTER," 2005.

-
- [14] Maxar Technologies, "Our Constellation," [Online]. Available: <https://www.maxar.com/maxar-intelligence/constellation>. [Accessed August 2024].
- [15] European Space Agency, "SkySat Instruments," [Online]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/skysat>. [Accessed August 2024].
- [16] K. Jacobsen, "MAPPING WITH SKYSAT IMAGES," in *XXIV ISPRS Congress (2022 edition)*, Nice, France, 2022.
- [17] Y. Furukawa and J. Ponce, "Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis," in *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007)*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2007.
- [18] B. Zitova and J. Flusser, "Image registration methods: a survey," vol. 21, pp. 977-1000, 2003.
- [19] H. Hirschmuller, "Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 328-341, 2007.
- [20] S. Devika, S. S. Ramakrishnan, A. S. R. K. V. Murali Mohan and B. Sadasiva Rao, "Development and Implementation of Rational Polynomial Coefficient Algorithms for Georeferencing CARTOSAT-1 Data," in *Symposium of ISPRS Commission IV*, Goa, India, 2006.
- [21] R. Mari, C. de Francis, E. Meinhardt-Llopis, J. Anger and G. Facciolo, "A Generic Bundle Adjustment Methodology for Indirect RPC Model Refinement of Satellite Imagery," *Image Processing On Line*, vol. 11, pp. 344-373, 2021.
- [22] P. L. Guth, A. Van Niekerk, C. H. Grohmann, J.-P. Muller, L. Hawker, I. V. Florinsky, D. Gesch, H. I. Reuter, V. Herrera-Cruz, S. Riazanoff, C. López-Vázquez, C. C. Carabajal, C. Albinet and P. Strobl, "Digital Elevation Models: Terminology and Definitions," *Remote Sensing MDPI*, vol. 13, no. 18, 2021.
- [23] I. N. Χατζόπουλος, Γεωχωροπληροφορική ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2018.
- [24] NASA, "Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)," [Online]. Available: <https://eosps.nasa.gov/missions/shuttle-radar-topography-mission>. [Accessed October 2024].
- [25] M. F. Abd Rahman, A. H. Md Din, M. R. Mahmud and M. F. Pa'suya, "A Review on Global and Localised Coverage Elevation Data Sources for Topographic Application," in *8th International Conference on Geomatics nad Geospatial Technology (GGT 2022)*, Shah Alam, Malaysia, 2022.
- [26] NASA, "Global Digital Elevation Model," [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/image-article/global-digital-elevation-model/>. [Accessed October 2024].
- [27] European Space Agency, "ESA Online Dissemination," [Online]. Available: <https://tpm-ds.esa.int/oads/access/collection>. [Accessed September 2024].

- [28] European Space Agency, "eo cat," [Online]. Available: <https://eocat.esa.int/sec/#data-services-area>. [Accessed September 2024].
- [29] AIRBUS Defence and Space, "Pléiades Neo Tri-Stereo - Marseille, France," [Online]. Available: <https://intelligence.airbus.com/imagery/sample-imagery/pleiades-neo-tristereo-marseille/>. [Accessed September 2024].
- [30] ESRI, "Data to support Reality Mapping satellite imagery DSM generation tutorial," [Online]. Available: <https://esri-rasterdev.maps.arcgis.com/home/item.html?id=83d7bef430544ce8af8bf93ad22653fa>. [Accessed September 2024].
- [31] E. Panagiotakis, N. Chrysoulakis, V. Charalampopoulou and D. Poursanidis, "Validation of Pleiades Tri-Stereo DSM in Urban Areas," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, no. 3, 2018.
- [32] AIRBUS, "Our Optical and Radar Satellite Imagery," [Online]. Available: <https://intelligence.airbus.com/imagery/our-optical-and-radar-satellite-imagery/>. [Accessed August 2024].
- [33] AIRBUS Defence and Space Intelligence, "Pleiades Neo User Guide," August 2024.
- [34] R. Perko, H. Raggam and P. M. Roth, "Mapping with Pleiades—End-to-End Workflow," *Remote Sensing MDPI*, vol. 11, no. 17, 2019.
- [35] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, Corfu, 1999.
- [36] K. S. Sanjay, D. N. S., P. S. T., G. K. B. and K. S. P., "Rational Polynomial Modelling for CARTOSAT-1 Data," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 2008.
- [37] European Environment Agency, "Europe coastline shapefile," [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-coastline-for-analysis-1/gis-data/europe-coastline-shapefile>. [Accessed September 2024].
- [38] PCI Geomatics, "Catalyst DEM Extraction - Satellite Tutorial," [Online]. Available: <https://catalyst.earth/tutorial/dem-extraction-satellite-2/>. [Accessed September 2024].
- [39] Agisoft LLC, "Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.1," [Online]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf. [Accessed September 2024].
- [40] eoPortal, "SPOT-6 and SPOT-7 (Azersky)," [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/spot-6-7#spacecraft>. [Accessed September 2024].
- [41] AIRBUS Defence and Space Intelligence, "SPOT Imagery User Guide".
- [42] B. Stular, S. Eichert and E. Lozic, "Airborne LiDAR Point Cloud Processing for Archaeology. Pipeline and QGIS Toolbox," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 3225, 2021.

-
- [43] Planet Developers, "SkySat Overview," [Online]. Available: <https://developers.planet.com/docs/data/skysat/>. [Accessed September 2024].
- [44] eoPortal, "Pleiades-HR (High-Resolution Optical Imaging Constellation of CNES)," [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/pleiades>. [Accessed October 2024].
- [45] eoPortal, "Ikonos-2," [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/ikonos-2>. [Accessed October 2024].
- [46] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2nd ed., Springer, 2022, p. 1232.
- [47] W. Yang, X. Li, B. Yang and Y. Fu, "A Novel Stereo Matching Algorithm for Digital Surface Model (DSM) Generation in Water Areas," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 5, 2020.
- [48] S. M. Smith and J. M. Brady, "SUSAN-A New Approach to Low Level Image Processing," *International Journal of Computer Vision*, vol. 23, no. 1, pp. 45-78, 1997.
- [49] S. B. Sukhvasi, S. B. Sukhvasi, K. Elleithy, S. Abuzneid and A. Elleithy, "CMOS Image Sensors in Surveillance Systems Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 2, 2021.

