



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

**Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την
παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της
Ιωάννας Κωσταρά

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :

Βασιλεία Καραθανάση, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
Ιωάννας Κωσταρά

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :
Βασιλεία Καραθανάση, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 8 Ιανουαρίου 2015.

.....
Β. Καραθανάση
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Δ. Αργιαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Κ. Καρατζαλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιανουάριος 2015

Copyright © Ιωάννα Κωσταρά, 2015
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 το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Γεωπληροφορική» και έχει ως θέμα την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας σε ραντάρ δορυφορικές απεικονίσεις συνθετικού ανοίγματος (SAR). Στόχος ήταν η μελέτη του συγκεκριμένου θέματος όσον αφορά το θεωρητικό του μέρος, δηλαδή η ανάλυση των μεθόδων που εφαρμόζονται στα SAR δεδομένα για την παραγωγή DEM με την τεχνική της Συμβολομετρίας καθώς και η εφαρμογή και αξιολόγηση της συμβολομετρίας και της τεχνικής των μωσαϊκών στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως την κυρία Βασιλεία Καραθανάση, η οποία ήταν και η επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά της. Οι κατευθύνσεις της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας, η επιστημονική και ηθική υποστήριξη και το αμέριστο ενδιαφέρον της ήταν βασικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση και την επιτυχή έκβαση του συγκεκριμένου θέματος.

Θερμές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω επίσης, στο σύνολο του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης για την τεχνική και επιστημονική βοήθεια που προσέφεραν, οποιαδήποτε στιγμή και αν χρειάστηκε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ειδικά τον υποψήφιο διδάκτορα Κλεάνθη Καραμβάση, για τη διαρκή βοήθεια του σε όλα τα τεχνικά ζητήματα που προέκυψαν. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. για τη δωρεάν παραχώρηση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου της περιοχής μελέτης.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Πρόλογος - Ευχαριστίες | 6 |
| Περιεχόμενα..... | 7 |
| Πίνακας Εικόνων..... | 9 |
| Λίστα Πινάκων..... | 10 |
| Πίνακας Σχημάτων..... | 10 |
| Περίληψη..... | 11 |
| Abstract..... | 12 |
| 1. Εισαγωγή..... | 13 |
| 1.1 Σκοπός της εργασίας..... | 14 |
| 1.2 Παρουσίαση κεφαλαίων εργασίας..... | 14 |
| 2. Επιστημονική Μέθοδος- Ανασκόπηση..... | 16 |
| 2.1 Τεχνική της συμβολομετρίας..... | 16 |
| 2.2 Βασικές αρχές και περιορισμοί της συμβολομετρίας..... | 17 |
| 2.3 Επαναληπτική Συμβολομετρία..... | 21 |
| 2.4 Συμβολομετρική διαδικασία SAR απεικονίσεων..... | 22 |
| 3. Δεδομένα..... | 25 |
| 3.1 SAR Απεικονίσεις..... | 25 |
| 3.2 Βοηθητικό Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους..... | 31 |
| 3.3 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Αξιολόγησης | 31 |
| 4. Επεξεργασία Δεδομένων..... | 33 |
| 4.1 Εισαγωγή δεδομένων..... | 33 |
| 4.2 Υπολογισμός Διανύσματος Βάσης..... | 35 |
| 4.3 Δημιουργία διαγράμματος κροσσών συμβολής με τη χρήση DEM αναφοράς..... | 37 |
| 4.4 Φιλτράρισμα συμβολογράμματος και δημιουργία της εικόνας συνάφειας..... | 39 |
| 4.5 Αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης..... | 43 |
| 4.6 Επαναπροσδιορισμός της τροχιακής θέσης των δορυφόρων..... | 45 |
| 4.7 Μετατροπή φάσης σε υψόμετρο (παραγωγή DEM)- Γεωκωδικοποίηση | 46 |
| 5. Αξιολόγηση παραγόμενων DEM..... | 49 |
| 6. Μωσαϊκά DEM..... | 55 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 6.1. Δημιουργία Μωσαϊκών DEM..... | 55 |
| 6.2. Αξιολόγηση Μωσαϊκών DEM..... | 58 |
| 7. Συμπεράσματα..... | 62 |
| 8. Βιβλιογραφία..... | 64 |
| Ελληνική Βιβλιογραφία..... | 64 |
| Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία..... | 64 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... | 67 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β..... | 78 |

Πίνακας Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1: Επαναληπτική συμβολομετρία | 22 |
| Εικόνα 2: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVI SAT..... | 26 |
| Εικόνα 3: Ψηφιακό Μοντέλο Αναφοράς (ASTER)..... | 31 |
| Εικόνα 4: Αποτέλεσμα (slc) της ENVISAT ASAR APS απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 25 Νοεμβρίου 2004..... | 34 |
| Εικόνα 5: Πάνω παρουσιάζεται η κύρια εικόνα (20040131) του set 5, κάτω αριστερά το συμβολόγραμμα πριν την αφαίρεση του «όρου της επίπεδης Γης» και κάτω δεξιά το συμβολόγραμμα μετά την αφαίρεση του «όρου επίπεδης Γης» με την χρήση του DEM ASTER 30m..... | 39 |
| Εικόνα 6: Αριστερά παρουσιάζεται το συμβολόγραμμα πριν την χρήση του φίτρου Goldstein και δεξιά μετά την χρήση του φίλτρου..... | 41 |
| Εικόνα 7: Τμήμα της εικόνας συνάφειας του set 4, σε διαβάθμιση του γκρι. Όπου μαύρο αντιστοιχεί σε $\gamma=0$ και λευκό σε $\gamma=1$ | 42 |
| Εικόνα 8: Εικόνα Αποκατεστημένης φάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού 6..... | 45 |
| Εικόνα 9: Παραγόμενο DEM του συμβολομετρικού ζευγαριού 6..... | 47 |
| Εικόνα 10: Από το παραγόμενο DEM του set 1 έχει αφαιρεθεί το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 51 |
| Εικόνα 11: Από το παραγόμενο DEM του set 3 έχει αφαιρεθεί το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 52 |
| Εικόνα 12: Από το παραγόμενο DEM του set 4 έχει αφαιρεθεί το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. | 52 |
| Εικόνα 13: Από το παραγόμενο DEM του set 5 έχει αφαιρεθεί το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 53 |
| Εικόνα 14: Από το παραγόμενο DEM του set 6 έχει αφαιρεθεί το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 53 |
| Εικόνα 15: Μωσαϊκό από το σύνολο των παραγόμενων DEM με την χρήση του μέσου όρου..... | 56 |
| Εικόνα 16: Μωσαϊκό από τα παραγόμενα DEM των set 3,5,6 με την χρήση του μέσου όρου..... | 56 |
| Εικόνα 17: Μωσαϊκό από το σύνολο των παραγόμενων DEM με την χρήση βαρών..... | 57 |
| Εικόνα 18: Μωσαϊκό από τα παραγόμενα DEM των set 3,5,6 με την χρήση βαρών..... | 58 |
| Εικόνα 19: Διαφορά Μωσαϊκού από όλα τα παραγόμενα DEM με την χρήση μέσου όρου από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 59 |
| Εικόνα 20: Διαφορά Μωσαϊκού από τα παραγόμενα 3,5,6 με την χρήση μέσου όρου από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 60 |
| Εικόνα 21: Διαφορά Μωσαϊκού από όλα τα παραγόμενα DEM με την χρήση βαρών | |

| | |
|--|----|
| από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 60 |
| Εικόνα 22: Διαφορά Μωσαϊκού από τα παραγόμενα 3,5,6 με την χρήση βαρών από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 61 |

Λίστα Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 : Τύποι και χαρακτηριστικά δεδομένων ENVISAT ASAR..... | 28 |
| Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά του Envisat..... | 30 |
| Πίνακας 3: Επιλεγμένα συμβολομετρικά ζεύγη | 37 |
| Πίνακας 4: Μέση τιμή Συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι | 42 |
| Πίνακας 5: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα..... | 46 |
| Πίνακας 6: Στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν από την σύγκριση των παραγόμενων DEM με το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..... | 50 |
| Πίνακας 7: Σύγκριση ΜΤΣ με διάνυσμα βάσης, χρονική αποσυσχέτιση, ύψος ασάφειας..... | 50 |

Πίνακας Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1..... | 19 |
| Σχήμα 2: Συμβολομετρική διαδικασία | 24 |
| Σχήμα3 : Η έννοια της αποκατάστασης της φάσης | 43 |

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της Συμβολομετρίας ραντάρ απεικονίσεων για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ - DEM). Περιοχή μελέτης της εργασίας καθορίστηκε ο Νομός Αττικής.

Η συμβολομετρία είναι μία τεχνική της Τηλεσκοπήσης, η οποία με την χρήση της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο ραντάρ εικόνων συνθετικού ανοίγματος (SAR) δημιουργεί DEM μεγάλης ακρίβειας. Αποτελεί μία από τις πιο σύγχρονες τεχνικές απόκτησης υψομετρικής πληροφορίας σε μεγάλης έκτασης περιοχές.

Η εφαρμογή των βημάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας έγινε σε 6 ζεύγη SAR απεικονίσεων του δορυφόρου ENVISAT ASAR. Συνολικά είχαμε 19 SAR απεικονίσεις σε μορφή SLC, εκ των οποίων 3 είναι τύπου APS με πόλωση HH+VV, 1 τύπου APS με πόλωση HH+HV και 15 τύπου IMS με πόλωση HH. Από αυτές τις 19 απεικονίσεις και αφού υπολογίστηκε το διάνυσμα βάσης για κάθε ένα δυνατό ζευγάρι καταλήξαμε στην χρήση μόνο 6 ζευγαριών για την δημιουργία DEM. Η συμβολομετρική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την χρήση του Λογισμικού SARscape. Ως Ψηφιακό Μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το DEM από τον δορυφόρο ASTER (ακρίβειας 30 μέτρων). Το φιλτράρισμα του συμβολογράμματος έγινε με τον αλγόριθμο Goldstein. Για την αποκατάσταση της φάσης εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Region Growing ορίζοντας το κατώφλι της συνάφειας στην τιμή 0.1. Αποτέλεσμα της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι η δημιουργία DEM από κάθε ζεύγος εικόνων.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν 4 μωσαϊκά DEM. Για την δημιουργία των μωσαϊκών, το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε DEM από συμβολομετρικά ζευγάρια είτε με την χρήση της μέσης τιμής για κάθε εικονοστοιχείο είτε με συνένωση τμημάτων των παραγόμενων DEM με χρήση βαρών στις τιμές υψομέτρου του κάθε DEM, με βάση το τυπικό σφάλμα του αντίστοιχου αρχείου ακρίβειας. Εμείς επιλέξαμε να δημιουργήσουμε DEM με τη χρήση και των δύο μεθόδων, ώστε εν συνεχεία να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα.

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των παραγόμενων DEM υπολογίστηκε το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (ΜΤΣ) σε σχέση με το DEM αναφοράς το οποίο μας δόθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Abstract

This thesis discusses the use of SAR interferometry technique in order to generate accurate Digital Elevation Model (DEM) in the region of Attica in Greece.

SAR interferometry is a remote sensing technique which exploits the phase difference of two SAR images in order to generate accurate DEM. It is one of the most modern techniques for obtaining altitude information for wide-scale areas.

In this study the interferometric processing was done using 6 pairs of SAR images of ENVISAT ASAR satellite. In total we had 19 SAR images in SLC format from which 3 are APS type with HH+VV polarization, 1 APS type with HH+HV polarization and 15 IMS type with HH polarization. From these acquisitions and after calculating the baseline for each pair we chosen 6 pairs to generate DEM. The interferometric processing was applied on each pair using SARscape software. The flat earth component removed by using ASTER DEM. The interferogram filtering performed with Goldstein algorithm. Finally, for the phase unwrapping the Region Growing algorithm was applied while we define the coherence threshold to the value 0.1. Result of the interferometric process is the creation of one DEM per interferometric pair.

Using the resulted DEMs, we then generated 4 mosaic DEMs. For the mosaic creation SARscape has 2 available algorithms. One is using the average of the pixel values as height and the other is calculating the height per pixel on the basis of the coherence and baseline using the precision file that is generated during the interferometric processing of each pair of images. In this study we used both algorithms in order to compare the results.

The produced DEMs were evaluated by calculating the root mean square error (RMSE) and were compared to a reference DEM that it was provided from NATIONAL CADASTRE & MAPPING AGENCY S.A..

1. Εισαγωγή

Ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) αποτελεί θεμελιώδους σημασίας πληροφορία για οποιοδήποτε τρισδιάστατη γεω-χωρική δραστηριότητα. Τα DEM χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, και αποτελούν το σύνηθες υπόβαθρο για την δημιουργία ψηφιακών χαρτών. Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη δημιουργία DEM είναι πάρα πολλές για διαφορετικές εφαρμογές και σε διάφορες κλίμακες, λεπτομέρεια και ακρίβεια.

Ο πρωτεύοντας στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμβολομετρικής διαδικασίας (InSAR) για την δημιουργία DEM. Μετά την περιγραφή και την εφαρμογή των βημάτων της τεχνικής παρουσιάζονται οι δυνατότητες χρήσης της καθώς και τα προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν.

Η τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να χρησιμοποιήσει εικόνες ραντάρ είτε από δορυφορικά συστήματα είτε από αερομεταφερόμενα. Η διαδικασία παραγωγής του DEM και στις δύο περιπτώσεις είναι η ίδια. Η διαφορά έγκειται στην ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος η οποία οφείλεται κυρίως στα χαρακτηριστικά του ραντάρ που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί η διαδικασία παραγωγής DEM από δορυφορικά συστήματα. Οι μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να παραχθούν DEM είναι:

- ✓ Με τη χρήση GPS ή αλτιμετρίας και κατ' επέκταση την χωρική παρεμβολή μεταξύ των σημείων γνωστών υψομέτρων.
- ✓ Μέσω μεθόδων κλασσικής τοπογραφίας.
- ✓ Με τη χρήση εικόνων τηλεπισκόπησης:
 1. Στερεογραμμετρία (Stereogrammetry).
 - LIDAR
 - Με τη χρήση αεροφωτογραφιών (φωτογραμμετρία)
 - VIR imagery
 - Radargrammetry
 2. Συμβολομετρία ραντάρ (InSAR).

Παλαιότερες μέθοδοι παραγωγής DEM συχνά εμπλέκουν την παρεμβολή ισούψων καμπυλών από ψηφιακούς χάρτες που μπορεί να έχουν παραχθεί με μεθόδους κλασσικής τοπογραφίας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ακόμα σε ορεινές περιοχές, όπου η τεχνική της συμβολομετρίας δεν είναι πάντα ικανοποιητική.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της τεχνικής της συμβολομετρίας για την παραγωγή DEM με την χρήση SAR απεικονίσεων του δορυφόρου ENVISAT/ASAR. Μέσα από την περιγραφή και την εφαρμογή των επιμέρους βημάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας αναδεικνύονται οι δυνατότητες χρήσης της αλλά και οι αδυναμίες της. Μετά την ολοκλήρωση της συμβολομετρικής διαδικασίας γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς και περαιτέρω επεξεργασία αυτών αυτών με την τεχνική των μωσαϊκών, για την βελτιστοποίηση του τελικού αποτελέσματος.

Αναλυτικότερα, στόχοι της εργασίας αποτελούν, αρχικά η θεωρητική μελέτη και κατανόηση της τεχνικής της συμβολομετρίας. Στη συνέχεια η παρουσίαση του δορυφορικού συστήματος ENVISAT/ASAR και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Ακολούθως, η παρουσίαση και εφαρμογή της συμβολομετρικής διαδικασίας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα επιμέρους βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν και στα χαρακτηριστικά εκείνα που θα καθορίσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Παρουσιάζονται οι τρόποι αξιολόγησης της συμβολομετρικής διαδικασίας καθώς και του παραγόμενου DEM. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας καθώς επίσης ερευνώνται τρόποι βελτίωσης των αποτελεσμάτων μέσα από την δημιουργία Μωσαϊκών.

1.2 Παρουσίαση κεφαλαίων εργασίας

Η εργασία είναι χωρισμένη σε 8 κεφάλαια. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της συγκεκριμένης εργασίας. Γίνεται αναφορά στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) και στον τρόπο παρασκευής τους καθώς επίσης παρουσιάζονται οι στόχοι της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η επιστημονική μέθοδος που χρησιμοποιείται. Αναλύονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες της Συμβολομετρίας SAR απεικονίσεων, περιγράφονται οι βασικές αρχές της τεχνικής και παρατίθενται τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Το κεφάλαιο 3 αποτελεί την παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της συμβολομετρικής διαδικασίας. Γίνεται περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων του δορυφορικού συστήματος από το οποίο προέρχονται οι SAR απεικονίσεις. Τέλος αναφερόμαστε στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται διεξοδικά τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Σε κάθε ένα βήμα αναλύεται η σκοπιμότητά του, ο τρόπος εφαρμογής του και τα

επιμέρους χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψιν καθώς και οι παράμετροι εκείνες που θα πρέπει να καθοριστούν ώστε να αποφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα στο τελικό προϊόν.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται η παρουσίαση των DEM που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο από τα διαφορετικά ζεύγη εικόνων SAR και πραγματοποιείται η αξιολόγηση τους.

Στο κεφάλαιο 6 μας απασχολεί το θέμα της δημιουργίας μωσαϊκών DEM. Αναλύεται ο τρόπος δημιουργίας μωσαϊκών και παρουσιάζονται τα τελικά προϊόντα και η αξιολόγησή τους.

Το κεφάλαιο 7 αποτελεί την ανασκόπηση της συγκεκριμένης εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Τέλος, το κεφάλαιο 8 παραθέτει την βιβλιογραφία και τις επιστημονικές έρευνες που βοήθησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

2. Επιστημονική Μέθοδος- Ανασκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνική της συμβολομετρίας δίνοντας έμφαση στην επιστημονική της βάση, τις δυνατότητες της καθώς και τους περιορισμούς που παρουσιάζει.

2.1 Τεχνική της συμβολομετρίας

Οι συμβολομετρικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε SAR δεδομένα. Η συμβολομετρία αρχικά αναπτύχθηκε ως μία εναλλακτική μέθοδος για την αντικατάσταση της στερεοσκοπικής μεθόδου με σκοπό την εξαγωγή σχετικού και απόλυτου υψομέτρου (Toulin και Frey, 2000). Εκμεταλλευόμενη την συνάφεια ενός ζεύγους SAR απεικονίσεων καθώς και των πλεονεκτημάτων των συστημάτων Radar και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων εξελίχθηκε σε μία εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδο παραγωγής DEM και στην απόδοση παραμορφώσεων του αναγλύφου.

Οι εικόνες SAR που αποκτώνται από τους δορυφόρους περιλαμβάνουν τιμές για τη φάση και το μέτρο των σημάτων που λαμβάνονται και αφορούν σε κάθε ένα εικονοστοιχείο της εικόνας. Για να δημιουργηθεί ένα συμβολόγραμμα απαιτούνται δύο εικόνες για την περιοχή μελέτης που αποκτώνται είτε από δύο δορυφόρους σε διαφορετικές γωνίες την ίδια στιγμή, (single-pass συμβολομετρία), είτε μπορεί να έχουν ληφθεί σε δύο διαφορετικές στιγμές στο χρόνο από τον ίδιο δορυφόρο ή από δύο σε διαφορετικές γωνίες, όπως στην περίπτωση των ERS-1 και ERS-2 (repeat-pass συμβολομετρία).

Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή των τροχιών) καλείται βάση και είναι το μέτρο του διανύσματος βάσης (interferometer baseline) ενώ η κάθετη προβολή της βάσης στην πλάγια απόσταση του ενός δορυφόρου καλείται κάθετη συνιστώσα της βάσης (perpendicular baseline).

Από τις δύο εικόνες υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των τιμών των φάσεων για κάθε εικονοστοιχείο και δημιουργείται το συμβολόγραμμα. Το συμβολόγραμμα παράγεται με τον πολλαπλασιασμό, της μιγαδικής τιμής του κάθε εικονοστοιχείου της μιας απεικόνισης επί τη συζυγή μιγαδική τιμή του αντίστοιχου εικονοστοιχείου στη δεύτερη απεικόνιση. Κατά συνέπεια, η φάση του συμβολογράμματος είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων (ESA, 2007). Η φάση ενός σημείου στο συμβολόγραμμα που προέκυψε από την διαφορά φάσης των δύο SAR απεικονίσεων ονομάζεται συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Το συμβολόγραμμα λοιπόν είναι μία εικόνα όπου σε κάθε pixel απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ των φάσεων δύο μικροκυματικών σημάτων. Αυτή η διαφορά φάσης οφείλεται στην απόσταση δορυφόρου- στόχου και στην καθυστέρηση της φάσης λόγω οπισθοσκέδασης του στόχου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω

σχέση (Εξίσωση 1):

$$\psi = \varphi_2 - \varphi_1 = [4\pi\lambda^{-1}r_2 + \varphi_2] - [4\pi\lambda^{-1}r_1 + \varphi_1]$$

Εξίσωση 1

Όπου r_1 και r_2 η απόσταση κάθε στόχου από τους δορυφόρους 1 και 2 αντίστοιχα, και φ_1 , φ_2 η φάση λόγω οπισθοσκέδασης του στόχου στην 1^η και 2^η απεικόνιση αντίστοιχα. Οι τελευταίες μπορούν να έχουν διαφορετικές τιμές μόνο εάν υπάρχει χρονική και χωρική αποσυσχέτιση μεταξύ των δύο εικόνων. Αν δεχτούμε ότι δεν υπάρχει χωρική και χρονική αποσυσχέτιση, τότε προκύπτει ότι $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ και η διαφορά φάσης δίνεται από την Εξίσωση 2.

$$\psi = 4\pi\lambda^{-1}(r_2 - r_1)$$

Εξίσωση 2

Η χρησιμότητα λοιπόν, ενός συμβολογράμματος προέρχεται από το γεγονός ότι οι διαφορές αυτές στη φάση αντιστοιχούν στο υψόμετρο του αντικειμένου στην επιφάνεια της γης. Αυτό αποτελεί και την βασική αρχή της συμβολομετρίας. Η διαφορά φάσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως είναι η χωρική και χρονική αποσυσχέτιση των απεικονίσεων. Εάν αυτοί οι παράγοντες εξαιρεθούν τότε μπορεί να ληφθεί μία ακριβής μέτρηση του τοπογραφικού υψομέτρου της γήινης επιφάνειας.

2.2 Βασικές αρχές και περιορισμοί της συμβολομετρίας

Προτού αναφερθούμε στις βασικές αρχές και τους περιορισμούς που διέπουν την τεχνική της συμβολομετρίας θα πρέπει να τονίσουμε πως η ακρίβεια και η ορθότητα και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την συνέπεια με την οποία ακολουθούνται τα στάδια της διαδικασίας. Τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας θα πρέπει να διέπονται από μεθοδικότητα και συστηματικότητα. Επιπλέον, η ποιότητα των διαθέσιμων SAR απεικονίσεων στην εκάστοτε μελέτη και η ποσότητα αυτών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η συμβολομετρία μπορεί να εφαρμοστεί κάτω από προϋποθέσεις. Για την επαναλαμβανόμενη (repeat-pass) συμβολομετρία η απόσταση μεταξύ των δύο γραμμών πτήσης (η βάση) δεν πρέπει να είναι πάνω από μια ορισμένη τιμή (περίπου 1 km για τον ERS). Οι δορυφόροι SAR σχεδιάζονται για να επαναλάβουν τις τροχιές τους κυκλικά και επομένως η πρώτη προϋπόθεση ικανοποιείται. Άλλοι παράμετροι

που πρέπει να ικανοποιηθούν είναι η κλίση του εδάφους να μην είναι πολύ απότομη, το μήκος κύματος των σημάτων να είναι ικανοποιητικό (μεγάλο) και η διακριτική ικανότητα (resolution) του εικονοστοιχείου να είναι καλή. Όλα τα παραπάνω εξαρτώνται από την απόσταση των δύο λήψεων. Ένας περαιτέρω παράγοντας που πρέπει να ικανοποιηθεί είναι ότι το έδαφος πρέπει να παρατηρηθεί από την ίδια κατεύθυνση δηλαδή και οι δύο γραμμές πτήσεων να είναι ανερχόμενες ή κατερχόμενες. Επίσης, δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί η συμβολομετρία σε ζεύγη εικόνων που ανήκουν σε διαφορετικούς δορυφόρους με διαφορετικά χαρακτηριστικά αισθητήρων (παραδείγματος χάριν με διαφορετικό μήκος κύματος ή πόλωση).

Όπως προαναφέρθηκε η εφαρμογή τη συμβολομετρίας απαιτεί την ύπαρξη τουλάχιστον δύο SAR απεικονίσεων σε μορφή SLC που έχουν ληφθεί από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις και έχουν την ίδια διεύθυνση πόλωσης. Η πρώτη SAR απεικόνιση ονομάζεται κύρια (master/reference) και η δεύτερη ονομάζεται δευτερεύουσα (slave/match). Το κύριο προϊόν της συμβολομετρίας είναι το διάγραμμα κροσσών συμβολής ή συμβολόγραμμα (Interferogram) το οποίο προκύπτει από πολλαπλασιασμό μιας SAR απεικόνισης με το συζυγή μιγαδικό της άλλης. Στην εικόνα του συμβολογράμματος που προκύπτει, το συμβολομετρικό πλάτος είναι το γινόμενο των πλατών των δύο SAR απεικονίσεων, ενώ η συμβολομετρική φάση είναι η διαφορά των φάσεων των δύο SAR απεικονίσεων.

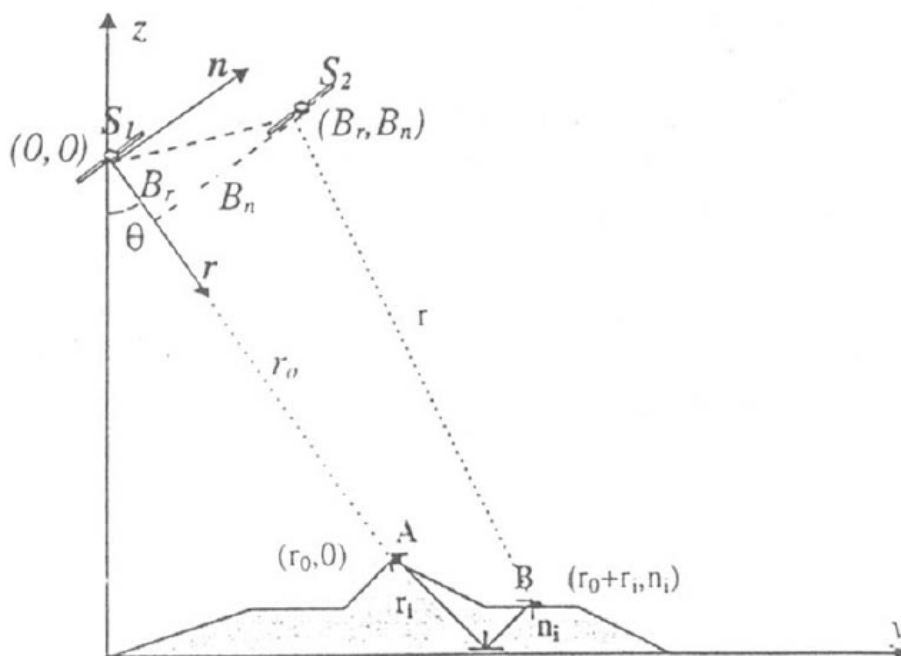
Τα συμβολογραφήματα υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Οι πιο σημαντικοί είναι η χρονική και η γεωμετρική-χωρική αποσυσχέτιση (decorrelation). Η θέση και ο προσανατολισμός των αντικειμένων στο έδαφος μπορούν να αλλάξουν κατά τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων (χρονική αποσυσχέτιση), κάτι τέτοιο αποτελεί σημαντική πηγή σφαλμάτων για την repeat-pass συμβολομετρία. Όσον αφορά τη γεωμετρική αποσυσχέτιση και αυτή μπορεί να περιορίσει τη χρήση της συμβατικής συμβολομετρίας και οφείλεται στη γεωμετρία της τεχνικής. Όταν γίνει η ταύτιση των απεικονίσεων κάθε εικονοστοιχείο δεν αντιστοιχεί στην ίδια ακριβώς μοναδιαία περιοχή μελέτης. Τα συμβολογράμματα επηρεάζονται επίσης από δύο είδη ασάφειας. Κατ' αρχάς, οι διαφορές φάσης δίνονται ως μέρη των κύκλων (όλα τα εικονοστοιχεία έχουν τη φάση μεταξύ 0 και 1), όχι ως ακέραιοι αριθμοί των κύκλων. Αυτό πρακτικά αντιμετωπίζεται με τον υπολογισμό της διαφοράς της συμβολομετρικής φάσης δύο γειτονικών στόχων. Ακολουθεί περιγραφή του τρόπου υπολογισμού της διαφοράς της συμβολομετρικής φάσης μεταξύ δύο γειτονικών στόχων (Καραθανάση, 2003).

Η φάση του διαγράμματος των κροσσών συμβολής, που προκύπτει από την φαίρεση των φάσεων των δυο απεικονίσεων, είναι άμεσα συνδεδεμένη μόνο με τη διαφορά των αποστάσεων δεκτών-στόχου:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$$

Εξίσωση 3

Για την διευκόλυνση της εξέτασης της γεωμετρικής πλευράς του φαινομένου, ορίζεται ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή (0,0) τη θέση του πρώτου δορυφόρου, άξονα r αυτόν που ορίζεται από την πλάγια απόσταση του πρώτου δορυφόρου και τον κάθετο σε αυτόν άξονα n. Η θέση του δεύτερου δορυφόρου δίνεται στο νέο σύστημα από τις συντεταγμένες (B_r, B_n). Ορίζονται ακόμα τα σημεία A(r₀, 0) και B(r₀+r_i, n_i), δηλαδή η τομή (A) του άξονα r με το έδαφος και ένα άλλο σημείο (B) του εδάφους αντίστοιχα (σχήμα 1).



Σχήμα 1

Η απόσταση r μεταξύ σημείου B και της θέσης του δεύτερου δορυφόρου δίνεται από τη σχέση:

$$r = \sqrt{(r_0 + r_i - B_r)^2 + (n_i - B_n)^2}$$

Εξίσωση 4

Η διαφορά του μονοπατιού μετάδοσης Δr μεταξύ των δυο δορυφόρων και του σημείου B μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση σειράς Taylor με γνωστό το διάνυσμα εκκεντρότητας των δορυφόρων (B_r, B_n):

$$\Delta r = \frac{\partial r}{\partial B_n} \Big|_{r_i=B_r=n_i=B_n=0} \cdot B_n + \frac{\partial r}{\partial B_r} \Big|_{r_i=B_r=n_i=B_n=0} \cdot B_r$$

Εξίσωση 4

Η σχέση (4) δίνει την φάση ενός σημείου στο διάγραμμα κροσσών συμβολής και ονομάζεται συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Ο σκοπός της συμβολομετρίας είναι να ανασύρει την γνώση της απόστασης δέκτη-στόχου από την συμβολομετρική φάση των σημείων. Η φάση αυτή όμως δεν είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμη γιατί όπως αναφέρθηκε παραπάνω βρίσκεται μεταξύ των ορίων $[0, 2\pi)$, άρα δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες για την απόσταση δέκτη-στόχου. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τον υπολογισμό της διαφοράς της συμβολομετρικής φάσης δυο γειτονικών σημείων. Στην περίπτωση των A και B η διαφορά της συμβολομετρικής τους φάσης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \psi_{AB} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r)$$

Εξίσωση 5

Η παραγωγή της σχέσης (4) δίνει τον παράγοντα $\Delta(\Delta r)$:

$$\Delta(\Delta r) = \frac{B_n n_i}{r_0}$$

Εξίσωση 6

Οπότε η διαφορά της συμβολομετρικής φάσης δυο σημείων του διαγράμματος κροσσών συμβολής δίνεται από την σχέση:

$$\Delta \psi_{AB} = \frac{4\pi B_n n_i}{\lambda r_0}$$

Εξίσωση 7

Η σχέση (7) σχετίζει τη διαφορά συμβολομετρικής φάσης δυο σημείων και της γεωμετρίας της περιοχής μελέτης και περιέχει τα εξής σημαντικά στοιχεία:

Ο παράγοντας n_i που βρίσκεται στον αριθμητή δείχνει ότι η συμβολομετρική φάση είναι ανάλογη της απόστασης των σημείων στη διεύθυνση n . Η διεύθυνση αυτή είναι κάθετη στη διεύθυνση των αποστάσεων (range) της απεικόνισης. Η οριζοντιογραφική διαφορά δηλαδή δυο σημείων έχει ως αποτέλεσμα έναν όρο φάσης. Ο όρος αυτός ονομάζεται όρος «επίπεδης γης» (flat earth) και αφαιρείται σε συγκεκριμένο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας για να απλοποιήσει την διαδικασία αποκατάστασης της φάσης στο αντίστοιχο στάδιο. Ο παράγοντας B_n ονομάζεται κάθετη γραμμή βάσης (perpendicular baseline) (Καραθανάση, 2003).

Δεύτερον, τα συμβολογράμματα παρέχουν τις σχετικές αλλαγές της φάσης, και όχι τις απόλυτες αλλαγές, αυτό σημαίνει ότι πρέπει ήδη να ξέρουμε ένα σημείο με μηδενική παραμόρφωση και να αναφέρουμε σε αυτό όλες τις μετρήσεις.

Όπως προαναφέρθηκε η ποσότητα των διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων Radar και κατ' επέκταση ο αριθμός των συμβολομετρικών ζευγαριών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο παραγόμενο προϊόν. Πιο συγκεκριμένα προτιμάται η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων συμβολομετρικών ζευγαριών SAR με λήψεις από διαφορετικές οπτικές γωνίες με σκοπό να μειώνεται η εισαγωγή σφαλμάτων λόγω της γεωμετρίας και της φύσης των αντικειμένων-στόχων. Επιπλέον η χρήση πολλαπλών ζευγαριών SAR απεικονίσεων αντισταθμίζει σφάλματα που προέρχονται από επιδράσεις της ατμόσφαιρας.

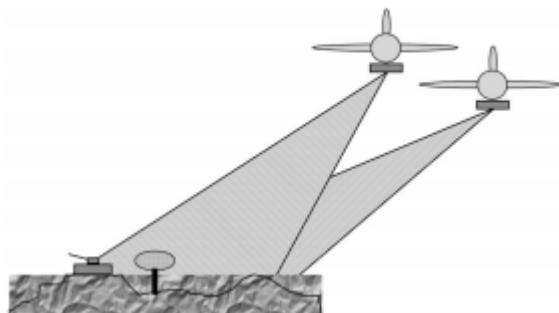
Η συμβολομετρία διακρίνεται σε τέσσερα είδη ανάλογα με τον τρόπο λήψης των απεικονίσεων και την διάταξη των κεραιών (Καραθανάση, 2003).

- ✓ Απλή συμβολομετρία
- ✓ Επαναληπτική συμβολομετρία ή κατά πλάτος συμβολομετρία
- ✓ Κατά μήκος συμβολομετρία (along-track interferometry)
- ✓ Διαφορική συμβολομετρία

2.3 Επαναληπτική Συμβολομετρία

Η επαναληπτική συμβολομετρία πραγματοποιείται με την χρήση εικόνων SAR που προέρχονται από την ίδια κεραία ενός συστήματος RADAR. Ο δορυφόρος χρειάζεται να σαρώσει τουλάχιστον δύο φορές την ίδια περιοχή (για την ακρίβεια κοντινές περιοχές σχεδόν παράλληλες) με ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία λήψης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της επαναληπτικής συμβολομετρίας είναι η ακριβής γνώση της τροχιάς πτήσης του εκάστοτε

δορυφορικού συστήματος. Η γεωμετρία λήψης των δύο SAR απεικονίσεων είναι ίδια με την γεωμετρία λήψης της κατά πλάτος συμβολομετρίας με τη μόνη διαφορά ότι το διάνυσμα βάσης προκύπτει από την διαφορά στις θέσεις λήψης των SAR απεικονίσεων και όχι από τη διαφορά των θέσεων των δύο κεραιών στο αεροσκάφος. Η λήψη των SAR απεικονίσεων της επαναληπτικής συμβολομετρίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1 : Επαναληπτική συμβολομετρία

Πηγή : Ritchards, 2007

2.4 Συμβολομετρική διαδικασία SAR απεικονίσεων

Το αρχικό στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει τον έλεγχο της διαθεσιμότητας SAR εικόνων για την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η επιτυχία της τεχνικής εξαρτάται από την ποιότητα των SAR δεδομένων, όπως αυτή ορίζεται από την σταθερότητα της συχνότητας Doppler μεταξύ των λήψεων. Όπως έχει προαναφερθεί ένας ακόμη παράγοντας που καθορίζει την επιτυχία της συμβολομετρικής διαδικασίας και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι το σύνολο των διαθέσιμων απεικονίσεων.

Η παρουσία θορύβου στα δεδομένα έχει άμεσες συνέπειες στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι στα αρχικά στάδια της επεξεργασίας επικεντρώνονται στην απομάκρυνση του θορύβου. Το βασικό μέρος της επεξεργασίας πραγματοποιείται με εξειδικευμένα λογισμικά τα οποία αναλύουν την απόκριση των φάσεων σε κάθε σημείο-στόχο με σκοπό να διαχωριστούν οι επιμέρους συνεισφορές στη φάση. Γίνεται απομάκρυνση του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικών επιδράσεων, και άλλων παραμέτρων χρονικής αποσυσχέτισης στην συμβολομετρική φάση.

Πιο συγκεκριμένα τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι τα εξής (Καραθανάση, 2003):

Βήμα 1: Προεπεξεργασία των SAR απεικονίσεων για την απομάκρυνση συστηματικού θορύβου

Βήμα 2: Συμπροσαρμογή των SAR εικόνων (Coregistration). Η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων θα πρέπει να έχει ακρίβεια κοντά στο 1/8 του εικονοστοιχείου και καλύτερη.

Βήμα 3: Δημιουργία διαγράμματος κροσσών συμβολής (Interferogram Generation).

Βήμα 4: Φιλτράρισμα διαγράμματος κροσσών συμβολής (Filtering) με σκοπό την βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών.

Βήμα 5: Αφαίρεση όρου επίπεδης γης (Flat earth removal) με σκοπό την αφαίρεση της ανεπιθύμητης φάσης λόγω της οριζοντιογραφικής διαφοράς των σημείων.

Βήμα 6: Αποκατάσταση φάσης (Phase Unwrapping) με σκοπό την απόδοση των ακέραιων κύκλων που χάθηκαν κατά τη δημιουργία του διαγράμματος κροσσών συμβολής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή της φάσης να μπορεί να πάρει την πραγματική της τιμή, πέραν δηλαδή του διαστήματος $[-\pi, 0, \pi]$.

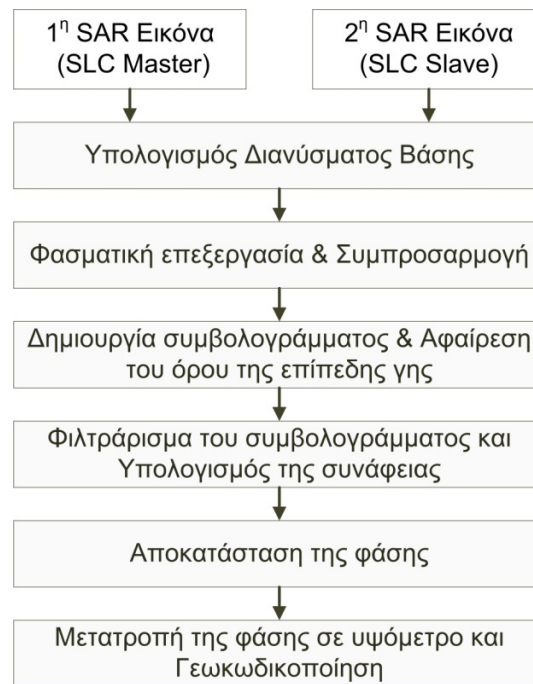
Βήμα 7: Δημιουργία εικόνας συνάφειας.

Βήμα 8: Επαναπροσδιορισμός της βάσης (Baseline Refinement).

Βήμα 9: Μετατροπή φάσης σε υψόμετρο (Phase to height Conversion) με βάση την γεωμετρία των απεικονίσεων και τη γνώση των τροχιακών δεδομένων.

Βήμα 10: Γεωκωδικοποίηση. Τα σχετικά υψόμετρα μπορούν να τοποθετηθούν σε κάναβο επιθυμητού βήματος, σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς.

Όλα τα στάδια της συμβολομετρίας παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 1.



Σχήμα 2: Συμβολομετρική διαδικασία
Πηγή: Χουσιάφης, 2011

3. Δεδομένα

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στις ιδιότητες του δορυφορικού συστήματος RADAR από το οποίο προέρχονται τα δεδομένα.

3.1 SAR Απεικονίσεις

Η εφαρμογή των βημάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας έγινε σε 6 ζεύγη SAR απεικονίσεων του δορυφόρου ENVISAT ASAR. Συνολικά είχαμε 19 SAR απεικονίσεις σε μορφή SLC (μη γεωμετρικά διορθωμένες), εκ των οποίων 3 είναι τύπου APS με πόλωση HH+VV, 1 τύπου APS με πόλωση HH+HV και 15 τύπου IMS με πόλωση HH. Από αυτές τις 19 απεικονίσεις και αφού υπολογίστηκε το διάνυσμα βάσης για κάθε ένα δυνατό ζευγάρι καταλήξαμε στην χρήση μόνο 6 ζευγαριών για την δημιουργία DEM.

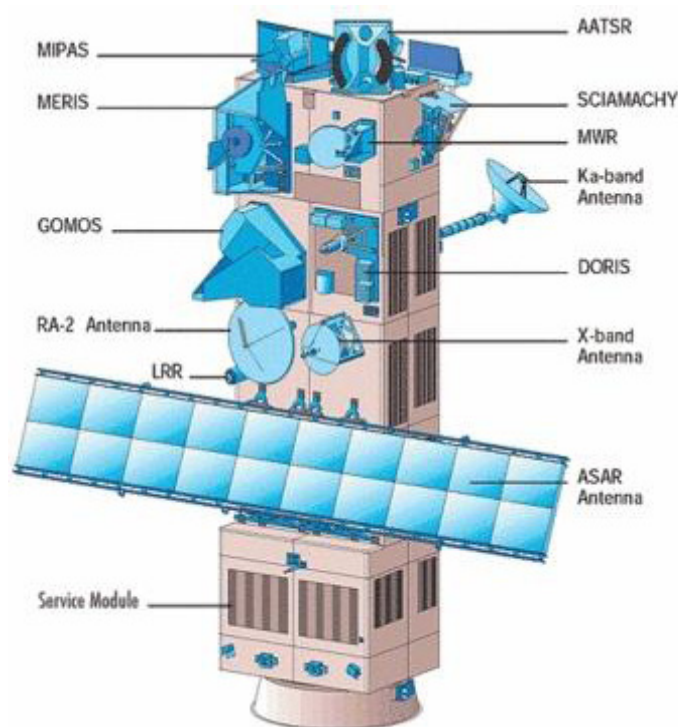
Οι SAR απεικονίσεις διατέθηκαν από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών το Ε.Μ.Π. Η χρονική περίοδος που καλύπτουν είναι από Φεβρουάριο του 2003 έως και τον Δεκέμβριο του 2004.

Ο ENVISAT είναι το μεγαλύτερο διαστημικό σκάφος παρατήρησης της γης που έχει κατασκευαστεί ποτέ και τέθηκε σε τροχιά το 2002. Φέρει δέκα οπτικούς και μικροκυματικούς δέκτες για να παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς παρατήρησης και ελέγχου της γήινης επιφάνειας, της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των πάγων. Τα δεδομένα του Envisat παρέχουν έναν πλούτο πληροφοριών σχετικά με τη λειτουργία του γήινου συστήματος, καθώς και πληροφορίες που δίνουν στους ερευνητές την δυνατότητα να μελετήσουν τους παράγοντες που συμβάλουν στην κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, τα στοιχεία που επιστρέφονται από το σύνολο των οργάνων καταγραφής του διευκολύνουν την ανάπτυξη διάφορων λειτουργικών και εμπορικών εφαρμογών.



Ο ENVISAT φέρει δέκα συμπληρωματικά όργανα για την παρατήρηση παραμέτρων που ποικίλουν από το θαλάσσιο γεωειδές ως και εικόνες εκπομπής αερίων υψηλής ανάλυσης (Εικόνα 2). Συγκεκριμένα διαθέτει ένα RADAR (SAR) το ASAR που επιτρέπει την παραγωγή εικόνων υψηλής ανάλυσης, το RA-2 ένα αλτίμετρο που χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση της τοπογραφίας των ωκεανών (βαθυμετρία), τον εντοπισμό των πάγων και τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των ανέμων με σκοπό τη συνεισφορά στην πρόγνωση του καιρού, το DORIS-NG με το οποίο γίνεται η διόρθωση του ύψους της τροχιάς του δορυφόρου, το φασματόμετρο MERIS που μετρά τις ιδιότητες του φωτός στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επιπλέον, το MWR ένα μικροκυματικό ραδιόμετρο το οποίο εκτελεί μετρήσεις στηλών υδρατμών, νεφών,

υγρασίας εδάφους, το AATSR, ένα ραδιόμετρο σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της συνέχειας των δεδομένων που αφορούν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και με το φωτόμετρο GOMOS να μετρά την περιεκτικότητα των συστατικών της ατμόσφαιρας. Τέλος, το συμβολόμετρο MIPAS και το φασματόμετρο SCIAMACHY μετρούν και αναλύουν τις εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα και τροπόσφαιρα-στρατόσφαιρα αντίστοιχα.



Εικόνα 2: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVIAT
(Πηγή: <https://earth.esa.int>)

Ο Envisat διαθέτει ένα προηγμένο σύστημα Radar Συνθετικού Ανοίγματος (ASAR), που λειτουργεί στην C-band. Αυτό εξασφαλίζει τη συνέχιση της συλλογής δεδομένων μετά τον ERS-2, παρά τη μικρή (31 MHz) κεντρική μετατόπιση συχνότητας. Το C κανάλι είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κανάλι σε αερομεταφερόμενα και διαστημικά μεταφερόμενα συστήματα RADAR.

Το κανάλι εκπομπής είναι ένα πολύ συγκεκριμένο χαρακτηριστικό των RADAR. Η ίδια επιφάνεια θα εμφανίζει ουσιαστικές και σημαντικές διαφορές αν ληφθεί για παράδειγμα στα κανάλια C και L. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια εξαιτίας της αλλαγής των χαρακτηριστικών του μήκους κύματος (π.χ. διεισδυτική ικανότητα) του κάθε καναλιού.

Το μήκος κύματος ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος είναι αυτό που θα καθορίσει το βάθος διείσδυσης του εκπεμπόμενου παλμού στη βλάστηση και στην επιφάνεια του

εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης. Είναι επόμενο ότι παλμοί που εκπέμπονται στο κανάλι Χ να ανακλώνται από το ανώτερο τμήμα της βλάστησης ή της επιφάνειας του εδάφους, ενώ οι παλμοί στο κανάλι L περνούν μέσα από το ανώτερο τμήμα της βλάστησης και ανακλώνται είτε από το εσωτερικό των δέντρων είτε από την επιφάνεια ή ακόμη και από το εσωτερικό του εδάφους. Η συμπεριφορά της οπισθοσκέδασης στο κανάλι C είναι λιγότερο προβλέψιμη. Συγκεκριμένα, εξαιτίας του φαινομένου της διάχυσης, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με σαφήνεια εάν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα προέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους ή από τη βλάστηση .

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του δορυφόρου και μετά την αρχική επεξεργασία από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (European Space Agency-ESA) προκύπτουν διάφοροι τύποι ASAR δεδομένων (Πίνακας 1). Ωστόσο, για να εκτελέσουμε τη συμβολομετρική διαδικασία θα πρέπει οι απεικονίσεις μας να είναι σε μορφή single look complex (slc format) και οι καταγεγραμμένες αποστάσεις να είναι αυτές που αναφέρονται στην πλάγια διεύθυνση. Από όλους τους τύπους δεδομένων, αυτοί που μας εξυπηρετούν είναι οι απεικονίσεις με τις ενδείξεις IMS και APS.

| Product ID | Product Name | Nominal Resolution (m) (range x azimuth) | Nominal Pixel Spacing (m) (range x azimuth) | Approx. Coverage (Km) (range x azimuth) |
|-------------------|--|---|--|--|
| IMP | Image Mode Precision | 30x30 | 12.5x12.5 | 56-100x100 |
| IMS | Image Mode Single Look Complex | 9x6 | natural | 56-100x100 |
| IMG | Image Mode high-resolution Ellipsoid Geocoded | 30x30 | 12.5x12.5 | 56-100x100 |
| IMM | Image Mode medium resolution | 150x150 | 75x75 | 56-100x100 |
| IMB | Image Mode Browse | 450x450 | 225x225 | 56-100x100 |
| APP | Alternating Polarisation Precision Image | 30x30 | 12.5x12.5 | 56-100x100 |
| APS | Alternating Polarisation Single Look Complex | 9x12 | natural | 56-100x100 |
| APG | Alternating Polarisation Mode high-resolution Ellipsoid Geocoded | 30x30 | 12.5x12.5 | 56-100x100 |
| APM | Alternating Polarisation Mode medium resolution | 150x150 | 75x75 | 56-100x100 |
| APB | Alternating Polarisation Mode Browse | 450x450 | 225x225 | 56-100x100 |
| WSM | Wide Swath Mode medium resolution | 150x150 | 75x75 | 400x400 |
| WSB | Wide Swath Mode Browse | 1800x1800 (approximately) | 900x900 | 400x400 |
| WVI | Wave Mode Imagette and Imagette Power Spectrum | 9x6 | natural | 5x5 |
| WVS | Wave Mode Image Spectra | N/A | N/A | 5x5 |
| GMI | Global Monitoring Mode Image | 1000x1000 | 500x500 | 400x400 |
| GMB | Global Monitoring Mode Browse | 2000x2000 | 1000x1000 | 400x400 |

Πίνακας 1 : Τύποι και χαρακτηριστικά δεδομένων ENVISAT ASAR
 (Πηγή: Asar Product Handbook, ESA 2007)

Ο δέκτης ASAR διαθέτει αυξημένη ικανότητα όσον αφορά την κάλυψη, το εύρος της συχνότητας των γωνιών, την πόλωση, καθώς και τις μεθόδους λειτουργίας του (ESA, 2007). Εκτός από το ASAR τα όργανα που διαθέτει ο δορυφόρος αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω.

- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS): καταγράφει την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από την γήινη επιφάνεια, τα σύννεφα και την συγκέντρωση χλωροφύλλης στους ωκεανούς και στα παράκτια δίκτυα.
- Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR): καταγράφει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Radar Altimeter 2 (RA-2): καταγράφει το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των ανέμων, την τοπογραφία της γης και της θάλασσας.
- Microwave Radiometer (MWR): Καταγράφει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών.
- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS): όργανο που χρησιμοποιείται για τον ακριβή εντοπισμό του δορυφόρου στο διάστημα.
- Global Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS): χρησιμοποιείται για την μέτρηση του όζοντος καθώς και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας.
- Michelson Inteferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS): χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας.
- Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY): καταγράφει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αέρια.
- Laser Retro-Reflector (LLR): Επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό της τροχιάς του δορυφόρου (ILRS/NASA και Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά του Envisat:

| Envisat-1 Parameters | |
|----------------------------------|--|
| Sponsor: | European Space Agency |
| Expected Life: | 5 years |
| Primary Applications: | remote sensing and environmental monitoring |
| Primary SLR Applications: | POD |
| COSPAR ID: | 200901 |
| SIC Code: | 6179 |
| NORAD SSC Code: | 27386 |
| Launch Date: | 01/03/02 |
| NP Bin Size: | 15 seconds |
| RRA Diameter: | 20 cm |
| RRA Shape: | hemispherical |
| Reflectors: | 9 corner cubes |
| Orbit: | circular, sun-synchronous polar |
| Inclination: | 98.54 degrees |
| Eccentricity: | 0 |
| Perigee: | 796 km |
| Period: | 100 minutes |
| Weight: | 8211 kg |

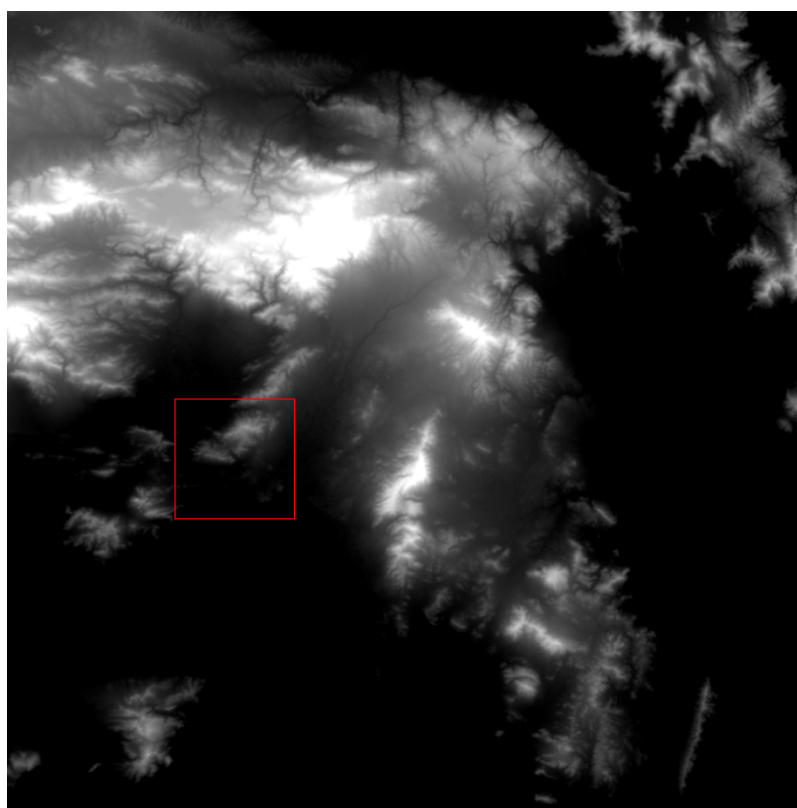
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά του Envisat
πηγή: ILRS/NASA

Κύριοι στόχοι του είναι:

- ✓ να υπάρξει συνέχεια των παρατηρήσεων που ξεκίνησε με τους δορυφόρους ERS
- ✓ να ενισχύσει την αποστολή των ERS, ειδικότερα των ωκεανών και των πάγων
- ✓ να επεκτείνει το φάσμα των παραμέτρων που παρατηρούνται, ώστε να καλυφθούν
- ✓ οι ανάγκες για τον εμπλουτισμό της γνώσης των παραγόντων που επηρεάζουν το περιβάλλον
- ✓ να συμβάλει σημαντικά στην εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών, ιδίως στο τομέα της ατμοσφαιρικής χημείας και των ωκεάνιων μελετών (συμπεριλαμβανομένης της θαλάσσιας βιολογίας).

3.2 Βοηθητικό Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Ως Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους αναφοράς, κατά τα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το DEM από τον δορυφόρο ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Η χωρική ανάλυση του DEM είναι 30m. Το συγκεκριμένο DEM δημιουργήθηκε από εικόνες του δορυφόρου ASTER που χρονολογούνται από ξεκίνημα της πορείας του έως και τον Αύγουστο του 2008. Το συγκεκριμένο DEM παρέχεται δωρεάν στο διαδίκτυο.



Εικόνα 3: Ψηφιακό Μοντέλο Αναφοράς (ASTER)

3.3 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τόσο των παραγόμενων DEM όσο και των μωσαϊκών, χρησιμοποιήθηκε DEM που δημιουργήθηκε με αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές μεθόδους από την Κτηματολόγιο Α.Ε. από λήψεις αεροφωτογραφιών κλίμακας περίπου 1:25.000 την περίοδο 2007-2009. Το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ έχει

μέγεθος εικονοστοιχείου 5m και υψομετρική ακρίβεια μικρότερη των 3.9m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Για το σύνολο των δεδομένων αξιολόγησης έγινε μετατροπή των υψομέτρων από ορθομετρικά σε γεωμετρικά, ενώ χρησιμοποιήθηκε ενιαίο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς το WGS 84 με προβολικό σύστημα αναφοράς την Παγκόσμια Μερκατορική προβολή στη ζώνη 34 βόρεια (UTM 34N/WGS84).

4. Επεξεργασία Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη συμβολομετρική διαδικασία στις SAR απεικονίσεις. Όλα τα βήματα της συμβολομετρίας πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό SARscape το οποίο αποτελεί επέκταση του λογισμικού ENVI. Σε κάθε στάδιο της τεχνικής αναλύονται όλες οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και πως αυτοί επηρεάζουν το τελικό παραγόμενο προϊόν.

4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Πριν ξεκινήσει η συμβολομετρική διαδικασία θα πρέπει όλα τα δεδομένα να εισαχθούν στο λογισμικό και να μετατρέπουν σε κατάλληλο format ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους.

Οι εικόνες SAR του δορυφόρου ENVISAT (ASAR) παραδίδονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) σε μορφή «.N1». Υπό αυτή τη μορφή δεν είναι δυνατή η επεξεργασία τους στο συγκεκριμένο λογισμικό, οπότε και είναι απαραίτητη η μετατροπή σε format αναγνωρίσιμο. Για την συμβολομετρική διαδικασία απαιτούνται εικόνες τύπου slc (Single Look Complex). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο εικόνες τέτοιου τύπου στο συγκεκριμένο δορυφορικό σύστημα αποτελούν οι εικόνες τύπου IMS και APS.

Για την μετατροπή¹ των εικόνων σε κατάλληλο format είναι απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων παραμέτρων. Αρχικά θα πρέπει να οριστεί ο δορυφόρος από τον οποίο προέρχονται τα δεδομένα (ENVISAT ASAR), στη συνέχεια ορίζεται ο τύπος της εικόνας (IMS, APS) και τέλος απαιτείται η εισαγωγή του αρχείου τροχιάς του δορυφόρου κατά την εκάστοτε λήψη (ASAR Doris file).

Όπως έχει προαναφερθεί η γνώση της ακριβούς τροχιακής θέσης του δορυφόρου αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες της συμβολομετρικής διαδικασίας. Τα αρχεία που φέρουν την τροχιακή πληροφορία είναι τα αρχεία DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Υπάρχουν δύο διαθέσιμοι τύποι τέτοιων αρχείων, τα αρχεία VOR και τα αρχεία POR. Τα πρώτα αποτελούν τα πιο ακριβή τροχιακά δεδομένα που μπορούμε να έχουμε, αλλά είναι διαθέσιμα τουλάχιστον ένα μήνα μετά τη λήψη και δεν είναι διαθέσιμα ελεύθερα. Ο δεύτερος τύπος αρχείων από την άλλη μεριά είναι διαθέσιμος ταυτόχρονα με την λήψη των δεδομένων. Για την συγκεκριμένη εργασία τα τροχιακά δεδομένα προήλθαν από το

1 Εντολή για την μετατροπή των εικόνων στο λογισμικό SARscape: Import Data→Standart Formats.

ερευνητικό κέντρο DEOS (Delft Institute for Earth-oriented Space Research). Τα αρχεία αυτά διατίθενται δωρεάν και μπορούν να ληφθούν άμεσα από το διαδίκτυο (<ftp://dutlru2.lr.tudelft.nl/pub/orbits/ODR.ENVISAT1/eigen-cg03c/>) . Τα τροχιακά δεδομένα από το ερευνητικό κέντρο DEOS έχουν πολύ καλή ακρίβεια της τάξης των 5-6 cm. Κάθε τέτοιο αρχείο περιέχει τη θέση της τροχιάς του δορυφόρου σε συνάρτηση με το χρόνο. Για κάθε ημερομηνία λήψης επιλέγουμε το αρχείο εκείνο με την πιο πρόσφατη ημερομηνία πριν την λήψη.

Μετά την εισαγωγή των SAR απεικονίσεων το λογισμικό τις μετατρέπει σε format slc και τις αποθηκεύει.



Εικόνα 4: Αποτέλεσμα (slc) της ENVISAT ASAR APS απεικόνισης με ημερομηνία λήψης 25 Νοεμβρίου 2004.

Εκτός από την εισαγωγή των δορυφορικών εικόνων στο λογισμικό θα πρέπει να γίνει και η εισαγωγή του βοηθητικού DEM ώστε να μετατραπεί σε κατάλληλο format για να είναι δυνατή η μετέπειτα χρήση του. Η εισαγωγή² ενός DEM στο SARscape δεν μπορεί να γίνει με κανέναν άλλο τρόπο εκτός από την εισαγωγή του ως αρχείο εικόνων και πιο συγκεκριμένα ως αρχείο .tiff. Κατά την εισαγωγή του DEM θα πρέπει να οριστούν τα ακόλουθα:

- ✓ Μονάδα Μέτρησης (Data Units). Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε DEM.
- ✓ Χαρτογραφικό Σύστημα Αναφοράς (Cartographic System). Στην προκειμένη ελλειψοειδές WGS 84, UTM 34.

Τα υψόμετρα του DEM θα πρέπει να αναφέρονται στο ελλειψοειδές και όχι στο γεωειδές και αυτό γιατί η γεωμετρία και η τροχιακή θέση των δορυφόρων καθορίζεται βάση του ελλειψοειδούς WGS 84.

4.2 Υπολογισμός Διανύσματος Βάσης

Σε αυτό το στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας υπολογίζεται το διάνυσμα βάσης μεταξύ των τροχιακών θέσεων του δορυφόρου κατά τις ημερομηνίες λήψης. Ο υπολογισμός του διανύσματος βάσης αποτελεί απαραίτητο βήμα της συμβολομετρίας καθώς εδώ θα αποφασιστεί πια ζευγάρια κρίνονται κατάλληλα για την επιτυχή εξαγωγή του DEM. Πρακτικά το διάνυσμα βάσης προκύπτει από τη διαφορά των παράλληλων τροχιών του δορυφόρου και αποτελεί ένα μετρό της αναμενόμενης συνάφειας των SAR απεικονίσεων ενός συμβολομετρικού ζευγαριού. Ανάλογα με τις διάφορες εφαρμογές της συμβολομετρίας επιλέγεται και το κατάλληλο διάνυσμα βάσης. Σε κάθε περίπτωση το διάνυσμα βάσης καθορίζεται σε σχέση με την κρίσιμη βάση (Critical Baseline). Ως κρίσιμη βάση ορίζεται η μέγιστη βάση για να είναι δυνατή η δημιουργία του συμβολογράμματος. Αν το διάνυσμα βάσης είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη βάση αυτό σημαίνει πως οι εικόνες του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους και κατ' επέκταση το παραγόμενο συμβολόγραμμα θα είναι καθαρός θόρυβος. Ο υπολογισμός της κρίσιμης βάσης γίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B_{cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r}$$

Εξίσωση 8

2 Εισαγωγή αρχείων tiff: SARscape→Import Data→Tiff.

Όπου, B_{cr} είναι η κρίσιμη βάση, λ το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου παλμού, R η απόσταση στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων, R_r η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων και θ η γωνία πρόσπτωσης (SARscape Help).

Όπως γίνεται αντιληπτό η βάση ενός συμβολομετρικού ζευγαριού πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη βάση για να είναι δυνατή η δημιουργία του συμβολογράμματος. Πρακτικά όμως επιλέγουμε η βάση να είναι μικρότερη από το μισό της κρίσιμης βάσης. Για την δημιουργία DEM επιθυμούμε να έχουμε μεσαία ή μεγάλη βάση (100-300m για τον δορυφόρο ENVISAT/ASAR) και αυτό γιατί βάσεις τέτοιου μεγέθους μας επιτρέπουν να ανιχνεύσουμε μικρότερες υψομετρικές διαφορές. Αντίθετα για την εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας επιλέγονται μικρότερες βάσεις ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση επιπλέον κροσσών συμβολής λόγω της τοπογραφίας της περιοχής μελέτης.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος της βάσης το λογισμικό μας δίνει δύο επιλογές. Η πρώτη αφορά στον υπολογισμό της βάσης μεταξύ δύο και μόνο εικόνων (baseline estimation). Για τον υπολογισμό του διανύσματος βάσης με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει να ορίσουμε μία εικόνα ως κύρια (master) και την άλλη ως δευτερεύουσα (slave). Συνήθως ως κύρια επιλέγεται η εικόνα εκείνη που απεικονίζει την μεγαλύτερη επιφάνεια της περιοχής μελέτης, με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται το ενδεχόμενο να επιλεγούν περιοχές που δεν υπάρχουν στην κύρια κατά το στάδιο της συμπροσαρμογής. Αν και οι δύο εικόνες εμφανίζουν την ίδια ή σχεδόν την ίδια τότε ως κύρια επιλέγεται η χρονικά προγενέστερη. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ πως ανεξάρτητα πια θα επιλεγεί ως κύρια απεικόνιση και πια ως δευτερεύουσα αυτή η ιεραρχία θα πρέπει να διατηρηθεί καθ' όλη τη διάρκεια της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Επειδή όμως κατά την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας είναι πιθανό να δουλεύουμε με πάνω από δύο SAR απεικονίσεις, όπως στην προκείμενη περίπτωση, το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα με την χρήση ειδικής φόρμουλας (multi-baseline estimation) να εκτελέσουμε τον υπολογισμό του διανύσματος βάσης στο σύνολο των εικόνων σε ένα βήμα³. Σε αυτή την περίπτωση κάθε εικόνα ορίζεται ως κύρια και υπολογίζεται το διάνυσμα βάσης σε σχέση με κάθε μία από τις υπόλοιπες εικόνες. Όλα τα πιθανά ζευγάρια με το υπολογισμένο διάνυσμα βάσης παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διανύσματα βάσης των επιλεγμένων συμβολομετρικών ζευγαριών για τα επόμενα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας. Εκτός από το διάνυσμα βάσης στην επιλογή των κατάλληλων ζευγαριών σημαντικό ρόλο έπαιξε και η χρονική διαφορά λήψης των δύο απεικονίσεων. Όσο μικρότερη η χρονική διαφορά των εικόνων τόσο αυξάνεται η πιθανότητα καλύτερου παραγόμενου DEM εξαιτίας της καλύτερης συνάφειας των εικόνων.

3 SARscape→Interferometry→Interferometric Tools→Multi Baseline Calculation.

| Set | Τύπος | Κύρια | Δευτερεύουσα | Διάνυσμα Βάσης | Χρονική διαφορά |
|-----|---------------------|----------|--------------|----------------|-----------------|
| 1 | APS(HH)- APS(HH) | 20041125 | 20041230 | 197,286 | 35 |
| 2 | IMS-APS(HH) | 20030410 | 20041125 | 209,57 | 595 |
| 3 | IMS-IMS | 20030705 | 20040515 | 188,021 | 315 |
| 4 | IMS-IMS | 20031227 | 20040410 | 136,051 | 105 |
| 5 | IMS-IMS | 20040131 | 20040410 | 163,669 | 70 |
| 6 | IMS-IMS | 20040515 | 20040619 | 300,048 | 35 |

Πίνακας 3: Επιλεγμένα συμβολομετρικά ζεύγη

Όπως προαναφέρθηκε και παρατηρείται και στον παραπάνω πίνακα η κρίσιμη βάση επιλέχθηκε να είναι ανάμεσα στο διάστημα 100-300m. Όσον αφορά τη χρονική διαφορά, η βιβλιογραφία αναφέρει πως είναι επιθυμητό να επιλέγονται συμβολομετρικά ζευγάρια με διαφορά όχι μεγαλύτερη από 500 ημέρες. Εμείς παρόλα αυτά επιλέξαμε και ένα ζευγάρι με μεγαλύτερη χρονική διαφορά με σκοπό να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα.

4.3 Δημιουργία διαγράμματος κροσμών συμβολής με τη χρήση DEM αναφοράς

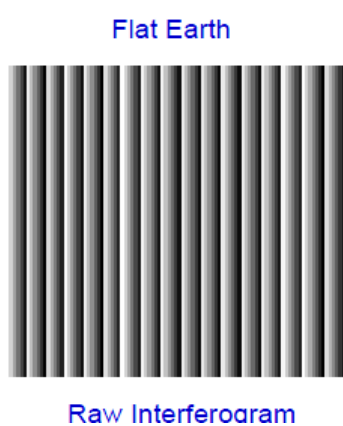
Στο βήμα αυτό της συμβολομετρικής διαδικασίας⁴ πραγματοποιείται η συμπροσαρμογή των εικόνων SAR και δημιουργείται το συμβολόγραμμα με τον πολλαπλασιασμό της μίας απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική της άλλης.

Η συμπροσαρμογή εξασφαλίζει ότι κάθε αντικείμενο-στόχος στην γήινη επιφάνεια αντιστοιχεί στο ίδιο εικονοστοιχείο των δύο SAR απεικονίσεων. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως η γεωμετρία της δευτερεύουσας απεικόνισης προσαρμόζεται στην γεωμετρία της κύριας. Αρχικά υπολογίζονται οι μετατοπίσεις στις δύο διευθύνσεις μεταξύ των δύο εικόνων ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι μετασχηματισμού που θα οδηγήσουν στη μετατροπή της γεωμετρίας της δευτερεύουσας απεικόνισης με βάση την γεωμετρία της κύριας απεικόνισης. Το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα υπολογισμού και αποθήκευσης των παραμέτρων μετασχηματισμού χωρίς να είναι αναγκαία η συμπροσαρμογή των εικόνων και κατ' επέκταση η δημιουργία του συμβολογράμματος.

Το παραγόμενο συμβολόγραμμα έχει καταγεγραμμένες όλες τις γεωμετρικές διαφορές μεταξύ του ζεύγους των απεικονίσεων. Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε ένα μεγάλο εύρος φαινομένων που λαμβάνουν χώρα τόσο στην γήινη επιφάνεια όσο και στην ατμόσφαιρα. Στόχος είναι να εντοπιστούν αυτά τα φαινόμενα και να αφαιρεθούν κατά τα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας ώστε να μείνει μόνο η γεωμετρική διαφορά

4 Εντολή SARscape→ Interferometry→1B-Interferometric Workflow (Multi Steps) →1-Interferogram generation

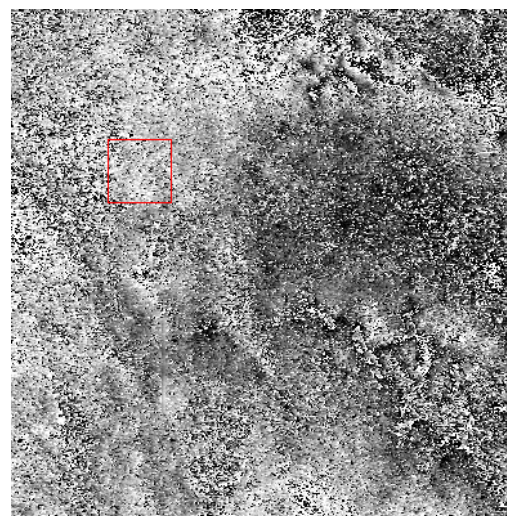
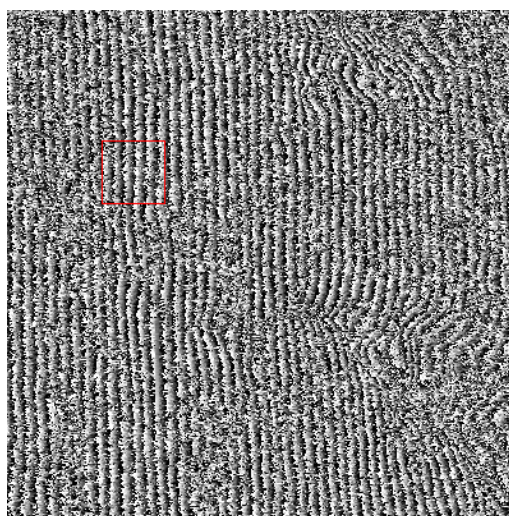
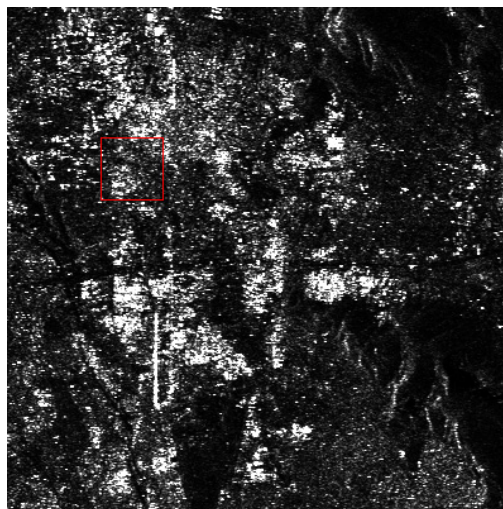
που οφείλεται στην τοπογραφία του εδάφους. Τα φαινόμενα αυτά έχουν να κάνουν με την τροχιά των δορυφόρων, την τοπογραφία, την χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων. Η μεγάλη χρονική διαφορά μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα είτε την μετακίνηση/ μετατόπιση του εδάφους είτε/και τις διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για το λόγο όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω αποφεύγονται συμβολομετρικά ζευγάρια με μεγάλη χρονική αποσυσχέτιση. Επιπλέον αν η περιοχή είναι σεισμογενής, αποφεύγεται να πραγματοποιείται η συμβολομετρική διαδικασία με χρήση συμβολομετρικών ζευγαριών όπου η ημερομηνίες λήψης των εικόνων είναι πριν και μετά ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός.



Αφού πραγματοποιηθεί η συμπροσαρμογή των εικόνων και δημιουργηθεί το διάγραμμα κροσμών συμβολής αφαιρείται εν συνεχεία ο «όρος της επίπεδης Γης». Υπάρχουν τρεις δυνατοί τρόποι για να πραγματοποιηθεί η αφαίρεση του «Όρου της επίπεδης γης». Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση σημείων επίγειου ελέγχου. Ο δεύτερος είναι με την χρήση ενός DEM αναφοράς, ενώ ο τρίτος αποτελεί συνδιασμό των δύο παραπάνω. Εάν η διαδικασία αυτή πραγματοποιηθεί με την χρήση σημείων επίγειου ελέγχου αυτά θα πρέπει να εντοπιστούν στην κύρια εικόνα και να είναι καλά διασκορπισμένα σε όλα την έκτασή της. Γενικά είναι επιθυμητό να επιλέγονται αρκετά σημεία επίγειου ελέγχου. Ο ελάχιστος αριθμός σημείων στο συγκεκριμένο λογισμικό είναι 7 (SARscape Help).

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας η αφαίρεση του «όρου της επίπεδης Γης» θα πραγματοποιηθεί με την χρήση DEM αναφοράς (ASTER). Σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται επίσης η συνθετική φάση (synthetic phase) και το DEM αναφοράς προβάλλεται στην διεύθυνση πλαγίων αποστάσεων (slant range DEM). Και τα δύο αυτά παραγόμενα χρησιμοποιούνται στα μετέπειτα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας. Τέλος παράγονται τα αρχεία multi-look των δύο απεικονίσεων. Τέλος να σημειωθεί πως σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο να οριστεί η αναλογία για την μεταβολή των διαστάσεων του εικονοστοιχείου στις δύο διευθύνσεις. Η αναλογία αυτή για δορυφορικές εικόνες του ENVISAT/ASAR είναι 5:1 (azimuth/range).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συμβολομετρικό ζευγάρι 5. Είναι προφανές πως ο αριθμός των κροσμών συμβολής μειώθηκε αρκετά μετά την αφαίρεση του «όρου επίπεδης Γης», πράγμα που θα διευκολύνει τα επόμενα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας.



Εικόνα 5: Πάνω παρουσιάζεται η κύρια εικόνα (20040131) του set 5, κάτω αριστερά το συμβολόγραμμα πριν την αφαίρεση του «όρου της επίπεδης Γης» και κάτω δεξιά το συμβολόγραμμα μετά την αφαίρεση του «όρου επίπεδης Γης» με την χρήση του DEM ASTER 30m.

4.4 Φιλτράρισμα συμβολογράμματος και δημιουργία της εικόνας συνάφειας.

Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται η εφαρμογή φίλτρου⁵ στο συμβολόγραμμα που έχει προκύψει από την αφαίρεση του «όρου της επίπεδης Γης» με σκοπό την αφαίρεση του θορύβου που προκαλείται από την μετατόπιση του φάσματος. Τα φασματικά φίλτρα βοηθούν στην συγκράτηση ή τη διέλευση της ενέργειας από τις διάφορες φασματικές περιοχές. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ελέγξουν τυχόν συστηματικό θόρυβο (Καραθανάση, 2003). Με την εφαρμογή του φίλτρου το συμβολόγραμμα μεταφέρεται από τη διάσταση του χώρου στο πεδίο συχνοτήτων και επαναφέρεται με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Σκοπός αυτού του βήματος λοιπόν είναι η μείωση του

5 SARscape→Interferometry→1B-Interferometric Workflow (Multi Steps) → 2-Adaptive filter and coherence generation.

θορύβου της φάσης.

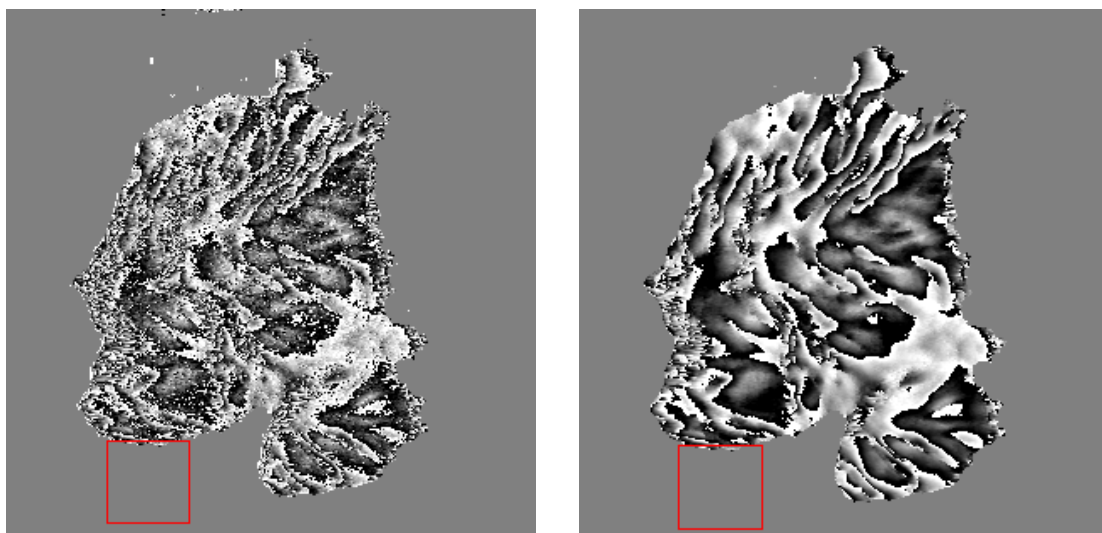
Υπάρχουν 3 διαθέσιμα είδη φιλτραρίσματος από το λογισμικό SARscape. Το πρώτο είναι με τη χρήση προσαρμοσμένου παραθύρου (adaptive window), το δεύτερο με τη χρήση του φίλτρου Boxcar και το τρίτο με την χρήση το φίλτρου Goldstein. Στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε το φίλτρο Goldstein. Το συγκεκριμένο φίλτρο αποτελεί το πιο διαδεδομένο φίλτρο μιας και αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε εικόνες με περιοχές κακής συνάφειας.

Το φιλτράρισμα του συμβολογράμματος με αυτό τον αλγόριθμο βελτιώνει σημαντικά την εμφάνιση των κροσσών συμβολής και μειώνει αισθητά το θόρυβο που εισάγεται λόγω της χρονικής ή χωρικής αποσυσχέτισης (SARscape Guidebook, 2013).

Το παράθυρο που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή του φίλτρου μπορεί να έχει διαστάσεις που προκύπτουν από δυνάμεις του 2 και παίρνει τιμές από 32 έως 512 (SARscape Help). Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερο είναι το φίλτρο τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η επιρροή του. Μία ακόμη παράμετρος που θα πρέπει να καθοριστεί και θα επηρεάσει την αποτελεσματικότητα του φίλτρου είναι ο βαθμός επικάλυψης. Όσο αυξάνει το ποσοστό επικάλυψης ωστόσο αυξάνεται και ο χρόνος επεξεργασίας. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίων διαστάσεων (64*64) με ποσοστό επικάλυψης 85%.

Για την βέλτιστη εφαρμογή του φίλτρου προσδιορίζεται ο τελεστής Άλφα. Ο τελεστής Άλφα είναι η παράμετρος εκείνη που καθορίζει την επιθετικότητα του φίλτρου σε σχέση με την τιμή της συνάφειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τελεστή Άλφα τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξομάλυνση που θα επιφέρει το φίλτρο στο συμβολόγραμμα. Δύο παράμετροι θα πρέπει να καθοριστούν. Η μέγιστη τιμή του τελεστή η οποία εφαρμόζεται σε περιοχές με συνάφεια 0 και η ελάχιστη η οποία εφαρμόζεται σε περιοχές με συνάφεια 1. Για τις ενδιάμεσες τιμές συνάφειας, η τιμή του τελεστή υπολογίζεται γραμμικά. Η ελάχιστη τιμή του τελεστή μπορεί να κυμαίνεται από 0,3 έως 3 και για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε ήπιο φιλτράρισμα με τιμή του τελεστή 0,3. Αντίθετα η μέγιστη τιμή του τελεστή κυμαίνεται από 0,5 έως 4 και για την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε μέσο φιλτραρισμα με τιμή του τελεστή να είναι 1,5.

Τέλος, παράλληλα με την εφαρμογή του φασματικού φίλτρου επιλέχθηκε να εφαρμοστεί και ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (low pass filter) με σκοπό να ελαττωθεί ο θόρυβος της φάσης σε υψηλές συχνότητες. Γενικά συνίσταται να επιλέγονται μικρές τιμές του φίλτρου αυτού ώστε να μην αφαιρεθούν τιμές φάσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε να δοθεί ένα χαμηλό ποσοστό 5%.

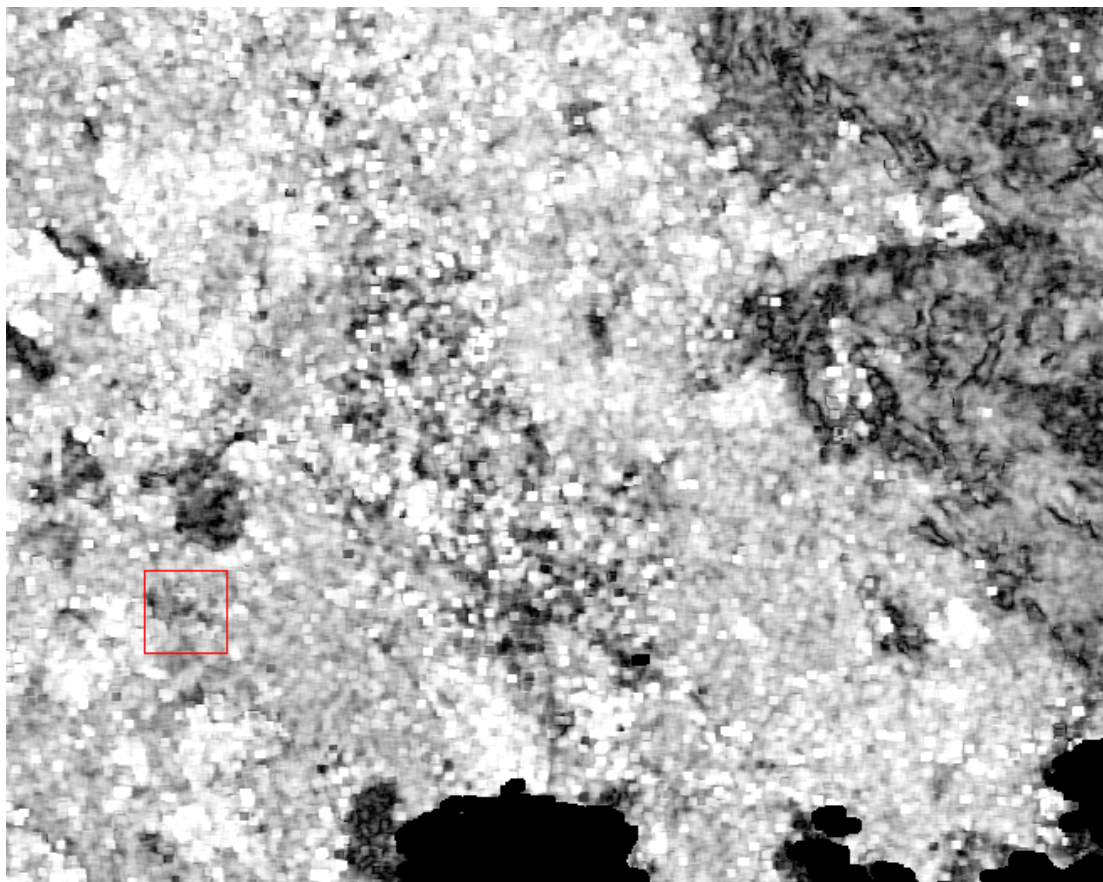


Εικόνα 6: Αριστερά παρουσιάζεται το συμβολόγραμμα πριν την χρήση του φίτρου Goldstein και δεξιά μετά την χρήση του φίλτρου.

Στις εικόνες που παρουσιάζονται παραπάνω γίνεται αντιπαράθεση του συμβολογράμματος πριν και μετά τη χρήση του φίλτρου. Η εξομάλυνση της εικόνας είναι αδιαμφισβήτητη καθώς παρατηρούμε σχεδόν ολική αφαίρεση του θορύβου.

Στο ίδιο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας παράγεται η εικόνα συνάφειας. Η εικόνα συνάφειας παίζει καθοριστικό ρόλο στην συμβολομετρική διαδικασία καθώς εικόνες με χαμηλή συνάφεια δεν έχει νόημα να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στην παραγωγή DEM. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε παράρυθο 3*3 (coherence range) για τον υπολογισμό της συνάφειας. Η συνάφεια εκφράζεται με την χρήση του τελεστή γ , ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ [0,1], όπου 0 αντιστοιχεί σε ασυσχέτιστα ζεύγη ενώ τελεστής γ μεγέθους 1 αντιστοιχεί σε απόλυτα συσχετιζόμενα ζεύγη. Ένας ακόμα πολύ σημαντικός ρόλος της εικόνας της συνάφειας είναι η χρήση της για τον καθορισμό σημείων επίγειου έλεγχου στο στάδιο επαναπροσδιορισμού των τροχιακών δεδομένων.

Ακολουθεί παράδειγμα εικόνας συνάφειας για το συμβολομετρικό ζευγάρι 3. Γενικά το μέγεθος της συνάφειας μεταξύ δύο εικόνων μειώνεται όσο αυξάνεται η χρονική αποσυσχέτιση.



Εικόνα 7: Τμήμα της εικόνας συνάφειας του set 4, σε διαβάθμιση του γκρι. Όπου μαύρο αντιστοιχεί σε $\gamma=0$ και λευκό σε $\gamma=1$.

Στην συνέχεια παρατίθεται πίνακας με την μέση τιμή συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι. Όπως παρατηρείται το set 2 παρουσιάζει πολύ χαμηλή τιμή συνάφειας $\gamma=0.043$ κάτι που οφείλεται κυρίως στο γεγονός της μεγάλης χρονικής αποσυσχέτισης που παρουσιάζουν οι δύο εικόνες. Για το λόγο αυτό το ζευγάρι αυτό θεωρείται ακατάλληλο για την παραγωγή DEM και απορρίπτεται σε αυτό το στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας.

| Set | Τύπος | Κύρια | Δευτερεύουσα | Διάνυσμα Βάσης | Χρονική διαφορά | Μέση Συνάφεια |
|-----|-----------------|----------|--------------|----------------|-----------------|---------------|
| 1 | APS(HH)-APS(HH) | 20041125 | 20041230 | 197,286 | 35 | 0.397344 |
| 2 | IMS-APS(HH) | 20030410 | 20041125 | 209,57 | 595 | 0.043081 |
| 3 | IMS-IMS | 20030705 | 20040515 | 188,021 | 315 | 0.455570 |
| 4 | IMS-IMS | 20031227 | 20040410 | 136,051 | 105 | 0.396187 |
| 5 | IMS-IMS | 20040131 | 20040410 | 163,669 | 70 | 0.450383 |
| 6 | IMS-IMS | 20040515 | 20040619 | 300,048 | 35 | 0.510914 |

Πίνακας 4: Μέση τιμή Συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι

4.5 Αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης

Στο παρόν στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας επιδιώκεται η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης⁶ (phase unwrapping). Η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης αποτελεί το πιο σημαντικό και απαιτητικό στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας η οποία μάλιστα δεν είναι βέβαιο αν θα εκτελεστεί με επιτυχία. Την αβεβαιότητα αυτή δημιουργούν:

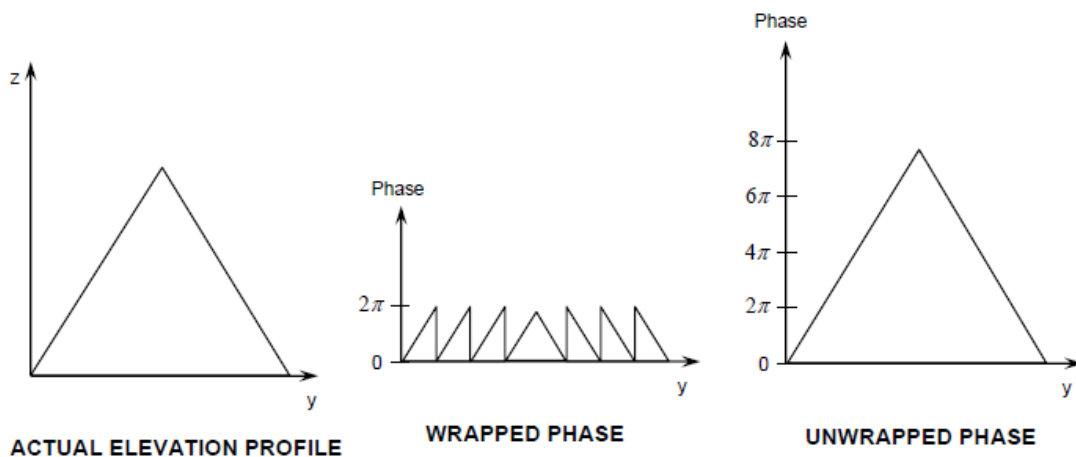
A) Η μικρή συνάφεια των δύο SAR απεικονίσεων οι οποίες απαιτούνται για την υλοποίηση της συμβολομετρικής διαδικασίας

B) Οι επιπτώσεις του αναγλύφου στη γεωμετρία λήψης (σκιά, σμίκρυνση, πτύχωση) και επομένως οι καταγραφόμενες τιμές οπισθοσκέδασης των SAR απεικονίσεων (Α.Πλατάκος, 2002).

Η τιμή της φάσης παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 2\pi)$, με αυτή την διαδικασία εκτιμώνται οι ακέραιοι κύκλοι φάσης έτσι ώστε η τιμή της φάσης των απεικονίσεων να μην περιορίζονται σε αυτό το διάστημα. Η σχέση που συνδέει την αποκαταστημένη φάση με την τιμή φάσης που προκύπτει από το διάγραμμα των κροσσών συμβολής για κάθε εικονοστοιχείο δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\varphi_{unw} = \Delta\varphi + n \cdot 2\pi,$$

όπου φ_{unw} η αποκαταστημένη τιμή της φάσης και $\Delta\varphi$ η τιμή της φάσης στο συμβολόγραμμα.



Σχήμα3 : Η έννοια της αποκατάστασης της φάσης

Πηγή: Χ.Κ.Χουσιάφης, 2011

6 SARscape→Interferometry→1B-Interferometric Workflow (Multi Steps)→3-Phase Unwrapping.

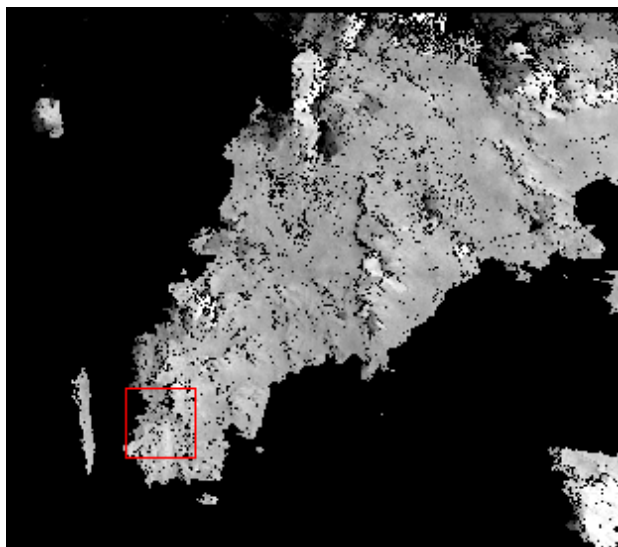
Για το συγκεκριμένο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας το λογισμικό SARscape διαθέτει δύο αλγόριθμους:

- Τον αλγόριθμο Region Growing
- Τον αλγόριθμο Minimum Cost Flow (MCF)

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ο πρώτος. Με την χρήση του συγκεκριμένου αλγόριθμου η αποκατάσταση της φάσης ξεκινά από τις εύκολες περιοχές όπου η αποκατάσταση της φάσης αναμένεται να είναι επιτυχής και στην συνέχεια προχωρά στις πιο δύσκολες περιοχές.

Ως βάση για την αποκατάσταση της φάσης χρησιμοποιείται η εικόνα της συνάφειας. Ως κατώφλι συνάφειας επιλέγεται η τιμή 0,15, αυτό σημαίνει ότι για τα εικονοστοιχεία με τιμή συνάφειας μικρότερη από 0,15 η φάση δεν θα αποκατασταθεί. Η επιλογή μικρής τιμής κατωφλίου για τη συνάφεια θα συμβάλλει στο περιορισμό της πιθανότητας εισαγωγής εσφαλμένων αλμάτων φάσης στην τελική εικόνα της αποκατεστημένης φάσης. Όπως προτείνεται και από το λογισμικό για καλύτερα αποτελέσματα σε αυτό το στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας το κατώφλι συνάφειας θα πρέπει να είναι μικρό ώστε να παρέχεται αρκετή ελευθερία στην ανάπτυξη του αλγόριθμου. Συνιστάνται ως τιμές κατωφλίου συνάφειας οι τιμές 1,5 και 2.

Μία ακόμα παράμετρος που θα πρέπει να καθοριστεί σε αυτό το σημείο είναι ο αριθμός επαναλήψεων της αποκατάστασης της φάσης. Η αποκατάσταση της φάσης μπορεί να γίνει είτε κατευθείαν στα αρχικά εικονοστοιχεία είτε σε δεδομένα που έχουν μικρότερη ανάλυση της αρχικής (μεγαλύτερη διάσταση εικονοστοιχείων – multilook δεδομένα) και εν συνεχεία μέσω δειγματοληψίας στα αρχικά εικονοστοιχεία. Κάθε επανάληψη αντιστοιχεί σε μικρότερη ανάλυση των δεδομένων κατά 3 φορές (Sarmar, 2009). Σημειώνεται ότι ο αριθμός των επαναλήψεων καθορίζεται βάση των διαστάσεων των αρχικών δεδομένων και βάση του γεγονότος ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε η αποκατάσταση της φάσης να γίνει κατευθείαν στα αρχικά δεδομένα.



Εικόνα 8: Εικόνα Αποκατεστημένης φάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού 6.

4.6 Επαναπροσδιορισμός της τροχιακής θέσης των δορυφόρων

Σε αυτό το στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας πραγματοποιείται η βελτίωση των στοιχείων τροχιάς των δορυφόρων⁷. Η διόρθωση πιθανών σφαλμάτων στον προσδιορισμό της θέσης των δορυφόρων την στιγμή της λήψης είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή μετατροπή της φάσης σε τιμές υψομέτρου. Το διάνυσμα βάσης υπολογίζεται στα αρχικά στάδια της συμβολομετρίας μόνο από τα τροχιακά δεδομένα για κάθε ημερομηνία λήψης, ο επαναπροσδιορισμός της τροχιακής θέσης των δορυφόρων γίνεται με τη χρήση σημείων επίγειου ελέγχου (Ground Control Point – GCP) και βελτιώνει την τιμή του διανύσματος βάσης (U.G.Sefercik, 2011). Ο προσδιορισμός των σημείων επίγειου ελέγχου μπορεί να γίνει είτε στην πλάγια διεύθυνση (slant geometry) είτε σε γεωαναφερμένες εικόνες (x,y,z όπου οι συντεταγμένες προσδιορίζονται αυτόματα από ΨΜΕ αναφοράς) αλλά όχι και στις δύο γεωμετρίες. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων διόρθωσης χρειάζονται τουλάχιστον 7 σημεία επίγειου ελέγχου (τόσα σημεία χρειάζεται το λογισμικό για να διεκπεραιώσει την συγκεκριμένη διαδικασία), τα οποία προσδιορίζονται στο συμβολόγραμμα που έχει αφαιρεθεί ο όρος της επίπεδης γης ώστε να αποφευχθεί η επιλογή σημείων που δεν έχουν διορθωθεί οι κροσσοί συμβολής. Τα σημεία επίγειου ελέγχου θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα σε όλη την περιοχή και κριτήριο για την επιλογή τους θα πρέπει να είναι η υψηλή συνάφεια. Για την ασφαλέστερη επιλογή σημείων γίνεται αντιπαράθεση του συμβολογράμματος με την εικόνα συνάφειας και ορίζοντας κατώφλι τιμών ίσο με 0,98 ώστε οι περιοχές με μικρή συνάφεια να μην εμφανίζονται.

7 SARscape→Interferometry→2- Refinement and Re-Flattening

Σε αυτό το βήμα της συμβολομετρικής διαδικασίας δεν δημιουργείται κανένα αρχείο, αλλά οι παράμετροι διόρθωσης της τροχιάς αποθηκεύονται στο αρχείο της αποκατεστημένης φάσης. Η σημαντικότερη παράμετρος που υπολογίζεται σε αυτό το στάδιο είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square error-RMS). Το σφάλμα προκύπτει από την αντιπαράθεση των τιμών υψομέτρου των σημείων επίγειου ελέγχου με τις αντίστοιχες τιμές φάσης στο συμβολόγραμμα, μετατρεπόμενες σε υψόμετρο. Οι τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος θα πρέπει να κυμαίνονται σε μερικές μονάδες έως μερικές δεκάδες. Μεγάλα σφάλματα της τάξης των εκατοντάδων ή/και χιλιάδων μέτρων καθώς και πολύ μικρά σφάλματα έχουν ως αποτέλεσμα τον μη ακριβή επανυπολογισμό δεδομένων τροχιάς καθώς και τον μη αξιόπιστο υπολογισμό υψομέτρων (SARscape Help).

Ακολουθεί πίνακας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κάθε συμβολομετρικού ζευγαριού.

| Set | Τύπος | Κύρια | Δευτερεύουσα | Διάνυσμα Βάσης | Χρονική διαφορά | ΜΤΣ(m) |
|-----|---------------------|----------|--------------|----------------|-----------------|---------|
| 1 | APS(HH)- APS(HH) | 20041125 | 20041230 | 197,286 | 35 | 9,6417 |
| 3 | IMS-IMS | 20030705 | 20040515 | 188,021 | 315 | 10,0927 |
| 4 | IMS-IMS | 20031227 | 20040410 | 136,051 | 105 | 12,8560 |
| 5 | IMS-IMS | 20040131 | 20040410 | 163,669 | 70 | 23,4515 |
| 6 | IMS-IMS | 20040515 | 20040619 | 300,048 | 35 | 10,3973 |

Πίνακας 5: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα

Αφού γίνει ο επαναπροσδιορισμός της τροχιάς σε κάθε ημερομηνία λήψης στην συνέχεια γίνεται επαναπροσδιορισμός και αφαίρεση της φάσης της επίπεδης γης και επαναπροσδιορισμός της αποκατεστημένης φάσης με σκοπό η φάση να οφείλεται πλέον στην τοπογραφία.

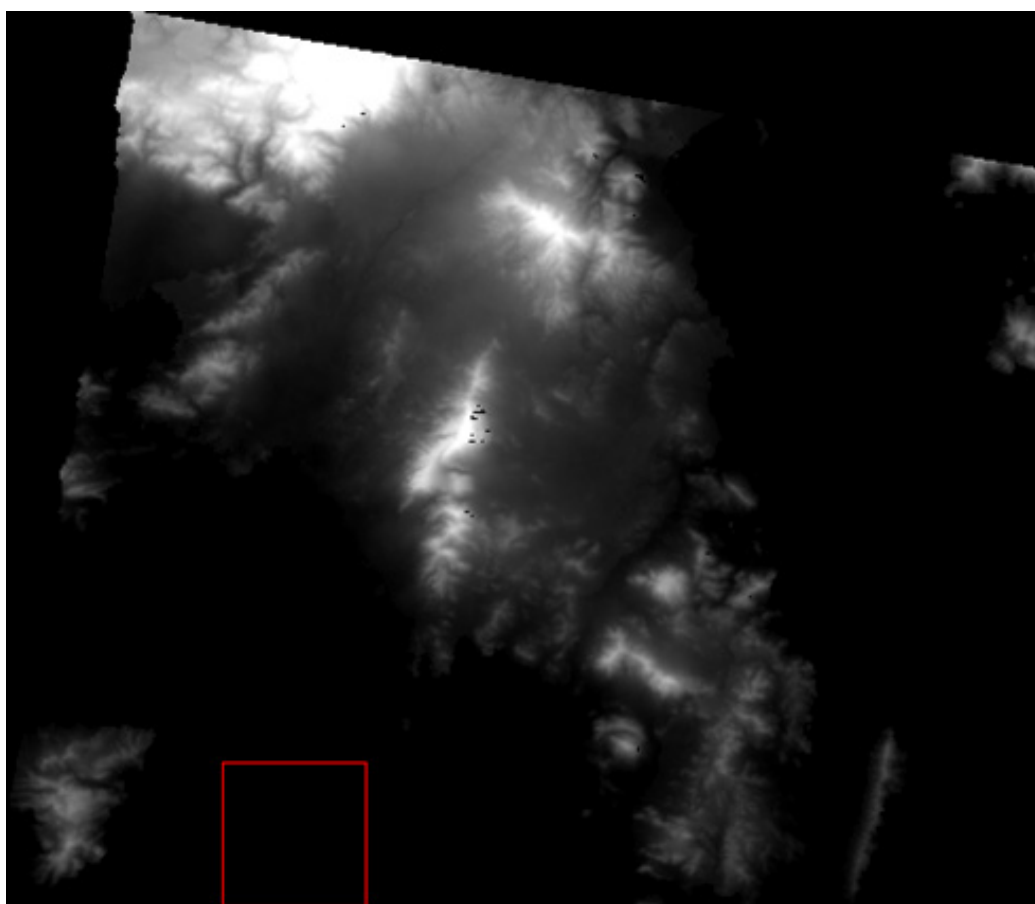
4.7 Μετατροπή φάσης σε υψόμετρο (παραγωγή DEM)- Γεωκωδικοποίηση

Η εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας από την φάση αποτελεί το τελικό στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας. Μετά τον επαναπροσδιορισμό της τροχιακής θέσης του δορυφόρου για κάθε ημερομηνία λήψης και αφού αφαιρέσουμε ξανά τον «όρο της επίπεδης Γης» σε κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι η διαφορά των τιμών της αποκατεστημένης φάσης οφείλεται πλέον στην υψομετρική διαφορά των αντικειμένων-στόχων στο χώρο. Πάνω στην παραπάνω θεώρηση βασίζεται και η διαδικασία παραγωγής DEM.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι απαιτούν την γνώση τουλάχιστον ενός σημείου γνωστών

συντεταγμένων για την μετατροπή των σχετικών τιμών, που υπολογίζονται από την μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο, σε απόλυτες τιμές υψομέτρου. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία (SARscape) έχει ενσωματώσει αλγόριθμους που δεν απαιτούν τη γνώση τέτοιων σημείων αλλά λαμβάνουν υπόψιν το DEM αναφοράς.

Για την δημιουργία του DEM έχει οριστεί ως χωρική ανάλυση τα 25m και η γεωαναφορά έγινε στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς UTM (WGS 84 Zone 34 North). Ακολουθεί το παραγόμενο DEM από το set συμβολομετρικού ζευγαριού 6.



Εικόνα 9: Παραγόμενο DEM του συμβολομετρικού ζευγαριού 6.

Σε αυτό το στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας εκτός από το DEM δημιουργείται και το αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών. Αυτό το αρχείο είναι πολύ σημαντικό γιατί περιλαμβάνει τις τιμές του τυπικού σφάλματος κατά την διαδικασία υπολογισμού του υψομέτρου και αφορά σε κάθε εικονοστοιχείο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του εικονοστοιχείου στο αρχείο ακρίβειας τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια των υπολογισμών. Ο υπολογισμός της ακρίβειας δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2\gamma^2} \cdot \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B}}$$

Εξίσωση 7

Όπου, γ η συμβολομετρική συνάφεια, λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας, θ η γωνία πρόσπτωσης, R η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του σκεδαστή και του αισθητήρα SAR και B η γεωμετρική γραμμή βάσης (SARscape Guidebook, 2013).

Στο παράρτημα Β παρατίθενται οι εικόνες εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι.

5. Αξιολόγηση παραγόμενων DEM

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των παραγόμενων DEM που προέκυψαν κατά τη συμβολομετρική διαδικασία.

Ο έλεγχος ποιότητας ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους επικεντρώνεται στην αξιολόγηση του παραγόμενου προϊόντος και όχι στη διαδικασία της παραγωγής του. Αυτό συμβαίνει γιατί ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της εφαρμογής ενός βήματος της διαδικασίας ή ενός αλγόριθμου είναι ένα δύσκολο πρόβλημα.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της ποιότητας ενός DEM είναι η χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων. Για την αξιολόγηση ενός DEM απαιτούνται τουλάχιστον 28 σημεία (20 εσωτερικά 8 περιφερειακά) για τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Η ακρίβεια υπολογίζεται με τη σύγκριση των υψομέτρων που προκύπτουν από τα αντίστοιχα σημεία στο παραγόμενο DEM και των υψομέτρων των σημείων γνωστών συντεταγμένων. Τέλος, η υψομετρική ακρίβεια των σημείων γνωστών συντεταγμένων πρέπει να είναι καλύτερη από την ακρίβεια του παραγόμενου DEM.

Στη συγκεκριμένη εργασία η απουσία σημείων γνωστών συντεταγμένων οδήγησε στην απόρριψη της συγκεκριμένης μεθόδου για τον έλεγχο της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος. Η χρήση ενός DEM αναφοράς για την αξιολόγηση άλλων DEM είναι μια εναλλακτική προσέγγιση ελέγχου ποιότητας καθώς μας παρέχει τη δυνατότητα της πλήρους σύγκρισης μεταξύ των DEM. Σημειώνεται ότι από στατιστική άποψη το DEM αναφοράς πρέπει να είναι τουλάχιστον μια τάξη καλύτερης ακρίβειας από το DEM που αξιολογείται. Το παραπάνω κριτήριο περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των DEM αναφοράς. Ένα πρόβλημα σχετικά με το ψηφιακό DEM είναι η διαφορετική χωρική ανάλυση του DEM αναφοράς με αυτή του παραγόμενου μοντέλου από την συμβολομετρική διαδικασία. Στην παρούσα εργασία όπως έχει προαναφερθεί το DEM που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παραγόμενων είναι το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., το οποίο έχει χωρική ανάλυση 5m. Τα παραγόμενα DEM επιλέχθηκαν να έχουν χωρική ανάλυση 25m, για το λόγο αυτό το μέγεθος του εικονοστοιχείου του DEM αναφοράς άλλαξε από 5m σε 25m ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση.

Κατά την αξιολόγηση⁸ παραγόμενων DEM με την χρήση DEM αναφοράς στο λογισμικό SARscape χρησιμοποιείται ένας κλίμακας σημείων με υψόμετρα αναφοράς από το DEM αναφοράς και υπολογίζονται τα ακόλουθα στατιστικά μεγέθη:

8 SARscape→General Tools→Quality Analysis→DEM Validation

- ✓ Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα – ΜΤΣ (Root Mean Square Error - RMSE)
- ✓ Μέση τιμή (Mean)
- ✓ Διάμεσος (Median)
- ✓ Μέγιστο – Ελάχιστο (Max – Min)
- ✓ Τυπική απόκλιση (Standard Deviation)
- ✓ Απόλυτο και σχετικό (Absolute – Relative Error)

Ακολουθεί ο πίνακας 6 με τα στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν από τη σύγκριση των παραγόμενων DEM με το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..

| Set | Μέση Τιμή | ΜΤΣ από ΤΟΡΟDEM | Τυπική Απόκλιση | Ελάχιστο | Μέγιστο | Διάμεσος | Απόλυτο Σφάλμα | Σχετικό Σφάλμα |
|-----|-----------|--------------------|--------------------|----------|---------|----------|-------------------|-------------------|
| 1 | 14.067 | 29.306 | 25.709 | -197.552 | 201.802 | 12.568 | 55.314 | 41.247 |
| 3 | -10.600 | 27.613 | 25.498 | -192.961 | 223.569 | -7.381 | 55.431 | 44.831 |
| 4 | -143.394 | 249.081 | 203.665 | -901.068 | 317.620 | -65.412 | 571.417 | 428.022 |
| 5 | -3.397 | 36.911 | 36.755 | -254.695 | 188.791 | -0.999 | 66.179 | 62.781 |
| 6 | -12.286 | 28.658 | 25.891 | -192.227 | 166.664 | -7.508 | 58.555 | 46.268 |

Πίνακας 6: Στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν από την σύγκριση των παραγόμενων DEM με το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Το ΜΤΣ που έχει προκύψει κρίνεται σχετικά καλό, δεδομένου ότι για ένα τοπογραφικό χάρτη κλίμακας 1:250.000 το μέγιστο ΜΤΣ της υψομετρικής πληροφορίας δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 1/3 της ισοδιάστασης των ισοϋψών καμπυλών (~33m), ενώ σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να υπάρχουν σημεία με σφάλμα μεγαλύτερο από τα 2/3 της ισοδιάστασης (~65m) (DEMs Standards, 1998). Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα το ΜΤΣ κυμαίνεται από 27,61m έως και 36,91m για τα ζευγάρια 1,3,5,6. Εντύπωση προκαλεί το μέγεθος του σφάλματος του ζευγαριού 4 το οποίο είναι πολύ υψηλό.

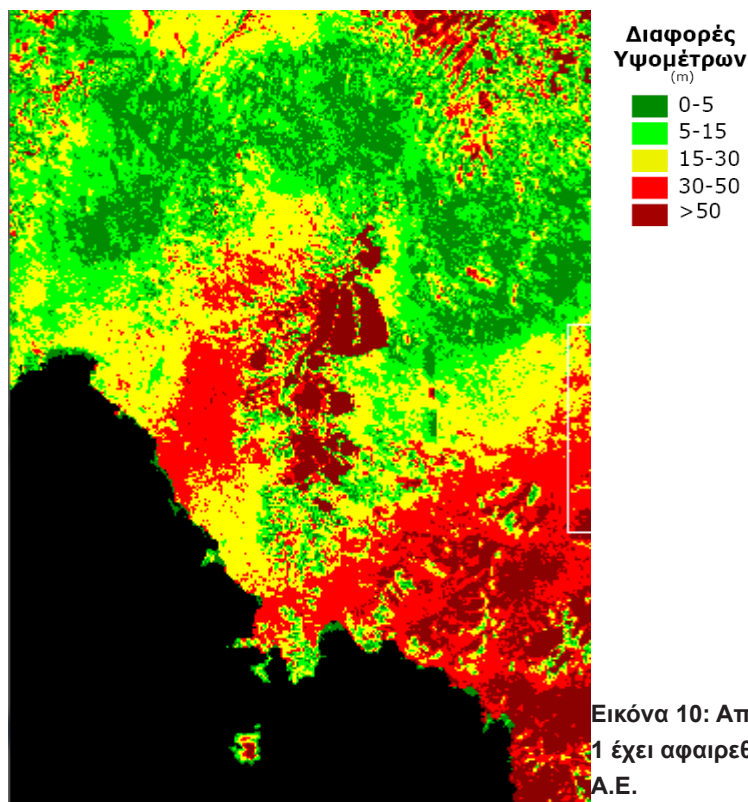
| Set | Τύπος | Κύρια | Δευτερεύουσα | Διάνυσμα Βάσης | Χρονική διαφορά | Μέση Συνάφεια | Ύψος Ασάφειας | ΜΤΣ από ΤΟΡΟDEM |
|-----|---------------------|----------|--------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 1 | APS(HH)- APS(HH) | 20041125 | 20041230 | 197,286 | 35 | 0,397344 | 46,4390 | 29.306 |
| 3 | IMS-IMS | 20030705 | 20040515 | 188,021 | 315 | 0,45557 | 49,2090 | 27.613 |
| 4 | IMS-IMS | 20031227 | 20040410 | 136,051 | 105 | 0,396187 | 66,4310 | 249.081 |
| 5 | IMS-IMS | 20040131 | 20040410 | 163,669 | 70 | 0,450383 | 56,4860 | 36.911 |
| 6 | IMS-IMS | 20040515 | 20040619 | 300,048 | 35 | 0,510914 | 30,7530 | 28.658 |

Πίνακας 7: Σύγκριση ΜΤΣ με διάνυσμα βάσης, χρονική αποσυσχέτιση, ύψος ασάφειας.

Ένα άλλο μέγεθος που κρίνεται σκόπιμο να συγκριθεί με το ΜΤΣ είναι η ασάφεια προσδιορισμού υψομέτρου. Η ασάφεια προσδιορισμού του υψομέτρου είναι το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς που αντιστοιχεί σε ένα κύκλο φάσης, δηλαδή σε 2π και υπολογίζεται στο συγκεκριμένο λογισμικό κατά τον υπολογισμό του

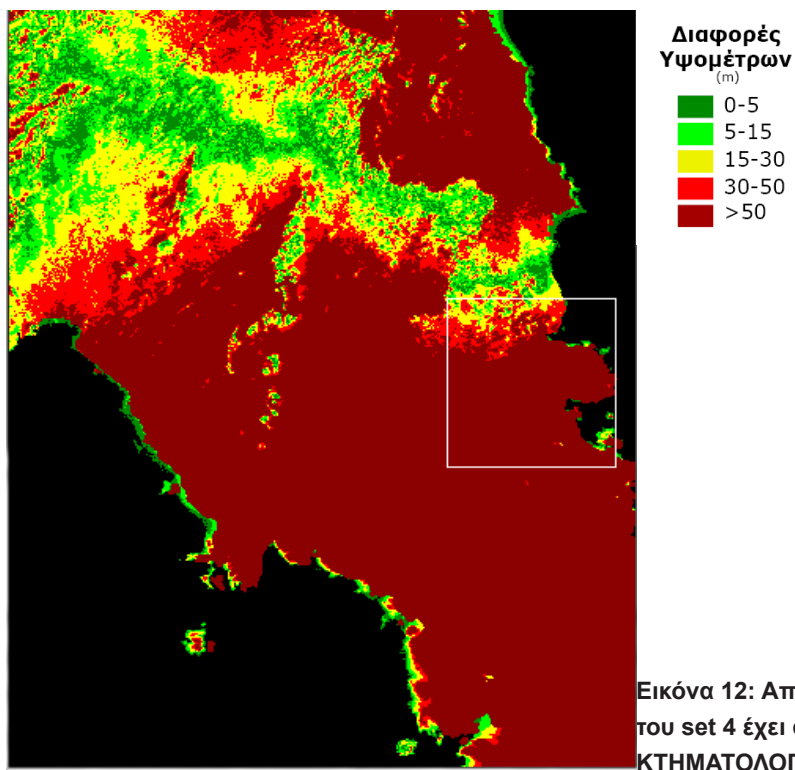
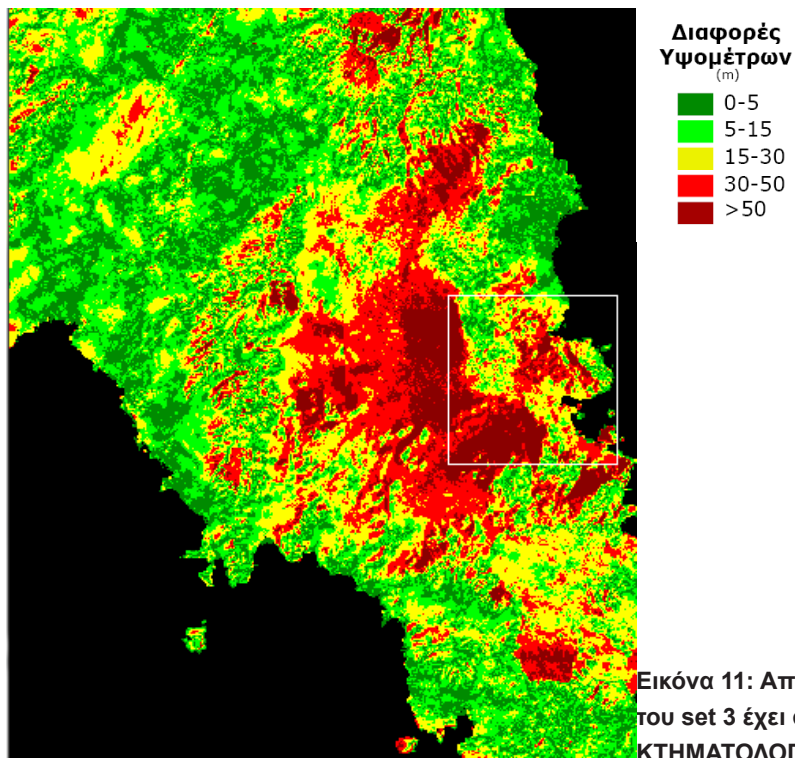
διανύσματος της βάσης κάθε συμβολομετρικού ζευγαριού. Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 7 το ΜΤΣ του παραγόμενου DEM σε σχέση με το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε του ζευγαριού 4 υπερβαίνει το ύψος της ασάφειας. Επίσης, έχουμε αναφέρει ότι το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης αποσκοπεί στο να αποκαλύψει το πλήθος των ακεραίων κύκλων που είναι τυλιγμένοι στη φάση. Με βάση το προηγούμενο συμπεραίνουμε ότι για να ξεπερνά το ΜΤΣ την ασάφεια προσδιορισμού του υψομέτρου ενός συμβολομετρικού ζευγαριού, αυτό σημαίνει ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης σε σημεία της περιοχής μελέτης. Δηλαδή, κατά την αποκατάσταση της φάσης έχουμε «χάσει» έναν ή περισσότερους ακέραιους κύκλους σε αυτά τα σημεία, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός του υψομέτρου να αποκλίνει αρκετά από το πραγματικό υψόμετρο και όπως είναι προφανές να αυξάνεται σημαντικά το ΜΤΣ.

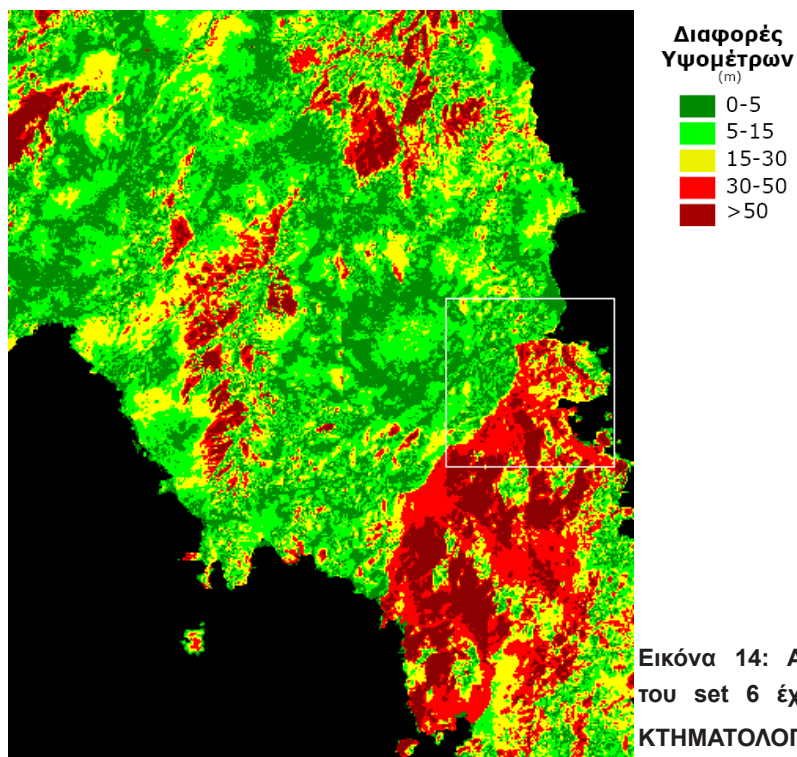
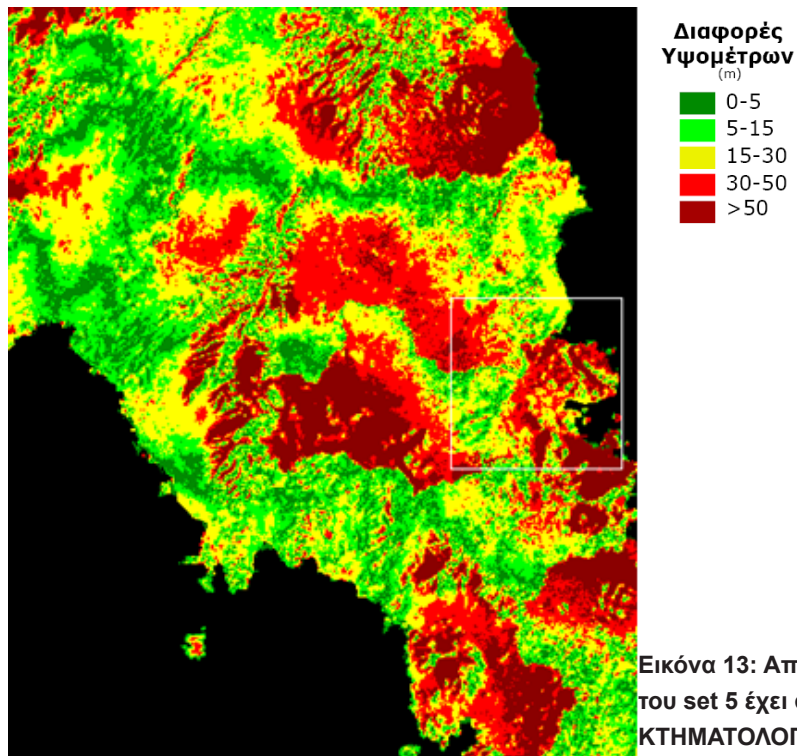
Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά⁹ του κάθε παραγόμενου DEM από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. και παράγονται εικόνες που παρουσιάζουν την διαφορά των υψομέτρων σε κάθε εικονοστοιχείο. Με αυτό τον τρόπο θα εντοπίσουμε τις περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές αποκλίσεις στο υψόμετρο και τις περιοχές που παρουσιάζουν χαμηλές αποκλίσεις. Να σημειωθεί πως απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι δυνατή η αφαίρεση δύο DEM είναι να έχουν το ίδιο μέγεθος εικονοστοιχείου καθώς και να αντιπροσωπεύουν ακριβώς την ίδια περιοχή¹⁰



9 ENVI Classic→Basic Tools→Band Maths

10 SARscape→General Tools→Sample Selections→Maximum Common Area





Όπως παρατηρείται και από τις παραπάνω εικόνες η υψομετρική ακρίβεια είναι καλύτερη στις περιοχές που δεν υπάρχουν έντονες κλίσεις και σε μη ορεινές περιοχές όπως για παράδειγμα το Λεκανοπέδιο Αττικής. Η παρουσία έντονων κλίσεων έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία γεωμετρικών παραμορφώσεων (πτύχωση, σμίκρυνση, σκίαση) με αποτέλεσμα να μειώνεται η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Περιοχές με μεγάλες υψομετρικές διαφορές συναντάμε σε όλες τις εικόνες, κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχουν ορεινοί όγκοι. Επιπλέον, υψηλές υψομετρικές διαφορές στις περισσότερες εικόνες συναντάμε και στην περιοχή του Αεροδρομίου, κάτι για το οποίο δεν μπορούμε να δώσουμε μία ακριβή εξήγηση. Οι υψομετρικές διαφορές στο set 4 είναι πολύ μεγάλες στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι δεν πραγματοποιήθηκε με επιτυχία το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης κατά τη συμβολομετρική διαδικασία.

Για τη βελτίωση του παραγόμενου προϊόντος της συμβολομετρικής διαδικασίας δεν αρκεί η χρήση ενός μόνο συμβολομετρικού ζευγαριού. Ο συνδυασμός της υψομετρικής πληροφορίας των DEM που προέρχονται από διαφορετικά συμβολομετρικά ζευγάρια οδηγεί στην βελτιστοποίηση της ποιότητας και της ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η δημιουργία μωσαϊκών από τον συνδυασμό των παραγόμενων DEM.

6. Μωσαϊκά DEM

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά αναλύονται οι τρόποι δημιουργίας των μωσαϊκών από το λογισμικό SARscape. Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα παραγόμενα μωσαϊκά και τέλος γίνεται η αξιολόγηση τους με την χρήση του DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

6.1. Δημιουργία Μωσαϊκών DEM

Όπως προαναφέρθηκε ο συνδυασμός της υψομετρικής πληροφορίας των ΨΜΕ που προέρχονται από διαφορετικά συμβολομετρικά ζευγάρια οδηγεί στη βελτιστοποίηση της ποιότητας και της ακρίβειας του τελικού προϊόντος.

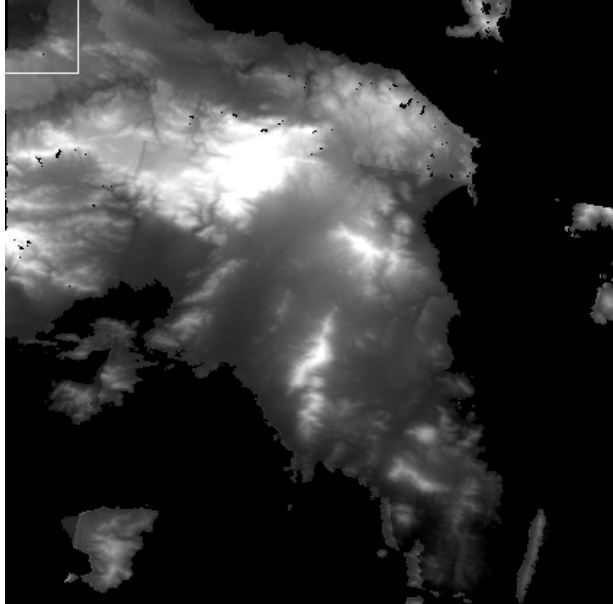
Το μωσαϊκό DEM είναι ένα νέο DEM που συντίθεται από άλλα DEM με σκοπό να εμφανίσει καλύτερη ποιότητα και αξιοπιστία από τα επιμέρους DEM. Το πρωτογενές DEM που δημιουργείται μέσα από τη συμβολομετρική διαδικασία ενδέχεται να εμφανίζει κενά εικονοστοιχεία. Επιπλέον, το αποτέλεσμα της συμβολομετρικής διαδικασίας κάθε συμβολομετρικού ζευγαριού είναι διαφορετικό. Σε άλλες περιοχές είναι καλύτερο και σε άλλες χειρότερο, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων που έχουν ήδη αναφερθεί και επιδρούν είτε κατά τη συλλογή των SAR απεικονίσεων είτε κατά την επεξεργασία αυτών. Στο μωσαϊκό DEM επιθυμητό είναι να έχουν εξαλειφθεί τα κενά εικονοστοιχεία, αλλά ο κύριος στόχος είναι να έχει βελτιωθεί σημαντικά η αξιοπιστία του, δηλαδή η ακρίβειά του που δηλώνει ότι οι τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων πλησιάζουν μεταξύ τους και η ορθότητά του που δηλώνει ότι οι τιμές των εικονοστοιχείων πλησιάζουν τις αληθείς τιμές υψομέτρου.

Σε αυτό το σημείο θα δημιουργήσουμε μωσαϊκά από το σύνολο της υψομετρικής πληροφορίας των πρωτογενών δεδομένων της συμβολομετρικής διαδικασίας, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του λογισμικού SARscape. Για την δημιουργία των Μωσαϊκών, το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε DEM¹¹ από συμβολομετρικά ζευγάρια είτε με την χρήση της μέσης τιμής για κάθε εικονοστοιχείο είτε με συνένωση τμημάτων των παραγόμενων DEM με χρήση βαρών P_i στις τιμές υψομέτρου h του κάθε DEM τα οποία υπολογίζονται με βάση το τυπικό σφάλμα σ_i του αντίστοιχου αρχείου ακρίβειας. Εμείς επιλέξαμε να δημιουργήσουμε DEM με τη χρήση και των δύο μεθόδων, ώστε εν συνεχεία να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα.

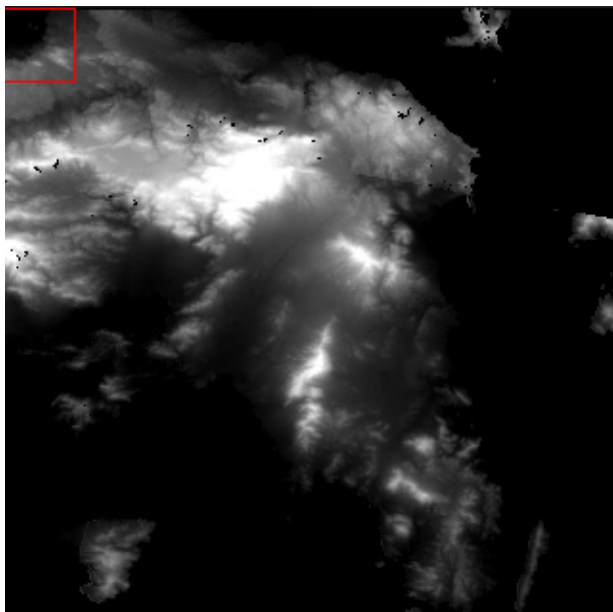
Η πρώτη μέθοδος όπως προαναφέραμε αφορά στην δημιουργία μωσαϊκών με την χρήση του μέσου όρου των υψομέτρων από τα παραγόμενα DEM σε κάθε εικονοστοιχείο. Αρχικά δημιουργήθηκε ένα μωσαϊκό από το σύνολο των παραγόμενων DEM (ο συνολικός αριθμός των παραγόμενων είναι 5). Στη συνέχεια δημιουργήσαμε

11 SARscape→General Tools→Mosaicing→Convventional Mosaicing

ένα μωσαϊκό από τα καλύτερα συμβολομετρικά ζευγάρια βάση του διανύσματος βάσης, συνάφειας, ύψος ασάφειας και σε συνδυασμό με το ΜΤΣ. Τα ζευγάρια που επιλέχθηκαν βάση των παραπάνω είναι τα 1,3,6.



Εικόνα 15: Μωσαϊκό από το σύνολο των παραγόμενων DEM με την χρήση του μέσου όρου.



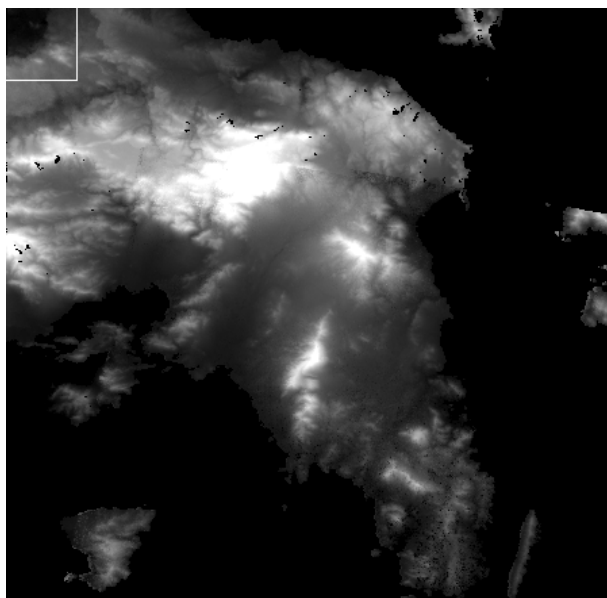
Εικόνα 16: Μωσαϊκό από τα παραγόμενα DEM των set 1,3,6 με την χρήση του μέσου όρου.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η δημιουργία μωσαϊκών με χρήση βαρών P_i στις τιμές υψομέτρου h του κάθε DEM με βάση το τυπικό σφάλμα σ_i του αντίστοιχου αρχείου ακρίβειας. Το συγκεκριμένο αρχείο, όπως έχουμε αναφέρει, περιλαμβάνει το τυπικό σφάλμα υπολογισμού του υψομέτρου για κάθε ένα εικονοστοιχείο και

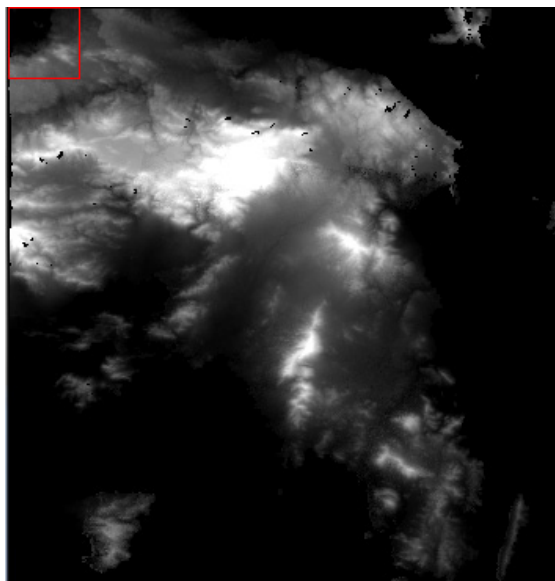
προκύπτει ως συνάρτηση των παραμέτρων της συνάφειας, του διανύσματος της βάσης και του μήκους κύματος (SARscape Help, 2010). Είναι προφανές ότι εκτός της δυνατότητας ελέγχου της ακρίβειας των υπολογισμών για τη δημιουργία του DEM από ένα συμβολομετρικό ζευγάρι, μπορούμε να το αξιοποιήσουμε στη δημιουργία μωσαϊκών από DEM.

Το μωσαϊκό DEM που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία συνοδεύεται και πάλι από αρχείο ακρίβειας που προκύπτει από το τυπικό σφάλμα υπολογισμού του υψομέτρου για κάθε ένα εικονοστοιχείο. Τα βάρη που αποδίδονται είναι συνάρτηση του τυπικού σφάλματος και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τυπικού σφάλματος τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια της υπολογισμένης τιμής υψομέτρου. Ο τρόπος με τον οποίο το λογισμικό SARscape δημιουργεί το μωσαϊκό δεν αποκλείει τις περιοχές χαμηλής αξιοπιστίας. Ως εκ τούτου αν το σύνολο των επιμέρους τιμών υψομέτρου έχει μεγάλο τυπικό σφάλμα τότε και η τιμή του υψομέτρου στο μωσαϊκό ΨΜΕ, θα είναι μικρής ακρίβειας και θα έχει αντίστοιχης τάξης μεγέθους τυπικό σφάλμα. Η συμμετοχή αυτών των περιοχών στο μωσαϊκό ΨΜΕ συμβάλλει στην άμβλυση του ΜΤΣ και προφανώς στη μείωση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος.

Και με αυτή την μέθοδο δημιουργήσαμε δύο μωσαϊκά DEM. Ένα χρησιμοποιώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας και ένα χρησιμοποιώντας τα παραγόμενα DEM των set 1,3,6.



Εικόνα 17: Μωσαϊκό από το σύνολο των παραγόμενων DEM με την χρήση βαρών.



Εικόνα 18: Μωσαϊκό από τα παραγόμενα DEM των set 1,3,6 με την χρήση βαρών.

6.2. Αξιολόγηση Μωσαϊκών DEM

Η αξιολόγηση θα πραγματοποιηθεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που έγινε και για τα παραγόμενα DEM της συμβολομετρικής διαδικασίας.

| Μωσαϊκά DEM | Μέση Τιμή | ΜΤΣ από TOPODEM | Τυπική Απόκλιση | Ελάχιστο | Μέγιστο | Διάμεσος | Απόλυτο Σφάλμα | Σχετικό Σφάλμα |
|----------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|----------|----------------|----------------|
| mos_all_mean | -16.540.458 | 66.195.534 | 64.095.726 | -836.959.473 | 778.071.228 | -7,7472 | 137,2273 | 120,6869 |
| mos_1,3,6_mean | -2.644.057 | 18.974.257 | 18.789.130 | -149.007.034 | 290.481.110 | -1,8874 | 31,9049 | 29,2609 |
| mos_all_prec | -4.941.106 | 52.065.012 | 51.830.020 | -836.959.473 | 778.071.228 | -5,1150 | 86,4931 | 91,4342 |
| mos_1,3,6_prec | -5.497.914 | 23.936.699 | 23.296.749 | -224.914.490 | 290.481.140 | -3,0388 | 45,1334 | 39,6355 |

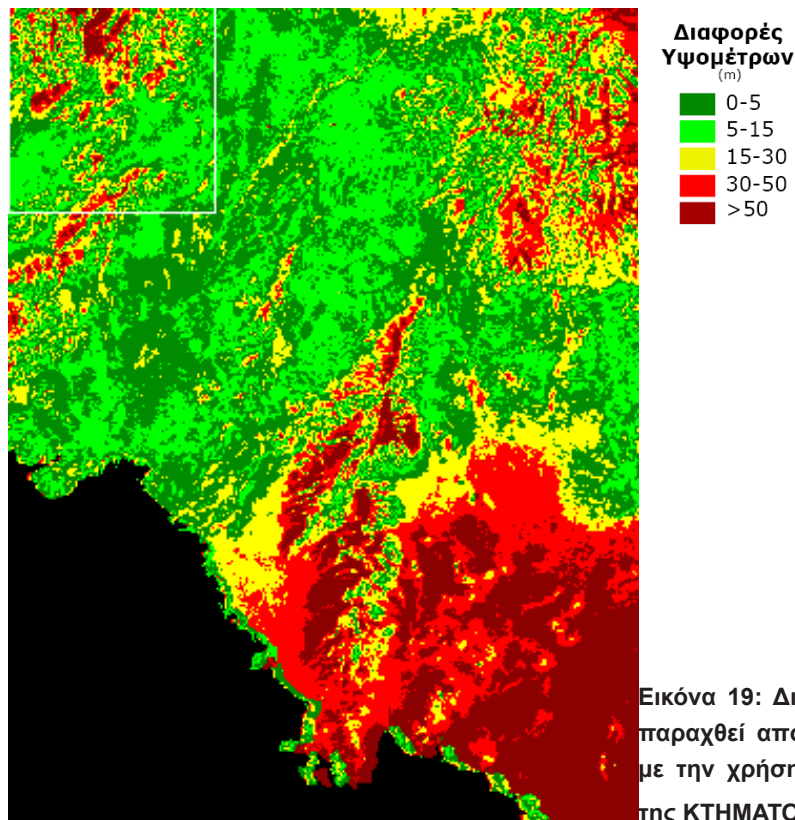
Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως το μωσαϊκό που προέρχεται από τα DEM των ζευγαριών 1,3,6 το οποίο δημιουργήθηκε με την χρήση του μέσου όρου των υψομέτρων για κάθε ρίxel παρουσιάζει το μικρότερο ΜΤΣ, ύψους 18,974m, το οποίο είναι μικρότερο από το ΜΤΣ των παραγόμενων DEM. Το ΜΤΣ των παραγόμενων DEM από τα οποία προέρχεται κυμαίνεται από 27,613 έως 29,30m. Η συνάφεια των τριών αυτών συμβολομετρικών ζευγαριών κυμαινόταν από 0,39 έως 0,51, ενώ το ύψος ασάφειας από 30,7 έως 49,2.

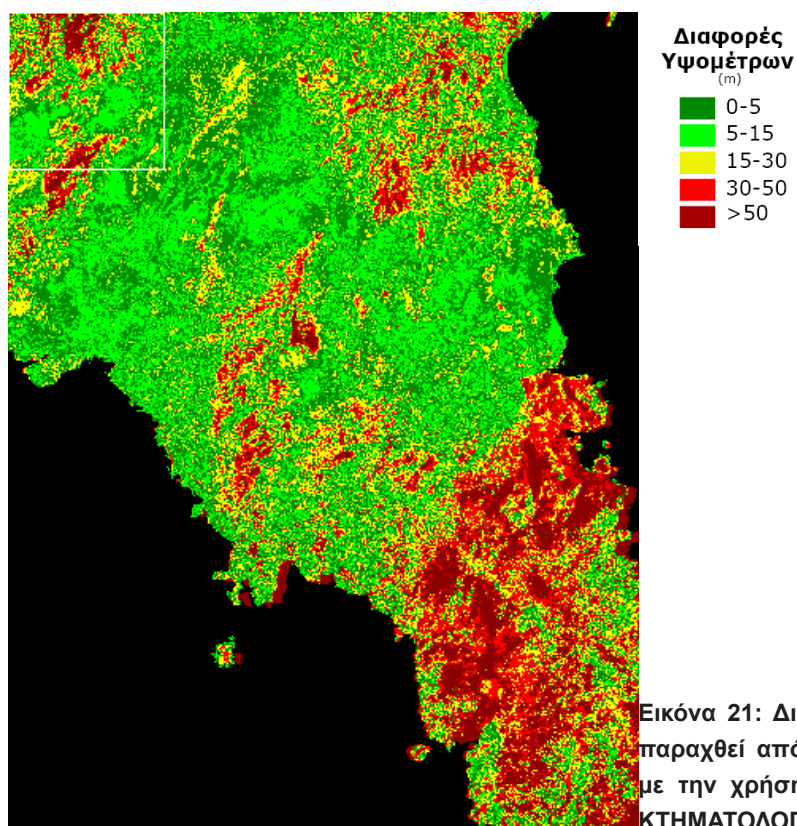
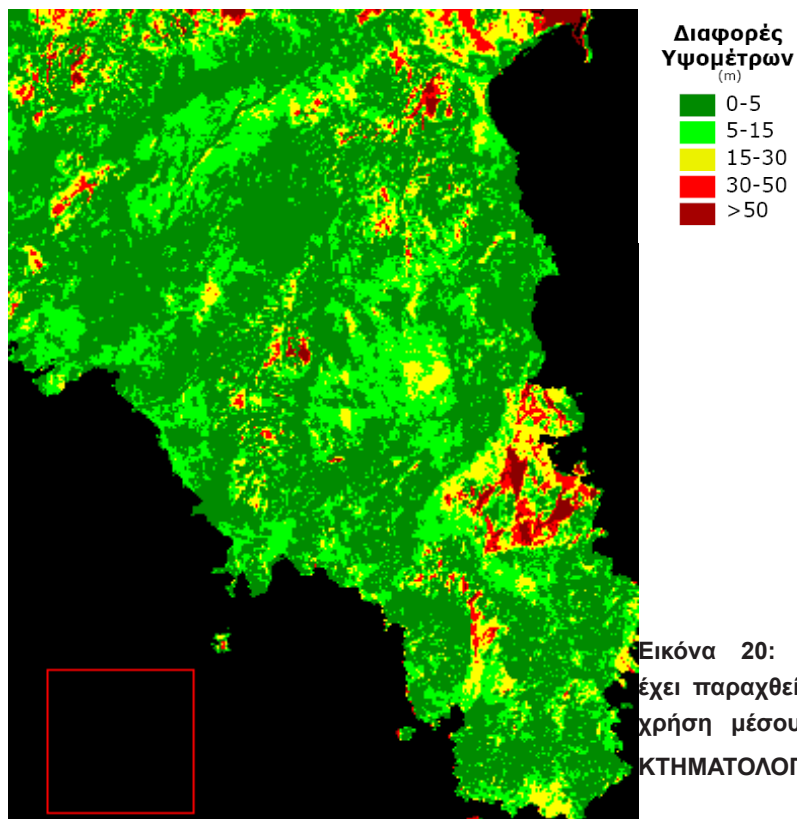
Αντίστοιχα, το ΜΤΣ του μωσαϊκού που παράχθηκε με την μέθοδο των βαρών και τα ζευγάρια 1,3,6 είναι 23,936m, ενώ το μωσαϊκό που παράχθηκε από όλα τα ζευγάρια έχει ΜΤΣ 52,065m.

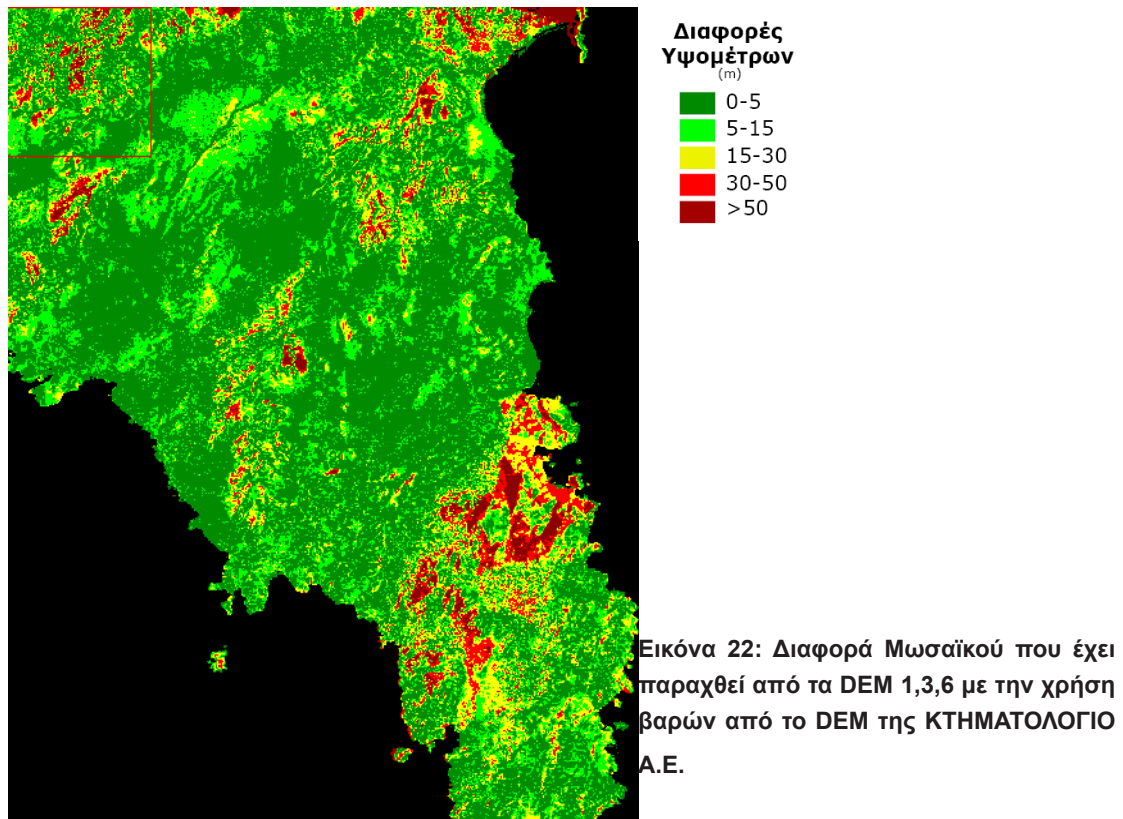
Παρατηρούμε λοιπόν πως τα μωσαϊκα που δημιουργήθηκαν από τα ζευγάρια 1,3 και 6 και με τους δύο τρόπους παραγωγής, έδωσαν καλύτερο ΜΤΣ σε σχέση με το ΜΤΣ του καλύτερου ζευγαριού. Επίσης, παρατηρούσαμε ότι το εύρος τιμών (μέγιστο –

ελάχιστο) της διαφοράς του μωσαϊκού ΨΜΕ από το ΨΜΕ αναφοράς εξακολουθεί να είναι μεγάλο.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά του κάθε μωσαϊκού DEM από το DEM της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. και παράγονται εικόνες που παρουσιάζουν την διαφορά των υψομέτρων σε κάθε εικονοστοιχείο.







Όπως παρατηρείται και από τις παραπάνω εικόνες η υψομετρική ακρίβεια έχει βελτιωθεί αισθητά στα μωσαϊκά που προέρχονται από τα DEM των ζευγαριών 1,3,6. Οι περιοχές με μεγάλες αποκλείσεις (μεγαλύτερες από 50m) έχουν περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό, σε αντίθεση με τα μωσαϊκά που προέρχονται από το σύνολο των συμβολομετρικών ζευγαριών τα οποία συνεχίζουν να παρουσιάζουν πολλές περιοχές με μεγάλες υψομετρικές διαφορές.

7. Συμπεράσματα

Η συμβολομετρία SAR απεικονίσεων είναι μια πρόσφατη σχετικά τεχνική, για την δημιουργία DEM ικανοποιητικής ακρίβειας για περιοχές μεγάλης έκτασης. Αποτελεί σήμερα μια από τις τρεις πλέον σύγχρονες τεχνικές (automatic image matching, InSAR, LiDAR) για την απόκτηση υψομετρικής πληροφορίας.

Η τεχνική της συμβολομετρίας και ειδικότερα η συμβολομετρική διαδικασία είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική μέθοδος. Απαιτητική τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο υλικοτεχνικής υποδομής και υποστήριξης λογισμικού. Το λογισμικό είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι στην επιτυχία της διαδικασίας. Η δυνατότητα επέμβασης του χειριστή τόσο στον καθορισμό κρίσιμων παραμέτρων όσο και στην επιλογή αλγορίθμων στα επιμέρους στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι καθοριστικής σημασίας. Η πλήρης κατανόηση της τεχνικής και των επιμέρους σταδίων της είναι προαπαιτούμενο για την επιτυχή έκβαση του αποτελέσματος. Το πλήθος των ενδιάμεσων παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα είναι πάρα πολλοί και συνεπώς κάθε επιλογή που κάνει ο χρήστης στις ρυθμίσεις της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι απολύτως κρίσιμη για την επιτυχία της μεθόδου.

Η ακρίβεια της συμβολομετρίας SAR απεικονίσεων καθώς και των παραγόμενων προϊόντων της συμβολομετρικής διαδικασίας επηρεάζονται από αρκετούς παράγοντες. Το σύστημα RADAR που χρησιμοποιείται για τη λήψη των δεδομένων χαρακτηρίζεται από μια σειρά ουσιωδών παραμέτρων, όπως η γωνία όρασης, ο θόρυβος του συστήματος, η χωρική ανάλυση, το μήκος κύματος, η πόλωση και το εύρος της δέσμης. Ο τροχιά του δορυφόρου παρέχει ουσιαστική πληροφορία για την περιγραφή της γεωμετρίας λήψης κατά τη λήψη των απεικονίσεων. Η επίδραση της ατμόσφαιρας θεωρείται ο πιο περιοριστικός παράγοντας της ποιότητας των SAR απεικονίσεων που λαμβάνονται από δορυφόρους. Η αποσυσχέτιση (χωρική και χρονική) πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη και τέλος δεν θα πρέπει να παραλείψουμε το καθοριστικό στάδιο της επεξεργασίας.

Η συνάφεια είναι ένα μέτρο ποιότητας του συμβολογράμματος και κατ' επέκταση της ποιότητας και της αξιοπιστίας του αποτελέσματος της συμβολομετρικής διαδικασίας. Η συνάφεια των απεικονίσεων μειώνεται όσο μεγαλώνει η χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων.

Όσο μικρότερο είναι το ύψος ασάφειας τόσο καλύτερη είναι η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Εμπειρικά, ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα στην παραγωγή ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι να έχουμε ακρίβεια μεταξύ 1/10 με 1/20 του ύψους ασάφειας, οπωσδήποτε όμως δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το 1/2 του ύψους ασάφειας.

Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι το βοηθητικό DEM που χρησιμοποιείται κατά την συμβολομετρική διαδικασία. Αν το βοηθητικό DEM είναι κακής ή μέτριας ποιότητας τότε και το παραγόμενο DEM θα είναι αντίστοιχης ποιότητας. Επειδή το παραγόμενο DEM πρέπει να αξιολογηθεί είτε με σημεία επίγειου ελέγχου είτε με την χρήση κάποιου άλλου DEM – το οποίο θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μίας τάξης καλύτερης ποιότητας – αυτό μας περιορίζει στην επιλογή του DEM αναφοράς καθώς θα πρέπει πάντα να έχουμε διαθέσιμο ένα καλύτερης ποιότητας DEM για την αξιολόγηση.

Ένα από τα σημαντικότερα και δυσκολότερα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι η αποκατάσταση της φάσης. Σε αυτό το στάδιο θα καθοριστεί και η ποιότητα του παραγόμενου DEM. Αν η αποκατάσταση της φάσης ενός συμβολομετρικού ζευγαριού δεν πραγματοποιηθεί με επιτυχία τότε το παραγόμενο DEM θα παρουσιάζει υψηλό τετραγωνικό σφάλμα, όπως παρατηρήθηκε με το συμβολομετρικό ζευγάρι 4.

Η δημιουργία μωσαϊκών DEM με την χρήση του λογισμικού SARScapε γίνεται με την αξιοποίηση του συνόλου της υψομετρικής πληροφορίας των επιμέρους πρωτογενών DEM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιοχές με χαμηλή συνάφεια να λαμβάνονται υπόψιν στην δημιουργία του μωσαϊκού. Κατ' επέκταση η δημιουργία μωσαϊκών με αυτόν τον τρόπο δεν οδηγεί σε σημαντική βελτίωση του ΜΤΣ.

Στην εργασία αυτή διαπιστώσαμε ότι όταν επιλέγονται τα καλύτερα παραγόμενα DEMs για να συμμετάσχουν στον υπολογισμό του μωσαϊκού DEM η συνολική ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνεται. Επίσης, τα μωσαϊκά που έχουν παραχθεί με τη χρήση βαρών παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια (ΜΤΣ= 23,93m) από αυτά που έχουν παραχθεί με τη χρήση του μέσου όρου (ΜΤΣ= 18,97m). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού του αρχείο εκτίμησης ακρίβειας βάση του οποίου υπολογίζονται οι τιμές των βαρών χρειάζεται βελτιώσεις.

8. Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Α.Πλατάκος, Χ.Παράσχου, Β.Καραθανάση, Μέθοδοι Αποκατάστασης Φάσης στη Συμβολομετρία. Εφαρμογή και Αξιολόγηση Δύο Μεθόδων, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχος 1-2-2002.

Καραθανάση, Β., Ραδιομετρία-Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, ΕΜΠ, 2003.

Χ.Κ.Χουσιάφης, Βέλτιστη Αξιοποίηση της Επαναληπτικής Συμβολομετρίας και Ανάπτυξη Μεθόδου Δημιουργίας Μωσαικών για τη Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2011.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

A.Saqellqri-Likoka, V.Karathanassi, An approach for solving rank-deficient systems that enable atmospheric path delay and water vapour content estimation, IJET Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No 10, pp.3187-3195, 2008

Allen, C., Interferometric Synthetic Aperture Radar, Review article of Department of Electrical Engineering and Computer Science and Radar Systems and Remote Sensing Laboratory University of Kansas, 1995.

ASTER Global DEM Validation, Prepared by ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS In cooperation with NGA and Other Collaborators, 2009.

Canadian Center for Remote Sensing, Fundamentals of Remote Sensing, 2003, (http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index_e.php#tutor).

Carrasco, D., SAR Interferometry for digital elevation model generation and differential applications. Ph. D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 1998.

D. Geudtner, P.W.Vachon, K.E.Mattar and A.L.Gray, RADARSAT Repeat-Pass SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998

D. Hoja, P. Reinartz, M. Schroeder, Comparison of DEM generation and combination methods using high resolution optical stereo imagery and interferometric SAR data, Commission I, WG I/5

D. Perissin and T.Wang, Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011

European Space Agency (ESA) , 2007, “*InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry*”.

Ferretti A. , Prati C., Rocca F., 2001, Permanent Scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 8-20.

Goldstein R., Zebker H. & Werner C. (1988). Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 23(4).

Gray, A. L., and P. L. Farris - Manning, Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, p. 180-191, 1993.

Hahn Chul Jung and Doug Alsdorf, Repeat-pass multi-temporal interferometric SAR coherence variations with Amazon floodplain and lake habitats, *International journal of Remote Sensing*, Vol. 31 No. 4 p. 801-901, 2010

Jürgen Holzner, Michael Eineder, and Birgit Schättler, First analysis of Envisat/ASAR image mode products for interferometry, *German Aerospace Center (DLR)*, 2002

Manfred Sties and Susanne Kruger, J.Bryan Mercer and S. Schnick, Comparison of digital elevation data from airborne LASER and interferometric SAR systems, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII Part B3, Amsterdam 2000.

Massonnet, D., and K. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, p. 441–500, 1998.

M. Fomelis, I. Parcharidis, E. Lagios, N. Voulgaris, 2009, Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry, *Journal of Applied Geophysics*.

O. Hadj Sahaoui, B. Hassaine, C. Serief, Radar Interferometry with Sarscape Software, PS 5.8 - Photogrammetry and Remote Sensing 2/10, Shaping the Change, XXIII FIG Congress Munich Germany, October 2006.

Richards, M., A Beginner's Guide to Interferometric SAR, *IEEE A&E Systems Magazine* Vol. 22, No. 9 Part 2: Tutorials, p.5-29, 2007.

Sarmap, Synthetic Aperture Radar and SARscape Guidebook, 2013.

Sarmap, SBAS Tutorial Version 2.0, Ιούλιος 2013.

S.Takeuchi, Improvement of DEM Quality Derived by Interferometric SAR by Using Multiple Baseline Data Pairs

T.Tounin, L.Gray, Stateof-the-art of elevation extraction from satellite SAR data,
Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 55 13-33, 2000.

U.G.Sefercik, I. Dana, Crutial Points of Interferometric Processing For DEM
Generation using High Resolution SAR Data, ISPRS, Hannover2011

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ακολουθεί πίνακας με όλα τα εν δυνάμει συμβολομετρικά ζευγάρια. Παρουσιάζεται το διάνυσμα βάσης καθώς και η χρονική αποσυσχέτιση μεταξύ των δύο λήψεων.

| α/α | Κύρια | Δευτερεύουσα | Διεύθυνση Κάθετης Βάσης (m) | Χρονική Διαφορά Λήψεων (ημέρες) | Πόλωση | |
|-----|----------|--------------|-----------------------------------|--|--------|--------------|
| | | | | | Κύρια | Δευτερεύουσα |
| 1 | 20034110 | 20030208 | 589734 | 61 | HH | HH |
| 2 | 20034110 | 20030420 | 275781 | -10 | HH | HH |
| 3 | 20034110 | 20030426 | 130048 | -16 | HH | HH |
| 4 | 20034110 | 20030426 | 63601.1 | -16 | HH | HH |
| 5 | 20034110 | 20030629 | 315174 | -80 | HH | HH |
| 6 | 20034110 | 2003070 | 124131 | -86 | HH | HH |
| 7 | 20034110 | 20030705b | 124348 | -86 | HH | HH |
| 8 | 20034110 | 20031018 | 122396 | -191 | HH | HH |
| 9 | 20034110 | 20031227 | 138002 | -261 | HH | HH |
| 10 | 20034110 | 20040131 | 136527 | -296 | HH | HH |
| 11 | 20034110 | 20040410 | 134074 | -366 | HH | HH |
| 12 | 20034110 | 20040515 | 135097 | -401 | HH | HH |
| 13 | 20034110 | 20040619 | 135912 | -436 | HH | HH |
| 14 | 20034110 | 20041125 | 209.509 | -595 | HH | HH |
| 15 | 20034110 | 20041125 | 209.509 | -595 | HH | HH |
| 16 | 20034110 | 20041226 | 800746 | -626 | HH | HH |
| 17 | 20034110 | 20041230 | 26.477 | -630 | HH | VV |
| 18 | 20034110 | 20041230 | 26.369 | -630 | HH | HH |
| 19 | 20034110 | 20041230 | 26.369 | -630 | HH | VV |
| 20 | 20034110 | 20041230b | 26.477 | -630 | HH | HH |
| 21 | 20034110 | 20050114 | 876391 | -645 | HH | VV |
| 22 | 20034110 | 20050114 | 876391 | -645 | HH | HH |
| 23 | 20030420 | 20030208 | 892669 | 71 | HH | HH |
| 24 | 20030420 | 20030410 | -328135 | 10 | HH | HH |
| 25 | 20030420 | 20030426 | -306846 | -6 | HH | HH |
| 26 | 20030420 | 20030426 | -263395 | -6 | HH | HH |
| 27 | 20030420 | 20030629 | -192591 | -70 | HH | HH |
| 28 | 20030420 | 2003070 | -300980 | -76 | HH | HH |
| 29 | 20030420 | 20030705b | -301113 | -76 | HH | HH |
| 30 | 20030420 | 20031018 | -301437 | -181 | HH | HH |
| 31 | 20030420 | 20031227 | -310991 | -251 | HH | HH |
| 32 | 20030420 | 20040131 | -310026 | -286 | HH | HH |
| 33 | 20030420 | 20040410 | -308673 | -356 | HH | HH |
| 34 | 20030420 | 20040515 | -307980 | -391 | HH | HH |
| 35 | 20030420 | 20040619 | -308841 | -426 | HH | HH |
| 36 | 20030420 | 20041125 | -328001 | -585 | HH | HH |
| 37 | 20030420 | 20041125 | -328001 | -585 | HH | HV |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|----|-----------|-----------|----------|------|----|----|
| 38 | 20030420 | 20041226 | 1,10E+10 | -616 | HH | HH |
| 39 | 20030420 | 20041230 | -328072 | -620 | HH | VV |
| 40 | 20030420 | 20041230 | -328140 | -620 | HH | HH |
| 41 | 20030420 | 20041230 | -328140 | -620 | HH | VV |
| 42 | 20030420 | 20041230b | -328072 | -620 | HH | HH |
| 43 | 20030420 | 20050114 | 1,19E+11 | -635 | HH | VV |
| 44 | 20030420 | 20050114 | 1,19E+11 | -635 | HH | HH |
| 45 | 20030426 | 20030208 | 617517 | 77 | HH | HH |
| 46 | 20030426 | 20030410 | -64009.5 | 16 | HH | HH |
| 47 | 20030426 | 20030420 | 226153 | 6 | HH | HH |
| 48 | 20030426 | 20030426 | -64839.3 | 0 | HH | HH |
| 49 | 20030426 | 20030629 | 226747 | -64 | HH | HH |
| 50 | 20030426 | 2003070 | 1916.44 | -70 | HH | HH |
| 51 | 20030426 | 20030705b | 1916.45 | -70 | HH | HH |
| 52 | 20030426 | 20031018 | 648.919 | -175 | HH | HH |
| 53 | 20030426 | 20031227 | 698.204 | -245 | HH | HH |
| 54 | 20030426 | 20040131 | 734.505 | -280 | HH | HH |
| 55 | 20030426 | 20040410 | 571.107 | -350 | HH | HH |
| 56 | 20030426 | 20040515 | 1729.58 | -385 | HH | HH |
| 57 | 20030426 | 20040619 | 1429.79 | -420 | HH | HH |
| 58 | 20030426 | 20041125 | -64024.8 | -579 | HH | HH |
| 59 | 20030426 | 20041125 | -64024.8 | -579 | HH | HH |
| 60 | 20030426 | 20041226 | 834131 | -610 | HH | HH |
| 61 | 20030426 | 20041230 | -63955.2 | -614 | HH | VV |
| 62 | 20030426 | 20041230 | -64072.4 | -614 | HH | HH |
| 63 | 20030426 | 20041230 | -64072.4 | -614 | HH | VV |
| 64 | 20030426 | 20041230b | -63955.2 | -614 | HH | HH |
| 65 | 20030426 | 20050114 | 929607 | -629 | HH | VV |
| 66 | 20030426 | 20050114 | 929607 | -629 | HH | HH |
| 67 | 20030426b | 20030208 | 670621 | 77 | HH | HH |
| 68 | 20030426b | 20030410 | -144422 | 16 | HH | HH |
| 69 | 20030426b | 20030420 | 222474 | 6 | HH | HH |
| 70 | 20030426b | 20030426 | -181618 | 0 | HH | HH |
| 71 | 20030426b | 20030629 | 310667 | -64 | HH | HH |
| 72 | 20030426b | 2003070 | 173631 | -70 | HH | HH |
| 73 | 20030426b | 20030705b | 173887 | -70 | HH | HH |
| 74 | 20030426b | 20031018 | 172360 | -175 | HH | HH |
| 75 | 20030426b | 20031227 | 190295 | -245 | HH | HH |
| 76 | 20030426b | 20040131 | 188604 | -280 | HH | HH |
| 77 | 20030426b | 20040410 | -185906 | -350 | HH | HH |
| 78 | 20030426b | 20040515 | 186448 | -385 | HH | HH |
| 79 | 20030426b | 20040619 | 187538 | -420 | HH | HH |
| 80 | 20030426b | 20041125 | -146984 | -579 | HH | HH |
| 81 | 20030426b | 20041125 | -146984 | -579 | HH | HV |
| 82 | 20030426b | 20041226 | 884865 | -610 | HH | HH |
| 83 | 20030426b | 20041230 | -143779 | -614 | HH | VV |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|----------|------|----|----|
| 84 | 20030426b | 20041230 | -145556 | -614 | HH | HH |
| 85 | 20030426b | 20041230 | -145556 | -614 | HH | VV |
| 86 | 20030426b | 20041230b | -143779 | -614 | HH | HH |
| 87 | 20030426b | 20050114 | 949726 | -629 | HH | VV |
| 88 | 20030426b | 20050114 | 949726 | -629 | HH | HH |
| 89 | 20030629 | 20030208 | 870338 | 141 | HH | HH |
| 90 | 20030629 | 20030410 | -331161 | 80 | HH | HH |
| 91 | 20030629 | 20030420 | -75943.6 | 70 | HH | HH |
| 92 | 20030629 | 20030426 | -266758 | 64 | HH | HH |
| 93 | 20030629 | 20030426 | -281531 | 64 | HH | HH |
| 94 | 20030629 | 2003070 | -264123 | -6 | HH | HH |
| 95 | 20030629 | 20030705b | -264141 | -6 | HH | HH |
| 96 | 20030629 | 20031018 | -265323 | -111 | HH | HH |
| 97 | 20030629 | 20031227 | -267095 | -181 | HH | HH |
| 98 | 20030629 | 20040131 | -266842 | -216 | HH | HH |
| 99 | 20030629 | 20040410 | -266658 | -286 | HH | HH |
| 100 | 20030629 | 20040515 | -265556 | -321 | HH | HH |
| 101 | 20030629 | 20040619 | -265999 | -356 | HH | HH |
| 102 | 20030629 | 20041125 | -330729 | -515 | HH | HH |
| 103 | 20030629 | 20041125 | -330729 | -515 | HH | HV |
| 104 | 20030629 | 20041226 | 1,07E+11 | -546 | HH | HH |
| 105 | 20030629 | 20041230 | -331174 | -550 | HH | VV |
| 106 | 20030629 | 20041230 | -331035 | -550 | HH | HH |
| 107 | 20030629 | 20041230 | -331035 | -550 | HH | VV |
| 108 | 20030629 | 20041230b | -331174 | -550 | HH | HH |
| 109 | 20030629 | 20050114 | 1,18E+11 | -565 | HH | VV |
| 110 | 20030629 | 20050114 | 1,18E+11 | -565 | HH | HH |
| 111 | 20030705 | 20030208 | 619344 | 147 | HH | HH |
| 112 | 20030705 | 20030410 | -67363.3 | 86 | HH | HH |
| 113 | 20030705 | 20030420 | 222692 | 76 | HH | HH |
| 114 | 20030705 | 20030426 | -1916.98 | 70 | HH | HH |
| 115 | 20030705 | 20030426 | -53813.2 | 70 | HH | HH |
| 116 | 20030705 | 20030629 | 225137 | 6 | HH | HH |
| 117 | 20030705 | 20030705b | 916.028 | 0 | HH | HH |
| 118 | 20030705 | 20031018 | -1269.43 | -105 | HH | HH |
| 119 | 20030705 | 20031227 | -1219.27 | -175 | HH | HH |
| 120 | 20030705 | 20040131 | -1183.99 | -210 | HH | HH |
| 121 | 20030705 | 20040410 | -1347.43 | -280 | HH | HH |
| 122 | 20030705 | 20040515 | -187.427 | -315 | HH | HH |
| 123 | 20030705 | 20040619 | -487.465 | -350 | HH | HH |
| 124 | 20030705 | 20041125 | -67854.8 | -509 | HH | HH |
| 125 | 20030705 | 20041125 | -67854.8 | -509 | HH | HV |
| 126 | 20030705 | 20041226 | 839717 | -540 | HH | HH |
| 127 | 20030705 | 20041230 | -67194.7 | -544 | HH | VV |
| 128 | 20030705 | 20041230 | -67630.8 | -544 | HH | HH |
| 129 | 20030705 | 20041230 | -67630.8 | -544 | HH | VV |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|-----------|------|----|----|
| 130 | 20030705 | 20041230b | -67194.7 | -544 | HH | HH |
| 131 | 20030705 | 20050114 | 932603 | -559 | HH | VV |
| 132 | 20030705 | 20050114 | 932603 | -559 | HH | HH |
| 133 | 20030705b | 20030208 | 619344 | 147 | HH | HH |
| 134 | 20030705b | 20030410 | -67256.4 | 86 | HH | HH |
| 135 | 20030705b | 20030420 | 222769 | 76 | HH | HH |
| 136 | 20030705b | 20030426 | -1916.98 | 70 | HH | HH |
| 137 | 20030705b | 20030426 | -54329.3 | 70 | HH | HH |
| 138 | 20030705b | 20030629 | 225137 | 6 | HH | HH |
| 139 | 20030705b | 2003070 | -0.020235 | 0 | HH | HH |
| 140 | 20030705b | 20031018 | -1269.43 | -105 | HH | HH |
| 141 | 20030705b | 20031227 | -1219.27 | -175 | HH | HH |
| 142 | 20030705b | 20040131 | -1183.99 | -210 | HH | HH |
| 143 | 20030705b | 20040410 | -1347.43 | -280 | HH | HH |
| 144 | 20030705b | 20040515 | -187.428 | -315 | HH | HH |
| 145 | 20030705b | 20040619 | -487.465 | -350 | HH | HH |
| 146 | 20030705b | 20041125 | -67726.3 | -509 | HH | HH |
| 147 | 20030705b | 20041125 | -67726.3 | -509 | HH | HV |
| 148 | 20030705b | 20041226 | 839534 | -540 | HH | HH |
| 149 | 20030705b | 20041230 | -67093 | -544 | HH | VV |
| 150 | 20030705b | 20041230 | -67514.6 | -544 | HH | HH |
| 151 | 20030705b | 20041230 | -67514.6 | -544 | HH | VV |
| 152 | 20030705b | 20041230b | -67093 | -544 | HH | HH |
| 153 | 20030705b | 20050114 | 932547 | -559 | HH | VV |
| 154 | 20030705b | 20050114 | 932547 | -559 | HH | HH |
| 155 | 20031018 | 20030208 | 618154 | 252 | HH | HH |
| 156 | 20031018 | 20030410 | -67170 | 191 | HH | HH |
| 157 | 20031018 | 20030420 | 223167 | 181 | HH | HH |
| 158 | 20031018 | 20030426 | -650.727 | 175 | HH | HH |
| 159 | 20031018 | 20030426 | -49472 | 175 | HH | HH |
| 160 | 20031018 | 20030629 | 226199 | 111 | HH | HH |
| 161 | 20031018 | 2003070 | 1269.41 | 105 | HH | HH |
| 162 | 20031018 | 20030705b | 1269.39 | 105 | HH | HH |
| 163 | 20031018 | 20031227 | 756.684 | -70 | HH | HH |
| 164 | 20031018 | 20040131 | 840.227 | -105 | HH | HH |
| 165 | 20031018 | 20040410 | -79.419 | -175 | HH | HH |
| 166 | 20031018 | 20040515 | 1080.9 | -210 | HH | HH |
| 167 | 20031018 | 20040619 | 780.83 | -245 | HH | HH |
| 168 | 20031018 | 20041125 | -67854.2 | -404 | HH | HH |
| 169 | 20031018 | 20041125 | -67854.2 | -404 | HH | HV |
| 170 | 20031018 | 20041226 | 840122 | -435 | HH | HH |
| 171 | 20031018 | 20041230 | -66956.1 | -439 | HH | VV |
| 172 | 20031018 | 20041230 | -67519.7 | -439 | HH | HH |
| 173 | 20031018 | 20041230 | -67519.7 | -439 | HH | VV |
| 174 | 20031018 | 20041230b | -66956.1 | -439 | HH | HH |
| 175 | 20031018 | 20050114 | 931866 | -454 | HH | VV |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|----------|-----------|----------|------|----|----|
| 176 | 20031018 | 20050114 | 931866 | -454 | HH | HH |
| 177 | 20031227 | 20030208 | 618205 | 322 | HH | HH |
| 178 | 20031227 | 20030410 | -64636.8 | 261 | HH | HH |
| 179 | 20031227 | 20030420 | 226102 | 251 | HH | HH |
| 180 | 20031227 | 20030426 | -698.022 | 245 | HH | HH |
| 181 | 20031227 | 20030426 | -67430 | 245 | HH | HH |
| 182 | 20031227 | 20030629 | 226171 | 181 | HH | HH |
| 183 | 20031227 | 2003070 | 1218.7 | 175 | HH | HH |
| 184 | 20031227 | 20030705b | 1218.7 | 175 | HH | HH |
| 185 | 20031227 | 20031018 | -702.266 | 70 | HH | HH |
| 186 | 20031227 | 20040131 | 580.903 | -35 | HH | HH |
| 187 | 20031227 | 20040410 | -136.051 | -105 | HH | HH |
| 188 | 20031227 | 20040515 | 1031.72 | -140 | HH | HH |
| 189 | 20031227 | 20040619 | 732.041 | -175 | HH | HH |
| 190 | 20031227 | 20041125 | -64531.8 | -334 | HH | HH |
| 191 | 20031227 | 20041125 | -64531.8 | -334 | HH | HV |
| 192 | 20031227 | 20041226 | 833895 | -365 | HH | HH |
| 193 | 20031227 | 20041230 | -64610.9 | -369 | HH | VV |
| 194 | 20031227 | 20041230 | -64648.1 | -369 | HH | HH |
| 195 | 20031227 | 20041230 | -64648.1 | -369 | HH | VV |
| 196 | 20031227 | 20041230b | -64610.9 | -369 | HH | HH |
| 197 | 20031227 | 20050114 | 930052 | -384 | HH | VV |
| 198 | 20031227 | 20050114 | 930052 | -384 | HH | HH |
| 199 | 20040131 | 20030208 | 618258 | 357 | HH | HH |
| 200 | 20040131 | 20030410 | -64701.8 | 296 | HH | HH |
| 201 | 20040131 | 20030420 | 225745 | 286 | HH | HH |
| 202 | 20040131 | 20030426 | -734.331 | 280 | HH | HH |
| 203 | 20040131 | 20030426 | -65739.9 | 280 | HH | HH |
| 204 | 20040131 | 20030629 | 226140 | 216 | HH | HH |
| 205 | 20040131 | 2003070 | 1185.14 | 210 | HH | HH |
| 206 | 20040131 | 20030705b | 1185.12 | 210 | HH | HH |
| 207 | 20040131 | 20031018 | -84.407 | 105 | HH | HH |
| 208 | 20040131 | 20031227 | -657.032 | 35 | HH | HH |
| 209 | 20040131 | 20040410 | -163.669 | -70 | HH | HH |
| 210 | 20040131 | 20040515 | 996.873 | -105 | HH | HH |
| 211 | 20040131 | 20040619 | 696.695 | -140 | HH | HH |
| 212 | 20040131 | 20041125 | -64673.9 | -299 | HH | HH |
| 213 | 20040131 | 20041125 | -64673.9 | -299 | HH | HV |
| 214 | 20040131 | 20041226 | 834512 | -330 | HH | HH |
| 215 | 20040131 | 20041230 | -64657.4 | -334 | HH | VV |
| 216 | 20040131 | 20041230 | -64746.3 | -334 | HH | HH |
| 217 | 20040131 | 20041230 | -64746.3 | -334 | HH | VV |
| 218 | 20040131 | 20041230b | -64657.4 | -334 | HH | HH |
| 219 | 20040131 | 20050114 | 930256 | -349 | HH | VV |
| 220 | 20040131 | 20050114 | 930256 | -349 | HH | HH |
| 221 | 20040410 | 20030208 | 618060 | 427 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|----------|-----------|----------|------|----|----|
| 222 | 20040410 | 20030410 | -64686.6 | 366 | HH | HH |
| 223 | 20040410 | 20030420 | 225341 | 356 | HH | HH |
| 224 | 20040410 | 20030426 | -571.313 | 350 | HH | HH |
| 225 | 20040410 | 20030426 | -63005.2 | 350 | HH | HH |
| 226 | 20040410 | 20030629 | 226258 | 286 | HH | HH |
| 227 | 20040410 | 2003070 | 1348.74 | 280 | HH | HH |
| 228 | 20040410 | 20030705b | 1348.72 | 280 | HH | HH |
| 229 | 20040410 | 20031018 | 796.447 | 175 | HH | HH |
| 230 | 20040410 | 20031227 | 138.864 | 105 | HH | HH |
| 231 | 20040410 | 20040131 | 163.29 | 70 | HH | HH |
| 232 | 20040410 | 20040515 | 1160.1 | -35 | HH | HH |
| 233 | 20040410 | 20040619 | 859.926 | -70 | HH | HH |
| 234 | 20040410 | 20041125 | -64783.7 | -229 | HH | HH |
| 235 | 20040410 | 20041125 | -64783.7 | -229 | HH | HV |
| 236 | 20040410 | 20041226 | 835264 | -260 | HH | HH |
| 237 | 20040410 | 20041230 | -64612.5 | -264 | HH | VV |
| 238 | 20040410 | 20041230 | -64784.7 | -264 | HH | HH |
| 239 | 20040410 | 20041230 | -64784.7 | -264 | HH | VV |
| 240 | 20040410 | 20041230b | -64612.5 | -264 | HH | HH |
| 241 | 20040410 | 20050114 | 930325 | -279 | HH | VV |
| 242 | 20040410 | 20050114 | 930325 | -279 | HH | HH |
| 243 | 20040515 | 20030208 | 619165 | 462 | HH | HH |
| 244 | 20040515 | 20030410 | -65813.5 | 401 | HH | HH |
| 245 | 20040515 | 20030420 | 224486 | 391 | HH | HH |
| 246 | 20040515 | 20030426 | -1729.67 | 385 | HH | HH |
| 247 | 20040515 | 20030426 | -63585.7 | 385 | HH | HH |
| 248 | 20040515 | 20030629 | 225292 | 321 | HH | HH |
| 249 | 20040515 | 2003070 | 187.523 | 315 | HH | HH |
| 250 | 20040515 | 20030705b | 188.021 | 315 | HH | HH |
| 251 | 20040515 | 20031018 | -1081.89 | 210 | HH | HH |
| 252 | 20040515 | 20031227 | -1032.14 | 140 | HH | HH |
| 253 | 20040515 | 20040131 | -996.583 | 105 | HH | HH |
| 254 | 20040515 | 20040410 | -1160.07 | 35 | HH | HH |
| 255 | 20040515 | 20040619 | -300.043 | -35 | HH | HH |
| 256 | 20040515 | 20041125 | -65880.6 | -194 | HH | HH |
| 257 | 20040515 | 20041125 | -65880.6 | -194 | HH | HV |
| 258 | 20040515 | 20041226 | 836126 | -225 | HH | HH |
| 259 | 20040515 | 20041230 | -65746.2 | -229 | HH | VV |
| 260 | 20040515 | 20041230 | -65899 | -229 | HH | HH |
| 261 | 20040515 | 20041230 | -65899 | -229 | HH | VV |
| 262 | 20040515 | 20041230b | -65746.2 | -229 | HH | HH |
| 263 | 20040515 | 20050114 | 931399 | -244 | HH | VV |
| 264 | 20040515 | 20050114 | 931399 | -244 | HH | HH |
| 265 | 20040619 | 20030208 | 618902 | 497 | HH | HH |
| 266 | 20040619 | 20030410 | -65447.7 | 436 | HH | HH |
| 267 | 20040619 | 20030420 | 224955 | 426 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|----------|-----------|----------|------|----|----|
| 268 | 20040619 | 20030426 | -1429.75 | 420 | HH | HH |
| 269 | 20040619 | 20030426 | -64693.1 | 420 | HH | HH |
| 270 | 20040619 | 20030629 | 225552 | 356 | HH | HH |
| 271 | 20040619 | 2003070 | 487.683 | 350 | HH | HH |
| 272 | 20040619 | 20030705b | 487.959 | 350 | HH | HH |
| 273 | 20040619 | 20031018 | -781.69 | 245 | HH | HH |
| 274 | 20040619 | 20031227 | -732.564 | 175 | HH | HH |
| 275 | 20040619 | 20040131 | -696.539 | 140 | HH | HH |
| 276 | 20040619 | 20040410 | -859.977 | 70 | HH | HH |
| 277 | 20040619 | 20040515 | 300.048 | 35 | HH | HH |
| 278 | 20040619 | 20041125 | -65465.8 | -159 | HH | HH |
| 279 | 20040619 | 20041125 | -65465.8 | -159 | HH | HV |
| 280 | 20040619 | 20041226 | 835491 | -190 | HH | HH |
| 281 | 20040619 | 20041230 | -65392.2 | -194 | HH | VV |
| 282 | 20040619 | 20041230 | -65512.1 | -194 | HH | HH |
| 283 | 20040619 | 20041230 | -65512.1 | -194 | HH | VV |
| 284 | 20040619 | 20041230b | -65392.2 | -194 | HH | HH |
| 285 | 20040619 | 20050114 | 931019 | -209 | HH | VV |
| 286 | 20040619 | 20050114 | 931019 | -209 | HH | HH |
| 287 | 20041125 | 20030208 | 556200 | 656 | HH | HH |
| 288 | 20041125 | 20030410 | -209.57 | 595 | HH | HH |
| 289 | 20041125 | 20030420 | 275603 | 585 | HH | HH |
| 290 | 20041125 | 20030426 | 127287 | 579 | HH | HH |
| 291 | 20041125 | 20030426 | 63793.1 | 579 | HH | HH |
| 292 | 20041125 | 20030629 | 313635 | 515 | HH | HH |
| 293 | 20041125 | 2003070 | 121433 | 509 | HH | HH |
| 294 | 20041125 | 20030705b | 121649 | 509 | HH | HH |
| 295 | 20041125 | 20031018 | 119693 | 404 | HH | HH |
| 296 | 20041125 | 20031227 | 135206 | 334 | HH | HH |
| 297 | 20041125 | 20040131 | 133739 | 299 | HH | HH |
| 298 | 20041125 | 20040410 | 131297 | 229 | HH | HH |
| 299 | 20041125 | 20040515 | 132327 | 194 | HH | HH |
| 300 | 20041125 | 20040619 | 133135 | 159 | HH | HH |
| 301 | 20041125 | 20041226 | 799584 | -31 | HH | HH |
| 302 | 20041125 | 20041230 | -197.518 | -35 | HH | VV |
| 303 | 20041125 | 20041230 | -197.286 | -35 | HH | HH |
| 304 | 20041125 | 20041230 | -197.286 | -35 | HH | VV |
| 305 | 20041125 | 20041230b | -197.518 | -35 | HH | HH |
| 306 | 20041125 | 20050114 | 876048 | -50 | HH | VV |
| 307 | 20041125 | 20050114 | 876048 | -50 | HH | HH |
| 308 | 20041226 | 20030208 | -234288 | 687 | HH | HH |
| 309 | 20041226 | 20030410 | 773932 | 626 | HH | HH |
| 310 | 20041226 | 20030420 | 920416 | 616 | HH | HH |
| 311 | 20041226 | 20030426 | 804660 | 610 | HH | HH |
| 312 | 20041226 | 20030426 | 859079 | 610 | HH | HH |
| 313 | 20041226 | 20030629 | 875375 | 546 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|----------|-----------|----------|-----|----|----|
| 314 | 20041226 | 2003070 | 809521 | 540 | HH | HH |
| 315 | 20041226 | 20030705b | 809417 | 540 | HH | HH |
| 316 | 20041226 | 20031018 | 808956 | 435 | HH | HH |
| 317 | 20041226 | 20031227 | 801878 | 365 | HH | HH |
| 318 | 20041226 | 20040131 | 802579 | 330 | HH | HH |
| 319 | 20041226 | 20040410 | 803450 | 260 | HH | HH |
| 320 | 20041226 | 20040515 | 804248 | 225 | HH | HH |
| 321 | 20041226 | 20040619 | 803583 | 190 | HH | HH |
| 322 | 20041226 | 20041125 | 772622 | 31 | HH | HH |
| 323 | 20041226 | 20041125 | 772622 | 31 | HH | HV |
| 324 | 20041226 | 20041230 | 774229 | -4 | HH | VV |
| 325 | 20041226 | 20041230 | 773269 | -4 | HH | HH |
| 326 | 20041226 | 20041230 | 773269 | -4 | HH | VV |
| 327 | 20041226 | 20041230b | 774229 | -4 | HH | HH |
| 328 | 20041226 | 20050114 | 311677 | -19 | HH | VV |
| 330 | 2001230 | 20030208 | 589899 | 691 | VV | HH |
| 331 | 2001230 | 20030410 | -345.157 | 630 | VV | HH |
| 332 | 2001230 | 20030420 | 275766 | 620 | VV | HH |
| 333 | 2001230 | 20030426 | 130432 | 614 | VV | HH |
| 334 | 2001230 | 20030426 | 63545.6 | 614 | VV | HH |
| 335 | 2001230 | 20030629 | 315367 | 550 | VV | HH |
| 336 | 2001230 | 2003070 | 124504 | 544 | VV | HH |
| 337 | 2001230 | 20030705b | 124722 | 544 | VV | HH |
| 338 | 2001230 | 20031018 | 122770 | 439 | VV | HH |
| 339 | 2001230 | 20031227 | 138391 | 369 | VV | HH |
| 340 | 2001230 | 20040131 | 136915 | 334 | VV | HH |
| 341 | 2001230 | 20040410 | 134461 | 264 | VV | HH |
| 342 | 2001230 | 20040515 | 135482 | 229 | VV | HH |
| 343 | 2001230 | 20040619 | 136299 | 194 | VV | HH |
| 344 | 2001230 | 20041125 | 198.826 | 35 | VV | HH |
| 345 | 2001230 | 20041125 | 198.826 | 35 | VV | HV |
| 346 | 2001230 | 20041226 | 800944 | 4 | VV | HH |
| 347 | 2001230 | 20041230 | 0.248312 | 0 | VV | HH |
| 348 | 2001230 | 20041230 | 0.248312 | 0 | VV | VV |
| 349 | 2001230 | 20041230b | -914.003 | 0 | VV | HH |
| 350 | 2001230 | 20050114 | 876474 | -15 | VV | VV |
| 351 | 2001230 | 20050114 | 876474 | -15 | VV | HH |
| 352 | 2001230 | 20030208 | 556029 | 691 | HH | HH |
| 353 | 2001230 | 20030410 | -342.916 | 630 | HH | HH |
| 354 | 2001230 | 20030420 | 275766 | 620 | HH | HH |
| 355 | 2001230 | 20030426 | 128877 | 614 | HH | HH |
| 356 | 2001230 | 20030426 | 63748.8 | 614 | HH | HH |
| 357 | 2001230 | 20030629 | 314557 | 550 | HH | HH |
| 358 | 2001230 | 2003070 | 122989 | 544 | HH | HH |
| 359 | 2001230 | 20030705b | 123206 | 544 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
 Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
 Εδάφους

| | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|----------|-----|----|----|
| 360 | 2001230 | 20031018 | 121252 | 439 | HH | HH |
| 361 | 2001230 | 20031227 | 136813 | 369 | HH | HH |
| 362 | 2001230 | 20040131 | 135342 | 334 | HH | HH |
| 363 | 2001230 | 20040410 | 132894 | 264 | HH | HH |
| 364 | 2001230 | 20040515 | 133921 | 229 | HH | HH |
| 365 | 2001230 | 20040619 | 134733 | 194 | HH | HH |
| 366 | 2001230 | 20041125 | 198.773 | 35 | HH | HH |
| 367 | 2001230 | 20041125 | 198.773 | 35 | HH | HV |
| 368 | 2001230 | 20041226 | 800162 | 4 | HH | HH |
| 369 | 2001230 | 20041230 | -889.129 | 0 | HH | VV |
| 370 | 2001230 | 20041230b | -889.129 | 0 | HH | HH |
| 371 | 2001230 | 20050114 | 876159 | -15 | HH | VV |
| 372 | 2001230 | 20050114 | 876159 | -15 | HH | HH |
| 373 | 20041230 | 20030208 | 556029 | 691 | VV | HH |
| 374 | 20041230 | 20030410 | -342.916 | 630 | VV | HH |
| 375 | 20041230 | 20030420 | 275766 | 620 | VV | HH |
| 376 | 20041230 | 20030426 | 128877 | 614 | VV | HH |
| 377 | 20041230 | 20030426 | 63748.8 | 614 | VV | HH |
| 378 | 20041230 | 20030629 | 314557 | 550 | VV | HH |
| 379 | 20041230 | 2003070 | 122989 | 544 | VV | HH |
| 380 | 20041230 | 20030705b | 123206 | 544 | VV | HH |
| 381 | 20041230 | 20031018 | 121252 | 439 | VV | HH |
| 382 | 20041230 | 20031227 | 136813 | 369 | VV | HH |
| 383 | 20041230 | 20040131 | 135342 | 334 | VV | HH |
| 384 | 20041230 | 20040410 | 132894 | 264 | VV | HH |
| 385 | 20041230 | 20040515 | 133921 | 229 | VV | HH |
| 386 | 20041230 | 20040619 | 134733 | 194 | VV | HH |
| 387 | 20041230 | 20041125 | 198.773 | 35 | VV | HH |
| 388 | 20041230 | 20041125 | 198.773 | 35 | VV | HV |
| 389 | 20041230 | 20041226 | 800162 | 4 | VV | HH |
| 390 | 20041230 | 20041230 | -889.129 | 0 | VV | VV |
| 391 | 20041230 | 20041230b | -889.129 | 0 | VV | HH |
| 392 | 20041230 | 20050114 | 876159 | -15 | VV | VV |
| 393 | 20041230 | 20050114 | 876159 | -15 | VV | HH |
| 394 | 20041230b | 20030208 | 589899 | 691 | HH | HH |
| 395 | 20041230b | 20030410 | -345.157 | 630 | HH | HH |
| 396 | 20041230b | 20030420 | 275766 | 620 | HH | HH |
| 397 | 20041230b | 20030426 | 130432 | 614 | HH | HH |
| 398 | 20041230b | 20030426 | 63545.6 | 614 | HH | HH |
| 399 | 20041230b | 20030629 | 315367 | 550 | HH | HH |
| 400 | 20041230b | 2003070 | 124504 | 544 | HH | HH |
| 401 | 20041230b | 20030705b | 124722 | 544 | HH | HH |
| 402 | 20041230b | 20031018 | 122770 | 439 | HH | HH |
| 403 | 20041230b | 20031227 | 138391 | 369 | HH | HH |
| 404 | 20041230b | 20040131 | 136915 | 334 | HH | HH |
| 405 | 20041230b | 20040410 | 134461 | 264 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
Εδάφους

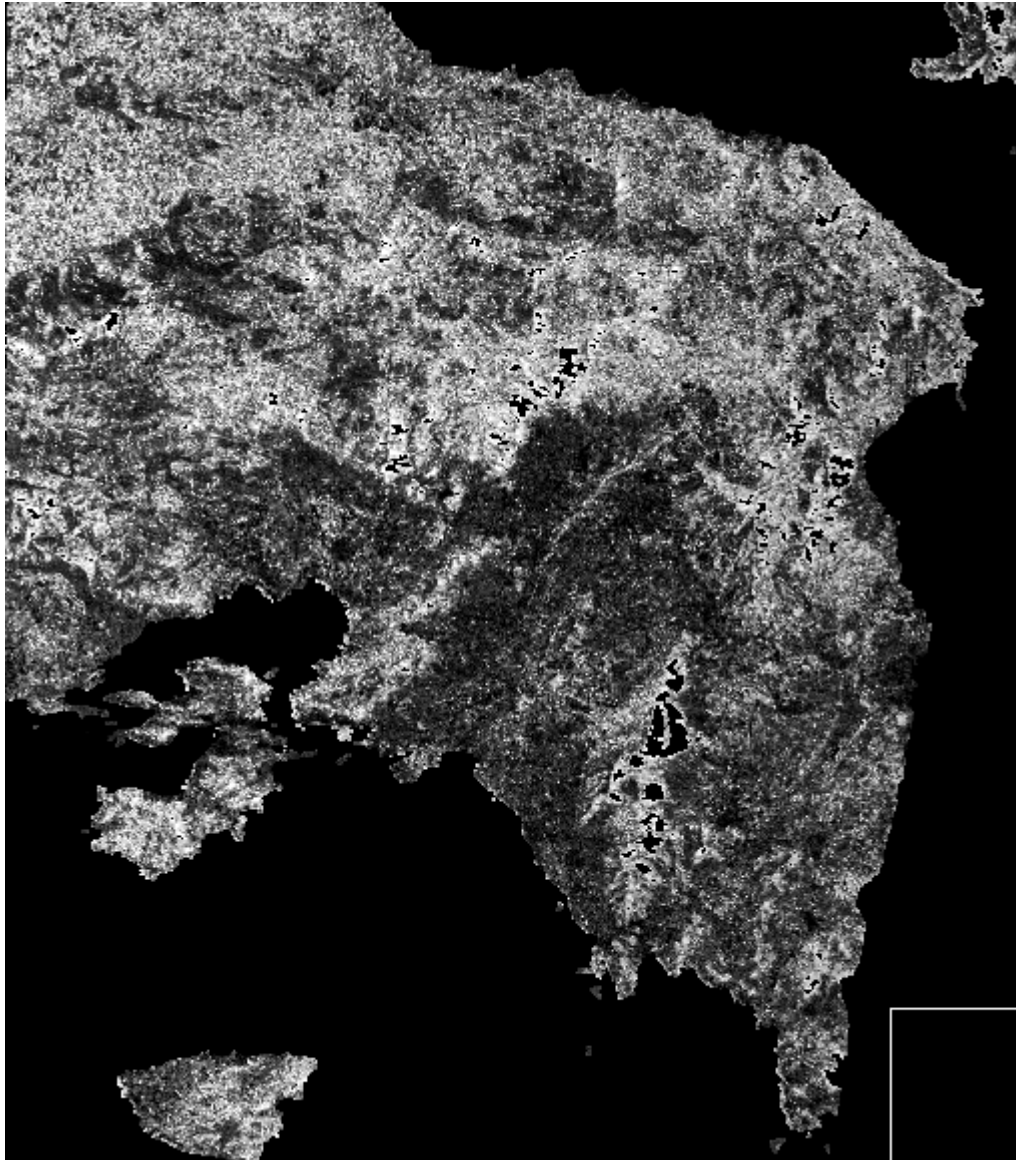
| | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|----------|-----|----|----|
| 406 | 20041230b | 20040515 | 135482 | 229 | HH | HH |
| 407 | 20041230b | 20040619 | 136299 | 194 | HH | HH |
| 408 | 20041230b | 20041125 | 198.826 | 35 | HH | HH |
| 409 | 20041230b | 20041125 | 198.826 | 35 | HH | HV |
| 410 | 20041230b | 20041226 | 800944 | 4 | HH | HH |
| 411 | 20041230b | 20041230 | -914.003 | 0 | HH | VV |
| 412 | 20041230b | 20041230 | 0.248312 | 0 | HH | HH |
| 413 | 20041230b | 20041230 | 0.248312 | 0 | HH | VV |
| 414 | 20041230b | 20050114 | 876474 | -15 | HH | VV |
| 415 | 20041230b | 20050114 | 876474 | -15 | HH | HH |
| 416 | 20050114 | 20030208 | -290925 | 706 | VV | HH |
| 417 | 20050114 | 20030410 | 835827 | 645 | VV | HH |
| 418 | 20050114 | 20030420 | 961090 | 635 | VV | HH |
| 419 | 20050114 | 20030426 | 885458 | 629 | VV | HH |
| 420 | 20050114 | 20030426 | 910006 | 629 | VV | HH |
| 421 | 20050114 | 20030629 | 945200 | 565 | VV | HH |
| 422 | 20050114 | 2003070 | 888422 | 559 | VV | HH |
| 423 | 20050114 | 20030705b | 888383 | 559 | VV | HH |
| 424 | 20050114 | 20031018 | 887458 | 454 | VV | HH |
| 425 | 20050114 | 20031227 | 884934 | 384 | VV | HH |
| 426 | 20050114 | 20040131 | 885217 | 349 | VV | HH |
| 427 | 20050114 | 20040410 | 885377 | 279 | VV | HH |
| 428 | 20050114 | 20040515 | 886385 | 244 | VV | HH |
| 429 | 20050114 | 20040619 | 885987 | 209 | VV | HH |
| 430 | 20050114 | 20041125 | 835300 | 50 | VV | HH |
| 431 | 20050114 | 20041125 | 835300 | 50 | VV | HV |
| 432 | 20050114 | 20041226 | -197625 | 19 | VV | HH |
| 433 | 20050114 | 20041230 | 835920 | 15 | VV | VV |
| 434 | 20050114 | 20041230 | 835486 | 15 | VV | HH |
| 435 | 20050114 | 20041230 | 835486 | 15 | VV | VV |
| 436 | 20050114 | 20041230b | 835920 | 15 | VV | HH |
| 437 | 20050114 | 20050114 | -883.488 | 0 | VV | HH |
| 438 | 20050114 | 20030208 | -290925 | 706 | HH | HH |
| 439 | 20050114 | 20030410 | 835827 | 645 | HH | HH |
| 440 | 20050114 | 20030420 | 961090 | 635 | HH | HH |
| 441 | 20050114 | 20030426 | 885458 | 629 | HH | HH |
| 442 | 20050114 | 20030426 | 910006 | 629 | HH | HH |
| 443 | 20050114 | 20030629 | 945200 | 565 | HH | HH |
| 444 | 20050114 | 2003070 | 888422 | 559 | HH | HH |
| 445 | 20050114 | 20030705b | 888383 | 559 | HH | HH |
| 446 | 20050114 | 20031018 | 887458 | 454 | HH | HH |
| 447 | 20050114 | 20031227 | 884934 | 384 | HH | HH |
| 448 | 20050114 | 20040131 | 885217 | 349 | HH | HH |
| 449 | 20050114 | 20040410 | 885377 | 279 | HH | HH |
| 450 | 20050114 | 20040515 | 886385 | 244 | HH | HH |
| 451 | 20050114 | 20040619 | 885987 | 209 | HH | HH |

Ε.Μ.Π.-Σ.Α.Τ.Μ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»
Διπλωματική Εργασία με θέμα Χρήση της Τεχνικής της Συμβολομετρίας για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου
Εδάφους

| | | | | | | |
|------------|----------|-----------|----------|----|----|----|
| 452 | 20050114 | 20041125 | 835300 | 50 | HH | HH |
| 453 | 20050114 | 20041125 | 835300 | 50 | HH | HV |
| 454 | 20050114 | 20041226 | -197625 | 19 | HH | HH |
| 455 | 20050114 | 20041230 | 835920 | 15 | HH | VV |
| 456 | 20050114 | 20041230 | 835486 | 15 | HH | HH |
| 457 | 20050114 | 20041230 | 835486 | 15 | HH | VV |
| 458 | 20050114 | 20041230b | 835920 | 15 | HH | HH |
| 459 | 20050114 | 20050114 | -883.488 | 0 | HH | VV |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Β1. Αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών συμβολομετρικού ζευγαριού 1. Ημερομηνία Κύριας Λήψης 20041125, ημερομηνία δευτερεύουσας λήψης 20041230.



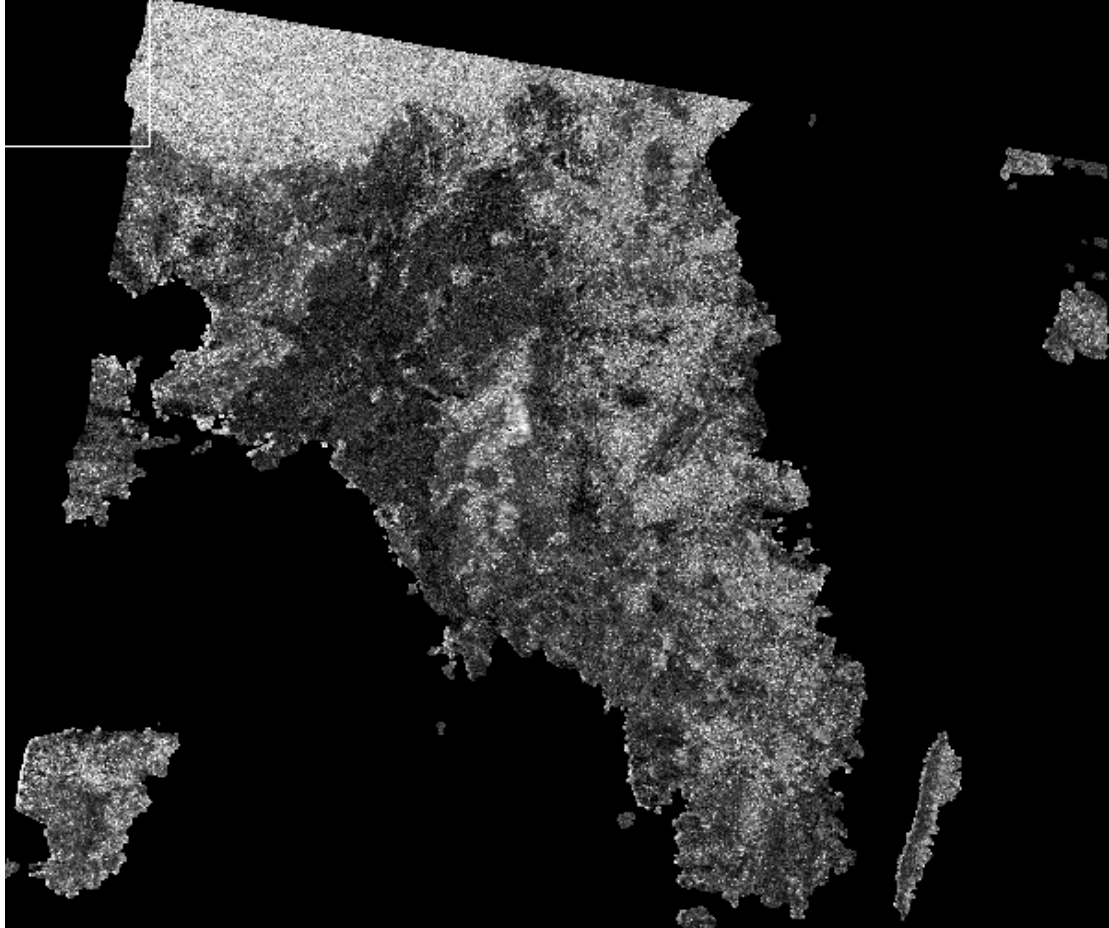
B2. Αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών συμβολομετρικού ζευγαριού 3. Ημερομηνία Κύριας Λήψης 20030705, ημερομηνία δευτερεύουσας λήψης 20040515.



Β3. Αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών συμβολομετρικού ζευγαριού 4. Ημερομηνία Κύριας Λήψης 20031227, ημερομηνία δευτερεύουσας λήψης 20040410.



Β4. Αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών συμβολομετρικού ζευγαριού 5. Ημερομηνία Κύριας Λήψης 20040131, ημερομηνία δευτερεύουσας λήψης 20040410.



B5. Αρχείο εκτίμησης ακρίβειας των υπολογισμών συμβολομετρικού ζευγαριού 6. Ημερομηνία Κύριας Λήψης 20040515, ημερομηνία δευτερεύουσας λήψης 20040619.

