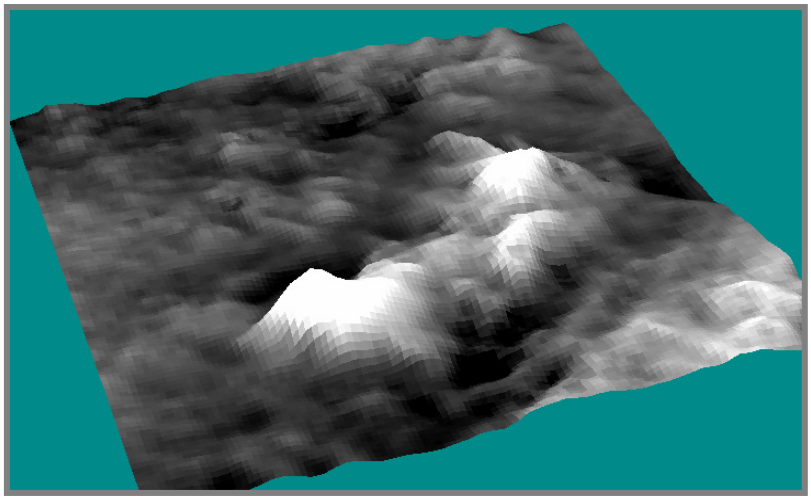
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «*Γεωπληροφορική*»

Διπλωματική Εργασία

"ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ/ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΕ Χ.Υ.Τ.Α. ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ RADAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ"



Γραμματικού Ζωή

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Βασιλεία Καραθανάση

ΑΘΗΝΑ 2010

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

1) Επίκουρος Καθηγήτρια Βασιλεία Καραθανάση, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης - Τομέας Τοπογραφίας - Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Επιβλέπουσα
2) Καθηγητής Δημήτριος Αργιαλάς, Διευθυντής στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης - Τομέας Τοπογραφίας - Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μέλος
3) Λέκτορας Ισαάκ Παρχαρίδης, Τμήμα Γεωγραφίας - Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Μέλος

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Τμήματος Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος *«Γεωπληροφορική»*. Πραγματεύεται την παρακολούθηση της μετακίνησης/παραμόρφωσης του ανάγλυφου σε χώρους απόθεσης απορριμμάτων με τη μέθοδο της *Διαφορικής Συμβολομετρίας* σε εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία ο αναγνώστης αρχικά εισάγεται στις βασικές αρχές της συμβολομετρίας σε εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR). Σταδιακά, μέσα από την εφαρμογή των βημάτων της συμβολομετρίας παρακολουθεί κάθε βήμα της διαδικασίας και συγκεκριμένα τα δεδομένα, τα ζητούμενα, τις δυσκολίες που προκύπτουν και τον τρόπο που αντιμετωπίζονται και φυσικά τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Η συνεισφορά της εργασίας αυτής στο γνωστικό πεδίο της *Διαφορικής Συμβολομετρίας* έγκειται στην παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου καθώς και εικόνων που παρουσιάζουν την σταδιακή μετακίνηση/παραμόρφωση του αναγλύφου για ένα συγκεκριμένο εύρος χρόνου, σε χώρους που παρατηρείται ενεργή και συνεχής ανθρώπινη παρέμβαση.

Πριν την παρουσίαση των κεφαλαίων της εργασίας θεωρώ απαραίτητο να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της. Τις θερμότερες ευχαριστίες μου οφείλω στην επιβλέπουσα Επίκουρο Καθηγήτρια Κυρία Βασιλεία Καραθανάση για την άψογη συνεργασία σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η αδιάκοπη καθοδήγησή της σε όλη την ερευνητική μου πορεία, η υπόδειξη της κατάλληλης βιβλιογραφίας, το αμείωτο ενδιαφέρον για την εξέλιξη της έρευνας, η πρακτική βοήθεια που μου προσέφερε σε τεχνικά ζητήματα παραμερίζοντας την προσωπική της ευκολία και η εμπιστοσύνη της προς εμένα ήταν παράγοντες καθοριστικοί για την περάτωση της εργασίας μου.

Τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να υποβάλω στο *Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφίων* για την οικονομική στήριξη που μου προσέφερε κατά την διάρκεια

παρακολούθησης των μαθημάτων μου στο Μεταπτυχιακό πρόγραμμα από τον Οκτώβριο του 2008 έως και τον Οκτώβριο του 2009.

Ευχαριστώ επίσης, θερμά τα μέλη του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, Κολοκούση Πολυχρόνη και Ιωσιφίδη Χρήστο και τους φοιτητές Συκά Δημήτρη και Χουσιάφη Χρήστο για την πολύτιμη βοήθεια, την συμπαράσταση και την εξαιρετική συνεργασία.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ENVIROPLAN για την στήριξη και την πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε προμηθεύοντάς με υλικό και επίγειες μετρήσεις και απαντώντας σε κάθε μου ερώτημα σχετικό με την διαμόρφωση και την εξέλιξη των έργων στην περιοχή μελέτης, μέσα από την πολϋετή εμπειρία της σε μελέτες διαχείρισης απορριμμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου που με εμψυχώνει, με συμβουλεύει και με στηρίζει, σε κάθε μου απόφαση, σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 10
1. Εισαγωγή 10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 13
2. Παρουσίαση περιοχής μελέτης 13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 21
3. Επιλογή επιστημονικής μεθόδου και ανασκόπηση σχετικών ερευνών 21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 31
4. Δεδομένα 31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 37
5. Επεξεργασία 37
5.1 Εισαγωγή των εικόνων 37
5.2 Εκτίμηση του διανύσματος βάσης 39
5.3 Δημιουργία συμβολογράμματος με τη χρήση DEM αναφοράς 40
5.4 Εφαρμογή φίλτρου στο συμβολόγραμμα και δημιουργία της εικόνας συνάφειας με τη μέθοδο Goldstein 46
5.5 Αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης 50
5.5.1 Επεξεργασία της απεκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης 51
5.6. Επαναπροσδιορισμός της τροχιακής θέσης των δορυφόρων 52
5.7 Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο για την παραγωγή DEM 54
5.9 Διαφορική Συμβολομετρία 58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 61
6. Ανάλυση των αποτελεσμάτων 61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 68
7. Συμπεράσματα 68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 71
8. Βιβλιογραφία και Αναφορές 71
8.1 Βιβλιογραφία 71
8.2 Επιστημονικές Έρευνες 71

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Χάρτης Προσανατολισμού της περιοχής μελέτης 14
Εικόνα 2: Βασική φιλοσοφία σχεδιασμού ενός ΧΥΤΑ 18
Εικόνα 3: Γενική Διάταξη έργων ΟΕΔΑ Δυτικής Αττικής..... 19
Εικόνα 4: Σύγκριση της γεωμετρίας των δύο μεθόδων εξαγωγής υψομέτρου: Στερεοσκοπική μέθοδος και Συμβολομετρία. Στην πρώτη περίπτωση το μήκος του διανύσματος βάσης κυμαίνεται σε μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα ενώ στην δεύτερη σε μερικές εκατοντάδες μέτρα (Δθi<<<Δθs και Bi<<<Bs) 22
Εικόνα 5: Η συσχέτιση της φάσης με την απόσταση δορυφόρου-στόχου αποτελεί την ιδέα στην οποία βασίζεται η Συμβολομετρία 25
Εικόνα 6: Η έκταση που αποτυπώνεται είναι η ίδια (ground range) αλλά η προβολή της αλλάζει εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας του συστήματος του δορυφόρου από τη θέση S_1 στη θέση S_2. 27
Εικόνα 7: Η μετατόπιση του φάσματος (spectral shift) είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία των κροσσών συμβολής αλλά και του θορύβου της φάσης 27
Εικόνα 8: Το σύστημα radar ENVISAT ASAR σε διαφορετικούς τύπους λειτουργίας..... 33
Εικόνα 9: Διαφορετικές εκδοχές πόλωσης της κεραίας του radar 33
Εικόνα 10: Το DEM που παράγεται από ψηφιοποίηση χαρτών 1:5000 με χωρική ανάλυση 5m. Οι τόνοι του γκρίζου ανοίγουν προς το λευκό όσο το υψόμετρο αυξάνεται. 35
Εικόνα 11(α) και (β): Τμήμα της ENVISAT ASAR IMS απεικόνισης (31 Ιανουαρίου 2004). Αριστερά παρουσιάζεται η SLC εικόνα όπως δίνεται από το δορυφόρο, με πλάγια λήψη. Δεξιά είναι το μέτρο της SLC εικόνας που προκύπτει από το άθροισμα του πραγματικού και του φανταστικού της μέρους. 38
Εικόνα 12: Η διαδικασία γεωαναφοράς με τη χρήση σημείων επίγειου ελέγχου..... 43
Εικόνα 13: Η διαδικασία γεωαναφοράς με τη χρήση DEM..... 43
Εικόνα 14: Στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται από πάνω προς τα κάτω η master εικόνα του set 6 (2003 07 05) μετά την συμπροσαρμογή και το αντίστοιχο συμβολόγραμμα με τη χρήση του DEM 5m πριν και μετά την αφαίρεση του όρου της Επίπεδης Γης. Στην δεξιά στήλη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη χρήση του DEM ASTER 30m. 45
Εικόνα 15: Το συμβολόγραμμα του ζεύγους εικόνων από το set 6, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή φασματικού φίλτρου με τη μέθοδο Goldstein. Η δημιουργία του συμβολογράμματος έγινε με τη χρήση του DEM 5μ. 47
Εικόνα 16: Σύγκριση ανάμεσα στο συμβολόγραμμα του ζεύγους εικόνων του set 3 πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή φασματικού φίλτρου με τη μέθοδο Goldstein. Η δημιουργία του συμβολογράμματος έγινε με τη χρήση του DEM SRTM..... 48
Εικόνα 17: Τμήμα από την εικόνα της συνάφειας του set 3. Επάνω δεξιά παρουσιάζεται το αποτέλεσμα σε τόνους του γκρίζου όπου το μάυρο χρώμα αντιστοιχεί σε γ=0 και το λευκό σε γ=1. Στην ψευδέγχρωμη εικόνα, κάτω δεξιά, παρουσιάζεται η ίδια εικόνα συνάφειας με μια χρωματική διαβάθμιση σε συνάρτηση του τελεστή γ με τις εξής αντιστοιχίες χρωμάτων: Κόκκινο χρώμα: 0.0≤γ<0.3,

Πράσινο χρώμα: 0.3≤γ<0.6, Μπλε χρώμα: 0.6≤γ<1. Μέσα σε κύκλο σημειώνεται η περιοχή μελέτης, με εμφανή κακή συνάφεια. 49
Εικόνα 18: Αριστερά η εικόνα της αποκατάστημένης φάσης του set 3 με την χρήση του DEM 5m και δεξιά το αντίστοιχο αποτέλεσμα με τη χρήση του DEM ASTER 30m. 51
Εικόνα 19: Ασυνέχειες στην εικόνα της αποκατεστημένης φάσης 52
Εικόνα 20: Επάνω αριστερά εμφανίζεται η master εικόνα από το set 3 και δεξιά η αντίστοιχη εικόνα συνάφειας. Με κόκκινο χρώμα αναγνωρίζονται οι περιοχές με συνάφεια ≥0.70. Κάτω εμφανίζονται τα σημεία επιγειου ελέγχου στην εικόνα του συμβολογράμματος. 53
Εικόνα 21: Τα απεικονιζόμενα DEM έχουν προκύψει με τη χρήση DEM αναφοράς 90m, 30m και 5m (από πάνω προς τα κάτω). Όσο καλύτερη είναι η χωρική ανάλυση του DEM αναφοράς τόσο ακριβέστερο είναι το παραγόμενο DEM κάτι που φαίνεται από την διασπορά τιμών υψομέτρου (τόνους του γκρίζου). 56
Εικόνα 22: Από το «μέσο» DEM έχει αφαιρεθεί το DEM αναφοράς 5μ. Οι παρατηρούμενες υψομετρικές αποκλίσεις έχουν χωριστεί σε συγκεκριμένα εύρη τιμών και έχουν χρωματιστεί. 63
Εικόνα 23: Από το «μέσο» DEM των set 3, 5 & 6 έχει αφαιρεθεί το DEM αναφοράς 5μ. Οι παρατηρούμενες υψομετρικές αποκλίσεις έχουν χωριστεί και χρωματιστεί αντίστοιχα με το DEM. 64
Εικόνα 24: Πρόκειται για το αποτέλεσμα των εικόνων 22 και 23 αντίστοιχα σε μια προβολή που δίνει την αίσθηση της τρίτης διάστασης. 65
Εικόνα 25: Αντιπαράθεση DEM 5m από επίγειες τοπογραφικές αποτυπώσεις (επάνω) και DEM από Συμβολομετρία (κάτω). 67

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά των προϊόντων ASAR 34
Πίνακας 2: Τα ζεύγη των εικόνων ASAR στα οποία εφαρμόζεται η συμβολομετρική διαδικασία. 40
Πίνακας 3: Αντιστοιχία του RMS με τον συνδυασμό των απεικονίσεων ASAR και το DEM αναφοράς.....54
Πίνακας 4: Τριγωνομετρικά σημεία της Γ.Υ.Σ. για το Φ.Χ. 1:50.000 ΑΘΗΝΑ - ΕΛΕΥΣΙΣ.....61
Πίνακας 5: Υψομετρικές αποκλίσεις των DEM που προέκυψαν έχοντας ως DEM αναφοράς εκείνο που προέκυψε από χάρτες 1:5000. 61
Πίνακας 6: Υψομετρικές αποκλίσεις του «μέσου» DEM από τα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία.....62
Πίνακας 7: Υψομετρικές αποκλίσεις του «μέσου» DEM από τα set 3, 5 & 6 από τα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία.....64

Περίληψη

Η βασική ιδέα στην παρούσα επιστημονική μελέτη είναι η εφαρμογή της Συμβολομετρίας ραντάρ απεικονίσεων στην παρακολούθηση των μετακινήσεων/ παραμορφώσεων του αναγλύφου μετά από ανθρώπινη παρέμβαση.

Για την επίτευξη του στόχου αρχικά καθορίζεται η περιοχή μελέτης η οποία είναι ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) που βρίσκεται στην συμβολή των Δήμων Φυλής και Άνω Λιοσίων του Νομού Αττικής. Πρόκειται, για μια περιοχή που τις τελευταίες δεκαετίες δέχεται διαρκείς παρεμβάσεις στο ανάγλυφό της εξαιτίας της δημιουργίας λεκανών υποδοχής απορριμμάτων και της επανεπίχωσής τους με απορρίμματα αλλά και εξαιτίας των εκσκαφών υγειούς εδάφους για την χωματοκάλυψη των εναποτιθέντων απορριμμάτων.

Η προσέγγιση του αντικειμένου γίνεται με την εφαρμογή των βημάτων της Συμβολομετρικής διαδικασίας σε οκτώ ζεύγη εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) από τον δορυφόρο ENVISAT ASAR. Για την εφαρμογή της διαδικασίας δοκιμάζονται ως Ψηφιακά Μοντέλα αναφοράς τρία διαφορετικά DEM, τα δύο προερχόμενα από τους δορυφόρους SRTM και ASTER και το τρίτο που προέκυψε από ψηφιοποίηση χαρτών κλίμακας 1:5000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ).

Αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός DEM από κάθε ζεύγος εικόνων. Η αξιολόγηση της ακρίβειας των παραγόμενων DEM γίνεται με την χρήση Τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ. Από τα ζεύγη εικόνων με τις μικρότερες κατακόρυφες υψομετρικές αποκλίσεις και λαμβάνοντας υπόψη ένα εκτιμώμενο μέσο σφάλμα γίνεται η σύνθεση ενός «μέσου» DEM που προκύπτει από τα επιμέρους DEM με τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών υψομέτρου για κάθε εικονοστοιχείο. Τέλος, από την αφαίρεση του DEM αναφοράς από το «μέσο DEM» προκύπτει ένας χάρτης με τις κατακόρυφες υψομετρικές μετακινήσεις/ παραμορφώσεις.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη προοπτική απεικόνιση και συγκρίνονται με βάση σημεία γνωστού υψομέτρου μέσα στην περιοχή μελέτης που έχουν προκύψει από επίγειες τοπογραφικές αποτυπώσεις.

Τέλος, αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή της Συμβολομετρίας καθώς και οι προοπτικές εξέλιξης της έρευνας.

Summary

The basic idea of this study is the surface deformation / movement investigation and monitoring in areas with rigorous human intervention using the Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) technique.

To start with, for the accomplishment of the initial aim, the area of investigation is defined, an area which was decided to be the Sanitary Landfill which is located in the northwestern part of Attica. In the recent decades, the constant excavations of the healthy surface for the structure of basins and for the covering of the dispoased waste as well as the simultaneous backfilling with waste had as a result significant changes in the surface.

The Interferometric analysis process was applied using eight InSAR pairs of ENVISAT ASAR Single Look Complex Images. The topographic phase was estimated using suitable reference Digital Elevation Models (DEMs), two of them derived from the satellite SRTM and ASTER respectively and a third one derived by topographic maps with scale 1:5000 of approximate spatial resolution of 5m.

As a result of the Interferometric process eight DEMs one for each image pair were generated. The invastigation of the accuracy of DEM generation was based on three ground control points outside of the area of landfill. From the sets with the lower vertical deviation, considering the estimated mean error, a “median” DEM was extracted. Finally, the reference DEM was removed from the “median” DEM and a map with the final vertical deformations/ displacement was extracted.

The results are presented in a two-dimensional and three-dimensional view and compared with ground control points from the inside of the landfill, known from topographic mesurements.

At the end of the study the main conclusions of the application were outlined as well as the future prospects of research.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1 Στόχος

Ο πρωτεύοντας στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ανίχνευση και εκτίμηση των μετακινήσεων/ παραμορφώσεων του αναγλύφου που παρατηρούνται στην περιοχή εγκατάστασης του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) που βρίσκεται στην συμβολή των Δήμων Φυλής και Άνω Λιοσίων του Νομού Αττικής. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται η εφαρμογή της Συμβολομετρικής διαδικασίας με την χρήση ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR). Μέσα από την περιγραφή και την εφαρμογή των βημάτων της συμβολομετρίας αναδεικνύονται οι δυνατότητες χρήσης της αλλά και οι αδυναμίες της.

Ο λόγος για τον οποίο η έρευνα προσανατολίστηκε σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων είναι προφανής. Πρόκειται για περιοχές που εξ΄αιτίας της αποδοχής μεγάλου όγκου απορριμμάτων, το ανάγλυφό τους αλλάζει με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Ειδικότερα, για την περίπτωση του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων που αποτελεί, εδώ και αρκετά χρόνια, το βασικό αποδέκτη απορριμμάτων όχι μόνο από Δήμους της Αττικής αλλά και από Δήμους εκτός του Νομού.

Για την μελέτη χρησιμοποιούνται εικόνες radar συνθετικού ανοίγματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές λήψης αλλά με κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά. Τελικά προϊόντα της μελέτης είναι:

α) η δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (Digital Elevation Model – DEM) για κάθε ένα από τα ζεύγη εικόνων ραντάρ που συμμετέχουν στη διαδικασία.

β) ένας πίνακας εκτίμησης των αποκλίσεων των παραγόμενων DEM από τρία γνωστά τριγωνομετρικά σημεία της περιοχής με σκοπό την αξιολόγηση των DEM και τον υπολογισμό του εκτιμώμενου σφάλματος.

γ) η σύνθεση ενός DEM από τα παραγόμενα επιμέρους DEM που αξιολογήθηκαν ως αξιόπιστα.

Με τον όρο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DEM) χαρακτηρίζεται μια ποσοτική απεικόνιση της μορφολογίας της γήινης επιφάνειας σε ψηφιακή μορφή, που υπολογίζεται συνήθως σε μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας, συμπεριλαμβανομένου του ύψους της βλάστησης, σε καθορισμένο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς.

1.2 Συνοπτική παρουσίαση των κεφαλαίων

Η εργασία είναι χωρισμένη σε 8 κεφάλαια. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στο στόχο και το περιεχόμενο της μελέτης.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται συνοπτικά η γεωγραφική θέση και η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης ενώ έμφαση δίνεται στην εξέλιξη των έργων και στην προβλεπόμενη εξέλιξη του όγκου των απορριμμάτων την περίοδο που εξετάζεται.

Το κεφάλαιο 3 αποτελεί μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες της Συμβολομετρίας ραντάρ απεικονίσεων. Χρησιμοποιώντας βασική ορολογία της Συμβολομετρίας, περιγράφονται οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας καθώς και τα βασικά στοιχεία της γεωμετρίας των SAR απεικονίσεων.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Συμολομετρικής διαδικασίας. Επιπρόσθετα, γίνεται μια περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων των δορυφορικών συστημάτων από τα οποία προέρχονται τα δεδομένα.

Το κεφάλαιο 5 περιγράφει διεξοδικά την εφαρμογή των βημάτων της Συμβολομετρίας στα δεδομένα ραντάρ που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3. Για κάθε ένα βήμα αναλύεται η σκοπιμότητά του, ο τρόπος εφαρμογής του, τυχόν δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά την εφαρμογή και ο τρόπος που ξεπεράστηκαν. Η εφαρμογή κάθε βήματος συνοδεύεται από ένα ενδεικτικό απόσπασμα μιας εικόνα ραντάρ ώστε να είναι άμεσα ορατό το αποτέλεσμα κάθε βήματος, η σύνδεσή του με

τα επόμενα και τα προηγούμενα βήματα αλλά και καλύτερα κατανοητή η εφαρμογή της διαδικασίας μέχρι το τέλος της.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η παρουσίαση των DEM που δημιουργήθηκαν από τα διαφορετικά ζεύγη εικόνων ραντάρ, πραγματοποιείται η αξιολόγησή τους και ακολούθως η εξαγωγή ενός DEM από τον μέσο όρο των τιμών υψομέτρου.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει μια σύντομη ανασκόπηση της μελέτης καταλήγοντας στα ουσιαστικότερα συμπεράσματα.

Τέλος, το κεφάλαιο 8 παραθέτει την βιβλιογραφία και κάποιες δημοσιευμένες επιστημονικές έρευνες που βοήθησαν στην εκπόνηση της έρευνας και της συγγραφής της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Παρουσίαση περιοχής μελέτης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η περιοχή του ΧΥΤΑ για την οποία εφαρμόζεται η συμβολομετρική διαδικασία με ιδιαίτερη προσοχή στην εξέλιξη των έργων στο ΧΥΤΑ για το χρονικό διάστημα από τον Ιανουάριο του 2003 έως και τον Φεβρουάριο του 2005 για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμες δορυφορικές απεικονίσεις.

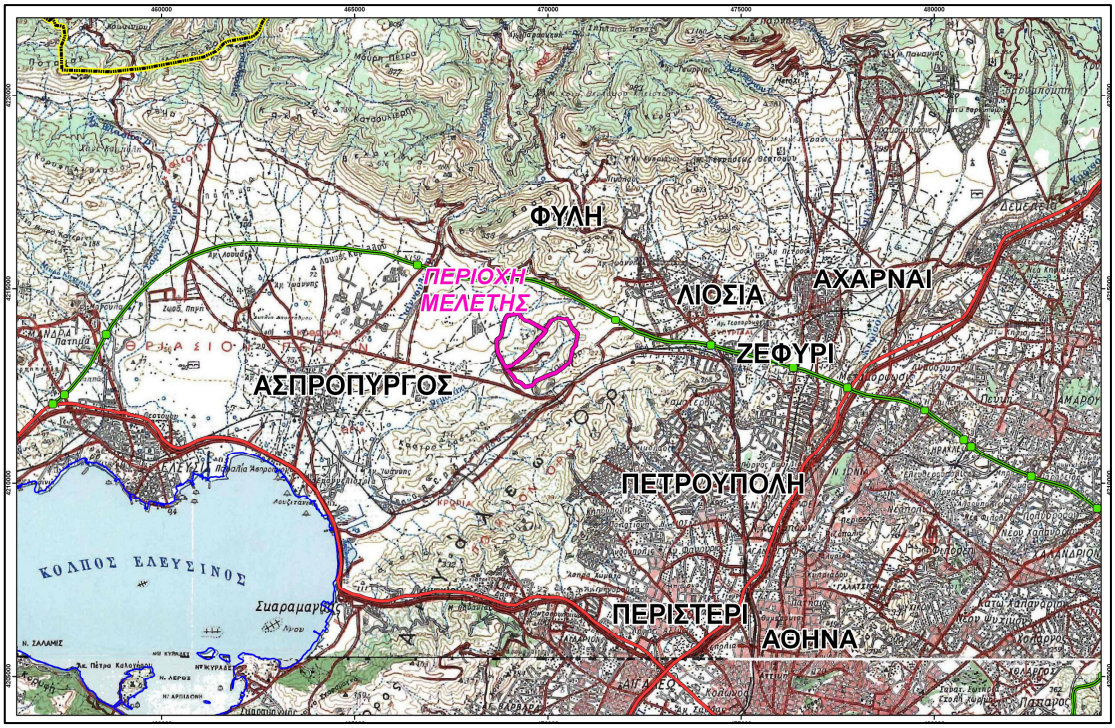
1.1 Χωρική Ένταξη

Ως περιοχή μελέτης ορίζεται η ευρύτερη χωρική ενότητα που περικλείει τους ΧΥΤΑ των δήμων Ανω Λιοσίων και Φυλής καθώς και τον αποκατεστημένο πλέον ΧΑΔΑ. Ο χώρος είναι γνωστός με την ονομασία ΟΕΔΑ (Ολοκληρωμένη Εγκατάσταση Διαχείρισης Απορριμμάτων) Δυτικής Αττικής.

Ο Δήμος Άνω Λιοσίων αναπτύσεται στους πρόποδες του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και βόρεια απο το όρος Αιγάλεω (Ποικίλο όρος). Διοικητικά, εντοπίζεται στο βορειοδυτικό άκρο του Λεκανοπεδίου της Αττικής και οριοθετείται βόρεια και δυτικά απο το Δήμο Φυλής, ανατολικά από τον Δήμο Αχαρνών, νότια από το Δήμο Ζεφυρίου και δυτικά από το Δήμο Ασπροπύργου.

Η ΟΕΔΑ βρίσκεται στην θέση με το τοπωνύμιο «Σκαλιστήρι», στο δυτικό άκρο του Δήμου Άνω Λιοσίων και μόλις 2km από το κέντρο του. Διοικητικά το μεγαλύτερο μέρος της ανήκει στον Δήμο Άνω Λιοσίων. Ωστόσο, το εναπομένον ενεργό κομμάτι της, πολύ μικρότερης έκτασης, ανήκει στον Δήμο Φυλής.

Η οδική πρόσβαση στο χώρο γίνεται μέσω της Λεωφόρου ΝΑΤΟ, στο δυτικό όριο της ΟΕΔΑ.



Εικόνα 1: Χάρτης Προσανατολισμού της περιοχής μελέτης

Πηγή : Εταιρία ENVIROPLAN

2.2 Γεωμορφολογία

Ο χώρος που εκτείνεται το σύνολο του δήμου Άνω Λιοσίων αποτελεί, γεωμορφολογικά ένα λεκανοπέδιο, το οποίο οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους και τους πρόποδες της Πάρνηθας και του Όρους Αιγάλεω, καθώς και τα υψώματα του Μενιδίου και του Ζεφυρίου. Η έκταση του δήμου ανέρχεται σε 38.500 στρ. (3.850 Ηα) και χαρακτηρίζεται από μία ποικιλία ανάγλυφου που την συνθέτουν ορεινές εκτάσεις (4.990 στρ.), ημιορεινές (11.740 στρ.) και πεδινές – όπου αναπτύσεται και ο αστικός ιστός (21.770 στρ.).

Μοναδικές «φυσικές έξοδοι» του λεκανοπεδίου υπάρχουν στο νοτιοανατολικό άκρο του, στη θέση «Σίδερα» (Ρέμα Ευπυρίδων – έξοδος προς Αθήνα) και στο νοτιοδυτικό άκρο του, κοντά στο στρατόπεδο της αεροπορίας (έξοδος προς Ασπρόπυργο).

Η περιοχή που απλώνεται ο οικιστικός ιστός είναι στο μεγαλύτερο μέρος της επίπεδη. Εξαιρείται το βόρειο - βορειοδυτικό κομμάτι του Δήμου που βρίσκεται στους πρόποδες του όρους της Πάρνηθας, μια έκταση με φυσικό πλούτο. Στο νότιο μέρος

εντοπίζονται οι πρόποδες του όρους Αιγάλεω, που αποτελούν προστατευόμενη περιοχή. Το δυτικό κομμάτι του δήμου που βρίσκεται η έκταση του ΟΕΔΑ χαρακτηρίζεται ως επί τω πλείστω από μέτριες κλίσεις (30% - 45%).

2.3 Βασικές έννοιες

Πριν την περιγραφή των έργων που λαμβάνουν χώρα στη σημερινή ευρύτερη έκταση του ΟΕΔΑ (2.802στρ) κρίνεται σημαντικό να αποσαφινιστεί κάποια βασική ορολογία:

1. ***ΧΑΔΑ***: Με τον όρο ΧΑΔΑ περιγράφεται ένας Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων ή απλούστερη μια χωματερή που λειτουργεί χωρίς κάποια πρόβλεψη για τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προκαλεί. Οι χώροι αυτοί αποτελούν εστίες διαρκούς ρύπανσης του περιβάλλοντος και πηγές ανάφλεξης και δεν θα πρέπει να συγχέονται με τους χώρους υγειονομικής ταφής.
2. ***ΧΥΤΑ***: Με τον όρο ΧΥΤΑ περιγράφεται ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Η Υγειονομική ταφή είναι η σημαντικότερη μέθοδος διάθεσης απορριμμάτων. Αρχικά τα απορρίμματα διαχωρίζονται και επεξεργάζονται για την απόκτηση δευτερογενών πρώτων υλών, εδαφοβελτιωτικού και καύσιμων υλών. Τα απορρίμματα που υπολείπονται εναποθέτονται σε τεχνητές κοιλότητες οι οποίες προηγουμένως έχουν στεγανωθεί με πολλαπλές στρώσεις κατάλληλου πάχους και πυκνότητας ώστε να αποτρέπεται η μόλυνση του υπεδάφους και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Τα απορρίμματα διαστρωματώνονται σε στρώσεις ύψους 2-3 μέτρων, συμπιέζονται και καλύπτονται με κατάλληλο αδρανές υλικό στο τέλος κάθε καθημερινής λειτουργίας. Ένα δίκτυο σωλήνων συλλέγει τα αποστραγγίσματα και τα διοχετεύει σε μονάδα επεξεργασίας. Επίσης, μέσω δικτύου αγωγών γίνεται η συλλογή του βιοαερίου (CH_4 + CO_2) που δημιουργείται από την αναερόβια αποσύνθεση των απορριμμάτων, το οποίο διοχετεύεται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν ο χώρος διάθεσης πληρωθεί, καλύπτεται με κατάλληλες στρώσεις προστασίας από τα επιφανειακά ύδατα και εκροής του βιοαερίου των απορριμμάτων προς την ατμόσφαιρα, επιστρώνεται με χώμα και δενδροφυτεύεται κατάλληλα ώστε να αποκατασταθεί αισθητικά το τοπίο.

   Οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις που πρέπει να υπάρχουν σε ένα ΧΥΤΑ και που υπάρχουν στον αντίστοιχο των Άνω Λιοσίων είναι :

- δρόμος προσπέλασης, εσωτερική οδοποιία
- στεγανοποίηση του πυθμένα
- δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων
- σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων
- δίκτυο συλλογής βιοαερίου
- σύστημα επεξεργασίας / αξιοποίησης βιοαερίου
- δίκτυο παρακολούθησης χώρου (βιοαεριο, στραγγίσματα, καθιζήσεις)
- περιμετρική αποστραγγιστική τάφρος
- αντιπυρική ζώνη
- γεφυροπλάστιγγα
- κτιριακά έργα εξυπηρέτησης

Τα είδη των απορριμμάτων που μπορούν να γίνουν δεκτά, σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής δημοτικών απορριμμάτων, εφόσον δεν υπάρχουν απαγορευτικοί περιορισμοί, είναι τα παρακάτω :

- Οικιακά απορρίμματα ή παρεμφερή προερχόμενα από εμπορικές ζώνες
- Διάφορες τέφρες και σκουριές (εφόσον δεν έχουν βαρέα μέταλλα πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια)
- Μπάζα
- Σταθεροποιημένες λάσπες από εγκαταστάσεις καθαρισμού νερού
- Σταθεροποιημένες και αφυδατωμένες λάσπες από μονάδες βιολογικού καθαρισμού αστικών λυμάτων

Εξαιρούνται απο τη διάθεση με υγειονομική ταφή, τα ραδιενεργά, τα ειδικά απορρίμματα και τα τοξικά και επικίνδυνα, που απαιτούν οργάνωση ειδικών χώρων διάθεσης.

Οι διάφοροι τρόποι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι :

- Η παραδοσιακή διάθεση απορριμμάτων
- Η διάθεση με συμπίεση
- Η διάθεση μετά απο προηγούμενη θραύση των απορριμμάτων
- Η λιπασματοποίηση επί τόπου
- Η αερόβια διάθεση
- Η δεματοποίηση
- Η εξώρυξη παλαιών απορριμμάτων και ταφή νέων
- Η αποθήκευση απορριμμάτων σε υπερυψωμένα κτίρια από σκυρόδεμα

3. ***ΕΜΑΚ:*** Με τον όρο ΕΜΑΚ περιγράφεται το Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης οικιακών ή/και πράσινων απορριμμάτων.

2.4 Διαχρονική εξέλιξη του χώρου

Η ρύπανση του χώρου με απορρίμματα ξεκινά την δεκαετία του ’50. Η αυξημένη ανάγκη δημιουργίας ενός μεγάλης έκτασης χώρου για την απόθεση απορριμμάτων στα προάστια της πρωτεύουσας αλλά και η πλήρης έλλειψη περιβαλλοντικής πολιτικής στην μεταπολεμική περιόδο οδήγησαν στη δημιουργία ενός Χώρου Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ) στους πρόποδες του όρους της Πάρνηθας συνολικής έκτασης 750 στρεμμάτων, περίπου.

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη διαχρονική υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, την έλευση φτωχών κοινωνικών ομάδων και τη δημιουργία πρόσθετων οχλουσών δραστηριοτήτων στην περιοχή. Η υποβάθμιση αυτή δεν αντιμετωπίστηκε σωστά απο την πολιτική των κυβερνήσεων ανά τις δεκαετίες προκαλώντας περισσότερο σύγχυση στη λειτουργικότητα της περιοχής και απομονώνοντάς την από το υπόλοιπο λεκανοπέδιο.

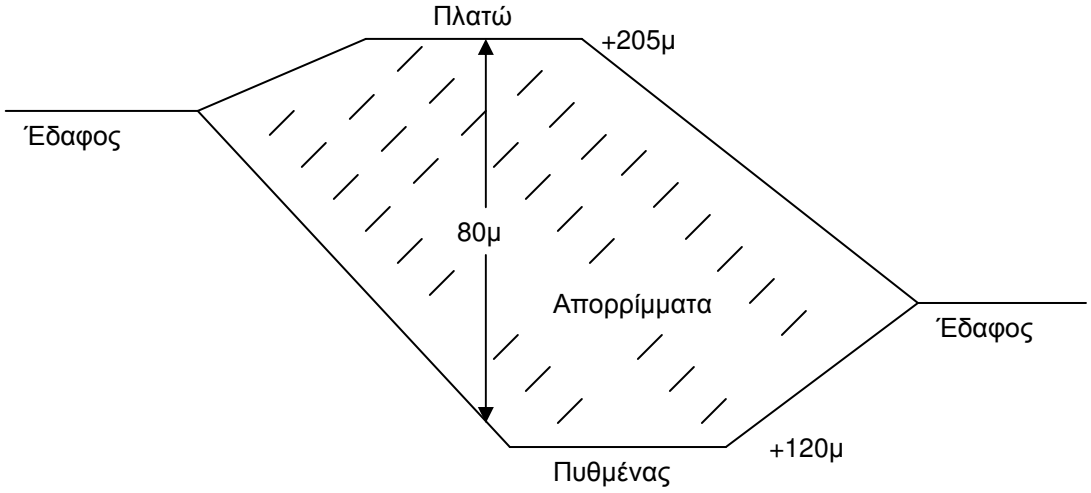
Στα τέλη της δεκαετίας του ’90 ο ΧΑΔΑ σταματάει να λειτουργεί καθώς δεν πληρούσε τις βασικές αρχές που είχαν τεθεί για την υγιεινή των χωματερών. Στις μέρες μας, ο χώρος αυτός έχει πλέον αποκατασταθεί, έχει δεντροφυτευθεί και αποτελεί πάρκο. Το μέγιστο εκτιμώμενο απορριμματικό ύψος στο χώρο εκτιμάται 70m.

Μετά την αποκατάσταση του ΧΑΔΑ τίθεται σε λειτουργία σε όμορο οικόπεδο ο ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, συνολικής έκτασης 620 στρεμμάτων, αποτελούμενος από δύο κύτταρα, το πρώτο (ΧΥΤΑ Ι) με έκταση 300 στρεμμάτων και το δεύτερο (ΧΥΤΑ ΙΙ) 320 στρεμμάτων. Ο ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων Ι & ΙΙ βρίσκεται ΒΔ και σε άμεση γειτνίαση με τον ΧΑΔΑ σε υφιστάμενη μισγάγγεια με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, ανοικτή προς τα ΝΔ προς το Θριάσιο Πεδίο.

Ο ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων δέχεται μόνο αστικά και προσομοιάζοντα με αυτά απορρίμματα. Η κατασκευή και πλήρωση του ΧΥΤΑ πραγματοποιείται από τα

ανάντη προς τα κατάντη. Τα απορρίματα διατίθενται και διαστρώνονται με συμπιεστές σε στρώσεις (ταμπάνια) μέχρι τη συμπλήρωση του προβλεπόμενου ύψους και αριθμού των επιμέρους κυττάρων ανάπτυξης του ΧΥΤΑ. Κάθε ημερήσιο κύτταρο καλύπτεται με γαιώδη υλικά πάχους 15-20 cm.

Το κύτταρο Ι κατασκευάστηκε το 1998 σε έκταση με μέγιστη υφιστάμενη κλίση 30% και σε ένα μέσο βάθος γύρω στα 120m. Η πλήρωση του ΧΥΤΑ Ι ολοκληρώθηκε πριν το 2003 και στην διετία που ακολούθησε βρισκόταν σε φάση αποκατάστασης με χωματοκάλυψη, σπορά και δεντροφυτεύσεις. Μετά την πλήρωση του συγκεκριμένου κυττάρου, το απορριμματικό ανάγλυφο έφτανε περίπου τα 205m. Το μέγιστο εκτιμώμενο απορριμματικό ύψος στο χώρο εκτιμάται 85m.



Εικόνα 2: Βασική φιλοσοφία σχεδιασμού ενός ΧΥΤΑ

Το κύτταρο ΙΙ κατασκευάστηκε πριν το 2003 σε έκταση με μέγιστη υφιστάμενη κλίση 35% και σε ένα μέσο βάθος γύρω στα 150m. Ο ΧΥΤΑ ΙΙ βρισκόταν σε εξέλιξη στο διάστημα 2003-2006 αφού χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι αποθηκευσε τα απορρίμματα των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας. Η στάθμη πλήρωσής του για την περίοδο που εξετάζεται δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί καθώς ο χώρος βρισκόταν σε διαδικασία πλήρωσης και το ύψος των απορριμμάτων άλλαζε διαρκώς. Μετά το τέλος λειτουργίας του η στάθμη πλήρωσης του χώρου φτάνει στα 210m και το μέγιστο εκτιμώμενο απορριμματικό ύψος εκτιμάται 60m. Στις μέρες μας το κύτταρο

ΙΙ του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων βρίσκεται σε διαδικασία αποκατάστασης. Στις μέρες το κύτταρο του ΧΥΤΑ ΙΙ βρίσκεται σε διαδικασία αποκατάστασης.

Κατά την διάρκεια λειτουργίας του ΧΥΤΑ ΙΙ Άνω Λιοσίων ξεκινά και η μελέτη σχεδιασμού του ΧΥΤΑ Φυλής (τέλη 2003). Η κατασκευή ξεκίνησε λίγο πριν το 2005. Ο ΧΥΤΑ Φυλής συνολικής έκτασης 660 στρεμμάτων περίπου, αποτελείται επίσης από δύο κύτταρα, το πρώτο (ΧΥΤΑ Φυλής Ι) με έκταση 260 στρεμμάτων και το δεύτερο (ΧΥΤΑ Φυλής ΙΙ) 400 στρεμμάτων. Ο ΧΥΤΑ Φυλής Ι & ΙΙ βρίσκεται ανατολικά εντός του χώρου της ΟΕΔΑ και βόρεια του ΧΑΔΑ. Ο ΧΥΤΑ Φυλής Ι έχει πλέον κορεστεί και χρησιμοποιείται μόνο ο ΧΥΤΑ Φυλής ΙΙ. Ο κορεσμός του ενεργού ΧΥΤΑ αναμένεται σε λιγότερο από τρία περίπου χρόνια

Στο χώρο σήμερα υπάρχουν και οι εγκαταστάσεις της ΕΜΑΚ Ι. Το εργοστάσιο ασχολείται με την επεξεργασία οικιακών απορριμμάτων, βιολογικής ιλύος προερχόμενης από την Ψυτάλλεια και πράσινων αποβλήτων (κλαδιά – χόρτα).

Εικόνα 3: Γενική Διάταξη έργων ΟΕΔΑ Δυτικής Αττικής

Πηγή : Google Earth

Στην ευρύτερη έκταση της ΟΕΔΑ σχεδιάζονται οι εγκαταστάσεις της ΕΜΑΚ ΙΙ, η Μονάδα Αποτέφρωσης μολυσματικών αποβλήτων που προορίζεται για την διαχείριση αποκλειστικά των νοσοκομειακών αποβλήτων της Αττικής καθώς και η Μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας από το βιοαέριο του ΧΑΔΑ Άνω Λιοσίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

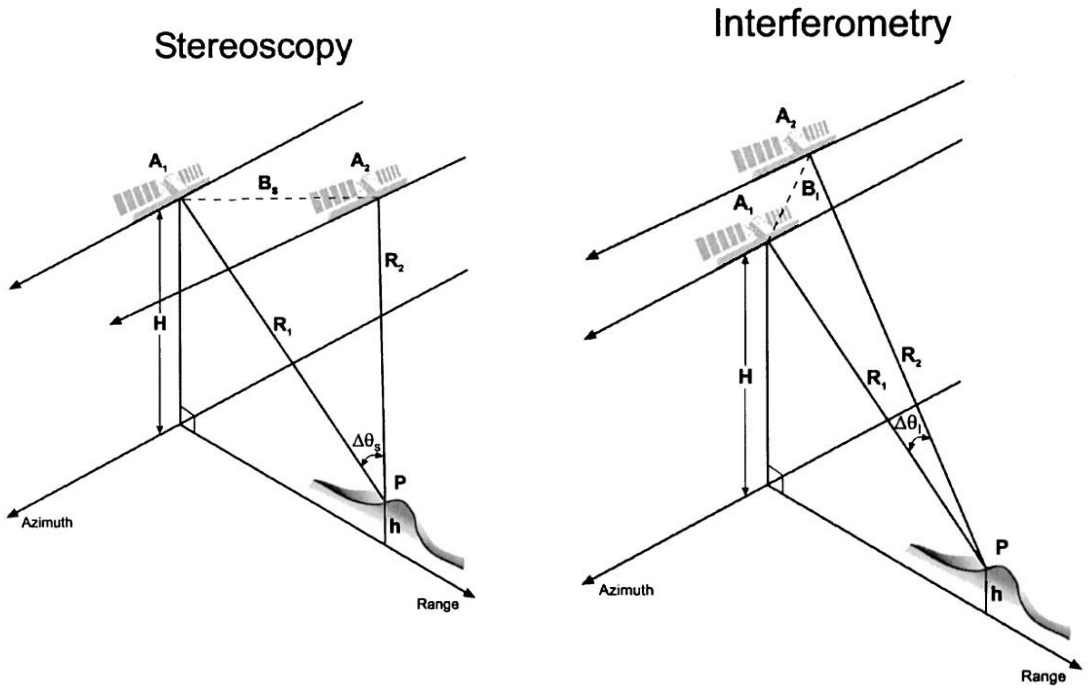
3. Επιλογή επιστημονικής μεθόδου και ανασκόπηση σχετικών ερευνών

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει αναλυτικά την επιστημονική μέθοδο που ακολουθείται στην παρούσα μελέτη εστιάζοντας στην επιστημονική της βάση και τις δυνατότητές της. Η παρουσίαση της μεθόδου έχει βασιστεί σε σχετική βιβλιογραφία και σε δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά με μια πληθώρα εφαρμογών της Συμβολομετρικής διαδικασίας.

3.1 Η Συμβολομετρική Διαδικασία

Κατά τη μελέτη ενός προβλήματος θα πρέπει πάντοτε να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της κατάλληλης επιστημονικής μεθόδου. Θα πρέπει να είναι τέτοια που να διασφαλίζει τα εγκυρότερα κατά το δυνατόν πορίσματα αλλά και αποτελεσματικές διαδικασίες για την παρουσίαση πιθανών προτεινόμενων λύσεων [ΡΟΚΟΣ, 2005].

Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται η εφαρμογή της Συμβολομετρικής διαδικασίας. Η συμβολομετρία ξεκίνησε ως μια εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση της συμβατικής στερεοσκοπικής μεθόδου [TOUTIN-GRAY, 2000], με σκοπό την εξαγωγή σχετικού ή απόλυτου υψομέτρου. Βασιζόμενη στην έννοια της συνάφειας ενός ζεύγους απεικονίσεων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar – SAR) και εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ραντάρ και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (λήψεις ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, νυχτερινή λειτουργία, αυτοματοποιημένη ή ημι-αυτοματοποιημένη επεξεργασία κλπ) εξελίχθηκε αναμφίβολα σε μια εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδο στην παραγωγή DEM και στην απόδοση των μετακινήσεων/ παραμορφώσεων του αναγλύφου [STEBLER-MEIER-NUESCH, 2002].



Εικόνα 4: Σύγκριση της γεωμετρίας των δύο μεθόδων εξαγωγής υψομέτρου: Στερεοσκοπική μέθοδος και Συμβολομετρία. Στην πρώτη περίπτωση το μήκος του διανύσματος βάσης κυμαίνεται σε μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα ενώ στην δεύτερη σε μερικές εκατοντάδες μέτρα (Δθi<<<Δθs και Bi<<<Bs)

Πηγή: TOUTIN-GRAY, 2000

Η ακρίβεια και γενικότερα η ορθότητα και η αξιοπιστία των πορισμάτων που προκύπτουν από τη συμβολομετρική διαδικασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνέπεια με την οποία ακολουθούνται τα στάδια της διαδικασίας, από τη μεθοδικότητα και συστηματικότητα που θα πρέπει να διέπει όλη την ερευνητική πορεία καθώς επίσης και από την ποιότητα και την ποσότητα των διαθέσιμων δεδομένων.

Συγκεκριμένα προτιμώνται όσο το δυνατό περισσότερα ζεύγη εικόνων SAR με λήψεις από διαφορετικές οπτικές γωνίες ώστε να αντισταθμίζονται παράγοντες που εισάγουν σφάλματα στα αποτελέσματα της διαδικασίας και έχουν να κάνουν με τη γεωμετρία και τη φύση των αντικειμένων που αποτυπώνονται (φαινόμενα σκίασης, πτύχωσης, σμίκρυνσης) [GAMBA- DELL'ACQUA- HOUSHMAND, 2003], [STILLA- SOERGAL- THOENNESSEN, 2003]. Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών ζευγών εικόνων SAR αντισταθμίζει σφάλματα που προέρχονται από επιδράσεις της

ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα, στην περιοχή που εξετάζεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχει παρατηρηθεί και καταγραφεί ότι με βάση τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που δίνει ο κοντινότερος μετεωρολογικός σταθμός (Νέα Φιλαδέλφια) η επίδραση της ατμόσφαιρας σταθεροποιείται από την χρήση οκτώ συμβολομετρικών ζευγών και πάνω [SAQELLARI LIKOKA, KARATHANASI, 2008] .

Η συμβομομετρία διακρίνεται σε τέσσερα είδη ανάλογα με τον τρόπο λήψης των απεικονίσεων. Τα είδη αυτά είναι: i) η απλή συμβολομετρία, ii) η επαναληπτική ή κατα πλάτος συμβολομετρία (across-track interferometry), iii) η κατά μήκος συμβολομετρία (along-track interferometry) και iv) η διαφορική συμβολομετρία (differential interferometry) [ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, 2003].

3.2 Γεωμετρική προσέγγιση της συμβολομετρικής διαδικασίας

Η γεωμετρική προσέγγιση της συμβολομετρίας εστιάζει στην απόδοση της σχέσης που συνδέει την γεωμετρία της περιοχής που αποτυπώνεται με τη θέση λήψης του δορυφόρου. Η περιγραφή της γίνεται μέσα από την αναφορά και επεξήγηση κάποιων βασικών όρων της συμβολομετρίας που αναφέρονται σε αρκετά σημεία στα επόμενα κεφάλαια γι΄αυτό και κρίνεται σκόπιμο να αποσαφινιστούν εκ των προτέρων.

Κάθε SAR απεικόνιση ενός τμήματος της γήινης επιφάνειας αποδίδεται μέσα από εικονοστοιχεία που εμπεριέχουν γεωμετρική και φασματική πληροφορία. Ως γεωμετρική πληροφορία ορίζεται το μέτρο και η ***φάση (phase)***. Το μέτρο είναι μια παράμετρος που δεν συμβάλλει τόσο στη συμβολομετρία στο βαθμό που συμβάλλει η φάση. Αξίζει να αναφερθεί ότι η φάση έχει κυκλική φύση και παίρνει τιμές μεταξύ των ορίων [0,2π).

Η απόσταση που μεσολαβεί από τη θέση ενός αντικειμένου στο έδαφος έως τη θέση του δορυφόρου στο χώρο, μπορεί να μετρηθεί μέσω της διαφοράς στην τιμή της φάσης δύο συσχετισμένων SAR απεικονίσεων. Αυτό πρακτικά πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της μιας απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική της άλλης. Το αποτέλεσμα είναι ένα διάγραμμα ισοφασικών καμπυλών που ακολουθούν την

τοπογραφία του εδάφους. Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται ***συμβολόγραμμα*** ή διαφορετικά ***διάγραμμα κροσσών συμβολής (interferogram).***

Η φάση ενός σημείου στο διάγραμμα κροσών συμβολής που προκύπτει από τη διαφορά φάσης των δύο απεικονίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση του συμβολογράμματος ονομάζεται ***συμβολομετρική φάση (interferometric phase)***.

Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά φάσης του ίδιου στόχου σε δύο διαφορετικές απεικονίσεις οφείλεται στην απόσταση δορυφόρου-στόχου και στην καθυστέρηση της φάσης λόγω οπισθοσκέδασης του στόχου, όπως φαίνεται και στη σχέση που ακολουθεί:

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

όπου, r_2 και r_1 είναι η απόσταση του κάθε στόχου από το δορυφόρο και φ_2 και φ_1 είναι η καθυστέρηση της φάσης λόγω οπισθοσκέδασης του στόχου.

Ωστόσο, η καθυστέρηση της φάσης μεταβάλλεται μόνο εάν έχει αλλάξει ριζικά η ατμόσφαιρα μετάδοσης του σήματος ή εάν έχει γίνει κακή χωρική συσχέτιση των εικόνων. Πρακτικά λοιπόν $\varphi_2 = \varphi_1 = \varphi$ και άρα η διαφορά φάσης δίνεται ως εξής:

$$\psi = 4\pi\lambda^{-1}(r_2 - r_1) \qquad \textbf{Εξίσωση 2}$$

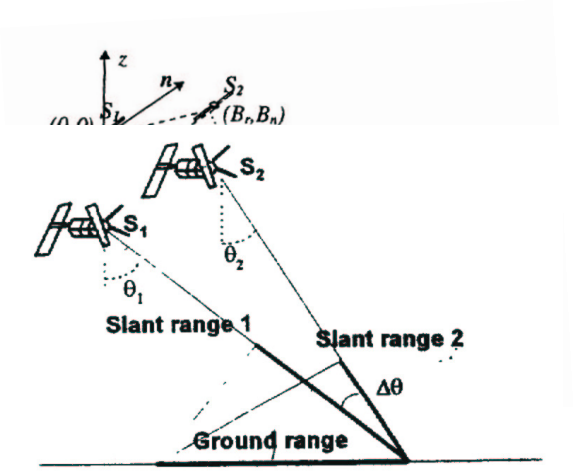
Από την εξίσωση 2 καταλαβαίνει κανείς ότι είναι ευκολα εφικτή η συσχέτιση της διαφοράς φάσης με την απόσταση δορυφόρου-στόχου και εν συνεχεία η μετατροπή αυτής της διαφοράς φάσης σε υψομετρική πληροφορία. Αυτή είναι η βασική αρχή της Συμβολομετρίας. Ωστόσο, η τιμή της φάσης δεν είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμη εξαιτίας της κυκλικής της φύσης (δεν δίνεται σε ακαίρεες τιμές). Αυτό πρακτικά αντιμετωπίζεται με τον υπολογισμό της διαφοράς της συμβολομετρικής φάσης δύο γειτονικών στόχων. Η διαφορά αυτή προκύπτει (μετά από παραγώγιση) από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\psi = [4\pi B_n n_i] / [\lambda r_o] \qquad \textbf{Εξίσωση 3}$$

Όπου, n_i είναι ο όρος της επίπεδης γης και B_n είναι η εγκάρσια συνιστώσα του διανύσματος βάσης.

Για να γίνει κατανοητή η έννοια του ***όρου της επίπεδης γης (flat earth term)*** αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι τα σημεία που αποτυπώνονται από το σύστημα SAR έχουν μεταξύ τους μια οριζοντιογραφική (στη διεύθυνση πτήσης – along track) και υψομετρική (κάθετη στη διεύθυνση πτήσης – cross track) διαφορά. Η οριζοντιογραφική διαφορά των σημείων που αποτυπώνονται έχει ως αποτέλεσμα τη συμμετοχή ενός ανεπιθύμητου όρου φάσης στη διαμόρφωση της τελικής τιμής της συμβολομετρικής φάσης. Ο όρος αυτός, όπως θα αναφερθεί και στα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας, υπολογίζεται και αφαιρείται (§5.3).

Εκτός από τον όρο της επίπεδης Γης, στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης εισέρχεται και η ***εγκάρσια συνιστώσα του διανύσματος βάσης (Perpendicular Baseline)***. Οι αισθητήρες ενός συστήματος SAR οι οποίοι παρατηρούν την ίδια περιοχή μελέτης από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις έχουν μεταξύ τους μια οριζόντια και μια κατακόρυφη απόσταση. Οι δύο αποστάσεις συνθέτουν το διάνυσμα βάσης που αποτελείται από την παράλληλη στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης συνιστώσα (Parallel Baseline ή B_p) και στην εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular Baseline ή B_n).



Εικόνα 5: Η συσχέτιση της φάσης με την απόσταση δορυφόρου-στόχου αποτελεί την ιδέα στην οποία βασίζεται η Συμβολομετρία

Πηγή: ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, 2003

Τέλος, η ποιότητα της διαφοράς φάσης που παρουσιάζεται στο συμβολόγραμμα μπορεί να μετρηθεί με βοήθεια της ***συνάφειας (coherence)***. Η συνάφεια παίρνει τιμές μεταξύ των ορίων [0,1]. Αναλυτικότερα, τιμές κοντά στο μηδέν σημαίνουν

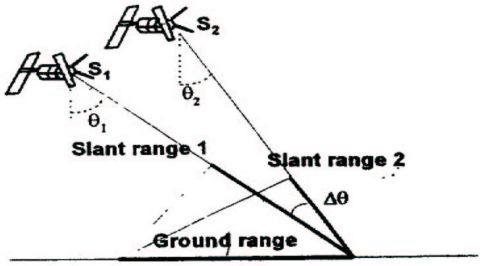
δυσδιάκριτους κροσσούς συμβολής και άρα κακή συσχέτιση του ζεύγους των απεικονίσεων ενώ αντίθετα τιμές κοντά στη μονάδα σημαίνουν εμφανείς κροσσούς και πολύ καλά συσχετισμένο ζεύγος.

Η τιμή της συνάφειας επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια αλλά και την ευκρίνεια του συμβολογράμματος. Δυστυχώς, υπάρχουν περιοχές που εμφανίζουν πάντοτε κακή συνάφεια όπως για παράδειγμα δασώδεις εκτάσεις ή θαλάσσιες εκτάσεις εξαιτίας της διαρκούς αλλαγής της υφής. [ZHONG- KIM- LEE- SHUM- DUAN- IBARAKI- AKYILMAZ- HYE, 2009], [HYDE- DUBAYAH- WALKER- BLAIR- HOFTON- HUNSAKER, 2006], [ELDHUSET- ANDERSEN- HAUGE- ISAKSSON- WEYDAHL, 2003].

Γενικότερα ο μόνος τρόπος που μπορούν περιοχές με κακή συνάφεια να προσεγγιστούν είναι με τη χρήση πολλών διαφορετικών λήψεων από διαφορετικές οπτικές γωνίες και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (στην περίπτωση της θάλασσας ούτε και αυτό βοηθάει) ή/και με τη χρήση φίλτρων εξομάλυνσης που ενδεχομένως να βελτιώνουν ως ένα σημείο την ευκρίνεια των εικόνων προτού αυτές αξιοποιηθούν συμβολομετρικά.

3.3 Φασματική προσέγγιση της συμβολομετρικής διαδικασίας

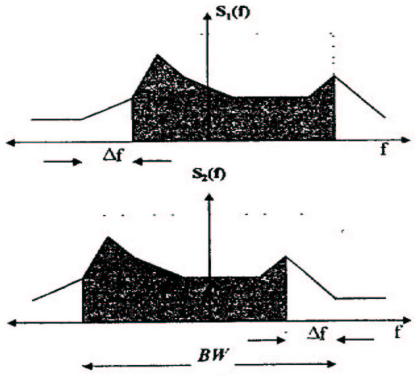
Εκτός από τη γεωμετρική προσέγγιση της συμβολομετρίας εξίσου σημαντική είναι και η φασματική προσέγγιση. Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται αυτή η προσέγγιση είναι ότι η αποτύπωση μιας έκτασης πραγματοποιείται από διαφορετικές θέσεις του δορυφόρου και με διαφορετική, για κάθε θέση, ***γωνία πρόσπτωσης (incidence angle)***. Αυτή η διαφοροποίηση στη γωνία πρόσπτωσης οδηγεί και σε διαφορετικό λαμβανόμενο σήμα. Για όμοιες γωνίες πρόσπτωσης, η γραμμή βάσης μηδενίζεται, το διάγραμμα κροσσών συμβολής παίρνει μηδενικές τιμές και η συμβολομετρία ακυρώνεται.



Εικόνα 6: Η έκταση που αποτυπώνεται είναι η ίδια (ground range) αλλά η προβολή της αλλάζει εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας του συστήματος του δορυφόρου από τη θέση S_1 στη θέση S_2.

Πηγή: D. CARRASSO DIAZ, 1998

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί η εικόνα που παράγεται ή αλλιώς η προβολή του εδάφους από τη θέση S_2 του δορυφόρου είναι σαφώς μικρότερη (απαιτούνται λιγότερα εικονοστοιχεία για την απόδοσή της) σε σχέση με την εικόνα από τη θέση S_1. Η εικόνα από τη θέση S_2 θα παρουσιάζει την ίδια περιοχή αλλά θα μοιάζει ελαφρώς "συμπιεσμένη" σε σχέση με την εικόνα από τη θέση S_1. Αντίστοιχα, τα φάσματα ανακλαστικότητας των δύο εικόνων (μετά από την εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier) θα είναι πανομοιότυπα, μόνο που το φάσμα της εικόνας από τη θέση S_2 θα είναι ελαφρώς τεντωμένο (Εικόνα 5). Η διαφορά ανάμεσα στα δύο διαγράμματα ανακλαστικότητας είναι γνωστή ως ***μετατόπιση του φάσματος (spectral shift).*** Για τη δημιουργία του διαγράμματος κροσσών συμβολής χρησιμοποιείται το κοινό μέρος του φάσματος (γραμμοσκιασμένο) ενώ το μη κοινό μέρος εισάγει θόρυβο που αντιμετωπίζεται με κατάλληλα φίλτρα.



Εικόνα 7: Η μετατόπιση του φάσματος (spectral shift) είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία των κροσσών συμβολής αλλά και του θορύβου της φάσης

Πηγή: D. CARRASSO DIAZ, 1998

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται συναρτήσει της φέρουσας συχνότητας $\mathbf{f_0}$, της απόστασης δορυφόρου-στόχου **R**, της εγκάρσιας συνιστώσας του διανύσματος βάσης $\mathbf{B_n}$, της γωνίας πρόσπτωσης **θ** και της τοπικής κλίσης **α**.

$$\Delta f = -f_0 \frac{\Delta\theta}{\tan(\theta-\alpha)} = -f_0 \frac{B_n}{R\tan(\theta-\alpha)}$$ **Εξίσωση 4**

3.4 Τα στάδια της Συμβολομετρίας

Στο σημείο αυτό καταγράφονται τα στάδια εφαρμογής της συμβολομετρικής διαδικασίας. Η μελέτη και η καταγραφή τους βασίστηκε στο βιβλίο "Ραδιομετρία – Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση" [ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, 2003] με στόχο την κατανόησή τους και την προσπάθεια να τηρηθούν κατά το δυνατό συνεπέστερα. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Προεπεξεργασία των απεικονίσεων (SAR preprocessing), που θα χρησιμοποιηθούν στη συμβολομετρική διαδικασία, για την απομάκρυνση τυχόν συστηματικού θορύβου.
2. Συμπροσαρμογή των απεικονίσεων (coregistration). Πρόκειται για την χωρική συσχέτιση των εικόνων.
3. Δημιουργία του διαγράμματος κροσσών συμβολής (interferogram).
4. Φιλτράρισμα του διαγράμματος κροσσών συμβολής (filtering) που αποσκοπεί στη βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών.
5. Αφαίρεση της φάσης της επίπεδης γης (flat earth removal) ώστε να προκύψει η τιμή της φάσης που αντιστοιχεί στην τοπογραφία (υψόμετρο) των σημείων και η οποία έχει σημασία για τον υπολογισμό του DEM.
6. Αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης (phase unwrapping). Οι ισοφασικές καμπύλες του συμβολογράμματος έχουν κυκλική μορφή παίρνοντας τιμές στο διαστημα [–π,0,π]. Ως εκ τούτου, η πληροφορία που εμπεριέχουν δεν είναι άμεσα αναγνώσιμη. Στο στάδιο αυτό αποδίδονται οι ακέραιοι κύκλοι που χάθηκαν στη διαδικασία δημιουργίας του

συμβολογράμματος ώστε η τιμή της φάσης να μπορεί να πάρει την πραγματική της τιμή, πέραν του διαστήματος [–π,0,π].

7. Μετατροπή της συμβολομετρικής φάσης σε υψόμετρο (phase to height conversion) με βάση την γεωμετρία των απεικονίσεων και τη γνώση των τροχιακών δεδομένων.
8. Γεωκωδικοποίηση (geocoding). Στο στάδιο αυτό τα σχετικά υψόμετρα που έχουν προκύψει μπορούν να τοποθετηθούν σε κάνναβο επιθυμητού βήματος και χαρτογραφικού συστήματος αναφοράς.

3.5. Η Διαφορική Συμβολομετρία

Η χρονική διαφοροποίηση μεταξύ των λήψεων των ENVISAT ASAR απεικονίσεων είναι κυρίως η αιτία για την ύπαρξη κακής συνάφειας κάτι που επηρεάζει και την ποιότητα του παραγόμενου DEM στη συμβολομετρία. Ωστόσο, αυτή η ίδια χρονική διαφοροποίηση λειτουργεί ως πλεονέκτημα στην περίπτωση όπου μελετώνται φαινόμενα που αλλάζουν δυναμικά την μορφολογία του αναγλύφου.

Αυτό αποτελεί το αντικείμενο της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR). Η διαφορική συμβολομετρία παρακολουθεί την κίνηση της γήινης επιφάνειας που οφείλεται είτε σε φυσικές διεργασίες (π.χ. φαινόμενα που προέρχονται από γεωδυναμικά αίτια) ή στην ανθρώπινη παρέμβαση. Με τη χρήση της διαφορικής συμβολομετρίας μπορούν να παραχθούν χάρτες παραμόρφωσης που οφείλονται σε γεωφυσικά αίτια [ΠΑΡΧΑΡΙΔΗΣ, 2009].

Η σχετική ακρίβεια που παρέχει η μέθοδος είναι της τάξης των μερικών εκατοστών ακόμη και χιλιοστών [ZHONG- KIM- LEE- SHUM- DUAN- IBARAKI- AKYILMAZ- HYE, 2009], [KIM- HYONGKI- SHUM- SWARZENSKI- DOYLE- BAEK, 2009], [ΠΑΡΧΑΡΙΔΗΣ, 2009].

Η τιμή της παρατηρούμενης συμβολομετρικής φάσης (φ_{Int}) προκύπτει από το άθροισμα ενός συνόλου όρων φάσης (Εξίσωση 5). Στόχος της διαφορικής επεξεργασίας είναι η απομόνωση του όρου της φάσης που προέρχεται από κινήσεις που έλαβαν χώρα ανάμεσα στις δύο χρονικές στιγμές λήψης ($\varphi_{Movement}$).

$$\phi_{Int} = 4\pi \frac{R_1 - R_2}{\lambda} = \phi_{Topography} + \phi_{Change} + \phi_{Movement} + \phi_{Atmosphere} + \phi_{Noise}$$ **Εξίσωση 5**

Η τιμή του θορύβου μπορεί να ελαττωθεί με την επιλογή ζευγών με καλή συνάφεια αλλά και με την χρήση κατάλληλων φίλτρων [LI- DING- HUANG- ZHU- CHEN, 2008]. Για την αντιμετώπιση της επδρασης της ατμόσφαιρας έχουν διατυπωθεί διάφορες τεχνικές. Ένας τρόπος, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι η χρήση πολλαπλού αριθμού ζευγών [SAQELLARI-LIKOKA, KARATHANASSI, 2008]. Όσον αφορά την εξάλειψη των παραμέτρων της τοπογραφίας συνηθίζεται η χρήση βοηθητικού DEM σε συνδυασμό με τη χρήση περισσότερων του ενός διαγράμματος κροσσών συμβολής.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τιμές μετατόπισης που προκύπτουν δεν είναι κατακόρυφες αλλά μετριούνται κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Δεδομένα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή DEM. Γίνεται επίσης αναφορά στις ιδιότητες των δορυφορικών συστημάτων radar από τα οποία προέρχονται τα δεδομένα.

Α) 9 τηλεπισκοπικές απεικονίσεις του συστήματος radar ENVISAT ASAR (C-band: ~ 5cm και ~5GHz) μη γεωμετρικά διορθωμένες. Οι εικόνες διατέθηκαν από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων του Ε.Μ.Π.. Η χρονική περίοδος παρακολούθησης που καλύπτουν είναι από τον Ιανουάριο του 2003 έως και τον Φεβρουάριο του 2005.

Ο ENVISAT ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) προστέθηκε στο προϋπάρχον δορυφορικό σύστημα ENVISAT ώστε να επεκτείνει την αποστολή παρατήρησης της γης μέσω ενεργών μικροκυματικών δεκτών συνθετικού ανοίγματος. Τα radar συνθετικού ανοίγματος (SAR), έχουν την ιδιότητα να παράγουν τηλεπισκοπικές απεικονίσεις με υψηλή διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση της γραμμής πτήσης (azimuth ή along track direction). Ο αισθητήρας τους εκπέμπει στο εύρος της μικροκυματικής ακτινοβολίας οπότε η ποιότητα των εικόνων SAR είναι ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια λήψης

Ο δέκτης ακολουθώντας την γραμμή κίνησης του δορυφόρου και χρησιμοποιώντας ένα σχετικά μεγάλο εύρος δέσμης εκπέμπει και λαμβάνει ακτινοβολία για τον ίδιο στόχο αρκετές φορές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάθε στόχος να έχει πολλά καταγεγραμμένα σήματα από διαφορετικές θέσεις του δορυφόρου, κατά μήκος της ίδιας τροχιάς. Τα διαφορετικά σήματα συνδυάζονται και με τον τρόπο αυτό παράγεται η «συνθετική κεραία».

Με τη χρήση της συνθετικής κεραίας η ανάλυση που επιτυγχάνεται κατά την διευθυνση της γραμμής πτήσης είναι περίπου ίση με το ήμισυ του μήκους του πραγματικού ανοιγματος της κεραίας χωρίς να εξαρτάται από το υψόμετρο της

πλατφόρμας του radar σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους (απόσταση στόχου δέκτη).

Αντίστοιχα, πολύ υψηλή ανάλυση επιτυγχάνεται και κατά την κάθετη διεύθυνση τη γραμμής πτήσης του radar (range direction) μέσω των τεχνικών συμπίεσης του λαμβανόμενου παλμού.

Ο ASAR χρησιμοποιεί γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 15 και 45 μοιρών. Καλύπτει μια πληθώρα εφαρμογών συμπεριλαμβάνοντας τη μελέτη των κυμάτων των ωκεανών, την έκταση και την κίνηση του πάγου σε θαλάσσιες επιφάνεις, καθώς και μελέτες της επιφάνειας της γης, όπως η αποψίλωση των δασών, η ερημοποίηση κ.α..

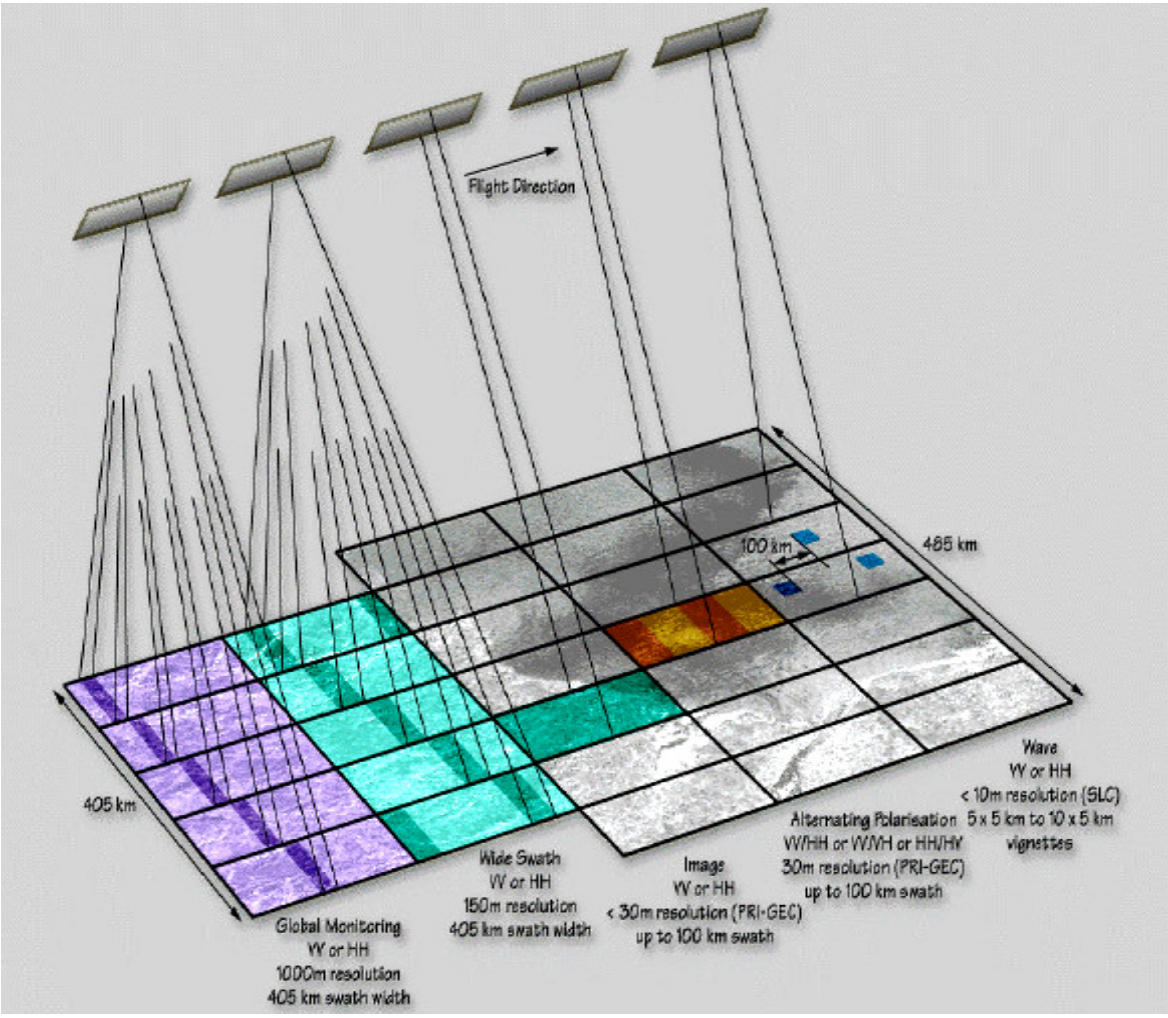
Το είδος των παραγόμενων εικόνων έχει να κάνει με τη λειτουργία του εκάστοτε δορυφόρου. Ο δορυφόρος ENVISAT ASAR μπορεί να ρυθμιστεί σε τέσσερα διαφορετικά είδη λειτουργίας:

IM Mode: παρέχει εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, περιορισμένου σχετικά εύρους και με μία εκδοχή πόλωσης της κεραίας που μπορεί να είναι είτε κάθετη και κατά την εκπομπή και κατά τη λήψη του σήματος (VV) είτε οριζόντια (HH).

AP Mode: παρέχει δεδομένα αντίστοιχα με τα προηγούμενα συμπεριλαμβάνοντας και μια δεύτερη εικόνα με ένα διαφορετικό συνδυασμό πόλωσης της κεραίας ώστε να επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος πόλωσης ανάλογα με την εφαρμογή.

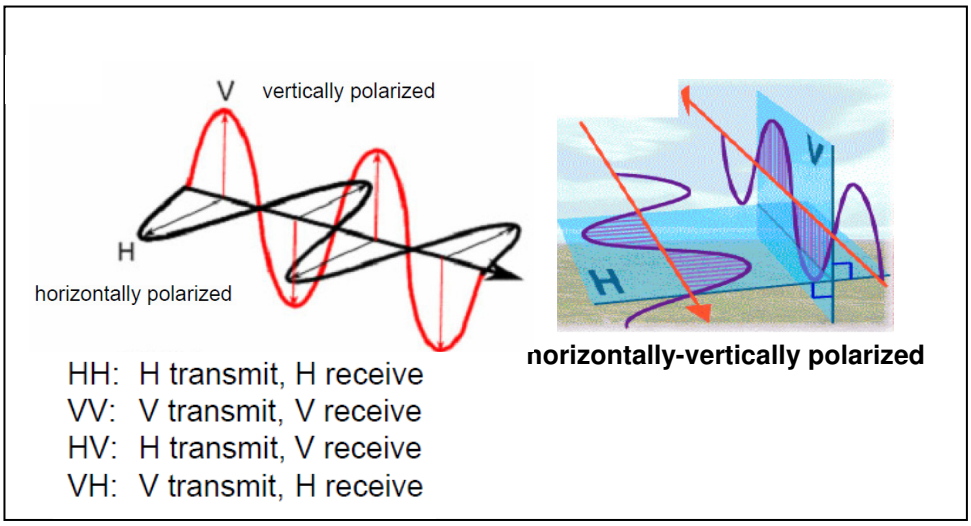
Wide Swath Mode: παρέχει δεδομένα που καλύπτουν ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τις προγούμενες περιπτώσεις ωστόσο υστερούν αρκετά σε χωρική ανάλυση.

Global Monitoring Mode: παρέχει δεδομένα αντίστοιχα με της προηγούμενης λειτουργίας αλλά μικρότερης αξίας καθώς από τα παραγόμενα δεδομένα απομονώνονται δείγματα κατά τη λήψη επί του δορυφόρου.



Εικόνα 8: Το σύστημα radar ENVISAT ASAR σε διαφορετικούς τύπους λειτουργίας

Πηγή: SAR-Guidebook



Εικόνα 9: Διαφορετικές εκδοχές πόλωσης της κεραίας του radar

Πηγή: NICOLL και SAR-Guidebook

Ανάλογα με τη λειτουργία στην οποία έχει τεθεί ο δορυφόρος παράγονται οκτώ διαφορετικοί τύποι δεδομένων:

ASA IMM: Single Polarization Medium Resolution Ground Range
ASA IMP: Single Polarization Multi-look Ground Range
ASA IMS: Single Polarization Single Look Complex
ASA APM: Alternative Polarization Medium Resolution Ground Range
ASA APS: Alternative Polarization Single Look Complex
ASA APP: Alternative Polarization Multi-look Ground Range
ASA WSM: ScanSAR Multi-look Ground Range
ASA GMI: Global Monitoring Multi-look Ground Range

Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά των εικόνων παρουσιάζονται στον ακολούθως:

Product ID	Nominal Resolution(m) (range x azimuth)	Nominal Pixel Spacing (m) (range x azimuth)	Approx.Coverage (km) (range x azimuth)	Equivalent No. of Looks
IMP	30 x 30	12.5 x 12.5	56-100 x 100	> 3
IMS	9 x 6	natural	56-100 x 100	1
IMM	150 x 150	75 x 75	56-100 x 100	40
IMB	450 x 450	225 x 225	56-100 x 100	80
APP	30 x 30	12.5 x 12.5	56-100 x 100	> 1.8
APS	9 x 12	natural	56-100 x 100	1
APM	150 x 150	75 x 75	56-100 x 100	50
WSM	150 x 150	75 x 75	400 x 400	11.5
GMI	1000 x 1000	500 x 500	400 x 400	7 - 9

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά των προϊόντων ASAR

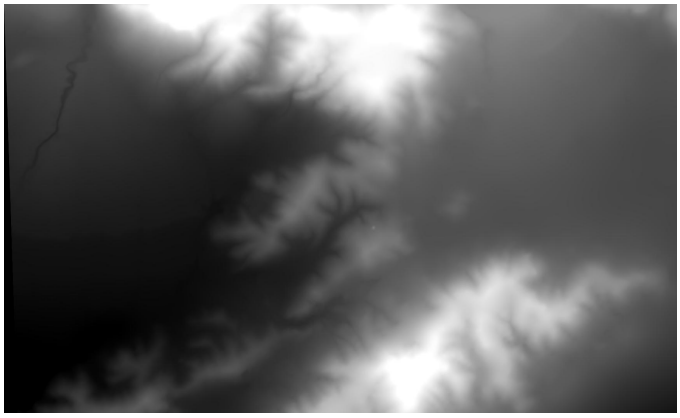
Πηγή: SARscape Help

Το αρχικό format των εικόνων είναι .N1, πρόκειται για την επίσημη τυποποίηση των εικόνων ENVISAT ASAR όπως παραδίδονται από την ESA(European Space Agency). Ωστόσο, για να είναι δυνατή η αναγνώριση και επεξεργασία των εικόνων από τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται (ENVI 4.7 και SARscape) πραγματοποιήθηκε μετατροπή τους σε format .slc. Στην παράγραφο 5.1 περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εισαγωγής τους.

Ας σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία προτείνεται να χρησιμοποιούνται εικόνες από διαφορετικούς δέκτες που εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος ώστε τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής να παρατηρούνται υπό διαφορετικές

συνθήκες οπισθοσκέδασης. [KIM- HYONGKI- SHUM- SWARZENSKI- DOYLE- BAEK, 2009].

Β) Ένα DEM που προέκυψε μετά από ψηφιοποίηση χαρτών 1:5000 χωρικής ανάλυσης 5m. Η χρήση ενός τοπικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους από ψηφιοποίηση χαρτών ως DEM αναφοράς είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική με αρκετά ακριβή αποτελέσματα [OZOUVILLE- DEFFONTAINES- BENVENISTE- WEGMULLER- VIOLETTE- MARCILY, 2008]. Ένα DEM περιλαμβάνει όχι μόνο τα σημεία του αναγλύφου με γνωστή υψομετρική πληροφορία αλλά και οποιαδήποτε χαρακτηριστικά του εδάφους που πιθανότερα αποδίδουν πιστότερα την μορφή της τοπογραφικής επιφάνειας – π.χ. γραμμές ασυνέχειας (breaklines) για να ορίσουν απότομες μεταβολές στην επιφάνεια [ΒΡΑΔΗΣ, 2000]. Οι ψηφιοποιημένες ισοϋψείς καμπύλες, οι γραμμές ασυνέχειας και τα σημεία γνωστού υψομέτρου εισήχθησαν στο ArcGIS. Τα πλησιέστερα γειτονικά σημεία ενώνονται με τρόπο που να δημιουργούν ένα ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (TIN) που προσεγγίζει την τοπογραφική [ΚΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΑΚΗΣ, 2005]. Το παραγόμενο DEM εξάγεται από το ArcGIS σε format TIFF και εν συνεχεία εισάγεται στο SARscape για να μετατραπεί σε format αναγνωρίσιμο από το λογισμικό[1]. Το συγκεκριμένο DEM χρησιμοποιείται ως μοντέλο αναφοράς κατά τη διάρκεια της συμβολομετρικής διαδικασίας.



Εικόνα 10: Το DEM που παράγεται από ψηφιοποίηση χαρτών 1:5000 με χωρική ανάλυση 5m. Οι τόνοι του γκρίζου ανοίγουν προς το λευκό όσο το υψόμετρο αυξάνεται.

[1] Για την διαχείριση των DEM από το SARscape πραγματοποιείται μετατροπή τους από το format .TIFF σε format .DEM. Ακολουθείται η εντολή Basic→Import Data→Tiff. Τα Data Units ορίζονται ως DEM και προσδιορίζεται το Χαρτογραφικό Σύστημα Αναφοράς του DEM που εισάγεται.

Γ) Ένα DEM από τον Δορυφόρο ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) χωρικής ανάλυσης 30m (ASTER Global Digital Elevation Model - ASTER GDEM). Το GDEM έχει δημιουργηθεί από εικόνες του δορυφόρου ASTER που χρονολογούνται από το ξεκίνημα της πορείας του δορυφόρου μέχρι και τον Αύγουστο του 2008. Το συγκεκριμένο DEM παρέχεται δωρεάν στο διαδίκτυο (http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται εναλλακτικά ως μοντέλο αναφοράς κατά τη διάρκεια της συμβολομετρικής διαδικασίας ωστέ να μπορεί να γίνει σύγκριση με το DEM που προαναφέρθηκε.

Δ) Ένα DEM από τον Δορυφόρο SRTM (Shuttle Radar Terrain Mission) χωρικής ανάλυσης 90m. Ο δορυφόρος SRTM παρέχει DEM για το 80% της επιφάνειας της Γης το οποίο είναι άμεσα διαθέσιμο στο διαδίκτυο, με μηδενικό κόστος (http://srtm.csi.cgiar.org). Η μέγιστη τιμή σφάλματος που εμπεριέχει το DEM στην κατακόρυφη διευθυνση είναι τα 16m. Το συγκεκριμένο DEM, όπως και το προηγούμενο, χρησιμοποιείται ως μοντέλο αναφοράς κατά τη διάρκεια της συμβολομετρικής διαδικασίας με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας με DEM μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης. Το συγκεκριμένο DEM πλεονεκτεί στο ότι είναι άμεσα αναγνωρίσιμο και διαχείρισιμο από το λογισμικό SARscape αφού το λογισμικό διαθέτει φόρμουλα που εντοπίζει και κατεβάζει αυτόματα DEM από το δορυφόρο SRTM.

Ε) Μια απεικόνιση από το Δορυφόρο SPOT χωρικής ανάλυσης 5μ και γεωμετρικά διορθωμένη στο Ελληνικό Γεωδαιτικό σύστημα συν/νων. Η εικόνα χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή σημείων επίγειου ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Επεξεργασία

Πρόκειται για την εφαρμογή των βημάτων της συμβολομετρίας που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα δεδομένα SAR. Η εισαγωγή των SAR δεδομένων και η ολοκλήρωση της συμβολομετρικής διαδικασίας γίνεται με τη χρήση του λογισμικού SARScape που λειτουργεί σε συνεργασία με το λογισμικό ENVI 4.7. Τα στάδια της επεξεργασίας των εικόνων, από την εισαγωγή τους έως και την τελική παραγωγή των DEM περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

5.1 Εισαγωγή των εικόνων

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι εικόνες παραδίδονται από την ESA σε format ".N1". Για την επεξεργασία τους από το λογισμικό SARScape είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάθε εικόνας χωριστά και η μετατροπή της σε format που να είναι αναγνωρίσιμο από το λογισμικό.

Η εισαγωγή[2] αυτή απαιτεί των καθορισμό κάποιων παραμέτρων. Αρχικά, δίνεται ο δορυφόρος από τον οποίο προέρχονται τα δεδομένα (Sensor). Στην προκειμένη περίπτωση ο δέκτης λήψης ήταν ο ENVISAT ASAR και ήταν κοινός για όλες τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν. Εν συνεχεία, προσδιορίζεται το είδος της εικόνας που εισάγεται (Data type) και το οποίο καθορίζει ως ένα βαθμό τα χαρακτηριστικά και τη χρήση της εικόνας.

Για τη συμβολομετρική διαδικασία απαιτούνται εικόνες SLC (Single Look Complex). Για το λόγο αυτό στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται εικόνες IMS και APS με πόλωση HH (η πόλωση HH δίνει καλύτερη συνάφεια στην περίπτωση παρατήρησης μετακινήσεων/ παραμορφώσεων σε σχέση με την HV πόλωση [KIM-HYONGKI- SHUM- SWARZENSKI- DOYLE- BAEK, 2009]).

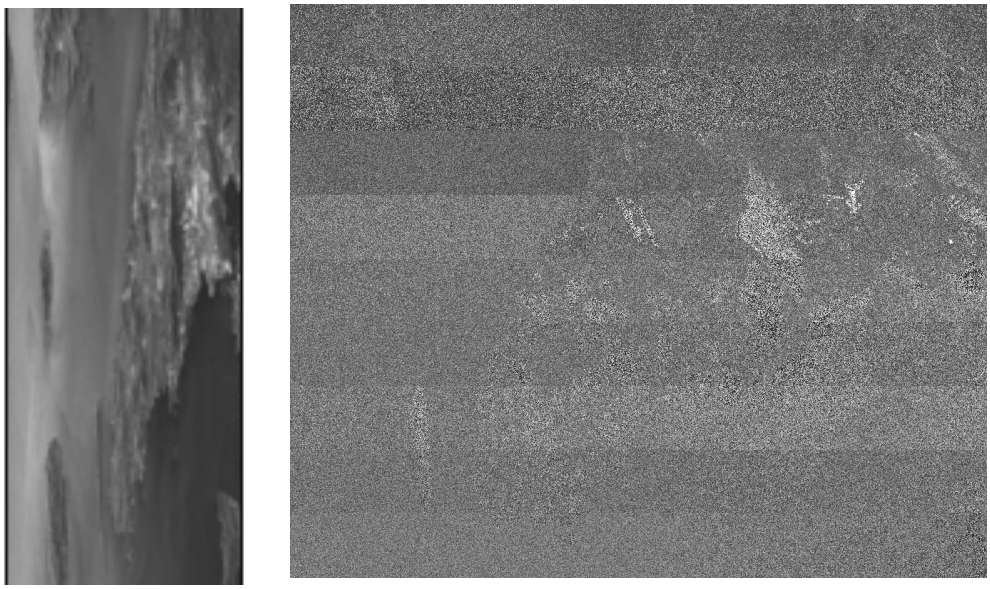
Τέλος, η εισαγωγή των εικόνων ASAR στο SARScape ολοκληρώνεται με τον καθορισμό του αρχείου τροχιάς (ASAR DORIS file). Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αρχείων τροχιάς. Τα αρχεία VOR (Verified Orbits) που δεν είναι διαθέσιμα

[2] Η εισαγωγή των εικόνων ASAR γίνεται στο SARscape με την εντολή Basic→Import Data→Standard Formats

νωρίτερα από ένα μήνα μετά τη λήψη των απεικονίσεων και τα αρχεία POR (Precise Orbits) που είναι μικρότερης αξίας σε σχέση με τα VOR αλλά παράγονται και διατίθενται ταυτοχρονα με την απόκτηση των απεικονίσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα τροχιακά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο και εντοπίζονται απλά με βάση την ημερομηνία λήψης της εικόνας (ftp://dutlru2.lr.tudelft.nl/pub/orbits/ORD.ENISAT1/eigen-cg03c). Κάθε τέτοιο αρχείο περιέχει τη θέση της τροχιάς του ENVISAT σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκτίμηση της τροχιάς γίνεται πρακτικά με τον υπολογισμό τροχιακών τόξων. Αυτά τα τόξα ταυτοποιούνται από ένα τριψήφιο ψηφιακό αριθμό. Το διάστημα κάθε τόξου (arc interval) είναι η περίοδος για την οποία υπολογίζεται η τροχιά και διαρκεί πέντε ημέρες έχοντας μια επικάλυψη δύο ημερών με το προγενέστερο και το μεταγενέστερο τροχιακό τόξο.

Ας σημειωθεί ότι η εισαγωγή του αρχείου τροχιάς είναι προαιρετική. Ωστόσο, συνιστάται γιατί συμβάλλει καθοριστικά στην εκτίμηση του διανύσματος βάσης (παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στην τιμή του διανύσματος κατά δεκάδες μέτρα) και κατ΄επέκταση στην εξέλιξη των επόμενων σταδίων της διαδικασίας. [ELDHUSET-ANDERSEN- HAUGE- ISAKSSON- WEYDAHL, 2003], [CROSETTO, 2002].

Μετά τον καθορισμό του δορυφόρου (Sensor), του τύπου δεδομένων (Data type) και του αρχείου τροχιάς (ASAR DORIS file), η εικόνα εισάγεται στο πρόγραμμα και μετατρέπεται σε format .slc οπότε και είναι αναγνωρίσιμη από το πρόγραμμα για κάθε μετέπειτα επεξεργασία.



Εικόνα 11(α) και (β): Τμήμα της ENVISAT ASAR IMS απεικόνισης (31 Ιανουαρίου 2004). Αριστερά παρουσιάζεται η SLC εικόνα όπως δίνεται από το δορυφόρο, με πλάγια λήψη. Δεξιά είναι το μέτρο της SLC εικόνας που προκύπτει από το άθροισμα του πραγματικού και του φανταστικού της μέρους.

5.2 Εκτίμηση του διανύσματος βάσης

Η τιμή του διανύσματος βάσης, δεν εμφανίζεται στα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας που ακολουθούν. Ωστόσο, ο υπολογισμός[3] της είναι απαραίτητο να προηγηθεί των βημάτων αυτών γιατί, εκτός των άλλων, κρίνει σε πολύ μεγάλο ποσοστό την καταλληλότητα ή μη ενός ζεύγους εικόνων για την επιτυχή εξαγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου. Επιπλέον, δίνει μια πρώτη, χοντρική εκτίμηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων που θα έχει η συμβολομετρική διαδικασία.

Πιο συγκεκριμένα, στόχος είναι η τιμή του διανύσματος βάσης να είναι κατά το δυνατό μικρότερη ώστε οι δύο απεικονίσεις να μοιράζονται όσο το δυνατό μεγαλύτερο ποσοστό πληροφορίας.

Για πολύ μεγάλες τιμές βάσης, η μετατόπιση του φάσματος είναι τόσο μεγάλη ώστε δεν υπάρχει πλέον επικαλυπτόμενη πληροφορία. Η τιμή της βάσης για την οποία η μετατόπιση του φάσματος είναι ίση με το εύρος της ζώνης συχνοτήτων ονομάζεται κρίσιμη γραμμή βάσης (Critical Baseline). Όσο το μέτρο της κάθετης συνιστώσας του διανύσματος βάσης (B_p) μεγαλώνει πέραν της τιμής της Critical Baseline η πληροφορία της φάσης και άρα η συνάφεια χάνεται και η συμβολομετρία είναι αδύνατη [SARscape Help].

Η εκτίμηση του διανύσματος βάσης μπορεί να γίνει ανάμεσα σε δύο δορυφορικές εικόνες εκ των οποίων η μία εικόνα θεωρείται κύρια (master) και η άλλη δευτερεύουσα (slave). Συνήθως ως κύρια εικόνα δίνεται εκείνη που απεικονίζει μεγαλύτερη επιφάνεια ώστε στο στάδιο της συμπροσαρμογής να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να επιλεγούν περιοχές (coregistration windows) που δεν υπάρχουν στην κύρια εικόνα. Η ιεραρχία των εικόνων σε master και slave που δίνεται σε αυτό το βήμα θα πρέπει να ακολουθείται μέχρι και το τέλος της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Για την παρούσα μελέτη υπήρχαν αρχικά διαθέσιμες 20 ENVISAT ASAR απεικονίσεις της ευρύτερης περιοχής της Αττικής. Αυτό σημαίνει ότι θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν 20x20 συνδυασμοί των εικόνων ανά δύο για την τελική επιλογή των καταλληλότερων ζευγών. Με τη βοήθεια φόρμουλας[4] του SARscape η εκτίμηση του διανύσματος βάσης μπορεί να γίνει για το σύνολο των εικόνων σε ένα βήμα (multi-baseline estimation). Κατά τη διαδικασία αυτή κάθε εικόνα ορίζεται ως master

[3] Η εισαγωγή στο λογισμικό γίνεται με την εντολή Interferometry→Baseline Estimation
[4] Εντολή Interferometry→Tools→Multi Baseline Calculation

και υπολογίζεται το διάνυσμα βάσης που σχηματίζει με κάθε μία από τις υπόλοιπες εικόνες.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα απότελέσματα της εκτίμησης του διανύσματος βάσης για τα 8 σετ εικόνων ENVISAT ASAR που επιλέχθηκαν ως τα καταλληλότερα για τα επόμενα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Στο σημείο αυτό ας αναφερθεί ότι στην επιλογή των ζευγών, συμπληρωματικό ρόλο παίζει η ημερομηνία λήψης των εικόνων καθώς και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για τις δύο εικόνες του ζεύγους. Ένα ζεύγος με μικρό χρονικό διάστημα ανάμεσα στις λήψεις των εικόνων που το αποτελούν, δεν μπορεί να αποδώσει σημαντικές αλλαγές στο ανάγλυφο αλλά πιθανότατα να μπορεί δημιουργήσει ένα καλύτερο μοντέλο εδάφους εξαιτίας της καλύτερης συνάφειας των εικόνων.

Set	*Master File*	*Slave File*	*Baseline*
1	2004 01 31	2003 12 27	65
2	2004 01 31	2005 02 12	43
3	2003 01 18	2003 12 27	52
4	2004 01 31	2004 04 10	163
5	2003 01 18	2004 01 31	84
6	2003 07 05	2004 05 15	188
7	2004 11 25 $_{HH}$	2003 04 10	209
8	2004 11 25 $_{HH}$	2004 12 30A $_{HH}$	198

Πίνακας 2: Τα ζεύγη των εικόνων ASAR στα οποία εφαρμόζεται η συμβολομετρική διαδικασία.

Από τον πίνακα είναι εμφανές ότι τα ζεύγη των εικόνων που επιλέγονται έχουν γραμμή βάσης έως και τα 209m. Τυπικά η συμβολομετρική διαδικασία μπορεί να προχωρήσει ακόμα και αν η γραμμή βάσης είναι μικρότερη από το μισό της κρίσιμης, ώστε να υπάρχει τουλάχιστον ένα 50% επικάλυψης. Πρακτικά όμως, όπου αυτό εφαρμόστηκε τα αποτελέσματα της διαδικασίας ήταν πολύ άσχημα γι΄αυτό και τελικά επιλέχθησαν ζεύγη εικόνων με πολύ μικρότερη βάση.

5.3 Δημιουργία συμβολογράμματος με τη χρήση DEM αναφοράς

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η συμπροσαρμογή[5] των απεικονίσεων ASAR που αποτελούν το κάθε ζεύγος και ταυτόχρονα δημιουργείται το διάγραμμα κροσσών συμβολής με πολλαπλασιασμό της μιας απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική της άλλης.

[5] Εντολή Interferometry→ Interferogram generation with DEM

Από το συμβολόγραμμα που δημιουργείται αφαιρείται εν συνεχεία η ανεπιθύμητη διαφορά φάσης που εισέρχεται στη διαδικασία και η οποία έχει να κάνει με την επίδραση της τοπογραφίας του εδάφους. Η διαφορά αυτή συνηθίζεται να αναφέρεται ως «όρος της επίπεδης Γης» (§3.2).

Η αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους. Πρώτον, με τη θεώρηση ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι ένα ελλειψοειδές με γνωστή γεωμετρία σε συνδυασμό με τη χρήση σημείων επίγειου ελέγχου[6]. Δεύτερον, με τη χρήση ενός DEM αναφοράς που είναι και αρκετά ακριβέστερο. Τρίτον, με τη χρήση DEM σε συνδυασμό με σημεία επίγειου ελέγχου.

Στην πρώτη περίπτωση όπου δε χρησιμοποιείται DEM αναφοράς, για την εξομάλυνση του συμβολογράμματος απαιτείται η εισαγωγή σημείων επίγειου ελέγχου (ground control points). Η διαδικασία μπορεί να διεξαχθεί ακόμη και με τη χρήση ενός σημείου, ωστόσο όσο περισσότερα είναι τα σημεία τόσο ακριβέστερος θα είναι ο υπολογισμός του ελλειψοειδούς. Τα σημεία αυτά θα πρέπει να εντοπίζονται στην master εικόνα και να είναι διασκορπισμένα σε όλη της την έκταση.

Σε περιπτώσεις όπου η τιμή του διανύσματος βάσης είναι μαγάλη ή/και η κάλυψη της περιοχής είναι ιδιαίτερη (μεγάλες εκτάσεις με κακή συνάφεια όπως π.χ. θάλασσα, πυκνή βλάστηση κ.α.) προτείνεται η χρήση DEM αναφοράς. Στην περίπτωση της Αττικής που εξετάζεται εδώ, οι εικόνες που χρησιμοποιούνται καλύπτονται κατά μεγάλο ποσοστό από θάλασσα. Ωστόσο, η παρούσα εφαρμογή εστιάζει σε τμήμα της ξηράς οπότε δεν δίνεται περαιτέρω προσοχή στην βελτίωση της συνάφειας στη θάλασσα.

Με την εισαγωγή DEM στη διαδικασία, επιτυγχάνεται η αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης και η εξομάλυνση του συμβολογράμματος (flattened interferogram). Όσο ακριβέστερο είναι το DEM που χρησιμοποιείται τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχει η αφαίρεση της επίδρασης της τοπογραφίας.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται για την αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης ο δεύτερος τρόπος, δηλαδή η χρήση DEM. Η επιλογή βασίζεται αφενός στην ιδιομορφία της κάλυψης των απεικονίσεων (σε μεγάλες εκτάσεις με κακή συνάφεια όπως π.χ. θάλασσα συνιστάται η χρήση DEM) και αφετέρου σε μια πειραματική διαδικασία γεωαναφοράς των master εικόνων, που περιγράφεται ακολούθως.

[6] Στις εικόνες ENVISAT ERS η χρήση DEM αναφοράς είναι υποχρεωτική.

Για την πειραματική διαδικασία επιλέγεται η SLC απεικόνιση με ημερομηνία λήψης 18 Ιανουαρίου 2003 για την οποία πραγματοποιείται η διαδικασία γεωαναφοράς της με δύο διαφορετικούς τρόπους:

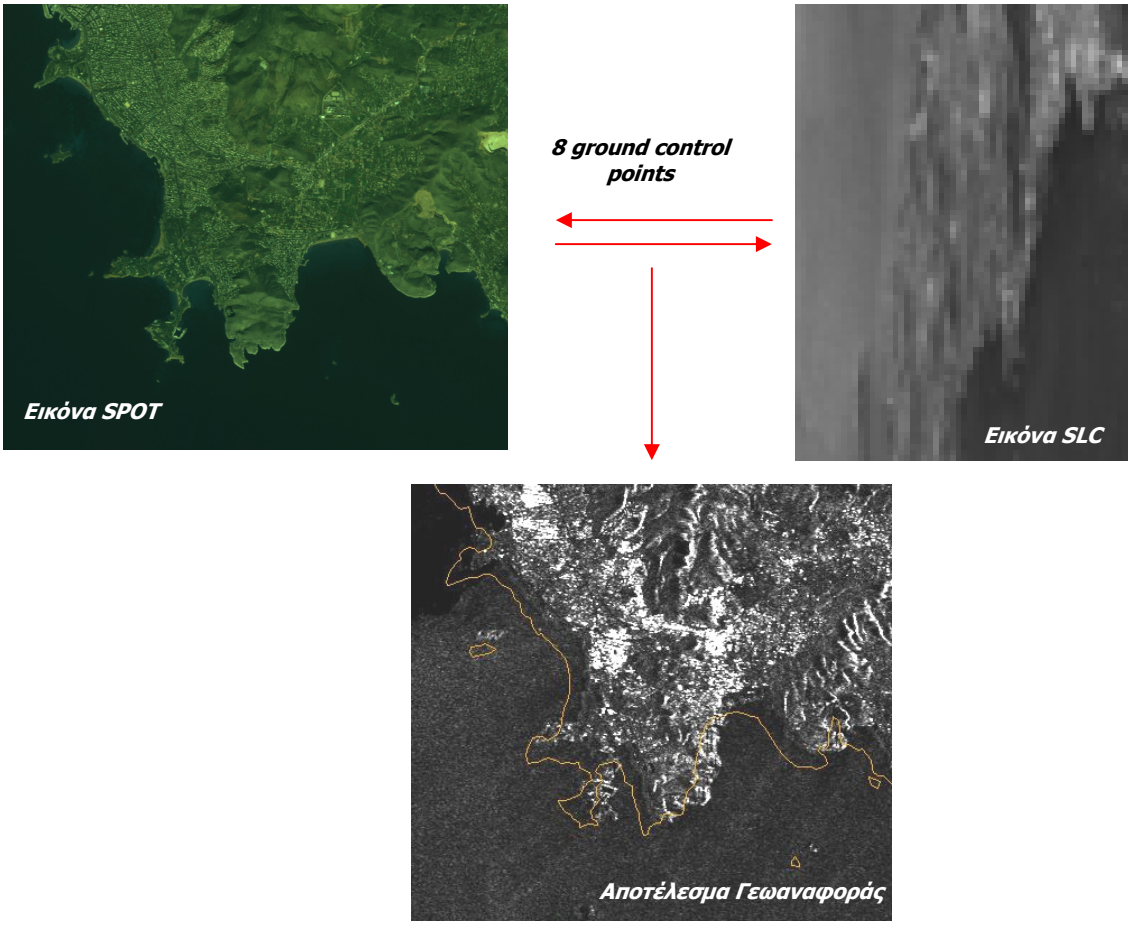
i) Στην πρώτη περίπτωση (Εικόνα 9) χρησιμοποιούνται οκτώ σημεία επίγειου ελέγχου τα οποία εντοπίζονται στην ψηφιακή τηλεπισκοπική απεικόνιση SPOT χωρικής ανάλυσης 5m.

ii) Στην δεύτερη περίπτωση (Εικόνα 10) επιλέγεται η χρήση ενός DEM από τον δορυφόρο ASTER χωρικής ανάλυσης 30m.

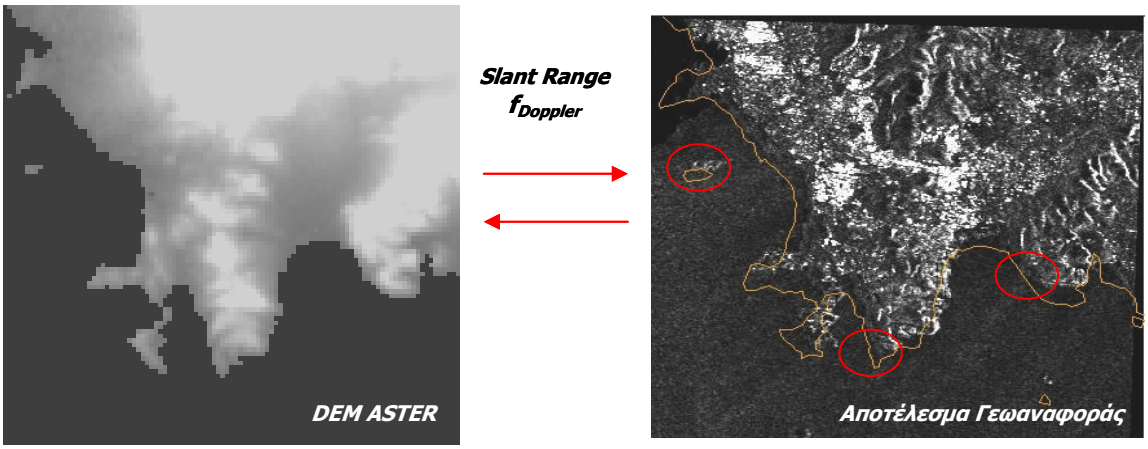
Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία γεωαναφοράς βασίζεται στον υπολογισμό της πλευρικής απόστασης R (slant range) και της συχνότητας Doppler (f_D) για κάθε εικονοστοιχείο της SLC απεικόνισης. Μετά την ολοκλήρωση του γεωμετρικού μετασχηματισμού πραγματοποείται η διαδικασία αναδόμησης όπου υπολογίζονται οι καινούργιες τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της διορθωμένης εικόνας. Για την αναδόμηση των τιμών φωτεινότητας επιλέγεται και στις δύο περιπτώσεις η μέθοδος " optimal resolution ".

Από το αποτέλεσμα της γεωαναφοράς, συγκρινόμενο με το όριο της ακτογραμμής που έχει προκύψει από ψηφιοποίηση της ψηφιακής τηλεπισκοπικής απεικόνισης SPOT, είναι εμφανές ότι λάθη υπεισέρχονται και με τις δύο μεθόδους. Τα λάθη αυτά έχουν να κάνουν με διαφορετικούς λόγους ανά περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση προέρχονται από την δυσκολία εντοπισμού των σημείων επίγειου ελέγχου στην SLC απεικόνιση και την αντιστοίχησή τους με την ψηφιακή τηλεπισκοπική απεικόνιση SPOT εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς που υπάρχει και στην γεωμετρία και στην χωρική ανάλυση των δύο εικόνων (25m και 5m αντίστοιχα). Στην δεύτερη περίπτωση τα λάθη προέρχονται από τη χρήση DEM μέτριας χωρικής ανάλυσης. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της γεωαναφοράς είναι εμφανώς καλύτερο στη δεύτερη περίπτωση.

Διαπιστώνεται λοιπόν ότι είναι προτιμότερη η χρήση ακόμη και ενός μέτριας ακρίβειας DEM σε σχέση με την μη χρήση DEM. Άλλωστε, το DEM χρησιμοποιείται βοηθητικά στην όλη διαδικασία, διευκολύνοντας τον υπολογισμό και την αποκατάσταση της φάσης χωρίς να στοχεύει στην ολική κατάργηση των κροσσών του διαγράμματος που προκύπτει αρχικά από κάθε ζεύγος εικόνων. Για το λόγο ένα DEM πολύ υψηλής ποιότητας δεν είναι αναγκαίο, αρκεί ένα ορατό DEM [ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, 2003], [ZHONG- KIM- LEE- SHUM- JIANBIN- IBARAKI- AKYILMAZ- HYE, 2009], [PARCHARIDIS- KOKKALAS- FOUNTOULIS- FOUMELIS, 2009], [CROSETTO, 2002], [HONG- WDOWINSKI- KIM- WON, 2010].



Εικόνα 12: Η διαδικασία γεωαναφοράς με τη χρήση σημείων επίγειου ελέγχου



Εικόνα 13: Η διαδικασία γεωαναφοράς με τη χρήση DEM

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι επιχειρήθηκε η γεωαναφορά της SLC απεικόνισης με τη χρήση DEM και σημείων επίγειου ελέγχου συνδυαστικά. Το αποτέλεσμα δεν είχε καμία εμφανή διαφοροποίηση από τη γεωαναφορά με DEM μόνο. Ως εκ τούτου και για λόγους ευκολίας και οικονομίας χρόνου η χρήση σημείων επίγειου ελέγχου θεωρείται περιττή και αποφεύγεται.

Ας σημειωθεί τέλος ότι η γεωαναφορά που αναλύθηκε σε αυτό το στάδιο έγινε πειραματικά για την υπόδειξη της καταλληλότερης επιλογής μεθοδολογίας. Δεν αποτελεί βασικό βήμα της συμβολομετρικής διαδικασίας και διαφοροποείται σε σχέση με τη γεωαναφορά που περιγράφεται στην παράγραφο 5.7 αφού δεν προέρχεται από ζεύγος εικόνων και δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αποδόσει τιμές υψομέτρου (Η) παρά μόνο γεωγραφικές συντεταγμένες (Χ,Υ).

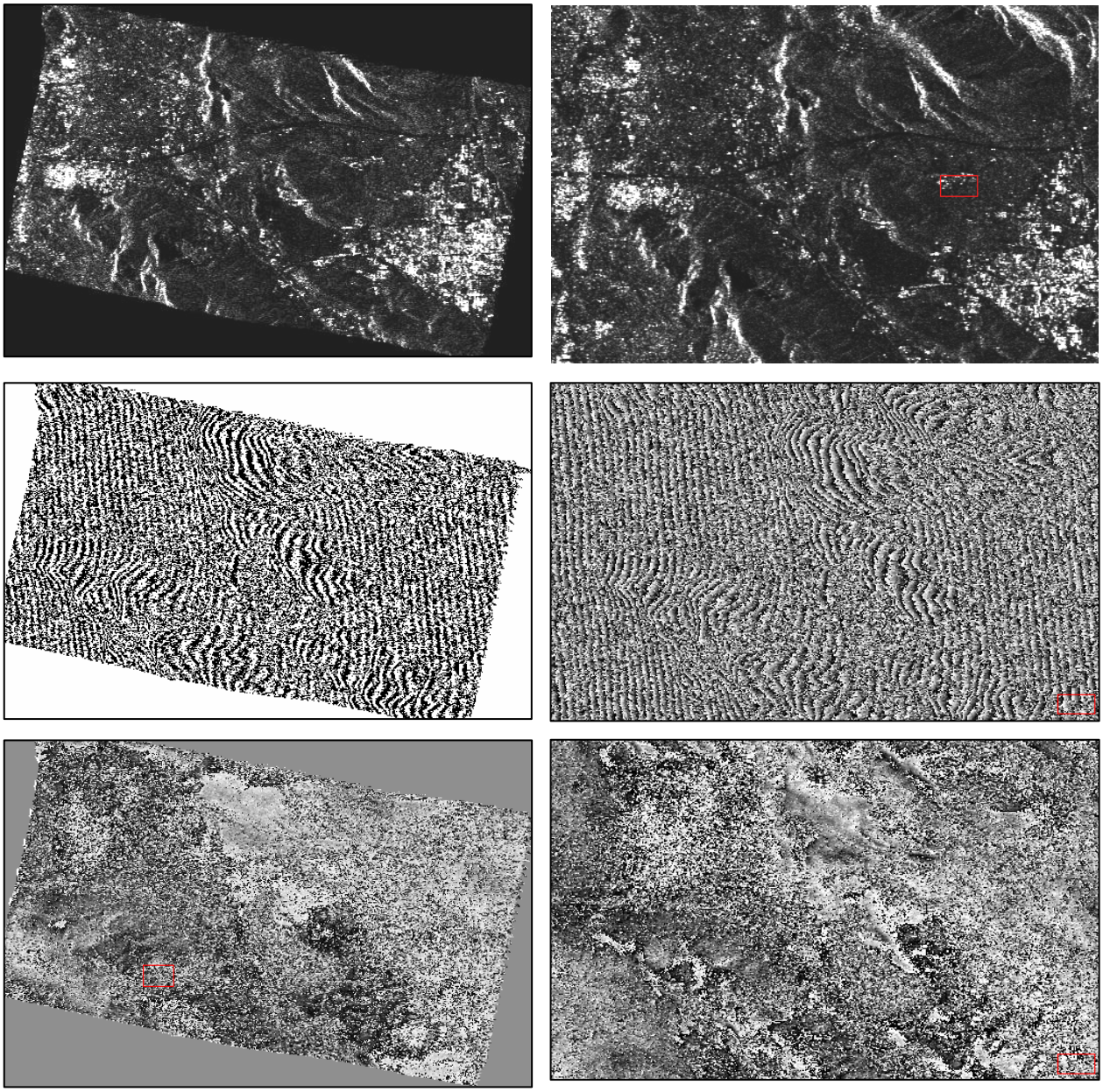
Ταυτόχρονα, με την παραγωγή του συσχετισμένου ζεύγους απεικονίσεων και με το συμβολόγραμμα, δημιουργούνται επίσης η συνθετική φάση (synthetic phase) και η προβολή του DEM αναφοράς στην διεύθυνση της πλευρικής απόστασης (slant range dem). Τα δύο αυτά δεδομένα χρησιμοποιούνται σε επόμενα βήματα της διαδικασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα κροσσών συμβολής που προκύπτει από τις εικόνες του ζεύγους 6 πριν και μετά την αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης. Στην αριστερή εικόνα είναι εμφανείς οι κροσσοί που δημιουργούνται στην περιοχή της ξηράς. Η διαφοροποίηση στη θέση λήψης των δύο εικόνων του ζεύγους εισάγει εσφαλμένες τιμές φάσης (και ως εκ τούτου κροσσούς) αποδίδοντας τοπογραφία σε περιοχές που δεν θα έπρεπε. Στην εικόνα του συμβολογράμματος είναι εμφανής ο θόρυβος σε όλη την έκταση της θάλασσας αλλά και σε κάποια σημεία της στεριάς.

Οι κροσσοί που δημιουργούνται εμπεριέχουν όλη την πληροφορία που αφορά στη γεωμετρία της περιοχής. Η διακύμανση του χρώματος (λευκό-γκρίζο-μαύρο) αναπαριστά τους συνεχείς κύκλους (-π,0,π) που κάνει η συμβολομετρική φάση. Συγκρίνοντας προσεκτικά με το μη γεωαναφερμένο μονέλο εδάφους στην κάτω αριστερή εικόνα παρατηρούμε ότι οι κροσσοί ακολουθούν την τοπογραφία του εδάφους (έντονες αλλαγές στους κροσσούς στις περιοχές που εμφανίζουν απότομες υψομετρικές αλλαγές και το ανάποδο).

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται το συμβολόγραμμα πριν και μετά την αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης με τη χρήση του DEM 5m πολύ υψηλής ανάλυσης και του DEM από τον δορυφόρο ASTER 30m. Και στις δύο περιπτώσεις

είναι εμφανές ότι ο αριθμός των κροσσών του αρχικού συμβολογράμματος ελαττώνεται κατά πολύ διευκολύνοντας τα επόμενα βήματα (αποκατάσταση φάσης, δημιουργία DEM).



Εικόνα 14: Στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται από πάνω προς τα κάτω η master εικόνα του set 6 (2003 07 05) μετά την συμπροσαρμογή και το αντίστοιχο συμβολόγραμμα με τη χρήση του DEM 5m πριν και μετά την αφαίρεση του όρου της Επίπεδης Γης. Στην δεξιά στήλη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη χρήση του DEM ASTER 30m.

5.4 Εφαρμογή φίλτρου στο συμβολόγραμμα και δημιουργία της εικόνας συνάφειας με τη μέθοδο Goldstein

Στο σημείο αυτό το συμβολόγραμμα που έχει προκύψει μετά την αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης επεξεργάζεται κατάλληλα για την αφαίρεση του θορύβου που προέρχεται από τη μετατόπιση του φάσματος. Η επεξεργασία γίνεται στο χώρο των συχνοτήτων. Πρόκειται για τη λεγόμενη προσαρμοσμένη επεξεργασία (adaptive processing) που εφαρμόζει στο συμβολόγραμμα ένα φασματικό φίλτρο κατάλληλων διαστάσεων[7]. Με την εφαρμογή του φίλτρου το συμβολόγραμμα μεταφέρεται στο πεδίο των συχνοτήτων και έπειτα με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier επανέρχεται στο πεδίο του χώρου.

Το λογισμικό SARscape δίνει τρεις επιλογές φιλτραρίσματος i) με προσαρμοσμένο παράθυρο (adaptive window), ii) με το φίλτρο Boxcar και iii) με το φίλτρο Goldstein. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται το φίλτρο Goldstein καθώς είναι το συνιστώμενο σε περιπτώσεις εικόνων με περιοχές κακής συνάφειας αφού προστατεύει από την απώλεια λεπτομερειών στους κροσσούς.

Η εφαρμογή του φίλτρου Goldstein αυξάνει την ευκρίνεια των κροσσών ενώ μειώνει το θόρυβο που εισέρχεται στην εικόνα από τη χωρική και την χρονική αποσυσχέτισή τους. Εχει την ιδιότητα να εξομαλύνει την εικόνα της φάσης σε περιοχές με υψηλή συσχέτιση αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστες εκείνες με τη χαμηλή [SARscape Guidebook, 2009].

Το παράθυρο του φίλτρου μπορεί να έχει διαστάσεις που προκύπτουν από δυνάμεις του 2 και συγκεκριμένα από 32 έως 512. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του παραθύρου τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιρροή του. Το παράθυρο του φίτρου θα πρέπει να έχει μια επικάλυψη με τα γειτονικά πράθυρα και στην οριζόντια και στην κάθετη διεύθυνση. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό επικάλυψης τόσο αποτελεσματικότερη είναι η επίδραση του φίλτρου, αυξάνοντας ωστόσο το χρόνο επεξεργασίας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο μεσσαίων διαστάσεων 64x64, με ποσοστό επικάλυψης 80%.

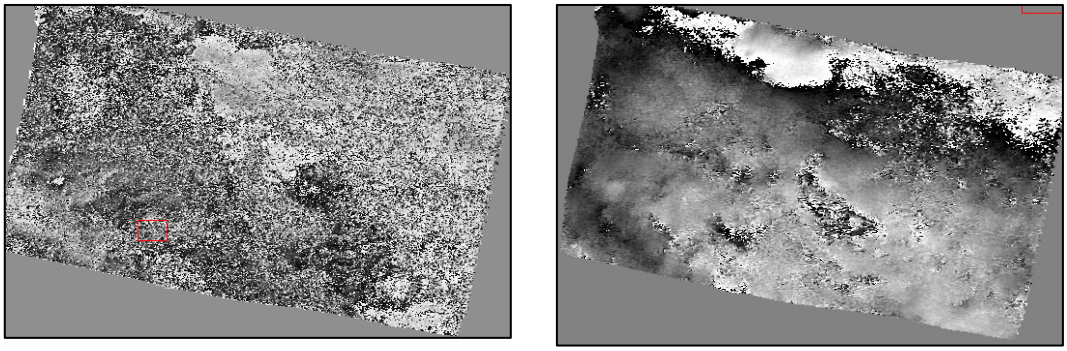
Για τη βέλτιστη εφαρμογή του φίλτρου προσδιορίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του τελεστή Άλφα. Ο τελεστής Άλφα είναι η παράμετρος εκείνη που δίνει τη δυνατότητα διακύμανσης της επίδρασης του φίλτρου στις διάφορες περιοχές της εικόνας ανάλογα με την τιμή συνάφειας που παρουσιάζουν. Με δυο λόγια καθορίζει

[7] Εντολή Interferometry→ Adaptive filter and coherence generation→Goldstein

την "επιθετικότητα" του φίλτρου σε συνάρτηση της τιμής της συνάφειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τελεστή τόσο ισχυρότερη είναι και η εξομάλυνση που επιφέρει. Η ελάχιστη τιμή του τελεστή εφαρμόζεται στις περιοχές με συνάφεια 1 και η μέγιστη τιμή εφαρμόζεται στις περιοχές με συνάφεια 0. Για τις ενδιάμεσες τιμές συνάφειας, η απόδοση της τιμής του τελεστή Άλφα υπολογίζεται γραμμικά. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δόθηκε ελάχιστη τιμή 0.3 (για ένα εύρος τιμών από 0.3 που αντιστοιχεί σε ήπιο φιλτράρισμα και 3 που αντιστοιχεί σε ισχυρό φιλτράρισμα) και μέγιστη τιμή 1.5 (για ένα εύρος τιμών από 0.5 που αντιστοιχεί σε ήπιο φιλτράρισμα και 4 που αντιστοιχεί σε ισχυρό φιλτράρισμα).

Ταυτόχρονα με την εφαρμογή του φασματικού φίλτρου που περιγράφεται, εφαρμόζεται και ένα φίλτρο χαμηλής συχνότητας (low pass filter). Το φίλτρο επιδρά στις υψηλές συχνότητες ελαττώνοντας το θόρυβο της φάσης. Ωστόσο, η εφαρμογή του πρέπει να γίνεται προσεκτικά καθώς εμπεριέχει τον κίνδυνο αφαίρεσης τιμών φάσης που δεν πρέπει. Για το λόγο αυτό συνιστάται να χρησιμοποιείται σε μικρό ποσοστό (στη συγκεκριμένη εφαρμογή δόθηκε σε ποσοστό 5%).

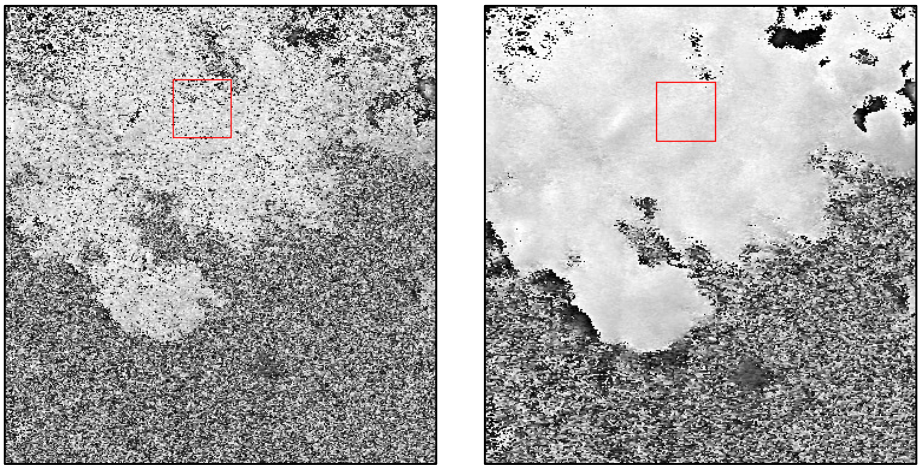
Στις εικόνες που ακολουθούν γίνεται μια αντιπαράθεση μεταξύ του συμβολογράμματος που προκύπτει μετά την αφαίρεση της φάσης της επίπεδης Γης (αριστερά) και του ίδιου συμβολογράμματος μετά την επεξεργασία με φίλτρα (δεξιά).



Εικόνα 15: Το συμβολόγραμμα του ζεύγους εικόνων από το set 6, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή φασματικού φίλτρου με τη μέθοδο Goldstein. Η δημιουργία του συμβολογράμματος έγινε με τη χρήση του DEM 5μ.

Η εξομάλυνση της εικόνας είναι αδιαμφισβήτητη καθώς παρατηρείται σχεδόν ολική αφαίρεση του θορυβου από τη στεριά. Αντιθέτως, στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ότι στη θάλασσα, όπου δεν υπάρχει συνάφεια και που ουσιαστικά περιλαμβάνει θόρυβο και όχι τοπογραφική πληροφορία, το φίλτρο έχει ατυχώς ενισχύσει κάποιες τιμές συχνότητας δίνοντας ψεύτικές τιμές φάσης που δημιουργούν

μικρούς τεχνητούς κροσσούς. Με άλλα λόγια δημιουργεί τοπογραφία σε περιοχές που δεν υπάρχει [ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, 2003].



Εικόνα 16: Σύγκριση ανάμεσα στο συμβολόγραμμα του ζεύγους εικόνων του set 3 πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή φασματικού φίλτρου με τη μέθοδο Goldstein. Η δημιουργία του συμβολογράμματος έγινε με τη χρήση του DEM SRTM.

Ταυτόχρονα στο στάδιο αυτό δημιουργείται και η εικόνα συνάφειας με βάση το φιλτραρισμένο πλέον συμβολόγραμμα. Ο υπολογισμός της συνάφειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε δύο επίπεδα:

i) Ζεύγη απεικονίσεων με κακή συνάφεια δεν έχει νόημα να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τη δημιουργία DEM καθώς το αποτέλεσμα δεν θα είναι αξιόπιστο. Αυτό εξυπηρέτησε πολύ τη διαδικασία διαλογής των ζευγών ENVISAT ASAR που εν τέλει χρησιμοποιήθηκαν.

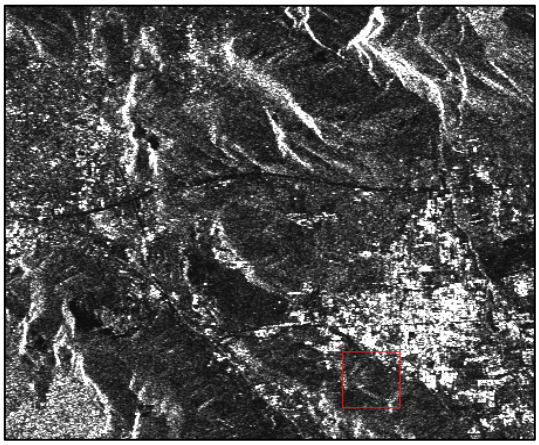
ii) Η τιμή της συνάφειας δίνει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με αλλαγές στα χαρακτηριστικά του εδάφους. Σε γενικές γραμμές έχει παρατηρηθεί ότι η συνάφεια ελαττώνεται όσο η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο απεικονίσεων μεγαλώνει [SARscape Guidebook, 2009].

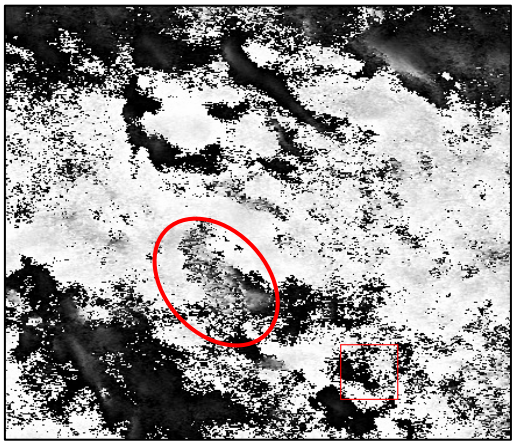
Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ο υπολογισμός της συνάφειας έγινε για ένα παράθυρο 3x3. Η τιμή της συνάφειας των δύο εικόνων προσδιορίζεται με τη χρήση του τελεστή πρόβλεψης γ (expectation operator). Ο τελεστής παίρνει τιμές μεταξύ των ορίων [0,1] όπου το μηδέν αντιστοιχεί σε ασυσχέτιστο ζεύγος απεικονίσεων ενώ αντίθετα η μονάδα αντιστοιχεί σε ζεύγος απόλυτα συσχετισμένο.

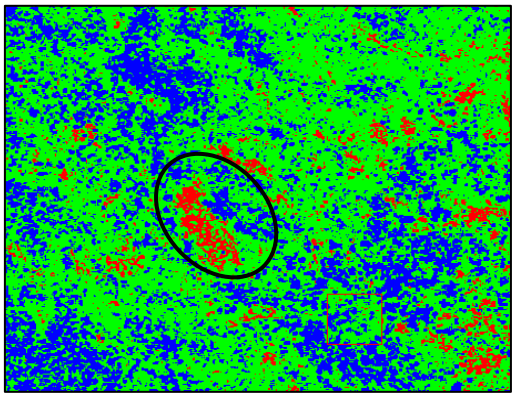
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η εικόνα της συνάφειας για το ζεύγος εικόνων 3 (με χρονική απόκλιση ένα περίπου έτος). Είναι εμφανές ότι στον χώρο του ΧΥΤΑ η τιμή της συνάφειας είναι κακή (κόκκινο χρώμα). Αρκετά καλή (μπλε

χρώμα) είναι η τιμή της συνάφειας στις κατοικημένες περιοχές και στις γυμνές πλαγιές ενώ μεσσαίες τιμές παίρνει στις περιοχές που παρουσιάζουν πυκνή βλάστηση.

Σε γενικές γραμμές η τιμή της συνάφειας και άρα η θεματική πληροφορία που προκύπτει από τη συσχέτιση των ASAR απεικονίσεων ελαττώνεται καθώς η χρονική διαφορά των λήψεων αυξάνεται. Ας σημειωθεί ότι η συνάφεια είναι αρκετά ευαίσθητη σε αλλαγές που προκύπτουν από ανθρώπινη παρέμβαση, όπως για παράδειγμα σε έναν ΧΥΤΑ καθώς και στις καιρικές συνθήκες (εικόνες σε περιοχές με ξηρή ατμόσφαιρα έχουν πολύ καλύτερη συνάφεια ακόμα και αν έχει περάσει μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσα στις λήψεις) [OZOUVILLE- DEFFONTAINES- BENVENISTE- WEGMULLER- VIOLETTE- MARCILY, 2008].







Εικόνα 17: Τμήμα από την εικόνα της συνάφειας του set 3. Επάνω δεξιά παρουσιάζεται το αποτέλεσμα σε τόνους του γκρίζου όπου το μάυρο χρώμα αντιστοιχεί σε γ=0 και το λευκό σε γ=1. Στην ψευδέγχρωμη εικόνα, κάτω δεξιά, παρουσιάζεται η ίδια εικόνα συνάφειας με μια χρωματική διαβάθμιση σε συνάρτηση του τελεστή γ με τις εξής αντιστοιχίες χρωμάτων: Κόκκινο χρώμα: 0.0≤γ<0.3, Πράσινο χρώμα: 0.3≤γ<0.6, Μπλε χρώμα: 0.6≤γ<1. Μέσα σε κύκλο σημειώνεται η περιοχή μελέτης, με εμφανή κακή συνάφεια.

5.5 Αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τιμή της φάσης παίρνει τιμές στο διάστημα [0,2π). Στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται η απόδοση των συνεχών, πραγματικών τιμών της φάσης κάτω του μηδενός και πέραν του 2π (ξεδίπλωμα της φάσης)[8].

Για την αποκατάσταση της φάσης, το λογισμικό SARscape δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δύο διαφορετικές μεθόδους: την Μέθοδο Τοπικής Ανάπτυξης *(Region Growing Method)* και την Μέθοδο Ελάχιστης Ροής Κόστους *(Minimum Cost Flow)*.

Η δευτερη μέθοδος πλεονεκτεί σε περιπτώσεις με μεγάλες εκτάσεις κακής συνάφειας και για το λόγο αυτό συνίσταται ως καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η ολοκλήρωσή της ωστόσο, δεν κατέστη εφικτή εξ΄αιτίας σφάλματος στον προγραμματισμό του αλγόριθμου που χρησιμοποιεί η εφαρμογή και το οποίο δεν έχει ως τώρα αποκατασταθεί από την πλευρά της εταιρίας κατασκευής του λογισμικού.

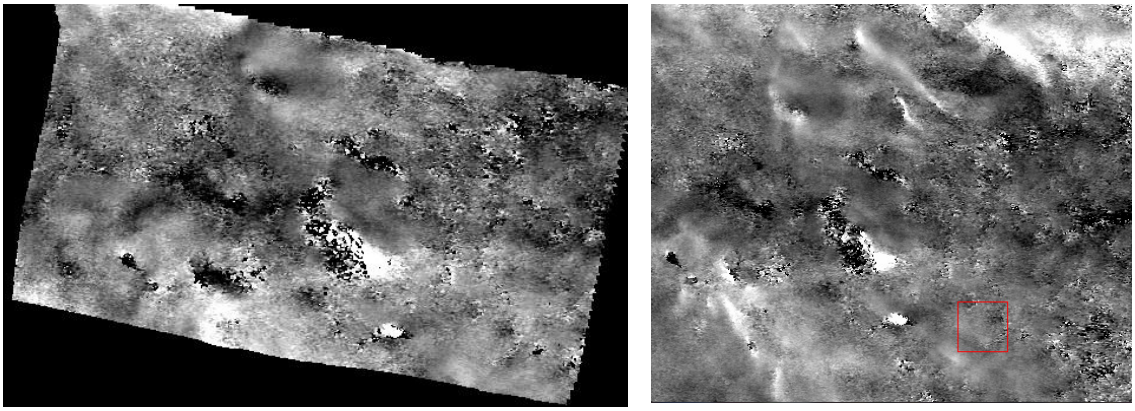
Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται η μέθοδος Τοπικής Ανάπτυξης. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπάγεται στην κατηγορία των μεθόδων ολοκλήρωσης. Η φιλοσοφία που ακολουθεί κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης θυμίζει τον ανθρώπινο συλλογισμό. Ξεκινά την αποκατάσταση της φάσης από τις εύκολες περιοχές και προχωρά σταδιακά προς τις δυσκολότερες. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνει να απομονώνει τις περιοχές όπου η διαδικασία της αποκατάστασης είναι δύσκολη και αβέβαιη αποτρέποντας τη διάδοση των σφαλμάτων σε όλη την εικόνα.

Ως εικόνα ποιότητας ή αλλιώς ως βάση για την αποκατάσταση χρησιμοποιείται η εικόνα της συνάφειας. Αρχικά τοποθετούνται οι γόνοι *(seeds)* σε εικονοστοιχεία με υψηλή συνάφεια ώστε να αρχίσει η αποκατάσταση *(restoring)*. Πριν αποδοθεί η τιμή της αποκατεστημένης φάσης πραγματοποιείται έλεγχος ποιότητας σε κάθε εικονοστοιχείο. Η αποκατάσταση προχωρά σταδιακά στα γειτονικά εικονοστοιχεία *(ανάπτυξη – growing)* στα οποία αποδίδεται η ξετυλιγμένη τιμή φάσης με τη βοήθεια, όσο το δυνατό περισσότερων, ήδη αποκατεστημένων εικονοστοιχείων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται αποκατεστημένες περιοχές *(regions)*. Όταν δύο αποκατεστημένες περιοχές συναντιούνται, ενώνονται μετά από έλεγχο ποιότητας που πραγματοποιείται στο κοινό τους όριο.

Ο έλεγχος ποιότητας βασίζεται στην τιμή της συνάφειας. Συγκεκριμένα ο έλεγχος ξεκινάει από την τιμή 1 (απόλυτα συναφής περιοχή) και κατά τη διάρκεια της

[8] Εντολή Interferometry→ Phase unwrapping

διαδικασίας ελαττώνεται ώστε σταδιακά μετά τις εύκολες περιοχές να ξετυλίγεται η φάση και στις δύσκολες. Το κατώτατο όριο συνάφειας στο οποίο θα φτάσει ο έλεγχος προσδιορίζεται από το ***κατώφλι ελέγχου συνάφειας (coherence threshold)***. Τα εικονοστοιχεία με συνάφεια μικρότερη της τιμής του κατωφλίου δεν αποκαθίστανται. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η τιμή του κατωφλίου δίνεται ίση με 0,1. Γενικότερα σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η Μέθοδος Τοπικής Ανάπτυξης προτείνεται το κατώφλι να μην ξεπερνά την τιμή 0,2 ώστε να παρέχεται αρκετή ελευθερία στην ανάπτυξη του αλγόριθμου. Υψηλές τιμές κατωφλίου έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία κενών-μη αποκατεστημένων περιοχών *(unwrapping islands)*.



Εικόνα 18: Αριστερά η εικόνα της αποκατάστημένης φάσης του set 3 με την χρήση του DEM 5m και δεξιά το αντίστοιχο αποτέλεσμα με τη χρήση του DEM ASTER 30m.

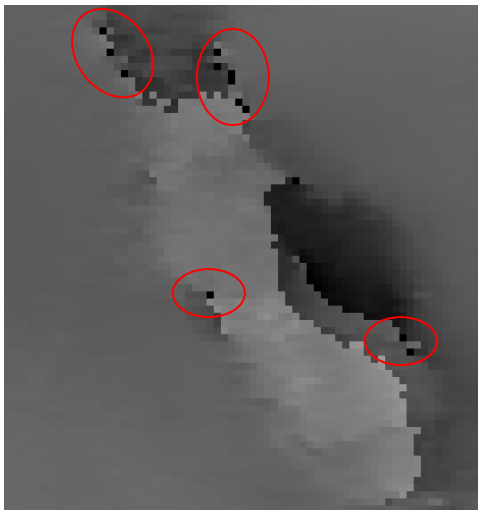
Είναι σημαντικό η εικόνα της φάσης να παρουσιάζει μια συνέχεια στις τιμές της ώστε να μπορούν στο επόμενο στάδιο να αποδοθούν υψόμετρα σε όλα τα σημεία. Ένας τρόπος να περιοριστούν οι «κενές» περιοχές παρουσιάζεται στην παράγραφο που ακολουθεί.

5.5.1 Επεξεργασία της απεκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποκατάστασης της συμβολομετρικής φάσης παρατηρείται η ύπαρξη ορισμένων εικονοστοιχείων στα οποία δεν έχει αποδοθεί τιμή φάσης εξαιτίας της κακής συνάφειας. Μια από τις περιοχές με εικονοστοιχεία στα οποία δεν έχει αποδοθεί τιμή φάσης είναι η περιοχή του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων που αποτελεί και την περιοχή ενδιαφέροντος. Επειδή η ύπαρξη ασυνεχειών στην εικόνα της αποκατεστημένης φάσης θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ασυνεχειών στο

παραγόμενο DEM προτείνεται η χειροκίνητη επεξεργασία[9] των συγκεκριμένων εικονοστοιχείων με σκοπό την απόδοση μιας τιμής φάσης κατά το δυνατό ακριβέστερης [CROSETTO, 2002].

Παρακάτω παρουσιάζεται η εικόνα της αποκατεστημένης φάσης που προέκυψε από το ζεύγος 3, για την περιοχή του με εμφανή τα εικονοστοιχεία στα οποία δεν έχει αποδοθεί τιμή φάσης. Για κάθε εικονοστοιχείο σχεδιάζεται ένα αντίστοιχο πολύγωνο. Το πολύγωνο αυτό δεν είναι απαραίτητο να εφαρμόζει τέλεια στις ακμές του εικονοστοιχείου καθώς η φόρμουλα που χρησιμοποιεί το λογισμικό SARscape αντιλαμβάνεται που πρέπει να επέμβει στην τιμή της φάσης και που όχι. Η τιμή της φάσης που αποδίδεται στο εικονοστοιχείο προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών της φάσης στις κορυφές αυτού του πολυγώνου.



Εικόνα 19: Ασυνέχειες στην εικόνα της αποκατεστημένης φάσης

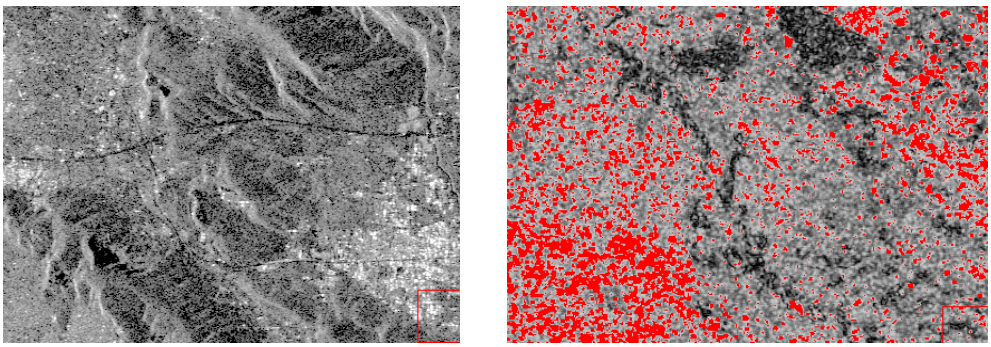
5.6. Επαναπροσδιορισμός της τροχιακής θέσης των δορυφόρων

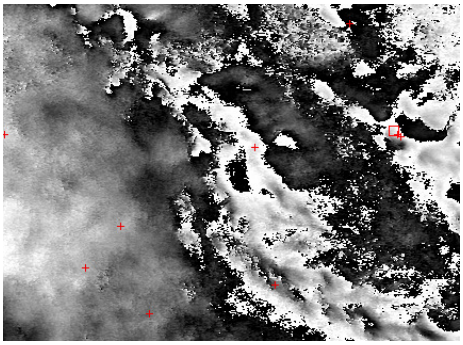
Ο επαναπροσδιορισμός της θέσης των δορυφόρων[10] την στιγμή της λήψης είναι απαραίτητος στο στάδιο αυτό για την σωστή μετατροπή των τιμών της φάσης σε τιμές υψομέτρου. Για να γίνει αυτή η διαδικασία χρειάζονται κάποια σημεία επίγειου ελέγχου[11] (*ground control points*).

[9] Εντολή Interferometry→ Tools→Phase editing
[10] Εντολή Interferometry→ Orbital Refinement
[11] Δημιουργείται ένα διανυσματικό αρχείο .evf με τα σημεία επίγειου ελέγχου. Το αρχείο αυτό μετατρέπεται σε μορφή .xmlμε την εντολή Tools→Generate ground control point file

Τα σημεία επίγειου ελέγχου πρέπει να εντοπίζονται στην εικόνα του συμβολογράμματος μετά την αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιλογή σημείων σε περιοχές όπου οι κροσσοί συμβολής δεν έχουν διορθωθεί. Τα σημεία επίγειου ελέγχου θα πρέπει να έχουν μια ικανοποιητική διασπόρά στην εικόνα και να είναι κατά το δυνατό περισσότερα (τουλάχιστον επτά γιατί με τόσα επιλύεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το λογισμικό). Εφόσον για τη δημιουργία του συμβολογράμματος έχει χρησιμοποιηθεί DEM δεν χρειάζεται να δοθούν γεωγραφικές συντεταγμένες στα σημεία. Το μόνο που απαιτείται είναι να επιλεγούν σημεία με καλή συνάφεια και να δοθούν οι εικονοσυντεταγμένες τους.

Στην παρούσα εφαρμογή, για την ασφαλή επιλογή σημείων με καλή συνάφεια έγινε μια αντιπαράθεση της εικόνας του επίπεδου συμβολογράμματος και της εικόνας της συνάφειας. Όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν, στην εικόνα της συνάφειας έχει τεθεί ένα κατώφλι τιμών ίσο με 0,70 ώστε όλες οι περιοχές με συνάφεια $\gamma<0,70$ να μην εμφανίζονται. Η εικόνα αυτή έχει συνδεθεί με βάση της εικονοσυντεταγμένες της με την εικόνα του συμβολογράμματος. Έτσι κατά την αναζήτηση σημείων επάνω στο συμβολόγραμμα εμφανίζονται ταυτόχρονα οι επιτρεπόμενες (πράσινες) ή μη επιτρεπόμενες (λευκές) περιοχές και διασφαλίζεται η διαδικασία επιλογής.





Εικόνα 20: Επάνω αριστερά εμφανίζεται η master εικόνα από το set 3 και δεξιά η αντίστοιχη εικόνα συνάφειας. Με κόκκινο χρώμα αναγνωρίζονται οι περιοχές με συνάφεια ≥0.70. Κάτω εμφανίζονται τα σημεία επιγειου ελέγχου στην εικόνα του συμβολογράμματος.

Σημαντική παράμετρος που καθορίζεται είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square error) το οποίο δίνεται σε μέτρα. Το σφάλμα αυτό προκύπτει από την αντιπαράθεση των τιμών υψομέτρου των σημείων επίγειου ελέγχου με τις αντίστοιχες τιμές φάσης των σημείων στο συμβολόγραμμα. Στην ιδανική περίπτωση η τιμή του σφάλματος πρέπει να κυμαίνεται από μερικές μονάδες έως μερικές δεκάδες, κάτι που επιβεβαιώνει την ορθή επιλογή σημείων. Μεγάλα σφάλματα, της τάξης των εκατοντάδων ή και χιλιάδων μέτρων καθώς και πολύ μικρά (κάτω της μονάδας) έχουν ως αποτέλεσμα τον κακό επανϋπολογισμό των δεδομένων τροχιάς και ένα μη αξιόπιστο υπολογισμό υψομέτρων.

A/A	Χρονική Απόκλιση	Bs	RMS ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ DEM		
			SRTM 90m	ASTER 30m	5000 5m
set 1	Δεκέμβριος 2003 - Ιανουάριος 2004	65	416.3	92.8	58.1
set 8	Νοέμβριος 2004 - Δεκέμβριος 2004	198	39.3	11.7	5.96
set 7	Απρίλιος 2003 - Νοέμβριος 2004	209	268.9	67.3	30.5
set 5	Ιουλιος 2003 - Μάιος 2004	188	53.7	22.60	6.60
set 2	Ιανουάριος 2004 - Φεβρουάριος 2005	43	97.8	88.2	50.6
set 3	Ιανουάριος 2003 - Δεκέμβριος 2003	52	284.4	30.5	13.7
set 4	Ιανουάριος 2004 - Απρίλιος 2004	59	148.3	37.1	11.2
set 6	Ιανουάριος 2003 - Ιανουάριος 2004	84	41.7	21.3	15.4

Πίνακας 3: Αντιστοιχία του RMS με τον συνδυασμό των απεικονίσεων ASAR και το DEM αναφοράς

5.7 Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο για την παραγωγή DEM

Εφόσον έχει προηγηθεί αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης η διαφορά των τιμών της αποκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης οφείλεται πλέον στην υψομετρική διαφορά των αντικειμένων στον χώρο. Πάνω σε αυτή τη θεώρηση βασίζεται η διαδικασία εξαγωγής DEM[12].

Η μετατροπή της συμβολομετρικής φάσης σε υψόμετρο και η γεωαναφορά της περιοχής σε συγκεκριμένη χαρτογραφική προβολή πραγματοποιείται με επίλυση του συστήματος που δίνεται ακολούθως.

[12] Εντολή Interferometry→ Phase to height conversion and Geocoding

$$\begin{cases} \left|\vec{P}-\vec{S}_1\right| - \left|\vec{R}_1\right| = 0 \\ \dfrac{2}{\lambda}\cdot\dfrac{\left(\vec{P}-\vec{S}_1\right)\cdot\left(\vec{V}_P-\vec{V}_{S_1}\right)}{\left|\vec{P}-\vec{S}_1\right|} + f_D = 0 \\ \left|\vec{P}-\vec{S}_2\right| - \left|\vec{R}_2\right| = 0 \\ \dfrac{2}{\lambda}\cdot\dfrac{\left(\vec{P}-\vec{S}_2\right)\cdot\left(\vec{V}_P-\vec{V}_{S_2}\right)}{\left|\vec{P}-\vec{S}_2\right|} + f_D = 0 \\ \left|\vec{R}_1\right| - \left|\vec{R}_2\right| = \dfrac{\lambda}{4\pi}\cdot\phi \end{cases}$$

Το σύστημα αυτό προκύπτει από την σύνθεση των ακόλουθων εξισώσεων:

$$R_s = S - P \qquad \textbf{Εξίσωση 6}$$

Πρόκειται για ένα βασικό κανόνα της γεωμετρίας του συστήματος ρανταρ σε σχέση με την επιφάνεια που αποτυπώνει όπου,

Rs είναι η πλευρική απόσταση ρανταρ-εδάφους (slant range)
S είναι η θέση του δορυφόρου στο χώρο και
P είναι η θέση του αντικειμένου στο έδαφος

$$f_D = \frac{2 f_0 (v_p - v_s) R_s}{c\left|R_s\right|} \qquad \textbf{Εξίσωση 7}$$

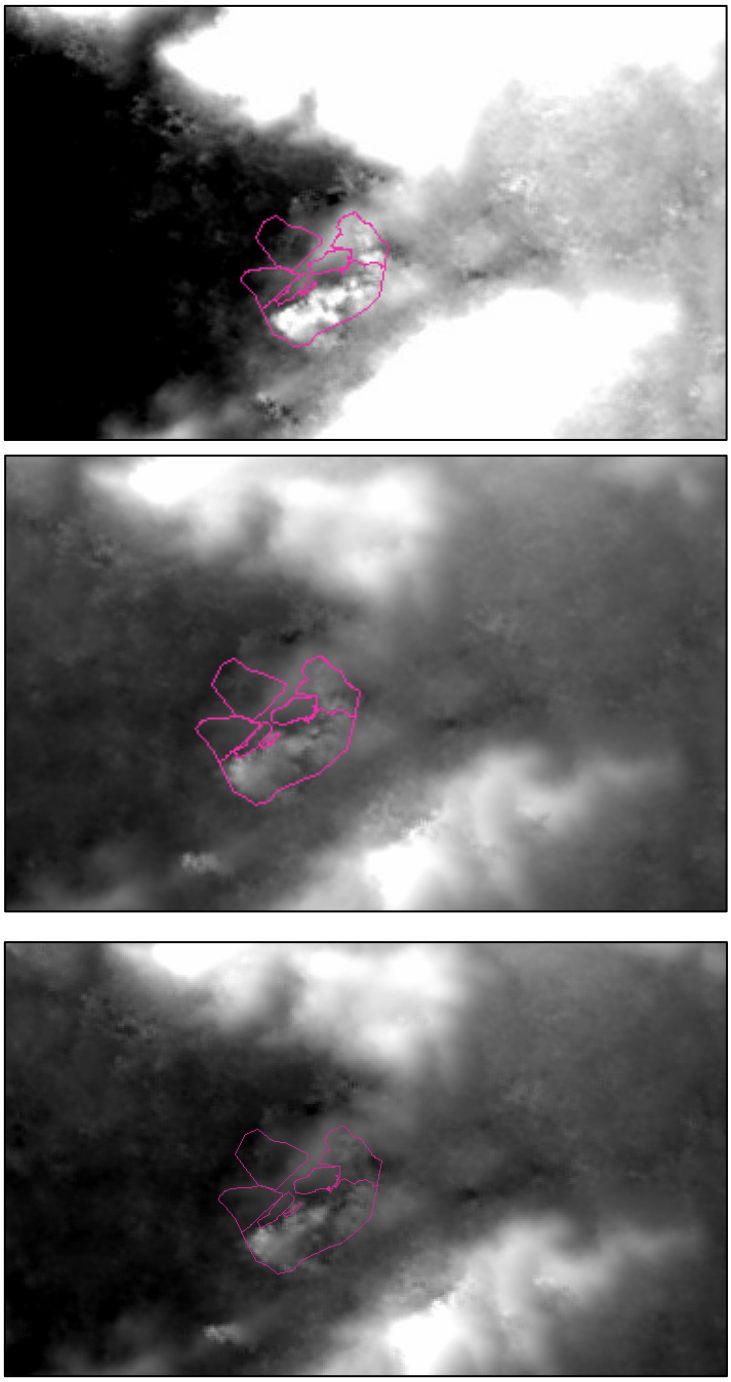
Πρόκειται για την εξίσωση Doppler όπου,

f_D είναι η συχνότητα Doppler
f_0 είναι η φέρουσα συχνότητα
V_P, V_S είναι η ταχύτητα μετακίνησης της θέσης στόχου και δορυφόρου αντίστοιχα
Rs είναι η πλευρική απόσταση ρανταρ-εδάφους (slant range) και
c είναι η γνωστή ταχύτητα του φωτός

$$\varphi = 4\pi\lambda^{-1}(R_2 - R_1) \qquad \textbf{Εξίσωση 8}$$

Η σχέση αυτή έχει παρουσιαστεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρόκειται για την σχέση που συνδέει τη διαφορά της συμβολομετρικής φάσης φ δύο γειτονικών σημείων 1 και 2 συναρτήσει της απόστασης καθενός από το δορυφόρο (R_1 και R_2).

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα DEM που δημιουργήθηκαν για το set 3 με τη χρήση διαφορετικού κάθε φορά DEM αναφοράς. Τα DEM έχουν σε κάθε περίπτωση χωρική ανάλυση 25m και είναι γεωαναφερμένα στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς UTM (Zone 34).



Εικόνα 21: Τα απεικονιζόμενα DEM έχουν προκύψει με τη χρήση DEM αναφοράς 90m, 30m και 5m (από πάνω προς τα κάτω). Όσο καλύτερη είναι η χωρική ανάλυση του DEM αναφοράς τόσο ακριβέστερο είναι το παραγόμενο DEM κάτι που φαίνεται από την διασπορά τιμών υψομέτρου (τόνους του γκρίζου).

Με μια πρώτη αξιολόγηση των παραγόμενων DEM με βάση τα υψόμετρα που αποδίδονται, όχι αυστηρά εντός της ΟΕΔΑ αλλά συνολικά στην ευρύτερη περιοχή, σημειώνονται τα εξής:

- ✓ Στο πρώτο παραγόμενο DEM, με DEM αναφοράς 90m, παρατηρείται μια βίαιη διακύμανση των υψομέτρων από πολύ χαμηλές τιμές (μαύρο χρώμα) σε πολύ υψηλές (λευκό χρώμα) ενώ επιπλέον, καταγράφονται και αρνητικές τιμές υψομέτρου στην περιοχή της ξηράς.
- ✓ Στο δεύτερο παραγόμενο DEM, με DEM αναφοράς 30m, δίνεται μια αρκετά ορθότερη εικόνα του αναγλύφου της περιοχής. Ωστόσο, δεν διακρίνονται καθαρά οι κορυφές και τα χαμηλά σημεία. Θα λέγαμε ότι το εύρος τιμών υψομέτρου είναι πιο περιορισμένο ή πιο κοντά στον μέσο όρο του υψομέτρου της περιοχής.
- ✓ Το τρίτο παραγόμενο DEM, με DEM αναφοράς 5m, δίνει το ακριβέστερο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό η περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων εστιάζει στα αποτελέσματα της διαδικασίας με την χρήση DEM αναφοράς 5m.

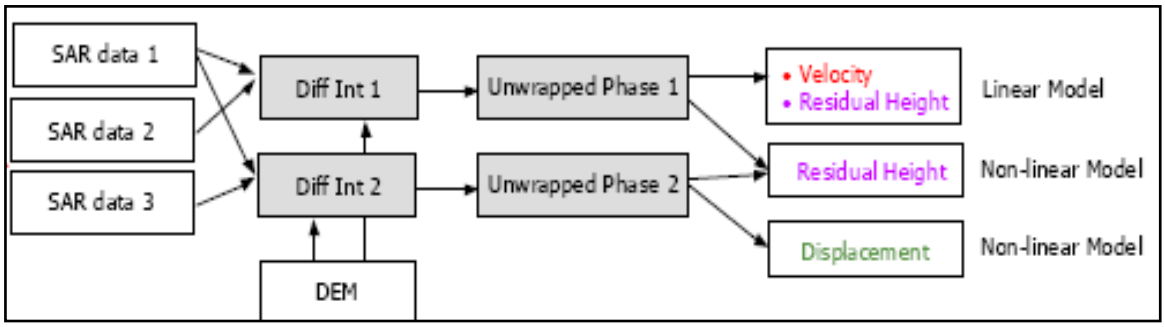
5.9 Διαφορική Συμβολομετρία

Η συγκεκριμένη διαδικασία[13] παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας χάρτη που δείχνει την μετακίνηση/ παραμόρφωση του ανάλγυφου κατά την πλάγια διεύθυνση (displacement) συνδυάζοντας σε ζεύγη τρεις ή τέσσερεις SAR εικόνες. Επίσης μπορεί να αποδώσει την ταχύτητα της μετακίνησης/ παραμόρφωσης (velocity) καθώς και την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο παραγόμενο DEM και στο DEM αναφοράς (residual height). Η διαδικασία εκτελείται με δύο τρόπους:

1. Χρησιμοποιείται ένα ζεύγος εικόνων πριν το περιστατικό και μια εικόνα μετά το περιστατικό. Οι τρεις εικόνες συνδυάζονται ανά δύο και με τη χρήση DEM αναφοράς παράγονται τα διαφορικά συμβολογράμματα και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αποκατεστημένης φάσης.

Εν συνεχεία με την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου (linear model) υπολογίζονται:
α) η ταχύτητα παραμόρφωσης του εδάφους για την χρονική περίοδο ανάμεσα στις λήψεις του πρώτου ζεύγους.
β) η διαφορά υψομέτρου ανάμεσα στο DEM που παράγεται από το πρώτο ζεύγος εικόνων και το DEM αναφοράς

Εναλλακτικά με την εφαρμογή του μη γραμμικού μοντέλου (non - linear model) υπολογίζονται:
α) η τιμή της παραμόρφωσης του εδάφους για την χρονική περίοδο ανάμεσα στις λήψεις του δεύτερου ζεύγους.
β) η διαφορά υψομέτρου ανάμεσα στο DEM που παράγεται από το δεύτερο ζεύγος εικόνων και το DEM αναφοράς.

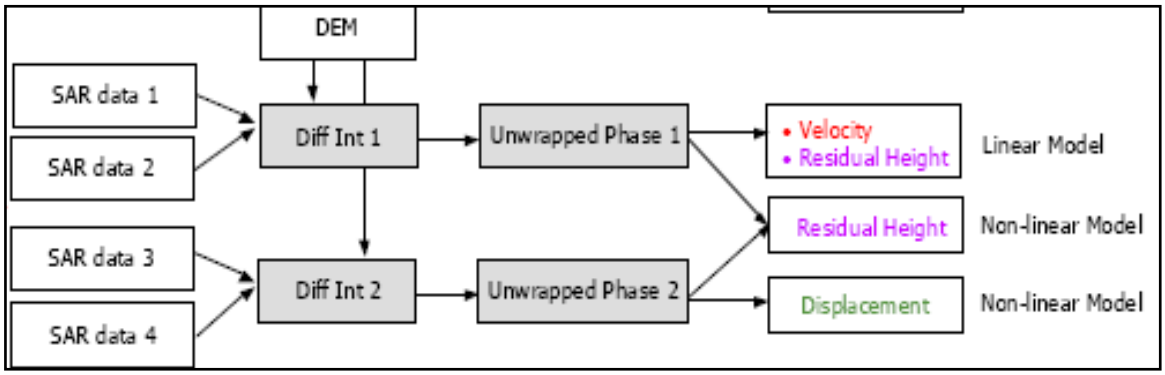


[13] Εντολή Interferometry→ Interferogram stacking→Dual pair differential Interferometry

2. Χρησιμοποιείται ένα ζεύγος εικόνων πριν το περιστατικό και ένα ζεύγος εικόνων μετά το περιστατικό. Από το κάθε ζεύγος και με τη χρήση DEM αναφοράς παράγονται τα αντίστοιχα διαφορικά συμβολογράμματα και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αποκατεστημένης φάσης.

Εν συνεχεία με την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου (linear model) υπολογίζονται:
α) η ταχύτητα παραμόρφωσης του εδάφους για την χρονική περίοδο ανάμεσα στις λήψεις του πρώτου ζεύγους.
β) η διαφορά υψομέτρου ανάμεσα στο DEM που παράγεται από το πρώτο ζεύγος εικόνων και το DEM αναφοράς

Εναλλακτικά με την εφαρμογή του μη γραμμικού μοντέλου (non - linear model) υπολογίζονται:
α) η τιμή της παραμόρφωσης του εδάφους για την χρονική περίοδο ανάμεσα στις λήψεις του δεύτερου ζεύγους.
β) η διαφορά υψομέτρου ανάμεσα στο DEM που παράγεται από το δεύτερο ζεύγος εικόνων και το DEM αναφοράς.



]Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τα δύο μοντέλα, γραμμικό και μη, είναι τα ακόλουθα:

Γραμμικό Μοντέλο

$$Phase_1 = (H_{res} * K_1) + (V * T_1 * 4\pi/\lambda)$$ **Εξίσωση 9**

$$Phase_2 = (H_{res} * K_2) + (V * T_2 * 4\pi/\lambda)$$ **Εξίσωση 10**

Μη Γραμμικό Μοντέλο

$$Phase_1 = H_{res} * K_1$$ **Εξίσωση 11**

$$Phase_2 = (H_{res} * K_2) + (D_2 * 4\pi/\lambda)$$ **Εξίσωση 12**

όπου H_{res} : η διαφορά υψομέτρου σε μέτρα από το DEM αναφοράς
V : η ταχύτητα παραμόρφωσης του εδάφους σε χιλιοστά ανά έτος
D_2 : η τιμή της πααμόρφωσης σε μέτρα
K_1 και K_2 : οι συντελεστές μετατροπής του υψομέτρου σε φάση
T_1 και T_2 : η χρονική απόσταση

Το μοντέλο που περιγράφηκε για την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας δεν θεωρείται κατάλληλο στην παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα, στο διάστημα 2003-2005 για το οποίο υπήρχαν διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα το ανάγλυφο στην περιοχή του ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ Ι βρισκόταν σε τελική μορφή χωρίς να επιδέχεται αλλαγές. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου θα είχε νόημα μόνο στην περίπτωση που υπήρχαν δεδομένα πριν και μετά το περιστατικό, δηλαδή πριν και μετά την απόθεση απορριμμάτων στο χώρο. Ωστόσο, δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν τόσο παλιά δορυφορικά δεδομένα (ειδικά για την περιπτωση του ΧΑΔΑ όπου η ρύπανση ξεκίνησε σταδιακά την δεκαετία του ’50 κάτι τέτοιο ήταν αδύνατο). Όσον αφορά το ανάγλυφο στη θέση του ΧΥΤΑ ΙΙ, βρισκόταν σε εξέλιξη κατά την χρονική περίοδο 2003-2005 οπότε και σε αυτήν την περιπτωση η εφαρμογή του μοντέλου δεν θα είχε αποτέλεσμα. Δυστυχώς, το software που χρησιμοποιείται δεν υποστηρίζει τη χρήση πολλαπλών εικόνων για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων.

Ας σημειωθεί ότι στο φαινόμενο που μελετάται στη συγκεκριμένη εφαρμογή αυτό που ενδιαφέρει είναι η κατακόρυφη μετακίνηση/ παραμόρφωση του αναγλύφου. Μια λεκάνη ΧΥΤΑ κατασκευάζεται με εκσκαφή του υφιστάμενου αναγλύφου και σταδιακά πληρώνεται καθ’ ύψος ως μια συγκεκριμένη στάθμη και με συγκεκριμένες κλίσεις πρανών που να εξασφαλίζουν την ευστάθεια του απορριμματικού αναγλύφου που δημιουργείται και που έχει την μορφή λόφου. Εναλλακτικά λοιπόν για την εκτίμηση των κατακόρυφων μετακινήσεων και δεδομένου ότι το μοντέλο της Διαφορικής Συμβολομετρίας που χρησιμοποιεί το software δεν εξυπηρετεί το στόχο, επιλέγεται μια διαφορετική προσέγγιση που βασίζεται στην αφαίρεση του DEM αναφοράς από τα παραγόμενα DEM. Η μεθοδολογία αυτή αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Για το έλεγχο της αξιοπιστίας του παραγόμενου DEM χρησιμοποιούνται τα τρία Τριγωνομετρικά σημεία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας του Στρατού (Γ.Υ.Σ.) που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Τα τριγωνομετρικά σημεία δίνονται από την Γ.Υ.Σ. στο σύστημα συντεταγμένων Hatt που χρησιμοποιεί ως προβολικό σύστημα το ελλειψοειδές Bessel. Για την σύγκρισή τους με το παραγόμενο DEM, έγινε μετατροπή τους στο Παγκόσμιο Σύστημα Συντεταγμένων UTM (Ζώνη 34°) που χρησιμοποιεί ως προβολικό σύστημα το ελλειψοειδές WGS 84.

Α/Α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	Χ	Υ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ
1	ΣΚΑΛΗΣΤΗΡΙ T_{35}	16548,08	-19664,36	207,07
2	ΠΥΡΓΑΡΙ T_{108}	17765,33	-19063,16	230,76
3	T_{62}	15651,92	-18131,48	144,97

Πίνακας 4: Τριγωνομετρικά σημεία της Γ.Υ.Σ. για το Φ.Χ. 1:50.000 ΑΘΗΝΑ - ΕΛΕΥΣΙΣ

Οι αποκλίσεις των DEM που προέκυψαν, με DEM αναφοράς χωρικής ανάλυσης 5m, από τα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Α/Α	ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ							
		set 1	*set 2*	*set 3*	*set 4*	*set 5*	*set 6*	*set 7*	*set 8*
T35	207.07	+74.1	+80.83	-13.67	-112.87	-3.88	+12.42	-38.37	-32.45
T108	230.76	+37.47	+50.94	-11.87	+1.57	-2.25	+10.77	-5.03	-13.34
T62	144.97	-30.85	-8.14	+7.48	-10.66	-3.73	-15.11	-12.07	-5.88
Μέσο σφάλμα		+26.91	+41.21	-6.02	-40.65	-3.29	+2.69	-18.49	-17.22

Πίνακας 5: Υψομετρικές αποκλίσεις των DEM που προέκυψαν έχοντας ως DEM αναφοράς εκείνο που προέκυψε από χάρτες 1:5000.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το τριγωνομετρικά T35 βρίσκεται μέσα στο χώρο της ΟΕΔΑ (πλησίον του χώρου εγκατάστασης της ΕΜΑΚ Ι) και άρα σε περιοχή με κακή συνάφεια (κάτω του 0.3). Παρόλο που η θέση του Τργωνομετρικού σημείου είναι εξ΄ορισμού αμετάβλητη, φαίνεται ότι η εκτίμηση του υψομέτρου του επηρεάζεται σημαντικά από την κακή συνάφεια στην περιβάλλουσα περιοχή (υπενθυμίζεται ότι ο υπολογισμός της συνάφειας γίνεται σε παράθυρο 3x3).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το set 4. Αντιθέτως, το υψόμετρο των σημείων T108 και T62, που βρίσκονται σε μια ακτίνα 3km περίπου μακριά από το χώρο, έχουν εκτιμηθεί πολύ καλύτερα.

Από τις αποκλίσεις που προέκυψαν υπολογίζεται ένα μέσο σφάλμα ίσο με -2.21μ από τη σχέση:

$$\sigma = \Sigma(H-H_i) / (\nu-1) \qquad \textbf{Εξίσωση 13}$$

όπου H είναι το υψόμετρου του τριγωνομετρικού σημείου
H_i είναι το υψόμετρο του αντίστοιχου σημείου στο παραγόμενο DEM
ν είναι το πλήθος του δείγματος, στην συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με 8

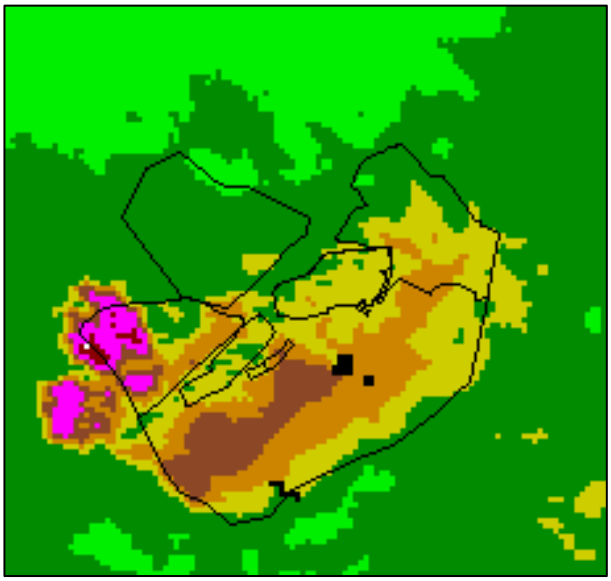
Εν συνεχεία από τα 8 DEM δημιουργείται ένα «μέσο» DEM που προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών υψομέτρου κάθε εικονοστοιχείου. Από το DEM αυτό αφαιρείται το σφάλμα που υπολογίστηκε προηγουμένως. Οι αποκλίσεις αυτού του DEM από τα τριγωνομετρικά φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Α/Α	**ΥΨΟΜΕΤΡΟ**	***Υψομετρική απόκλιση***
T35	207.07	+9.28
T108	230.76	+8.54
T62	144.97	-9.87

Πίνακας 6: Υψομετρικές αποκλίσεις του «μέσου» DEM από τα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία

Η διαφορά του «μέσου» DEM από το DEM αναφοράς, συνυπολογίζοντας και το εκτιμώμενο σφάλμα παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Ας σημειωθεί ότι για να είναι εφικτή η αφαίρεση των DEM θα πρέπει να έχουν το ίδιο μέγεθος εικονοψηφίδας. Αυτό απαιτεί πριν από κάθε αφαίρεση την αλλαγή του μεγέθους της εικονοψηφίδας[14] του DEM αναφοράς σε 25x25m.

[14] Η διαδικασία αυτή όπως επίσης και η αφαίρεση των εικόνων γίνεται στο λογισμικό ENVI 4.7 με την εντολή Basic Tools→ Resize Data→Set output dims by pixel size



ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
-25μ έως 0m	
0μ έως 30m	
30μ έως 60m	
60μ έως 90m	
90μ έως 120m	
120μ έως 170m	
170μ έως 200m	

Εικόνα 22: Από το «μέσο» DEM έχει αφαιρεθεί το DEM αναφοράς 5μ. Οι παρατηρούμενες υψομετρικές αποκλίσεις έχουν χωριστεί σε συγκεκριμένα εύρη τιμών και έχουν χρωματιστεί.

Στην εικόνα 22 παρατηρούνται τα εξής:

- ✓ Τόσο στην περιοχή του ΧΑΔΑ όσο και στις θέσεις των ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων Ι & ΙΙ παρατηρούνται σημαντικές επιχώσεις που ξεκινούν από τα 30μ και φτάνουν έως και τα 120μ.
- ✓ Με βάση τα δεδομένα πεδίου το απορριμματικό ανάγλυφο στη θέση του ΧΥΤΑ Ι την συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Ιανουάριος 2003 – Φεβροάριος 2005) είχε πληρωθεί και βρισκόταν σε φάση αποκατάστασης. Το μέγιστο ύψος απορριμμάτων που θα είχε λάβει εκτιμάτο γύρω 85μ που μαζί με την χωματοκάλυψη για την δεντροφύτευσή του δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 90μ. Πράγματι, στην εικόνα 22 παρατηρούνται επιχώσεις από 30 έως και 90μ. Επίσης, η διαμόρφωση του αναγλύφου γίνεται από τα ανάντη προς κατάντη όπως πράγματι περιγράφει και οσχεδιασμός τπυ χώρου (§2.4).
- ✓ Με βάση και πάλι δεδομένα πεδίου το απορριμματικό ανάγλυφο στη θέση του ΧΥΤΑ ΙΙ την συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Ιανουάριος 2003 – Φεβροάριος 2005) δεχόταν απορρίμματα αλλά βρισκόταν προς το τέλος της διάρκεια ζωής του. Το μέγιστο ύψος απορριμμάτων μετά την πλήρωση του κυττάρου έφτανε τα 60μ περίπου. Οπότε η παρατηρούμενη υψομετρική απόκλιση (30 – 60μ στο μεγαλύτερο μέρος και από 60μ και πάνω ανάντι του χώρου) δεν αποκλίνουν πολύ από την πραγματικότητα.
- ✓ Με βάση και πάλι δεδομένα πεδίου το απορριμματικό ανάγλυφο στη θέση του ΧΑΔΑ την συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Ιανουάριος 2003 – Φεβροάριος 2005) είχε αποκατασταθεί και δεντροφυτευθεί. Το μέγιστο εκτιμώμενο ύψος απορριμμάτων που περικλύει το αποκατεστημένο ανάγλυφο του χώρου εκτιμάται στα 70μ περίπου. Η εκτίμηση από το DEM δίνει αποκλίσεις που αγγίζουν έως και τα 120μ.
- ✓ Στον περιβάλλοντα χώρο της ΟΕΔΑ παρατηρούνται υψομετρικές αποκλίσεις που κυμαίνονται από -25μ έως 30μ. Είναι προφανές ότι δεν αναμενόταν μηδενική απόκλιση στην περιοχή δεδομένου ότι κάποιες παραμορφώσεις/

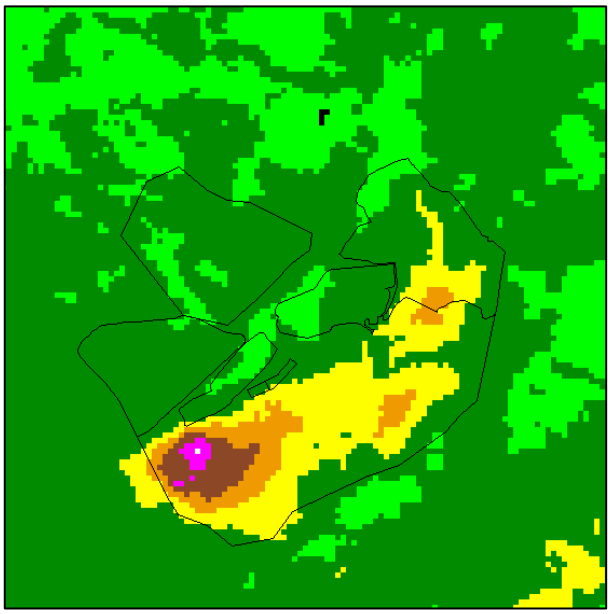
μετακινήσεις του αναγλύφου θα έχουν λάβει χώρα εκεί. Ωστόσο, η απόκλιση που προκύπτει έχει ένα συγκεκριμένο εύρος +/-30μ που προφανώς αντιστοιχεί σε αστοχία της μεθόδου γι΄αυτό και δεν θα ληφθεί υπόψη.

- ✓ Στον χώρο του ΧΥΤΑ Φυλής Ι την χρονική περίοδο που εξετάζεται (Ιανουάριος 2003 – Φεβροάριος 2005) διενεργούνταν εργασίες κατασκευής του. Πιθανότατα αυτό δημιουργεί πολύ κακή συνάφεια στο σημείο αυτό και άρα εσφαλμένη εικόνα αναγλύφου.
- ✓ Τέλος παρατηρούνται κάποια κενά (null) εικονοστοιχεία. Η τιμή της συνάφειας ήταν τόσο κακή στα σημεία αυτά που δεν μπορέσει να αποδοθεί η τιμή της αποκατεστημένης φάσης και άρα δεν ήταν εφικτός ο υπολογισμός υψομέτρου.

Εναλλακτικά δημιουργείται ένα μέσο DEM από τα set με το μικρότερο σφάλμα (set 3, 5 & 6). Οι αποκλίσεις αυτού του νέου «μέσου» DEM από τα τριγωνομετρικά φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Α/Α	**ΥΨΟΜΕΤΡΟ**	***Υψομετρική απόκλιση***
T35	207.07	-6.88
T108	230.76	-2.10
T62	144.97	-5.86

Πίνακας 7: Υψομετρικές αποκλίσεις του «μέσου» DEM από τα set 3, 5 & 6 από τα γνωστά τριγωνομετρικά σημεία

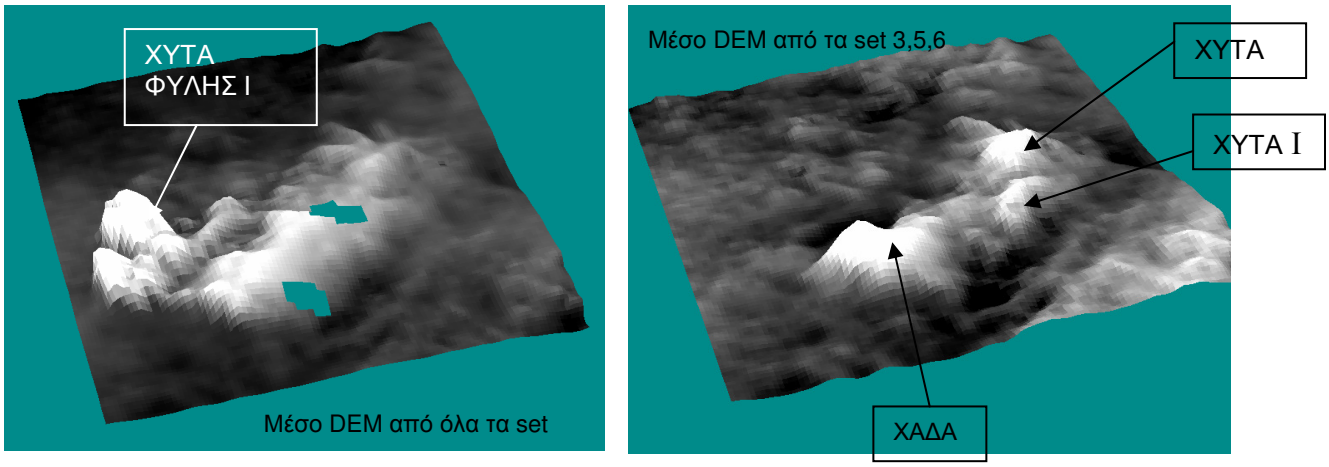


ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
-30μ έως 0m	
0μ έως 30m	
30μ έως 60m	
60μ έως 90m	
90μ έως 120m	

Εικόνα 23: Από το «μέσο» DEM των set 3, 5 & 6 έχει αφαιρεθεί το DEM αναφοράς 5μ. Οι παρατηρούμενες υψομετρικές αποκλίσεις έχουν χωριστεί και χρωματιστεί αντίστοιχα με το DEM.

Από την εικόνα 23 είναι εμφανή τα εξής:

- ✓ Οι υψομετρικές αποκλίσεις στο χώρο του ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ Ι & ΙΙ προσομοιάζουν ακριβέστερα τα πραγματικά απορριμματικά υψόμετρα αφού μόλις που αγγίζουν τα 90μ.
- ✓ Στην περιοχή του ΧΥΤΑ Φυλής Ι δεν παρατηρούνται οι υψομετρικές αποκλίσεις που εμφανίζονταν στην προηγούμενη περίπτωση. Ας σημειωθεί ότι τα set που χρησιμοποιούνται εδώ αντικατοπτρίζουν την κατάσταση του χώρου την χρονική περίοδο Ιανουάριος 2003 – Μάιος 2004 (σε αντίθεση με το προηγούμενο «μέσο» DEM που περιείχε εικόνες του 2005 όπου ο ΧΥΤΑ Φυλής Ι βρισκόταν υπό κατασκευή).
- ✓ Στον περιβάλλοντα χώρο της ΟΕΔΑ παρατηρούνται όπως και πριν υψομετρικές αποκλίσεις που κυμαίνονται από -30μ έως 30μ.
- ✓ Η αντίστοιχες εικόνες συνάφειας των set που χρησιμοποιήθηκαν είναι αρκετά καλές γι΄αυτό και δεν παρατηρούνται πλέον κενές (null) περιοχές.



Εικόνα 24: Πρόκειται για το αποτέλεσμα των εικόνων 22 και 23 αντίστοιχα σε μια προβολή που δίνει την αίσθηση της τρίτης διάστασης.

Από την αντιπαράθεση των τρισδιάστατων προβολών (Εικόνα 24) είναι εμφανές ότι και τα δύο DEM δίνουν μια σαφή εικόνα των απορριμματικών αποθέσεων που έχουν λάβει χώρα στην περιοχή. Στη δεύτερη περίπτωση διακρίνονται ξεκάθαρα τρεις διαφορετικοί απορριμματικοί όγκοι. Σημαντική είναι επίσης η διαφοροποίηση της εικόνας στην περιοχή του ΧΥΤΑ Φυλής Ι ανάμεσα στις δύο εικόνες που σχετίζεται άμεσα με την συμμετοχή ή μη εικόνων μετά το 2004 όπου και ξεκίνησε η κατασκευή του έργου.

Τέλος, για το DEM που προέκυψε από τα 3 καλύτερα set έγινε μια αξιολόγηση με βάση σημεία με υψόμετρο γνωστό από επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν στο πλατώ του ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ Ι αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολούθως.

	X	Y	H από πεδίο	H από DEM	ΔH (m)
ΧΑΔΑ (μετά την αποκατάσταση)	733460	4216605	187	193	-6
ΧΥΤΑ Ι (μετά την αποκατάσταση)	733265	4217060	205	201	4

Πίνακας 8: Αξιολόγηση παραγόμενων DEM με σημεία επίγειου ελέγχου

Για τον ΧΥΤΑ ΙΙ που βρισκόταν σε εξέλιξη δεν κατέστη δυνατό να υπάρχει η στάθμη πλήρωσης για κάθε μια ημερομηνία που συμμετέχει στην διαδικασία. Ωστόσο, από τη σύγκριση του εκτιμώμενου υψομέτρου ενός συγκεκριμένου σημείου στα DEM που προκύπτουν από τα τρία καλύτερα set 3,5,6 και των οποίων οι master εικόνες αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, παρατηρείται άνοδος του απορριμματικού ύψους από το μήνα Ιανουάριο έως το μήνα Ιούλιο κάτι που επιβεβαιώνει το αναμενόμενο.

	X	Y	H από πεδίο	H από DEM	ΔH (m)
Ιανουάριος 2003 (set 3& 6)	733550	4217630	-	187	-
Ιούλιος 2003 (set 5)	733550	4217630	-	202	-

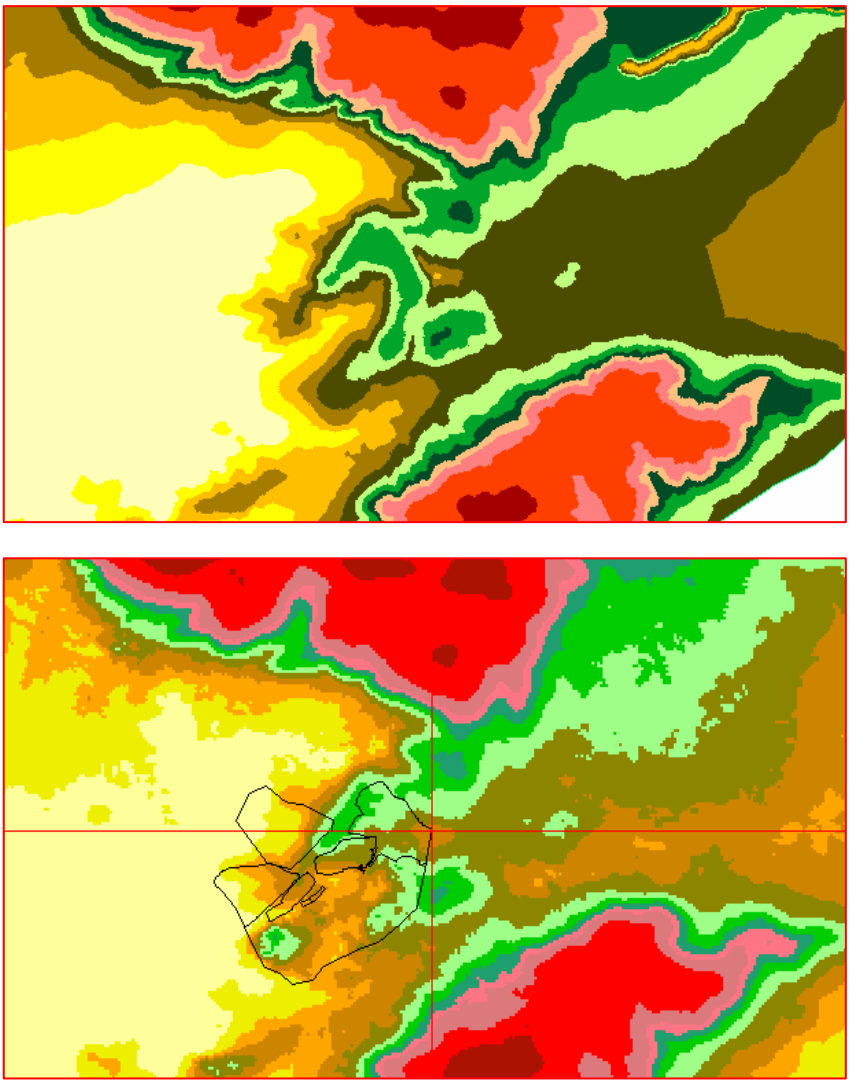
Πίνακας 9: Παρατήρηση της εξέλιξης του απορριμματικού ύψους

Τέλος, στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται μια αντιπαράθεση του DEM που προέκυψε από δεδομένα πεδίου της περιόδου 2003-2005, χωρικής ανάλυσης 5m (στο χώρο του ΧΥΤΑ ΙΙ τα δεδομένα είναι προσεγγιστικά) και του «μέσου» DEM που δημιουργήθηκε νωρίτερα από τα τρία καλύτερα set (3,5,6), χωρικής ανάλυσης 25m. Η αντιστοίχιση των χρωμάτων με τα εύρη των τιμών υψομέτρου είναι κοινά και στις δύο εικόνες και είναι αυτά που φαίνονται στο συνοδευτικό υπόμνημα[15].

Θεωρητικά θα έπρεπε αυτά τα δύο DEM σχεδόν να ταυτίζονται (υπενθιμίζεται η διαφορά στη χωρική τους ανάλυση) όπως και συμβαίνει στο μεγαλύτερο τμήμα της εικόνας. Από τη σύγκριση είναι εμφανείς κάποιες διαφοροποιήσεις εντός του χώρου

[15] Σημειώνεται ότι τα δύο DEM που συγκρίνονται κατασκευάστηκαν σε διαφορετικό software γι΄αυτό και δεν κατέστη εφικτό να γίνει πιστή αντιστοίχιση των χρωμάτων, κάτι που δυσχαιραίνει την αντιπαράθεσή τους.

της ΟΕΔΑ ωστόσο σε γενικές γραμμές η προσέγγιση του αναγλύφου με τη χρήση της Συμβολομετρίας θεωρείται αρκετά επιτυχής.



Elevations Table

Number	Minimum Elevation	Maximum Elevation	Color
1	0.00	100.00	
2	100.00	120.00	
3	120.00	140.00	
4	140.00	160.00	
5	160.00	180.00	
6	180.00	200.00	
7	200.00	220.00	
8	220.00	240.00	
9	240.00	260.00	
10	260.00	300.00	
11	300.00	400.00	
12	400.00	555.00	

Εικόνα 25: Αντιπαράθεση DEM 5m από επίγειες τοπογραφικές αποτυπώσεις (επάνω) και DEM από Συμβολομετρία (κάτω).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. Συμπεράσματα

Μέσα από την ως τώρα καταγραφή των βημάτων της Συμβολομετρικής διαδικασίας, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυπταν από κάθε στάδιο χωριστά αλλά και από την παρουσίαση και αξιολόγηση του τελικού παραγόμενου, έχουν ήδη επισημανθεί τα βασικότερα πορίσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της Συμβολομετρίας στη μελέτη και την παρατήρηση των μετακινήσεων/ παραμορφώσεων του αναγλύφου σε ενεργούς χώρους υποδοχής απορριμμάτων.

Ωστόσο, κλείνοντας τη μελέτη αυτή, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια συγκεντρωτική καταγραφή των συμπερασμάτων που θα εστιάζει πρώτα στα ειδικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της εφαρμογής και εν συνεχεία σε κάποια γενικότερα συμπεράσματα που έχουν να κάνουν με τη μεθοδολογία.

Η μελέτη των μετακινήσεων/ παραμορφώσεων του αναγλύφου στην ΟΕΔΑ Δυτικής Αττικής πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της Συμβολομετρίας σε εικόνες ραντάρ ENVISAT ASAR για τη χρονική περίοδο Ιανουάριος 2003 – Φεβρουάριος 2005. Οι εικόνες που συνέθεσαν τα οκτώ συμβολομετρικά ζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή είχαν χρονική απόκλιση από 1 μήνα έως και 18 μήνες. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής προκύπτουν τα ακόλουθα πορίσματα:

1. Τα εκτιμώμενα υψόμετρα της περιοχής που προέκυψαν από τα παραγόμενα DEM συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν με τη χρήση τριών Τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψαν υψομετρικές αποκλίσεις με βάση τις οποίες υπολογίστηκε ένα μέσο σφάλμα εκτίμησης του υψομέτρου ανά set. Για τα set 3 (Ιανουάριος 2003 - Δεκέμβριος 2003), 5 (Ιουλιος 2003 - Μάιος 2004) και 6 (Ιανουάριος 2003 - Ιανουάριος 2004) το σφάλμα κυμάνθηκε από 2-6μ περίπου. Ωστόσο, ακόμα και τα set με υψηλό σφάλμα, της τάξης των 40μ, όπως τα set 2 (Ιανουάριος 2004 - Φεβρουάριος 2005) & 4 (Ιανουάριος 2004 - Απρίλιος 2004) μαρτυρούσαν την ύπαρξη έντονης παρέμβασης, στο ανάγλυφο του χώρου, με σημαντικές επιχώσεις αλλά και εκσκαφές ή μετακινήσεις στους ΧΥΤΑ και στον ΧΑΔΑ.
2. Από όλα τα συμβολομετρικά ζεύγη έχει αποδοθεί σωστά η μορφολογία του αναγλύφου εξ΄αιτίας της μετακίνησης/ παραμόρφωσης. Δηλαδή, έχουν αποδοθεί τα υψηλότερα υψομετρικά σημεία (κορυφές) εκεί που υπάρχουν, βάσει επίγειων

δεδομένων, τα πλατώ των απορριμματικών αναγλύφων και αντίστοιχα τα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία εκεί που τα απορριμματικά ανάγλυφα καταλήγουν στο φυσικό έδαφος. Έχουν αποδοθεί οι κορυφές και τα κοίλα καθώς και η διεύθυνση πλήρωσης των λεκανών των ΧΥΤΑ. Για παράδειγμα στο ΧΥΤΑ ΙΙ που βρισκόταν σε διαδικασία πλήρωσης κατά την περίοδο 2003-2005 που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη,φαίνεται ότι η πλήρωση έχει γίνει από τα κατάντη Βορειοδυτικά προς τα ανάντη Νοτιοανατολικά, όπως επιβεβαιώνουν και τα στοιχεία πεδίου.

3. Η εξέλιξη των υψομετρικών παραμορφώσεων/ μετακινήσεων συνάδει με το χρονικό διάστημα στο οποίο αντιστοιχούν. Χαρακτηριστικά υπενθυμίζουμε το παράδειγμα με την καταγραφή της αύξησης του απορριμματικού ύψους του ΧΥΤΑ ΙΙ (υπενθυμίζουμε ότι η πλήρωση του ΧΥΤΑ ΙΙ βρισκόταν σε εξέλιξη κατά την περίοδο 2003-2005 που εξετάζεται), κατά 15μ από τον Ιανουάριο του 2003 στον Ιούλιο 2003 (Πίνακας 9). Η αύξηση αυτή κρίνεται μεγάλη για ένα χρονικό διάστημα 6-7 μηνών και δυστυχώς δεν κατέστη δυνατό να διασταυρωθεί από δεδομένα πεδίου. Ωστόσο, ακόμα και αν κατά απόλυτη τιμή τα 15μ είναι πολλά, η ανοδική τάση της στάθμης των απορριμμάτων με την πάροδο του χρόνου αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση της μεθόδου.

4. Οι υψομετρικές παραμορφώσεις/ μετακινήσεις είναι απόλυτα συναφείς με τη χρονική περίοδο που αντιστοιχούν. Το «μέσο» DEM που προέκυψε από εικόνες στο διάστημα Ιανουάριος 2003- Ιανουάριος 2004 δεν εμφάνιζε παραμόρφωση στη θέση του ΧΥΤΑ Φυλής Ι γιατί δεν είχε κατασκευαστεί ακόμη. Αντιθέτως, στο «μέσο» DEM που προέκυψε από εικόνες στο διάστημα Ιανουάριος 2003- Φεβρουάριος 2005 εμφάνιζε παραμόρφωση στη θέση του ΧΥΤΑ Φυλής Ι καθώς τότε βρισκόταν υπό κατασκευή.

Από την ολοκλήρωση της εφαρμογής προκύπτουν και οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα των εκτιμώμενων μετακινήσεων/ παραμορφώσεων:

1. <u>Η χωρική ανάλυση του DEM αναφοράς:</u> προτιμάται ένα τοπικό DEM αναφοράς καλής χωρικής ανάλυσης. Ένα DEM που έχει προκύψει από ψηφιοποίηση (όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε εδώ) σίγουρα δεν μπορεί να προσομοιώσει το ανάγλυφο τόσο καλά όσο μια δορυφορική απεικόνιση. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εφαρμογή τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα δεν είχαν την απαιτούμενη χωρική ανάλυση με αποτέλεσμα να δίνουν μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αντιθέτως, το DEM που προήλθε από ψηφιοποίηση παρείχε δεδομένα ακρίβειας λίγων μέτρων.

2. <u>Η μεταβολή της σύνθεσης της ατμόσφαιρας στις ημερομηνίες λήψης:</u> η αντιστάθμιση της επίδρασης της ατμόσφαιρας για τη συγκεκριμένη τοποθεσία απαιτεί, όπως προαναφέρθηκε (§3.1), τη χρήση τουλάχιστον οκτώ ζευγών εικόνων.

Τα συμβολομετρικά ζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ήταν οκτώ, οπότε οριακά αντισταθμίζουν τα ατμοσφαιιρικά σφάλματα. Πιθανότατα η χρήση περισσότερων εικόνων και από διαφορετικούς δέκτες να έδινε αρκετά ακριβέστερα αποτελέσματα.

3. Η σωστή επιλογή συμβολομετρικών ζευγών: Η τιμή του διανύσματος βάσης, λαμβάνοντας υπόψη τα τροχιακά δεδομένα θα πρέπει να είναι μικρή (περίπου το 1/8 της κρίσιμης) και το συμβολόγραμμα θα πρέπει να έχει ευκρινείς κροσσούς. Αυτές οι δυο παράμετροι δίνουν μια πρώτη αλλά αρκετά ξεκάθαρη εικόνα για την καταλληλότητα ή μη ενός ζεύγους και καθιστούν προφανές το αν υπάρχει ή όχι λόγος να ακολουθηθούν τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας μέχρι τέλους (οικονομία χρόνου).

4. Η χρονική διαφορά των εικόνων: σε γενικές γραμμές η αύξηση της χρονικής απόκλισης επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του παραγόμενου DEM. Ωστόσο, αυτό είναι μια παράμετρος σχετική γιατί στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η Διαφορική συμβολομετρία για την παρακολούθηση της εξέλιξης του αναγλύφου σε ΧΥΤΑ, εικόνες με μικρή χρονική αποσυσχέτιση (ημερών ή εβδομάδων) δεν μπορούν να αποδώσουν ουσιαστική πληροφορία. Στην παρούσα εφαρμογή τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από set με εικόνες που είχαν χρονική απόκλιση ενός περίπου έτους.

5. Η συνάφεια του συμβολομετρικού ζεύγους: όσο καλύτερη είναι η τιμή της τόσο ακριβέστερο είναι και το παραγόμενο DEM. Προφανώς, αναφερόμαστε στην περιβάλλουσα έκταση εφόσον στην περιοχή που εξετάζεται η μετακίνηση κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύει.

6. Η σωστή επιλογή gcpoints: επηράζει σημαντικά τον επανϋπολογισμό της τροχιάς του δορυφόρου και άρα των τιμών υψομέτρου που θα αποδοθούν στο έδαφος. Θα πρέπει να επιλέγονται σε περιοχές με πολύ υψηλή συνάφεια (>0,8).

7. Η συνέπεια με την οποία εκτελούνται όλα τα βήματα της Συμβολομετρικής διαδικασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8. Βιβλιογραφία και Αναφορές

8.1 Βιβλιογραφία

Β. ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΗ, *Ραδιομετρία και Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση*, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.

Δ. ΑΡΓΙΑΛΑΣ, *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση*, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1998.

Δ. ΡΟΚΟΣ, *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2005.

Χ. ΒΡΑΔΗΣ - Μετάφραση, Γ. ΚΑΡΡΑΣ & Ε. ΠΕΤΣΑ – Επιμέλεια & Σχόλια, *Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας* – The fundamentals of Digital Photogrammetry – ISM International Systemap Corporation, 2000.

SARMAP. *Synthetic Aperture Radar and SARscape*. Guidebook,2009

ENVIROPLAN, Κ. ΚΑΜΠΟΣΙΩΡΑ, Ε. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. ΖΑΡΚΑΔΟΥΛΑ, Θ. ΛΩΛΟΣ. *Τοπογραφική Μελέτη για το έργο «Αρχιτεκτονική, Λειτουργική, Κυκλοφοριακή, Αντιπλημμυρική και λοιπή διασύνδεση και διαμόρφωση των εγκαταστάσεων της Ο.Ε.Δ.Α. Δ.Αττικής»,* 2003.

D. CARRASSO DIAZ. *SAR interferometry for digital elevation model generation and applications,* Διαδακτορική διατριβή, Universita Politecnica de Catalunya, Βαερκελώνη, 1998

8.2 Επιστημονικές Έρευνες

Ι. ΠΑΡΧΑΡΙΔΗΣ. *Χαρτογράφηση της εδαφικής παραμόρφωσης στην περιοχή του Νομού Ηλείας με τη χρήση της Διαφορικής Συμβολομετρίας από δορυφόρους Ραντάρ,* Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Γεωγραφίας, 2009.

Κ.ΚΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ, Ν. ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΑΚΗΣ. *Εφαρμογές του λογισμικού ArcGIS 9x με απλά λόγια,* Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2005

A. SAQELLARI-LIKOKA, V. KARATHANASSI . *An approach for solving rank-deficient systems that enable atmospheric path delay and water vapour content*

estimation", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No 10, pp. 3187-3195, 2008

G. SUN, K.J. RANSON, V.I. KHARUK, K. KOVACS]. *Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter*. Remote Sensing of Environment 88 401–411, 2003.

I. KOTSIS, C. KONTOES, D. PARADISSIS, S. KARAMITSOS, P. ELIAS, I. PAPOUTSIS. *A Methodology to Validate the InSAR Derived Displacement Field of the September 7th, 1999 Athens Earthquake Using Terrestrial Surveying. Improvement of the Assessed Deformation Field by Interferometric Stacking.* Sensors, 4119-4134 DOI: 10.3390/s8074119, 2008.

I. PARCHARIDIS, S.KOKKALAS, I.FOUNTOULIS, M. FOUMELIS. *Detection and Monitoring of Active Faults in Urban Environments: Time Series Interferometry on the Cities of Patras and Pyrgos (Peloponnese, Greece).* Remote Sensing, 1, 676-696 doi:10.3390/rs1040676, 2009

J. NICOLL, *Making a case for full-polarimetric radar remote sensing,* Alaska Satellite Facility, University of Alaska Fairbanks

J.W. KIM, Z. L.HYONGKI, C.K. SHUM, C.M. SWARZENSKI, T.W. DOYLE, S.HO BAEK. *Integrated analysis of PALSAR/Radarsat-1 InSAR and ENVISAT altimeter data for mapping of absolute water level changes in Louisiana wetlands*. Remote Sensing of Environment 113 2356–2365, 2009.

K. ELDHUSET, P. H. ANDERSEN, S. HAUGE, E. ISAKSSON and D. J. WEYDAHL. *ERS tandem InSAR processing for DEM generation, glacier motion estimation and coherence analysis on Svalbard*. International Journal of remote sensing VOL. 24, NO. 7, 1415–1437, 2003
URL: http://dx.doi.org/10.1080/01431160210153039

K. RAO, H. AL-JASSAR, S. PHALKE, Y. RAO, J. MULLER, Z. LI. *A study on the applicability of repeat-pass SAR interferometry for generating DEMs over several Indian test sites,* International Journal of Remote Sensing Vol. 27, No. 3, 10 February 2006.

M. CROSETTO. *Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation*. Journal Photogrammetry & Remote Sensing 57 213– 227, 2002.

N.d'OZOUVILLE, B. DEFFONTAINES, J.BENVENISTE, U. WEGMULLER, S. VIOLETTE, G.de MARCILY. *DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos*. Remote Sensing of Environment 112 4131-4147, 2008

O. HELLWICH, H. EBNER. *Geocoding SAR interferograms by least squares adjustment*. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 55 277–288, 2000.

O. STEBLER, E. MEIER, D. NUESCH. *Multi-baseline polarimetric SAR interferometry - first experimental spaceborne and airborne results,* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (P&RS), 56(3):149-166, 2002.

O. SYKIOTI, C. KONTOES, P. ELIAS, P. BRIOLE, M. SACHPAZI, D. PARADISSIS, I. KOTSIS. *Ground deformation at Nisyros volcano (Greece) detected by ERS-2 SAR differential interferometry,* International Journal of Remote Sensing Vol. 24, No. 1, 2003.

P. GAMBA, F. DELL 'ACQUA, B. HOUSHMAND], [U. STILLA, U. SOERGAL, U. THOENNESSEN. *Comparison and fusion of LIDAR and InSAR digital elevation models over urban areas*. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, VOL. 24, NO. 22, 4289–4300, 2003.
URL: http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000096005

P. HYDE, R. DUBAYAH, W.WALKER, J. B. BLAIR, M. HOFTON, C. HUNSAKER. *Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy.* Remote Sensing of Environment 102 63–73, 2006.

S.-H. HONG, S. WDOWINSKI , S.-W. KIM, J.-S. WON. *Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR).* Remote Sensing of Environment 114 2436–2447, 2010.

S. STRAMONDO, M. MORO, F. DOUMAZ ,F. CINTI. *The 26 December 2003, Bam, Iran earthquake: surface displacement from Envisat ASAR interferometry*. International Journal of Remote Sensing Vol. 26, No. 5, 10 March 2005.

T. TOUTIN, L. GRAY. *State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data.* Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 55 13–33, 2000.

U. STILLA, U. SOERGAL, U. THOENNESSEN. *Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas*. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58 113– 123, 2003.

ZHONG LU, JIN-WOO KIM, HYONGKI LEE,C. K. SHUM, JIANBIN DUAN, MOTOMU IBARAKI, ORHAN AKYILMAZ, AND CHUNG-HYE. *Helmand River Hydrologic Studies Using ALOS PALSAR InSAR and ENVISAT Altimetry*. Marine Geodesy Marine Geodesy, 32:320–333, DOI: 10.1080/01490410903094833, 2009.
URL: http://dx.doi.org/10.1080/01490410903094833

Z.W. LI, X.L. DING, C. HUANG, J.J. ZHU, Y.L. CHEN. *Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter*. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 63 621–634, 2008.