



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

ΔΠΜΣ "Γεωπληροφορική"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Ανίχνευση μεταβολών από διαχρονικά οπτικά δεδομένα
Landsat-8 και απεικονίσεις SAR Sentinel-1A, στην περιοχή
του μεταλλείου των Σκουριών***

Αθανασοπούλου Ελένη

Αθήνα, Ιούλιος 2016



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY
LABORATORY OF REMOTE SENSING

MASTER IN "Geoinformatics"

MASTER THESIS

***Change detection from multitemporal optical data Landsat-8 and
SAR Sentinel-1A data at the Skouries mining site in Greece***

Athanasopoulou Eleni

Athens, July 2016



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

ΔΠΜΣ "Γεωπληροφορική"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Ανίχνευση μεταβολών από διαχρονικά οπτικά δεδομένα
Landsat-8 και απεικονίσεις SAR Sentinel-1A, στην περιοχή
του μεταλλείου των Σκουριών***

Αθανασοπούλου Ελένη

.....
Καράντζαλος Κωνσταντίνος
Επιβλέπων

.....
Αργιαλάς Δημήτρης

.....
Βασιλεία Καραθανάση

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Κ. Καρατζάλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Ευχαριστώ από καρδιάς τη φίλη μου Αλεξάνδρα για τη συμπαράσταση, τη βοήθεια και την υποστήριξη της, καθώς δεν έλειψε στιγμή σε όλη τη διαδικασία από την ανάθεση μέχρι και την παρουσίαση της μεταπτυχιακής και η δουλεία που έγινε οφείλεται και σε εκείνη. Επίσης, ευχαριστώ τον Κλεάνθη και το Θανάση για την ανεκτίμητη συνεισφορά τους, την πρακτική βοήθεια και τις γνώσεις που μου πρόσφεραν απλόχερα. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερω το Θωμά και τον αδερφό μου, Νίκο, που ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή τη διαδρομή και με βοήθησαν με ψυχραιμία και προθυμία να αντιμετωπίσω κάθε δυσκολία.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών στην ευρύτερη περιοχή του μεταλλείου των Σκουριών, Χαλκιδικής, με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR) σε ζεύγη εικόνων ραντάρ, συνδυαστικά με την εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών (change detection) σε οπτικές εικόνες.

Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δώδεκα SLC εικόνες Sentinel – 1A (S1A), για το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου 2014 – Ιανουαρίου 2016, οι οποίες επιλύθηκαν σε ζεύγη με κοινή “master” εικόνα, αυτή του Σεπτεμβρίου 2015, με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντεκα συμβολογραφημάτων, από τα οποία προέκυψαν χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων για την περιοχή μελέτης. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν πέντε αλγόριθμοι ανίχνευσης μεταβολών σε ζεύγη εικόνων Landsat-8 (L8), σε χρονικά διαστήματα αντίστοιχα των ζευγών των εικόνων S1A, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δυαδικών εικόνων μεταβολών, μετά την εφαρμογή κατάλληλων τιμών κατωφλίωσης σε αυτές, που προέκυψαν από μια διαδικασία αξιολόγησης της ακρίβειας, για καθένα αλγόριθμο που εξετάστηκε.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δύο σετ δεδομένων, S1A και L8, μελετήθηκαν για κάθε χρονική περίοδο που εξετάστηκε, για κάποιες υποπεριοχές μελέτης, με κριτήριο την ύπαρξη κατακόρυφης μετακίνησης, την ανίχνευση εποχικών μεταβολών και μεταβολών στο χώρο του μεταλλείου και έγινε η παράθεση των τελικών προϊόντων των δύο μεθοδολογιών.

Από τη συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών, δηλαδή των χαρτών μετακίνησης από τα ζεύγη SLC εικόνων S1A και των δυαδικών εικόνων των μεταβολών από τα ζεύγη εικόνων L8, έγινε κατανοητό ότι η εφαρμογή της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας στην περιοχή του μεταλλείου των Σκουριών, για τα ζεύγη εικόνων που επιλύθηκαν, δεν λειτούργησε όπως αναμενόταν και παρουσίασε αποτελέσματα, αμφίβολης αξιοπιστίας, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών που κρίθηκαν αντιπροσωπευτικά των μεταβολών, τόσο των εποχικών όσο και αυτών που οφείλονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες. Παρ' όλα αυτά εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για τη δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας των προϊόντων που προκύπτουν από την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας σε εδάφη με έντονο ανάγλυφο, που παρουσιάζουν εποχικές μεταβολές και σταδιακές παραμορφώσεις, όπως στο μεταλλείο των Σκουριών.

Abstract

In this thesis, change detection methods were studied based on both DInSAR in radar data and detection algorithms in optical images at the greater mining region at Skouries, Greece. In particular, the multitemporal dataset included twelve Sentinel1-1A (S1A) SLC images for the time period between October 2014 and January 2016. These multitemporal images were all processed, with a common master image the one of September 2015, resulting in the creation of eleven interferograms from which vertical displacement maps were produced. Furthermore five change detection algorithms were applied in Landsat-8 (L8) image pairs for the corresponding time periods. The outcome was binary images with the detected changes which were evaluated from manually collected ground truth data.

Moreover, based on the regions that most significant vertical changes have been detected, a joint analysis with the detected 2D changes from the Landsat 8 data was performed. Experimental results are presented and discussed.

Based on the performed experiments, evaluation and the comparison between the extracted vertical displacement from the S1A and the detected 2D changes from L8, it is clear that the application of DInSAR for the given area of study and the specific image pairs, didn't work as expected, presenting results of ambiguous quality. On the other hand, the change detection procedure at the optical data indicated promising results regarding both the seasonal changes and those due to the mining activity. Nevertheless, important conclusions were also discussed regarding the DInSAR procedures for applications in high relief areas like the Skouries test region.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	
Abstract.....	
1. Εισαγωγή.....	1
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	5
2.1. Ανίχνευση μεταβολών και Συμβολομετρία απεικονίσεων SAR.....	5
2.1.1. Βασικά βήματα Συμβολομετρικής διαδικασίας.....	8
2.1.2. Διαφορική Συμβολομετρία.....	15
2.1.3. Πηγές σφαλμάτων στη Συμβολομετρία.....	15
2.1.4. Συμβολομετρία με χρήση δεδομένων Sentinel-1A TOPS-mode.....	18
2.2.5. Διαφορική Συμβολομετρία σε μεταλλεία	23
2.2. Ανίχνευση μεταβολών σε οπτικά δεδομένα και συνδυαστικές μέθοδοι.....	27
2.2.1 Ανίχνευση μεταβολών σε μεταλλεία από οπτικά δεδομένα.....	27
2.2.2. Προχωρημένες μέθοδοι Συμβολομετρίας σε μεταλλεία	28
2.2.3. Συνδυαστικές μέθοδοι οπτικών και SAR δεδομένων.....	34
3. Διαφορική Συμβολομετρία για ανίχνευση μεταβολών στο μεταλλείο των Σκουριών	39
3.1. Περιοχή μελέτης.....	39
3.2. Δεδομένα.....	40
3.3. Υλοποίηση μεθοδολογίας και επεξεργασία δεδομένων	41
3.3.1. Συμπροσαρμογή των εικόνων του ζεύγους.....	42
3.3.2. Αναγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους στη ραντάρ γεωμετρία.....	45
3.3.3. Προσομοίωση της αποκατεστημένης φάσης της τοπογραφίας.....	48
3.3.4. Δημιουργία διαφορικού συμβολογραφήματος.....	49
3.3.5. Ραφινάρισμα – Φιλτράρισμα διαφορικού συμβολογραφήματος.....	50
3.3.6. Αποκατάσταση φάσης διαφορικού συμβολογραφήματος.....	51
3.3.7. Δημιουργία χάρτη μετακίνησης.....	52
3.3.8. Γεωκωδικοποίηση χάρτη μετακίνησης.....	52
3.3.9. Τεχνική Stacking Συμβολογραφημάτων.....	52
4. Ανίχνευση μεταβολών από οπτικά δορυφορικά δεδομένα στο μεταλλείο των Σκουριών.....	53
4.1 Δεδομένα.....	53
4.2. Αλγόριθμοι ανίχνευσης μεταβολών στο ENVI.....	53
4.3. Διαφορά φασματικών γωνιών εικόνων.....	55
4.4. Διαφορά δεικτών NDVI.....	56
4.5. Αλγόριθμος μετασχηματισμού PCA.....	57
4.6. Αλγόριθμος μετασχηματισμού MNF.....	58
4.7. Αλγόριθμος μετασχηματισμού ICA.....	59
4.8. Εύρεση κατάλληλου κατωφλίου για την απόδοση των μεταβολών.....	60
5. Αποτελέσματα.....	61
5.1. Χρονική περίοδος : Αύγουστος 2014 - Σεπτέμβριος 2015.....	63
5.1.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A.....	63
5.1.2. Αποτελέσματα από Landsat-8.....	70
5.1.3. Αξιολόγηση αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών για ζεύγος εικόνων Landsat-8.....	81
5.2. Χρονική περίοδος : Απρίλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015.....	84
5.2.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A.....	84

5.2.2. Αποτελέσματα από Landsat-8.....	86
5.3. Χρονική περίοδος : Ιούλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015.....	95
5.3.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A.....	95
5.3.2. Αποτελέσματα από Landsat-8.....	100
5.4. Χρονική περίοδος : Σεπτέμβριος 2015 – Ιανουάριος 2016.....	103
5.4.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A.....	103
5.4.2. Αποτελέσματα από Landsat-8.....	105
6. Ανάλυση και συζήτηση με βάση τα αποτελέσματα από οπτικά και ραντάρ δεδομένα	111
6.1. Χρονική περίοδος : Αύγουστος 2014 - Σεπτέμβριος 2015.....	111
6.2. Χρονική περίοδος : Απρίλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015.....	114
6.3. Χρονική περίοδος : Ιούλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015.....	116
6.4. Χρονική περίοδος : Σεπτέμβριος 2015 - Ιανουάριος 2016.....	117
7. Συμπεράσματα	119
7.1. Γενικά συμπεράσματα.....	119
7.2. Ανίχνευση μεταβολών στις εικόνες L8.....	119
7.3. Ανίχνευση κατακόρυφων μετακινήσεων στις εικόνες S1A.....	120
Βιβλιογραφία	123
Παράρτημα	127

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Γεωμετρία λήψης δύο απεικονίσεων SAR στην ίδια περιοχή μελέτης.....	5
Εικόνα 2: Συμβολογράφημα (esa.com).....	6
Εικόνα 3: Όρος “επίπεδης γης” (A High Accurate Approach for InSAR Flat Earth Effect Removal, Shurong Peng, 2009).....	9
Εικόνα 4: Βάση λήψης Β συμβολομετρικού ζεύγους.....	13
Εικόνα 5: Γεωμετρία και λειτουργίες λήψης SAR Sentinel-1A (Potin et al., 2014).....	18
Εικόνα 6: Λειτουργία λήψης TOPSAR Sentinel-1A ((Geudtner et al., 2014).....	19
Εικόνα 7: Ράμπες φάσης στη διεύθυνση του αζιμουθίου λόγω χρονικής καθυστέρησης μεταξύ δύο λήψεων (R.Grandin, 2015).....	20
Εικόνα 8: Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Google Earth).....	37
Εικόνα 9: περιοχή μελέτης του μεταλλείου των Σκουριών (Google Earth).....	38
Εικόνα 10: Εικόνα έντασης multilooked (MLI) για την ημερομηνία 19/09/2015.....	41
Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής διαδικασίας γεωκωδικοποίησης στο GAMMA.....	44
Εικόνα 12: Προσομοιωμένη εικόνα έντασης από το Ψ.Μ.Ε SRTM 1arcsec, σε UTM 34N.....	45
Εικόνα 13: Προσομοιωμένη εικόνα έντασης από το Ψ.Μ.Ε SRTM 1arcsec, στη ραντάρ γεωμετρία.....	45
Εικόνα 14: SRTM 1arcsec, στη γεωμετρία του ραντάρ.....	46
Εικόνα 15: Διαφορικό Συμβολογράφημα, με swaths IW1, IW2, IW3, μετά την αφαίρεση της τοπογραφίας.....	47
Εικόνα 16: Φιλτραρισμένο διαφορικό συμβολογράφημα με προσαρμοσμένο φίλτρο Goldstein, IW2 swath.....	48
Εικόνα 17: Συνάφεια συμβολομετρικού ζεύγους μετά την εφαρμογή φίλτρου στο διαφορικό συμβολογράφημα (IW1,IW2,IW3 swaths).....	48
Εικόνα 18: Αποκατεστημένη φάση διαφορικού συμβολογραφήματος.....	49
Εικόνα 19: Ενδεικτικός χάρτης μετακίνησης για ένα συμβολομετρικό ζεύγος για το swath IW2.....	50
Εικόνα 20: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26/08/2015 - 23/08/2014.....	53
Εικόνα 21: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26/08/2015 - 23/08/2014.....	54
Εικόνα 22: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014.....	56
Εικόνα 23: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014.....	57
Εικόνα 24: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014.....	58
Εικόνα 25: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014.....	61
Εικόνα 26: Χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων για τα ζεύγη του stack 14 με κοινή Master 19/09/2015.....	62
Εικόνα 27: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το stack 14 με κοινή Master 19/09/2015.....	63
Εικόνα 28: Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων των κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος 19/09/2015 – 18/10/2014.....	64

Εικόνα 29: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014.....	65
Εικόνα 30: Συνάφεια για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, μεγαλύτερη από 0.60.....	66
Εικόνα 31: Κλίσεις για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, μικρότερες από 10%.....	66
Εικόνα 32: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, για συνάφεια μεγαλύτερη από 0.60 και κλίσεις μικρότερες από 10%.....	66
Εικόνες 33: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, για το μεταλλείο των Σκουριών.....	67
Εικόνα 34: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	69
Εικόνα 35: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης.....	69
Εικόνα 36: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	70
Εικόνα 37: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης.....	70
Εικόνα 38: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	70
Εικόνα 39: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	70
Εικόνα 40: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	71
Εικόνα 41: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης.....	71
Εικόνα 42: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	72
Εικόνα 43: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	72
Εικόνα 44: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	72
Εικόνα 45: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	72
Εικόνα 46: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	73
Εικόνα 47: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	73
Εικόνα 48: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	73
Εικόνα 49: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	73
Εικόνα 50: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	74
Εικόνα 51: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	74
Εικόνα 52: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	75
Εικόνα 53: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	75
Εικόνα 54: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	75
Εικόνα 55: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	75
Εικόνα 56: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	76

Εικόνα 57: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	76
Εικόνα 58: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	76
Εικόνα 59: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	76
Εικόνα 60: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	77
Εικόνα 61: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	77
Εικόνα 62: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	77
Εικόνα 63: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	77
Εικόνα 64: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	78
Εικόνα 65: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	78
Εικόνα 66: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	78
Εικόνα 67: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	78
Εικόνα 68: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	79
Εικόνα 69: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση.....	79
Εικόνα 70: Δεδομένα ελέγχου, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	80
Εικόνα 71: Δυαδική εικόνα, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης στο έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	80
Εικόνα 72: True Positive, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	81
Εικόνα 73: False Positive, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	81
Εικόνα 74: False Negative, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014.....	81
Εικόνα 75: Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων τιμών κατακόρυφης μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 - 28/04/2015.....	82
Εικόνα 76: Χάρτης τιμών κατακόρυφης μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 - 28/04/2015.....	83
Εικόνα 77: Διαφορά δεικτών NDVI το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015.....	85
Εικόνα 78: Διαφορά δεικτών NDVI το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	85
Εικόνα 79: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015.....	85
Εικόνα 80: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	85
Εικόνα 81: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015.....	86
Εικόνα 82: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	86
Εικόνα 83: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015.....	86
Εικόνα 84: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	86
Εικόνα 85: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015.....	87
Εικόνα 86: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την	

κατωφλίωση.....	87
Εικόνα 87: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	87
Εικόνα 88: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	87
Εικόνα 89: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	88
Εικόνα 90: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	88
Εικόνα 91: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	89
Εικόνα 92: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	89
Εικόνα 93: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	89
Εικόνα 94: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	89
Εικόνα 95: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	90
Εικόνα 96: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	90
Εικόνα 97: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	90
Εικόνα 98: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	90
Εικόνα 99: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	91
Εικόνα 100: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	91
Εικόνα 101: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	91
Εικόνα 102: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	91
Εικόνα 103: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015.....	92
Εικόνα 104: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση.....	92
Εικόνα 105: Χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων για τα ζεύγη εικόνων του 2015 με κοινή Master 19/09/2015.....	93
Εικόνα 106: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων, όπως προέκυψε για τα ζεύγη του 2015 με κοινή Master 19/09/2015.....	94
Εικόνα 107: Ιστόγραμμα 20150919-20151001.....	95
Εικόνα 108: Ιστόγραμμα 20150919-20141028.....	95
Εικόνα 109: Ιστόγραμμα 20150919-20141028, μετά την αφαίρεση του 20150919-20151001.....	96
Εικόνα 110: Χάρτης μετακινήσεων για το ζεύγος 20150919-20141028, όπως προέκυψε μετά την αφαίρεση του ζεύγους 20150919-20151001.....	97
Εικόνα 111: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015.....	98
Εικόνα 112: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση.....	98
Εικόνα 113: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015.....	99
Εικόνα 114: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση.....	99
Εικόνα 115: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015.....	100
Εικόνα 116: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση.....	100

Εικόνα 117: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015.....	100
Εικόνα 118: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση.....	100
Εικόνα 119: Ιστόγραμμα 20150919-20160105.....	101
Εικόνα 120: Χάρτης μετακινήσεων για το ζεύγος 20150919-20160105.....	102
Εικόνα 121: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	104
Εικόνα 122: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	104
Εικόνα 123: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	104
Εικόνα 124: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	104
Εικόνα 125: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	105
Εικόνα 126: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	105
Εικόνα 127: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	106
Εικόνα 128: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	106
Εικόνα 129: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	106
Εικόνα 130: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	106
Εικόνα 131: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016.....	107
Εικόνα 132: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση.....	107
Εικόνα 133: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014.....	109
Εικόνα 134: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης.....	109
Εικόνα 135: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών.....	110
Εικόνα 136: Συνάφεια για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών.....	111
Εικόνα 137: Κλίσεις για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών.....	111
Εικόνα 138: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015.....	112
Εικόνα 139: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση.....	112
Εικόνα 140: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015.....	113
Εικόνα 141: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση.....	113
Εικόνα 142: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015.....	113
Εικόνα 143: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση.....	113
Εικόνα 144: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την	

κατωφλίωση.....	114
Εικόνα 145: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση.....	114
Εικόνα 146: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 09/07/2015	114
Εικόνα 147: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 – 25/07/2015, μετά την κατωφλίωση.....	114
Εικόνα 148: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 05/01/2016	115
Εικόνα 149: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015 – 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση.....	115

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι λειτουργιών λήψης SAR Sentinel-1A (Geudtner et al., 2014).....	18
Πίνακας 2: Εικόνες SLC που επιλέχθηκαν προς επίλυση.....	39
Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για τα ζεύγη του stack 14.....	62
Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία για τις θετικές και αρνητικές τιμές μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 – 28/04/2015.....	83
Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για τα ζεύγη του stack 14.....	93
Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για το ζεύγος 20150919-20141028.....	97
Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για το ζεύγος 20150919-20160105.....	102

1. Εισαγωγή

Η παρατήρηση της γης από το διάστημα και η μελέτη της γήινης επιφάνειας από τις δορυφορικές απεικονίσεις παρουσιάζουν σύγχρονο και ιδιαίτερο ενδιαφέρον, για την επιστήμη της Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης. Μια πτυχή της εφαρμοσμένης και επιστημονικής παρατήρησης της γήινης επιφάνειας, αφορά στη μελέτη των μεταβολών που συμβαίνουν σε αυτή και περιλαμβάνει την αναγνώριση των περιοχών που υπόκεινται σε μεταβολές, την εκτίμηση του μεγέθους και της έντασης παραμορφώσεων, αλλά και τον χαρακτηρισμό τους ως προς τη χρονική τους διάρκεια.

Γενικά, οι μεταβολές στο ανάγλυφο είναι δυνατόν να συνδέονται με ενδογενείς διεργασίες, όπως είναι η τεκτονική και ηφαιστειακή δραστηριότητα, επιφανειακές διεργασίες, όπως καθιζήσεις, κατολισθήσεις, λιώσιμο των πάγων, αλλά και ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως άντληση υδάτων και πετρελαίου, εξόρυξη μεταλλευμάτων, αλλά και μια πληθώρα τεχνικών έργων τόσο στη γήινη επιφάνεια όσο και υπογείως. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεταβολών, αν και διαφέρουν στο μηχανισμό και στην προέλευση τους, είναι ότι προκαλούν μεταβολές στο ανάγλυφο, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διάσταση και η μελέτη τους προϋποθέτει μια πολυπαραμετρική και σύνθετη επεξεργασία δεδομένων από διάφορες πηγές και δορυφορικούς δέκτες, τόσο οπτικούς όσο και ραντάρ.

Συγκεκριμένα, για τη μελέτη του αναγλύφου και των μεταβολών που συμβαίνουν σε αυτό, ιδιαίτερα στην κατακόρυφη διάσταση, παρατηρείται συνεχώς αυξανόμενη διάθεση δορυφορικών απεικονίσεων ραντάρ, καθώς και ανάπτυξη μεθοδολογιών και λογισμικών για την επεξεργασία τους. Η βασική μεθοδολογία επεξεργασίας των ραντάρ απεικονίσεων συνοψίζεται στη Συμβολομετρία (Interferometry).

Η δυνατότητα που προσφέρει η Συμβολομετρία απεικονίσεων ραντάρ στη χαρτογράφηση εδαφικών παραμορφώσεων με ακρίβεια της τάξης μερικών εκατοστών, σε μια εκτεταμένη περιοχή μελέτης, έχει επιφέρει ραγδαία εξέλιξη στην ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών που στηρίζονται στις βασικές αρχές της λειτουργίας των ραντάρ και στη μελέτη ολόενα και περισσότερων φαινομένων σε επιστημονικό επίπεδο.

Μια από τις πρώτες επιστημονικές μελέτες, η οποία εισήγαγε και εφάρμοσε τη Συμβολομετρία στην παρατήρηση της γης ήταν αυτή των Massonnet et al. (1993), στην οποία μελετήθηκαν σεισμικές μετακινήσεις στη νότια Καλιφόρνια από τη δημιουργία ενός διαφορικού συμβολογραφήματος. Στη συνέχεια, οι Sandwell και Price (1998) εισήγαγαν την τεχνική του συνδυασμού συμβολογραφημάτων (stacking), με σκοπό την βελτίωση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο και της ποιότητας των συμβολομετρικών προϊόντων (Samsouf et al., 2012). Αργότερα, οι Ferretti et al. (2001) εισήγαγαν τη μεθοδολογία των σταθερών σκεδαστών (persistent scatterers), με την οποία διευρύνθηκε η εφαρμοσιμότητα και η ακρίβεια της Συμβολομετρίας σε περιοχές με πυκνή βλάστηση, εκεί που οι απεικονίσεις υστερούσαν σε συνάφεια και τα συμβολομετρικά προϊόντα ήταν αμφίβολης ακρίβειας. Οι Berardino et al. (2002) και Usai (2003) εισήγαγαν τη μέθοδο μικρών βάσεων (SBAS), με την οποία δημιουργούνται χρονοσειρές εδαφικής παραμόρφωσης, για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων, με την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων σε μεγάλο αριθμό συμβολογραφημάτων της περιοχής που μελετάται. Τέλος, ο Hooper (2008) συνδύασε τις μεθόδους PS και SBAS σε μια ενιαία μεθοδολογία με πολλά πλεονεκτήματα. Σημειώνεται ότι αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να

αναπτύσσονται διάφορες παραλλαγές των βασικών μεθόδων PS και SBAS όπως στις επιστημονικές μελέτες των Samsonov et al. (2011b) και Hu et al. (2012) για τη μελέτη παραμορφώσεων, ακόμα και στις τρεις διαστάσεις, όπως πραγματοποίησαν οι Rocca (2003) Wright et al. (2004).

Παράλληλα με την εξέλιξη ανεπτυγμένων μεθοδολογιών Συμβολομετρίας, πραγματοποιήθηκαν διάφορες δορυφορικές αποστολές, που παράγουν δορυφορικές απεικονίσεις SAR μέτριας έως υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στις αρχές του 1990, ο μόνος δορυφόρος SAR ήταν ο ERS-1 του Ευρωπαϊκού κέντρου διαστήματος (ESA), ενώ στις αρχές του 2000 τέθηκαν σε λειτουργία οι ERS-2 και ENVISAT (ESA), ο RADARSAT-1 (CSA) και ο ALOS (JAXA) (Samsonov et al., 2012). Γύρω στο 2010 λειτούργησαν διάφοροι δορυφόροι SAR (RADARSAT-2, Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X), με πιο πρόσφατη την εκτόξευση του Sentinel-1A (2014).

Από τις διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν στη γήινη επιφάνεια, η μελέτη των μετακινήσεων που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες, αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, με την εφαρμογή της μεθόδου της Διαφορικής Συμβολομετρίας διπλής διέλευσης στο μεταλλείο των Σκουριών, Χαλκιδικής. Η Διαφορική Συμβολομετρία στοχεύει κυρίως στην ανίχνευση και μέτρηση μετακινήσεων μικρής κλίμακας και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα στην ανίχνευση παραμορφώσεων, που οφείλονται σε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, όπως σε περιοχές εξόρυξης μετάλλων, σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους, όπως μετρήσεις GPS και μετρήσεις στο πεδίο. Κάποια από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ότι οι απεικονίσεις SAR προσφέρουν δεδομένα συνεχή, που καλύπτουν μεγάλη έκταση, με πολύ μικρό κόστος ή ακόμα και δωρεάν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή παρακολούθηση των εξορυκτικών παρεμβάσεων, ενώ δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες φωτισμού και την ύπαρξη συννεφοκάλυψης. Έτσι, λοιπόν η Διαφορική Συμβολομετρία αποδεικνύεται ένα χρήσιμο εργαλείο της Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης για τη χωροχρονική μελέτη μετακινήσεων που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες, όπως μελέτησαν, μεταξύ άλλων οι Carnec και Delacourt (2000), οι Wegmuller et al. (2000), οι Ge et al. (2007) και οι Ng et al. (2009), με ακρίβεια της τάξης μερικών χιλιοστών.

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν μερικοί περιορισμοί στην απόδοση της μεθόδου, οι οποίοι συνοψίζονται σε τέσσερα επίπεδα και αφορούν στη χρονική αποσυσχέτιση των σκεδαστών, ειδικά σε περιοχές με υψηλή βλάστηση και εποχικές αλλαγές βλάστησης, στη χωρική αποσυσχέτιση εξαιτίας μεγάλων βάσεων μεταξύ των λήψεων, στην αρνητική επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και στην πολυπλοκότητα της επίλυσης των ασαφειών φάσης, ειδικά σε περιοχές έντονου αναγλύφου και σύνθετων παραμορφώσεων (Ferretti et al., 2000).

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν η ανίχνευση κατακόρυφων μετακινήσεων στην περιοχή των μεταλλείων των Σκουριών με την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας σε απεικονίσεις SAR από το δορυφόρο Sentinel -1A (S1A), σε συνδυασμό με την ανίχνευση μεταβολών από οπτικές εικόνες του δορυφόρου Landsat-8. Τα δεδομένα αυτά, δηλαδή οι απεικονίσεις SAR και οι οπτικές εικόνες είναι μέτριας διακριτικής ικανότητας και είναι διαθέσιμα για δωρεάν λήψη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνδυαστική μελέτη των αποτελεσμάτων που δημιουργήθηκαν από την επεξεργασία των δύο σετ δεδομένων, που οδηγεί σε μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα για τις μεταβολές που υφίστανται στην περιοχή του μεταλλείου, τόσο στην οριζόντια διάσταση (L8) όσο και στην κατακόρυφη (S1A).

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει πέντε ενότητες.

Στην **πρώτη** ενότητα, παραθέτονται βασικά στοιχεία των απεικονίσεων SAR και βασικές αρχές της Συμβολομετρίας, με έμφαση στη Διαφορική Συμβολομετρία και στους περιορισμούς που υφίστανται στην εφαρμογή της.

Στη **δεύτερη** ενότητα, γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση μεταβολών σε περιοχές εξόρυξης μεταλλευμάτων, καθώς και στις ακρίβειες που έχουν επιτευχθεί.

Στην **τρίτη** ενότητα, γίνεται αναλυτική περιγραφή των δεδομένων, της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας, όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό GAMMA και εφαρμόστηκε στις απεικονίσεις S-1, καθώς και περιγραφή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών, όπως εφαρμόστηκαν στις εικόνες L-8, στο λογισμικό ENVI.

Η **τέταρτη** ενότητα περιλαμβάνει την παράθεση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογίες, που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης, καθώς και τις παρατηρήσεις που έγιναν από την ερμηνεία της συνδυαστικής τους μελέτης.

Τέλος, στην **πέμπτη** ενότητα παραθέτονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν και γίνονται κάποιες προτάσεις για τη βελτίωση της εφαρμογής της Διαφορικής Συμβολομετρίας στην περιοχή μελέτης.

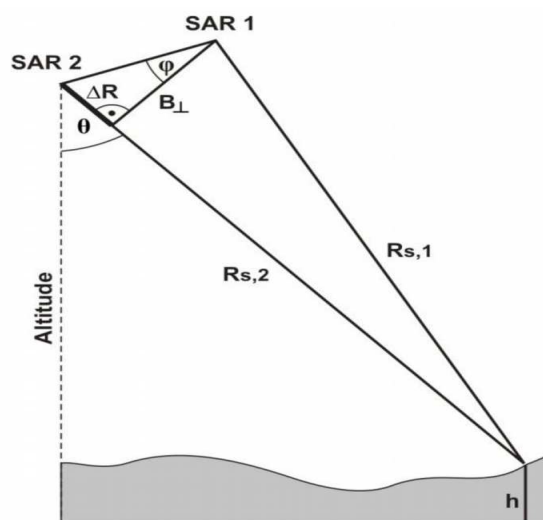
2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Ανίχνευση μεταβολών και Συμβολομετρία απεικονίσεων SAR

Η Συμβολομετρία (Interferometry) είναι η διαδικασία με την οποία γίνεται ο υπολογισμός του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Ψ.Μ.Ε) μιας περιοχής, με τη χρήση απεικονίσεων SAR (Καραθανάση, 2009). Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί διαφορές μορφές της Συμβολομετρίας, που στηρίζονται σε παραλλαγές της βασικής επεξεργασίας των απεικονίσεων SAR, με στόχο τη μελέτη μεταβολών στο ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας, είτε αυτές οφείλονται σε φυσικά είτε σε ανθρωπογενή αίτια, μέσα από το πρίσμα του προσδιορισμού της τρίτης διάστασης, αυτής του υψομέτρου.

Μερικές από τις εφαρμογές των διάφορων μορφών Συμβολομετρίας περιλαμβάνουν, πέρα από τη δημιουργία Ψ.Μ.Ε, την παρακολούθηση μακροπρόθεσμων και βραχυπρόθεσμων τεκτονικών μικρομετακινήσεων, σε σεισμογενείς περιοχές σε χρονικά διαστήματα από μέρες σε έτη, με ακρίβειες της τάξης των μερικών χιλιοστών, αλλά και μεγαλύτερων παραμορφώσεων και καθιζήσεων, της τάξης μερικών εκατοστών, που οφείλονται κυρίως σε τεχνητές παρεμβάσεις στη γήινη επιφάνεια, όπως η εξόρυξη μεταλλευμάτων, η άντληση υδάτων κ.τ.λ, αλλά και σε φυσικά αίτια, όπως εκρήξεις ηφαιστειών.

Η βασική αρχή της Συμβολομετρίας στηρίζεται στη γεωμετρία που σχηματίζουν τα σημεία λήψης δύο απεικονίσεων SAR, της ίδιας περιοχής μελέτης, για διαφορετικές χρονικές στιγμές, με τη γήινη επιφάνεια, σε δύο διαφορετικές θέσεις του δορυφόρου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, έστω SAR1 και SAR2 οι δύο διαφορετικές θέσεις λήψης απεικονίσεων της ίδιας περιοχής και R1 και R2 οι αντίστοιχες αποστάσεις προς τον στόχο στο έδαφος. Η απόσταση B αποτελεί το διάνυσμα βάσης μεταξύ των δύο σημείων λήψης, το οποίο αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μια παράλληλη στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης και μια κάθετη σε αυτή (B_{\perp}).



Εικόνα 8: Γεωμετρία λήψης δύο απεικονίσεων SAR στην ίδια περιοχή μελέτης.

Οι δύο απεικονίσεις SAR της ίδιας περιοχής μελέτης, οι οποίες καλούνται “master” και “slave” αντίστοιχα, περιέχουν δύο επίπεδα πληροφορίας σε κάθε εικονοστοιχείο, με τη μορφή μιγαδικού αριθμού: το μέτρο και τη φάση του κύματος του οπισθοσκεδαζόμενου παλμού του ραντάρ. Έτσι, λοιπόν, για κάθε εικονοστοιχείο, η τιμή είναι η εξής :

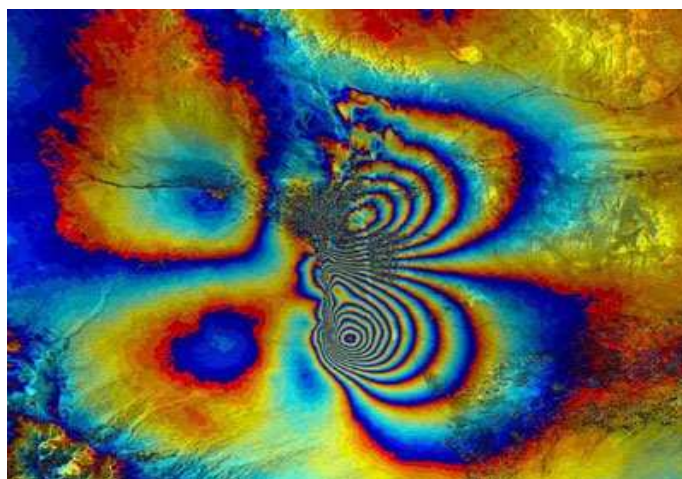
$$z(x, y) = I(x, y) * e^{(i * \phi(x, y))}$$

στην οποία (x, y) είναι οι συντεταγμένες του εικονοστοιχείου, z είναι η μιγαδική τιμή του εικονοστοιχείου, I είναι το πλάτος του σήματος στο σημείο που εκφράζεται από την ένταση του εικονοστοιχείου και ϕ είναι η φάση του ανακλώμενου σήματος από το αντίστοιχο σημείο.

Η πληροφορία της φάσης, είναι δυνατό με κατάλληλη επεξεργασία του ζεύγους των απεικονίσεων, να συσχετιστεί με την απόσταση δορυφόρου-στόχου και να περιγράψει τη γεωμετρία των απεικονίσεων.

Για το λόγο αυτό, δημιουργείται το διάγραμμα των κροσσών συμβολής (interferogram), από τον πολλαπλασιασμό της μιας μιγαδικής απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική της άλλης. Κάθε εικονοστοιχείο του συμβολογραφήματος περιλαμβάνει με τη σειρά του μια μιγαδική τιμή, με πεδίο τιμών $[0, 2\pi)$, που αντιστοιχεί στο γινόμενο του πλάτους και στη διαφορά φάσης των δύο απεικονίσεων, όπως εξηγείται παρακάτω.

Κροσσός συμβολής καλείται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν ίδια τιμή φάσης στην απεικόνιση του συμβολογραφήματος. Κάθε κροσσός συμβολής αντιπροσωπεύει τη διαφορά φάσης του στόχου μεταξύ των δύο απεικονίσεων, η οποία μεταφράζεται σε μετακίνηση της επιφάνειας, από τη “master” λήψη στη “slave”, στην πλάγια διεύθυνση της απόστασης δορυφόρου-στόχου, ίση με το μισό μήκος κύματος του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Δηλαδή, κάθε πλήρης φασματικός κύκλος των χρωμάτων αντιπροσωπεύει πρόσθετα $\lambda/2$ εκατοστά μετακίνησης της επιφάνειας προς την κατεύθυνση του δορυφόρου, για παράδειγμα, σχεδόν 3cm για τον αισθητήρα SAR του δορυφόρου Sentinel-1A, με μήκος κύματος 5.5cm.



Εικόνα 9: Συμβολογράφημα (esa.com)

Η διαφορά φάσης ενός στόχου σε δύο διαφορετικές απεικονίσεις SAR, που έχουν προκύψει από

σημεία λήψης με αποστάσεις R1 και R2, από το στόχο, καλείται συμβολομετρική φάση και είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαφορά των αποστάσεων R1 και R2 των δεκτών-στόχου, όπως φαίνεται στον μαθηματικό τύπο που ακολουθεί :

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4 * \pi * (R1 - R2)}{\lambda} = \frac{4 * \pi * \Delta R}{\lambda}$$

Στη συμβολομετρική φάση φ συνεισφέρουν διάφοροι παράγοντες φάσης, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{orbit} + \varphi_{ion} + \varphi_{tropo} + \varphi_{noise}$$

Στον τύπο αυτό, φ_{flat} είναι όρος “επίπεδη γης” (flat earth), ο οποίος προκύπτει λόγω της οριζοντιογραφικής διαφοράς μεταξύ δύο σημείων του συμβολογραφήματος και αφαιρείται σε συγκεκριμένο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας για να απλοποιήσει την διαδικασία αποκατάστασης της φάσης στο αντίστοιχο στάδιο, όπως εξηγείται παρακάτω. Ο δεύτερος όρος φ_{topo} εκφράζει την επίδραση της τοπογραφίας. Για την εξάλειψή του, στην περίπτωση που δεν ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της τοπογραφίας της περιοχής, δηλαδή η δημιουργία Ψ.Μ.Ε, αλλά η μελέτη του όρου φάσης φ_{defo} που δημιουργείται εξαιτίας των μεταβολών στη γήινη επιφάνεια, χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το οποίο αφαιρείται από ένα συνθετικό συμβολογράφημα που παράγεται από τις δύο απεικονίσεις (Διαφορική Συμβολομετρία), όπως αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

Η επίδραση του όρου φάσης φ_{orbit} είναι δυνατό να μετριάσει λαμβάνοντας υπόψη τροχιακά δεδομένα ακριβείας. Ο όρος φ_{ion} οφείλεται κυρίως στους υδρατμούς και στην πίεση της ατμόσφαιρας, η διαφοροποίηση των οποίων κατά μήκος του μονοπατιού μετάδοσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας, δημιουργούν μεταβολές στη τιμή της φάσης του σήματος (ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα). Επιπλέον, οι όροι φ_{ion} και φ_{tropo} είναι δυνατόν να εξαλειφθούν αν ληφθούν υπόψη συμπληρωματικά δεδομένα από άλλες παρατηρήσεις. Ο τελευταίος όρος φ_{noise} περιλαμβάνει σφάλματα του συστήματος (θερμικός θόρυβος κτλ).

2.1.1. Βασικά βήματα Συμβολομετρικής διαδικασίας

Στην ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη περιγραφή των βασικών βημάτων της Συμβολομετρικής διαδικασίας. Ανάλογα με τη μέθοδο της Συμβολομετρίας που εφαρμόζεται και τις απεικονίσεις που χρησιμοποιούνται τα βήματα αυτά εμφανίζουν κάποιες παραλλαγές, τόσο στις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη, όσο και στη σειρά με την οποία εφαρμόζονται στις απεικονίσεις που επιλέγονται να μελετηθούν. Η διαδικασία της Συμβολομετρίας όπως ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα της μεθοδολογίας που ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Προ-επεξεργασία απεικονίσεων SAR

Το πρώτο βήμα της προ-επεξεργασίας των απεικονίσεων SAR αφορά στην εστίαση των "raw" δεδομένων, κατά πλάτος και αζιμούθιο, με στόχο τη δημιουργία των SLC εικόνων. Σε δεύτερη φάση, οι εικόνες SLC υπόκεινται στη διαδικασία της επεξεργασίας πολλών όψεων, "multi-looking", με στόχο τη βελτίωση της ραδιομετρικής τους ανάλυσης, παράλληλα με τη μείωση του θορύβου, αλλά και την αναπόφευκτη μείωση της διακριτικής τους ικανότητας στη διεύθυνση του αζιμουθίου.

Υπολογισμός διανύσματος βάσης

Στο βήμα αυτό υπολογίζεται για το ζεύγος των απεικονίσεων το διάνυσμα της βάσης, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των δύο διαφορετικών σημείων λήψης των απεικονίσεων, το οποίο αναλύεται στη συνιστώσα που είναι παράλληλη με την απόσταση του δορυφόρου-δεκτή και στην κάθετη αυτής. Ιδιαίτερα η τελευταία συνιστώσα B_{\perp} αποτελεί σημαντικό κριτήριο επιλογής των ζευγών που θα επιλεγθούν για τη διαδικασία της Συμβολομετρίας, καθώς επηρεάζει τη χωρική αποσυσχέτιση των εικόνων του ζεύγους. Μάλιστα μετά την κρίσιμη τιμή της βάσης το ζεύγος των εικόνων οδηγείται σε πλήρη αποσυσχέτιση και έτσι δεν είναι δυνατή η δημιουργία συμβολογραφήματος.

Φασματικό φιλτράρισμα

Το βήμα αυτό, περιλαμβάνει τη φασματική επεξεργασία των δύο απεικονίσεων και συγκεκριμένα, το φιλτράρισμα της φασματικής μετατόπισης (spectral shift) και του κοινού εύρους της συχνότητας Doppler, κατά την πλάγια διεύθυνση και τη διεύθυνση του αζιμουθίου αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι για την δημιουργία συμβολογραφήματος χρησιμοποιείται μόνο η πληροφορία που είναι κοινή στα διαγράμματα φασματικής ανακλαστικότητας και στις δύο απεικονίσεις SAR, καθώς το τμήμα του φάσματος που δεν είναι κοινό, θεωρείται ότι είναι θόρυβος και δυσχεραίνει τη συμπροσαρμογή των εικόνων γι' αυτό και θα πρέπει να φιλτραριστεί. Η μετατόπιση αυτή στο φάσμα μεταξύ των δύο απεικονίσεων οφείλεται στα διαφορετικά σημεία λήψης και στη διαφορετική γωνία πρόσπτωσης και υπολογίζεται από τον τύπο που φαίνεται παρακάτω :

$$\Delta f = \frac{(f * B_{\perp})}{(R * \tan(\theta - \alpha))}$$

Στην περίπτωση που ταυτίζονται οι γωνίες πρόπτωσης, η γραμμή βάσης είναι ίση με το μηδέν, τα δυο φάσματα θα είναι πανομοιότυπα και το διάγραμμα κροσσών συμβολής θα έχει μηδενικές τιμές. Η συμβολομετρική διαδικασία δεν θα είναι δυνατή.

Συμπροσαρμογή ζεύγους απεικονίσεων SAR

Η συμπροσαρμογή του ζεύγους απεικονίσεων που συμμετέχουν στη διαδικασία της Συμβολομετρίας αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο που επηρεάζει την ομαλή έκβαση της διαδικασίας αλλά και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, γι' αυτό και περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Σε γενικές γραμμές, αναφέρεται ότι η διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων της "master" και της "slave" εικόνας, γίνεται σε δύο στάδια και αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία με στόχο την επίτευξη ακρίβειας στη συμπροσαρμογή μικρότερης από 1/8 του εικονοστοιχείου. Στο πρώτο στάδιο, υπολογίζονται χονδρικά, για κάθε εικονοστοιχείο, οι μετατοπίσεις για το μετασχηματισμό της "slave" εικόνας στη γεωμετρία της "master", λαμβάνοντας υπόψη την ετεροσυσχέτιση μεταξύ των δύο απεικονίσεων. Στο δεύτερο στάδιο, γίνεται η αναδειγματοληψία της "slave" εικόνας στη "master" και υπολογίζονται εκ νέου οι μετατοπίσεις, με χρήση μιας πληθώρας αλγορίθμων.

Παραγωγή διαγράμματος κροσσών συμβολής

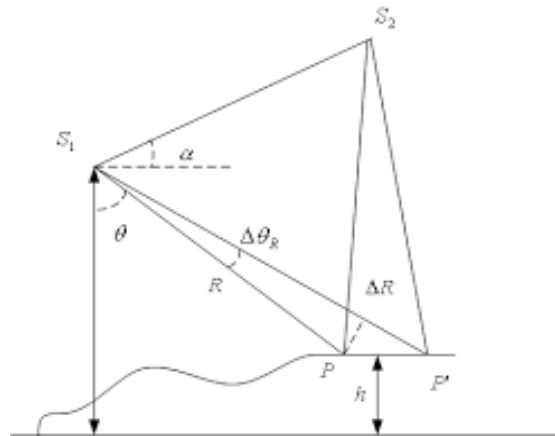
Η δημιουργία του διαγράμματος κροσσών συμβολής προκύπτει με το μιγαδικό πολλαπλασιασμό της μιας απεικόνισης με τη συζυγή της άλλης. Οι γραμμές (κροσσοί) που παρουσιάζονται στο διάγραμμα κροσσών συμβολής, είναι ισοφασικές καμπύλες που λαμβάνουν τιμές στο διάστημα [0, 2π).

Αφαίρεση του όρου επίπεδης γης

Η διαφορά της συμβολομετρικής φάσης μεταξύ δυο σημείων του διαγράμματος κροσσών συμβολής δίνεται από την σχέση :

$$\Delta\varphi_{flat} = \frac{(4\pi * h * B_{\perp})}{(\lambda * \rho * \sin\theta)}$$

Ο όρος αυτός ονομάζεται όρος "επίπεδης γης" και προκύπτει από την οριζοντιογραφική διαφορά μεταξύ δύο σημείων, η οποία δημιουργεί μια γραμμική συμβολομετρική φάση που δεν σχετίζεται με το υψόμετρο και δυσκολεύει την αποκατάσταση της φάσης. Έτσι, λοιπόν, ο όρος «επίπεδης γης» (flat earth) πρέπει να αφαιρείται σε συγκεκριμένο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας, ώστε στο συμβολογράφημα να παραμείνουν οι κροσσοί συμβολής που οφείλονται, ιδανικά, στην τοπογραφία της περιοχής και στις παραμορφώσεις. Με την αφαίρεση αυτή, κατά τη διαδικασία του "flattening", διευκολύνεται η διαδικασία αποκατάστασης της φάσης σε επόμενο στάδιο.



Εικόνα 10: Όρος “επίπεδης γης” (A High Accurate Approach for InSAR Flat Earth Effect Removal, Shurong Peng, 2009)

Φιλτράρισμα του Συμβολογραφήματος

Το φιλτράρισμα του συμβολογραφήματος έχει ως σκοπό την βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών και την μείωση του θορύβου, που προκαλείται από την επίδραση πολλών και διαφορετικών σφαλμάτων, κατά τη διαδικασία της Συμβολομετρίας. Το χωρικό φιλτράρισμα εφαρμόζεται στο συμβολογράφημα βάσει ενός κινούμενου παραθύρου, συγκεκριμένων διαστάσεων, χωρικής ανάλυσης και βαθμού επιρροής στην εικόνα, ώστε να μειωθούν μεν οι κροσσοί που οφείλονται στο θόρυβο, αλλά να διατηρηθούν οι όροι της φάσης που ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες (προσαρμοσμένο φιλτράρισμα).

Δημιουργία εικόνας της συνάφειας

Η συμβολομετρική συσχέτιση ή συνάφεια εκφράζει το βαθμό ομοιότητας μεταξύ των απεικονίσεων του συμβολομετρικού ζεύγους και απορρέει από το βαθμό χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης, σε συνδυασμό με την ύπαρξη θορύβου και άλλων πηγών σφάλματος. Υπολογίζεται από την ετεροσυσχέτιση των απεικονίσεων του συμβολομετρικού ζεύγους και ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης.

$$\gamma = \frac{|\sum g_1(x) * g_2(x)^*|}{\sqrt{(\sum |g_1(x)|)^2 * (\sum |g_2(x)|)^2}}$$

Η συνάφεια ενός συμβολομετρικού ζεύγους μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 δηλώνει την πλήρη αποσυσχέτιση, ενώ το 1, σημαίνει πλήρη συσχέτιση, η οποία είναι αδύνατο να προκύψει.

Το μέγεθος του κινούμενου παραθύρου μέσα στο οποίο υπολογίζεται η τιμή της συνάφειας επηρεάζει την τελική παραγόμενη εκτίμηση της συνάφειας. Η αντιστάθμιση μεταξύ αξιόπιστης εκτίμησης και πολύ υψηλής ανάλυσης παραθύρου υπολογισμού, χρησιμοποιείται η τεχνική της προσαρμοσμένης εκτίμησης της συνάφειας, κατά την οποία αρχικά υπολογίζεται μια αρχική τιμή

συνάφειας και στη συνέχεια πραγματοποιείται συμπληρωματική εκτίμηση με μεγαλύτερο μέγεθος παραθύρου σε περιοχές χαμηλής συνάφειας (Wegmüller et al., 1998).

Αποκατάσταση της φάσης

Κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης, προσδιορίζεται για κάθε εικονοστοιχείο ο ακέραιος αριθμός των κύκλων 2π , που θα πρέπει να προστεθεί στην “τυλιγμένη” φάση με πεδίο τιμών από 0 έως 2π , ώστε να προκύψει για κάθε εικονοστοιχείο η απόλυτη διαφορά φάσης.

$$\varphi_{unwrapped} = \varphi_{wrapped} + n * 2\pi$$

Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν διαδοχικές τιμές φάσης σε όλη την εικόνα, με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχουν άλματα φάσεων μεταξύ διαδοχικών σημείων, δηλαδή $\Delta\varphi < \pi$, και έχει εξαλειφθεί από τα προηγούμενα βήματα ο θόρυβος και οι υπόλοιπες συνιστώσες της φάσης (τοπογραφία, όρος επίπεδης γης κ.λ.π). Παρ' όλα αυτά άλματα φάσης είναι δυνατό να εμφανίζονται σε περιοχές που επηρεάζονται από φαινόμενα αναστροφής και σκίασης και σε αυτές εμφανίζονται τελικά υπόλοιπα φάσης (residual phase).

Σε περιοχές με χαμηλή συνάφεια φάσης και υψηλό θόρυβο, αλλά και έντονο ανάγλυφο, διαδικασία αποκατάστασης της φάσης δυσχεραίνεται και για το λόγο αυτό απαιτούνται εξελιγμένοι αλγόριθμοι αποκατάστασης.

Ακριβής υπολογισμός βάσης

Μετά την αποκατάσταση της φάσης, είναι δυνατό να γίνει ο ακριβής προσδιορισμός της συμβολομετρικής βάσης, λαμβάνοντας υπόψη την αποκατεστημένη φάση σε ένα σημείο γνωστού υψομέτρου, βάση του μαθηματικού τύπου που ακολουθεί :

$$B_{\perp} = \frac{\lambda * R * \sin\theta}{(\varphi_{topo} * 4 * \pi * z)}$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, R η πλάγια απόσταση δορυφόρου – στόχου, δηλαδή του σημείου γνωστού υψομέτρου στο έδαφος και θ , η τοπική γωνία πρόσπτωσης.

Μετατροπή της Φάσης σε Υψόμετρο

Μετά την αποκατάσταση της φάσης, είναι δυνατό να γίνει η μετατροπή της φάσης αυτής σε υψόμετρο. Για να γίνει αυτό απαιτείται η ύπαρξη ενός σημείου γνωστών συντεταγμένων στο έδαφος, ώστε να μετατραπεί η φάση σε απόλυτο υψόμετρο.

Η μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο πραγματοποιείται βάσει της σχέσης που ακολουθεί:

$$\Delta\varphi = \frac{(4 \pi * \Delta h * B_{\perp})}{(\lambda * R * \sin\theta)}$$

Στη μετατροπή αυτή γίνεται η θεώρηση ότι η γη είναι επίπεδη, οπότε ακόμα και αν ο υπολογισμός

των συντελεστών της κάθετης βάσης B_{\perp} , της πλάγιας απόστασης R και της γωνίας πρόσπτωσης θ προκύπτει για κάθε εικονοστοιχείο, τα αποτελέσματα δε θα είναι ακριβή. Μια καλύτερη προσέγγιση της μετατροπής της φάσης σε υψόμετρο είναι η χρήση πολυωνύμων μεγαλύτερου βαθμού, θεωρώντας τη γη ως ελλειψοειδές, από την οποία οι συντελεστές προκύπτουν με προσαρμογή των δεδομένων σε ένα σύνολο προσομοιωμένων τιμών. Έτσι, λοιπόν, από τις θέσεις των δύο σημείων λήψης και ενός σημείου στο συμβολογράφημα, με γνωστές συντεταγμένες και γνωστό υψόμετρο, προκύπτει το υψόμετρο στο ελλειψοειδές, με τη διαδικασία της άμεσης γεωκωδικοποίησης.

Γεωκωδικοποίηση

Στο τελευταίο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας, γίνεται η γεωκωδικοποίηση του συμβολομετρικού προϊόντος στη χαρτογραφική προβολή, είτε με τη χρήση γεωμετρικών υψόμετρων από το ελλειψοειδές είτε με τη χρήση Ψ.Μ.Ε. Στην ουσία, στο στάδιο αυτό κάθε εικονοστοιχείο του συμβολομετρικού προϊόντος μετασχηματίζεται από τη γεωμετρία της απεικόνισης SAR, στη χαρτογραφική προβολή, δηλαδή από τις συντεταγμένες της πλάγιας απόστασης και του αζιμουθίου στις προβολικές. Από την πλάγια απόσταση του εικονοστοιχείου προκύπτει η απόσταση του δορυφόρου-δέκτη (R) και από το αζιμούθιο, λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα Doppler, προκύπτει η θέση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης (S_x, S_y και S_z).

Η συντεταγμένη (j) της πλάγιας απόστασης ενός pixel, εάν κατάλληλα προστεθεί στη χρονική καθυστέρηση του πρώτου pixel (first pixel delay), μας δίνει το γρήγορο χρόνο (fast time) του συγκεκριμένου pixel από τον οποίο εύκολα προκύπτει η απόσταση δέκτη- σημείου R (range).

Επομένως για κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνονται υπόψη οι εξής εξισώσεις :

πρώτον, η εξίσωση της πλάγιας απόστασης :

$$R_s^2 = (|(S - P)|)^2 = (S_x - P_x)^2 + (S_y - P_y)^2 + (S_z - P_z)^2$$

δεύτερον, η εξίσωση της συχνότητας Doppler:

$$f_D = \frac{(2 * (V_s - V_p) * (P - S))}{(\lambda * (|(P - S)|))}$$

και, τρίτον, η εξίσωση της γήινης επιφάνειας του ελλειψοειδούς :

$$\frac{P_x^2}{(a+h)^2} + \frac{P_y^2}{(a+h)^2} + \frac{P_z^2}{(b+h)^2} = 1$$

όπου R_s , η πλάγια απόσταση δορυφόρου-δέκτη, S, P , τα διανύσματα της θέσης του δορυφόρου και του στόχου, v_p, v_s , οι αντίστοιχες ταχύτητες, c η ταχύτητα του φωτός και f_D , η συχνότητα Doppler.

Με τη διαδικασία της άμεσης γεωκωδικοποίησης τα προϊόντα της Συμβολομετρίας, μετασχηματίζονται από τη γεωμετρία της SAR απεικόνισης στη χαρτογραφική προβολή, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο ενός εικονοστοιχείου στο ελλειψοειδές (ή από το διαθέσιμο Ψ.Μ.Ε), την τροχιά του δορυφόρου (διανύσματα θέσης και ταχύτητας) Απαιτείται αναδειγματοληψία στον κάρναβο της χαρτογραφικής προβολής, με μια από τις μεθόδους παρεμβολής. Η διαδικασία της έμμεσης γεωκωδικοποίησης είναι η αντίστροφη διαδικασία κατά

την οποία γίνεται ο μετασχηματισμός από την χαρτογραφική προβολή στη γεωμετρία του ραντάρ. Είναι απλούστερη διαδικασία, στην οποία υπολογίζεται από την εξίσωση της συχνότητας Doppler, για τη χρονική στιγμή στην οποία $f_D = 0$, το αζιμούθιο του στόχου και η πλάγια απόσταση δορυφόρου-στόχου.

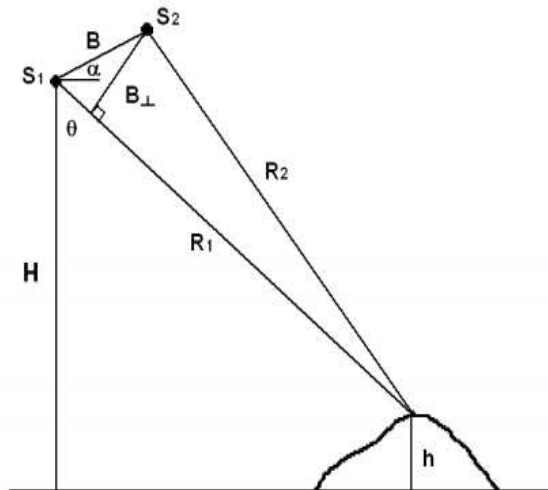
2.1.2. Διαφορική Συμβολομετρία

Στην περίπτωση της Διαφορικής Συμβολομετρίας, στόχος είναι ο διαχωρισμός των όρων της φάσης της τοπογραφίας από τη φάση που οφείλεται σε μετακινήσεις στη γήινη επιφάνεια. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων στην περιοχή μελέτης, η φάση της τοπογραφίας πρέπει να αφαιρεθεί από το συμβολογράφημα και μάλιστα πριν από τη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης, ειδικά για περιοχές με έντονο ανάγλυφο ή έντονες παραμορφώσεις.

Η διαφορά φάσης για ένα εικονοστοιχείο μεταξύ των δύο απεικονίσεων SAR, με τη θεώρηση ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταξύ των λήψεων είναι ίδιες και τα λοιπά σφάλματα του συστήματος απαλείφονται κατά τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης, δίνεται από τον μαθηματικό τύπο που ακολουθεί (Zebker, 1994) :

$$\Delta\varphi = (\Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{flat}}) + \Delta\varphi_{\text{defo}} = \frac{(4\pi * B * \sin(\theta - \alpha))}{\lambda} + \frac{(4\pi * \Delta R)}{\lambda} ,$$

όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης, B είναι η συμβολομετρική βάση, α η γωνία μεταξύ του διανύσματος της βάσης και της οριζόντιας διεύθυνσης, λ το μήκος κύματος και ΔR η παραμόρφωση μεταξύ των δυο απεικονίσεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί :



Εικόνα 11: Βάση λήψης B συμβολομετρικού ζεύγους

Μετά την αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης, η διαφορά φάσης προκύπτει ως εξής :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{defo}} = \frac{(4\pi * B * \cos(\theta_{\text{inc}} - \alpha)) * \Delta h}{(\lambda * R * \sin\theta_{\text{inc}})} + \frac{(4\pi * \Delta R)}{\lambda} ,$$

όπου θ_{inc} είναι η γωνία πρόσπτωσης, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο του σημείου από το Ψ.Μ.Ε.

Η φάση της τοπογραφίας είναι δυνατό να προκύψει είτε από ένα εξωτερικό Ψ.Μ.Ε, από το οποίο γίνεται η προσομοίωση των συμβολομετρικών κροσσών που οφείλονται στην τοπογραφία Massonnet (1993), λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του συμβολομετρικού συστήματος (κάθετη

βάση, πλάγια διεύθυνση, τροχιά κτλ), είτε από ένα άλλο συμβολομετρικό ζεύγος απεικονίσεων, στο οποίο όμως θεωρείται ότι οι παραμορφώσεις δεν υφίστανται.

Σημειώνεται ότι στη δεύτερη περίπτωση, το σύνθετο συμβολογράφημα που προκύπτει από το συνδυασμό αυτού που περιλαμβάνει τις παραμορφώσεις και αυτού που περιλαμβάνει την τοπογραφία, θα πρέπει να υποστεί αλλαγή της κλίμακας ώστε να ανταποκρίνεται στη διαφορά της κάθετης βάσης των δύο συμβολογραφημάτων.

Τελικά, μετά την αφαίρεση της τοπογραφίας η παραμόρφωση στην πλάγια διεύθυνση (ΔR) είναι δυνατό να προκύψει από την εναπομείνασα διαφορά φάσης (μετά την αφαίρεση των όρων της τοπογραφίας, επίπεδης γης, θορύβου και ατμοσφαιρικών τεχνουργημάτων, σε μια ιδανική κατάσταση) και το μήκος κύματος. Σημειώνεται ότι σφάλματα στο $\Psi.M.E$ επηρεάζουν την τελική ακρίβεια του αποτελέσματος της παραμόρφωσης, σύμφωνα με τον τύπο που παρουσιάζεται παρακάτω (NG et al., 2008) :

$$\sigma_{\Delta R} = \frac{B}{(R * \sin \theta_{inc})} * \sigma_{\Delta h}$$

Στην περίπτωση διαθεσιμότητας ενός εξωτερικού $\Psi.M.E$, η μέθοδος παραλλάσσεται σε Διαφορική Συμβολομετρία διπλής διέλευσης (2-pass), ενώ στην περίπτωση επεξεργασίας επιπρόσθετων συμβολογραφημάτων για τον καθορισμό της φάσης της τοπογραφίας, πρόκειται για Διαφορική Συμβολομετρία τριπλής ή τετραπλής διέλευσης (3-pass, 4-pass), ανάλογα με τον αριθμό των συμβολογραφημάτων προς επεξεργασία.

2.1.3. Πηγές σφαλμάτων στη Συμβολομετρία

Στη Συμβολομετρία, η ομαλή έκβαση της επεξεργασίας των απεικονίσεων SAR και η ακρίβεια των τελικών συμβολομετρικών προϊόντων είτε πρόκειται για Ψ.Μ.Ε, είτε πρόκειται για χάρτες παραμορφώσεων και κατακόρυφων μετακινήσεων, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που αφορούν στα χαρακτηριστικά των λήψεων, αλλά και στα βήματα επεξεργασίας των απεικονίσεων. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες αναφέρονται παρακάτω, με ιδιαίτερη έμφαση στην μεθοδολογία της Διαφορικής Συμβολομετρίας.

Αρχικά, σε ότι αφορά στη γεωμετρία της λήψης των απεικονίσεων που επιλέγονται προς επεξεργασία, τα σφάλματα των τροχιακών δεδομένων επιδρούν αρνητικά στον προσδιορισμό της γεωμετρικής τους βάσης, γεγονός που επηρεάζει συνολικά την ακρίβεια της επεξεργασίας των απεικονίσεων, από το στάδιο της συμπροσαρμογής τους, μέχρι το στάδιο της ανίχνευσης των μεταβολών, καθώς προκαλεί αλλαγή στην κλίμακα και τη συχνότητα εμφάνισης των κροσσών συμβολής. Για το λόγο αυτό, σε περίπτωση ελλιπούς ακρίβειας των τροχιακών δεδομένων, απαιτείται η χρήση σημείων ελέγχου στο έδαφος (GCPS), με γνωστό υψόμετρο, έτσι ώστε μετά την αποκατάσταση της φάσης, είναι δυνατό να γίνει ραφινάρισμα στον προσδιορισμό της βάσης του συμβολομετρικού ζεύγους και να απαλειφθούν κροσσοί που οφείλονται στα τροχιακά σφάλματα ή στην κακή συμπροσαρμογή του ζεύγους των απεικονίσεων.

Επιπλέον, η επιλογή απεικονίσεων με γνώμονα τη γραμμή βάσης επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς σχετίζεται με τη χωρική αποσυσχέτιση των απεικονίσεων του ζεύγους. Συγκεκριμένα, η γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζεύγους θα πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη (στο 20%-30% της κρίσιμης) για είναι δυνατή η εφαρμογή της Συμβολομετρίας, αλλά και πολύ μικρότερη για την εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, ώστε να εξισορροπείται η επίδραση της τοπογραφίας στο συμβολογράφημα, καθώς δυσχεραίνει την ετεροσυσχέτιση των δυο απεικονίσεων (λόγω μεταβολών που εμφανίζονται σε αυτές), αλλά και δημιουργεί πρόσθετους κροσσούς στο συμβολογράφημα, που παρεμποδίζουν την αποκατάσταση της φάσης.

Επιπρόσθετα, η χρονική βάση των δύο απεικονίσεων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη Συμβολομετρία, καθώς σχετίζεται με τις διαχρονικές μεταβολές των ιδιοτήτων οπισθοσκέδασης των στόχων, ιδιαίτερα για περιοχές με έντονη βλάστηση, στις οποίες μεταβάλλονται έντονα οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο χρόνο. Συνολικά, η επίδραση της χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης των απεικονίσεων SAR επηρεάζουν τη συνάφεια του συμβολομετρικού ζεύγους.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην ακρίβεια της επεξεργασίας των απεικονίσεων SAR είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες των λήψεων, οι οποίες προκαλούν μεταβολές στο δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης του σήματος. Η μεταβολή της πίεσης και των υδρατμών της ατμόσφαιρας από τη μια λήψη στην άλλη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμορφώσεων που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Επιπλέον, η επίδραση της ατμόσφαιρας γίνεται εμφανέστερη στα συμβολομετρικά ζεύγη με μικρότερη χωρική βάση, καθώς και σε αυτά με μεγάλη χρονική διαφορά. Επιπλέον, οι μεταβολές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταξύ των λήψεων του συμβολομετρικού ζεύγους παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά στο χώρο και στο χρόνο και δεν είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της συνάφειας του ζεύγους, ο οποίος γίνεται σε μικρά παράθυρα μέσα στην εικόνα, οπότε είναι πιθανό να εμφανίζονται

ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα, ακόμα και σε περιοχές με υψηλή συσχέτιση.

Τέλος, η χρήση Ψ.Μ.Ε χειρότερης ανάλυσης των απεικονίσεων, αλλά και η ύπαρξη σφαλμάτων σε αυτό επηρεάζει τη συμπροσαρμογή των απεικονίσεων, τη γεωκωδικοποίηση και την τελική ακρίβεια ανίχνευσης παραμορφώσεων. Το τελευταίο συμβαίνει καθώς η ακρίβεια με την οποία επιτυγχάνεται η προσομοίωση της φάσης που οφείλεται στην τοπογραφία από το Ψ.Μ.Ε, επηρεάζει το διαφορικό συμβολογράφημα και την απόδοση της αποκατάστασης της φάσης. Στο στάδιο της αποκατάστασης της φάσης στη Διαφορική Συμβολομετρία υπεισέρχονται τα περισσότερα σφάλματα της επεξεργασίας των απεικονίσεων, που επηρεάζουν καταλυτικά την ακρίβεια εκτίμησης των μεταβολών.

2.1.4. Συμβολομετρία με χρήση δεδομένων Sentinel-1A TOPS-mode

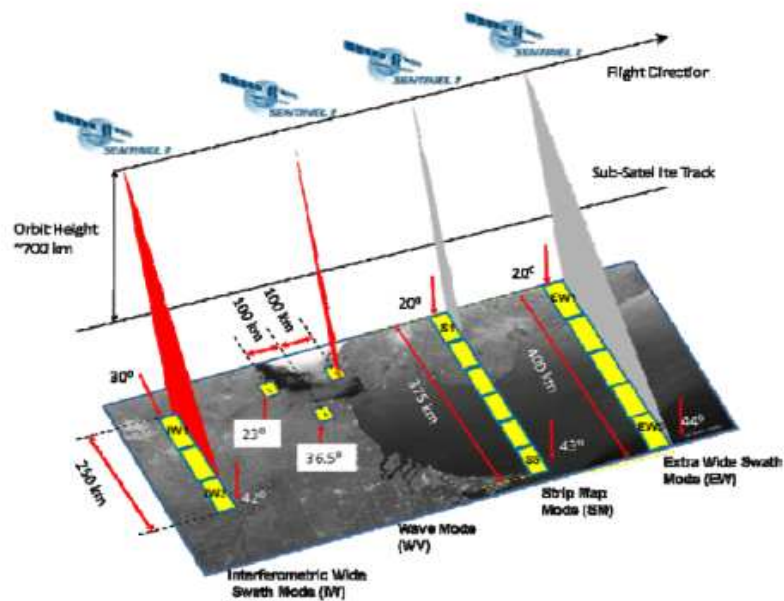
Η δορυφορική αποστολή Sentinel-1 αποτελεί μέρος του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus και περιλαμβάνει το σχηματισμό δύο δορυφόρων SAR, η λειτουργία των οποίων είναι στο κανάλι C, μιας και αποτελούν συνέχεια των προϋπαρχόντων δορυφόρων ERS/ENVISAT. Ο πρώτος δορυφόρος Sentinel-1A τέθηκε σε λειτουργία στις 3 Απριλίου 2014 και ο δεύτερος ο Sentinel-1B είναι προγραμματισμένος να τεθεί σε τροχιά μέσα στο έτος 2016 (Potin et al., 2014).

Σχετικά με την στρατηγική της παραγωγής προϊόντων που ακολουθείται, η συστηματική επεξεργασία και η παραγωγή προκαθορισμένων σετ δεδομένων Level-0 συμβαίνει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, σε συνεργασία με τους σταθμούς επίγειου ελέγχου, ενώ για επεξεργασία Level-1 και Level-2 απαιτείται το χρονικό διάστημα 24 ωρών, για συγκεκριμένες περιοχές μελέτης.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, παρέχεται κάλυψη διπλής διέλευσης, σε ανοδική και καθοδική τροχιά αντίστοιχα, που επαναλαμβάνεται κάθε 12 ημέρες, στη λειτουργία Wide Swath (IW mode), σε VV-VH πόλωση, για καθεμία από τις 38 χώρες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, παρέχεται τακτική κάλυψη σε ζώνες, σε μονή διέλευση, σε IW mode, με VV-VH πόλωση, που ακολουθεί κάποια κλιματολογικά και γεωγραφικά κριτήρια. Η επιλογή των ζωνών γίνεται έτσι ώστε να καλύπτονται επαρκώς τα διοικητικά όρια κάθε χώρας.

Στο μέλλον, οι δύο δορυφόροι S-1A και S-1B θα κινούνται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο, με διαφορά φάσης 180 μοιρών και με κυκλική επανάληψη της τροχιάς τους μέσα σε 12 μέρες, οπότε τα συμβολομετρικά ζεύγη που θα προκύψουν από τον συνδυασμό τους θα έχουν χρονική βάση τις 6 μέρες, γεγονός που θα διευκολύνει τη διαδικασία της Συμβολομετρίας. Επιπλέον, το γεγονός ότι η τυπική απόκλιση της τροχιάς τους υπολογίζεται ώστε να παραμένει σταθερή στα $\pm 50\text{m}$, σε συνδυασμό με τις μικρές Συμβολομετρικές βάσεις, της τάξης των 150m, θα συμβάλει στην εξάλειψη σφαλμάτων, κατά την ανίχνευση μεταβολών στη γήινη επιφάνεια (Martinez, 2016).

Ο δορυφόρος Sentinel-1A διαθέτει κεραία ενεργητικής φάσης που υποστηρίζει τέσσερις αποκλειστικές λειτουργίες λήψης, με διαφορετική διακριτική ικανότητα και κάλυψη η καθεμία : Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), StripMap (SM), και Wave (WV).

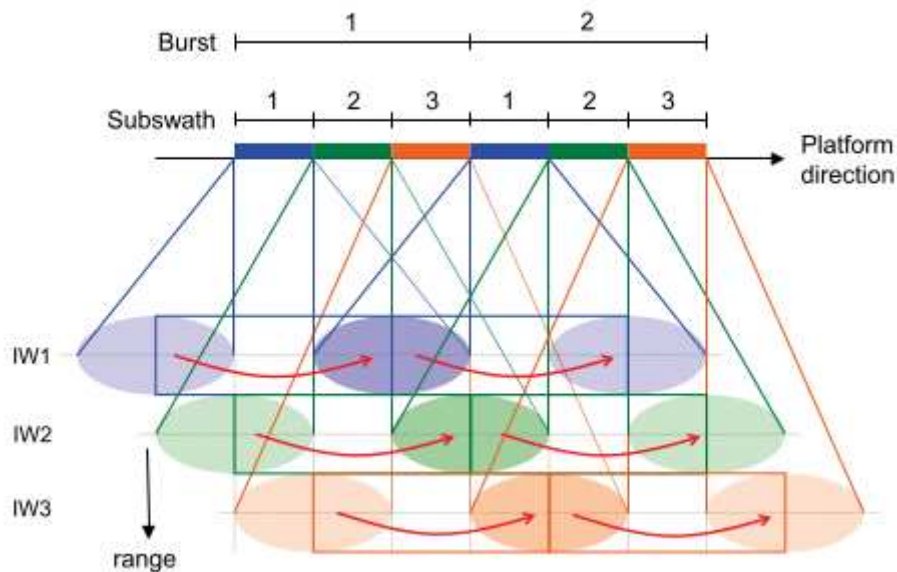


Εικόνα 12: Γεωμετρία και λειτουργίες λήψης SAR Sentinel-1A (*Potin et al., 2014*)

Mode	Incidence Angle [deg]	Chirp Bandwidth [Hz]	Single-Look Ground Resolution (rg x az) [m]
SM (S1-S5)	20-43	87.6-42.2	5 x 5
IW (1-3)	30-42	56.5-42.8	5 x 20
EW (1-5)	20-44	22.2-10.4	20 x 40
WV (1&2)	23 & 36.5	74.5 & 48.2	5 x 5

Πίνακας 6: Βασικές παράμετροι λειτουργιών λήψης SAR Sentinel-1A (*Geudtner et al., 2014*)

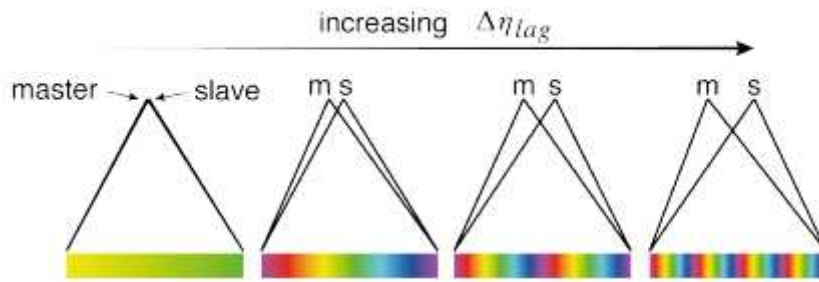
Όλες οι λειτουργίες, πέραν της WV, ενεργούν σε διπλή πόλωση, ενώ οι IW και EW υλοποιούνται ως λειτουργίες TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans in azimuth), με σκοπό την δημιουργία απεικονίσεων με ευρύ πλάτος, 250km, με διακριτική ικανότητα 5m x 20m, στο έδαφος και 400km, με διακριτική ικανότητα 20m x 40m, στο έδαφος, αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τη συμβατική λειτουργία ScanSAR, η TOPSAR εμφανίζεται περισσότερο αποδοτική στη δημιουργία απεικονίσεων (Geudtner et al., 2014). Σημειώνεται ότι η λειτουργία IW αποτελεί τη βασική λειτουργία για τη συστηματική παρακολούθηση μεγάλων ηπειρωτικών εκτάσεων και παράκτιων περιοχών.



Εικόνα 13: Λειτουργία λήψης TOPSAR Sentinel-1A ((Geudtner et al., 2014)

Το βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας TOPSAR είναι ότι η κεραία στρέφεται, κατά την πλάγια διεύθυνση, περιοδικά, για να καλύψει τρεις ευρύτερες περιοχές (swaths), αλλά και κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, από και προς την πορεία της κίνησης, μεταδίδοντας μια σύντομη διαδοχή παλμών, που σχηματίζουν τα λεγόμενα “bursts”. Έτσι, μειώνεται το αποτέλεσμα της “οδόντωσης” στην απεικόνιση (scalloping effect), καθώς επίσης δημιουργείται σταθερή ασάφεια και αναλογία σήματος-προς-θόρυβο (Signal-to-Noise ratio) κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου (Martinez, 2016). Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο μειωμένος χρόνος θέασης ενός στόχου, λόγω της γρήγορης περιστροφής της κεραίας, οδηγεί σε μειωμένη χωρική ανάλυση της απεικόνισης στη διεύθυνση του αζιμουθίου.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της λειτουργίας TOPSAR είναι ότι το κεντροειδές Doppler μεταβάλλεται έντονα μεταξύ διαδοχικών “bursts”, εξαιτίας της στροφής της κεραίας κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, με αποτέλεσμα η φάση που ανακτάται, μετά τη διαδικασία της εστίασης των απεικονίσεων SAR, δεν περιλαμβάνει μόνο τη σύνθετη απόκριση κάθε εικονοστοιχείου, αλλά και ένα πρόσθετο όρο, ο οποίος μεταβάλλεται τετραγωνικά με τη μεταβολή της φάσης κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Αυτός ο πρόσθετος όρος φάσης είναι εμφανής στις απεικονίσεις SLC, που παρέχονται από την ESA και οδηγεί σε παραμορφώσεις στο πλάτος και στη φάση του κύματος, όταν η εικόνα “slave” υπόκειται σε αναδειγματοληψία, κατά τη διαδικασία της συμπροσαρμογής της με τη “master” εικόνα. Έτσι, λοιπόν, σε περίπτωση σφάλματος στη συμπροσαρμογή των εικόνων, δημιουργούνται ράμπες απότομης μεταβολής της φάσης, οι οποίες ανακλώνται και στη συμβολομετρική φάση.



Εικόνα 14: Ράμπες φάσης στη διεύθυνση του αζιμουθίου λόγω χρονικής καθυστέρησης μεταξύ δύο λήψεων (R.Grandin, 2015)

Για το λόγο αυτό, γίνεται σαφές ότι απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στη συμπροσαρμογή ενός ζεύγους εικόνων Sentinel-1 IW TOPS, καθώς το βήμα αυτό είναι κρίσιμο για την επιτυχημένη εφαρμογή της Συμβολομετρίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε μια συμβατική περίπτωση ζεύγους εικόνων Stripmap, δημιουργούνται γραμμικές ράμπες φάσης κατά τη διαδικασία εστίασης των απεικονίσεων SAR, οι οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν ένα σταθερό όρο μετακίνησης της φάσης στο συμβολογράφημα, σε περίπτωση σφάλματος στη συμπροσαρμογή. Αντίθετα, στη λειτουργία TOPS, ένα αντίστοιχο σφάλμα στη συμπροσαρμογή οδηγεί σε γραμμικά μεταβαλλόμενες μετακινήσεις της φάσης (phase offsets) στο συμβολογράφημα. Το σφάλμα της φάσης στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ως εξής :

$$\varphi_{error} = 2\pi f_{DC} \Delta t \quad ,$$

όπου f_{DC} η συχνότητα του κεντροειδούς Doppler και Δt το σφάλμα της συμπροσαρμογής, όπως εκφράζεται σε χρονική διαφορά κατά το αζιμούθιο, μεταξύ των εικόνων του ζεύγους (Geudtner et al., 2014). Επομένως, απαιτείται ακρίβεια συμπροσαρμογής κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου της τάξης των 0.002 pixels, για να επιτευχθεί σφάλμα στη φάση του συμβολογραφήματος μικρότερο των 10deg.

Μετά την ακριβή συμπροσαρμογή των εικόνων, ο όρος φάσης (phase ramp) είναι απαραίτητο να εξαλειφθεί πριν από οποιαδήποτε συμβολομετρική διαδικασία, μέσα από μια επεξεργασία, η οποία ονομάζεται “deramping” (R.Grandin, 2015).

Κατά τη διαδικασία του “deramping”, αρχικά, γίνεται η συρραφή των διαδοχικών “bursts” σε μια ενιαία απεικόνιση κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, λαμβάνοντας υπόψη τα μεταδεδομένα της εικόνας για τις επικαλυπτόμενες περιοχές των “bursts”. Δεύτερον, οι εικόνες του συμβολομετρικού ζεύγους πολλαπλασιάζονται με έναν εξισορροπητικό όρο με στόχο την ακύρωση της αζιμουθιακής τετραγωνικής φάσης, λαμβάνοντας υπόψη και τη χρονική καθυστέρηση κατά το αζιμούθιο μεταξύ των δύο εικόνων, όπως προκύπτει από τη συσχέτιση τους, με στόχο τον προσδιορισμό μικρών σφαλμάτων συμπροσαρμογής. Τα σφάλματα αυτά μειώνονται κατά την εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού στη “slave” εικόνα, ο οποίος προκύπτει από την προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων στις μετατοπίσεις μεταξύ των δύο εικόνων, κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Τρίτον, από τον υπολογισμό των φασματικών διαφορών μεταξύ των επικαλυπτόμενων περιοχών των “bursts” (spectral diversity double differences), πραγματοποιείται ραφινάρισμα των συντελεστών του αφινικού μετασχηματισμού, που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Έτσι, καθίσταται δυνατή η απαλοιφή των υπολειπόμενων αλμάτων φάσης μεταξύ των διαδοχικών

“bursts”.

Η διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων S-1A καθώς και η διαδικασία του “deramping” αποτελούν κρίσιμα βήματα της Συμβολομετρικής επεξεργασίας ενός ζεύγους εικόνων TOPSAR mode και αποτελούν προϋπόθεση για την ομαλή έκβαση των βημάτων που ακολουθούν. Στην επόμενη ενότητα, περιγράφεται εκτενώς η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής, που αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της Διαφορικής Συμβολομετρίας, στο λογισμικό GAMMA, και η εφαρμογή της στα ζεύγη εικόνων SLC TOPS mode, που επιλέχθηκαν για την περιοχική μελέτη.

2.1.5. Διαφορική Συμβολομετρία σε μεταλλεία

Η Διαφορική Συμβολομετρία εφαρμόστηκε σε πληθώρα μελετών για την ανίχνευση μετακινήσεων, που οφείλονται είτε σε υπόγειες εξορυκτικές δραστηριότητες (Perski και Jura 1999, Carnec και Delacourt 2000, Raucoules et al., 2003, Crosetto et al., 2005; Colesanti et al., 2005; Herrera et al., 2007; Perski et al., 2009; Yang et al. 2010, Ng et al., 2010), είτε σε ανοιχτά μεταλλεία (Wegmuller et al., 2007; Herrera et al., 2010; Hartwig et al., 2013) (Paradella et al., 2015).

Με την εφαρμογή της μεθόδου DInSAR είναι δυνατόν να ανιχνευτούν μικρο-μετακινήσεις που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες, με ακρίβεια της τάξης του εκατοστού ή μερικών χιλιοστών, όπως διαπιστώθηκε πρώτα από τους Gray και Farris-Manning (1993) και με τον τρόπο αυτό να σχεδιαστεί η τομή της κατακόρυφης μετακίνησης σε κάθε σημείο της λεκάνης εξόρυξης (Ng et al., 2010). Η ακρίβεια της μεθόδου οφείλεται στην ευαισθησία του ραντάρ στις μετακινήσεις που είναι παράλληλες στη γραμμή θέασης του δορυφόρου, δηλαδή στο θεωρητικό κατώφλι ανίχνευσης μετακίνησης μεταξύ δύο απεικονίσεων SAR το οποίο είναι ίσο με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος ($\lambda/4$, $\lambda = c/f$). Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί μήκος κύματος λ ίσο με 5.8cm για αισθητήρες C - καναλιού, όπως ERS και Envisat και ελάχιστη χρονική βάση 35 ημερών, τότε ο μέγιστος ανιχνεύσιμος ρυθμός μεταβολής της μετακίνησης είναι ίσος με 14.5cm/έτος, μεταξύ κοντινών εικονοστοιχείων (Herrera et al., 2010, Paradella et al., 2015). Οι υφιστάμενες μετακινήσεις εμφανίζονται στο διαφορικό συμβολογράφημα ως μεταβολές φάσης που υποδεικνύονται από χρωματικές αλλαγές οι οποίες αποκαλύπτουν σχετικές μετακινήσεις της επιφάνειας : ένας ολοκληρωμένος χρωματικός κύκλος από μοβ έως κόκκινο αντιστοιχεί σε μετακίνηση ίση με το μισό του μήκους κύματος στην πλάγια διεύθυνση (Guéguen et al., 2009). Σε γενικές γραμμές, όπως αναφέρθηκε, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του ραντάρ σε οποιαδήποτε μετακίνηση, αλλά είναι πιο πιθανό να αποτύχει η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης, που αποτελεί περιορισμό εφαρμογής της μεθόδου.

Συγκεκριμένα, επισημαίνονται τέσσερις κυρίως περιορισμοί στη χρήση και αποτελεσματικότητα της μεθόδου DInSAR (Ferretti et al., 2000, 2001) : (1) η χρονική αποσυσχέτιση των επιφανειακών σκεδαστών εξαιτίας της ύπαρξης βλάστησης ή άλλων διεργασιών που προκαλούν μεταβολές στην επιφάνεια, (2) η χωρική αποσυσχέτιση που προκαλείται εξαιτίας της μεγάλης χωρικής βάσης των λήψεων μεταξύ δύο απεικονίσεων SAR, (3) η ύπαρξη ατμοσφαιρικών διαταραχών, που προκαλεί μεταβολές στην καθυστέρηση του σήματος και (4) η επίλυση των ασαφειών της φάσης. Ένας επιπλέον περιορισμός στην περίπτωση των μεταλλείων δημιουργείται από την απώλεια της συμβολομετρικής συνάφειας, που συμβαίνει σε περιοχές έντονων αλλαγών, επειδή οι μετακινήσεις που οφείλονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες είναι κυρίως κάθετες, ασυνεχείς στο χώρο και μη-γραμμικές στο χρόνο. Ακόμα, όμως και σε περιοχές με υψηλή συμβολομετρική

συνάφεια, είναι πιθανό οι συμβολομετρικοί κροσσοί να είναι πυκνοί και παραμορφωμένοι, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης (Chen και Zebker, 2001). Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες μελέτες που εφαρμόζουν DInSAR σε μεταλλεία, δηλαδή χρησιμοποιούν μετρήσεις της συμβολομετρικής φάσης για να χαρτογραφήσουν τις μετακινήσεις, τα ζεύγη των απεικονίσεων επιλέγονται ώστε να έχουν μικρά χρονικά διαστήματα και μικρή χωρική βάση έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται από υψηλή συνάφεια (Ge et al., 2003).

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι η μέθοδος DInSAR στην περίπτωση των μεταλλείων είναι δυνατό να αποτυπώσει τις μετακινήσεις που οφείλονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες, υπό κάποιες προϋποθέσεις, βάσει των περιορισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά δεν είναι πάντοτε εφικτό να αποτυπωθεί το πραγματικό μέγεθος των μετακινήσεων αυτών (Yan et al., 2013). Γενικά, η χρήση της μεθόδου DInSAR είναι αποτελεσματική στην περίπτωση που η φάση που οφείλεται στη μετακίνηση υπερσχύει των υπόλοιπων τεσσάρων συνιστωσών : τοπογραφία, ατμόσφαιρα, τροχιακά σφάλματα, θόρυβος. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση ενός Ψ.Μ.Ε ακριβείας, ώστε να αφαιρεθεί αποτελεσματικά η φάση της τοπογραφίας, καθώς και χωρικό φίλτράρισμα για τη μείωση του θορύβου. Παρ' όλα αυτά η καθυστέρηση του σήματος λόγω ατμοσφαιράς και η υπολειπόμενη φάση λόγω των τροχιακών σφαλμάτων δεν είναι δυνατόν να φιλτραριστούν ή να εκτιμηθούν στην κλασική Διαφορική Συμβολομετρία (Muga et al., 2014), παρά μόνο είναι δυνατόν να αξιολογηθούν με τη χρήση περισσότερων και διαφορετικών απεικονίσεων SAR, από πολλαπλούς δέκτες (Ferretti et al., 2007). Έτσι, σε ευνοϊκές συνθήκες, η μέθοδος DInSAR είναι δυνατό να ανιχνεύσει μετακινήσεις σε μεταλλεία, αλλά είναι λιγότερο ακριβής από τις συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους και για το λόγο αυτό συνιστάται η συνδυασμένη εφαρμογή με γεωδαιτικές μετρήσεις (Ge et al., 2003).

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή μερικών περιπτώσεων εφαρμογής της μεθόδου DInSAR σε μεταλλεία.

Οι **Stow και Right (1993)** εξέτασαν την ανίχνευση μετακινήσεων σε δύο περιοχές ανθρακωρυχείων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, καθώς στο ένα οι μετακινήσεις είναι της τάξης του 1m και στο δεύτερο παρατηρούνται εκτεταμένες μετακινήσεις της τάξης των 40m, εξαιτίας αθροιστικών εξορύξεων. Για τη διασφάλιση βέλτιστης συμβολομετρικής συνάφειας, επιλέχθηκαν ζεύγη, των οποίων οι λήψεις ήταν μεταξύ Σεπτεμβρίου και Μαρτίου, χωρίς βροχόπτωση πριν ή κατά τη διάρκεια των λήψεων και με χωρική βάση μικρότερη των 200m και χρονική βάση τις 35 μέρες. Τελικά, δύο ζεύγη παράλληλων τροχιών (tandem) και ένα ζεύγος διαδοχικών SLC απεικονίσεων ERS, με χρονική βάση 35 ημερών επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της Συμβολομετρίας και προέκυψε ότι η ακρίβεια προσδιορισμού των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι της τάξης μερικών εκατοστών, στην περίπτωση ευνοϊκών συνθηκών συνάφειας.

Με σκοπό την εκτίμηση της δυνατότητας ανίχνευσης μετακινήσεων που σχετίζονται με υπόγειες εξορυκτικές δραστηριότητες από απεικονίσεις ERS-1 και ERS-2, οι **Carnec και Delacourt (2000)** εφάρμοσαν τη Διαφορική Συμβολομετρία σε 13 απεικονίσεις με χρονική βάση τριών, δώδεκα και δεκαπέντε ημερών, για το χρονικό διάστημα τριών ετών. Οι συμβολομετρικοί συνδυασμοί επιλέχθηκαν έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται από μικρή ευαισθησία στην τοπογραφία, η οποία σχετίζεται με το ύψος της ασάφειας κάθε ζεύγους (της τάξης των 100m). Τελικά η μέγιστη μετακίνηση που ανιχνεύτηκε είναι της τάξης των 6mm, 17mm και 23mm, από τα συμβολογραφήματα με χρονική βάση τις τρεις, δώδεκα και δεκαπέντε μέρες αντίστοιχα. Από τοπογραφικές μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι για το χρονικό διάστημα των τριών μηνών η μέγιστη μετακίνηση δεν ξεπερνά τα 20mm, γεγονός που σημαίνει ότι η ύπαρξη θορύβου και

ατμοσφαιρικών τεχνουργημάτων στα συμβολογραφήματα είναι πιθανό να επηρεάζει την ευαισθησία ανίχνευσης της μεθόδου.

Οι Ge et al. (2003) εφάρμοσαν τη μεθοδολογία της Διαφορικής Συμβολομετρίας σε απεικονίσεις C- και L- καναλιού για να εξετάσουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην ανίχνευση μετακινήσεων σε ανθρακωρυχείο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δύο ζεύγη ERS (C- κανάλι) tandem απεικονίσεων (χρονική βάση 1 ημέρας) με πολύ υψηλή συμβολομετρική συνάφεια, λόγω της μικρής χρονικής βάσης μεταξύ των λήψεων και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η εσωτερική ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης των 2mm. Επιπλέον, από τα ζεύγη JERS απεικονίσεων (L- κανάλι) υπολογίστηκαν μετακινήσεις με μέγιστη τιμή της τάξης των 10cm και προέκυψε ότι, σε σύγκριση με δεδομένα GPS, οι μετακινήσεις που ανιχνεύτηκαν είχαν μέσο τετραγωνικό σφάλμα 1.4cm. Γενικά διαπιστώθηκε ότι τα συμβολομετρικά ζεύγη JERS (κύκλος λήψεων 44 ημερών) παρουσίασαν μεγαλύτερη συνάφεια από τα αντίστοιχα ζεύγη ERS-1/2 (κύκλος λήψεων 33 ημερών), γεγονός που οφείλεται στην χρονική αποσυσχέτιση μεταξύ των απεικονίσεων, λόγω των μεταβολών στη βλάστηση, η οποία επηρεάζει αρνητικά πολύ περισσότερο το C- κανάλι από ότι το L- κανάλι.

Οι **Herrera et al. (2007)** μελέτησαν τις μεταβολές σε βιομηχανική περιοχή έκτασης 12 km × 8 km, που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες στο υπέδαφος, εφαρμόζοντας έναν εξελιγμένο αλγόριθμο Διαφορικής Συμβολομετρίας, γνωστό ως Coherent Pixels Technique σε 38 SLC απεικονίσεις από ERS-1, ERS-2 και ENVISAT, για τις χρονικές περιόδους 1998 –2000 και 2003-2004. Τα ζεύγη επιλέχθηκαν με κριτήριο κάθετη βάση μικρότερη από 130m, χρονική βάση μικρότερη από 900 μέρες και σχετική διαφορά στο κεντροειδές Doppler μικρότερη από 250Hz. Τελικά, ανιχνεύτηκαν υψομετρικές μεταβολές με μέγιστη τιμή 4.8cm και, σε σύγκριση με μετρήσεις σε σημεία του χωροσταθμικού δικτύου της περιοχής μελέτης για αντίστοιχα χρονικά διαστήματα, προέκυψε μέση απόλυτη υψομετρική διαφορά της τάξης του 0.7cm με τυπική απόκλιση 0.5cm. Οι **Casu et al. (2006)** κατέληξαν σε ακρίβεια της τάξης του μισού εκατοστού με τυπική απόκλιση της τάξης των 5mm, από τη συγκριτική μελέτη SAR/χωροσταθμίσεων και SAR/GPS, με την εφαρμογή της μεθόδου SBAS, η οποία είναι παρόμοια με CPT.

Οι **Fang et al. (2008)** μελέτησαν τις μεταβολές που προκαλούνται από εξορυκτικές δραστηριότητες σε περιοχή μεταλλείων, έκτασης 670 km², βάσει δύο προσεγγίσεων για την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας : η πρώτη στηρίχθηκε στη μέθοδο τριπλής διέλευσης με τη χρήση τριών SAR απεικονίσεων ERS, με χρονικό εύρος από το 1996 έως το 2000 και, η δεύτερη, στη μέθοδο διπλής διέλευσης με τη χρήση δύο ASAR απεικονίσεων ENVISAT, με χρονικό εύρος από το 2004 έως το 2006, και ενός βοηθητικού DEM. Η μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης που ανιχνεύτηκε ήταν 18cm, με μέση τιμή της τάξης των 10cm.

Οι **Ng et al. (2010)** ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για την ανίχνευση μετακινήσεων σε περιοχή ανθρακωρυχείου, η οποία στηρίζεται στη χρήση πολλαπλών διαφορικών συμβολογραφήματων, όπως ορίζει η συμβατική Διαφορική Συμβολομετρία. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ζεύγη 10 απεικονίσεων ALOS PALSAR, με την ελάχιστη χρονική βάση, έτσι ώστε ελαχιστοποιείται η χρονική αποσυσχέτιση των συμβολομετρικών ζευγών, για το χρονικό διάστημα πέντε μηνών. Εικονοστοιχεία με συνάφεια μεγαλύτερη από 0.5 χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της φάσης της ατμόσφαιρας και το συμβολογράφημα με την ελάχιστη διακύμανση, μετά την αφαίρεση του σφάλματος του DEM, χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για τα υπόλοιπα. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας αποτελεί η εκτίμηση της φάσης της ατμόσφαιρας σε κάθε διαφορικό συμβολογράφημα με την αξιοποίηση του "stack" όλων των διαθέσιμων απεικονίσεων SAR. +++Τα

αποτελέσματα της μετακίνησης, για το χρονικό διάστημα των πέντε μηνών, υπολογίστηκαν από την αθροιστική συσσώρευση των επιμέρους χαρτών μετακίνησης (σε χρονοσειρές) και είναι της τάξης των 700mm και, σε σύγκριση με τη μετακίνηση που προέκυψε από μετρήσεις GPS, οι απόλυτες διαφορές είναι της τάξης των 45mm, με τυπική απόκλιση 8 mm και μέση τιμή 12 mm.

Οι Yan et al. (2013) δημιούργησαν εννέα διαφορετικά συμβολογραφήματα από 10 απεικονίσεις ALOS PALSAR (Διαφορική Συμβολομετρία διπλής διέλευσης), με χρονική βάση 46 ημέρες, για χρονικό διάστημα 18 μηνών για να εξετάσουν τις μετακινήσεις σε περιοχή ανθρακωρυχείου. Η αριθμητική προσομοίωση των μετακινήσεων, όπως προέκυψε από την προσαρμογή μοντέλου με παραμέτρους που περιγράφουν το δυναμικό φαινόμενο των μετακινήσεων στην περιοχή και η καμπύλη των μετακινήσεων όπως προέκυψαν από τη Διαφορική Συμβολομετρία, συμφωνούν κατά 95%, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στη συγκεκριμένη μελέτη.

Στη μελέτη των **Dong et al. (2013)** επιλέχθηκαν έξι ASAR απεικονίσεις ENVISAT από τις δεκατρείς διαθέσιμες, για τη δημιουργία τεσσάρων διαφορετικών συμβολογραφημάτων, μεταξύ Ιανουαρίου 2009 και Οκτωβρίου 2010, με κριτήριο η κάθετη τους βάση να είναι μικρότερη από 300m, η οποία είναι κατάλληλη για εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας και την αποφυγή αποσυσχέτισης σε απεικονίσεις C-band Envisat ASAR (Damoah-Afagi, 2009) και η χρονική τους βάση μικρότερη από 70 ημέρες, με σκοπό την εκτίμηση των μετακινήσεων σε περιοχή εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη η εποχή λήψης των απεικονίσεων, καθώς θεωρήθηκε ότι η ξηρή και ψυχρή εποχή εμφανίζουν μικρότερα ποσοστά υγρασίας στην ατμόσφαιρα και λιγότερη βλάστηση και έτσι, ελαχιστοποιούνται τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (Abdulla, 2004).

Στη μελέτη τους οι **Mura et al. (2014)** δημιούργησαν χρονοσειρά διαφορετικών συμβολογραφημάτων, χρησιμοποιώντας 33 απεικονίσεις StripMap TerraSAR-X, για το χρονικό εύρος 14 μηνών, με σκοπό την ανίχνευση μετακινήσεων σε περιοχή ανοικτού ορυχείου. Σκοπός της ανάλυσης των χρονοσειρών στην ανίχνευση μετακινήσεων, με τη χρήση πλεοναζόντων διαφορετικών συμβολογραφημάτων, με βέλτιστες συνθήκες χωρικής και χρονικής βάσης και καλή μέση τιμή συνάφειας, είναι ο διαχωρισμός των διαφορετικών συνιστωσών της φάσης, που οφείλονται σε μετακίνηση, σε σφάλμα στην αφαίρεση της τοπογραφίας, σε ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα και θόρυβο. Οι μετακινήσεις προέκυψαν από την αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων διαφορετικών συμβολογραφημάτων με την εφαρμογή μιας παραλλαγή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, που περιλαμβάνει Singular Value Decomposition (SVD), με τη χρήση κατάλληλων βαρών – περιορισμών για κάθε συμβολογράφημα. Τελικά, ανιχνεύτηκε μέγιστη μετακίνηση -486.5 mm/ έτος στο χώρο απόθεσης αποβλήτων και -255.7 mm/year στο χώρο των βαθμωτών εξορυκτικών επιπέδων.

2.2. Ανίχνευση μεταβολών σε οπτικά δεδομένα και συνδυαστικές μέθοδοι

2.2.1. Ανίχνευση μεταβολών σε μεταλλεία από οπτικά δεδομένα

Οι **Latifovic et al. (2005)** εφάρμοσαν μια μεθοδολογία αξιολόγησης μεταβολών στην κάλυψη γης σε περιοχή εξόρυξης πετρελαίου. Συγκεκριμένα, η ανάλυση σε πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε στη σύγκριση δύο χαρτών χρήσεων γης με δεκαπέντε κλάσεις, όπως προέκυψαν από την ταξινόμηση δύο εικόνων Landsat-7 (μέθοδος μετά-ταξινόμησης Cihlar et al., 1998 και Latifovic et al., 1999) και έδειξε μείωση στη βλάστηση της περιοχής μελέτης κατά 8.64% μέσα σε χρονικό διάστημα εννέα ετών (1992 - 2001). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε και μια δευτερεύουσα εκτίμηση των μεταβολών που βασίστηκε στη χωροχρονική ανάλυση της τάσης του δείκτη key resources (KRI), όπως υπολογίστηκε από τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης (χρονοσειρά μετρήσεων NDVI μεταξύ των ετών 1990–2002 από NOAA–AVHRR σύνθετα δέκα ημερών), μέση θερμοκρασία αέρα και εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία, με σκοπό τη μελέτη της μεταβολής στην παραγωγικότητα της βλάστησης (NPP), η οποία σχετίζεται με τις εξορυκτικές δραστηριότητες, σε μηνιαία, εποχική και ετήσια κλίμακα.

Οι **Jun et al., 2008** εφάρμοσαν μια μεθοδολογία ενίσχυσης της ακρίβειας ανίχνευσης της μετακίνησης που οφείλεται σε εξορυκτικές δραστηριότητες μέσω της συγχώνευσης παγχρωματικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης και πολυφασματικών δεδομένων, SPOT και TM. Η συγχώνευση δεδομένων στηρίζεται σε τεχνικές μετασχηματισμού Wavelet και συμβάλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας στην εξαγωγή χαρακτηριστικών και ταξινόμηση της εικόνας. Τελικά, η εξέλιξη του φαινομένου της καθίζησης στην περιοχή του μεταλλείου μελετήθηκε μέσω της παρατήρησης των μεταβολών στη συγκέντρωση του νερού στην περιοχή αυτή, από τα συγχωνευμένα δεδομένα.

Οι **Townsend et al. (2009)** χρησιμοποίησαν εικόνες Landsat για τα έτη 1976, 1987, 1999 και 2006 για να χαρτογραφήσουν την έκταση των ενεργών μεταλλείων και των αποκατεστημένων περιοχών σε ορεινή δασώδη περιοχή, για οκτώ μεγάλες λεκάνες απορροής, για το χρονικό διάστημα 30 ετών. Συγκεκριμένα, εφάρμοσαν τυπικές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας σε χρονοσειρές χαρτών χρήσεων γης (από εικόνες Landsat), σε συνδυασμό με ένα χρονικό δέντρο αποφάσεων, με λογικούς κανόνες, για να εντοπίσουν τις χωροχρονικές μεταβολές (μεταβάσεις από μια κλάση σε μία άλλη) στα ενεργά μεταλλεία και τις αποκατεστημένες περιοχές (δάσος και λιβάδια), τις οποίες διέκριναν με επιτυχία από τις υπόλοιπες περιοχές βλάστησης.

Για κάθε εικόνα υπολογίστηκαν φασματικοί δείκτες που ενισχύουν τη διαχωριστικότητα των ενεργών μεταλλείων και των αποκατεστημένων περιοχών από τα υπόλοιπα είδη κάλυψης γης, όπως είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) και οι δείκτες Tasseled Cap (Φωτεινότητα και δείκτης πράσινου χρώματος για Landsat MSS και TM/ETM+, καθώς και δείκτης υγρασίας για TM/ETM+, Crist & Cicone, 1984; Huang, Wylie, Yang, Homer, & Zylstra, 2002; Kauth & Thomas, 1976). Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των επιμέρους ταξινομήσεων, χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμες ορθοφωτογραφίες NAIP από το 2005, με χωρική ανάλυση 1m, καθώς αεροφωτογραφίες από το 1962 και 1982.

Οι **Pour και Hasim (2015)** εφάρμοσαν μεθόδους ανάλυσης εικόνας, υπερφασματικής επεξεργασίας, φιλτραρίσματος και μετασχηματισμού σε εικόνες Landsat-8 για την αναγνώριση γεωφυσικών χαρακτηριστικών και αλλοιώσεων που σχετίζονται με αποθέματα πορφυρού χαλκού. Σκοπός της μελέτης ήταν ο διαχωρισμός των διαφορετικών τύπων μεταλλεύματος από ένα μικτό φάσμα μέσω της φασματικής χαρτογράφησης που επιτρέπει την καταγραφή της σύστασης της επιφάνειας του εδάφους. Συμπέραναν ότι από τα διαθέσιμα κανάλια του Landsat-8, το δεύτερο και τέταρτο κανάλι στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα, καθώς και το έκτο και έβδομο κανάλι στο βραχύ υπέρυθρο και το δέκατο κανάλι στο θερμικό φάσμα περιέχουν χρήσιμη πληροφορία για την εκμετάλλευση του μεταλλεύματος του χαλκού.

Η παραγωγή των χαρτών με τους τύπους των συστατικών της επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων και δεικτών φασματικής χαρτογράφησης, όπως η φασματική γωνία, το προσαρμοσμένο φιλτράρισμα (Mixture-tuned Matched Filtering MTMF), την προσαρμογή φασματικού χαρακτηριστικού (spectral feature fitting) και τη δυαδική κωδικοποίηση. Σημειώνεται ότι πραγματοποιήθηκε, μεταξύ άλλων, η φασματική συμπίεση, καταστολή και μείωση της διάστασης του θορύβου μέσω του μετασχηματισμού της εικόνας βάσει Minimum Noise Fraction (MNF) και χωρικό φιλτράρισμα βάσει του δείκτη Pixel Purity. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE) για μια ομάδα εικονοστοιχείων, σε σύγκριση με πραγματικά δεδομένα εδάφους και προέκυψε RMSE της τάξης του 80%.

2.2.2. Προχωρημένες μέθοδοι Συμβολομετρίας σε μεταλλεία

Οι προηγμένοι αλγόριθμοι DInSAR για την ανάλυση χρονοσειρών διαφορικών συμβολογραφημάτων (Time Series -InSAR) (Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Mora et al., 2003; Usai, 2003; Werner et al., 2003; Hooper et al., 2004; Crosetto et al., 2005; Kampes, 2005; Bovenga et al., 2006; Hooper et al., 2007) αναπτύχθηκαν με στόχο να διαχειριστούν αποτελεσματικά τους περιορισμούς της κλασικής μεθόδου DInSAR, με τη χρήση πλεονάζοντα αριθμού διαφορικών συμβολογραφημάτων, που συντελεί στο διαχωρισμό της φάσης της μετακίνησης από τις υπόλοιπες συνιστώσες της φάσης (Castaneda, 2014, Mura et al., 2014, Paradella et al., 2015). Οι Tarayre και Massonet (1996), Hanssen et al. (1999) Hanssen (2001) υποστήριξαν ότι οι τεχνικές προηγμένης Συμβολομετρίας (Advanced DInSAR, A-DInSAR) επιτρέπουν το φιλτράρισμα και την αφαίρεση της φάσης της ατμόσφαιρας, εκμεταλλευόμενες την υψηλή χωρική συσχέτιση και τη χαμηλή χρονική συσχέτιση των ατμοσφαιρικών ανομοιογενειών μεταξύ διαφορετικών λήψεων (Castaneda, 2014).

Οι μέθοδοι A-DInSAR διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των σκεδαστών που ανιχνεύουν (Castaneda, 2014, Paradella et al., 2015, Du et al., 2016) : αυτές που βασίζονται στην ανάλυση των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterers – PS), αυτές που βασίζονται στη συμβολομετρική συνάφεια και τους κατανεμημένους σκεδαστές (Distributed Scatterers – DS) και, τέλος αυτές που χρησιμοποιούν και τις δύο ομάδες σκεδαστών (PS και DS).

Η πρώτη κατηγορία, βάσει PS (Ferretti et al., 2001; Werner et al., 2003; Kampes, 2005; Bovenga et al., 2006) λειτουργεί σε σύνολο (stack) συμβολογραφημάτων μονής – όψης (single – look), που

δημιουργούνται με μια κοινή εικόνα αναφοράς (master), χωρίς κανένα περιορισμό ως προς τις χωρικές ή χρονικές βάσεις των συμβολογραφημάτων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανάλυση μοναδικών στόχων - εικονοστοιχείων, που αναφέρονται ως σταθεροί σκεδαστές (PS), οι οποίοι διατηρούν επαρκώς σταθερή ανακλαστικότητα του σήματος του ραντάρ για το χρονικό διάστημα που μελετάται και δεν επηρεάζονται από την χρονική και χωρική αποσυσχέτιση. Αυτές οι τεχνικές έχουν το πλεονέκτημα ότι συνδέουν την πληροφορία της μετακίνησης με ένα συγκεκριμένο σκεδαστή και έτσι το αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης μετακινήσεων υψηλής ανάλυσης.

Η δεύτερη κατηγορία, βάσει συνάφειας (Berardino et al., 2002; Mora et al., 2003; Usai, 2003; Hooper et al., 2004; Crosetto et al., 2005; Hooper et al., 2007, Samsonof et al., 2013) χρησιμοποιεί κατάλληλο συνδυασμό διαφορετικών συμβολογραφημάτων πολλαπλών όψεων, με μικρές χρονικές και χωρικές βάσεις, με διαφορετικές εικόνες αναφοράς, με στόχο τη μείωση της αποσυσχέτισης. Στο σύνολο των διαφορετικών συμβολογραφημάτων αναγνωρίζονται κατανεμημένοι σκεδαστές (Distributed Scatterers – DS) , οι οποίοι είναι, συνήθως, στόχοι που αντιστοιχούν σε ομάδες γειτονικών εικονοστοιχείων, με παρόμοιο σήμα οπισθοσκέδασης και έτσι αυξάνεται η πυκνότητα των εικονοστοιχείων με υψηλή συνάφεια.

Στη τρίτη κατηγορία A-DInSAR, συμβολογραφήματα με κοινή αλλά και διαφορετική εικόνα αναφοράς, συνδυάζονται στην ανάλυση χρονοσειρών. Τέτοιες μέθοδοι είναι οι SqueeSAR και GEOS-ATSA, στις οποίες χρησιμοποιούνται PS και DS, και εφαρμόζονται κυρίως σε μη-αστικές περιοχές, με μειωμένη συμβολομετρική συνάφεια, εκεί που εκλείπουν οι ανθρωπογενείς κατασκευές και, κατ' επέκταση οι σταθεροί σκεδαστές.

Αυτή η διαχρονική εφαρμογή της προχωρημένης Διαφορικής Συμβολομετρίας, που υλοποιείται είτε με τα διαφορικά συμβολογραφήματα πολλαπλών βάσεων (SBAS), είτε με τους σταθερούς σκεδαστές (Persistent Scatterer Interferometry – PSI), είτε με το συνδυασμό τους, έχει εφαρμοστεί σε διάφορες μελέτες ανίχνευσης μετακινήσεων σε περιοχές μεταλλείων με στόχο την παραγωγή χρονοσειρών των μετακινήσεων για τη διαχρονική παρακολούθηση του φαινομένου, με ακρίβεια μερικών χιλιοστών, ειδικά σε περιοχές με χαμηλό ρυθμό μεταβολής της μετακίνησης (Jung et al. 2007, Raucoules et al., 2009, Ng et al. 2010). Η ακρίβεια προσδιορισμού της μετακίνησης στην πλάγια διεύθυνση θέασης του δέκτη είναι της τάξης των 5mm σε μεμονωμένους σκεδαστές και συνολικά η πληροφορία της μετακίνησης είναι δυνατό να εξαχθεί μέσα από ένα πυκνό κάρναβο σταθερών σκεδαστών (περίπου 5–10 PS/km² απαιτούνται, Colesanti et al., 2003), ανάλογα με τη χωρική ανάλυση του συστήματος του ραντάρ, από τουλάχιστον 20 απεικονίσεις (Paradella et al., 2015, Guéguen et al., 2009). Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι που έχουν εφαρμοστεί σε μελέτες μεταλλείων, σύμφωνα με τους Paradella et al. (2015) είναι οι : PSInSAR (Ferretti et al., 2001), Coherent Target Monitoring (Van der Kooij et al., 2005), Coherent Pixel technique (Mallorqui et al., 2003), Interferometric Point Target Analysis (IPTA) (Werner et al., 2003), Small Baseline Subset Approach (SBAS) (Berardino et al., 2002), Spatio- Temporal Unwrapping Network algorithm (STUN) (Kampes, 2006) and Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) (Hooper, 2006).

Σε αντίθεση με τη μέθοδο DInSAR, η οποία επιτρέπει την ανίχνευση μετακινήσεων μεταξύ δύο ημερομηνιών, η μέθοδος PSI επιτρέπει τη διαχρονική καταγραφή των μετακινήσεων, για δεδομένο χρονικό διάστημα, ακόμα και σε περιοχές που παρουσιάζουν χαμηλή συμβολομετρική συνάφεια (Guéguen et al., 2009). Επιπλέον, η μέθοδος PSI παρέχει καλύτερη ακρίβεια, σε σύγκριση με την αθροιστική ανάλυση χρονοσειρών DInSAR (TS-InSAR), καθώς η πρώτη συμβάλει στην εκτίμηση και μείωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας, μέσω των σταθερών σκεδαστών (PS), ενώ η δεύτερη

συμβάλει στην ανίχνευση μεγαλύτερων μετακινήσεων, με κόστος τη μειωμένη χωρική ανάλυση (Mura et al., 2014). Οι Hawley et al. (2009) υποστήριξαν ότι οι τεχνικές A-DInSAR θεωρούνται ένα αποτελεσματικό εργαλείο ανίχνευσης καθιζήσεων και υπολειπόμενων μετακινήσεων μετά το πέρας των εργασιών εξόρυξης, παρ' όλα αυτά δεν είναι κατάλληλοι για την αποτύπωση των κλίσεων (Paradella et al., 2015). Ένας ακόμη περιορισμός της μεθόδου σχετίζεται με τις περιπτώσεις στις οποίες η μετακίνηση που οφείλεται σε υπόγεια εξορυκτική δραστηριότητα είναι μεγάλης κλίμακας και μη-γραμμική και, για το λόγο αυτό, είναι δύσκολο να ανιχνευτεί από τεχνικές PSI, καθώς τα σημεία PS δεν είναι δυνατό να αναγνωριστούν σε περιοχές με μεγάλες παραμορφώσεις (Raucoules et al., 2009, Fan et al., 2014). Επιπλέον, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων απεικονίσεων είναι ένας ακόμα ανασταλτικός παράγοντας για την εφαρμογή τεχνικών PSI (Colesanti et al., 2003).

Σε περιπτώσεις περιοχών με εξορυκτική δραστηριότητα, όπου η τεχνική PSI, αλλά και η SBAS αποτυγχάνουν να αποφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα, λόγω έλλειψης συνάφειας και της περιορισμένης πυκνότητας σκεδαστών (π.χ λόγω της ύπαρξης βλάστησης), ενδείκνυται η χρήση της τρίτης κατηγορίας των τεχνικών A-DInSAR, αυτών που χρησιμοποιούν και τους καταναμημένους σκεδαστές (DS), όπως η SqueeSAR, η οποία υπερνικά τους περισσότερους περιορισμούς της μεθόδου PSI και SBAS (Ferretti et al., 2011).

Μια ιδιαίτερη κατηγορία A-DInSAR αναφέρεται στη χρήση των απεικονίσεων πλάτους του ραντάρ, με στόχο την ανίχνευση της μετακίνησης χαρακτηριστικών της εικόνας, σε χρονοσειρές απεικονίσεων πλάτους και είναι γνωστή ως Offset-tracking (Zhao et al., 2013, Fan et al., 2015, Paradella et al., 2015). Αυτή η ανάλυση χρονοσειρών απεικονίσεων πλάτους ραντάρ στηρίζεται στην εκμετάλλευση του μοτίβου της κηλίδωσης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, μεταξύ δύο απεικονίσεων, κατ' αντιστοιχία με την αναγνώριση φασματικών χαρακτηριστικών στις οπτικές εικόνες (Feature tracking) επιτρέπει την ανίχνευση μετακινήσεων στις δύο διαστάσεις, στην πλάγια διεύθυνση και στο αζιμούθιο. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι χαμηλότερη από αυτή των αλγορίθμων που εκμεταλλεύονται τη φάση των απεικονίσεων SAR και είναι της τάξης των 2-3cm. Παρ' όλα αυτά, η χρήση της μεθόδου ενδείκνυται σε περιπτώσεις περιοχών που χαρακτηρίζονται από υψηλή και μη-γραμμική τιμή μετακίνησης, στις οποίες οι μέθοδοι PSI, SBAS και SqueeSAR αποτυγχάνουν, καθώς δεν απαιτείται αποκατάσταση της φάσης, ούτε υψηλή συνάφεια. Τέλος, υπάρχουν δύο μέθοδοι offset-tracking : η πρώτη βασίζεται στην αλληλοσυσχέτιση της εικόνας της έντασης (intensity offset-tracking) και η δεύτερη στην ορατότητα των κροσσών συμβολής (coherence offset-tracking).

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή μερικών μελετών στις οποίες εφαρμόστηκαν προχωρημένες μέθοδοι DInSAR, αλλά και συνδυασμός μεθόδων.

Οι **Jung et al. (2007)** χρησιμοποίησαν 25 συμβολομετρικά ζεύγη απεικονίσεων JERS-1, για το χρονικό διάστημα μεταξύ Νοεμβρίου 1992 και Οκτωβρίου 1998, για να μετρήσουν τις μετακινήσεις σε περιοχή μεταλλείου, εφαρμόζοντας την μέθοδο PS. Η περιοχή μελέτης ταξινομήθηκε σε πέντε κλάσεις ανάλογα με το βαθμό της μετακίνησης που είχε υποστεί, όπως είχε προκύψει από τοπογραφικές μετρήσεις το έτος 1997. Για την εφαρμογή της μεθόδου PS επιλέχθηκαν 135 σκεδαστές από τις πέντε κλάσεις, ύστερα από ανάλυση του πλάτους (amplitude dispersion index) και της φάσης τους (Colesanti et al., 2001), για το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε. Η μέγιστη μετακίνηση που ανιχνεύτηκε είναι της τάξης των 10cm σε χρονικό διάστημα 6 ετών και ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της μετακίνησης για την κλάση με τις σοβαρότερες μετακινήσεις είναι της τάξης του 0.5cm/έτος. Για την αφαίρεση της φάσης της **τοπογραφίας**

χρησιμοποιήθηκε Ψ.Μ.Ε με χωρική ανάλυση 10m, το οποίο δημιουργήθηκε από ψηφιακούς χάρτες υψομετρικών καμπύλων.

Σημειώνεται ότι αν και η μέση τιμή της συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζεύγος ήταν της τάξης του 0.3, τα συμβολογραφήματα αυτά παραμένουν χρήσιμα για το διαχωρισμό των υποψήφιων σταθερών σκεδαστών, καθώς η χωροχρονική ανάλυση περιορίζεται τελικά στα σταθερά σημεία (Suzanne και Sandwell, 2003). Επιπλέον, από την ανάλυση και μοντελοποίηση της φάσης των υποψηφίων σταθερών σκεδαστών διορθώνονται υπολειπόμενοι κροσσοί εξαιτίας σφαλμάτων στον προσδιορισμό των τροχιών και ατμοσφαιρικών τεχνουργημάτων. Επισημαίνεται ότι τουλάχιστον τρεις με τέσσερις υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο είναι απαραίτητοι για τον προσδιορισμό ενός αξιόπιστου μοντέλου διόρθωσης της φάσης (Colesanti et al., 2003). Τελικά, τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου PS σε απεικονίσεις L- καναλιού έδειξαν ότι η μέθοδος είναι αποτελεσματική στην ανίχνευση έντονης καθίζησης, εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους κύματος σε σχέση με τις απεικονίσεις C- και X - καναλιών. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος περιορίζεται στην παρατήρηση συνεχούς και γραμμικής καθίζησης και δεν είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό μη-γραμμικών μετακινήσεων.

Οι **Guéguen et al. (2009)** εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR) και της μεθόδου των Σταθερών Σκεδαστών (PS) στην καταγραφή της υπολειπόμενης καθίζησης (μετά τη φάση της ενεργής εξόρυξης) που οφείλεται σε εξορυκτικές δραστηριότητες για το χρονικό διάστημα είκοσι ετών, σε σύγκριση με τοπογραφικές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποίησαν 88 απεικονίσεις ERS-1 και ERS-2, με περιοδικότητα τριών μηνών, για το χρονικό διάστημα έντεκα ετών (1992 και 2002), καθώς και 19 απεικονίσεις Envisat, για το χρονικό διάστημα τεσσάρων ετών (2004 έως 2007). Τελικά, παρατήρησαν καθιζήσεις με μέγιστη τιμή 4cm από DInSAR, για το χρονικό διάστημα τεσσάρων ετών, οι οποίες συμφωνούν με τις τοπογραφικές μετρήσεις στην περιοχή. Από την εφαρμογή της μεθόδου PS, προέκυψε ότι η μέγιστη τιμή καθίζησης είναι της τάξης του 1cm/έτος, οπότε οι δύο συμβολομετρικές τεχνικές θεωρήθηκε ότι συμφωνούν μεταξύ τους, καθώς και με τις τοπογραφικές μετρήσεις.

Στη μελέτη τους οι **Zhao et al. (2013)** εφάρμοσαν τη μέθοδο offset-tracking σε 15 ζεύγη από έξι απεικονίσεις ALOS-PALSAR, με σκοπό να χαρτογραφήσουν τις μετακινήσεις μεγάλης βαθμίδας σε περιοχή μεταλλείου. Για το λόγο αυτό, οι μετακινήσεις στην πλάγια διεύθυνση που προέκυψαν από κάθε ζεύγος απεικονίσεων, από την εφαρμογή της μεθόδου offset-tracking, χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν χρονοσειρές αθροιστικών μετακινήσεων, μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Σημειώνεται ότι, επειδή η εκτίμηση των offsets βασίζεται στην εφαρμογή του αλγορίθμου αλληλοσυσχέτισης της έντασης (intensity cross-correlation algorithm), η ακρίβεια της εκτίμησης επηρεάζεται από τις μεταβολές στην υγρασία του εδάφους, στη βλάστηση και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες προκαλούν μεταβολές στην ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, στη μελέτη των Zhao et al. (2013) επιλέχθηκαν απεικονίσεις που αντιστοιχούν στη χειμερινή περίοδο, κατά την οποία υπάρχει λιγότερη βλάστηση και βροχή.

Με βάση αυτή την επιλογή των απεικονίσεων, η ακρίβεια προσδιορισμού των offsets στην πλάγια διεύθυνση από τις εικόνες πλάτους ραντάρ εκτιμήθηκε ότι αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση των offsets από την πρώτη χρονική περίοδο που εξετάστηκε, κατά την οποία δεν ήταν ενεργό το μεταλλείο και είναι της τάξης του 0.2m, που αντιστοιχεί στο 1/25 του εικονοστοιχείου. Η ακρίβεια της μεθόδου offset-tracking είναι δυνατόν να προσεγγίσει το 1/30 του εικονοστοιχείου, όπως έχει αποδειχθεί και στις μελέτες των Fialko et al. (2001), Casu et al. (2011) και Jung et al. (2011). Αυτό

σημαίνει ότι με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατό να ανιχνευτούν κατακόρυφες μετακινήσεις που είναι μεγαλύτερες από την ακρίβεια προσδιορισμού των offsets (κατά την πλάγια διεύθυνση), δηλαδή της τάξης μερικών δεκάδων εκατοστών.

Τελικά, από τις έξι απεικονίσεις ALOS-PALSAR παρήχθησαν 15 offset ζεύγη, για το χρονικό διάστημα μεταξύ των ετών 2006 και 2011, με μέγιστη κάθετη βάση της τάξης των 4.5km και μέγιστη χρονική βάση της τάξης των τεσσάρων ετών. Από την ανάλυση των χρονοσειρών των διαδοχικών offset ζευγών, παρόμοια με τη μέθοδο SBAS (Berardino et al. 2002), προέκυψε μέγιστη αθροιστική μετακίνηση της τάξης των 4.5m (ίση περίπου με τη διάσταση ενός εικονοστοιχείου στην πλάγια διεύθυνση) και διαπιστώθηκε ότι η χρονική και χωρική έκταση των μετακινήσεων και η καμπύλη των μετακινήσεων ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αντίθετα, η κλασική συμβολομετρική μέθοδος που βασίζεται στη φάση των απεικονίσεων SAR, απέτυχε να αποτυπώσει τις μεγάλες μετακινήσεις που οφείλονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες, εξαιτίας της απώλειας της συνάφειας, ακόμα και για την ελάχιστη χρονική βάση (46 μέρες).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία των **Samsonov et al. (2013)**, Πολυδιάστατη SBAS (Multidimensional SBAS-MSBAS), επιτρέπει το συνδυασμό απεικονίσεων SAR με διαφορετικές παραμέτρους λήψης, χρονική και χωρική ανάλυση, μήκος κύματος και πόλωση. Οι παραγόμενες χρονοσειρές συμβολογραφημάτων διαθέτουν συνδυασμένη κάλυψη, βελτιωμένη χρονική ανάλυση και χαμηλότερο επίπεδο θορύβου.

Η ανάλυση χρονοσειρών για τη μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε για ένα σύνολο 167 απεικονίσεων ERS – 1/2 και ENVISAT μεταξύ των ετών 1995 και 2009 από μια ανιούσα και μια κατιούσα τροχιά και προέκυψαν 500 διαφορετικά συμβολογραφήματα, εκ των οποίων επιλέχθηκαν να συμμετέχουν στην επίλυση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων αυτά με κάθετη βάση μικρότερη από 400m, χρονική βάση μικρότερη από 1000 μέρες και υψηλή συμβολομετρική συσχέτιση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρονοσειρών με την μέθοδο MSBAS επικυρώθηκαν από τοπογραφικές μετρήσεις μεταξύ των ετών 2006 και 2008 και διαπιστώθηκε ότι οι μετακινήσεις οφείλονται κυρίως στις μεταβολές της συγκέντρωσης του νερού στα μεταλλεία.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, στην περίπτωση που δεδομένα είναι διαθέσιμα από περισσότερες γεωμετρικές λήψης, σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο SBAS (Berardino et al., 2002 και Usai, 2003), συνοψίζονται στα εξής : (1) στην παραγωγή πολυδιάστατων χρονοσειρών μετακίνησης , με κάθετη και οριζόντια (Ανατολή – Δύση) συνιστώσα, (2) στην αδιάκοπη και πυκνή χρονική κάλυψη της περιοχής μελέτης, μιας και όλα τα διαθέσιμα δεδομένα χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών φιλτραρίσματος για τη βελτίωση της αναλογίας σήματος – θορύβου, καθώς και την ανίχνευση παροδικών μετακινήσεων, χαμηλών – συχνοτήτων και περιορισμένης διάρκειας. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που δεδομένα είναι διαθέσιμα από τρεις γεωμετρικές λήψης, συμπεριλαμβανομένης και μιας μη – πολικής τροχιάς, τότε είναι δυνατή η αποσύνθεση (Singular Value Decomposition) του διανύσματος της μετακίνησης από την πλάγια διεύθυνση παρατήρησης LOS στις συνιστώσες της βόρειας, δυτικής και κατακόρυφης διεύθυνσης (Samsonov et al., 2007).

Οι **Castañeda et al. (2014)** μελέτησαν τη δυνατότητα ανίχνευσης μετακινήσεων σε περιοχή ενεργών μεταλλείων άλατος, με την εφαρμογή της μεθόδου SBAS σε 27 εικόνες ERS για τη χρονική διάρκεια πέντε ετών (1995-2000) και κατέληξαν στον προσδιορισμό ζωνών κατακόρυφης μετακίνησης με ακρίβεια της τάξης του μισού εκατοστού, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου. Περιορισμοί της εφαρμογής αποτελούν η μειωμένη συνάφεια λόγω της ύπαρξης βλάστησης και η μειωμένη χωρική ανάλυση του τελικού χάρτη των μετακινήσεων (μέγεθος εδαφοψηφίδας 90m).

Σημειώνεται ότι επιλέχθηκαν προς επίλυση συμβολομετρικά ζεύγη με μέγιστη χωρική βάση 300m και μέγιστη χρονική βάση 1400 μέρες.

Για την ανίχνευση μεταβολών μεγάλης κλίμακας σε περιοχή ενεργών μεταλλείων, στη μελέτη τους οι **Fan et al. (2014)** εφάρμοσαν τη Διαφορική Συμβολομετρία σε συνδυασμό με τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας, για την πρόβλεψη των παραμέτρων των μεταβολών λόγω καθίζησης. Το τελικό μέσο σφάλμα προσδιορισμού της υψομετρικής μεταβολής, σε σύγκριση με δεδομένα χωροσταθμικών μετρήσεων ήταν της τάξης των 30mm.

Οι **Liu et al. (2014)** χρησιμοποίησαν απεικονίσεις TerraSAR-X για την εφαρμογή DInSAR και PSI με σκοπό την ανίχνευση μετακίνησης σε μεταλλείο, σε ορεινή περιοχή. Για την τεχνική PSI, η ανάλυση χρονοσειρών των διαφορικών συμβολογραφημάτων πολλαπλών βάσεων εφαρμόστηκε σε περιορισμένη περιοχή κοντά στα όρια της περιοχής που εμφανίζει μετακίνηση, η οποία προέκυψε από μια αρχική DInSAR επεξεργασία. Έτσι, λοιπόν, τα σημεία των υποψήφιων σταθερών σκεδαστών προέκυψαν στην περίμετρο του μεταλλείου, μετά την εφαρμογή μάσκας για την περιοχή με έντονη μετακίνηση και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την επεξεργασία IPTA (Interferometric Point Target Analysis). Σημειώνεται ότι τα 55 συμβολομετρικά ζεύγη επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν χρονική βάση μέχρι 44 ημέρες.

Οι **Fan et al. (2015)** μελέτησαν την εφαρμογή ενός συνδυασμού των τεχνικών phase – stacking και offset – tracking για την ανίχνευση μετακινήσεων που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες. Στη μεθοδολογία αυτή, οι μικρού μεγέθους μετακινήσεις υπολογίζονται από τις χρονοσειρές διαφορικών συμβολογραφημάτων με χρονική βάση 11 ημερών (phase – stacking), ενώ οι μετακινήσεις μεγάλου μεγέθους υπολογίζονται από την τεχνική offset-tracking από τις απεικονίσεις πλάτους ραντάρ. Από την ανάλυση χρονοσειρών που πραγματοποιήθηκε για 11 απεικονίσεις TerraSAR-X για το χρονικό διάστημα τεσσάρων μηνών προέκυψε ότι η μέγιστη τιμή μετακίνησης είναι της τάξης των 5m και η μέγιστη ταχύτητα 40 mm/ημέρα. Οι μετακινήσεις αυτές δε θα μπορούσαν να ανιχνευτούν με τις τυπικές μεθόδους DInSAR και A-DInSAR. Σε σύγκριση με τοπογραφικές μετρήσεις προέκυψε ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι της τάξης των 15cm στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα από την τεχνική offset-tracking (μετακίνηση κατά αζιμούθιο και πλάγια διεύθυνση) χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν την περιοχή με χαμηλή συνάφεια, στην οποία η τεχνική phase-stacking δεν είναι δυνατό να αποφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι, οι δύο μέθοδοι είναι δυνατόν να συνεργήσουν στην ανίχνευση μετακίνηση σε μια περιοχή με υψηλή βαθμίδα παραμόρφωσης. Τέλος, με την τεχνική offset-tracking είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι μετακινήσεις στην οριζόντια διεύθυνση.

Στη μελέτη τους οι **Paradella et al. (2015)** εφάρμοσαν μια ολοκληρωμένη μέθοδο ανάλυσης απεικονίσεων SAR για την παρακολούθηση και καταγραφή μετακινήσεων, μικρού ή μεγάλου μεγέθους, καθώς και την ανίχνευση των μεταβολών στην επιφάνεια του εδάφους, βασισμένοι στις μεταβολές του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του ραντάρ, σε περιοχή εκτεταμένου ανοικτού ορυχείου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 33 SLC απεικονίσεις TSX-1 StripMap.

Η μεθοδολογία που εφάρμοσαν βασίζεται στην συνδυαστική εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών SAR με σκοπό : (1) την ανίχνευση αργής μετακίνησης (της τάξης μερικών χιλιοστών έως μερικών εκατοστών ανά έτος), μέσω της τεχνικής SqueezeSARTM, (2) την ανίχνευση ταχείας μετακίνησης (της τάξης μερικών μέτρων/έτος) μέσω της ανάλυσης απλών συμβολογραφημάτων με αποκατεστημένη φάση και χαρτών Speckle Tracking (ST), από χρονοσειρές απεικονίσεων πλάτους

ραντάρ για την παρακολούθηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (offset-tracking) και (3) την ανίχνευση αλλαγών στην επιφάνεια του εδάφους μέσω της εφαρμογής μεθοδολογίας ανίχνευσης μεταβολών στις εικόνες πλάτους ραντάρ, από τη σύγκριση της οπισθοσκέδασης μεταξύ δύο εικόνων, πριν και μετά την εμφάνιση της μεταβολής. Έτσι, λοιπόν, από τη μέθοδο ST προκύπτουν χρονοσειρές μετακίνησης, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ταχεία και έντονη μετακίνηση, η οποία δεν είναι δυνατό να ανιχνευτεί μέσω SqueeSARTM. Επιπλέον, η τεχνική ανίχνευσης μετακινήσεων από εικόνες πλάτους ραντάρ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές που η εφαρμογή SqueeSARTM και ST δεν είναι εφικτή, για την παρακολούθηση μεταβολών σε εβδομαδιαία, μηνιαία και γενικά βραχυπρόθεσμη βάση. Τελικά, οι αθροιστικές μετακινήσεις που ανιχνεύτηκαν από τη μέθοδο SqueeSARTM, για την ξηρή περιοχή, εντοπίζονται στους δύο κύριους χώρους απόθεσης αποβλήτων και είναι της τάξης των 20cm.

Οι **Du et al. (2016)** δημιούργησαν χρονοσειρές διαφορικών συμβολογραφημάτων με κοινή master εικόνα, για κάθε σετ απεικονίσεων ALOS-1 PALSAR (23 απεικονίσεις μεταξύ Ιουνίου 2007 και Ιανουαρίου 2011) και ENVISAT ASAR (24 απεικονίσεις μεταξύ Ιουλίου 2007 και Σεπτεμβρίου 2010), με σκοπό την ανίχνευση μετακινήσεων που οφείλονται σε εξορυκτικές δραστηριότητες σε περιοχή ανθρακωρυχείου. Τα αποτελέσματα από τις απεικονίσεις ALOS-1 PALSAR επιβεβαίωσαν ότι η απόδοση του L- καναλιού στην ανίχνευση μετακινήσεων είναι καλύτερη από το C – κανάλι, εξαιτίας της μέγιστης βαθμίδας μετακίνησης που είναι δυνατό να ανιχνεύσει το καθένα, λόγω του διαφορετικού μήκους κύματος. Έτσι, λοιπόν, οι απεικονίσεις ALOS - PALSAR εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους κύματος και της μικρότερης αποσυσχέτισης των ζευγών των απεικονίσεων, σε παρόμοιες τιμές χωρικής βάσης, προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα DS και PS σκεδαστών, οι οποίοι συμβάλουν στην πλεονεκτικότερη ανάλυση των χρονοσειρών, σε σχέση με τις απεικονίσεις ENVISAT.

Στην περίπτωση του ανθρακωρυχείου, όμως, όπου οι μετακινήσεις είναι της τάξης μερικών δεκάδων cm/έτος, η επίλυση των ασαφειών φάσης δυσχεραίνεται και έτσι η μέθοδος των χρονοσειρών δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί με επιτυχία. Με άλλα λόγια, αν η μετακίνηση σε ένα εικονοστοιχείο μεταξύ των δύο απεικονίσεων είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος για ένα κύκλο παρατήρησης (5.9 cm/ 46 μέρες για L- κανάλι και 1.4cm / 35 μέρες για C- κανάλι), τότε είναι πιθανό ότι το σήμα της μετακίνησης δε θα εκτιμηθεί σωστά, παρά μόνο θα ανιχνευτεί η χρονική στιγμή και η τοποθεσία του φαινομένου της μετακίνησης.

Στην περιοχή του ανθρακωρυχείου, λοιπόν, ανιχνεύτηκαν από την ανάλυση χρονοσειρών με τις απεικονίσεις ALOS – PALSAR, τέσσερις λεκάνες μετακίνησης με μέγιστη τιμή ρυθμού μεταβολής της τάξης των 10 cm/έτος, ενώ στις απεικονίσεις ENVISAT ASAR, η χαμηλή συνάφεια των συμβολομετρικών ζευγών, λόγω της εκτεταμένης μη-γραμμικής μετακίνησης, οδήγησε σε μειωμένο αριθμό σταθερών σκεδαστών και αποσυσχέτιση.

2.2.3. Συνδυαστικές μέθοδοι αξιοποίησης οπτικών και SAR δεδομένων

Η αξιοποίηση και συγχώνευση της πληροφορίας από οπτικά και SAR δεδομένα είναι ένα θέμα με ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον και έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι οπτικές και οι SAR απεικονίσεις είναι δυνατό να συνδυαστούν με διαφορετικούς τρόπους με στόχο να βελτιωθούν τα δεδομένα και να ενισχυθεί η ανίχνευση χαρακτηριστικών και μεταβολών. Ο συνδυασμός των δύο τύπων δεδομένων επιτρέπει την καταγραφή της ανακλαστικότητας από την οπτική απεικόνιση, καθώς και την καταγραφή της γεωμετρικής πληροφορίας από την απεικόνιση

SAR, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (Laurin et al., 2013). Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τρία επίπεδα επεξεργασίας : (1) σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel level), (2) σε επίπεδο χαρακτηριστικού (feature level) και (3) σε λογικό επίπεδο (decision level) (Zhang et al., 2014, Ghassemian, 2016).

Συγκεκριμένα, η συγχώνευση των απεικονίσεων (image fusion) σε επίπεδο εικονοστοιχείου είναι μια μέθοδος συνδυασμού μιας απεικόνισης υψηλής φασματικής ανάλυσης με μια υψηλής χωρικής ανάλυσης. Οι επιμέρους στόχοι της συγχώνευσης των απεικονίσεων είναι να βελτιωθεί η χωρική ανάλυση και η γεωμετρική ακρίβεια, να ενισχυθεί η ευκρίνεια των υπό μελέτη χαρακτηριστικών και η δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών, καθώς και να αντικατασταθούν ή να διορθωθούν οι ελλείψεις των δεδομένων (Ghassemian, 2016). Έτσι, το προϊόν που προκύπτει διακρίνεται από υψηλότερη χωρική ανάλυση και διαθέτει γεωμετρική πληροφορία από την απεικόνιση SAR, καθώς και φασματική ανάλυση από την οπτική απεικόνιση (Blaes et al., 2005).

Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη του φαινομένου της κηλίδωσης στις απεικονίσεις SAR αποτελεί περιορισμό στην εφαρμογή συγχώνευσης οπτικών και SAR δεδομένων, καθώς μειώνει την ποιότητα των απεικονίσεων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αφαιρεθεί με κατάλληλο χωρικό φιλτράρισμα σε δύο διευθύνσεις (Maksymiuk et al., 2016). Επίσης, η ανάλυση χρονοσειρών απεικονίσεων SAR συμβάλει, εκτός των άλλων, και στη μείωση της κηλίδωσης, καθώς επιτρέπει το χώρο- χρονικό φιλτράρισμα των απεικονίσεων (Reiche et al., 2014).

Γενικά, η εξαγωγή πληροφορίας η οποία στηρίζεται σε επίπεδο εικονοστοιχείου είναι πιθανό να αποτύχει, καθώς επηρεάζεται από τη γειτονιά του κάθε εικονοστοιχείου. Για το λόγο αυτό προτιμώνται τεχνικές που τεμαχίζουν την εικόνα σε ομοιογενή αντικείμενα και επιτρέπουν τη συγχώνευση της πληροφορίας σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό του εικονοστοιχείου (Hong et al., 2007, Robson et al., 2015). Ένας επιπλέον λόγος που καθιστά σημαντική την εφαρμογή υψηλότερων αντικειμενοστραφών τεχνικών συγχώνευσης οπτικών και SAR απεικονίσεων έγκειται στη δυσκολία συσχέτισης της πληροφορίας της ανακλαστικότητας στην οπτική εικόνα με την πληροφορία της έντασης του σήματος του ραντάρ στις απεικονίσεις SAR, γεγονός που επηρεάζει και τη συμπροσαρμογή των απεικονίσεων (Bigdeli et Pahlavani, 2016).

Σε υψηλότερο επίπεδο συνδυασμού των δεδομένων, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία για την εξαγωγή χαρακτηριστικών στις οπτικές και SAR απεικονίσεις, όπως η κατάτμηση των εικόνων, ο μετασχηματισμός Fourier στο πεδίο των χωρικών συχνοτήτων κ.α (Ghassemian, 2016). Στο υψηλότερο επίπεδο συγχώνευσης δεδομένων, το λογικό επίπεδο, κάθε απεικόνιση έχει υποστεί ταξινόμηση και, στη συνέχεια, τα αποτελέσματα από διαφορετικούς τοπικούς ταξινομητές (local classifiers) συνδυάζονται, ώστε να διαμορφώσουν την τελική απόφαση. Σύμφωνα με τους Dell'Acqua & Gamba (2003) και Stasolla & Gamba (2008), οι μέθοδοι συγχώνευσης απεικονίσεων σε επίπεδο χαρακτηριστικού, όπως αυτές που εφαρμόζουν κατάτμηση της εικόνας, υπερέχουν των μεθόδων συγχώνευσης σε επίπεδο εικονοστοιχείου, καθώς λαμβάνουν υπόψη χαρακτηριστικά μεγέθη της υψής, πέραν των υπόλοιπων χωρικών και φασματικών ιδιοτήτων (Zhang et al., 2014). Η υψή είναι σημαντικό μέτρο για τη ανάλυση των απεικονίσεων SAR, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που το φαινόμενο της κηλίδωσης είναι εξέχον στην απεικόνιση (Laurin et al., 2013, Zhang et al., 2014) και λειτουργεί συνεργατικά με την ανάλυση του συντελεστή οπισθοσκέδασης.

Η συγχώνευση των οπτικών και SAR απεικονίσεων συμβάλει στην ερμηνεία των τύπων εδαφοκάλυψης, μέσω του συνδυασμού της φασματικής πληροφορίας της οπτικής εικόνας με το συντελεστή οπισθοσκέδασης της απεικόνισης SAR. Οι **Maksymiuk et al. (2016)** αναφέρουν ότι διάφορες μελέτες έχουν στηριχθεί στο συνδυασμό των οπτικών και SAR απεικονίσεων με στόχο

να βελτιώσουν την ακρίβεια ταξινόμησης σε αγροτικές περιοχές (Brisco et al., 1989; Schistad-Solberg et al., 1994; Brisco και Brown, 1995; Le Hegarat-Masclé et al., 2000; Ban, 2003; Blaes et al., 2005; Michael et al., 2005; McNairn et al., 2009). Επιπλέον, οι **Laurin et al. (2013)** αναφέρουν ότι πλήθος μελετών στηρίχθηκε στην ανάλυση της υψής από εικόνες Landsat και ALOS-PALSAR για την χαρτογράφηση και ταξινόμηση τροπικών περιοχών (Erasmí και Twele, 2009; Kuplich, 2006; Longepe et al., 2011; Wijaya et al., 2008). Οι ίδιοι εφάρμοσαν πέντε χαρακτηριστικά μεγέθη της υψής (μέσο όρο, εντροπία, συσχέτιση, διακύμανση και δεύτερη παράγωγο στον πίνακα Grey-Level Co-Occurrence GLCM) για απεικονίσεις Landsat TM (κανάλια 4 και 5), AVNIR- 2 (κανάλια 3 και 4) και ALOS-PALSAR (διπλή πόλωση) και πραγματοποίησαν ταξινόμηση της βλάστησης, με τη χρήση των ταξινομητών της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood - MLC) και των Νευρωνικών Δικτύων (Neural Networks – NN). Οι Maksymiuk et al. (2016) χρησιμοποίησαν το μετασχηματισμό βάσει έντασης, απόχρωσης και κορεσμού (intensity, hue, saturation – IHS) και την ολοκλήρωση wavelet για το συνδυασμό πολυφασματικής απεικόνισης χαμηλής ανάλυσης, MODIS με τη χωρική πληροφορία από RADARSAT (ScanSAR, HV πόλωση) και βελτίωσαν έτσι την ακρίβεια της ταξινόμησης σε περιοχές με συναφή είδη χαμηλής βλάστησης.

Επιπλέον, οι **Zhang et al. (2014)** αναφέρουν ότι η συγχώνευση οπτικών και SAR δεδομένων έχει εφαρμοστεί και σε αστικές περιοχές με στόχο την εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας ανθρωπογενών κατασκευών από τη Συμβολομετρία και φασματικής από τις οπτικές εικόνες, σε διάφορες μελέτες (Jiang, Liao, Lin, & Yang, 2009; Weng, 2012; Yang, Jiang, Lin, & Liao, 2009). Οι ίδιοι εφάρμοσαν μια μεθοδολογία συγχώνευσης σε επίπεδο εικονοστοιχείου και χαρακτηριστικού, η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο Random Forest (RF) σε ζεύγη οπτικών και SAR απεικονίσεων, Landsat ETM+ και ENVISAT ASAR, SPOT-5 και ENVISAR ASAR, και SPOT-5 και TerraSAR-X, με στόχο την εκτίμηση των ανθρωπογενών επιφανειών σε αστική περιοχή, με συνολική ακρίβεια 98.44%, σε σύγκριση με δεδομένα εδάφους. Οι **Bigdeli και Pahlavani (2016)** πρότειναν σύστημα ταξινόμησης σε αστική περιοχή από δεδομένα πολλαπλών αισθητήρων και, συγκεκριμένα, με το συνδυασμό φασματικής πληροφορίας από οπτικό δέκτη WorldView-2, υψομετρική πληροφορία από LiDAR και πληροφορία του συντελεστή οπισθοσκέδασης ραντάρ από TerraSAR-X, με την εφαρμογή αλγορίθμων σε λογικό επίπεδο (Support Vector Machine και Θεωρία κατά Bayes, καθώς και ασαφής εφαρμογή K εγγύτερου γείτονα - K Nearest Neighbor), αλλά και σε επίπεδο χαρακτηριστικού, με τη δημιουργία στοίβας των χαρακτηριστικών από κάθε σετ αρχικών δεδομένων. Τέλος, οι Xu et al. (2015) εφάρμοσαν τη συνδυαστική χρήση οπτικών δεδομένων WorldView-2 και απεικονίσεων TerraSAR-X, με σκοπό την εξαγωγή του ύψους των κτιρίων σε αστική περιοχή στις τρεις διαστάσεις (ίχνη κτιρίου 2D από οπτικά δεδομένα με αντικειμενοστραφή ανάλυση και τρίτη διάσταση από Συμβολομετρία – τεχνική TomoSAR).

Η ενσωμάτωση των απεικονίσεων SAR σε αντικειμενοστραφείς μεθοδολογίες ταξινόμησης και ανίχνευσης μεταβολών με τη συνδυαστική χρήση οπτικών και τοπογραφικών δεδομένων πραγματοποιείται και σε μελέτες περιοχών που καλύπτονται από παγετώνες. Οι **Robson et al. (2015)** χρησιμοποίησαν οπτικά δεδομένα Landsat 8, ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM και εικόνες συνάφειας από ζεύγη απεικονίσεων SAR ALOS – PALSAR (HH πόλωση), με στόχο τη δημιουργία μεθοδολογίας αυτοματοποιημένης ταξινόμησης παγετώνων, με συνολική ακρίβεια 91%. Οι ίδιοι στηρίχθηκαν στη μεθοδολογία ανίχνευσης μεταβολών, η οποία βασίζεται στη χωροχρονική ανάλυση του μοτίβου της συμβολομετρικής συνάφειας μεταξύ δύο απεικονίσεων SAR (Zongli, Shiyin, Xin, Jian, & Sichun, 2011; Frey et al., 2012; Saraswat et al., 2013; Snehmani, Gupta, Bhardwaj, & Joshi, 2014). Πέρα από τις τεχνικές παρακολούθησης της έντασης σε απεικονίσεις πλάτους ραντάρ και της συμβολομετρικής συνάφειας (Intensity-tracking, coherence-tracking), οι

Necsoiu et al. (2016), βασισμένοι στη μελέτη των Heid και Kääb (2012), υποστήριξαν ότι για την παρακολούθηση των ταχυτήτων των παγετώνων στις δύο διαστάσεις ενδείκνυται η εφαρμογή τεχνικών ετεροσυσχέτισης (cross-correlation) εφαρμοσμένων στο χώρο των συχνοτήτων σε απεικονίσεις SAR (συσχέτιση φάσης), αλλά και σε οπτικές εικόνες στο ορατό και στο εγγύς – υπέρυθρο φάσμα. Επιπλέον, οι ίδιοι ανέφεραν πλήθος μελετών (π.χ Mattar et al., 1998; Rabus & Fatland, 2000; Nagler, Mayer, & Rott, 2001; Strozzi, Luckman, Murray, Wegmuller, & Werner, 2002; Strozzi et al., 2004), στις οποίες διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή του όγκου των παγετώνων είναι δυνατό να προσδιοριστεί με ανεπτυγμένες μεθόδους Διαφορικής Συμβολομετρίας (π.χ SBAS) με ακρίβεια της τάξης του εκατοστού.

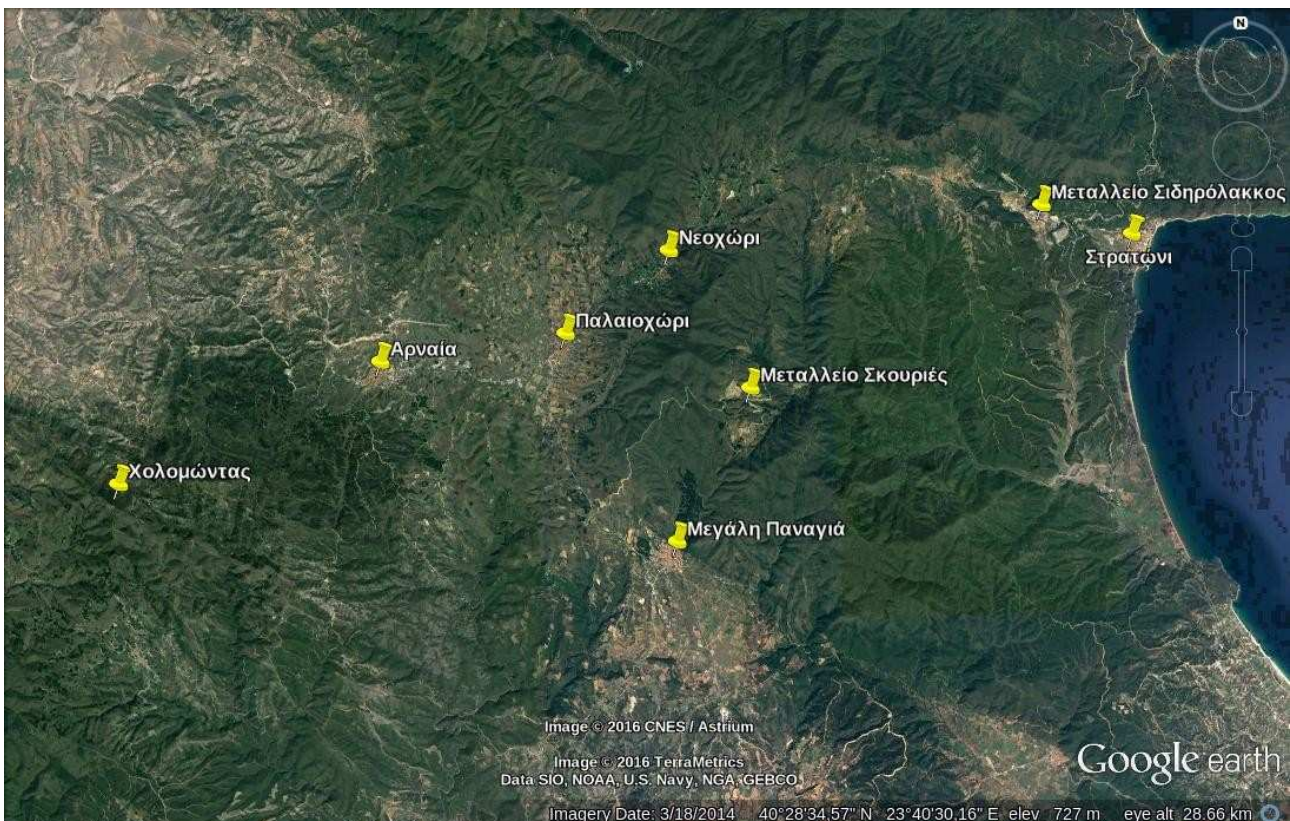
Οι **Reiche et al. (2014)** και οι **Lehmann et al. (2015)** αναφέρονται σε μελέτες που εφάρμοσαν τη συνδυαστική χρήση χρονοσειρών οπτικών και SAR δεδομένων με στόχο την ανίχνευση μεταβολών σε δασώδεις περιοχές (Lehmann et al., 2012; Reiche et al., 2013, Lu et al., 2014), αλλά και τη μεταβολή περιβαλλοντικών μεταβλητών στα δάση, όπως η βιομάζα. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των **Lehmann et al. (2015)** εφαρμόστηκε συνδυαστική μεθοδολογία χρονοσειρών από οπτικά και SAR δεδομένα (Multi-sensor Time-series Fusion approach – MulTiFuse), σε δασώδη έκταση, για το χρονικό διάστημα μεταξύ 2007 και 2010. Στη μελέτη αυτή, διαπιστώθηκε ότι οι χρονοσειρές του κανονικοποιημένου συντελεστή βλάστησης (NDVI) από εικόνες Landsat παρουσιάζουν γραμμική συσχέτιση με τις χρονοσειρές του συντελεστή οπισθοσκέδασης από εικόνες ALOS PALSAR (λόγος HV/HH πολώσεων) και η συνεργατική τους χρήση απέδωσε τις μεταβολές με ακρίβεια 95.5%.

3. Διαφορική Συμβολομετρία για ανίχνευση μεταβολών στο μεταλλείο των Σκουριών

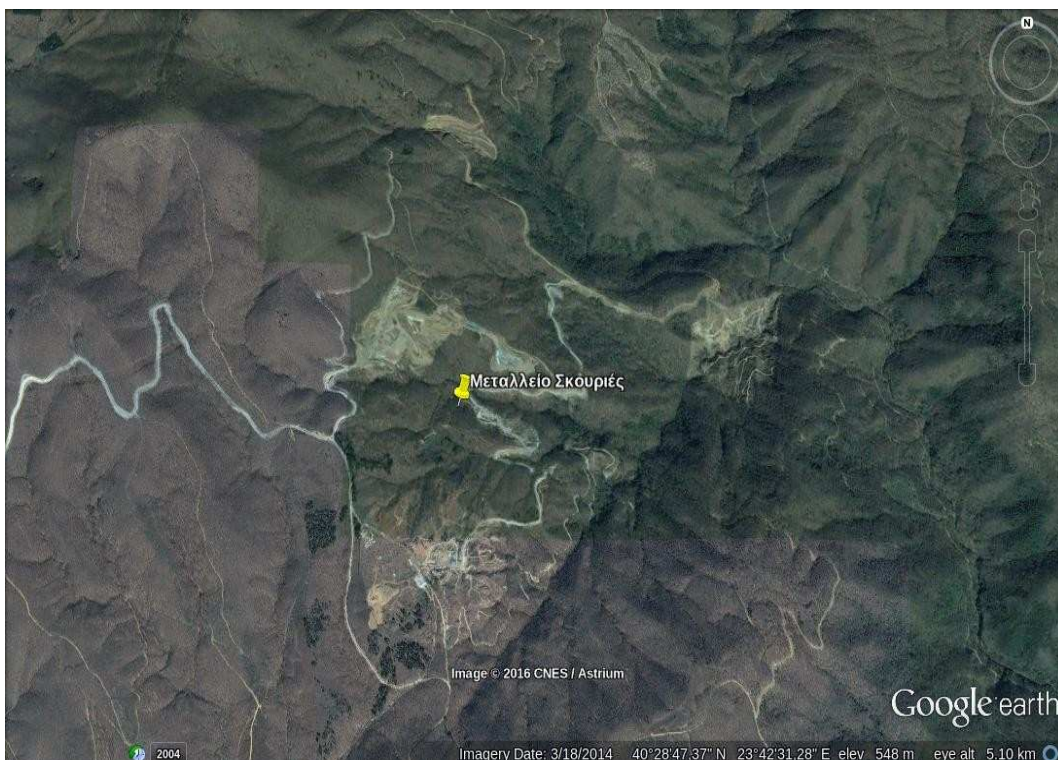
3.1. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή που επιλέχθηκε να μελετηθεί με τη εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας για την ανίχνευση κατακόρυφων μετακινήσεων είναι το μεταλλείο των Σκουριών στη Χαλκιδική, καθώς και η περιβάλλουσα περιοχή επιρροής του.

Το κοίτασμα των Σκουριών βρίσκεται στο Δήμο Αριστοτέλη, σε ίση απόσταση από τα χωριά Μεγάλη Παναγία, Παλαιοχώρι και Νεοχώρι, στο όρος Κακκάβου. Πρόκειται για ένα παγκοσμίου κλάσης πορφυριτικό κοίτασμα το οποίο περιέχει 0,54% χαλκό και 0,83 gr/tonne χρυσό. Έχει κυλινδρική μορφή με μία διάμετρο 200m και εκτείνεται από την επιφάνεια κατακόρυφα προς τα κάτω σε ένα βάθος 800m. Η εξόρυξη του κοιτάσματος γίνεται είτε επιφανειακά κατά το 1/3 και υπογείως κατά τα υπόλοιπα 2/3.



Εικόνα 8: Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Google Earth)



Εικόνα 9: περιοχή μελέτης του μεταλλείου των Σκουριών (Google Earth)

3.2. Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δώδεκα SLC εικόνες Sentinel – 1A (S-1A), για το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου 2014 – Ιανουαρίου 2016, με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντεκα συμβολογραφημάτων, με σκοπό την παραγωγή χαρτών κατακόρυφων μετακινήσεων για την περιοχή μελέτης του μεταλλείου. Τα δεδομένα αυτά, τα οποία δεν είναι οι πρωτογενείς SAR απεικονίσεις, αλλά οι εικόνες SLC (Level 1), όπως έχουν προκύψει μετά από την εφαρμογή της διαδικασίας εστίασης (focusing) , όπως εφαρμόζεται από την ESA, αναζητήθηκαν στον ιστότοπο "<https://scihub.esa.int/>", από όπου και διατέθηκαν με τη δυνατότητα δωρεάν λήψης.

Για της ημερομηνίες λήψεων των εικόνων SLC, που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε η λήψη των τροχιακών δεδομένων ακριβείας του δορυφόρου Sentinel-1A, από τον ιστότοπο "https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux_poeorb/".

Επιπλέον, από τον ιστότοπο "<http://earthexplorer.usgs.gov/>", έγινε η λήψη του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM 1Arc-sec Global, χωρικής ανάλυσης 30x30m, σε 12 "tiles", τα οποία καλύπτουν επαρκώς την περιοχή μελέτης και τα οποία ενώθηκαν σε ένα ενιαίο μοντέλο εδάφους, με κατάλληλη επεξεργασία μέσα στο λογισμικό GAMMA, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα.

3.3. Υλοποίηση μεθοδολογίας και επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων των SLC εικόνων S-1A και την υλοποίησης της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας διπλής διέλευσης (2-pass), με τη χρήση βοηθητικού DEM, με στόχο την παραγωγή χαρτών μετακινήσεων για την περιοχή μελέτης του μεταλλείου των Σκουριών, χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό GAMMA και συγκεκριμένα τα πακέτα αλγορίθμων "Interferometric SAR Processor (ISP)", "Differential Interferometry and Geocoding (DIFF&GEO)" και "Display Tools and Utilities (DISP)".

Η επιλογή των ζευγών των εικόνων που επιλύθηκαν έγινε με κριτήριο την, όσο το δυνατόν, μικρότερη κάθετη βάση μεταξύ των εικόνων από τις διαθέσιμες για τη μελέτη της περιοχής, πρώτον, για τη μέγιστη χρονική περίοδο, κατά την οποία το μεταλλείο ήταν ενεργό, αλλά και, κατά δεύτερο, την χρονική περίοδο στη διάρκεια της οποίας το μεταλλείο ήταν σε παύση λειτουργίας. Για τα ζεύγη αυτά επιλέχθηκε κοινή "master" εικόνα, από τη χρονική περίοδο παύσης λειτουργίας του μεταλλείου, αυτή του Σεπτεμβρίου 2015 (19/09/2015), με επιπρόσθετο κριτήριο, την καλή συμπροσαρμογή της με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε, όπως θα εξηγηθεί σε επόμενη παράγραφο. Οι "slave" εικόνες επιλέχθηκαν με κριτήριο τη σχετικά μικρή βάση, σε σχέση με τις διαθέσιμες για τις χρονικές περιόδους που εξετάστηκαν και επιπρόσθετο κριτήριο τις καλές καιρικές συνθήκες στις ημερομηνίες λήψης των απεικονίσεων, όπως διαπιστώθηκε από τον ιστότοπο ["http://meteosearch.meteo.gr/data/stratoni/"](http://meteosearch.meteo.gr/data/stratoni/), για την περιοχή του Στρατωνίου. Σημειώνεται ότι όλες οι απεικονίσεις είναι από την φθίνουσα (descending) τροχιά 7. Ακολουθεί πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των ζευγών που επιλύθηκαν.

SLC images	Βκάθετη (m)	Βχρονική (days)
18/10/2014	17.66	-336
23/11/2014	162.48	-300
05/12/2014	87.18	-288
17/12/2014	77.83	-276
28/04/2015	40.52	-155
09/07/2015	-132.37	-72
14/08/2015	55.66	-36
26/08/2015	76.00	-24
07/09/2015	8.75	-12
19/09/2015 (master)	0.00	0
01/10/2015	11.92	12
05/01/2016	36.71	108

Πίνακας 7: Εικόνες SLC που επιλέχθηκαν προς επίλυση

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των βημάτων της Διαφορικής Συμβολομετρικής διαδικασίας, όπως υλοποιήθηκε με χρήση εντολών, που αναγράφονται σε κάθε βήμα, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού GAMMA, με βάση τη διαδικασία που προτείνεται στο εγχειρίδιο λειτουργίας του λογισμικού για την επεξεργασία εικόνων S1A.

3.3.1. Συμπροσαρμογή των εικόνων του ζεύγους

Εισαγωγή ζεύγους εικόνων

Πριν από τη βασική επεξεργασία των εικόνων για τη δημιουργία συμβολογραφήματος προηγείται ένα στάδιο προεπεξεργασίας κατά το οποίο οι εστιασμένες εικόνες SLC, μετατρέπονται σε ένα μορφότυπο που είναι συμβατός και γίνεται αντιληπτός από τον συμβολομετρικό επεξεργαστή (interferometric processor) του λογισμικού. Αυτό γίνεται ταυτόχρονα με την εισαγωγή των εικόνων στο λογισμικό, με τη χρήση εντολής, με την οποία “διαβάζεται” τα αρχεία δεδομένων και μεταδεδομένων της εικόνας, καθώς και τα αρχεία παραμέτρων της, όπως παρέχονται για τις εικόνες S-1A, από την ESA και αφορούν σε πληροφορίες βαθμονόμησης και θορύβου του συστήματος. Για τις SLC εικόνες TOPS mode, που συντίθενται από τρία επιμέρους “swaths”, που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη, η διαδικασία εισαγωγής επαναλαμβάνεται για κάθε “swath” (IW1, IW2, IW3) και γίνεται ταυτόχρονα για όλα τα “bursts” αυτών, και για τις δύο εικόνες του ζεύγους προς επεξεργασία.

Σημειώνεται ότι με την εισαγωγή της εικόνας και το “διάβασμα” των αρχείων παραμέτρων, εφαρμόζεται παράλληλα ραδιομετρική διόρθωση, αλλά δεν εφαρμόζονται ειδικές διορθώσεις για τις επικαλυπτόμενες περιοχές των “swaths”. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι οι τιμές της SLC εικόνας αντιστοιχούν σε τιμές του κανονικοποιημένου συντελεστή οπισθοσκέδασης (σ_0), ανηγμένου στην οριζόντια επιφάνεια μέσω της γωνίας πρόσπτωσης του σήματος, για το ελλειψοειδές αναφοράς.

Η εντολή με την οποία υλοποιείται η παραπάνω διαδικασία εισαγωγής των εικόνων είναι η εξής :

par_S1_SLC

Δημιουργία εικόνων multi-looked (MLI)

Στο βήμα αυτό, συντίθενται το μωσαϊκό κάθε εικόνας SLC S-1A (TOPS mode), από τα επιμέρους “swaths” που την απαρτίζουν και επιλέγονται τα επιμέρους “bursts” που περιλαμβάνουν την περιοχή μελέτης. Στο σημείο αυτό, πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των “bursts”, κάθε εικόνας SLC του ζεύγους, ώστε αυτά να αντιστοιχούν σε ανάλογες λωρίδες που απεικονίζουν την ίδια περιοχή μελέτης.

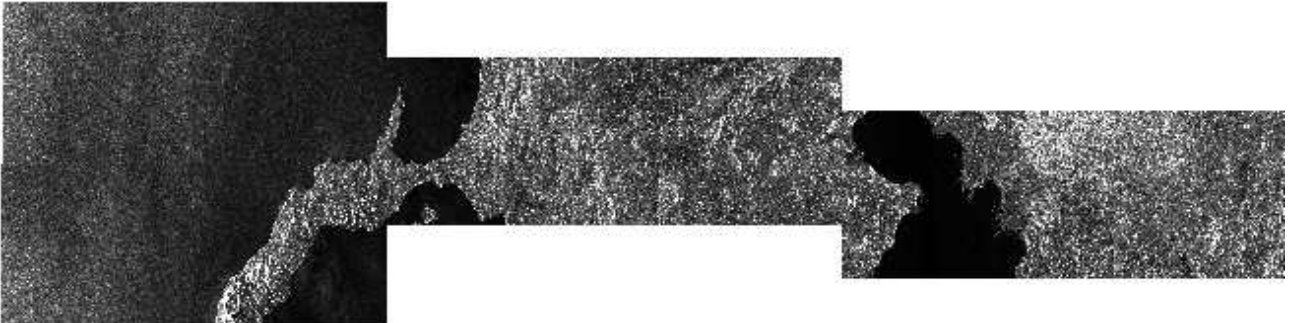
Στη συνέχεια δημιουργείται η εικόνα multi-looked, με την επιλογή κατάλληλου αριθμού όψεων, κατά αζιμούθιο και κατά την πλάγια διεύθυνση, με στόχο τη μείωση της κηλίδωσης της εικόνας και βελτίωση της ραδιομετρικής της πληροφορίας. Σημειώνεται ότι κατά την εφαρμογή multi-looked στην εικόνα, μειώνεται μαζί με το θόρυβο και η χωρική της ανάλυση, γι' αυτό πρέπει να γίνεται βέλτιστη επιλογή παραγόντων multi-looked, που θα εξισορροπούν το θόρυβο σε συνάρτηση και με τη διατήρηση της απαιτούμενης χωρικής ανάλυσης, ανάλογα με την εφαρμογή και την περιοχή μελέτης. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν 1 range look και 5 azimuth looks, με στόχο τη δημιουργία εικονοστοιχείου, διαστάσεων περίπου 25m στο έδαφος, όπως ανάγεται με τη γωνία πρόσπτωσης. Η διαδικασία της επιλογής των “bursts” που καλύπτουν την περιοχή μελέτης, της δημιουργίας ενιαίου μωσαϊκού της εικόνας SLC και, στη συνέχεια, η εφαρμογή multilooking σε αυτή, με στόχο τη μείωση του θορύβου και τη δημιουργία της εικόνας της έντασης (MLI) γίνεται με τη χρήση των παρακάτω εντολών:

SLC_copy_S1_TOPS

SLC_mosaic_S1_TOPS

multi_look

Στη συνέχεια, μετά τη δημιουργία των εικόνων MLI, οι τροχιές ακριβείας διαβάζονται και προσαρτώνται στα αρχεία παραμέτρων των εικόνων με την εντολή *S1_OPOD_vec*.



Εικόνα 10: Εικόνα έντασης multilooked (MLI) για την ημερομηνία 19/09/2015

Στο στάδιο αυτό γίνεται η συμπροσαρμογή των εικόνων του ζεύγους, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία του συμβολογραφήματος σε επόμενο στάδιο. Συγκεκριμένα, η "slave" εικόνα μετασχηματίζεται στη γεωμετρία της "master". Σημειώνεται ότι στην TOPS-mode Συμβολομετρία για τις SLC εικόνες Sentinel-1A, απαιτείται συμπροσαρμογή πολύ υψηλής ακριβείας κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, λόγω της ιδιαίτερης φύσης των δεδομένων TOPS-mode, που αφορά στις έντονες μεταβολές στο Doppler κεντροειδές, που εμφανίζονται μεταξύ διαδοχικών "bursts" των εικόνων. Για την αποφυγή, λοιπόν, της δημιουργίας αυτών των ασυνεχειών φάσης μεταξύ διαδοχικών "bursts", που είναι δυνατό να υπάρξουν, η συμπροσαρμογή των εικόνων θα πρέπει να γίνεται σε επίπεδο της τάξης μερικών εκατοστών του pixel, μέσω μιας επαναλαμβανόμενης διαδικασίας, που περιλαμβάνει, σε πρώτο στάδιο, μια διαδικασία συνταύτισης των εικόνων και, σε δεύτερο στάδιο, εξετάζει τις φασματικές διαφορές μεταξύ διαδοχικών "bursts". Την ακρίβεια συμπροσαρμογής των εικόνων επηρεάζει και η ποιότητα της αναγωγής του μοντέλου εδάφους στη ραντάρ γεωμετρία, αλλά και η ακρίβεια των τροχιακών δεδομένων. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι εντολές της διαδικασίας που ακολουθήθηκαν για τη συμπροσαρμογή των εικόνων των ζευγών, καθώς αποτελεί κρίσιμο βήμα της επιτυχίας της συνολικής διαδικασίας και κριτήριο ποιότητας του ζεύγους.

Αρχικά, υπολογίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού μεταξύ της γεωμετρίας της MLI "master" εικόνας και της MLI "slave" εικόνας (στο σύστημα συντεταγμένων TCN) , που επιτρέπει την αναδειγματοληψία (resampling) της δεύτερης στην πρώτη, με τις εντολές:

rdc_trans

SLC_interp_lt_S1_TOPS

Ακολουθεί η διαδικασία ραφινάρισματος του πίνακα μετασχηματισμού, με τον υπολογισμό των εναπομεινώνων μετατοπίσεων, μετά και την πρώτη χονδρική αναδειγματοληψία της "slave" εικόνας στη "master", μέσω μιας διαδικασίας που εξετάζει την αλληλοσυσχέτιση (cross-correlation, intensity tracking) μεταξύ των δύο εικόνων. Συγκεκριμένα, ένας βέλτιστος αριθμός παραθύρων που ορίζεται από το χρήστη κατανέμεται στην εικόνα και υπολογίζονται μέσα σε αυτά, οι τοπικές μετατοπίσεις από την κανονικοποιημένη ετεροσυσχέτιση τμημάτων των δύο εικόνων έντασης (MLI), σε δύο διαστάσεις. Από τις μετατοπίσεις αυτές, στη συνέχεια, προσδιορίζεται μια

πολυωνυμική καμπύλη προσαρμογής με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η διαδικασία ραφινάρισματος γίνεται με τις εντολές που ακολουθούν. Το μέγεθος του παραθύρου που επιλέχθηκε είναι 256x64, κατά την πλάγια διεύθυνση και τη διεύθυνση των αζιμουθίου, αντίστοιχα, και είναι κατάλληλο για εικόνες μέτριας ανάλυσης (περίπου 25m), όπως αυτές που μελετήθηκαν.

Σημειώνεται ότι δεν εφαρμόζεται υπερδειγματοληψία στις εικόνες, καθώς οι έντονες μεταβολές στη συχνότητα Doppler μεταξύ των διαδοχικών "bursts" θα οδηγούσαν σε σφάλματα.

create_offset

offset_pwr

offset_fit

Τελικά, η "slave" εικόνα μετασχηματίζεται εκ νέου στη γεωμετρία της "master", με το βελτιωμένο πίνακα μετασχηματισμού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου, η διόρθωση στο αζιμουθίο είναι μικρότερη από 0.002 SLC pixel. Ένας δείκτης ποιότητας της συμπροσαρμογής των δύο εικόνων είναι η τυπική απόκλιση του πολυωνυμικού μοντέλου προσαρμογής (<0.3). Τελικά, το αρχείο μετατοπίσεων μεταξύ των δύο εικόνων ανανεώνεται με τις διορθωμένες τιμές μετατόπισης και γίνεται εκ νέου η αναδειγματοληψία της "slave" εικόνας στη "master".

Ακολουθεί μια επιπρόσθετη διαδικασία ραφινάρισματος της συμπροσαρμογής των εικόνων, η οποία εξετάζει τη φασματική διαφοροποίηση των εικόνων του ζεύγους, λαμβάνοντας υπόψη τη διπλή διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών "bursts", με σκοπό την εξάλειψη των ασυνεχειών φάσης που εμφανίζονται λόγω των έντονων μεταβολών στο κεντροειδές Doppler. Αυτές οι διαφορές φάσεων μεταφράζονται σε διορθώσεις κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου, στον πίνακα μετασχηματισμού της μιας εικόνας στην άλλη. Σημειώνεται ότι στη διαδικασία ραφινάρισματος λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιοχές με υψηλή συσχέτιση, όπως ορίζεται από το χρήστη (π.χ πάνω από 0.80). Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται με την εντολή:

S1_coreg_overlap

Η διαδικασία ραφινάρισματος, η οποία εξετάζει τη διαφοροποίηση του φάσματος στις επικαλυπτόμενες περιοχές των "bursts" επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η διόρθωση για τη μετακίνηση του αζιμουθίου να είναι μικρότερη από 0.002 pixel.

Τελικά, η "slave" εικόνα μετασχηματίζεται εκ νέου στη γεωμετρία της "master", με το βελτιωμένο πίνακα μετασχηματισμού.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι, εξαιτίας των έντονων μεταβολών στο κεντροειδές Doppler, μεταξύ διαδοχικών "bursts" των εικόνων είναι πιθανό να υπάρξουν φασματικές αναβαθμίδες κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επεξεργασία των εικόνων SLC, καθώς αυτή η πληροφορία δεν εμφανίζεται στο αρχείο παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να γίνει αφαίρεση αυτών των "rphase ramps" με τη χρήση δύο εντολών, που αφορούν στη "master" και στη "slave" εικόνα, μετά την επιτυχημένη προσαρμογή τους και είναι οι εξής:

S1_deramp_TOPS_reference

S1_deramp_TOPS_slave

Τελικά η δημιουργία συμβολογραφήματος προκύπτει από τη ετεροσυσχέτιση των δύο εικόνων, με τον πολλαπλασιασμό κάθε εικονοστοιχείου της “master” εικόνας με το συζυγή μιγαδικό του αντίστοιχου εικονοστοιχείου στη “slave” εικόνα. Κάθε εικονοστοιχείο του συμβολογραφήματος έχει μια μιγαδική τιμή, το φανταστικό μέρος της οποίας αποτελείται από το πλάτος του κύματος (το μέγεθος του οποίου υποδεικνύει τη συσχέτιση των δύο εικόνων) και το πραγματικό μέρος είναι η συμβολομετρική φάση. Η συσχέτιση των δύο εικόνων, όπως προκύπτει από το πλάτος του κύματος είναι αντιπροσωπευτική της ακρίβειας της πληροφορίας της φάσης και αντανακλάται στην ευκρίνεια των κροσσών συμβολής του συμβολογραφήματος (fringe visibility). Η μειωμένη συσχέτιση έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση θορύβου στο συμβολογράφημα.

Στο λογισμικό GAMMA η δημιουργία του συμβολογραφήματος και η αφαίρεση από αυτό της προσομοιωμένης αποκατεστημένης φάσης της τοπογραφίας, με σκοπό τη δημιουργία του διαφορικού συμβολογραφήματος, γίνεται σε ένα κοινό βήμα, όπως εξηγείται παρακάτω. Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας αναγωγής του ψηφιακού μοντέλου εδάφους στη ραντάρ γεωμετρία.

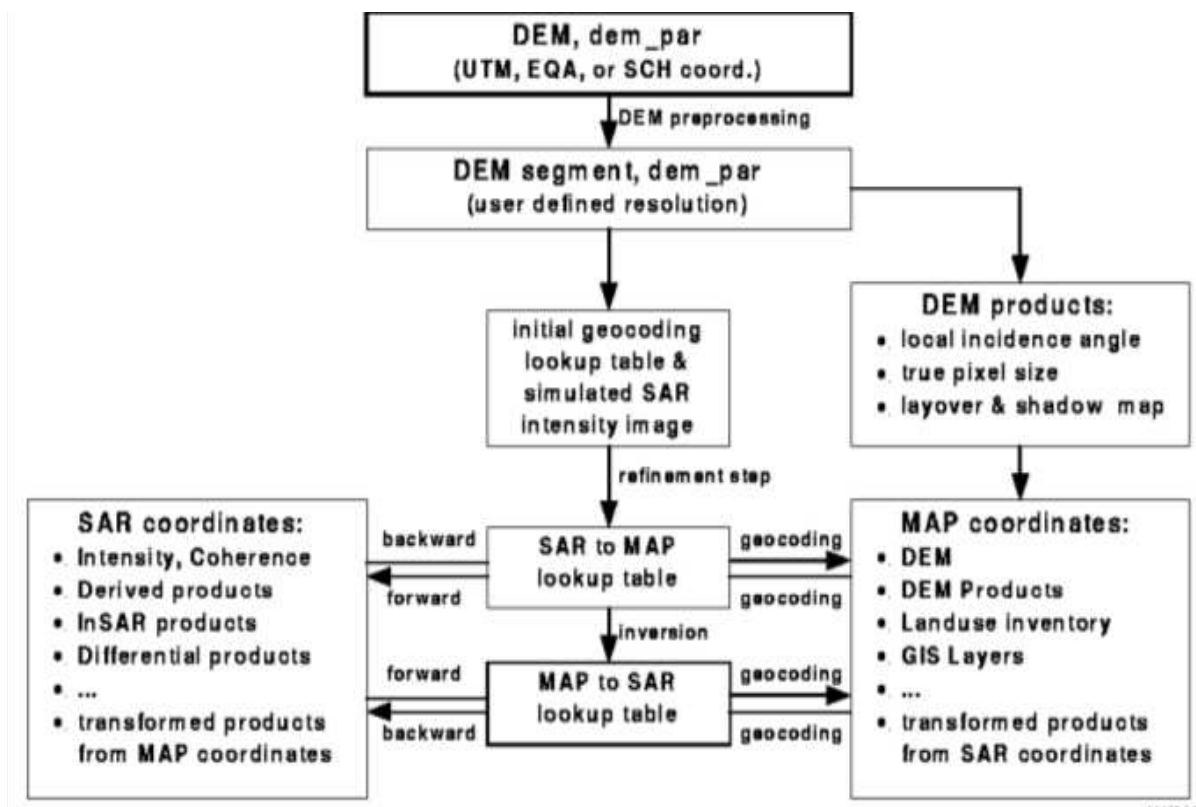
3.3.2. Αναγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους στη ραντάρ γεωμετρία

Η βασική αρχή της Διαφορικής Συμβολομετρίας διπλής διέλευσης στηρίζεται στην προσομοίωση φάσης που συνδέεται με την τοπογραφία της περιοχής ($\Phi_{\text{τοπο}}$), σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Συνήθως το διαθέσιμο Ψ.Μ.Ε είναι ανηγμένο σε χαρτογραφική προβολή, οπότε απαιτείται ο γεωμετρικός μετασχηματισμός των συντεταγμένων του από την προβολή αυτή στη γεωμετρία του ραντάρ (πλάγια διεύθυνση / αζιμούθιο), ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίηση του κατά τη διαδικασία της Διαφορικής Συμβολομετρίας.

Η διαδικασία αυτή, του γεωμετρικού μετασχηματισμού μεταξύ των συντεταγμένων στη γεωμετρία της εικόνας και των συντεταγμένων της χαρτογραφικής προβολής του Ψ.Μ.Ε, ονομάζεται γεωκωδικοποίηση και καθιστά δυνατό το συνδυασμό της πληροφορίας της απεικόνισης SAR με την υψομετρική πληροφορία του Ψ.Μ.Ε.

Η θέση του εικονοστοιχείου-στόχου στο έδαφος προσδιορίζεται από την τομή του κύκλου του διανύσματος της ταχύτητας του κινούμενου ραντάρ με τη γήινη επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη και την πληροφορία αν πρόκειται για ραντάρ δεξιάς ή αριστερής θέασης.

Στο λογισμικό GAMMA, τα βήματα που ακολουθούνται για τη διαδικασία της αναγωγής του Ψ.Μ.Ε στη γεωμετρία του ραντάρ, αλλά και τη διαδικασία του αντίστροφου μετασχηματισμού της απεικόνισης SAR στη χαρτογραφική προβολή του Ψ.Μ.Ε περιγράφονται παρακάτω μαζί με τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής διαδικασίας γεωκωδικοποίησης στο GAMMA

1) Προετοιμασία του Ψ.Μ.Ε και δημιουργία αρχείου παραμέτρων :

create_dem_par

Σημειώνεται ότι τα 12 "tiles" του Ψ.Μ.Ε ενώθηκαν σε ένα ενιαίο μωσαϊκό με την εντολή *multi_mosaic*. Επιπλέον, έγινε η αναδειγματοληψία του Ψ.Μ.Ε σε χωρική ανάλυση 25m (από 30m), ώστε να είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας της έντασης (MLI), μετά το multi-looking (περίπου 25m), με παραμέτρους που ορίστηκαν στην εντολή που προαναφέρθηκε. Επιπλέον έγινε ο μετασχηματισμός του Ψ.Μ.Ε, SRTM μετά τη δημιουργία του μωσαϊκού από Ισογώνια προβολή σε προβολή UTM 34N.

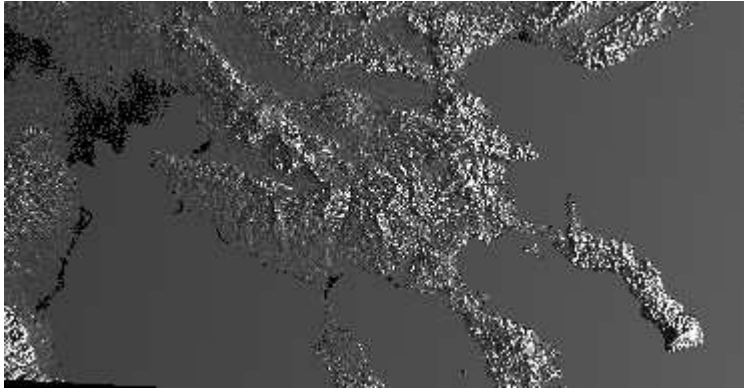
2) Βασικός προσδιορισμός του πίνακα μετασχηματισμού από την χαρτογραφική προβολή στη γεωμετρία του ραντάρ :

gc_map

geocode

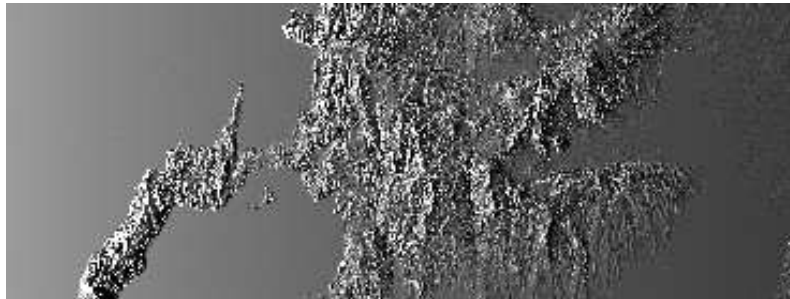
pixel_area

Στο βήμα αυτό δημιουργείται και μια προσομοιωμένη SAR εικόνα έντασης, λαμβάνοντας υπόψη την προσομοιωμένη χωρική ανάλυση και την τοπική γωνία πρόσπτωσης, όπως προκύπτει από την πληροφορία της πραγματικής SAR απεικόνισης και το υψόμετρο από το Ψ.Μ.Ε.



Εικόνα 12: Προσομοιωμένη εικόνα έντασης από το Ψ.Μ.Ε SRTM 1arcsec, σε UTM 34N

Η προσομοιωμένη SAR εικόνα μετασχηματίζεται από την προβολή στη γεωμετρία του ραντάρ. Επιπλέον, υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος συντελεστής οπισθοσκέδασης (σ_0) από την προσομοιωμένη SAR εικόνα, στην κάθετη διεύθυνση, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 13: Προσομοιωμένη εικόνα έντασης από το Ψ.Μ.Ε SRTM 1arcsec, στη ραντάρ γεωμετρία

Σφάλματα στο Ψ.Μ.Ε και στον προσδιορισμό της τροχιάς του δορυφόρου οδηγούν σε σφάλματα στον προσδιορισμό του πίνακα μετασχηματισμού από τη μια γεωμετρία στην άλλη, οπότε υπολογίζονται οι υπολειπόμενες μετακινήσεις μεταξύ της προσομοιωμένης (γ_0) και της πραγματικής SAR εικόνας έντασης (MLI), ώστε να προκύψει ένας διορθωμένος πίνακας μετασχηματισμού, μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία, εφαρμογής των εντολών που ακολουθούν.

3) Ραφινάρισμα του πίνακα μετασχηματισμού από τη χαρτογραφική προβολή στη γεωμετρία ραντάρ :

create_diff_par

offset_pwrn

offset_fitm

Στο βήμα αυτό, υπολογίζονται οι υπολειπόμενες μετακινήσεις μεταξύ της προσομοιωμένης (σ_0) και της πραγματικής SAR εικόνας έντασης (MLI) και στη συνέχεια, ένα πολυώνυμο προσαρμογής σε αυτές. Στην προκειμένη περίπτωση, έγινε ο υπολογισμός μιας σταθεράς μετακίνησης, κατά την πλάγια διεύθυνση και τη διεύθυνση του αζιμουθίου, καθώς τα τροχιακά δεδομένα του Sentinel-1A, είναι υψηλής ακριβείας και κρίθηκε ότι δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός πολυωνύμου. Το παράθυρο αναζήτησης των μετακινήσεων επιλέχθηκε με διαστάσεις 128x128 pixels, με ανάλυση 64x64 pixels, όπως ενδείκνυται για SAR/Ψ.Μ.Ε, χωρικής ανάλυσης της τάξης των 25 m. Γενικά, σε

εδάφη με έντονες κλίσεις όπως στην περίπτωση της περιοχής μελέτης, ενδείκνυται η επιλογή μικρού παραθύρου με υψηλή ανάλυση, για τη βέλτιστη κάλυψη της περιοχής. Επιπλέον, επιλέχθηκε να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό των μετακινήσεως, εικονοστοιχεία με συσχέτιση πάνω από 0.5, μεταξύ της προσομοιωμένης (γ_0) και της πραγματικής SAR εικόνας έντασης (MLI) και παράγοντας υπερδειγματοληψίας (oversampling factor) 8, για πιο ακριβή αποτελέσματα, γεγονός που κατέστησε τη διαδικασία αρκετά χρονοβόρα. Η τελική ακρίβεια της διαδικασίας κρίνεται από την τυπική απόκλιση της προσαρμογής, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από 0.3.

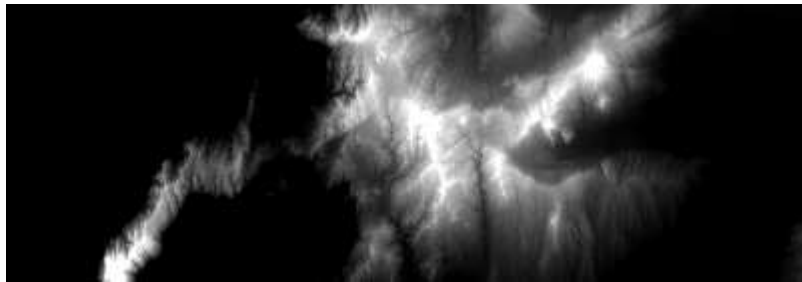
Αναφέρεται ενδεικτικά ότι για μια εικόνα MLI, αυτή της ημερομηνίας 19/09/2015, η διόρθωση που προέκυψε ήταν της τάξης μερικών χιλιοστών SLC pixel, κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, μετά από τρεις επαναλήψεις.

4) Τελικός μετασχηματισμός του Ψ.Μ.Ε στη γεωμετρία του ραντάρ με το διορθωμένο πίνακα μετασχηματισμού :

gc_map_fine

geocode

Το Ψ.Μ.Ε όπως προέκυψε μετά την εφαρμογή της αναγωγής στη γεωμετρία του ραντάρ, για την "master" εικόνα της ημερομηνίας 19/09/2015 παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 14: SRTM 1arcsec, στη γεωμετρία του ραντάρ

3.3.3. Προσομοίωση της αποκατεστημένης φάσης της τοπογραφίας

Μετά το γεωμετρικό μετασχηματισμό του ψηφιακού μοντέλου εδάφους στη γεωμετρία του ραντάρ, καθίσταται πλέον δυνατός ο υπολογισμός της αποκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης που οφείλεται στην τοπογραφία της περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της "master" SAR εικόνας και τη γεωμετρία της χωρικής βάσης του ζεύγους των εικόνων, που επιλέγεται να επιλυθούν. Σημειώνεται ότι στην αποκατεστημένη αυτή φάση, η οποία είναι πραγματικός αριθμός και όχι μιγαδικός, συμπεριλαμβάνεται και ο όρος της επίπεδης γης, μιας και το Ψ.Μ.Ε, από το οποίο υπολογίζεται η προσομοίωση της τοπογραφίας, έχει αναχθεί στη γεωμετρία της εικόνας. Έτσι από το βήμα αυτό, προκύπτει η φάση της τοπογραφίας της περιοχής (συμπεριλαμβανομένου του όρου επίπεδης γης) με την εντολή :

phase_sim_orb

Επισημαίνεται ότι για τη χρήση της εντολής αυτής, δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συμβολογραφήματος του ζεύγους των εικόνων, αλλά η εισαγωγή του πίνακα μετασχηματισμού

όπως έχει προκύψει από τη συμπροσαρμογή τους, καθώς και τα αρχεία παραμέτρων της κάθε εικόνας SLC. Επιπλέον, τονίζεται ότι ο υπολογισμός της χωρικής βάσης μεταξύ των δύο SLC εικόνων, που περιγράφει τη γεωμετρία του ζεύγους δεν υπολογίζεται μόνο από τα τροχιακά δεδομένα ή από την προσαρμογή γραμμικού μοντέλου που περιγράφει τη μεταβολή της βάσης για κάθε εικονοστοιχείο. Αντίθετα, η βάση υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο του ζεύγους, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο από το Ψ.Μ.Ε, την πλάγια απόσταση, το κεντροειδές Doppler κάθε λήψης και τα τροχιακά δεδομένα, όποτε είναι πιο ακριβής ο υπολογισμός της. Η προσέγγιση αυτή ενδείκνυται για εικόνες SLC TOPS-mode, που έχουν αρκετά μεγάλο εύρος και επομένως, έντονες μεταβολές των τιμών της βάσης κατά την πλάγια διεύθυνση.

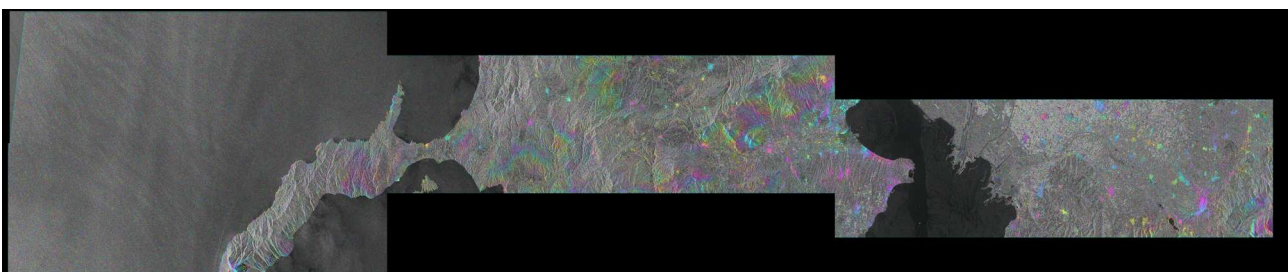
3.3.4. Δημιουργία διαφορικού συμβολογραφήματος

Στο βήμα αυτό σκοπός είναι η δημιουργία του διαφορικού συμβολογραφήματος, όπως προκύπτει από το διαχωρισμό της φάσης της τοπογραφίας, η οποία έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο στάδιο, από τη φάση που οφείλεται σε μετακίνηση στο συμβολογράφημα. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η παρακάτω εντολή :

SLC_diff_intf

Το διαφορικό συμβολογράφημα δημιουργείται απευθείας από το ζεύγος των δύο SLC συμπροσαρμοσμένων εικόνων και την αποκατεστημένη φάση της τοπογραφίας. Στην εντολή αυτή θα πρέπει να οριστούν οι ίδιοι παράγοντες "multi-looking", που είχαν επιλεγεί από την αρχή της διαδικασίας. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα φασματικού φιλτραρίσματος του διαφορικού συμβολογραφήματος κατά πλάτος, ενώ το φασματικό φιλτράρισμα κατά αζιμούθιο δεν είναι σωστό να εφαρμοστεί, σε αυτό το στάδιο, στο συμβολογράφημα, μιας και τα αρχεία παραμέτρων των δύο SLC εικόνων δεν περιλαμβάνουν την πληροφορία των μεταβολών του κεντροειδούς Doppler μεταξύ των διαδοχικών "bursts", η οποία επηρεάζει το αζιμουθιακό φάσμα των εικόνων. Η διαδικασία αυτή της δημιουργίας του διαφορικού συμβολογραφήματος σε ένα βήμα ενδείκνυται για περιοχές με έντονο ανάγλυφο, γι' αυτό και επιλέχθηκε, μιας και λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές κλίσεις για να αποφευχθεί η χωρική αποσυσχέτιση, μεταξύ των εικόνων του ζεύγους.

Το προϊόν που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία είναι στη γεωμετρία του ραντάρ και περιλαμβάνει μιγαδικές τιμές.



Εικόνα 15: Διαφορικό Συμβολογράφημα, με swaths IW1, IW2, IW3, μετά την αφαίρεση της τοπογραφίας

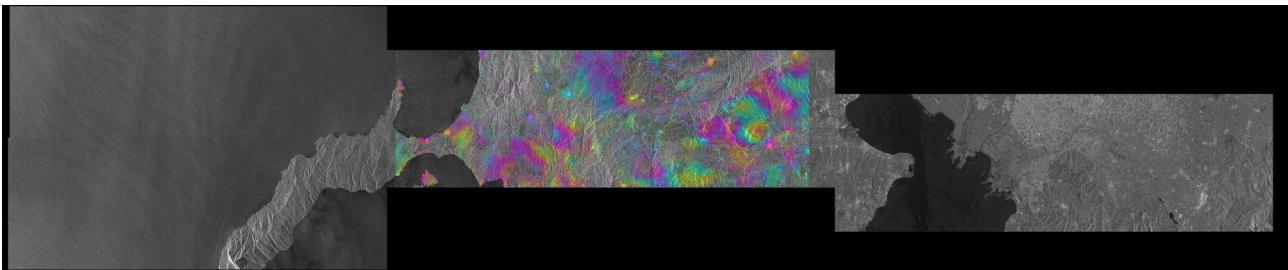
Ακολουθεί η διαδικασία του χωρικού φιλτραρίσματος και της αποκατάστασης της φάσης του διαφορικού συμβολογραφήματος.

3.3.5. Ραφινάρισμα - Φιλτράρισμα διαφορικού συμβολογραφήματος

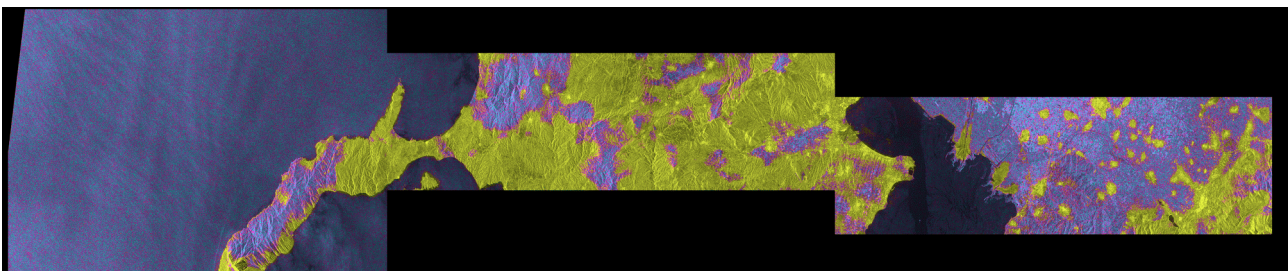
Σκοπός του χωρικού φιλτραρίσματος του διαφορικού συμβολογραφήματος είναι να μειωθεί ο θόρυβος που προκαλείται από την ύπαρξη υπολοίπων στις διαφορές φάσης μεταξύ των εικονοστοιχείων μιας κλειστής διαδρομής, που θα έπρεπε να είναι μηδενικές και δημιουργούνται κυρίως εξαιτίας του θερμικού θορύβου. Έτσι, διευκολύνεται και η αποκατάσταση φάσης που ακολουθεί σε επόμενο βήμα. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί προσαρμοσμένο φιλτράρισμα σε περιοχές στο φάσμα των κροσσών συμβολής (Goldstein et al., 1998). Σημειώνεται ότι το φιλτράρισμα Goldstein εφαρμόστηκε δύο φορές με συντελεστή 0.8 και μικρότερο παράθυρο (από 64 σε 32 pixels), με την εντολή :

adf

Επιπλέον, από την εφαρμογή αυτής της εντολής προκύπτει και η συνάφεια μεταξύ των εικόνων του ζεύγους, ως μέτρο ποιότητας του προϊόντος του διαφορικού συμβολογραφήματος.



Εικόνα 16: Φιλτραρισμένο διαφορικό συμβολογράφημα με προσαρμοσμένο φίλτρο Goldstein, IW2 swath



Εικόνα 17: Συνάφεια συμβολομετρικού ζεύγους μετά την εφαρμογή φίλτρου στο διαφορικό συμβολογράφημα (IW1, IW2, IW3 swaths)

3.3.6. Αποκατάσταση φάσης διαφορικού συμβολογραφήματος

Κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης, προσδιορίζεται για κάθε εικονοστοιχείο ο ακέραιος αριθμός των κύκλων 2π , που θα πρέπει να προστεθεί στην “τυλιγμένη” φάση με πεδίο τιμών από 0 έως 2π , ώστε να προκύψει για κάθε εικονοστοιχείο η απόλυτη διαφορά φάσης. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν διαδοχικές τιμές φάσης σε όλη την εικόνα, με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχουν άλματα φάσεων μεταξύ διαδοχικών σημείων, δηλαδή $\Delta\phi < \pi$, και έχει εξαιρεθεί από τα προηγούμενα βήματα ο θόρυβος και οι υπόλοιπες συνιστώσες της φάσης (τοπογραφία, όρος επίπεδης γης κ.λ.π).

Στο λογισμικό GAMMA δίνεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δύο αλγόριθμους αποκατάστασης φάσης, τον αλγόριθμο “Branch-cut region growing” και τον “Minimum-Cost-Flow” (Werner et al., 2002).

Ο πρώτος αλγόριθμος “Branch-cut region growing” ανιχνεύει ασυνέχειες στις τιμές της φάσης, οι οποίες αποκλείονται από τη διαδικασία αποκατάστασης (Goldstein et al., 1988). Επιπλέον, περιοχές με πολύ χαμηλές τιμές συνάφειας, δε λαμβάνονται υπόψη, καθώς δεν αποτελούν αξιόπιστη πηγή για την ανίχνευση μετακινήσεων (Rosen et al., 1994).

Ο δεύτερος αλγόριθμος “Minimum-Cost-flow” δημιουργεί ένα τριγωνικό δίκτυο τιμών φάσης, βάσει των τεχνικών αναζήτησης διαδρομών ελάχιστου κόστους (Costantini, 1998). Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δημιουργεί ένα πυκνό δίκτυο σημείων. Επιπλέον, σημειώνεται ότι επιτρέπει την εφαρμογή “μασκας” για χαμηλές τιμές συνάφειας, καθώς και την τμηματική αποκατάσταση φάσης, σε “τεμαχία” της εικόνας, που ορίζονται από το χρήστη, γεγονός που ενδείκνυται σε περιπτώσεις ευρέων συμβολογραφημάτων.

Στην περίπτωση του μεταλλείου των Σκουριών επιλέχθηκε ο αλγόριθμος “MCF”. Σημειώνεται ότι δημιουργήθηκε “μάσκα” για τιμές συνάφειας χαμηλότερες από 0.20 και η αποκατάσταση φάσης πραγματοποιήθηκε, με το διαχωρισμό της εικόνας σε δύο τμήματα. Το σημείο εκκίνησης της διαδικασίας αποκατάστασης φάσης επιλέχθηκε, έτσι ώστε να εμφανίζει υψηλή τιμή συνάφειας, μεγαλύτερης από 0.9, και να βρίσκεται σε περιοχή, στην οποία δεν υπάρχει πυκνότητα εμφάνισης κροσσών στο συμβολογράφημα, δηλαδή να είναι σε σταθερό σημείο, μακριά από πιθανή μετακίνηση. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

rascc_mask

mcf

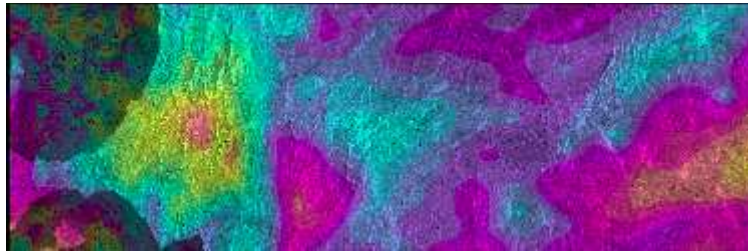


Εικόνα 18: Αποκατεστημένη φάση διαφορικού συμβολογραφήματος

3.3.7. Δημιουργία χάρτη μετακίνησης

Μετά τη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης το διαφορικό συμβολογράφημα που προκύπτει, περιλαμβάνει τις απόλυτες διαφορές φάσης, κατά την πλάγια διεύθυνση, οι οποίες μπορούν να μετατραπούν σε μετακίνηση. Η μετακίνηση αυτή είναι δυνατόν να εκφραστεί σε σχέση με το διάνυσμα θέασης του δέκτη ή σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο ή στο οριζόντιο επίπεδο (με τη χρήση του Ψ.Μ.Ε στη γεωμετρία ραντάρ). Στην προκειμένη περίπτωση, επιλέχθηκε οι μετακινήσεις να εκφραστούν σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο, με την εντολή :

dispmap



Εικόνα 19: Ενδεικτικός χάρτης μετακίνησης για ένα συμβολομετρικό ζεύγος για το swath IW2

3.3.8. Γεωκωδικοποίηση χάρτη μετακίνησης

Στο τελικό αυτό βήμα, εφαρμόζεται η διαδικασία της αντίστροφης γεωκωδικοποίησης της εικόνας των μετακινήσεων, από τη γεωμετρία του ραντάρ στη χαρτογραφική του Ψ.Μ.Ε, με χρήση του πίνακα μετασχηματισμού που δημιουργήθηκε στο στάδιο της αναγωγής του Ψ.Μ.Ε στη γεωμετρία του ραντάρ. Για την αναδειγματοληψία της εικόνας στην χαρτογραφική προβολή χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος γραμμικής παρεμβολής. Το τελικό προϊόν έχει τις διαστάσεις του αρχικού Ψ.Μ.Ε στη χαρτογραφική προβολή UTM 34N, όπως επιλέχθηκε.

3.3.9. Τεχνική Stacking Συμβολογραφημάτων

Η τεχνική Stacking πολλαπλών διαφορικών συμβολογραφημάτων με αποκατεστημένη φάση συμβάλει στη μείωση των ατμοσφαιρικών συνιστωσών, οι οποίες θεωρείται ότι είναι ασυσχέτιστες στο διαχρονική μελέτη των συμβολογραφημάτων. Κάθε ένα συμβολογράφημα συμμετέχει στο stack με βάρος αντιστρόφως ανάλογο της χρονικής του βάσης. Η βασική υπόθεση είναι ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παραμένουν σταθερές από τη μια παρατήρηση στην άλλη. Έτσι, η τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της φάσης που προκύπτει από κάθε συμβολογράφημα είναι ανάλογη της ποσότητας $1/\Delta t$, όπου Δt , η χρονική βάση.

$$\Phi_{rate} = \frac{(\sum_{j=1}^N (\Delta t_j \varphi_j))}{(\sum_{j=1}^N \Delta t_j)^2} \text{var}(\varphi_{rate}) \approx \frac{(\sum_{j=1}^N (\varphi_j - 4 \frac{\pi}{\lambda} \varphi_{rate} \Delta t_j)^2)}{\Delta t_j^2}$$

4. Ανίχνευση μεταβολών από οπτικά δορυφορικά δεδομένα στο μεταλλείο των Σκουριών

4.1 Δεδομένα

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών στο μεταλλείο των Σκουριών, Χαλκιδικής, χρησιμοποιήθηκαν πέντε εικόνες Landsat-8, για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2014 – Ιανουάριος 2016. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ως εικόνα αναφοράς αυτή της ημερομηνίας 26/08/2015 και εικόνες σύγκρισης οι ημερομηνίες 23/08/2014, 04/04/2015, 25/07/2015 και 01/01/2016 αντίστοιχα, με στόχο τη διερεύνηση μεταβολών σε χρονικά διαστήματα αντίστοιχα αυτών των ζευγών των SLC εικόνων, που επιλύθηκαν κατά ζεύγη με τη μεθοδολογία της Διαφορικής Συμβολομετρίας και που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, επιδιώχθηκε η διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης και διαχωρισμού των διαχρονικών αλλαγών που υφίστανται στο μεταλλείο, σε κάθε χρονική περίοδο μελέτης, από τις εποχικές αλλαγές στην περιοχή μελέτης, μεταξύ των εικόνων του ζεύγους 26/08/2015 - 04/04/2015 και 26/08/2015 – 01/01/2016.

Ο δορυφόρος Landsat-8 τέθηκε σε τροχιά λειτουργίας στις 11 Φεβρουαρίου 2013 από την αεροπορική βάση “Vandenberg”, στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α. Πρόκειται για ένα αμερικάνικο δορυφόρο παρατήρησης της γης της NASA, ο οποίος κινείται σε τροχιά γεωσύγχρονη, βρίσκεται σε ύψος περίπου 705km και παρέχει αυξημένη κάλυψη της γήινης επιφάνειας, ανά 16 μέρες. Σε αυτόν είναι προσαρτημένοι δύο δέκτες, “Operational Land Imager” (OLI) και “Thermal Infrared Sensor” (TIRS), οι οποίοι παρέχουν προϊόντα σε μορφή θετικών ακεραίων 16-bit ψηφίων. Ο δέκτης OLI διαθέτει εννέα φασματικά κανάλια, συμπεριλαμβανομένου και του παγχρωματικού, με διακριτική ικανότητα 30 και 15 μέτρων αντίστοιχα, ενώ ο δέκτης TIRS διαθέτει 2 θερμικά κανάλια και ένα που χρησιμοποιείται για βαθμονόμηση, χαμηλότερης διακριτικής ικανότητας.

Οι εικόνες L-8 που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών στο λογισμικό ENVI, διατίθενται δωρεάν στο ιστότοπο “<http://earthexplorer.usgs.gov/>” και αφορούν σε δεδομένα ψηφιακών τιμών ανακλαστικότητας (Digital numbers). Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των αλγορίθμων είναι τα τρία κανάλια του ορατού φάσματος, το εγγύς υπέρυθρο και τα τελευταία μικρού κύματος εγγύς υπέρυθρο.

4.2. Αλγόριθμοι ανίχνευσης μεταβολών στο ENVI

Η ανίχνευση μεταβολών είναι η διαδικασία της αναγνώρισης και εξακρίβωσης διαφοροποιήσεων στην κατάσταση ενός αντικειμένου ή ενός φαινομένου, που παρατηρείται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με τη χρήση δεδομένων από διαφορετικές χρονικές στιγμές καθίσταται δυνατή η καταγραφή των διαχρονικών μεταβολών στο αντικείμενο μελέτης (Singh, 1989).

Στην πράξη, συνήθως η εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών ανίχνευσης μεταβολών στο αντικείμενο μελέτης και η σύγκριση τους αποτελεί σημαντικό τρόπο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοση των διαφορετικών μεθόδων (Lu et al., 2004).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι Ρουγ και M. Hashim (2015) εφάρμοσαν απλή άλγεβρα και λόγους καναλιών σε εικόνες L-8 OLI, καθώς και αλγορίθμους φασματικής χαρτογράφησης σε μεταλλεία εξόρυξης χαλκού για να διαχωρίσουν τα πολύτιμα ορυκτά από τους βραχώδεις όρους της περιοχής καθώς και για να αξιολογήσουν και να καταγράψουν τις μεταβολές του φυσικού τοπίου, λόγω των εξορυκτικών δραστηριοτήτων.

Οι Townsend et al (2009) εφάρμοσαν τεχνικές ανάλυσης διαχρονικών ταξινομήσεων (post-classification techniques) σε τέσσερις εικόνες L8 (για τα έτη 1976, 1987, 1999 and 2006), σε συνδυασμό με λογικούς κανόνες σε δέντρα αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη υδρολογικά δεδομένα, φασματικούς δείκτες βλάστησης, δείκτες από το γραμμικό μετασχηματισμό Tasseled Cap (Principal Component Analysis) και άλλα, με στόχο την ανίχνευση των ενεργών μεταλλείων, το διαχωρισμό αποκατεστημένων ανενεργών εκτάσεων εξόρυξης από τα τμήματα πρασίνου χαμηλής βλάστησης και τη δημιουργία χωροχρονικών χαρτών με τις μεταβολές στις τρεις υπό μελέτη κλάσεις.

Οι Latifovic et al (2004) εφάρμοσαν επίσης μεθόδους ανάλυσης ταξινομήσεων από δυο διαφορετικές εικόνες L-8, για να εξετάσουν τη μεταβολή της φυσικής βλάστησης, μεταξύ των ετών 1990 και 2000, εξαιτίας εξορυκτικών δραστηριοτήτων, σε αμμώδη εδάφη. Μεταξύ άλλων, ο Collins (1996) αξιολόγησε την επιτυχία ανίχνευσης μεταβολών, εφαρμόζοντας σε εικόνες Landsat, διαφορετικούς αλγορίθμους γραμμικού μετασχηματισμού της εικόνας σε δασώδεις περιοχές (Radke, 2004)..

Οι αλγόριθμοι ανίχνευσης μεταβολών που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν για την ανίχνευση μεταβολών στο μεταλλείο των Σκουριών συνοψίζονται σε δύο είδη: Πρώτον, σε αυτούς που στηρίζονται στην απλή άλγεβρα εικόνας και εξετάζουν τις διαφορές χαρακτηριστικών δεικτών μεταξύ δύο εικόνων διαφορετικής ημερομηνίας, pixel-προς-pixel (Image Difference) και δεύτερον, σε αυτούς που μετασχηματίζουν τις εικόνες σε ένα νέο χώρο διαστάσεων, βάσει των ιδιοδιανυσμάτων τους και εξετάζουν την ανάλυση κύριων συνιστωσών των εικόνων, ώστε να προκύψουν τα χαρακτηριστικά των αλλαγών (Image Transform).

Από την πρώτη ομάδα αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών εφαρμόστηκαν : διαφορά στο δείκτη βλάστησης **NDVI** και η διαφορά στη **φασματική γωνία** (spectral angle) μεταξύ των εικόνων του ζεύγους. Από τη δεύτερη ομάδα αλγορίθμων μετασχηματισμού εξετάστηκαν οι **PCA**, **MNF** και **ICA**.

Πριν από την επεξεργασία των ζευγών των εικόνων με την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών, εφαρμόστηκε σε αυτές ραδιομετρική διόρθωση μέσα στο λογισμικό ENVI, η οποία εφαρμόζει "gain and offset" στην εικόνα σύγκρισης, έτσι ώστε να αποκτήσει την ίδια μέση τιμή και τυπική απόκλιση με την εικόνα αναφοράς. Επιπλέον, εφαρμόστηκε αφαίρεση σκοτεινών αντικειμένων (Dark object subtraction), καθώς λόγω του έντονου αναγλύφου στην περιοχή μελέτης, εμφανίζονται πολλές σκιές, που δυσχεραίνουν τη διαδικασία ανίχνευσης μεταβολών. Έτσι, μειώνονται αισθητά ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων αναφοράς και σύγκρισης, που οφείλονται σε ανωμαλίες στις συνθήκες λήψης και φωτισμού της περιοχής μελέτης.

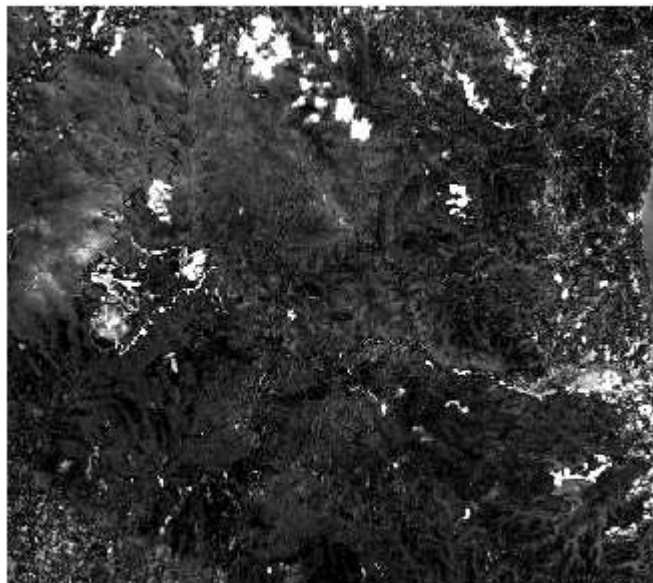
4.3. Διαφορά φασματικών γωνιών εικόνων

Ο αλγόριθμος αυτός πραγματοποιεί ανάλυση της διαφοράς μεταξύ των φασματικών γωνιών δύο εικόνων. Συγκεκριμένα, καθορίζεται η φασματική ομοιότητα μεταξύ του φάσματος της πρώτης εικόνας αναφοράς και της δεύτερης εικόνας σύγκρισης, από τον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ των δύο φασμάτων, τα οποία αντιμετωπίζονται ως διανύσματα στο χώρο με διαστάσεις ίσες με τον αριθμό των καναλιών. Ο αλγόριθμος ενδείκνυται για υπερφασματικά δεδομένα, αλλά εδώ χρησιμοποιήθηκε για το λόγο ότι χρησιμοποιήθηκαν και τα επτά κανάλια της εικόνας και θεωρείται ότι η πληροφορία των μεταβολών που υφίστανται στην περιοχή μελέτης δε βρίσκεται σε ένα μόνο κανάλι αλλά αντανακλάται στη διαφοροποίηση περισσότερων καναλιών.

Η τεχνική αυτή θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από μεταβολές φωτισμού και ανακλαστικότητας, όταν εφαρμόζεται σε εικόνες που έχουν υποστεί διορθώσεις στις τιμές ανακλαστικότητας (Kruse et al., 1993).

Έτσι, λοιπόν, εξετάζεται η κατεύθυνση των διανυσμάτων του φάσματος μεταξύ των δύο εικόνων και αναμένεται ότι οι μεταβολές που εμφανίζονται μεταξύ δύο εικόνων προκαλούν έντονες μεταβολές στη φασματικές υπογραφές της επιφάνειας (Phua et al, 2008).

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η εικόνα της διαφοράς γωνιών φασματικών για το ζεύγος **26/08/2015 - 23/08/2014 :**



Εικόνα 20: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26/08/2015 - 23/08/2014

4.4. Διαφορά δεικτών NDVI

Ο κανονικοποιημένος συντελεστής βλάστησης NDVI μετατρέπει τα πολυφασματικά δεδομένα σε μια εικόνα, στην οποία η κατανομή της βλάστησης εμφανίζεται φωτεινή. Για την εικόνα Landsat-8, ο δείκτης NDVI υπολογίζεται ως εξής :

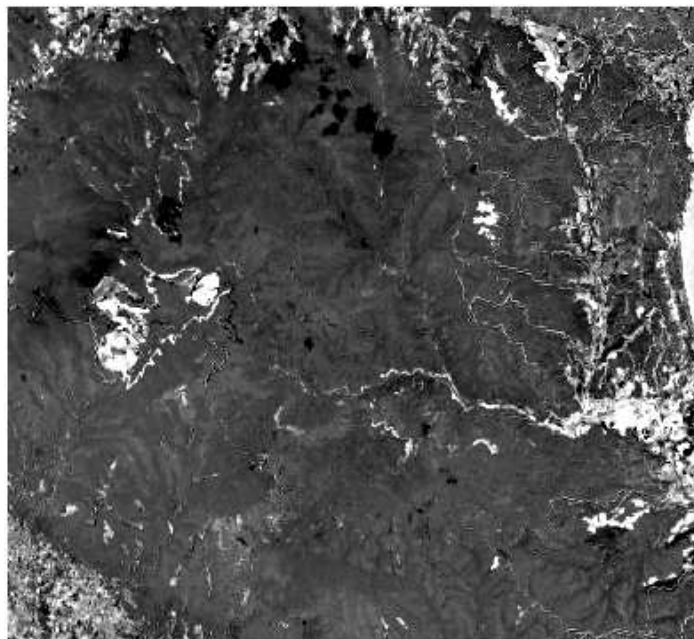
$$NDVI = (\text{Κανάλι 5} - \text{Κανάλι 4}) / (\text{Κανάλι 5} + \text{Κανάλι 4})$$

Ο δείκτης βλάστησης NDVI θεωρείται ότι ενισχύει με αποτελεσματικό τρόπο τη διαφορά μεταξύ των φασματικών χαρακτηριστικών της εικόνας και καταστέλλει τις αρνητικές επιδράσεις του αναγλύφου (σκίαση κτλ). Έτσι η διαφορά μεταξύ των δεικτών βλάστησης δύο εικόνων αποδεικνύεται αποτελεσματική στην ανίχνευση μεταβολών (Lu et al., 2005).

Στην εικόνα αυτή με τις τιμές της διαφοράς μεταξύ των δεικτών βλάστησης δύο εικόνων, για κάθε εικονοστοιχείο, οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν περιοχές μείωσης της βλάστησης (π.χ αποψίλωση δέντρων).

Γενικά, σημειώνεται ότι ενώ οι τεχνικές απλής αφαίρεσης μεταξύ δύο εικόνων αποτελούν μια απλή διαδικασία, της οποίας το αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευτεί εύκολα, έχει αποδειχθεί ότι είναι πιθανό να υπερεκτιμούν τις μεταβολές που ανιχνεύουν (Akin, 2009).

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η εικόνα της διαφοράς των δεικτών βλάστησης NDVI για το ζεύγος **26/08/2015 - 23/08/2014** :



Εικόνα 21: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26/08/2015 - 23/08/2014

4.5. Αλγόριθμος μετασχηματισμού PCA

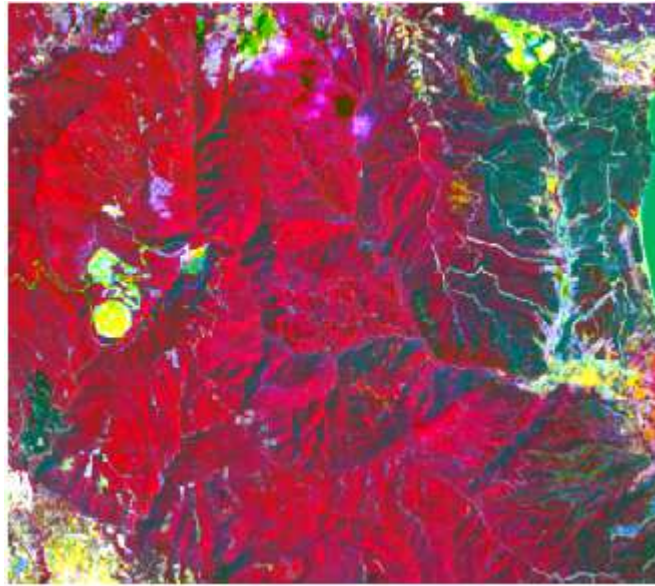
Ο αλγόριθμος της ανάλυσης των κυριών συνιστωσών (PCA), όταν εφαρμόζεται σε μια πολυφασματική εικόνα παράγει ασυσχέτιστα κανάλια, με σκοπό να απομονώσει τις συνιστώσες του θορύβου από την αξιοποιήσιμη πληροφορία και να μειώσει τη διάσταση των δεδομένων. Η παραγωγή ασυσχέτιστων καναλιών γίνεται με την περιστροφή των δεδομένων της εικόνας, ώστε να μεγιστοποιείται η μεταβλητότητα τους όταν προσαρμόζονται σε ένα νέο σύστημα ορθογώνιων αξόνων, με αρχή στη μέση τιμή τους.

Ο προσδιορισμός των κύριων συνιστωσών στηρίζεται στα ιδιοδιανύσματα του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των συγχωνευμένων δεδομένων των δύο εικόνων, στα οποία εφαρμόζεται γραμμικός μετασχηματισμός, από τον οποίο προκύπτει το είδος της πληροφορίας και το βάρος με το οποίο κάθε μεταβλητότητα συμμετέχει σε κάθε κύρια συνιστώσα (Afify, 2011). Έτσι, οι περιοχές, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν μεταβολές, παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των εικόνων (περιοχές αντίστοιχης μεταβλητότητας μεταξύ των δύο εικόνων) και εμφανίζονται στις πρώτες κύριες συνιστώσες, μιας και αντικατοπτρίζουν τη μέγιστη δυνατή μεταβλητότητα από τα δεδομένα των δύο εικόνων. Αντίθετα, οι περιοχές που περιλαμβάνουν τις μεταβολές δεν εμφανίζονται με την ίδια σημαντικότητα και στις δύο εικόνες οπότε παρουσιάζουν μικρές τιμές συσχέτισης και εμφανίζονται στις τελευταίες συνιστώσες.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις στην εφαρμογή του αλγορίθμου PCA. Η πρώτη, όπως μελετήθηκε μεταξύ άλλων και από τους Jensen [1996] και Niemeier et al. [1999], αντιμετωπίζει τις δύο εικόνες που εξετάζονται ως ένα ενιαίο κύβο (image cube) με τις δύο διαστάσεις να συμβαδίζουν με τις διαστάσεις των εικόνων και την τρίτη διάσταση να αποτελείται από το σύνολο των καναλιών των δύο εικόνων σε υπέρθεση (Radke, 2004). Στη δεύτερη προσέγγιση, όπως μελετήθηκε από τον Gong (1993), ο αλγόριθμος PCA εφαρμόζεται στην εικόνα της διαφοράς όπως προκύπτει από την αλγεβρική αφαίρεση της εικόνας σύγκρισης από την εικόνα αναφοράς, pixel-προς-pixel, έτσι ώστε οι περιοχές που έχουν μεταβληθεί εμφανίζονται στην πρώτη και δεύτερη συνιστώσα της εικόνας της διαφοράς (Radke, 2004).

Στην πρώτη προσέγγιση μετασχηματισμού PCA, αυτή της δημιουργίας του κύβου από την υπέρθεση του συνόλου των καναλιών των δύο εικόνων, από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών του συνόλου των δεδομένων, προκύπτει ότι οι μεγάλες ιδιοτιμές ανακλούν τμήματα της εικόνας που δεν έχουν μεταβληθεί και σχετίζονται με τη συνολική σκέδαση ή με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και για το λόγο αυτό εμφανίζονται στις πρώτες κύριες συνιστώσες της εικόνας μετασχηματισμού. Αντίθετα, μικρές ιδιοτιμές αντιστοιχούν σε τμήματα της εικόνας που έχουν μεταβληθεί και δεν είναι στατιστικά σημαντικές και για το λόγο αυτό εμφανίζονται στις μικρότερες συνιστώσες της εικόνας μετασχηματισμού (Afify, 2011). Σημειώνεται ότι η δυσκολία της μεθόδου έγκειται στην ανίχνευση των συνιστωσών που είναι αντιπροσωπευτικές των αλλαγών. Τέλος, αναφέρεται ότι ο αλγόριθμος PCA δεν είναι κατάλληλος για το διαχωρισμό του θορύβου από την πραγματική πληροφορία της εικόνας και δεν είναι αποτελεσματικός στην περίπτωση που τα δεδομένα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή (J.Zhong & R. Wang, 2006) γι' αυτό και εφαρμόστηκαν και οι αλγόριθμοι MNF και ICA, οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η εικόνα RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος **26/08/2015 - 23/08/2014, για την περιοχή μελέτης του μεταλλείου :**

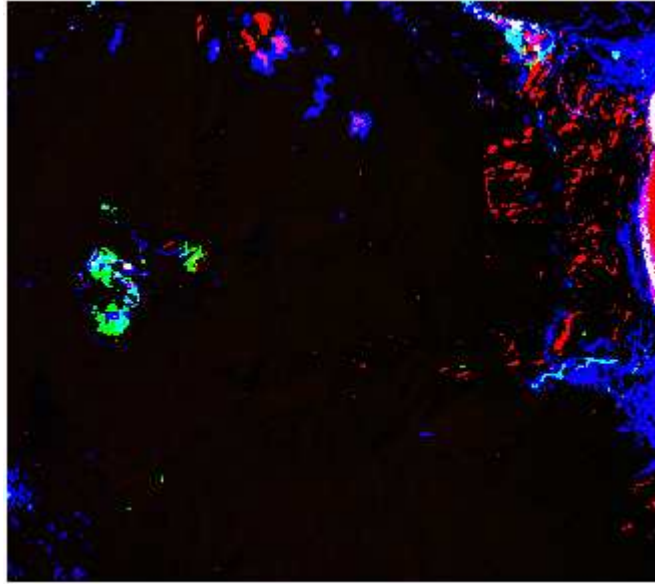


Εικόνα 22: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014

4.6. Αλγόριθμος μετασχηματισμού MNF

Ο αλγόριθμος μετασχηματισμού Minimum noise fraction (MNF), όπως τροποποιήθηκε από τον Green et al. (1988) και υλοποιήθηκε στο λογισμικό ENVI, αποτελεί ένα γραμμικό μετασχηματισμό που αποτελείται από δύο στροφές της ανάλυσης κύριων συνιστωσών. Η πρώτη στροφή συμβαίνει έτσι ώστε οι κύριες συνιστώσες της μεταβλητότητας του θορύβου της εικόνας να αποσυσχετίζονται με αποτέλεσμα την αποκλιμάκωση του θορύβου (noise whitening). Έτσι, ο θόρυβος αποκτά μοναδιαία μεταβλητότητα και μηδενική συσχέτιση μεταξύ των μετασχηματισμένων καναλιών. Η δεύτερη στροφή εφαρμόζεται στις κύριες συνιστώσες, μετά την αφαίρεση του θορύβου, με την εφαρμογή της πρώτης στροφής, με σκοπό την ανακλιμάκωση των δεδομένων με την τυπική απόκλιση του θορύβου. Τελικά, από το μετασχηματισμένο χώρο των δεδομένων της εικόνας προκύπτει ότι εκεί που κυριαρχούν οι υψηλές ιδιοτιμές, οι μετασχηματισμένες εικόνες είναι συναφείς και εκεί που οι ιδιοτιμές είναι κοντά στη μονάδα, στις εικόνες κυριαρχεί ο θόρυβος. Έτσι, λοιπόν, η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού του μετασχηματισμού των κυρίων συνιστωσών οδηγεί στην αύξηση της αναλογίας του σήματος προς το θόρυβο (Signal-to-noise ratio) και στη μείωση του υπολογιστικού κόστους στην περαιτέρω επεξεργασία της εικόνας (Boardman et al., 1994).

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η εικόνα RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος **26/08/2015 - 23/08/2014**, για την περιοχή μελέτης του μεταλλείου :



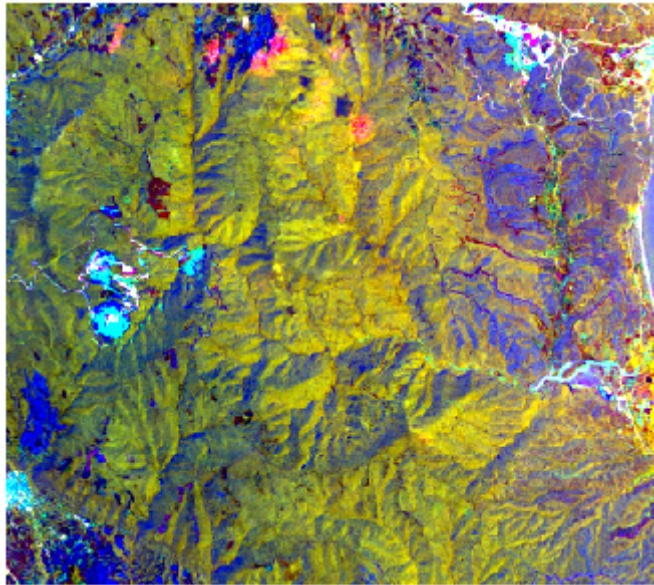
Εικόνα 23: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014

4.7. Αλγόριθμος μετασχηματισμού ICA

Ο αλγόριθμος ανάλυσης των ανεξάρτητων συνιστωσών της εικόνας (Independent Component Analysis, ICA) αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για το διαχωρισμό του θορύβου από τις πραγματικές αλλαγές και, εν δυνάμει, τις διαφορετικές μορφές αλλαγών. Σκοπός του αλγορίθμου ICA είναι η εξαγωγή συνιστωσών με υψηλή στατιστική ανεξαρτησία, με την εφαρμογή μη γραμμικού μετασχηματισμού στην εικόνα. Επιπλέον, συνίσταται για την αποσύνθεση εικόνων σε ανεξάρτητες συνιστώσες, όταν τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή (J.Zhong & R. Wang, 2006).

Αν το χαρακτηριστικό ενδιαφέροντος καταλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό των εικονοστοιχείων της εικόνας, τότε η συμβολή του στον πίνακα μεταβλητότητας δεν είναι σημαντική. Στην ανάλυση κύριων συνιστωσών PCA το χαρακτηριστικό αυτό θα εξομοιωθεί με το θόρυβο, ενώ στην ανάλυση των ανεξάρτητων συνιστωσών ICA, θα διαχωριστεί από το θόρυβο και θα αναδειχθεί.

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η εικόνα RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος **26/08/2015 - 23/08/2014, για την περιοχή μελέτης του μεταλλείου :**



Εικόνα 24: Σύνθετο RGB για τα κανάλια (1,2,3) του μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26/08/2015 - 23/08/2014

4.8. Εύρεση κατάλληλου κατωφλίου για την απόδοση των μεταβολών

Στις εικόνες που προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών, είτε αυτών της απλής άλγεβρας, είτε αυτών της ανάλυσης των συνιστωσών της εικόνας, που εμφανίζουν περισσότερα από ένα κανάλια, θα πρέπει να εφαρμοστεί κατάλληλο κατώφλι που θα αναδεικνύει τις πραγματικές μεταβολές της εικόνας. Η επιλογή του βέλτιστου κατωφλίου πραγματοποιείται μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία αξιολόγησης της δυαδικής εικόνας, που προκύπτει για κάθε κατώφλι, στην οποία η τιμή "0" ανατίθεται στις αμετάβλητες περιοχές και η τιμή "1" στις περιοχές των μεταβολών, όπως έχουν προκύψει για συγκεκριμένο τρίπτυχο αλγορίθμου-καναλιού-κατωφλίου, σε σύγκριση με δεδομένα αναφοράς (ground truth) (Afify, 2011).

Συνήθως, στις περιπτώσεις των δεδομένων που προσεγγίζουν την κανονική κατανομή, το κατώφλι προκύπτει σε διάστημα ανάλογο της τυπικής απόκλισης της κατανομής των τιμών της εικόνας (S.Berberoglu & A.Akin,2009). Γενικά αναφέρεται ότι εικονοστοιχεία, που δεν ανακλούν ή ανακλούν λίγο στα κανάλια που είναι αντιπροσωπευτικά των μεταβολών, κατανέμονται κοντά στο μέσο όρο της κατανομής συχνοτήτων των τιμών της εικόνας, ενώ τα εικονοστοιχεία που έχουν μεταβληθεί κατανέμονται στα άκρα του ιστογράμματος κατανομής συχνοτήτων (Singh, 1986).

5. Αποτελέσματα

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο και την επεξεργασία των ζευγών των SLC εικόνων **Sentinel-1A (S1A)** με το λογισμικό GAMMA, προέκυψαν χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements maps) για την περιοχή μελέτης. Οι χάρτες αυτοί δημιουργήθηκαν για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία εξετάστηκαν με σκοπό την ανίχνευση μετακινήσεων στο μεταλλείο των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου και στον περιβάλλοντα χώρο αυτών.

Για αντίστοιχα χρονικά διαστήματα με αυτά των ζευγών των SLC εικόνων S1A, παρουσιάζονται επίσης οι χάρτες με τις αλλαγές, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών (Difference NDVI, Difference SpectralAngle, PCA, MNF, ICA) σε εικόνες **Landsat-8 (L8)**, με το λογισμικό ENVI, σε κάποιες υποπεριοχές της περιοχής μελέτης (2-3), οι οποίες επιλέχθηκαν με γνώμονα την ύπαρξη μετακίνησης στους χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων από τα ζεύγη S1A, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα ανίχνευσης της αιτίας τους από τις οπτικές εικόνες.

Πιο συγκεκριμένα, η επεξεργασία για τη δημιουργία των χαρτών κατακόρυφης μετακίνησης έγινε με "master" εικόνα αυτή της ημερομηνίας **19/09/2015** για κάθε ζεύγος S1A, που επιλύθηκε με "slave" εικόνες αυτές των ημερομηνιών **18/10/2014, 23/11/2014, 05/12/2014** και **17/12/2014** αντίστοιχα. Τα ζεύγη αυτά επιλέχθηκαν, καθώς αναμένεται να περιλαμβάνουν τις μεταβολές στο μεταλλείο. Επιπλέον, με την ίδια "master" εικόνα αυτή του Σεπτεμβρίου 2015, επιλέχθηκαν οι "slave" εικόνες **09/07/2015, 14/08/2015, 26/08/2015, 07/09/2015, 01/10/2015** και **05/01/2016**. Οι εικόνες του 2015, σε κοντινές ημερομηνίες με τη "master" του Σεπτεμβρίου, για τους μήνες του Αυγούστου, του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου αναμένεται να μην περιλαμβάνουν μεταβολές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ζεύγη του 2014, καθώς το διάστημα αυτό το μεταλλείο δε βρισκόταν σε λειτουργία.

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών στις **εικόνες L8**, επιλέχθηκε ως εικόνα αναφοράς αυτή της ημερομηνίας **26/08/2015** και **εικόνες σύγκρισης οι ημερομηνίες 23/08/2014, 04/04/2015, 25/07/2015** και **01/01/2016** αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δύο ομάδων δεδομένων S1A και L8 παρουσιάζονται κατά χρονική περίοδο μελέτης και αντιστοιχούν σε **τέσσερις συνολικά χρονικές περιόδους**, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά, εξετάστηκε η **μέγιστη χρονική περίοδος** που αντιστοιχεί στη μέγιστη χρονική βάση (temporal baseline) των διαθέσιμων SLC ζευγών εικόνων για την περιοχή μελέτης, δηλαδή στο χρονικό διάστημα μεταξύ **Οκτωβρίου 2014 και Σεπτεμβρίου 2015**, σε παράθεση με τις αντίστοιχες εικόνες των αλλαγών από τα διαθέσιμα ζεύγη εικόνων L8 για το χρονικό διάστημα μεταξύ Αυγούστου 2014 και Αυγούστου 2015. Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι οι εικόνες L8 επιλέχθηκαν με κριτήριο να προσεγγίζουν τη χρονική διαφορά των ζευγών S-1A και να παρουσιάζουν μειωμένη συννεφοκάλυψη ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση μεταβολών στην περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η **χρονική περίοδος μεταξύ Απριλίου 2015 και Σεπτεμβρίου 2015**, η οποία επιλέχθηκε καθώς περιλαμβάνει τις **εποχικές αλλαγές** της περιοχής μελέτης, αλλά και αλλαγές στο χώρο του μεταλλείου, το οποίο ήταν σε λειτουργία το μεγαλύτερο διάστημα αυτής της χρονικής περιόδου.

Παρομοίως, εξετάζεται η **χρονική περίοδος μεταξύ Σεπτεμβρίου 2015 και Ιανουαρίου 2016**, που ακολουθεί, καθώς και εκεί αναμένονται **εποχικές μεταβολές**, αλλά και αλλαγές στο χώρο του μεταλλείου.

Τέλος, παρουσιάζεται η **χρονική περίοδος μεταξύ Ιουλίου 2015 και Σεπτεμβρίου 2015**, που αντιστοιχεί στην **ελάχιστη χρονική διαφορά** των διαθέσιμων ζευγών S1A εικόνων, σε παράθεση με τα αντίστοιχα ζεύγη L8 για το ίδιο χρονικό διάστημα.

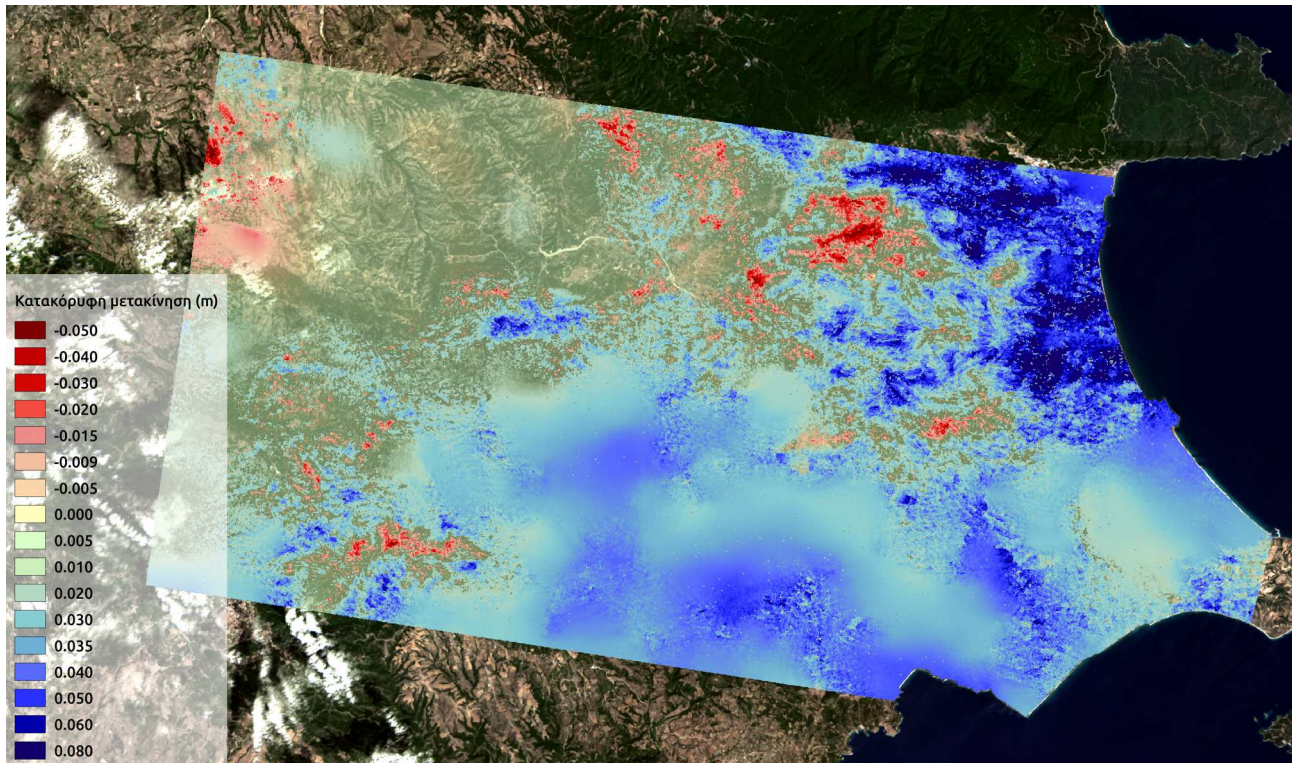
Συμπληρωματικά με την παράθεση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των δύο ομάδων δεδομένων S-1A και L-8, παρουσιάζεται και η επίλυση των ζευγών S1A εικόνων ως "stack" με κοινή "master" εικόνα το **Σεπτέμβριο 2015** για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, από τις οποίες η πρώτη ("stack '14") αντιστοιχεί στις διαθέσιμες εικόνες **S1A για το έτος 2014**, και συγκεκριμένα, για τους μήνες του Οκτωβρίου, του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου και η δεύτερη ("stack 15") αντιστοιχεί στις διαθέσιμες εικόνες **S1A για το έτος 2015** και συγκεκριμένα για τους μήνες του Αυγούστου, του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου, δηλαδή για τα ζεύγη του έτους 2015, με τη μικρότερη χρονική βάση με "master" εικόνα το Σεπτέμβριο. Η δημιουργία "stack" έγινε για να προκύψουν συνολικά οι διαφορές στην περιοχή μελέτης από τα έτη 2014 και 2015, λαμβάνοντας υπόψη όλη την πληροφορία που δίνουν τα διαθέσιμα ζεύγη συνδυαστικά και για να προκύψει ένα μέτρο αξιολόγησης της μεθόδου.

Συνολικά οι χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων από τα ζεύγη εικόνων S-1A καθώς και οι χάρτες με τις αλλαγές από L-8, δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού QGIS. Σημειώνεται ότι και για τις δύο ομάδες χαρτών εφαρμόστηκε **κατωφλίωση**, για να αναδειχθούν οι μεταβολές, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς σε κάθε χρονική περίοδο μελέτης.

5.1. Χρονική περίοδος : Αύγουστος 2014 - Σεπτέμβριος 2015

5.1.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ζεύγος των διαθέσιμων εικόνων S1A με τη μέγιστη χρονική βάση, με **“master”** εικόνα της ημερομηνίας **19/09/2015** και **“slave”** εικόνα της ημερομηνίας **18/10/2014**. Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό προϊόν της διαδικασίας της συγκεκριμένης εφαρμογής της Διαφορικής Συμβολομετρίας, δηλαδή ο χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων.

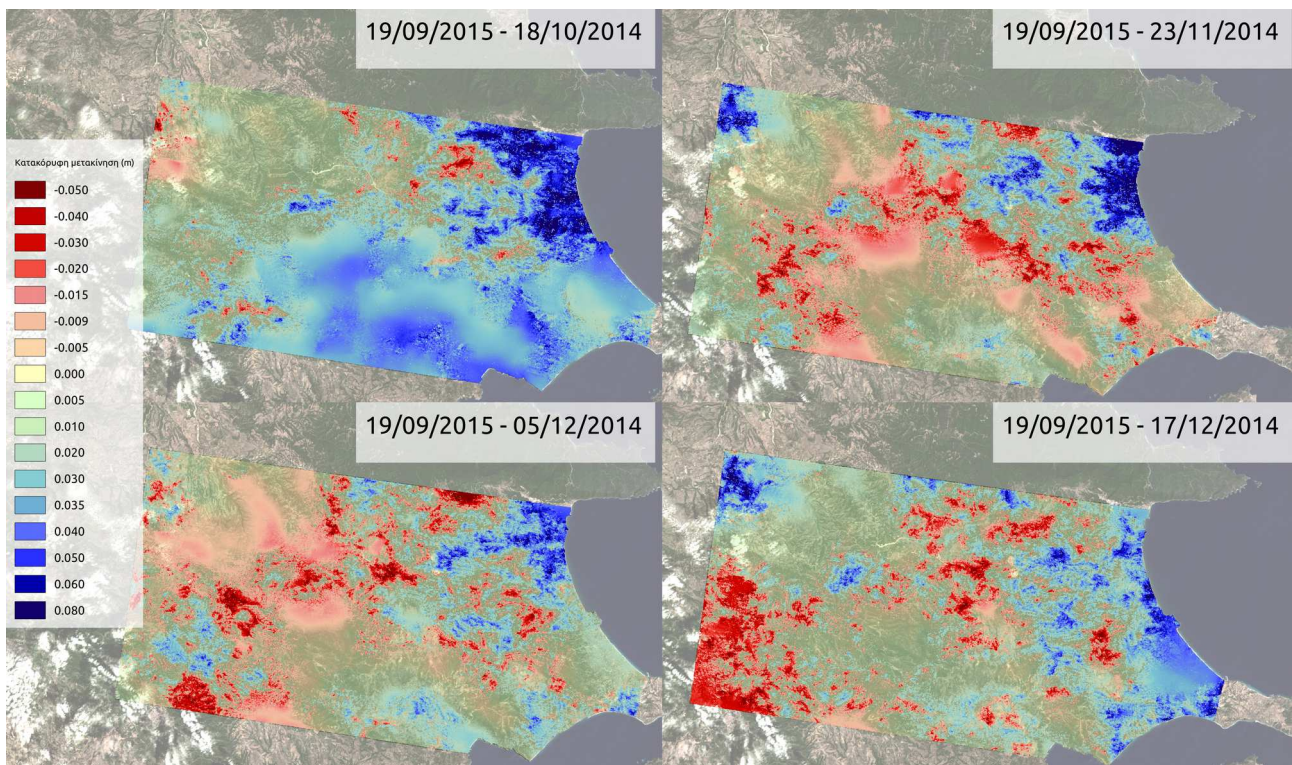


Εικόνα 25: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014

Στο ζεύγος αυτό, παρατηρείται ότι στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, που εκτείνεται κυρίως περιμετρικά της παράκτιας περιοχής, εμφανίζονται οι **μέγιστες θετικές τιμές** κατακόρυφης μετακίνησης, μεγαλύτερες από **+8cm**, όπως επίσης και σε περιοχές στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής. Οι **μέγιστες αρνητικές τιμές** κατακόρυφης μετακίνησης, μικρότερες από **-5cm** εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό και δυτικό τμήμα, καθώς και στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής, που βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο υψόμετρο και θα σχολιαστεί σε επόμενη παράγραφο. Περιοχές με μικρότερες τιμές κατακόρυφης μετακίνησης εμφανίζονται στο βορειοδυτικό και κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Θόρυβος και έντονες εναλλαγές τιμών εμφανίζονται στη διεύθυνση της νοητής διαγωνίου, βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά. Γενικά θα μπορούσε να επισημανθεί ότι η πλειοψηφία των αρνητικών τιμών κατακόρυφων μετακινήσεων εμφανίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής και περιμετρικά της ακτογραμμής.

Για να εξεταστεί η ύπαρξη θορύβου στις μετακινήσεις του ζεύγους **19/09/2015 – 18/10/2014**,

έγινε η επεξεργασία των συμβολογραφημάτων των μηνών του 2014, ως stack με κοινή master εικόνα αυτή του Σεπτεμβρίου (19/09/2015 – 18/10/2014 , 19/09/2015 – 23/11/2014, 19/09/2015 – 05/12/2014, 19/09/2015 – 17/12/2014), ώστε από το ρυθμό μεταβολής της αποκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης μεταξύ των συμβολογραφημάτων του “stack” να προκύψει ο ρυθμός μεταβολής και η τυπική απόκλιση της κατακόρυφης μετακίνησης, μεταξύ των ζευγών που εξετάζονται. Η βασική παραδοχή είναι ότι η επίδραση της ατμόσφαιρας παραμένει σταθερή για αυτά τα ζεύγη των συμβολογραφημάτων, για τα χρονικά διαστήματα που εξετάζονται, λόγω της μικρής διαφοράς στη χρονική τους βάση. Το καθένα ζεύγος και, πιο συγκεκριμένα, η αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση του κάθε ζεύγους (όπως έχει προκύψει από την αποκατάσταση φάσης, μετά και την αφαίρεση της τοπογραφίας), συμμετέχει στο “stack” με βάρους αντιστρόφως ανάλογο της χρονικής βάσης του. Συμπληρωματικά για κάθε ζεύγος υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν από το καθένα ξεχωριστά και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω για μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα των τιμών των κατακόρυφων μετακινήσεων μαζί με πίνακα την τυπική τους απόκλιση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του “stack”.



Εικόνα 26: Χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων για τα ζεύγη του stack 14 με κοινή Master 19/09/2015

Ζεύγος SLC εικόνων S-1A	Θετικές τιμές μετακίνησης			Αρνητικές τιμές μετακίνησης		
	Μέγιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)
19/09/2015 – 18/10/2014	0.112	0.026	±0.02	-0.048	-0.001	± 0.003
19/09/2015 – 23/11/2014	0.116	0.009	± 0.016	-0.061	-0.005	± 0.007
19/09/2015 – 05/12/2014	0.077	0.009	± 0.014	-0.061	-0.005	± 0.008
19/09/2015 – 17/12/2014	0.099	0.013	± 0.015	-0.078	-0.004	± 0.009
Stack '14	0.076	0.011	± 0.012	-0.028	-0.001	± 0.003

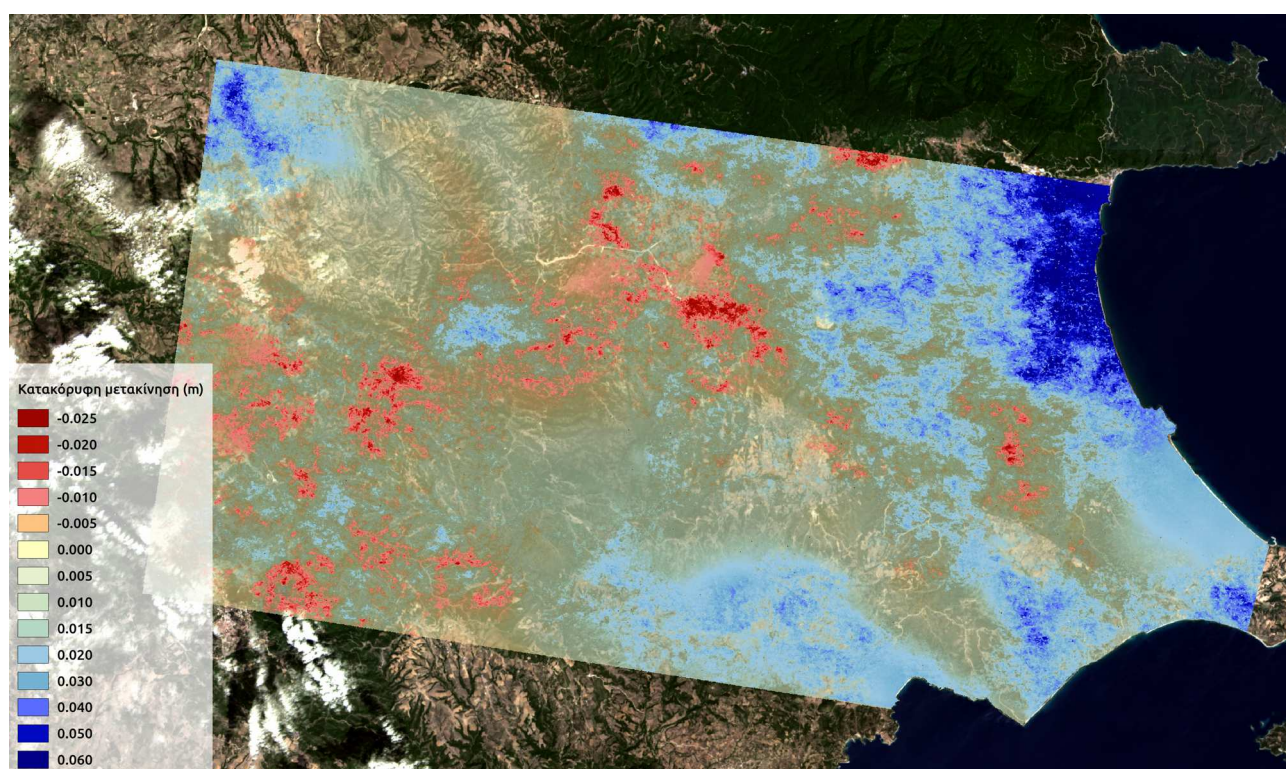
Πίνακας 8: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για τα ζεύγη του stack 14

Από τη σύγκριση των τεσσάρων συμβολογραφημάτων του “stack '14” παρατηρείται ότι σε τρία από αυτά για τους μήνες του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου, εμφανίζονται **αρνητικές τιμές κατακόρυφων μετακινήσεων**, με τοπικά ελάχιστα της τάξης των **-5cm**, σε τμήματα που βρίσκονται δυτικά του μεταλλείου και του ορεινού όγκου του Κακκάβου, καθώς και στον ορεινό όγκο του Χολομώντα, προς τα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης. Η μέση τιμή αρνητικών μετακινήσεων είναι της τάξης μερικών χιλιοστών με τυπική απόκλιση μερικά χιλιοστά.

Οι **θετικές τιμές κατακόρυφης μετακίνησης** λαμβάνουν μέγιστες τιμές, της τάξης των **+10cm** κυρίως στην παράκτια ζώνη και στο χώρο του μεταλλείου του Σιδηρόλακκου, αλλά και σε τμήματα του όρους που περιλαμβάνει το μεταλλείο των Σκουριών, δυτικά της παράκτιας ζώνης. Η μέση τιμή θετικών μετακινήσεων είναι της τάξης του +1cm για την πλειοψηφία των ζευγών με τυπική απόκλιση της τάξης +1.5cm. Παρατηρείται δηλαδή ότι στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται μεγαλύτερες θετικές τιμές μετακινήσεων από ότι αρνητικές, με μεγαλύτερη διασπορά τιμών και σε μεγαλύτερη έκταση της περιοχής, κυρίως στο νοτιοανατολικό και βορειοδυτικό τμήμα της.

Το ζεύγος με τη μέγιστη χρονική βάση **19/09/2015 – 18/10/2014**, εμφανίζει μέση θετική τιμή πάνω από **+2cm** με τυπική απόκλιση $\pm 2\text{cm}$ και θα εξεταστεί πιο αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο, συγκριτικά και με το ζεύγος **19/09/2015 – 01/10/2015**, που αφορά στο μήνα Οκτώβριο του έτους 2015, διάστημα κατά το οποίο το μεταλλείο ήταν εκτός λειτουργίας.

Ο χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων όπως προκύπτει από την επίλυση του “stack”, για τα τέσσερα συμβολογραφήματα, που συμμετείχαν σε αυτό παρουσιάζονται παρακάτω.

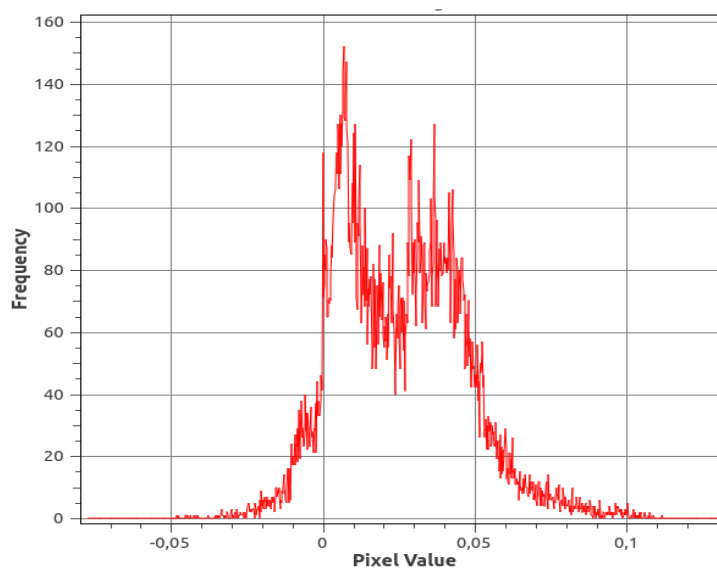


Εικόνα 27: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το stack 14 με κοινή Master 19/09/2015

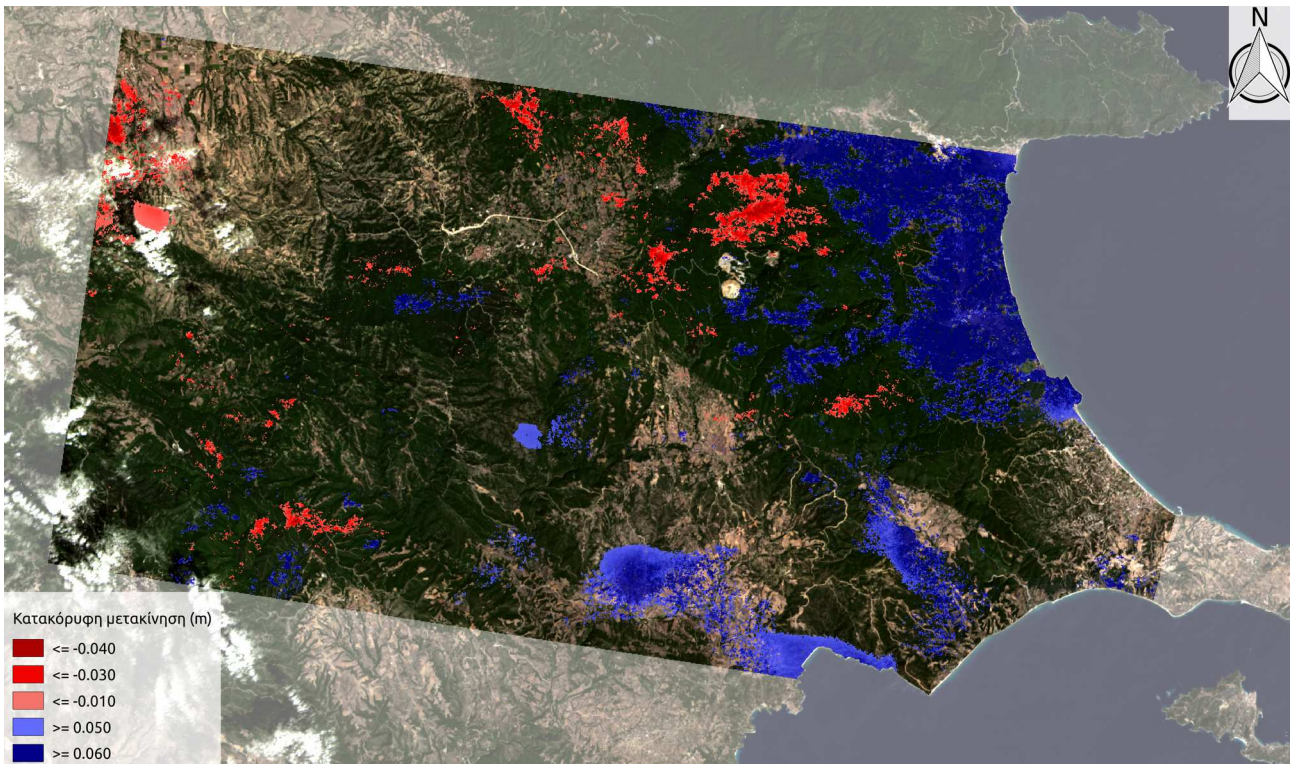
Παρατηρείται ότι στο stack ενισχύεται το μοτίβο κατανομής των θετικών και αρνητικών τιμών κατακόρυφης μετακίνησης σε σχέση με αυτό που εμφανίζεται στο ζεύγος 19/09/2015 – 18/10/2015, με τη μέγιστη χρονική διαφορά. Επιπλέον, εμφανίζεται μεγαλύτερη συγκέντρωση μέγιστων θετικών τιμών κατακόρυφης μετακίνησης στην περιοχή που βρίσκεται στο παράκτιο

βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, στην περιοχή του Σιδηρόλακκου, στον οικισμό του Στρατωνίου και νότια του οικισμού. Οι μέγιστες αρνητικές τιμές κατακόρυφης μετακίνησης κατανέμονται δυτικά της περιοχής των Σκουριών, μεταξύ των οικισμών της Αρναίας και του Παλαιοχωρίου, όπως επίσης και στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής. Η τυπική απόκλιση της κατακόρυφης μετακίνησης, όπως προέκυψε και από τα τέσσερα συμβολογραφήματα, λαμβάνει μέγιστη τιμή μεγαλύτερη από 4cm, σε περιοχές κυρίως στο βορειοανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής, αλλά και σε τυχαία σημεία και γενικά η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης είναι της τάξης των 2cm.

Στη συνέχεια εξετάζεται ο χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος **19/09/2015 – 18/10/2014**. Σημειώνεται ότι σε αυτόν το χάρτη τονίζονται οι τιμές που είναι **μεγαλύτερες από +5cm** και **μικρότερες από -1cm**. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το **ιστόγραμμα** κατανομής συχνοτήτων των κατακόρυφων μετακινήσεων, ώστε να προσεγγίζουν το θετικό και αρνητικό άκρο της καμπύλης κατανομής συχνοτήτων αντίστοιχα, σε σχέση με την διασπορά των τιμών του ζεύγους, που είναι της τάξης των 4cm. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται στο ιστόγραμμα ότι η καμπύλη της κατανομής των συχνοτήτων περιλαμβάνει δύο κορυφές, δηλαδή δύο υψηλές συγκεντρώσεις συχνοτήτων, οπότε γίνεται η υπόθεση ότι πρόκειται για δύο κατανομές συχνοτήτων, η μία με μέση τιμή (μ_1) που προσεγγίζει το μηδέν και η άλλη με μέση τιμή (μ_2) που προσεγγίζει τα +4cm. Έτσι, λοιπόν, θεωρείται ότι το θετικό και αρνητικό άκρο της κατανομής βρίσκονται εκτός του διαστήματος ($\mu_1+0.5\sigma$, $\mu_2+0,5\sigma$), δηλαδή **(-0.01, +0.05)m**. Ο χάρτης των τιμών κατακόρυφης μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 – 18/10/2015 με τιμές μεγαλύτερες από +5cm και μικρότερες από -1cm, παρουσιάζεται παρακάτω.



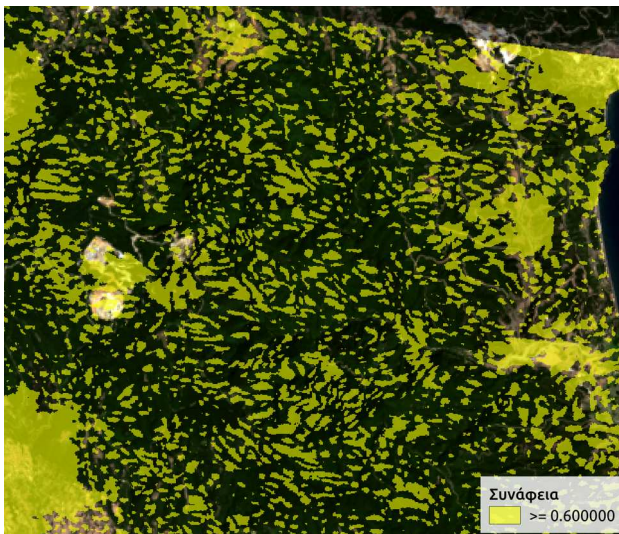
Εικόνα 28: Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων των κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος 19/09/2015 – 18/10/2014



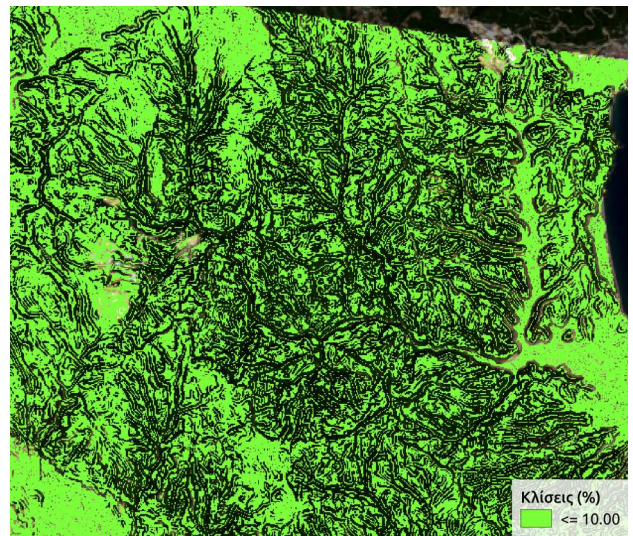
Εικόνα 29: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014

Στο ζεύγος αυτό, για τις μέγιστες τιμές θετικής μετακίνησης προκύπτει μια τυπική απόκλιση από τα ζεύγη του stack μερικών χιλιοστών, δηλαδή τα ζεύγη αυτά “συμφωνούν” μεταξύ τους. Η τυπική αυτή απόκλιση μας δείχνει σε ποιές από αυτές τις περιοχές, στις οποίες το ζεύγος 19/09/2015 – 18/10/2014 εμφάνισε τιμές μετακίνησης μικρότερες από -1cm και μεγαλύτερες από +5cm, τελικά έχουμε μικρότερα ή περισσότερα σφάλματα, λαμβάνοντας υπόψη την πληροφορία που μας δίνουν και τα τέσσερα ζεύγη του stack για αυτές, ώστε να κρίνουμε αν πραγματικά πρόκειται για μετακίνηση ή αυτές οι τιμές είναι μέσα στα όρια του σφάλματος. Φαίνεται, λοιπόν, ότι τα ζεύγη του “stack” έδειξαν ότι εμφανίζονται τιμές θετικής μετακίνησης, μεγαλύτερης από +5cm για την παράκτια περιοχή στο βορειοανατολικό άκρο της περιοχής μελέτης, αλλά **αμελητέες τιμές** με τυπική απόκλιση της τάξης των **2-3cm** για το χώρο των δύο μεταλλείων.

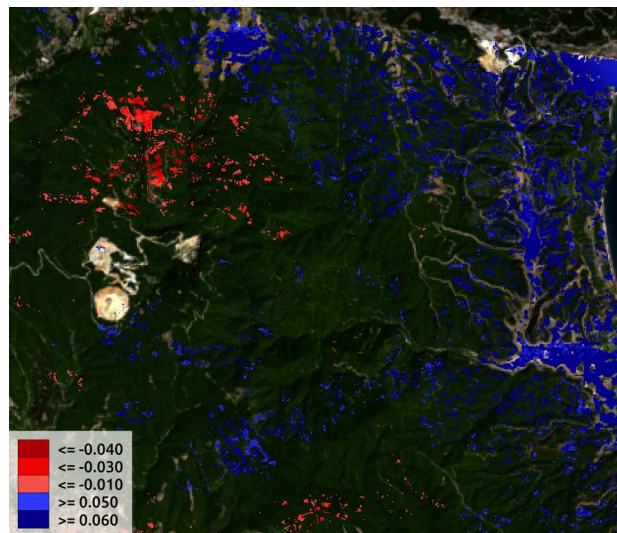
Ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση της υποπεριοχής που περιλαμβάνει το μεταλλείο των Σκουριών σε σχέση με την εικόνα της συνάφειας για το ζεύγος 9/09/2015 – 18/10/2014 και τις κλίσεις, όπως προέκυψαν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM 1arcsec (30m), το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην επεξεργασία των εικόνων SLC, για τη δημιουργία του χάρτη μετακίνησης.



Εικόνα 30: Συνάφεια για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, μεγαλύτερη από 0.60

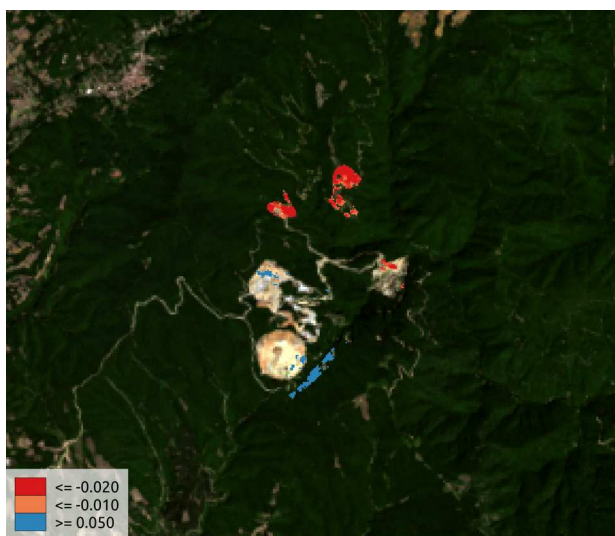


Εικόνα 31: Κλίσεις για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, μικρότερες από 10%



Εικόνα 32: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, για συνάφεια μεγαλύτερη από 0.60 και κλίσεις μικρότερες από 10%.

Συγκεκριμένα, για τα σημεία του ζεύγους 19/09/2015 – 18/10/2014, που οι τιμές μετακίνησης είναι μεγαλύτερες από +5cm και μικρότερες από -1cm, οι οποίες θεωρήθηκαν πιο “σημαντικές”, βάσει της λογικής κατωφλίωσης που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, δημιουργήθηκε μάσκα για τις τιμές της συνάφειας που είναι μικρότερες από 0.60 και για τις κλίσεις που είναι μεγαλύτερες από 10%, καθώς θεωρείται ότι για τα σημεία αυτά στα οποία οι τιμές της συνάφειας είναι χαμηλές και οι κλίσεις πολύ έντονες, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα. Τα σημεία που παρέμειναν μετά την εφαρμογή της διπλής αυτής μάσκας, εμφανίζουν μέγιστη θετική μετακίνησης τιμή της τάξης των +9cm, στις καλλιέργειες, στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής και ελάχιστη αρνητική τιμή μετακίνησης, της τάξης των 3-4cm σε σημεία διάσπαρτα, βόρεια του μεταλλείου των Σκουριών. Για τα σημεία αυτά η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης, όπως προέκυψε από το “stack 14” είναι της τάξης μερικών χιλιοστών. Ακολουθεί ο χάρτης και ανάλυση των τιμών μετακίνησης, που βρίσκονται στο **χώρο του μεταλλείου των Σκουριών**.



Εικόνες 33: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων για το ζεύγος με Master 19/09/2015 και Slave 18/10/2014, για το μεταλλείο των Σκουριών

Στον παραπάνω χάρτη οι τιμές που εμφανίζονται είναι **μεγαλύτερες από +5cm** και **μικρότερες από -1cm**. Ελάχιστες αρνητικές τιμές εμφανίζονται στο βόρειο δευτερεύον τμήμα του μεταλλείου και μέγιστες θετικές τιμές σε τμήματα της δασικής έκτασης νοτιοανατολικά του κύριου κυκλικού σχηματισμού. Στο χώρο του μεταλλείου η μέση τιμή συνάφειας είναι της τάξης του 0.60 και η μέση κλίση της τάξης του 10%, οπότε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι αμφίβολη.

5.1.2. Αποτελέσματα από Landsat-8

Για τη χρονική περίοδο μεταξύ Αυγούστου 2014 και Σεπτεμβρίου 2015, για την περιοχή μελέτης που μελετήθηκε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας σε ζεύγη SLC εικόνων Sentinel-1A, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή πέντε αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών σε ζεύγη εικόνων Landsat-8, με σκοπό την αναζήτηση αλλαγών στην περιοχή μελέτης και την παράθεση αυτών με τους χάρτες μετακινήσεων, που μελετήθηκαν παραπάνω.

Συγκεκριμένα, για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται, επιλέχθηκε η εικόνα της ημερομηνίας **26-08-2015** ως βάση αναφοράς για να συγκριθεί με την εικόνα της ημερομηνίας **23-08-2014**. Οι εικόνες αυτές επιλέχθηκαν με κριτήριο να διαφέρουν κατά χρονικό διάστημα, το οποίο θα συμβαδίζει όσο είναι δυνατόν με την αντίστοιχη χρονική βάση του ζεύγους των εικόνων S1A (13 μήνες) και να έχουν μειωμένη συννεφοκάλυψη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση αλλαγών στο μεταλλείο αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που εξετάστηκε.

Στις εικόνες αυτές οι αλλαγές εστιάζονται σε **τρεις υποπεριοχές μελέτης**, οι οποίες επιλέχθηκαν με κριτήριο την εμφάνιση μετακίνησης από το ζεύγος S1A, ώστε να διερευνηθεί αν μπορούν να εξηγηθούν και να εξεταστεί το ενδεχόμενο αν μπορεί να συνεισφέρει το αποτέλεσμα της μιας μεθοδολογίας με τη μια ομάδα δεδομένων SAR στην άλλη με την ομάδα δεδομένων οπτικών εικόνων. Η πρώτη υποπεριοχή μελέτης αφορά στην περιοχή που βρίσκεται το μεταλλείο των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο αυτών. Η **δεύτερη** υποπεριοχή μελέτης εκτείνεται από τον οικισμό του Νεοχωρίου έως το δυτικό τμήμα του οικισμού της Αρναίας και η τρίτη υποπεριοχή μελέτης περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο του Χολομώντα.

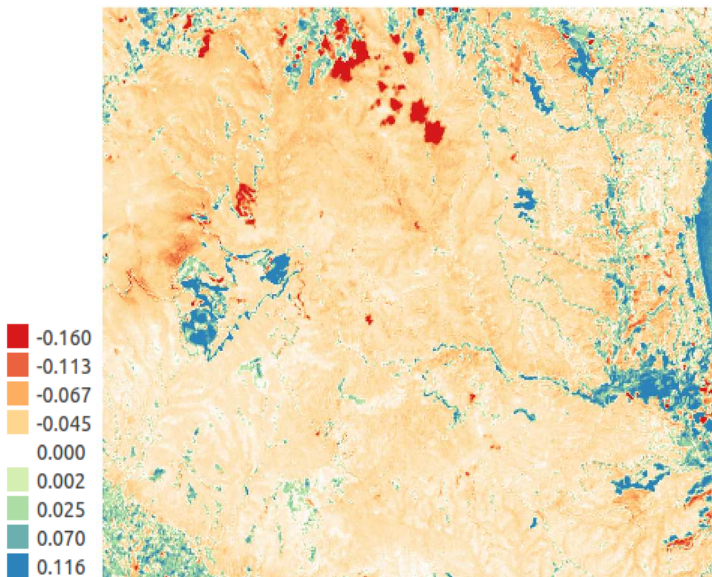
Σε αυτές τις τρεις υποπεριοχές μελέτης εφαρμόστηκαν πέντε αλγόριθμοι ανίχνευσης αλλαγών, οι οποίοι περιλαμβάνονται στο λογισμικό ENVI και είναι οι **Difference NDVI, Difference SpectralAngle, PCA, MNF και ICA**. Στη συνέχεια για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων L8, για τις τρεις υποπεριοχές μελέτης, οι εικόνες με τις αλλαγές αξιολογήθηκαν ως προς την πληρότητα, την ορθότητα και τη συνολική ακρίβεια στην ανίχνευση αλλαγών, σε σύγκριση με κάποια δεδομένα αναφοράς που ψηφιοποιήθηκαν από το χρήστη και για τα οποία επαληθεύτηκε η ορθότητά τους με φωτοερμηνευτικά κριτήρια.

Για τους τρεις τελευταίους αλγορίθμους μετασχηματισμού των εικόνων σε κύριες συνιστώσες, εξετάστηκαν παραπάνω από ένα κανάλια, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιο από αυτά ανιχνεύονται οι αλλαγές μεταξύ των δύο εικόνων και αξιολογήθηκαν και αυτά για την πληρότητα, την ορθότητα και τη συνολική τους ακρίβεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τους αλγόριθμους ανίχνευσης μεταβολών σε κάθε υποπεριοχή μελέτης και στη συνέχεια τα αποτελέσματα από την αξιολόγησή τους.

ΠΕΡΙΟΧΗ 1

Αρχικά για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τα δύο μεταλλεία των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου, παρουσιάζεται η **εικόνα διαφοράς των δεικτών NDVI** των δύο εικόνων που εξετάστηκαν με κλάσεις που δημιουργήθηκαν για διαστήματα της τυπικής απόκλισης των τιμών της εικόνας αυτής, ώστε να διευκολυνθεί η επιλογή κατάλληλου κατωφλίου για την ανάδειξη των μεταβολών. Για κάθε εικόνα ανίχνευσης αλλαγών, δοκιμάστηκε πληθώρα κατωφλίων, ώστε να διαπιστωθεί αυτό που ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα, βάσει φωτοερμηνευτικών κριτηρίων, αλλά στα αποτελέσματα κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί μόνο το βέλτιστο κατώφλι που επιλέχθηκε τελικά. Η επιτυχία επιλογής του κατωφλίου αξιολογείται αργότερα συνολικά για τον καθένα αλγόριθμο ανίχνευσης αλλαγών. Σημειώνεται ότι από τις τελικές εικόνες με τις αλλαγές, οι οποίες προκύπτουν από το κατώφλι που επιλέχθηκε για την καθεμιά, έχουν αφαιρεθεί τα σύννεφα και οι σκιές τους, ώστε να γίνει σωστά η κατωφλίωσή τους και σε επόμενο στάδιο η αξιολόγηση των αλγορίθμων.

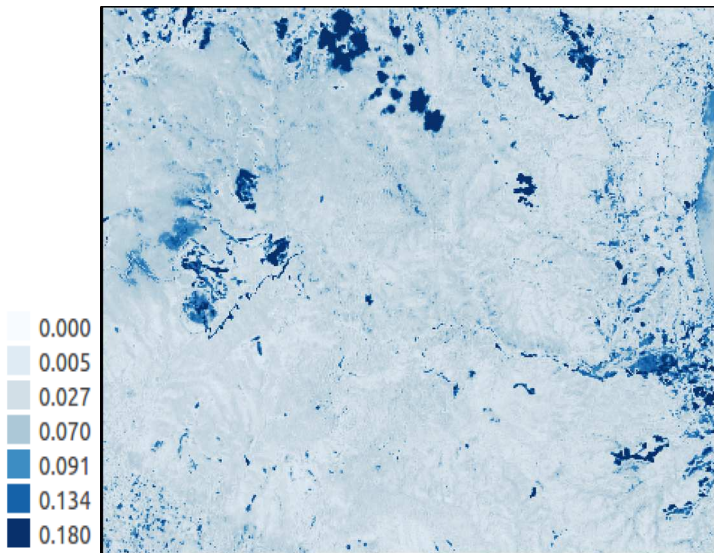


Εικόνα 34: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

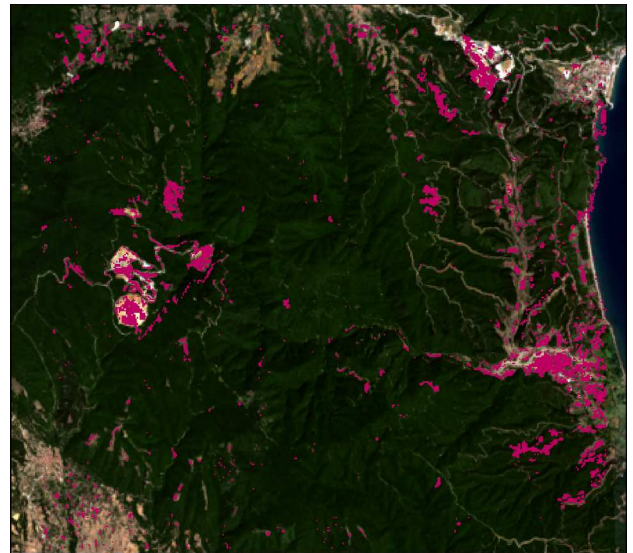


Εικόνα 35: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης

Στην εικόνα που προέκυψε από τη διαφορά των δεικτών NDVI των εικόνων, οι τιμές κατωφλίωσης που επιλέχθηκαν βρίσκονται εκτός των ορίων του διαστήματος $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$, όπου μ η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση της κατανομής των τιμών. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος ανιχνεύει αλλαγές μέσα στο μεταλλείο των Σκουριών και στο Σιδηρόλακκο, καθώς και τμήματα δάσους που έχουν αποψιλωθεί, αλλά και αλλαγές στις καλλιέργειες, κοντά στο παραλιακό τμήμα της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, εμφανίζει ότι υπάρχουν αλλαγές στη θάλασσα. Ακολουθεί **η εικόνα της διαφοράς στη φασματική γωνία** μεταξύ των δύο εικόνων.

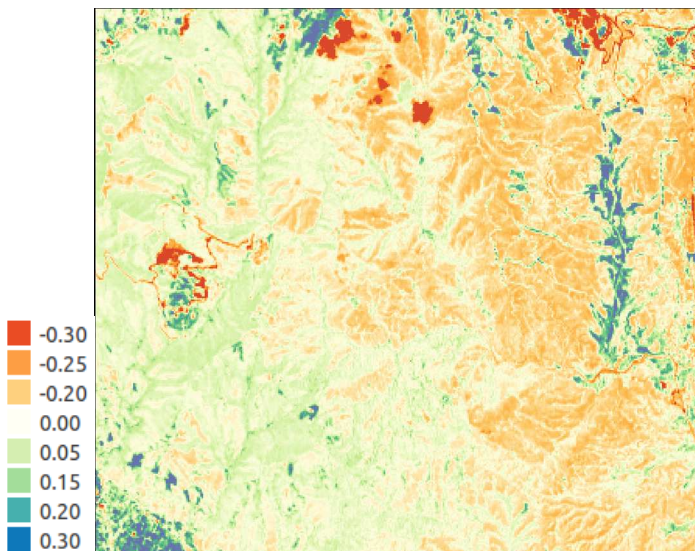


Εικόνα 36 Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 37: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης

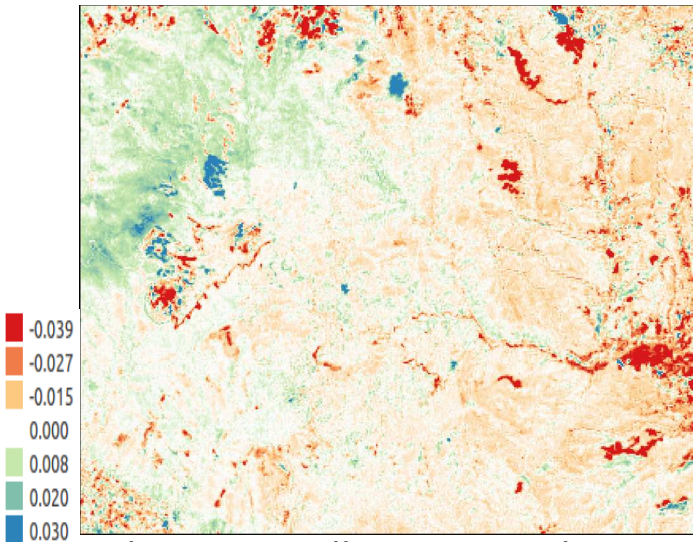
Στην εικόνα της διαφοράς στη φασματική γωνία μεταξύ των δύο εικόνων, οι τιμές κατωφλίωσης που επιλέχθηκαν βρίσκονται εκτός των ορίων του διαστήματος $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος ανιχνεύει παρόμοιες περιοχές με τον NDVI καθώς και αλλαγές σε τμήμα της ακτογραμμής, ενώ δεν εμφανίζει τη θάλασσα σαν αλλαγή. Ελάχιστος θόρυβος παραμένει με αυτές τις τιμές κατωφλίωσης σε τυχαία σημεία δάσος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου μετασχηματισμού της εικόνας, **PCA**, από τον οποίο εξετάστηκαν και τα επτά κανάλια, ώστε να διαπιστωθεί σε ποία από αυτά ανιχνεύεται η αλλαγή τελικά, αλλά εδώ παρουσιάζονται μόνο τα κανάλια που είναι ενδεικτικά των αλλαγών και αυτά είναι το **κανάλι τέσσερα** και το **κανάλι έξι**.



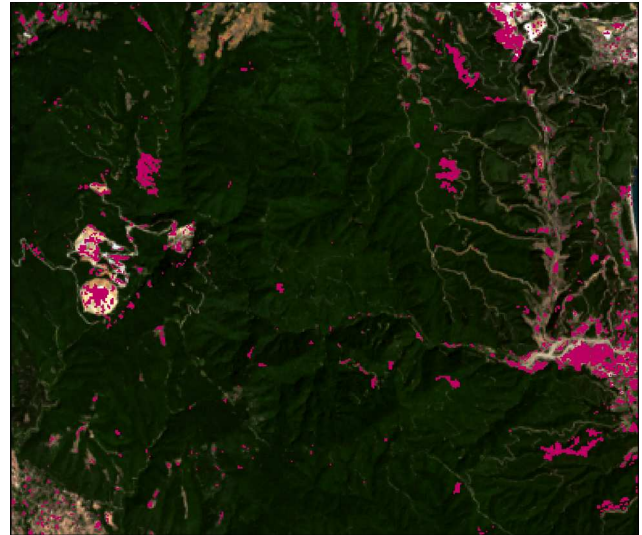
Εικόνα 38: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 39: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση



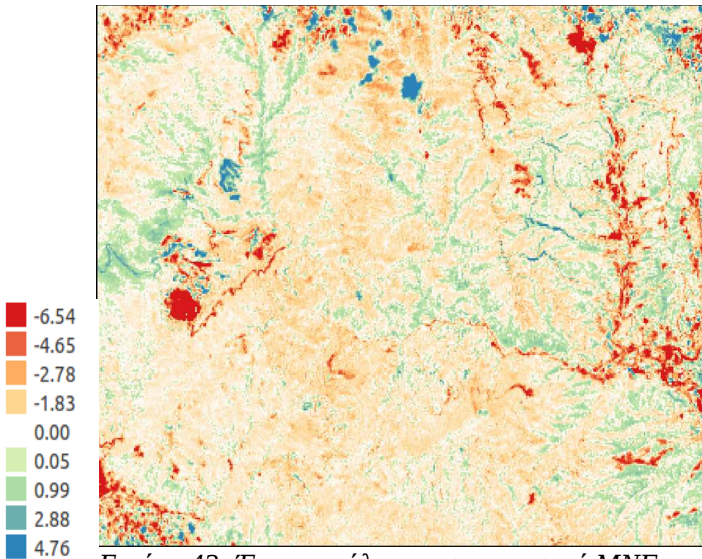
Εικόνα 40: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 41: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης

Στο μετασχηματισμένο κανάλι τέσσερα από τις δύο εικόνες L-8, το κατώφλι που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στο διάστημα $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος ανιχνεύει μικρότερες αλλαγές στο μεταλλείο των Σκουριών και στο Σιδηρόλακκο, καθώς και αλλαγές στις καλλιέργειες, που βρίσκονται παράλληλα της ακτογραμμής, ενώ δεν εμφανίζει αλλαγές στο πράσινο. Το μετασχηματισμένο κανάλι έξι, στο οποίο έγινε αντίστοιχη κατωφλίωση στο διάστημα $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$, ανιχνεύει επιπλέον την αλλαγή πρασίνου σε σχέση με το κανάλι τέσσερα, πέραν των υπολοίπων αλλαγών στο μεταλλείο, οι οποίες εμφανίζονται διαφοροποιημένες και εστιασμένες στον πυρήνα του κύριου εξορυκτικού σχηματισμού.

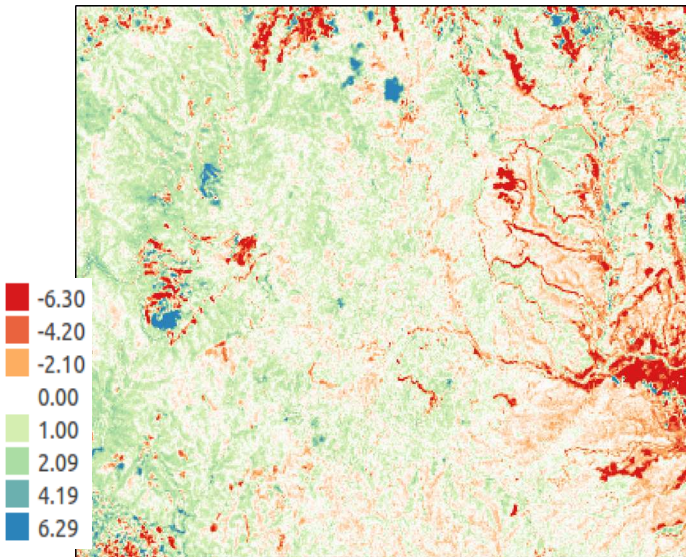
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου μετασχηματισμού της εικόνας, **MNF**, από τον οποίο εξετάστηκαν και τα επτά κανάλια, ώστε να διαπιστωθεί σε ποία από αυτά ανιχνεύεται η αλλαγή τελικά, αλλά εδώ παρουσιάζονται μόνο τα κανάλια που είναι ενδεικτικά των αλλαγών, δηλαδή το **κανάλι έξι** και το **κανάλι οκτώ**.



Εικόνα 42: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 43: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

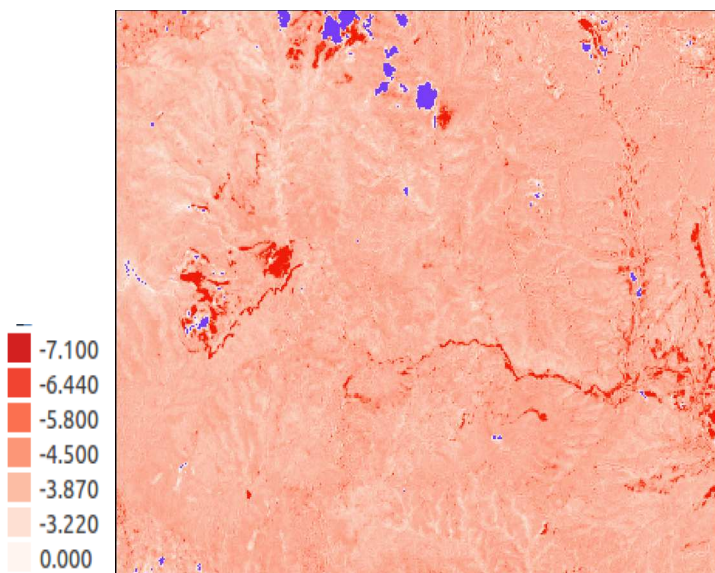


Εικόνα 44: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

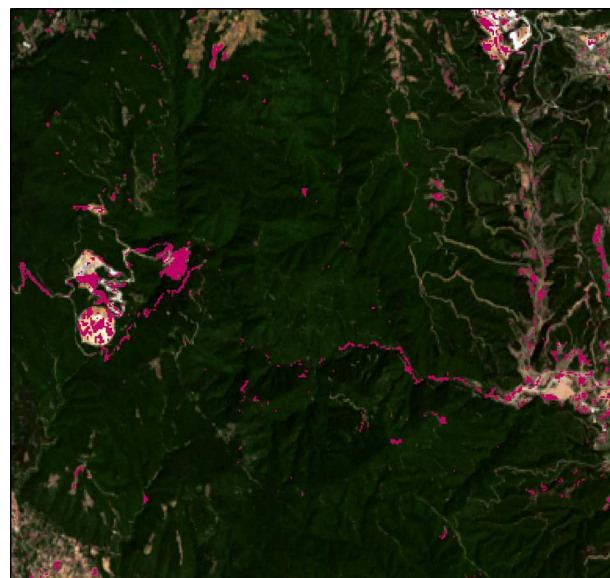


Εικόνα 45: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

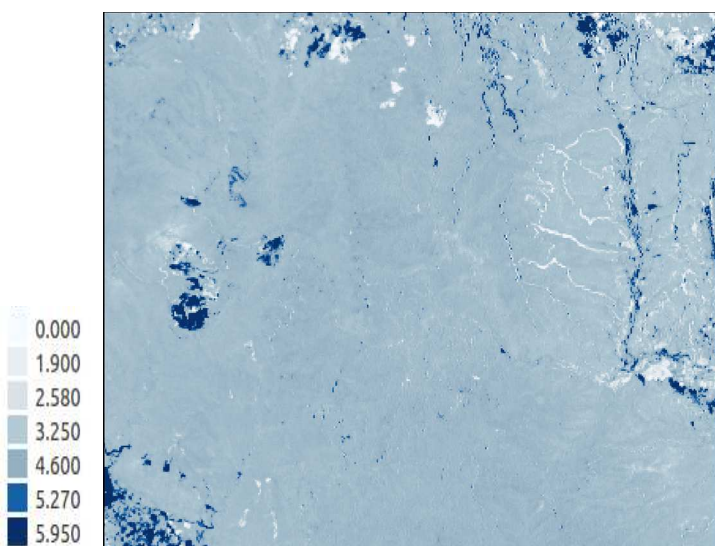
Στο μετασχηματισμένο κανάλι MNF έξι από τις δύο εικόνες L-8, το κατώφλι που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στο διάστημα $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος εμφανίζει πιο τραχείες αλλαγές στο μεταλλείο των Σκουριών σε σχέση με το αντίστοιχο κανάλι PCA, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις καλλιέργειες και στις αλλαγές του πρασίνου, οι οποίες εμφανίζονται μικρότερες. Το μετασχηματισμένο κανάλι οκτώ, στο οποίο έγινε αντίστοιχη κατωφλίωση στο διάστημα $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$, εμφανίζει αντίστοιχες αλλαγές με το κανάλι έξι και μεγαλύτερες αλλαγές στις καλλιέργειες. Ακολουθούν τα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο μετασχηματισμού **ICA** μεταξύ των δύο εικόνων L-8, για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης και συγκεκριμένα για τα **κανάλια τέσσερα και επτά**.



Εικόνα 46: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 47: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση



Εικόνα 48: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

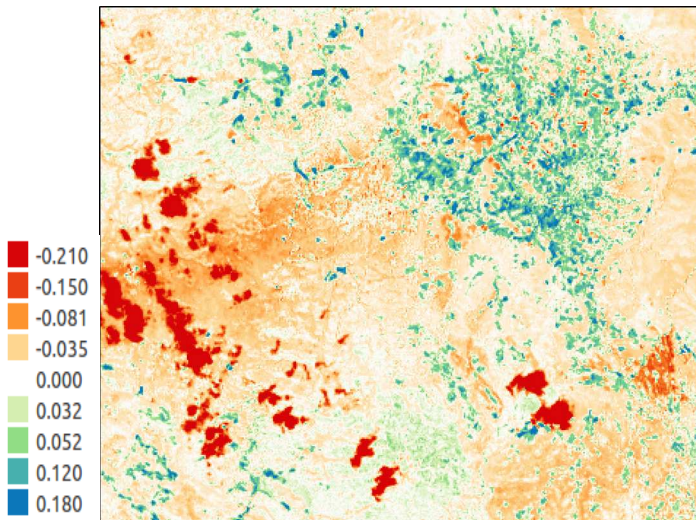


Εικόνα 49: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Στο μετασχηματισμένο κανάλι ICA τέσσερα, οι αλλαγές που εντοπίζονται αφορούν στα δύο μεταλλεία, σε γραμμικά τμήματα πρασίνου και ελάχιστες στις καλλιέργειες. Στο μετασχηματισμένο κανάλι ICA επτά, εμφανίζονται αλλαγές και στην πόλη του Στρατωνίου, ενώ ο θόρυβος είναι αισθητά μειωμένος σε σχέση με τους προηγούμενους αλγόριθμους μετασχηματισμού. Παρόλα αυτά δεν εντοπίζονται με σαφήνεια αλλαγές σε τμήματα του πρασίνου, παρά μόνο ορισμένες με γραμμικό πρότυπο.

ΠΕΡΙΟΧΗ 2

Αντίστοιχη διαδικασία με αυτή της πρώτης υποπεριοχής, ακολουθήθηκε και για την δεύτερη περιοχή, που εκτείνεται από τον οικισμό του Νεοχωρίου έως και δυτικά του οικισμού της Αρναίας και περιλαμβάνει κυρίως καλλιέργειες, ενώ δε συμβαίνει κάποια εξορυκτική δραστηριότητα σε αυτή. Η λογική καταφλίωσης που εφαρμόστηκε σε αυτή την υποπεριοχή παραμένει η ίδια, απλώς οι τιμές των καταφλιών που επιλέχθηκαν τελικά για κάθε εικόνα αλλαγής, είναι ελαφρώς διαφοροποιημένες σε σχέση με την πρώτη υποπεριοχή, καθώς αλλάζουν τα συστατικά στοιχεία των εικόνων και επομένως και οι συγκριτικές διαφορές στις ανακλαστικότητές τους. Παρακάτω παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της **διαφοράς στους δείκτες NDVI**, για την δεύτερη υποπεριοχή.

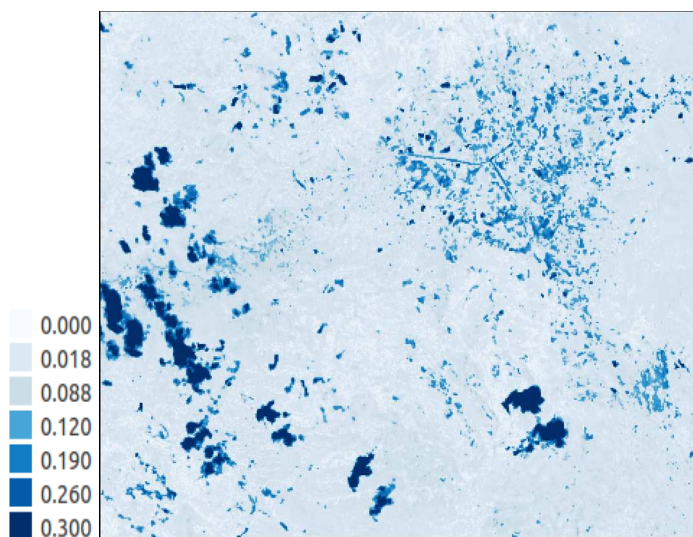


Εικόνα 50: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

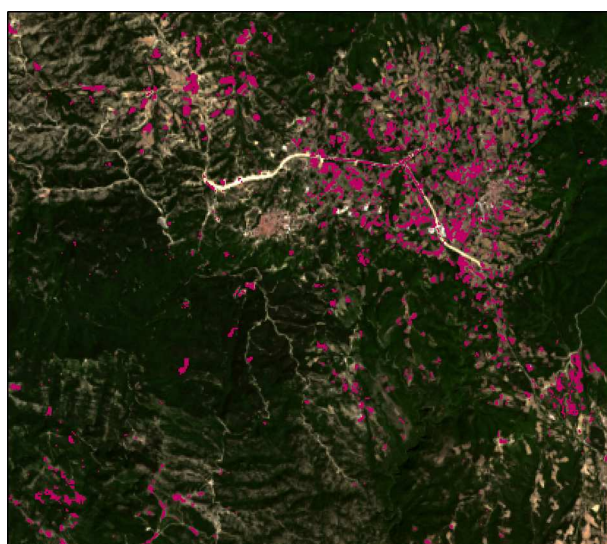


Εικόνα 51: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την καταφλίωση

Για την καταφλίωση της εικόνας της διαφοράς μεταξύ των δεικτών NDVI για το ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε, επιλέχθηκαν τιμές που βρίσκονται εκτός του διαστήματος $[\mu+2\sigma, \mu-2\sigma]$. Εντοπίζονται αλλαγές στις καλλιέργειες και σημεία πρασίνου στον ορεινό όγκο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της **διαφοράς στη φασματική γωνία** μεταξύ των δύο εικόνων, για κατώφλι που ορίζεται εκτός του διαστήματος $(\mu+\sigma, \mu-\sigma)$.

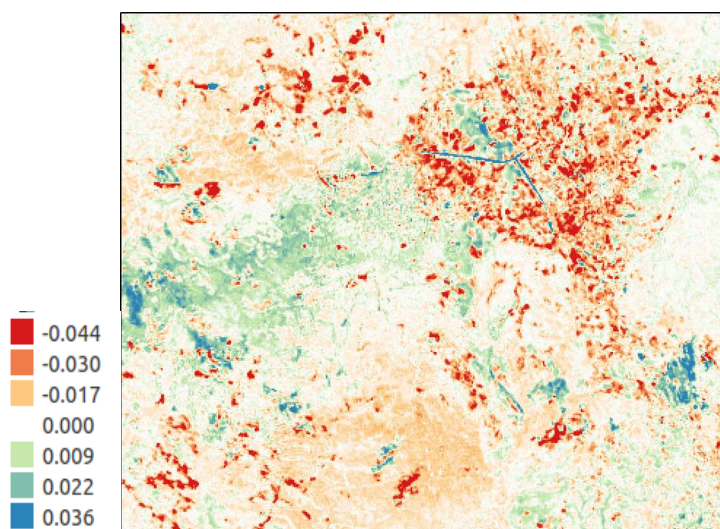


Εικόνα 52: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 53: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Πέραν των αλλαγών στις καλλιέργειες εντοπίζονται και κάποιες αλλαγές στον οικισμό της Μεγάλης Παναγίας στο νοτιοανατολικό άκρο της εικόνας. Ακολουθεί το αποτέλεσμα του αλγόριθμου μετασχηματισμού **PCA**, για το **κανάλι έξι**, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό των αλλαγών.

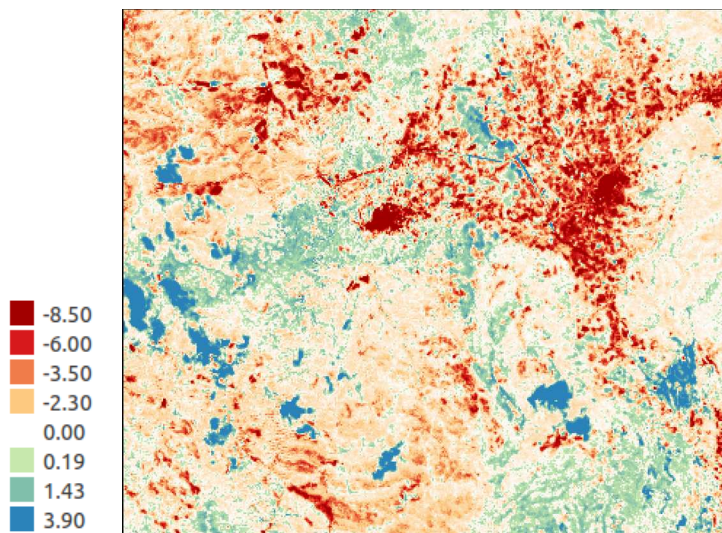


Εικόνα 54: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 55: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Για την κατωφλίωση της εικόνας μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε, επιλέχθηκαν τιμές που βρίσκονται εκτός του διαστήματος ($\mu+2\sigma, \mu-2\sigma$). Παρατηρείται ότι εμφανίζονται αλλαγές σε γραμμικά πρότυπα και αρκετός θόρυβος. Ακολουθεί το αποτέλεσμα του αλγόριθμου μετασχηματισμού **MNF** για το **κανάλι έξι**, το οποίο εστιάζει στις αλλαγές. Παρατηρείται ότι οι αλλαγές εστιάζονται κυρίως στους οικισμούς της Αρναίας, του Παλαιοχωρίου και της Μεγάλης Παναγίας, ενώ λιγότερες αλλαγές σε σχέση με τον προηγούμενο αλγόριθμο μετασχηματισμού PCA εντοπίζονται στις καλλιέργειες για το κατώφλι αυτό.

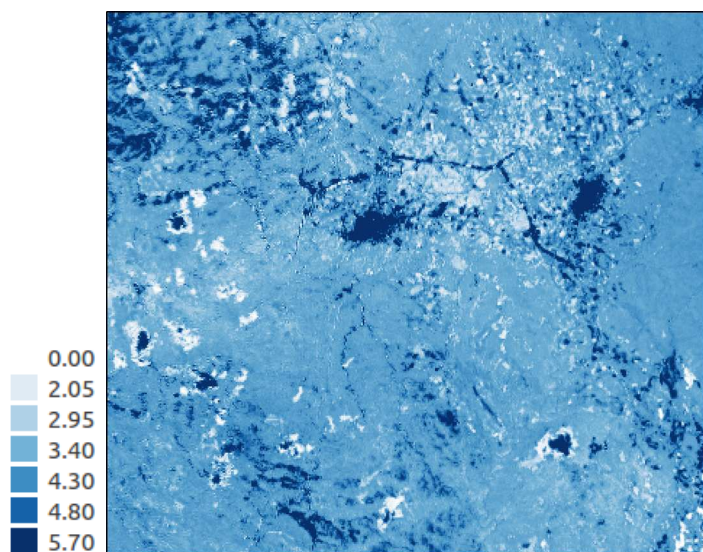


Εικόνα 56: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 57: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Ακολουθεί το αποτέλεσμα του αλγορίθμου μετασχηματισμού **ICA** για το **έβδομο κανάλι**, το οποίο εστιάζει στις αλλαγές.



Εικόνα 58: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

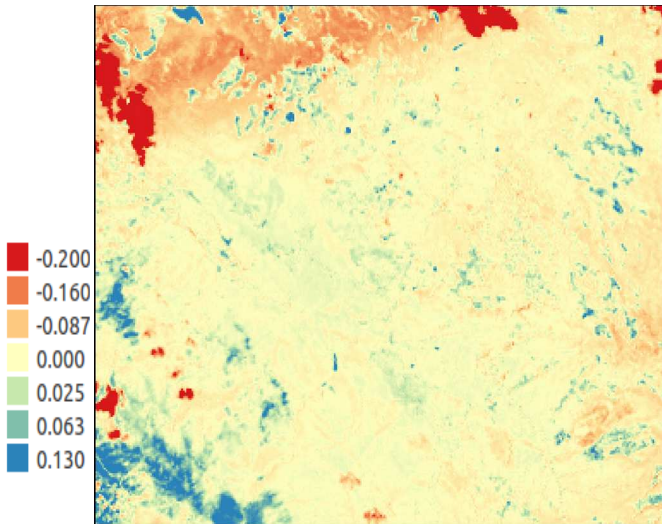


Εικόνα 59: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Παρατηρείται ότι στην εικόνα των αλλαγών από το μετασχηματισμό ICA, είναι ακόμα περισσότερο εμφανές σε σχέση με τον αλγόριθμο MNF ότι οι αλλαγές εστιάζονται κυρίως στους οικισμούς της Αρναίας, του Παλαιοχωρίου και της Μεγάλης Παναγίας, ενώ λιγότερες αλλαγές σε σχέση με τον προηγούμενο αλγόριθμο μετασχηματισμού PCA εντοπίζονται στις καλλιέργειες για το κατώφλι αυτό.

ΠΕΡΙΟΧΗ 3

Η τρίτη περιοχή που εξετάζεται είναι εκείνη που περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο του Χολομώντα, εκεί όπου η πλειοψηφία των χαρτών μετακίνησης από τα ζεύγη SLC εικόνων S-1A, έδειξε τοπικά ελάχιστες τιμές αρνητικής μετακίνησης. Ακολουθήθηκε παρόμοια λογική κατωφλίωσης με τις προηγούμενες υποπεριοχές μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της **διαφοράς των δεικτών NDVI** μεταξύ των εικόνων L-8 που επιλέχθηκαν.

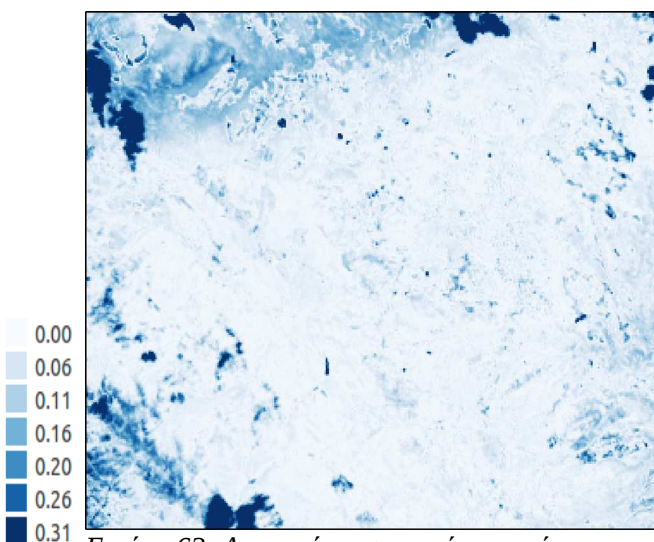


Εικόνα 60: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 61: Διαφορά δεικτών NDVI για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Για να αναδειχθούν οι αλλαγές της διαφοράς των δεικτών NDVI μεταξύ των εικόνων L-8, που εξετάστηκαν, επιλέχθηκε κατώφλι που βρίσκεται εκτός των ορίων του διαστήματος ($\mu+\sigma, \mu-\sigma$). Παρατηρείται ότι οι αλλαγές που εντοπίζονται αφορούν σε αλλαγή πρασίνου, αλλά και ένα μεγάλο τμήμα στο βορειοδυτικό άκρο της εικόνας, στο οποίο δεν αναγνωρίστηκαν αλλαγές μεταξύ των δύο εικόνων με φωτοερμηνεία και πιθανότητα να οφείλεται σε αστοχία ή σε ύπαρξη ομίχλης, οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται με την επιλογή κατωφλίου εκτός των ορίων του διαστήματος ($\mu+2\sigma, \mu-2\sigma$). Το ίδιο φαινόμενο συναντάται και στη **διαφορά των φασματικών γωνιών** των εικόνων που παρουσιάζεται παρακάτω, με κατώφλι εκτός των ορίων του διαστήματος ($\mu+\sigma, \mu-\sigma$).

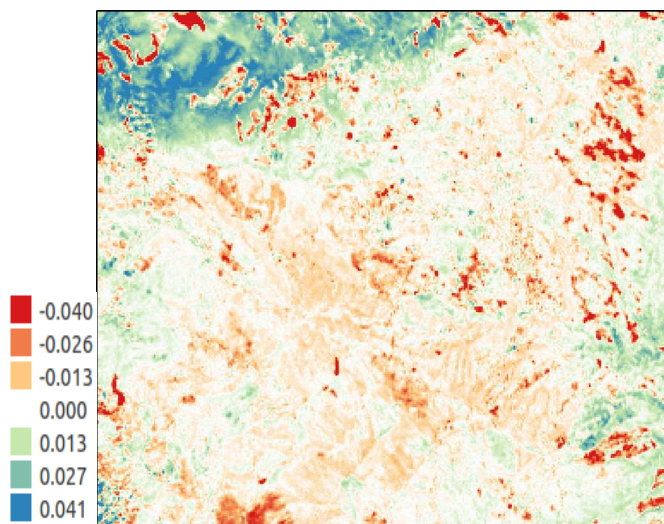


Εικόνα 62: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 63: Διαφορά φασματικών γωνιών για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους τρεις αλγορίθμους μετασχηματισμού της εικόνας, **PCA**, **MNF** και **ICA**, και συγκεκριμένα των καναλιών **έξι** για τους δύο πρώτους και **επτά** για τον τρίτο, στα οποία εντοπίζονται οι αλλαγές, με τη χρήση κατάλληλου κατωφλίου που επιλέχθηκε έτσι ώστε να βρίσκεται εκτός των ορίων του διαστήματος ($\mu+2\sigma, \mu-2\sigma$) για την κατανομή των τιμών του καθενός αλγορίθμου μετασχηματισμού.

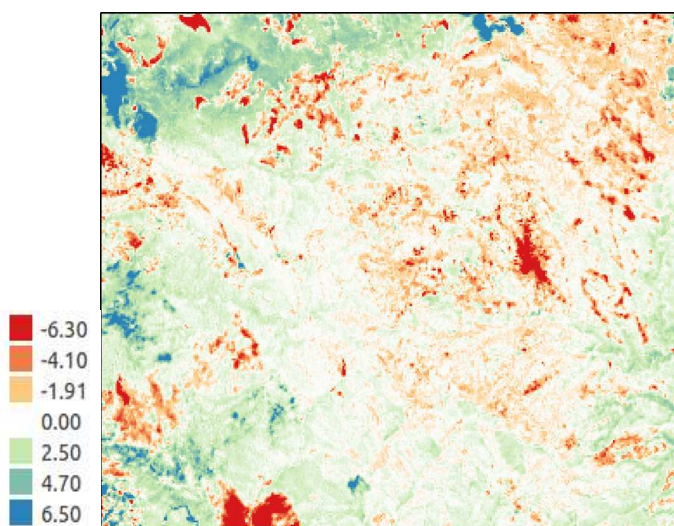


Εικόνα 64: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 65: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση

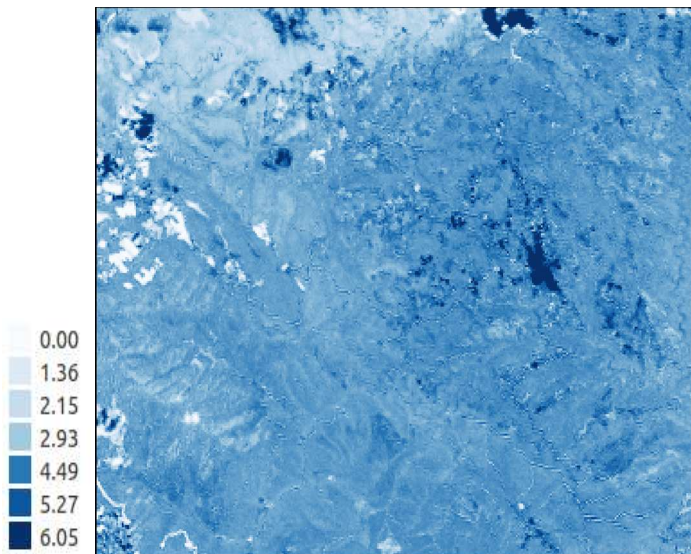
Παρατηρείται ότι στην εικόνα των αλλαγών που προέκυψε από τον αλγόριθμο μετασχηματισμού PCA, εντοπίζονται αντίστοιχες αλλαγές με αυτές της διαφοράς των δεικτών NDVI και των φασματικών γωνιών τους για τα κατώφλια που επιλέχθηκαν.



Εικόνα 66: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 67: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την κατωφλίωση



Εικόνα 68: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 69: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού ICA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την καταωφλίωση

Παρατηρείται ότι στους αλγορίθμους μετασχηματισμού MNF και ICA, για τα κανάλια έξι και επτά αντίστοιχα, οι αλλαγές εμφανίζονται εντονότερα σε σημεία πρασίνου ενώ μειώνεται ο θόρυβος, σε σχέση με τις προηγούμενες τρεις εικόνες που εξετάστηκαν.

Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η αξιολόγηση των αλγορίθμων από τους οποίους προέκυψαν οι δυαδικές εικόνες των αλλαγών για κάθε υποπεριοχή για συγκεκριμένα κατώφλια, όπως αναφέρθηκε σε κάθε περίπτωση, ως προς την πληρότητα, την ορθότητα και τη συνολική ακρίβεια στην ανίχνευση αλλαγών, σε σύγκριση με κάποια δεδομένα αναφοράς που ψηφιοποιήθηκαν από το χρήστη και για τα οποία επαληθεύτηκε η ορθότητά τους με φωτοερμηνευτικά κριτήρια.

5.1.3. Αξιολόγηση αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών για ζεύγος εικόνων Landsat-8

Η αξιολόγηση των αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών έγινε με τη χρήση αλγορίθμου στο λογισμικό Matlab, με τη σύγκριση των δυαδικών εικόνων των αλλαγών με κάποια δεδομένα έλεγχου, από την οποία προέκυψαν, με απλή άλγεβρα εικόνων, τα "αληθώς θετικά" (TP), "Λανθασμένα θετικά" (FP) και "Λανθασμένα αρνητικά" (FN) εικονοστοιχεία.

Με βάση τις παραπάνω ομάδες εικονοστοιχείων, υπολογίζονται οι τρεις δείκτες ποιότητας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα δεδομένα ελέγχου, οι οποίοι είναι οι εξής :

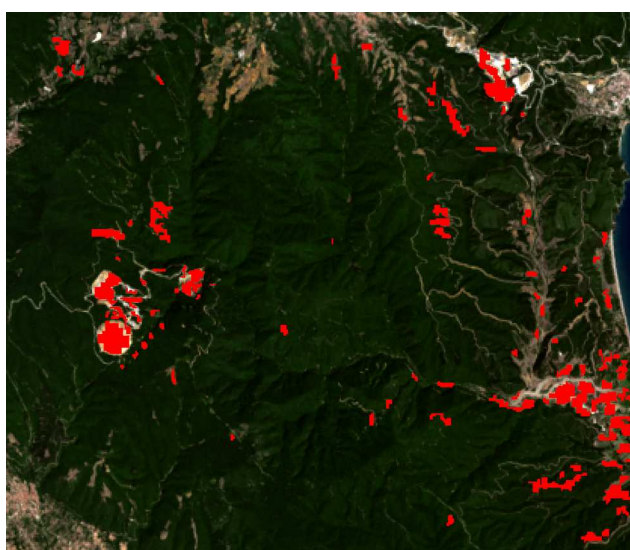
- **Πληρότητα (Completeness)** : Ο δείκτης της πληρότητας εκφράζει το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που έχουν θεωρηθεί ως αλλαγές στη δυαδική εικόνα.
- **Ορθότητα (Correctness)** : Ο δείκτης της ορθότητας εκφράζει κατά πόσο τα εικονοστοιχεία που έχουν θεωρηθεί ως αλλαγές στη δυαδική εικόνα είναι όντως αλλαγές σύμφωνα με τα

δεδομένα ελέγχου.

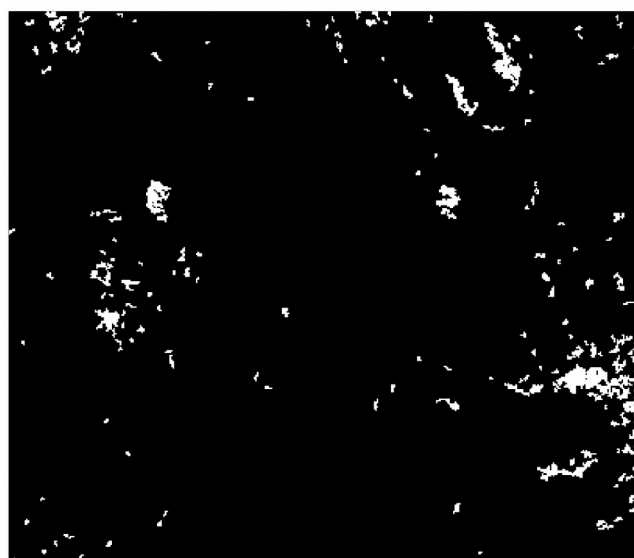
- **Ποιότητα (Quality)** : Ο δείκτης της ποιότητας προσδιορίζει ένα γενικευμένο δείκτη που συνδυάζει τις μετρήσεις για την πληρότητα και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Σημειώνεται ότι για κάθε δυαδική εικόνα, όπως προέκυψε από την εφαρμογή κατωφλίου για κάθε αλγόριθμο ανίχνευσης αλλαγών, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, εφαρμόστηκε φίλτρο εκκαθάρισης του θορύβου, διαστάσεων 5x5 εικονοστοιχείων, καθώς επίσης, αφαιρέθηκαν τα σύννεφα και οι σκιές τους, κατά την είσοδο της δυαδικής εικόνας στον αλγόριθμο της αξιολόγησης.

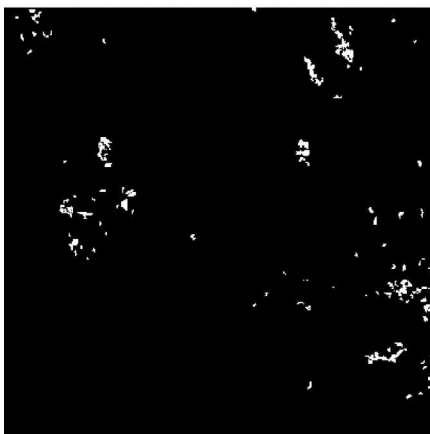
Για την πρώτη υποπεριοχή, αυτή που περιλαμβάνει τα μεταλλεία των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου, τα δεδομένα ελέγχου παρουσιάζονται παρακάτω. Ενδεικτικά παρουσιάζονται και τα στοιχεία εισόδου – εξόδου και τα αποτελέσματα για τον αλγόριθμο μετασχηματισμού PCA, για το κανάλι έξι.



Εικόνα 70: Δεδομένα ελέγχου, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



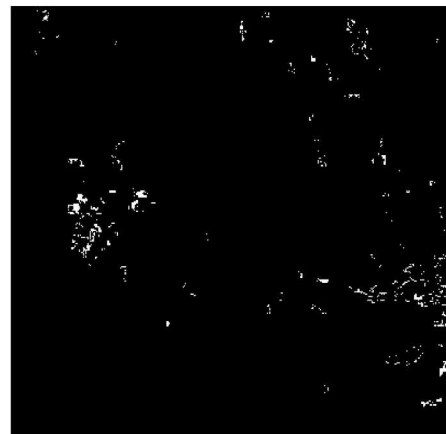
Εικόνα 71: Δυαδική εικόνα, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης στο έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 72: True Positive, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 73: False Positive, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014



Εικόνα 74: False Negative, για το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA, για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014

*****Quality measures *****

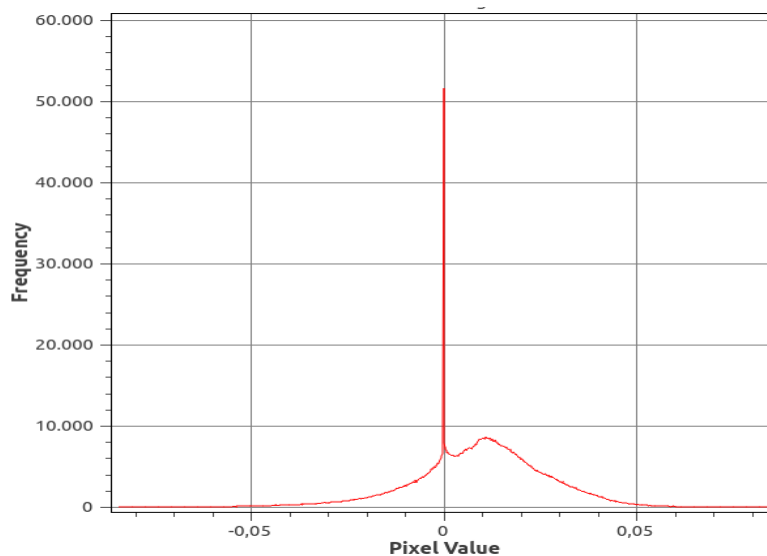
Completeness=0.71577	Correctness =0.81505	Quality =0.61576
TP=3173	FP=720	FN=1260

Από τους αλγορίθμους που εξετάστηκαν για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης, προέκυψε ότι ο αλγόριθμος μετασχηματισμού **PCA** και συγκεκριμένα το **κανάλι έξι** παρουσίασε τα μεγαλύτερα ποσοστά **επιτυχίας** στην ανίχνευση αλλαγών σε σύγκριση με τα δεδομένα ελέγχου, με συνολική ακρίβεια που προσεγγίζει το **60%**. Ακολουθεί η διαφορά των φασματικών γωνιών με 58% και στη συνέχεια οι υπόλοιποι με ακρίβεια της τάξης μεγέθους 50%. Η ακρίβεια του αλγορίθμου PCA για το έκτο κανάλι, με τις τιμές κατωφλίωσης που επιλέχθηκαν, κρίνεται ικανοποιητική για την επιτυχία του αλγορίθμου στην ανίχνευση αλλαγών στο μεταλλείο, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δεδομένα ελέγχου ψηφιοποιήθηκαν από το χρήστη και περιλαμβάνουν σφάλματα.

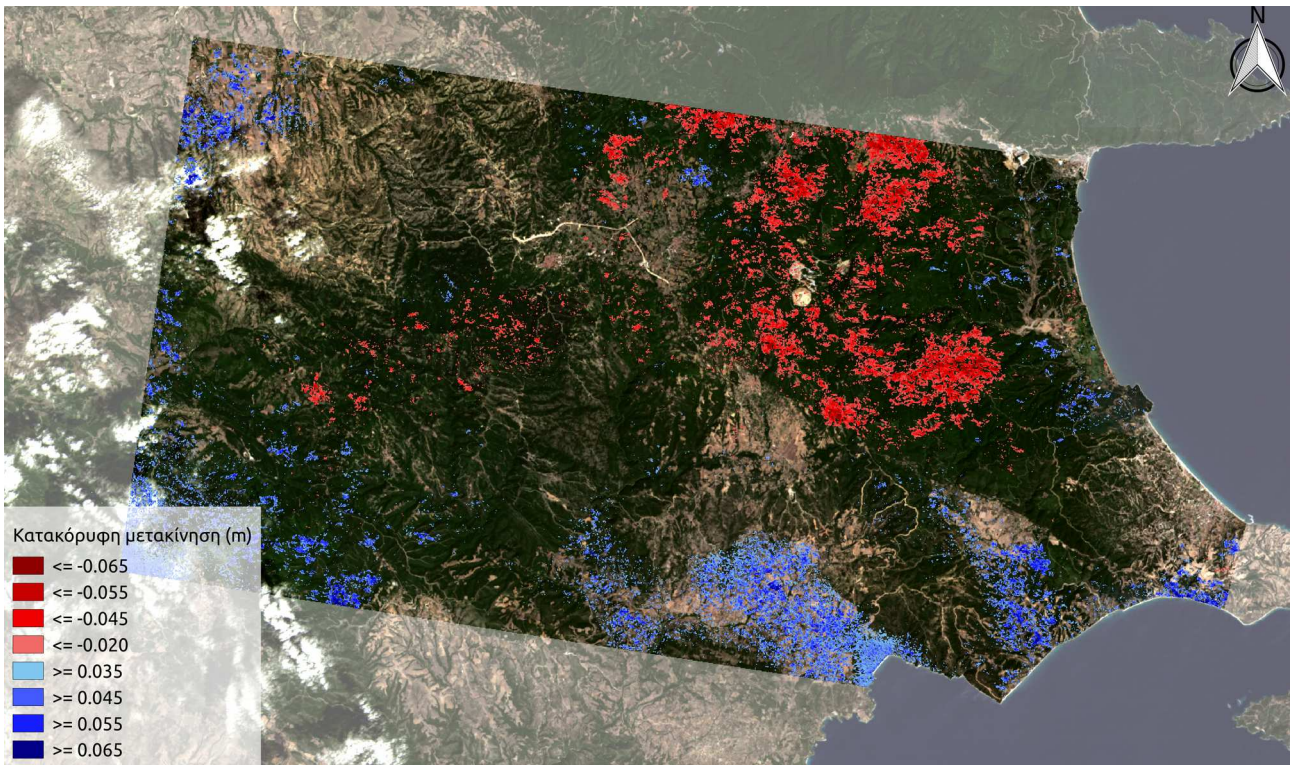
5.2. Χρονική περίοδος : Απρίλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015

5.2.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ζεύγος των SLC εικόνων S1A, με “**master**” εικόνα της ημερομηνίας **19/09/2015** και “**slave**” εικόνα της ημερομηνίας **28/04/2015**. Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό προϊόν της διαδικασίας της συγκεκριμένης εφαρμογής της Διαφορικής Συμβολομετρίας, δηλαδή ο χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων. Σημειώνεται ότι σε αυτόν το χάρτη τονίζονται οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **+3.5cm** και μικρότερες από **-2cm**. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων των κατακόρυφων μετακινήσεων, ώστε να προσεγγίζουν το θετικό και αρνητικό άκρο της κατανομής αντίστοιχα, σε σχέση με την διασπορά των τιμών του ζεύγους και να αναδεικνύονται κατά αυτόν τον τρόπο οι τοπικές μέγιστες και ελάχιστες συγκεντρώσεις των θετικών και αρνητικών τιμών μετακίνησης αντίστοιχα.



Εικόνα 75: Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων τιμών κατακόρυφης μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 - 28/04/2015



Εικόνα 76: Χάρτης τιμών κατακόρυφης μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 - 28/04/2015

Στο χάρτη αυτό παρατηρείται ότι εμφανίζεται υψηλή συγκέντρωση **αρνητικών μέγιστων** τιμών μετακίνησης, τάξης μεγέθους των **-4cm**, με **ελάχιστη** τιμή **-7cm**, στην περιοχή του όρους του Κακκάβου και βόρεια αυτής, όπως επίσης και μια διασπορά αρνητικών τιμών στον ορεινό όγκο του Χολομώντα. Οι περιοχές αυτές εξετάζονται σε επόμενη παράγραφο με την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών σε εικόνες L8. Επιπλέον, **θετικές** τιμές μετακίνησης εμφανίζονται στο νότιο και δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, της τάξης των +5cm, με μέγιστη τιμή τα **+7cm**, ενώ λίγες θετικές τιμές εμφανίζονται στην παράκτια περιοχή στα ανατολικά, γεγονός που συναντάται στην πλειοψηφία των ζευγών εικόνων που επιλύθηκαν. Γενικά, οι θετικές τιμές μετακίνησης παρουσιάζουν μια μέση τιμή της τάξης του 1cm \pm 1cm και οι αρνητικές τιμές της τάξης μερικών χιλιοστών.

Ζεύγος SLC εικόνων S-1A	Θετικές τιμές μετακίνησης			Αρνητικές τιμές μετακίνησης		
	Μέγιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)
19/09/2015-28/04/2015	0.071	0.012	\pm 0.012	-0.072	-0.003	\pm 0.008

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία για τις θετικές και αρνητικές τιμές μετακίνησης για το ζεύγος 19/09/2015 - 28/04/2015

5.2.2. Αποτελέσματα από Landsat-8

Για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται, επιλέχθηκε η εικόνα της ημερομηνίας **26-08-2015** ως βάση αναφοράς για να συγκριθεί με την εικόνα της ημερομηνίας **04-04-2015**. Οι εικόνες αυτές επιλέχθηκαν με κριτήριο να διαφέρουν κατά χρονικό διάστημα, το οποίο θα συμβαδίζει όσο είναι δυνατόν με την αντίστοιχη χρονική βάση του ζεύγους των εικόνων S-1A (4 μήνες) και να έχουν μειωμένη συννεφοκάλυψη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση αλλαγών στο μεταλλείο αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που εξετάστηκε.

Στις εικόνες αυτές οι αλλαγές εστιάζονται και πάλι σε **τρεις υποπεριοχές μελέτης**, οι οποίες επιλέχθηκαν με κριτήριο την εμφάνιση μετακίνησης από το ζεύγος S1A. Η πρώτη υποπεριοχή μελέτης περιλαμβάνει το μεταλλείο των Σκουριών, καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο αυτού. Η δεύτερη υποπεριοχή μελέτης περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο του Χολομώντα και η τρίτη υποπεριοχή μελέτης εκτείνεται στους πρόποδες του ορεινού τμήματος βόρεια των οικισμών της Αρναίας, του Παλαιοχωρίου και του Νεοχωρίου.

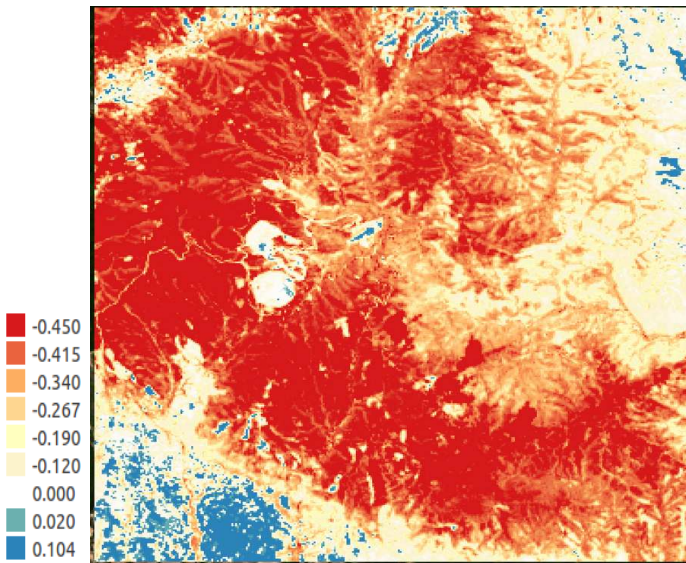
Για το ζεύγος εικόνων που εξετάζεται, στο οποίο εφαρμόστηκαν και οι πέντε αλγόριθμοι ανίχνευσης αλλαγών, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που κρίθηκε ότι ανταποκρίνονται στις αλλαγές εντός των ορίων του μεταλλείου, καθώς και στις εποχικές αλλαγές του ευρύτερου περιβάλλοντα χώρου, έτσι ώστε να εξεταστεί κατά πόσο αυτές συνδέονται και επηρεάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων S1A.

Η λογική των κατωφλίων που εφαρμόστηκαν για τη χρονική περίοδο αυτή στα αποτελέσματα των αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών, για τη δημιουργία δυαδικών εικόνων με τις αλλαγές, συνοψίζεται στο ότι επιδιώχθηκε να αναδειχθούν και να διακριθούν οι αλλαγές στο χώρο του μεταλλείου από αυτές που οφείλονται στην αλλαγή της εποχής στον περιβάλλοντα χώρο του (μεταβολή στη βλάστηση) και να διερευνηθεί εάν οι τελευταίες, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα και έκταση για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται, επηρεάζουν τις μετακινήσεις που εμφανίζεται ότι υπάρχουν μεταξύ των ζευγών S-1A.

ΠΕΡΙΟΧΗ 1

Αρχικά, για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης παρουσιάζεται η **διαφορά των φασματικών γωνιών** μεταξύ των εικόνων του ζεύγους και η αντίστοιχη δυαδική εικόνα των αλλαγών όπως προέκυψε για τιμές από **0.50** έως **0.68**. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα διότι μέσα σε αυτό το διάστημα τιμών υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση εικονοστοιχείων, μιας και η εποχική αλλαγή της βλάστησης καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό στην αλλαγή μεταξύ των δύο εικόνων.

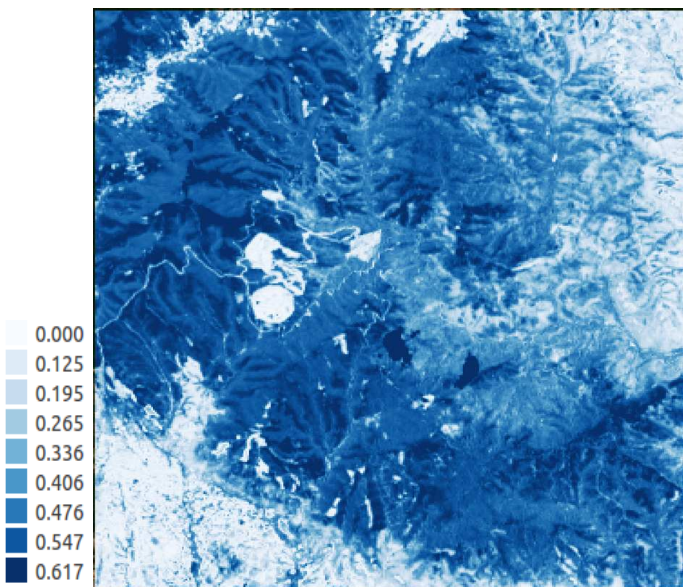
Ακολούθως, παρουσιάζεται η **διαφορά στους δείκτες NDVI** μεταξύ των δύο εικόνων. Στην περίπτωση αυτή η κατωφλίωση έγινε για τιμές **μικρότερες από -0.43**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε και πάλι από το ιστόγραμμα ώστε να περιλαμβάνεται η καμπύλη υψηλών συχνοτήτων τιμών των εικονοστοιχείων για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε παραπάνω.



Εικόνα 77: Διαφορά δεικτών NDVI το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015



Εικόνα 78: Διαφορά δεικτών NDVI το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση



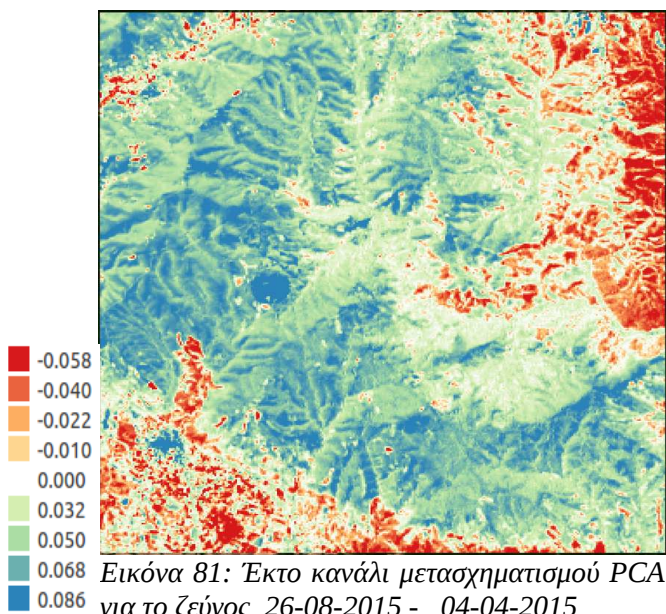
Εικόνα 79: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015



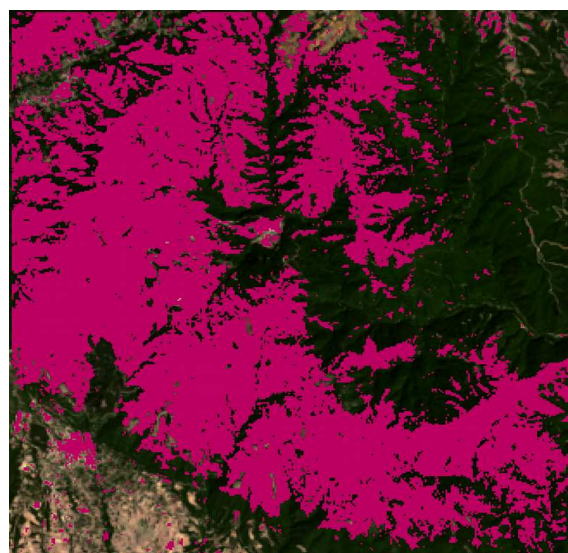
Εικόνα 80: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις εικόνων αλλαγών, με τα κατώφλια που επιλέχθηκαν αναδεικνύεται η εποχική αλλαγή της βλάστησης, ενώ δεν παρουσιάζεται αλλαγή στο χώρο του μεταλλείου, όπως και άλλες μικρότερης κλίμακας αλλαγές, στις καλλιέργειες για παράδειγμα.

Στη συνέχεια, εξετάζεται ο αλγόριθμος μετασχηματισμού **PCA**, μεταξύ δύο εικόνων, και συγκεκριμένα το **κανάλι 4**, στο οποίο συνοψίζονται οι αλλαγές.

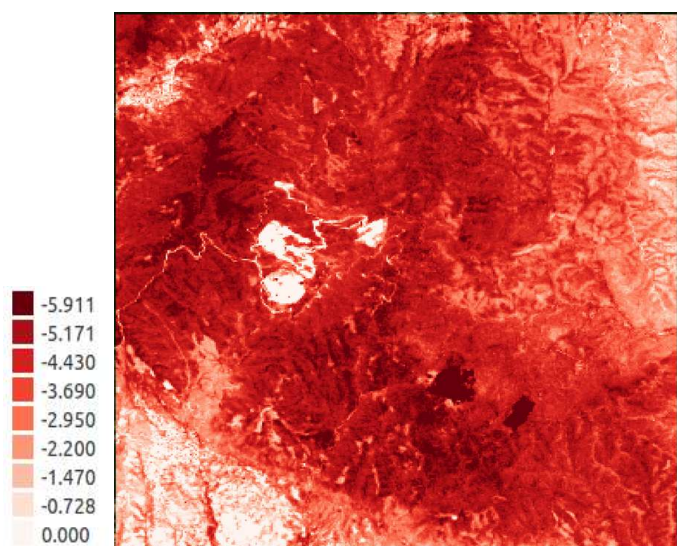


Εικόνα 81: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015

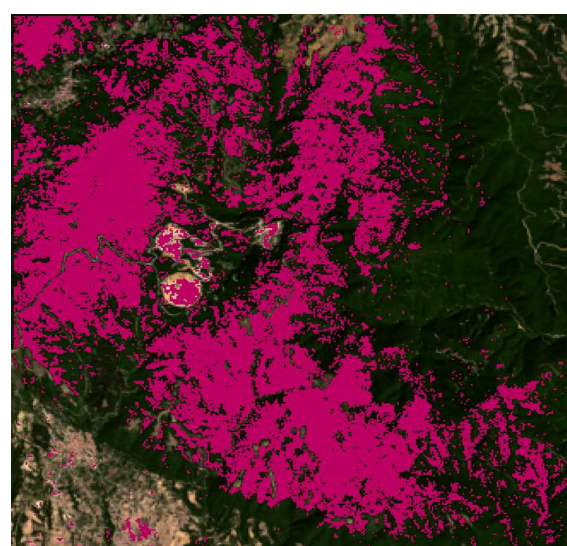


Εικόνα 82: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

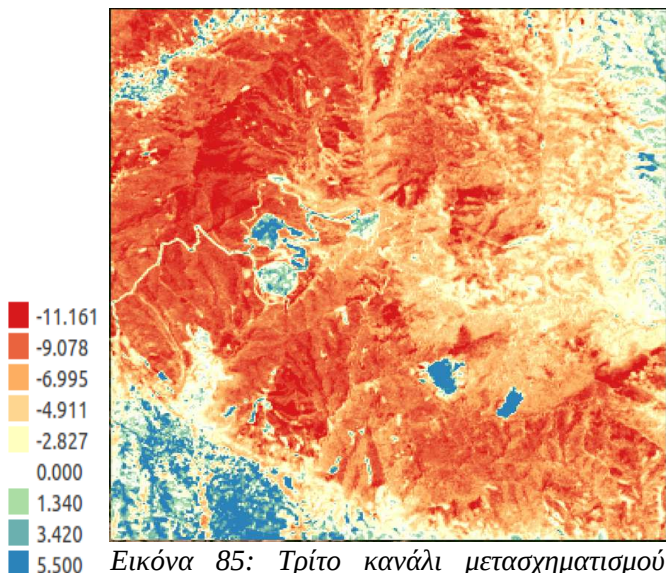
Παρόμοια με τους δύο προαναφερθέντες αλγόριθμους αλλαγών, το κατώφλι για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας με τις αλλαγές, για τον αλγόριθμο μετασχηματισμού PCA, επιλέχθηκε από το ιστόγραμμα βάσει της κορυφής στις συχνότητες εμφάνισης των τιμών των εικονοστοιχείων, έτσι ώστε να αναδειχθούν αυτά με τιμές **μεγαλύτερες από 0.045**. Παρατηρείται ότι στη δυαδική εικόνα των αλλαγών περιλαμβάνονται οι εποχικές αλλαγές της βλάστησης αλλά και ο χώρος του μεταλλείου. Ακολουθεί η παρουσίαση του αποτελέσματος από τον αλγόριθμο μετασχηματισμού **MNF**, για τα κανάλια **δύο, τρία** και **επτά**.



Εικόνα 83: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015



Εικόνα 84: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση



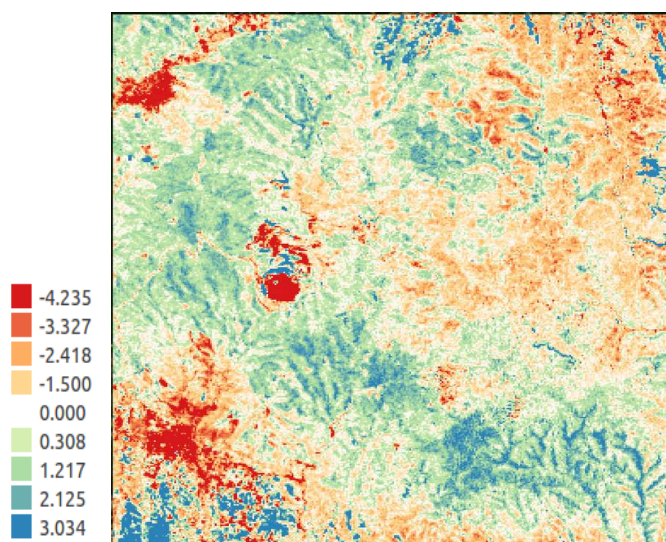
Εικόνα 85: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015



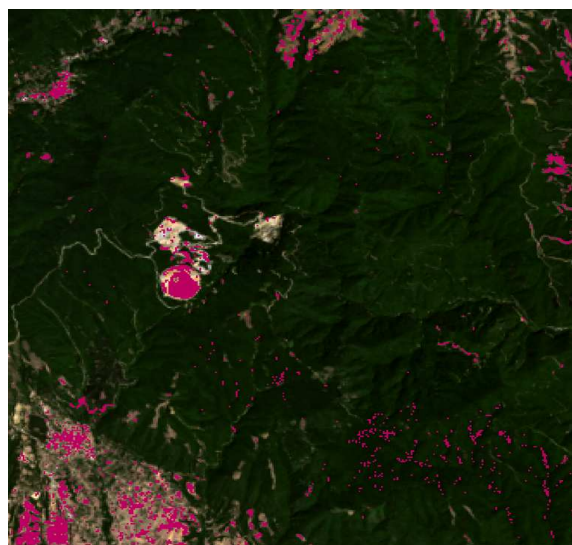
Εικόνα 86: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

Στο δεύτερο μετασχηματισμένο κανάλι **MNF**, επιλέχθηκε να εμφανιστούν οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **1.80** και μικρότερες από **-4.80**. Τα άνω και κάτω αυτά όρια βρίσκονται πολύ κοντά στην υψηλή συγκέντρωση συχνοτήτων της κατανομής των τιμών των εικονοστοιχείων και η επιλογή τους έγινε μέσα από μια διαδικασία δοκιμής και απόρριψης, ώστε να αναδεικνύονται οι αλλαγές στο μεταλλείο και οι εποχικές αλλαγές της βλάστησης. Παρατηρείται ότι εμφανίζεται θόρυβος στη δυαδική εικόνα και δεν είναι ξεκάθαρα τα όρια των αλλαγών. Ακολουθεί το **τρίτο** κανάλι του μετασχηματισμού **MNF**.

Σε αυτό επιλέχθηκε να εμφανιστούν στη δυαδική εικόνα κατωφλίωσης τιμές μεγαλύτερες από 5 και μικρότερες από -7.5. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα συχνοτήτων, ώστε να προσεγγίζουν το θετικό και αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών, εκεί που αναμένεται να βρίσκονται οι αλλαγές. Έτσι, εμφανίζονται οι εποχικές αλλαγές της βλάστησης αλλά και μικρότερης έκτασης αλλαγές στο μεταλλείο και στις καλλιέργειες. Ακολουθεί το **έβδομο** κανάλι του μετασχηματισμού **MNF**.

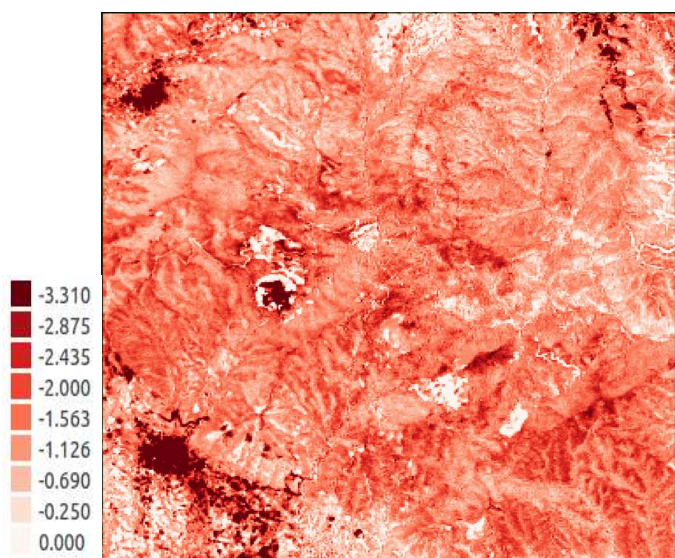


Εικόνα 87: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015



Εικόνα 88: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

Σε αυτό παρατηρείται ότι με την εμφάνιση τιμών μεγαλύτερων του **3** και μικρότερων από **-6.50**, αναδεικνύονται οι τοπικές αλλαγές, στο μεταλλείο, στις καλλιέργειες και σε κάποια επιμέρους σημεία πρασίνου που έχουν αποψιλωθεί. Αυτές οι τιμές κατωφλίωσης βρίσκονται εκτός του διαστήματος **($\mu+2\sigma, \mu-2\sigma$)**, για την κατανομή των τιμών του καναλιού αυτού. Παρακάτω παρουσιάζεται το **ένατο** κανάλι του μετασχηματισμού **ICA**.



Εικόνα 89: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 - 04-04-2015

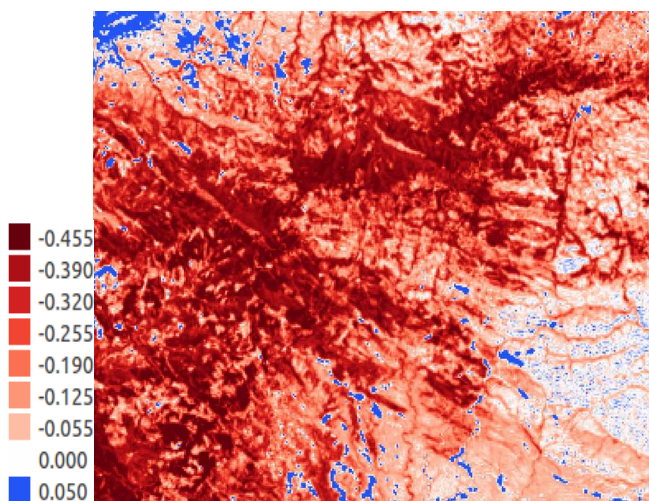


Εικόνα 90: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

Για το ένατο κανάλι του μετασχηματισμού ICA, για τη δημιουργία της κατωφλιωμένης δυαδικής εικόνας επιλέχθηκαν τιμές μεγαλύτερες μικρότερες από **-3** και μεγαλύτερες από **-9**. Παρατηρείται ότι στο κανάλι αυτό εμφανίζονται οι τοπικές αλλαγές που αφορούν στο μεταλλείο και στις καλλιέργειες, ενώ δεν εμφανίζεται καθόλου εποχική αλλαγή στο πράσινο. Επιπλέον, ο θόρυβος είναι ελάχιστος σε σχέση με το **έβδομο** κανάλι του μετασχηματισμού **MNF**, που εξετάστηκε προηγουμένως.

ΠΕΡΙΟΧΗ 2

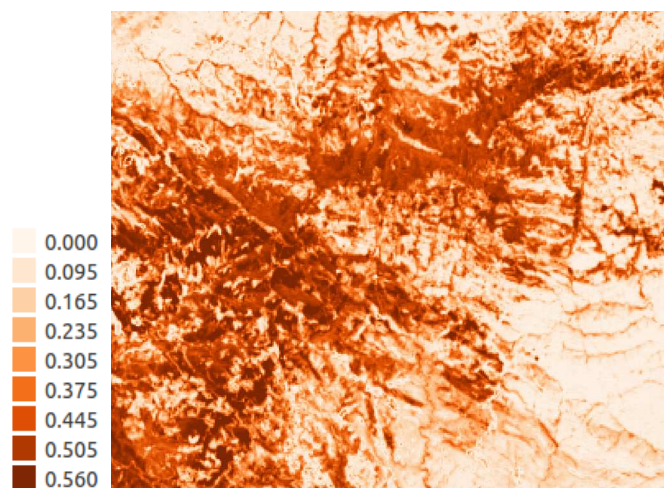
Για τη δεύτερη υποπεριοχή μελέτης παρουσιάζεται η **διαφορά στους δείκτες NDVI** μεταξύ των δύο εικόνων του ζεύγους και η αντίστοιχη δυαδική εικόνα των αλλαγών όπως προέκυψε για τιμές μικρότερες από την τιμή **-0.27**. Ακολούθως, παρουσιάζεται η **διαφορά στη φασματική γωνία** μεταξύ των δύο εικόνων. Στην περίπτωση αυτή η κατωφλίωση έγινε για τιμές μεγαλύτερες από **0.43**. Οι δύο εικόνες παρουσιάζουν παρεμφερείς αλλαγές, που αντιπροσωπεύουν εποχική αλλαγή στη βλάστηση.



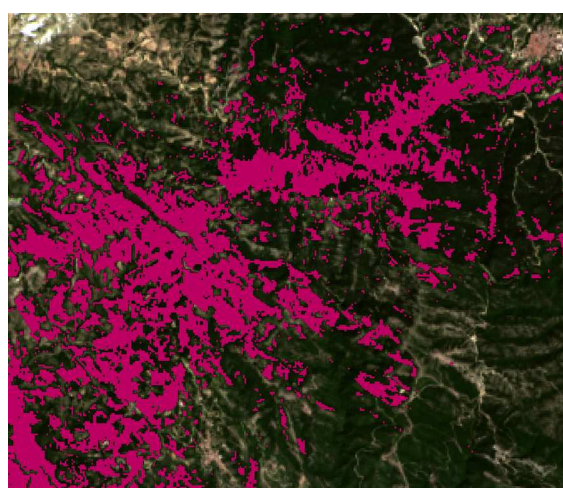
Εικόνα 91: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015



Εικόνα 92: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

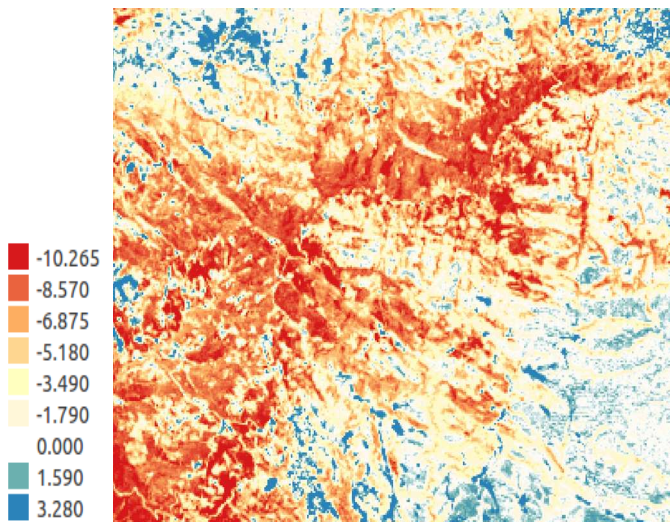


Εικόνα 93: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015



Εικόνα 94: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

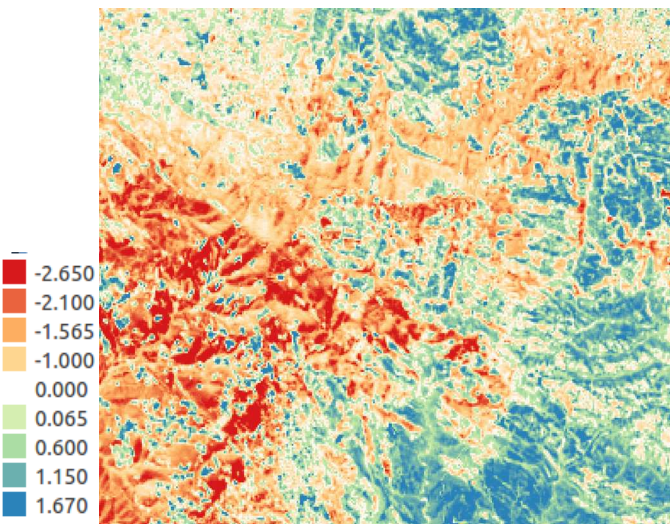
Επίσης, αυτές οι εποχικές αλλαγές στη βλάστηση είναι εμφανείς στο **τρίτο** κανάλι των μετασχηματισμένων εικόνων **MNF** και **ICA** αντίστοιχα. Για τον πρώτο αλγόριθμο μετασχηματισμού επιλέχθηκε να εμφανιστούν τιμές μεγαλύτερες από **4** και μικρότερες από **-7**. Για τον αλγόριθμο **ICA** επιλέχθηκε να εμφανιστούν τιμές, που είναι μεγαλύτερες από **2.50** και μικρότερες από **-0.80**. Οι τιμές αυτές για κάθε αλγόριθμο αντιστοιχούν στα διαστήματα του ιστογράμματος που εμφανίζονται υψηλές συχνότητες αρνητικών τιμών και χαμηλές συχνότητες θετικών τιμών. Ο αλγόριθμος **PCA** παρουσίασε αποτελέσματα με αρκετό θόρυβο γι' αυτό και δεν παρουσιάζεται.



Εικόνα 95: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015



Εικόνα 96: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση



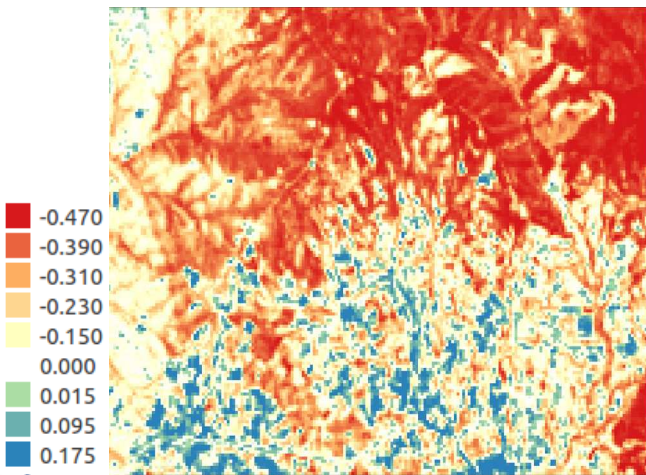
Εικόνα 97: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015



Εικόνα 98: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

ΠΕΡΙΟΧΗ 3

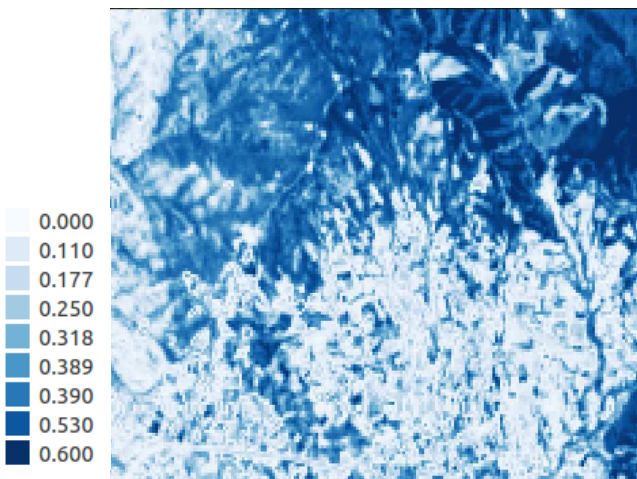
Για την τρίτη υποπεριοχή μελέτης παρουσιάζεται η **διαφορά στους δείκτες NDVI** μεταξύ των δύο εικόνων του ζεύγους και η αντίστοιχη δυαδική εικόνα των αλλαγών όπως προέκυψε για τιμές μικρότερες από την τιμή -0.33. Ακολουθώντας, παρουσιάζεται η **διαφορά στη φασματική γωνία** μεταξύ των δύο εικόνων. Στην περίπτωση αυτή η κατωφλίωση έγινε για τιμές μεγαλύτερες από 0.30. Οι δύο εικόνες παρουσιάζουν παρεμφερείς αλλαγές, που αντιπροσωπεύουν εποχική αλλαγή στη βλάστηση, όπως παρατηρήθηκε και στη δεύτερη υποπεριοχή μελέτης.



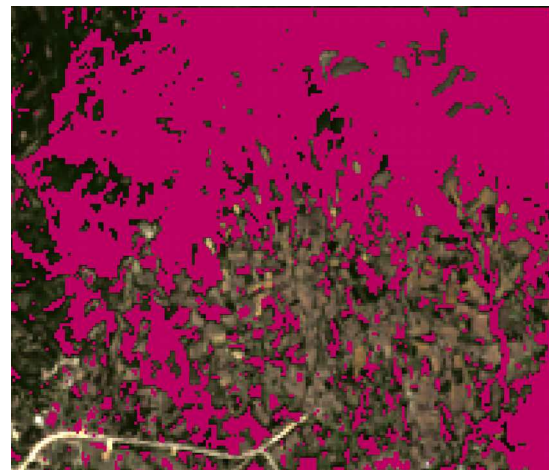
Εικόνα 99: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015



Εικόνα 100: Διαφορά δεικτών NDVI για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

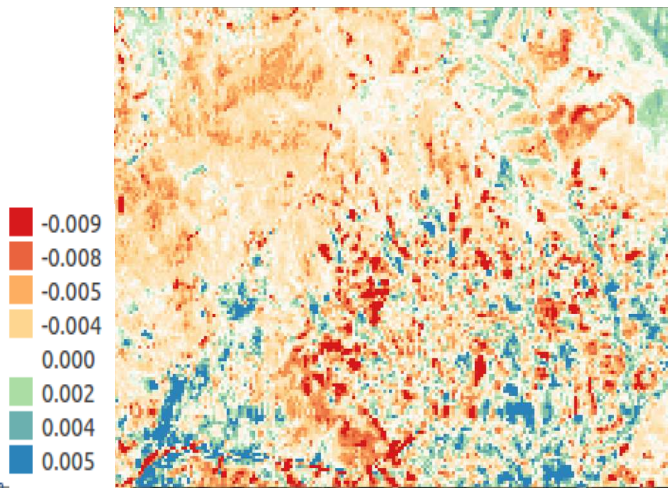


Εικόνα 101: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015

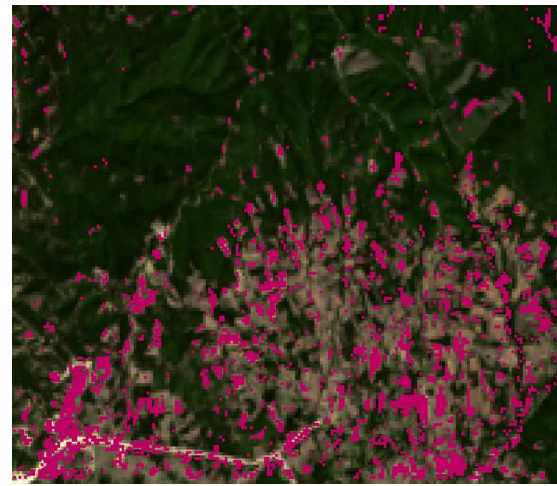


Εικόνα 102: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

Επιπρόσθετα, στην τρίτη υποπεριοχή μελέτης στη μετασχηματισμένη εικόνα **PCA** και συγκεκριμένα στο **κανάλι 8**, εμφανίζονται αλλαγές στις καλλιέργειες, οι οποίες ξεχωρίζουν από τις εποχικές αλλαγές στη βλάστηση για τιμές μεγαλύτερες από **0.0030** και μικρότερες από **-0.008**. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα ώστε να προσεγγίζουν το θετικό και αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών.



Εικόνα 103: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015

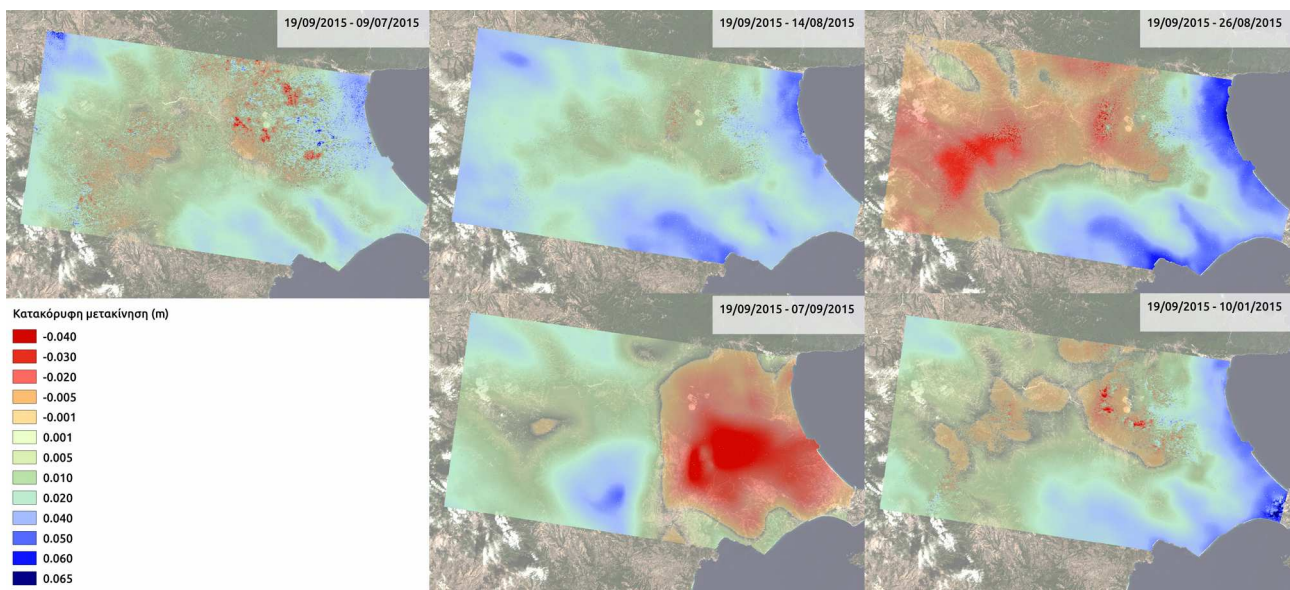


Εικόνα 104: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 04-04-2015, μετά την κατωφλίωση

5.3. Χρονική περίοδος : Ιούλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015

5.3.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A

Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται τα ζεύγη των διαθέσιμων εικόνων S1A για τους μήνες του Ιουλίου, του Αυγούστου, του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου 2015, με **“master”** εικόνα αυτή της ημερομηνίας **19/09/2015**. Αντίστοιχα όπως υπολογίστηκε και για τις εικόνες από το 2014, η αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση που προέκυψε για το κάθε ζεύγος του 2015 επιλύθηκε μαζί με τα υπόλοιπα ως stack για να διαπιστωθεί η ο ρυθμός μεταβολής της συμβολομετρικής φάσης για τους μήνες αυτούς και να υπολογιστεί τελικά από αυτή η κατακόρυφη μετακίνηση για τους μήνες αυτούς των ζευγών που συμμετείχαν στο stack. Τα ζεύγη αυτά χαρακτηρίζονται από τη μικρή χρονική τους βάση, με μέγιστη τις 48 μέρες και ελάχιστη τις 12, οπότε αναμένεται να υπάρχει μεγαλύτερη συνάφεια μεταξύ των εικόνων για κάθε ζεύγος. Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό προϊόν της διαδικασίας της συγκεκριμένης εφαρμογής της διαφορικής Συμβολομετρίας, δηλαδή ο χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων, όπως προέκυψε από την επίλυση κάθε ζεύγους ξεχωριστά αλλά και την επίλυση ως stack.

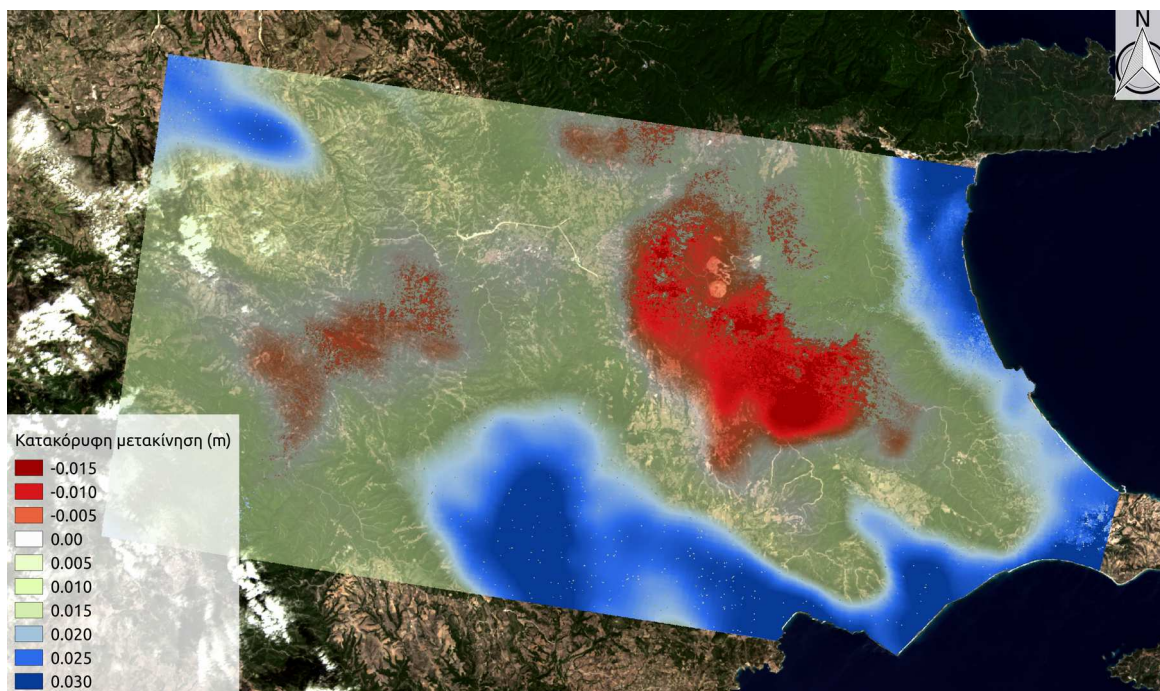


Εικόνα 105: Χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων για τα ζεύγη εικόνων του 2015 με κοινή Master 19/09/2015

Ζεύγος SLC εικόνων S-1A	Θετικές τιμές μετακίνησης			Αρνητικές τιμές μετακίνησης		
	Μέγιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)
19/09/2015 – 09/07/2015	0.072	0.015	±0.011	-0.048	-0.001	±0.003
19/09/2015 – 14/08/2015	0.068	0.025	±0.011	-0.030	0.000	±0.001
19/09/2015 – 26/08/2015	0.064	0.013	±0.012	-0.047	-0.006	±0.008
19/09/2015 – 07/09/2015	0.047	0.009	±0.010	-0.050	-0.007	±0.012
19/09/2015 – 01/10/2015	0.070	0.014	±0.013	-0.041	-0.001	±0.002
Stack '15	0.037	0.011	±0.010	-0.028	-0.001	±0.003

Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για τα ζεύγη του stack 14

Παρατηρείται ότι παρόλο που τα ζεύγη έχουν μικρή χρονική βάση, εμφανίζουν τιμές κατακόρυφων μετακινήσεων, με μια μέση τιμή της τάξης του 1cm. Επιπλέον, παρατηρείται ότι επαναλαμβάνεται το μοτίβο εμφάνισης των θετικών τιμών κατακόρυφης μετακίνησης στο παράκτιο βορειοανατολικό και νότιο τμήμα της περιοχής, όπως στα ζεύγη των μηνών του 2014, με εξαίρεση το ζεύγος του Σεπτεμβρίου. Οι αρνητικές τιμές μετακίνησης εμφανίζονται στην πλειοψηφία τους στην περιοχή δυτικά του μεταλλείου των Σκουριών, καθώς επίσης εμφανίζονται κάποια τοπικά μέγιστα στην περιοχή του ορεινού όγκου του Χολομώντα και του δάσους του Πολύγυρου, στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Στο ζεύγος του Σεπτεμβρίου εμφανίζονται δύο υψηλές κορυφές συγκέντρωσης αρνητικών και θετικών τιμών, οι οποίες δεν συμβαδίζουν με τα υπόλοιπα ζεύγη του stack. Τελικά, από την αποκατεστημένη φάση των συμβολογραφημάτων των ζευγών που αναφέρθηκαν παραπάνω προέκυψε ο ρυθμός μεταβολής της συμβολομετρικής φάσης για τους μήνες που εξετάστηκαν, ο οποίος μετατράπηκε σε κατακόρυφη μετακίνηση και έτσι προέκυψε ο χάρτης κατακόρυφης μετακίνησης που παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 106: Χάρτης κατακόρυφων μετακινήσεων, όπως προέκυψε για τα ζεύγη του 2015 με κοινή Master 19/09/2015

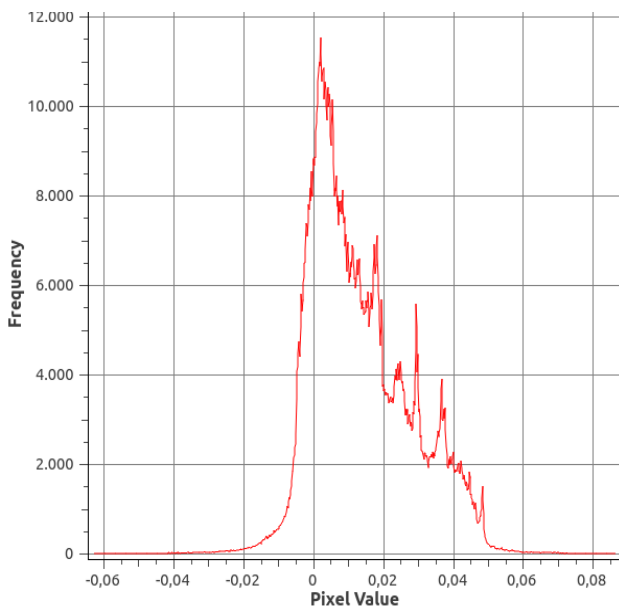
Από το χάρτη μετακινήσεων του stack γίνεται περισσότερο φανερό το μοτίβο που ακολουθεί η πλειοψηφία των συμβολογραφημάτων του stack, δηλαδή η υψηλή συγκέντρωση θετικών μεγίστων στην περιοχή του Στρατωνίου, στην παράκτια ζώνη και στο νότιο τμήμα της περιοχής και των αρνητικών ελαχίστων στην περιβάλλουσα περιοχή του μεταλλείου των Σκουριών και στον ορεινό όγκο του Χολομώντα, στο δυτικό τμήμα της περιοχής. Σε σύγκριση με το stack των μηνών του 2014, το stack αυτό εμφανίζει μικρότερο ποσοστό θορύβου, γεγονός που επιβεβαιώνει την **καλή συνάφεια** μεταξύ των εικόνων των ζευγών, λόγω της μικρής χρονικής τους βάσης, καθώς επίσης και μικρότερες τιμές μετακίνησης.

Η διασπορά των τιμών μετακίνησης φαίνεται να είναι μεγαλύτερη, καθώς δεν εμφανίζονται έντονες εναλλαγές τιμών μετακίνησης, σε σχέση με το stack του 2014 που συμβαίνει αυτό λόγω

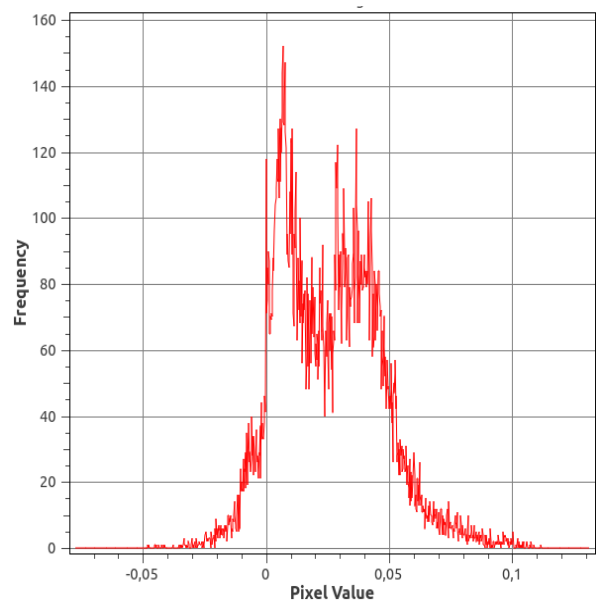
του θορύβου. Γενικά, όμως, οι τιμές μετακίνησης έχουν ίδια τάξη μεγέθους και στα δύο stack και επιπλέον, σε κανένα από τα δύο **δεν εμφανίζεται σημαντική τιμή μετακίνησης** εντός των ορίων του μεταλλείου των Σκουριών, σε αντίθεση με το μεταλλείο του Σιδηρόλακκου, όπου εμφανίζονται θετικές τιμές κατακόρυφης μετακίνησης, της τάξης των 3cm.

Στη συνέχεια, για να διερευνηθεί περαιτέρω η δυνατότητα ανίχνευσης μετακινήσεων στην περιοχή του μεταλλείου των Σκουριών και να αναδειχθούν εναπομείνασες τοπικές διαφορές μεταξύ του Οκτωβρίου 2014 και του Οκτωβρίου 2015, αφαιρέθηκε από το χάρτη μετακινήσεων του ζεύγους **19/09/2015 – 01/10/2015**, από το χάρτη του **19/09/2015 – 28/10/2014**, μιας και τα δύο επιλύθηκαν με την ίδια “master” εικόνα αυτή της ημερομηνίας 19/09/2015 και αντιστοιχούν στην ίδια εποχή, οπότε θεωρείται ότι οι **ατμοσφαιρικές συνθήκες** είναι συναφείς για τις δύο αυτές χρονικές περιόδους.

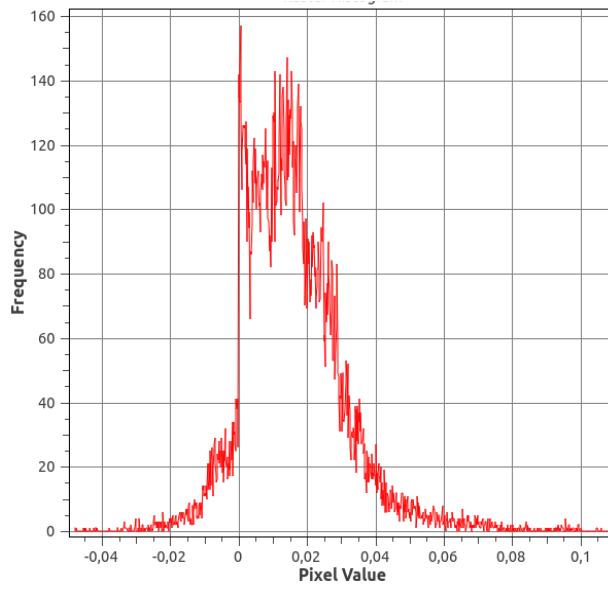
Στο σημείο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι το ζεύγος 19/09/2015 – 28/10/2014 περιλαμβάνει τοπικές μετακινήσεις στο μεταλλείο, μιας και εκείνη τη χρονική περίοδο ήταν ενεργό και το ζεύγος 19/09/2015 – 28/10/2014 δεν περιλαμβάνει μετακινήσεις στο χώρο του μεταλλείου, μιας και εκείνη τη χρονική περίοδο υπήρχε παύση εργασιών. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω ως χάρτης τιμών κατακόρυφης μετακίνησης. Σημειώνεται ότι στο χάρτη αυτό τονίζονται οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **+4cm** και μικρότερες από **-2cm**. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων, ώστε να προσεγγίζουν τα όρια του διαστήματος (**$\mu-2\sigma$, $\mu+2\sigma$**), για μέση τιμή (μ) της τάξης του **1.5cm** και τυπική απόκλιση (σ) της τάξης του **1.5cm** αντίστοιχα.



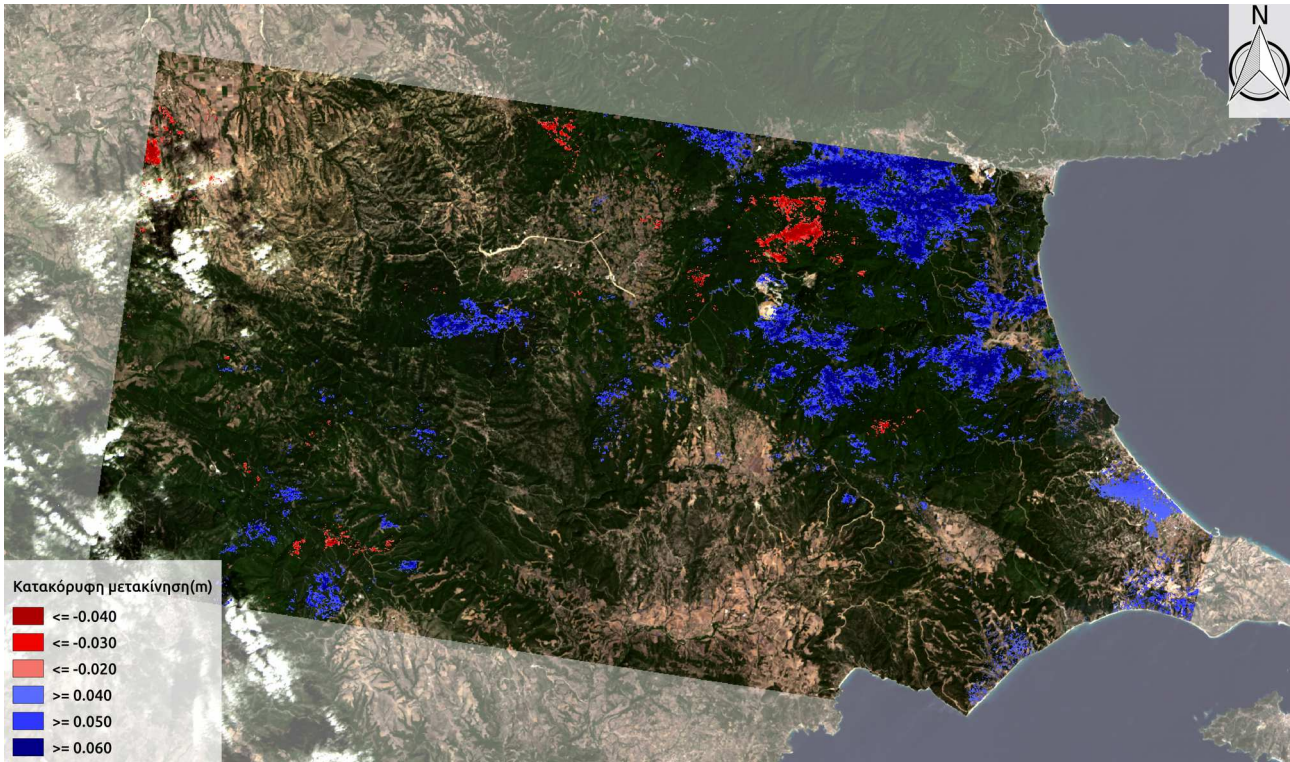
Εικόνα 107: Ιστόγραμμα 20150919-20151001



Εικόνα 108: Ιστόγραμμα 20150919-20141028



Εικόνα 109: Ιστόγραμμα 20150919-20141028, μετά την αφαίρεση του 20150919-20151001



Εικόνα 110: Χάρτης μετακινήσεων για το ζεύγος 20150919-20141028, όπως προέκυψε μετά την αφαίρεση του ζεύγους 20150919-20151001

Ζεύγος SLC εικόνων S-1A	Θετικές τιμές μετακίνησης			Αρνητικές τιμές μετακίνησης		
	Μέγιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)
19/09/2015 – 18/10/2014	0.112	0.026	±0.020	-0.048	-0.001	± 0.003
19/09/2015 – 18/10/2014 (μετά την αφαίρεση)	0.109	0.014	±0.014	-0.048	-0.001	± 0.003

Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για το ζεύγος 20150919-20141028

Στην περιοχή βόρεια του μεταλλείου, παρατηρούνται **αρνητικές** τιμές μετακίνησης της τάξης των **-3cm**. Στην παράκτια περιοχή στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, καθώς και στην περιοχή νοτιοανατολικά του μεταλλείου των Σκουριών, στο όρος του Κακκάβου, εμφανίζονται τιμές μετακίνησης της τάξης των **+4cm**. Μικρότερες θετικές τιμές μετακίνησης εμφανίζονται στην περιοχή του ορεινού όγκου του Χολομώντα και νότια αυτής. Γενικά, από την αφαίρεση του χάρτη μετακίνησης του ζεύγους 19/09/2015 – 01/10/2015 από τον αντίστοιχο χάρτη του ζεύγους 19/09/2015 – 28/10/2015 παρατηρείται μικρή **μείωση** των θετικών τιμών και της μέσης τιμής τους στο μισό, αλλά οι αρνητικές τιμές δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες αλλαγές.

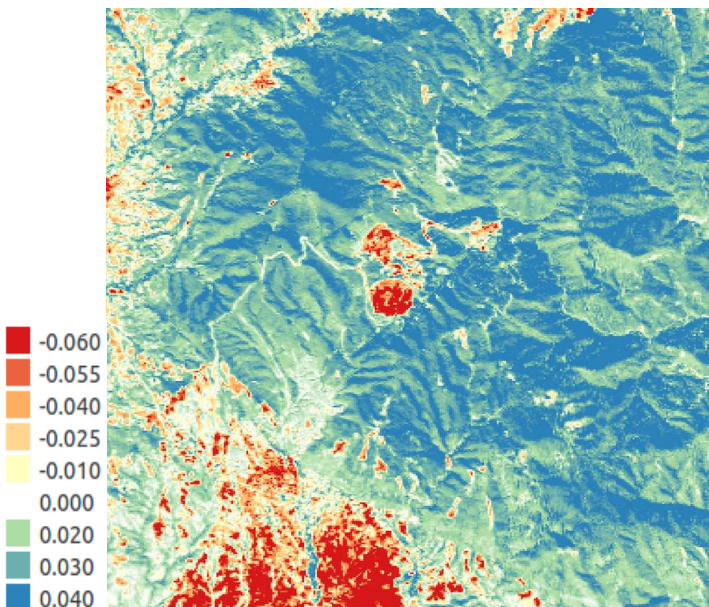
5.3.2. Αποτελέσματα από Landsat-8

Για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται σε αυτή την περίπτωση, επιλέχθηκε η εικόνα L8 της ημερομηνίας **26-08-2015** ως βάση αναφοράς για να συγκριθεί με την εικόνα της ημερομηνίας **25-07-2015**. Οι εικόνες αυτές επιλέχθηκαν με κριτήριο να διαφέρουν κατά χρονικό διάστημα, το οποίο θα συμβαδίζει όσο είναι δυνατόν με την αντίστοιχη χρονική βάση του ζεύγους των εικόνων S-1A και να έχουν μειωμένη συννεφοκάλυψη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση αλλαγών στην περιοχή μελέτης.

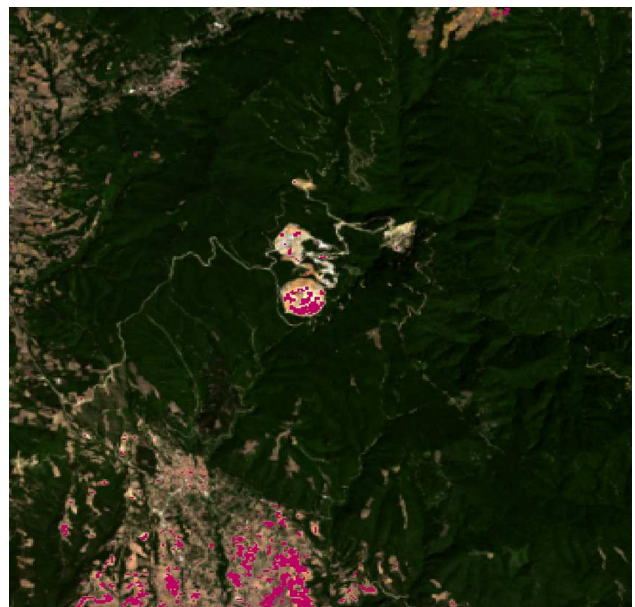
Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων που επιλέχθηκε, η εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών εστιάστηκε σε μια υποπεριοχή μελέτης, αυτή του μεταλλείου των Σκουριών και του περιβάλλοντα χώρου αυτού, μιας και σε αυτή τη χρονική περίοδο, από Ιούλιο μέχρι Αύγουστο, δεν υπάρχουν εποχικές αλλαγές και δεν αναμένεται να εμφανίζονται σημαντικές αλλαγές σε άλλα σημεία της ευρύτερης περιοχής. Σημειώνεται, επιπλέον, ότι οι **εξορυκτικές εργασίες στο μεταλλείο σταμάτησαν από τον Αύγουστο και μετά**, οπότε δεν αναμένεται να υπάρχουν αξιοσημείωτες αλλαγές, μεγάλης έκτασης, στο βασικό χώρο εξόρυξης του μεταλλείου, όπως ούτε και μεταβολές στην περιβάλλουσα δασική έκταση.

Συγκεκριμένα, στο ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε γι' αυτή τη χρονική περίοδο, εφαρμόστηκαν και οι πέντε αλγόριθμοι ανίχνευσης αλλαγών, οι οποίοι έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά επιλέγεται να παρουσιαστούν οι αλγόριθμοι μετασχηματισμού PCA, MNF και ICA, οι οποίοι παρουσίασαν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των αλλαγών.

Αρχικά, παρουσιάζεται παρακάτω η μετασχηματισμένη εικόνα των αλλαγών, όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο **PCA**.



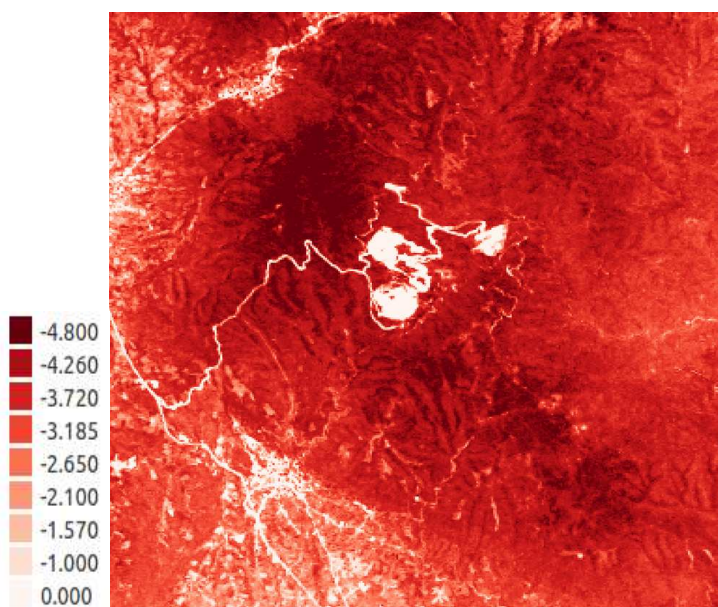
Εικόνα 111: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015



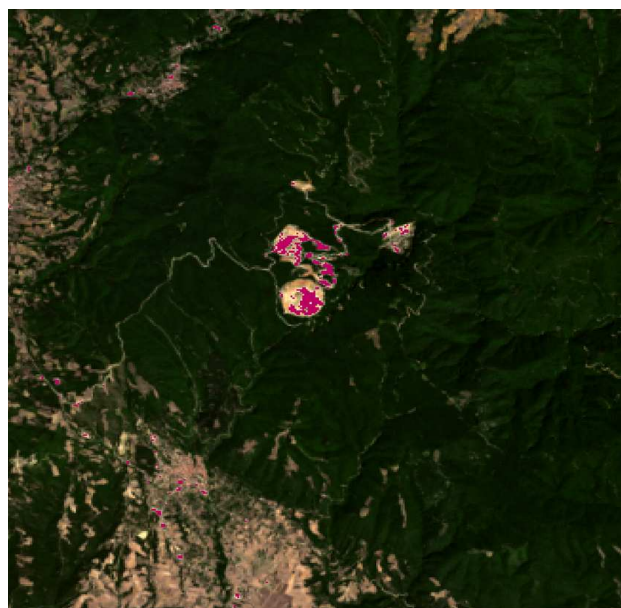
Εικόνα 112: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση

Για το **τρίτο** κανάλι του αλγορίθμου PCA, επιλέχθηκαν για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας με τις αλλαγές οι τιμές που είναι μικρότερες από -0.08. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε από το ιστόγραμμα της εικόνας, επειδή προσεγγίζει το αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών και είναι ενδεικτική της αλλαγής στο χώρο του μεταλλείου. Επίσης, εμφανίζονται τοπικές αλλαγές σε καλλιέργειες στην περιοχή νότια του μεταλλείου, οι οποίες θεωρούνται ότι είναι αστοχία του αλγορίθμου.

Για το τρίτο κανάλι του αλγορίθμου **MNF**, επιλέχθηκαν, για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας με τις αλλαγές, οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **4**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε από το ιστόγραμμα της εικόνας, επειδή προσεγγίζει το θετικό άκρο της κατανομής των τιμών και είναι ενδεικτική της αλλαγής στο χώρο του μεταλλείου. Είναι φανερό ότι ο θόρυβος είναι ελάχιστος σε σχέση με τον προηγούμενο αλγόριθμο PCA και οι αλλαγές είναι στοχευμένες στο χώρο του μεταλλείου και επιβεβαιώνονται με φωτοερμηνεία.

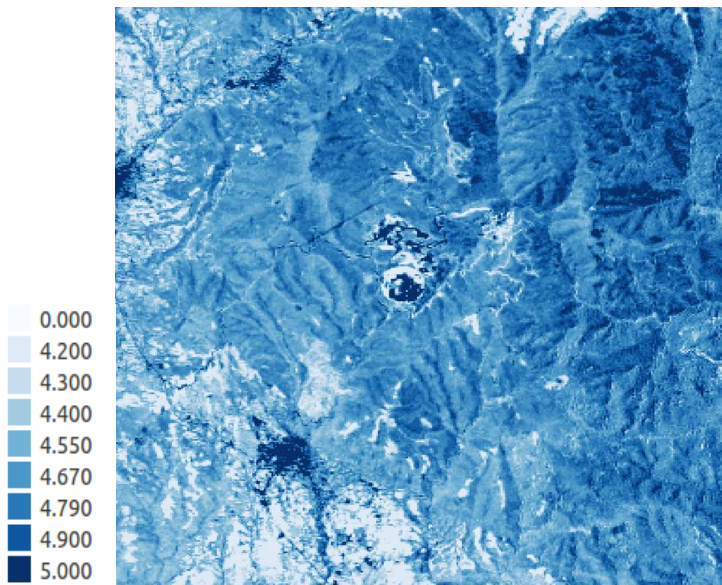


Εικόνα 113: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015

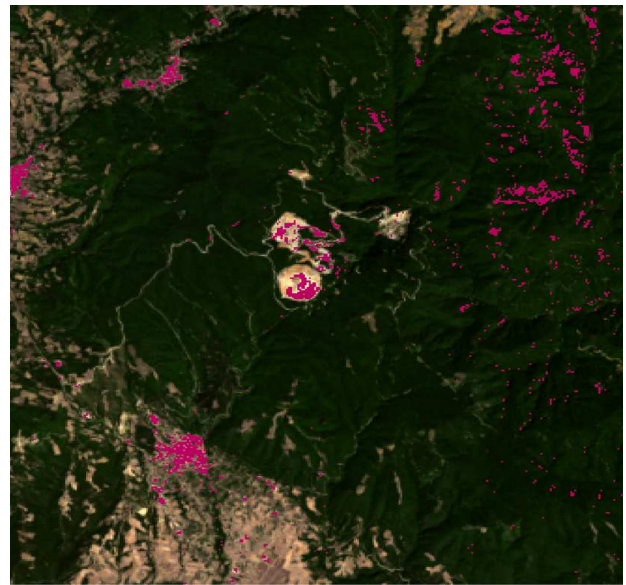


Εικόνα 114: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση

Για το δεύτερο κανάλι του αλγορίθμου μετασχηματισμού **ICA**, επιλέχθηκαν για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας, οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **5**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε από το ιστόγραμμα της εικόνας, επειδή προσεγγίζει το μέγιστο θετικό άκρο της κατανομής των τιμών και είναι ενδεικτική της αλλαγής στο χώρο του μεταλλείου. Παρατηρείται θόρυβος στη δασική έκταση ανατολικά του μεταλλείου. Επίσης εμφανίζονται αλλαγές στους οικισμούς περιμετρικά του μεταλλείου, προς τα δυτικά, οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

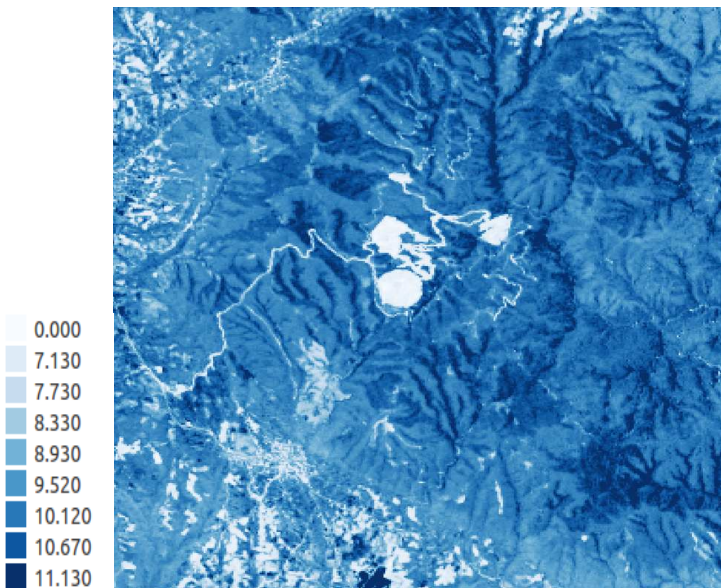


Εικόνα 115: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015

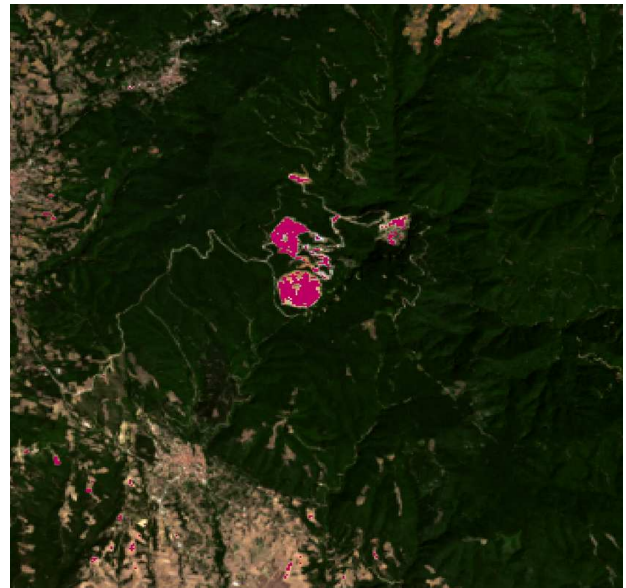


Εικόνα 116: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση

Τέλος, για το **όγδοο** κανάλι του αλγορίθμου μετασχηματισμού ICA, επιλέχθηκαν για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας, οι τιμές που είναι μικρότερες από **4**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε από το ιστόγραμμα της εικόνας, επειδή προσεγγίζει το ελάχιστο θετικό άκρο της κατανομής των τιμών και είναι ενδεικτική της αλλαγής στο χώρο του μεταλλείου. Με βάση τη συγκεκριμένη κατωφλίωση, παρατηρείται ότι **υπερεκτιμάται** η αλλαγή στο χώρο του μεταλλείου, δεδομένου ότι αυτό ήταν ενεργό για διάστημα μικρότερο του ενός μήνα.



Εικόνα 117: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015

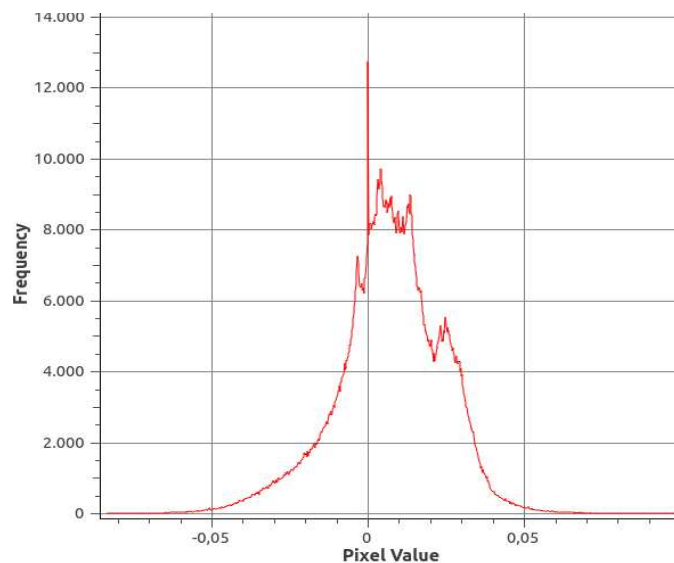


Εικόνα 118: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26-08-2015 – 25-07-2015, μετά την κατωφλίωση

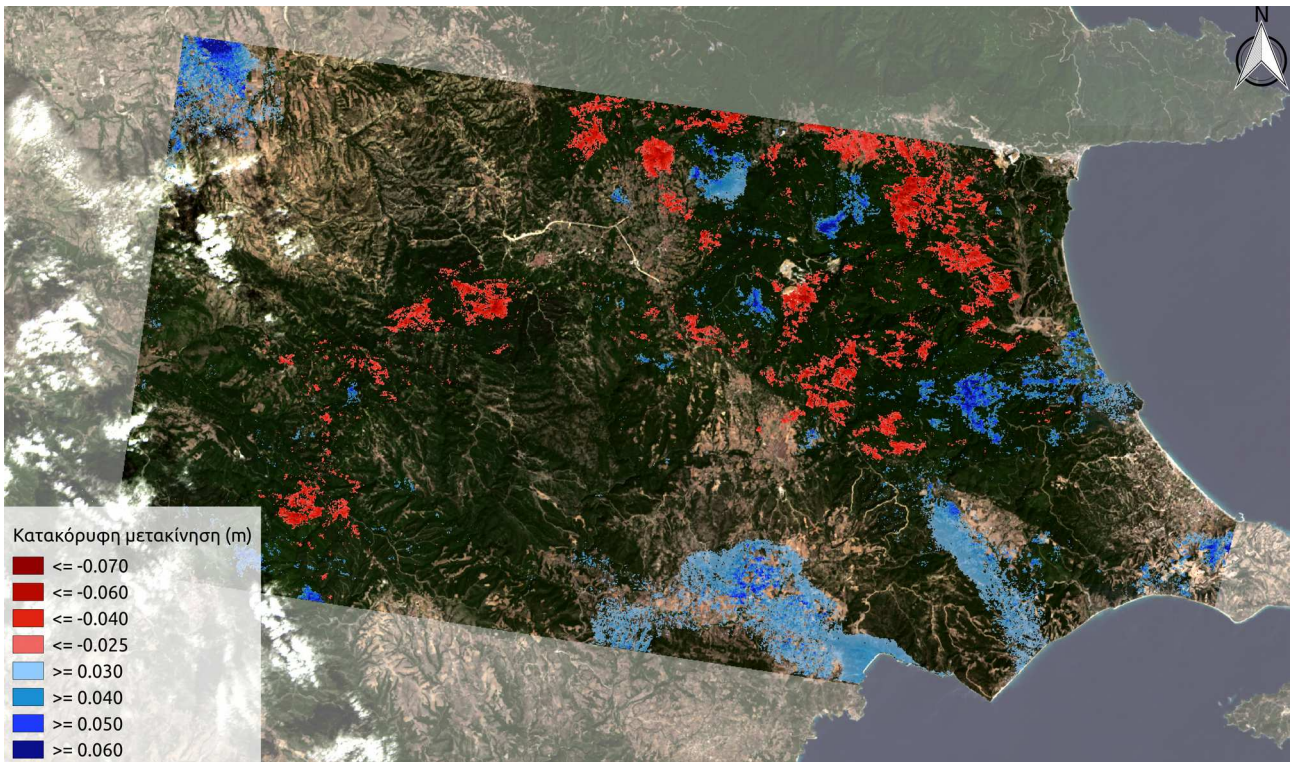
5.4. Χρονική περίοδος : Σεπτέμβριος 2015 – Ιανουάριος 2016

5.4.1. Αποτελέσματα από Sentinel-1A

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ζεύγος των SLC εικόνων S1A, με “**master**” εικόνα της ημερομηνίας **19/09/2015** και “**slave**” εικόνα της ημερομηνίας **05/01/2016**. Παρακάτω παρουσιάζεται χάρτης των κατακόρυφων μετακινήσεων για αυτό το ζεύγος εικόνων. Σημειώνεται ότι και σε αυτόν το χάρτη τονίζονται οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από **+3cm** και μικρότερες από **-2.5cm**, βάσει της λογικής κατωφλίωσης που ακολουθήθηκε και στους προηγούμενους χάρτες μετακινήσεων που παρουσιάστηκαν, από το ιστόγραμμα της κατανομής των τιμών μετακίνησης, ώστε να αναδειχθούν οι τοπικές μέγιστες και ελάχιστες συγκεντρώσεις των θετικών και αρνητικών τιμών μετακίνησης.



Εικόνα 119: Ιστόγραμμα 20150919-20160105



Εικόνα 120: Χάρτης μετακινήσεων για το ζεύγος 20150919-20160105

Στο χάρτη αυτόν, επαναλαμβάνεται το μοτίβο εμφάνισης θετικών τιμών μετακίνησης, της τάξης των **+4cm**, στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, στους πρόποδες των τοπικών ορεινών όγκων, σε εκτάσεις που καλύπτονται από καλλιέργειες. Επίσης, θετικές τιμές μετακίνησης εμφανίζονται σε παράκτιο τμήμα μεταξύ Στρατωνίου και Ιερισσού, οι οποίες εξαπλώνονται και στο όρος του Κακκάβου. Οι αρνητικές τιμές μετακίνησης εμφανίζονται και σε αυτό το ζεύγος, εντονότερα από τα προηγούμενα, στη διεύθυνση βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά, στην περιοχή γύρω από το μεταλλείο των Σκουριών, στον ορεινό όγκο του Χολομώντα και επεκτείνονται μέχρι και τον Πολύγυρο, στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής.

Ζεύγος SLC εικόνων S-1A	Θετικές τιμές μετακίνησης			Αρνητικές τιμές μετακίνησης		
	Μέγιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση(m)
19/09/2015 – 05/01/2016	0.075	0.011	± 0.011	-0.063	-0.004	± 0.009

Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία αρνητικών και θετικών τιμών μετακίνησης για το ζεύγος 20150919-20160105

Στην επόμενη παράγραφο εξετάζονται οι περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές τιμές συγκέντρωσης θετικών και αρνητικών τιμών μετακίνησης μέσω της εφαρμογής αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών σε εικόνες L8 σε κοντινές ημερομηνίες με αυτές των ζευγών SLC εικόνων S1A, ώστε να διαπιστωθεί αν παρουσιάζονται αλλαγές και αν αυτές συμφωνούν ή όχι με τις περιοχές των κατακόρυφων μετακινήσεων στις εικόνες S1A.

5.4.2. Αποτελέσματα από Landsat-8

Για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται, επιλέχθηκε η εικόνα της ημερομηνίας **26-08-2015** ως βάση αναφοράς για να συγκριθεί με την εικόνα της ημερομηνίας **01-01-2016**. Οι εικόνες αυτές για άλλη μια φορά επιλέχθηκαν με κριτήριο να διαφέρουν κατά χρονικό διάστημα, το οποίο θα συμβαδίζει όσο είναι δυνατόν με την αντίστοιχη χρονική βάση του ζεύγους των εικόνων S1A για τη χρονική αυτή περίοδο, που εξετάζεται και να έχουν μειωμένη συννεφοκάλυψη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση αλλαγών στο μεταλλείο αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που εξετάστηκε.

Στις εικόνες αυτές οι αλλαγές εστιάζονται και πάλι σε **τρεις υποπεριοχές μελέτης**, οι οποίες επιλέχθηκαν με κριτήριο την εμφάνιση μετακίνησης από το ζεύγος S1A. Η πρώτη υποπεριοχή μελέτης περιλαμβάνει το μεταλλείο των Σκουριών, καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο αυτού. Η δεύτερη υποπεριοχή μελέτης περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο του Χολομώντα και η τρίτη υποπεριοχή μελέτης εκτείνεται στους πρόποδες του ορεινού τμήματος βόρεια των οικισμών της Αρναίας, του Παλαιοχωρίου και του Νεοχωρίου.

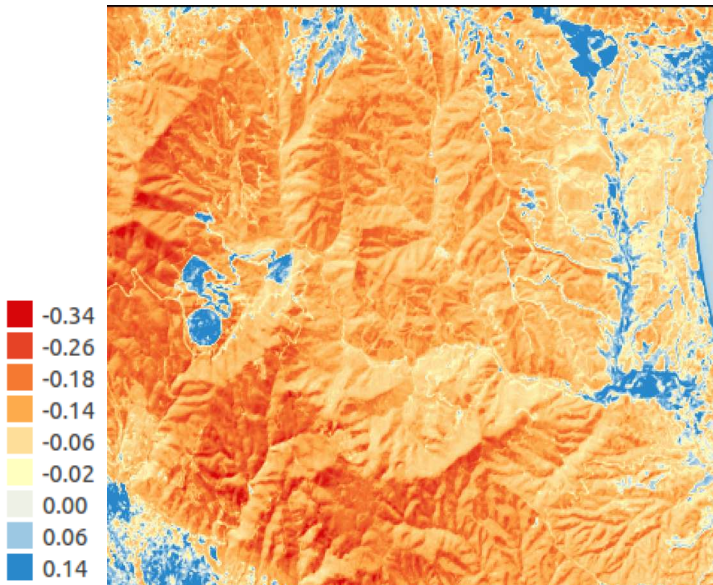
Για το ζεύγος εικόνων που εξετάζεται, στο οποίο εφαρμόστηκαν και οι πέντε αλγόριθμοι ανίχνευσης αλλαγών, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που κρίθηκε ότι ανταποκρίνονται στις αλλαγές εντός των ορίων του μεταλλείου, καθώς και στις εποχικές αλλαγές του ευρύτερου περιβάλλοντα χώρου, έτσι ώστε να εξεταστεί κατά πόσο αυτές συνδέονται και επηρεάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων S1A.

Η λογική των κατωφλίων που εφαρμόστηκαν για τη χρονική περίοδο αυτή στα αποτελέσματα των αλγορίθμων ανίχνευσης αλλαγών, για τη δημιουργία δυαδικών εικόνων με τις αλλαγές, συνοψίζεται στο ότι επιδιώχθηκε να αναδειχθούν και να διακριθούν οι αλλαγές στο χώρο του μεταλλείου από αυτές που οφείλονται στην αλλαγή της εποχής στον περιβάλλοντα χώρο του, όπως συνέβη και στο ζεύγος μεταξύ του Απριλίου 2015 και του Σεπτεμβρίου 2015. Η διαφορά με αυτό είναι ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο, η αλλαγή εστιάζεται στην εμφάνιση **χιονιού** στο μεταλλείο αλλά και στον ορεινό όγκο που το περιβάλλει. Επομένως, κρίνεται ενδιαφέρον να παρουσιαστεί, σε πρώτη φάση, η δυνατότητα **διαχωρισμού** των αλλαγών στο χώρο του μεταλλείου από την εποχική αλλαγή και σε δεύτερη φάση να διερευνηθεί αν η τελευταία, η οποία καταλαμβάνει και τη μεγαλύτερη έκταση στην ανίχνευση των αλλαγών συνδέεται με τις μετακινήσεις που εμφανίζονται από την επεξεργασία του ζεύγους SLC εικόνων S1A.

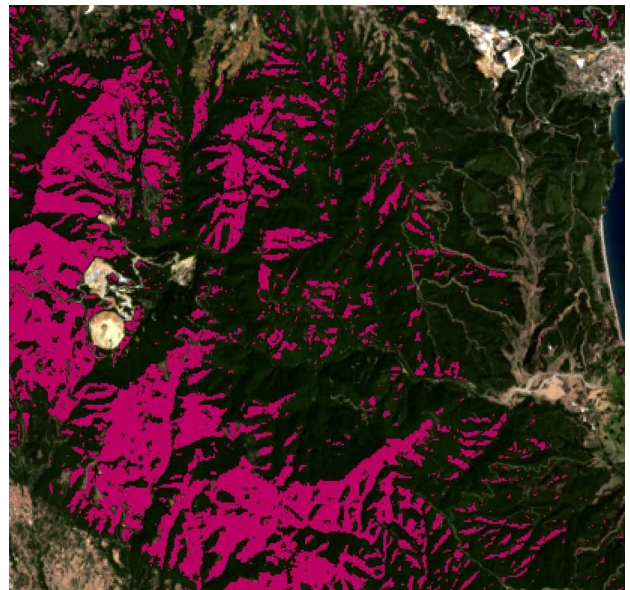
Σημειώνεται ότι και για τις τρεις υποπεριοχές μελέτης, δόθηκε έμφαση στα αποτελέσματα των αλγορίθμων μετασχηματισμού, **PCA, ICA** και **MNF**, καθώς θεωρήθηκαν ως πιο **αξιόπιστοι** για τη δεδομένη εποχική διαφορά που εξετάζεται.

ΠΕΡΙΟΧΗ 1

Για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης, η οποία περιλαμβάνει το μεταλλείο των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου μετασχηματισμού **PCA** για το **δεύτερο**, και **όγδοο** κανάλι, στα οποία συνοψίζονται οι αλλαγές.

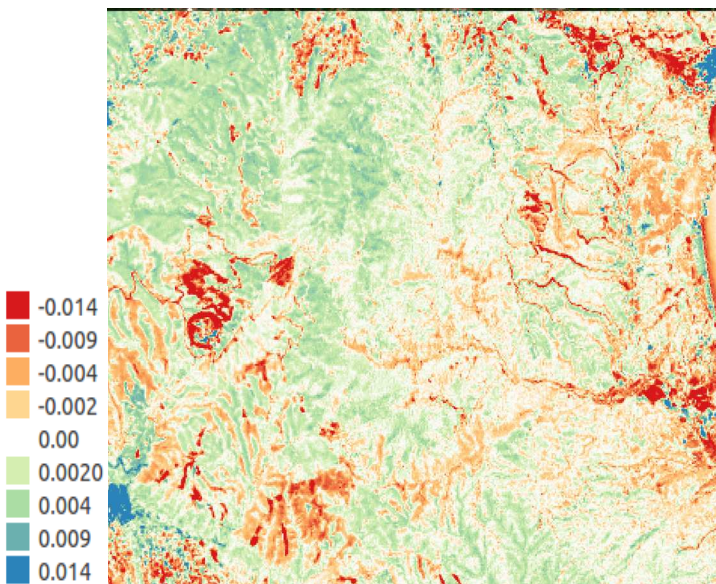


Εικόνα 121: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016



Εικόνα 122: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση

Παρατηρείται ότι στο **δεύτερο** κανάλι εμφανίζεται η εποχική αλλαγή της εμφάνισης του χιονιού στον ορεινό όγκο του μεταλλείου για τιμές μικρότερες από **-0.149**. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε καθώς προσεγγίζει το αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών στο ιστόγραμμα της εικόνας. Ακολουθεί το **έκτο** κανάλι PCA.

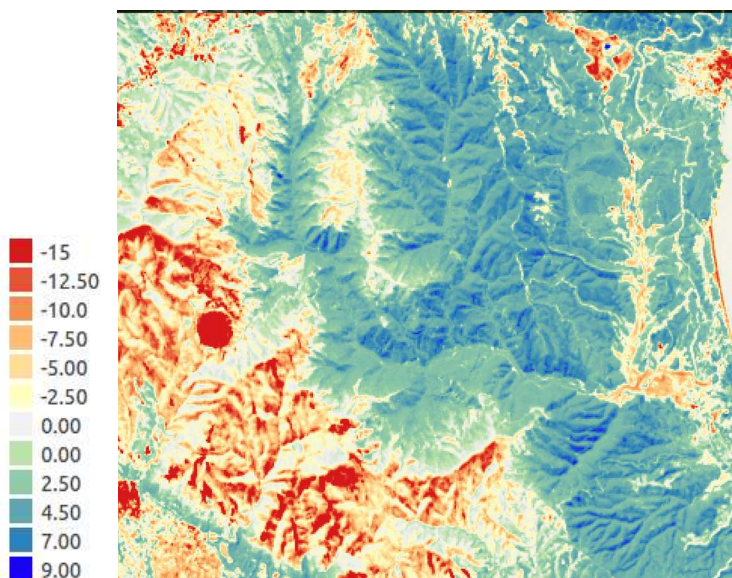


Εικόνα 123: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016



Εικόνα 124: Όγδοο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση

Στο όγδοο κανάλι PCA για τιμές μεγαλύτερες από **0.01** και μικρότερες από **-0.01**, εμφανίζονται οι αλλαγές στα μεταλλεία των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου και σε κάποια σημεία στον ορεινό όγκο, όπως και σε κάποιες καλλιέργειες. Το διάστημα αυτό επιλέχθηκε γιατί προσεγγίζει το θετικό και το αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών στο ιστόγραμμα του όγδοου καναλιού PCA, εκεί που αναμένονται οι τοπικές αλλαγές. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των αλγορίθμων **MNF** και **ICA** για το κανάλι **τέσσερα** και **έξι** αντίστοιχα.



Εικόνα 125: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016



Εικόνα 126: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση

Παρατηρείται ότι για τιμές μικρότερες της τιμής **-47**, η δυαδική εικόνα που προκύπτει περιλαμβάνει το σύνολο των αλλαγών της εικόνας, είτε αυτές αφορούν σε εποχικές αλλαγές, είτε βρίσκονται στα μεταλλεία ή στις καλλιέργειες. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε καθώς προσεγγίζει το αρνητικό άκρο της κατανομής των τιμών στο ιστόγραμμα του τέταρτου καναλιού MNF.

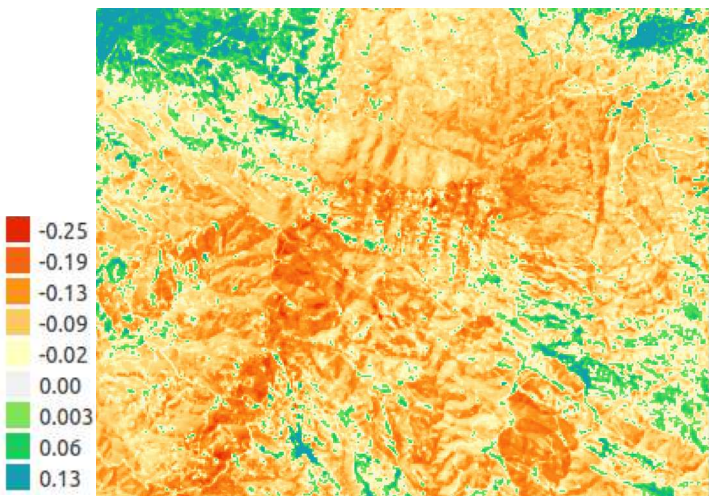
Τέλος για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης, παρατίθεται το έκτο κανάλι του αλγορίθμου ICA, από το οποίο προέκυψε η δυαδική εικόνα των αλλαγών για τιμές μεγαλύτερες από 1.30 και μικρότερες από -1.70, που είναι αντίστοιχα το θετικό και αρνητικό άκρο της καμπύλης της κατανομής στο ιστόγραμμα των τιμών της εικόνας. Παρατηρείται ότι σε αυτό το κανάλι εμφανίζονται τοπικές αλλαγές στα μεταλλεία των Σκουριών και του Σιδηρόλακκου, αλλαγές στο πράσινο και στις καλλιέργειες, αλλά και στους οικισμούς του Στρατωνίου και της Μεγάλης Παναγίας, στο βορειοανατολικό και νοτιοδυτικό άκρο της εικόνας αντίστοιχα.

ΠΕΡΙΟΧΗ 2

Για τη δεύτερη υποπεριοχή μελέτης, που περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο του Χολομώντα, παρατίθεται το δεύτερο κανάλι του αλγορίθμου PCA και η δυαδική εικόνα που προέκυψε για τιμές μεγαλύτερες από 0.13 και μικρότερες από -0.13, όπως επιλέχθηκαν από το ιστόγραμμα των τιμών του καναλιού.

Οι αλλαγές που εντοπίζονται αφορούν στην εποχική αλλαγή εμφάνισης του χιονιού στον ορεινό όγκο. Επιπλέον, εμφανίζονται αλλαγές στον οικισμό της Αρναίας καθώς επίσης και στις

καλλιέργειες που βρίσκονται στο βορειοδυτικό τμήμα της υποπεριοχής μελέτης.



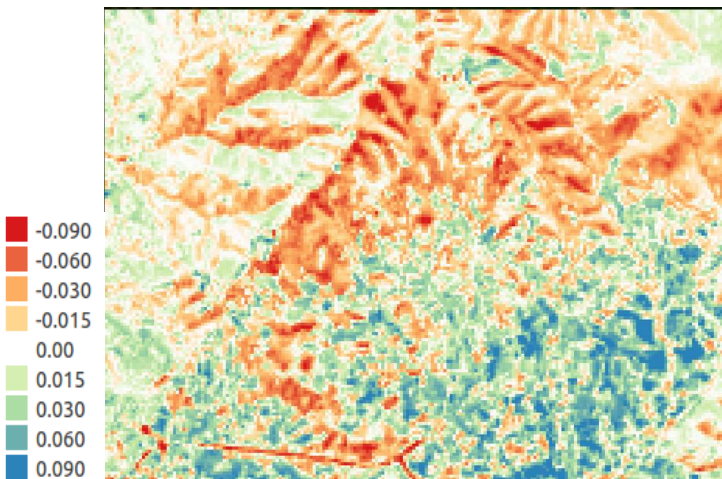
Εικόνα 127: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016



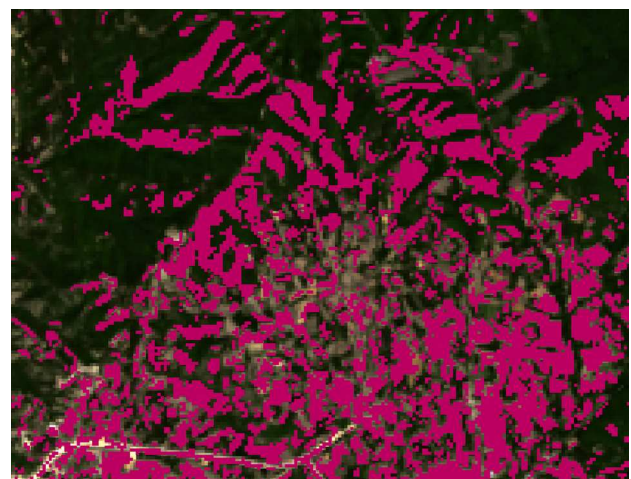
Εικόνα 128: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση

ΠΕΡΙΟΧΗ 3

Για την τρίτη υποπεριοχή μελέτης, η οποία περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή του οικισμού της Αρναίας, παρουσιάζονται το έκτο κανάλι του αλγορίθμου PCA και το τέταρτο κανάλι του αλγορίθμου MNF.



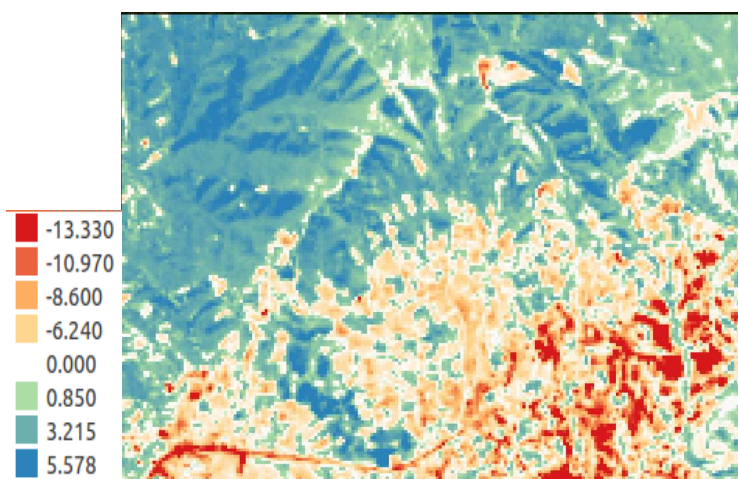
Εικόνα 129: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016



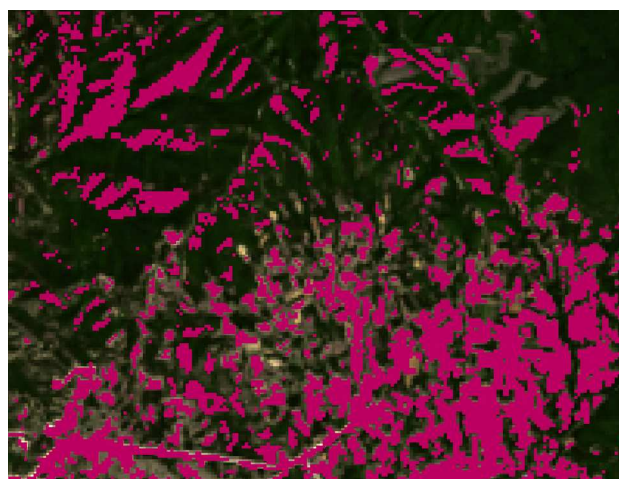
Εικόνα 130: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015- 01/012016, μετά την κατωφλίωση

Στο έκτο κανάλι του αλγορίθμου PCA, δημιουργήθηκε δυαδική εικόνα με τις τιμές που είναι εκτός των ορίων του διαστήματος ($\mu - \sigma, \mu + \sigma$). Παρατηρείται ότι αναδεικνύονται οι εποχικές αλλαγές, που αφορούν στην εμφάνιση του χιονιού και στην αλλαγή της βλάστησης. Ακολουθεί το κανάλι

τέσσερα του αλγορίθμου MNF.



Εικόνα 131: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016



Εικόνα 132: Τέταρτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015- 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση

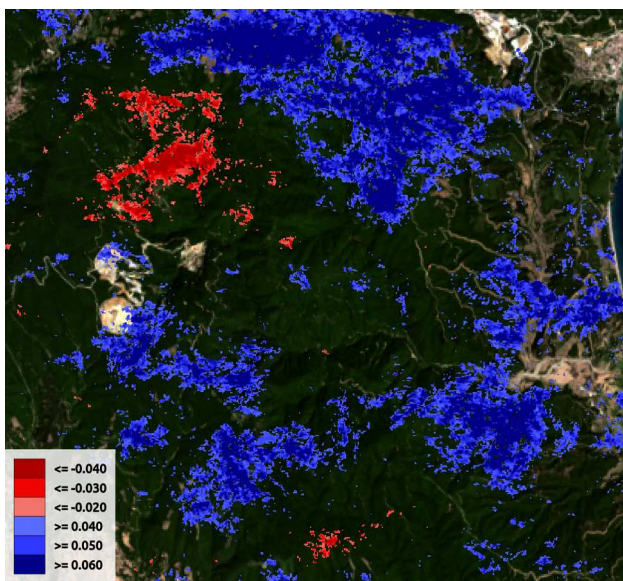
Στο κανάλι αυτό, για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας με τις αλλαγές, επιλέχθηκαν οι τιμές της εικόνας που είναι μεγαλύτερες από 4.50 και μικρότερες από -4.50, με τη διαδικασία της δοκιμής και απόρριψης. Παρατηρείται ότι εμφανίζονται παρεμφερείς αλλαγές με αυτές του έκτου καναλιού PCA και αφορούν στις εποχικές αλλαγές.

6. Ανάλυση και συζήτηση με βάση τα αποτελέσματα από οπτικά και ραντάρ δεδομένα

Στην ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν μαζί τα αποτελέσματα από **S1A** και **L8** και να διερευνηθεί η αιτία εμφάνισης μετακινήσεων στις περιοχές μελέτης και αν αυτές συνδέονται με την ανίχνευση εποχικών αλλαγών, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, για κάθε χρονική περίοδο και υποπεριοχή μελέτης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην περιοχή του μεταλλείου των Σκουριών. Οι υπόλοιπες υποπεριοχές μελέτης σχολιάζονται για λόγους πληρότητας και συμβολής στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

6.1. Χρονική περίοδος : Αύγουστος 2014 - Σεπτέμβριος 2015

Για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης που περιλαμβάνει τα δύο μεταλλεία, ο χάρτης των μετακινήσεων και η δυαδική εικόνων των αλλαγών όπως προέκυψε από την κατωφλίωση του έκτου καναλιού PCA, η οποία αξιολογήθηκε ως η πιο αντιπροσωπευτική των μεταβολών που υφίστανται στην περιοχή, παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα 133: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014

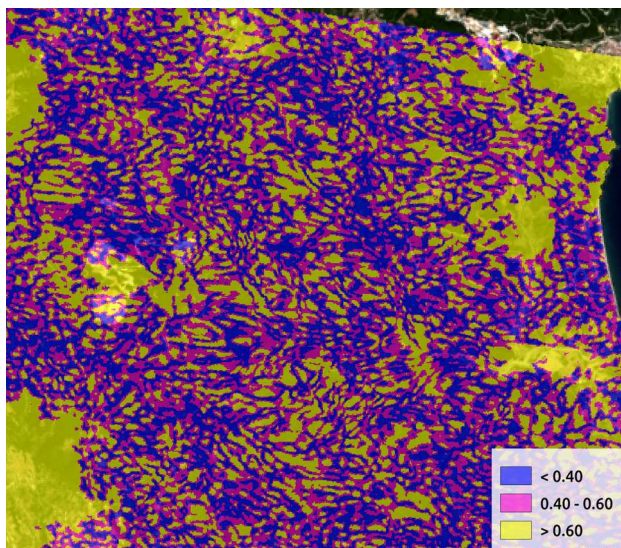


Εικόνα 134: Έκτο κανάλι μετασχηματισμού PCA για τις εικόνες 26-08-2015 και 23-08-2014, μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης

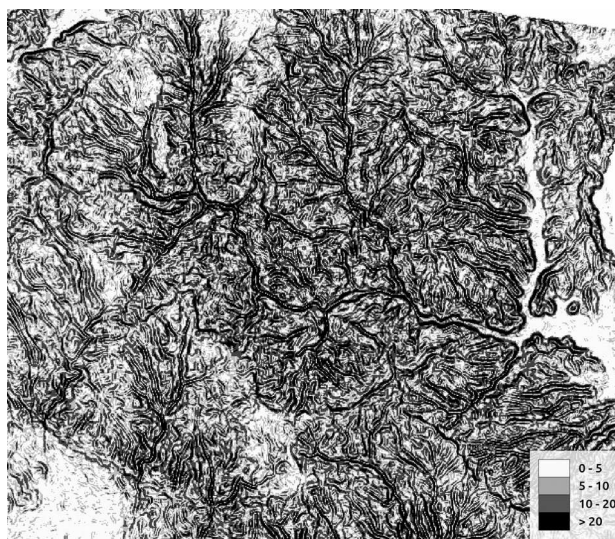
Στα σημεία που ανιχνεύτηκαν ως αλλαγές από το ζεύγος εικόνων L-8, εμφανίζονται μετακινήσεις της τάξης των **1-2cm**, οι οποίες θεωρείται ότι είναι μέσα στα όρια της τυπικής απόκλισης, όποτε δε θεωρούνται σημαντικές για τη χρονική βάση των ζευγών. Επίσης παρατηρούμε ότι οι περιοχές με τα θετικά και αρνητικά ακρότατα τιμών κατακόρυφων μετακινήσεων **δεν συγκλίνουν** με τις περιοχές που ανιχνεύτηκαν μεταβολές στα μεταλλεία και σε τμήματα πρασίνου, στα οποία αναμενόταν να υπάρχουν κατακόρυφες μετακινήσεις.

Στο χώρο του μεταλλείου των Σκουριών, στο χάρτη των μετακινήσεων, όπως προέκυψε από την αφαίρεση των μετακινήσεων του ζεύγους 19/09/2015 – 01/10/2015 από τον αντίστοιχο χάρτη του ζεύγους 19/09/2015 – 28/10/2014, με στόχο την ανάδειξη τοπικών ακρότατων τιμών και την εξάλειψη σφαλμάτων του συστήματος και ατμοσφαιρικών επιδράσεων, εμφανίζονται **θετικές** τιμές μετακινήσεων της τάξης των **3cm** και **αρνητικές** τιμές της τάξης των **5cm**. **Η συνάφεια** μεταξύ των ζευγών για το χώρο του μεταλλείου κρίνεται ικανοποιητική, με μέση τιμή της τάξης του **0.60**, συγκρινόμενη με τη συνάφεια όλης της εικόνας που είναι της τάξης του 0.70. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα των μετακινήσεων **δε μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα** λόγω του μεγάλου θορύβου στις τιμές των μετακινήσεων στην ευρύτερη υποπεριοχή μελέτης και θα πρέπει να αναζητηθούν τα αίτια αυτής της αστοχίας στις επιδράσεις άλλων σφαλμάτων, για τα οποία η συνάφεια της εικόνας ως το μοναδικό μέτρο ποιότητας των αποτελεσμάτων, δεν είναι ενδεικτική. Η ανάλυση των σφαλμάτων αυτών ακολουθεί σε επόμενη παράγραφο λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις στο σύνολο της υποπεριοχής μελέτης.

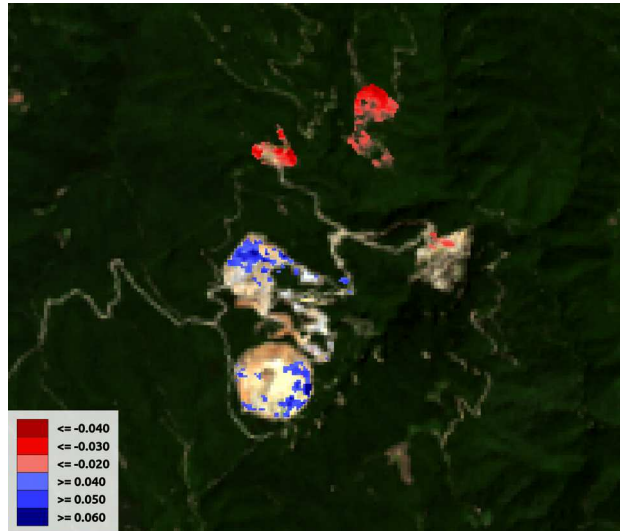
Για τις κατακόρυφες μετακινήσεις που εμφανίζονται στις καλλιέργειες, που βρίσκονται νοτιοανατολικά στο περιβάλλοντα χώρο του μεταλλείου του Σιδηρόλακκου, στο βόρειο τμήμα της περιοχής και στη δασική έκταση ανατολικά του μεταλλείου των Σκουριών και είναι της τάξης των **4-5cm**, καθώς και για τις αρνητικές τιμές μετακινήσεων που εμφανίζονται στο ορεινό τμήμα βόρεια του μεταλλείου των Σκουριών της τάξης των **-2cm**, παρατηρείται ότι υπάρχει μικρή τυπική απόκλιση μεταξύ των ζευγών του "stack 14" της τάξης μερικών χιλιοστών. Αυτό σημαίνει ότι τα ζεύγη του stack φαίνεται να "συμφωνούν" για τις μετακινήσεις αυτές. Παρ' όλα αυτά κρίνεται ότι η εμφάνιση μέγιστων και ελαχίστων, θετικών και αρνητικών μετακινήσεων αντίστοιχα, στις συγκεκριμένες περιοχές, σχετίζεται με την **χαμηλή συνάφεια** των εικόνων του 2014 με τη "master" εικόνα του Σεπτεμβρίου του 2015, καθώς και με το **ανάγλυφο** της περιοχής και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.



Εικόνα 136: Συνάφεια για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών



Εικόνα 137: Κλίσεις για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών

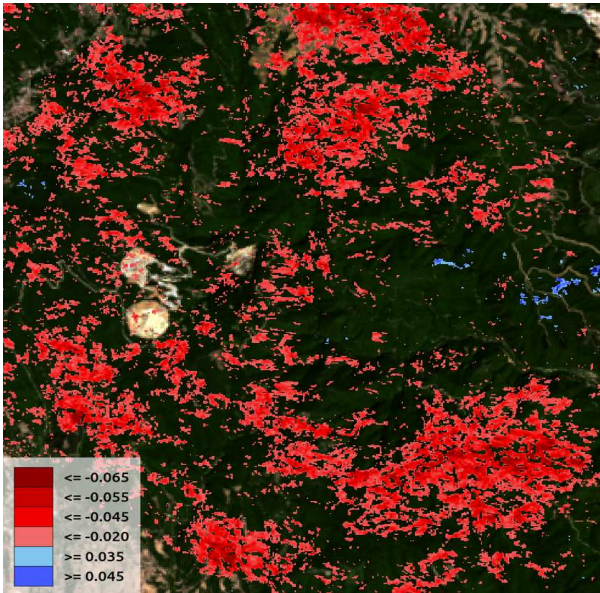


Εικόνα 135: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/10/2014 για το μεταλλείο των Σκουριών

Συγκεκριμένα, για τα σημεία του χάρτη των μετακινήσεων για το “stack '14”, στα οποία εμφανίζονται θετικές κατακόρυφες μετακινήσεις, μεγαλύτερες από +5cm και αρνητικές κατακόρυφες μετακινήσεις μικρότερες από -2cm, διαπιστώνεται, από το ζεύγος **19/09/2015 – 18/10/2014**, ότι η μέση τιμή της συνάφειας για την περιοχή αυτή είναι 0.1 ± 0.1 , ενώ για τη συνολική εικόνα είναι της τάξης του 0.80, οπότε το αποτέλεσμα των μετακινήσεων σε αυτή την υποπεριοχή **δε μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο**. Τέλος, οι κλίσεις της περιοχής εμφανίζουν μέση τιμή της τάξης του $10\% \pm 8\%$, γεγονός που συμβάλει στην μείωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

6.2. Χρονική περίοδος : Απρίλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015

Για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης που περιλαμβάνει τα δύο μεταλλεία, ο χάρτης των μετακινήσεων και η δυαδική εικόνα των αλλαγών, όπως προέκυψε από την κατωφλίωση της διαφοράς των φασματικών γωνιών του ζεύγους των εικόνων L8, η οποία συνοψίζει τις εποχικές μεταβολές που υφίστανται στην περιοχή, παρατίθενται παρακάτω.

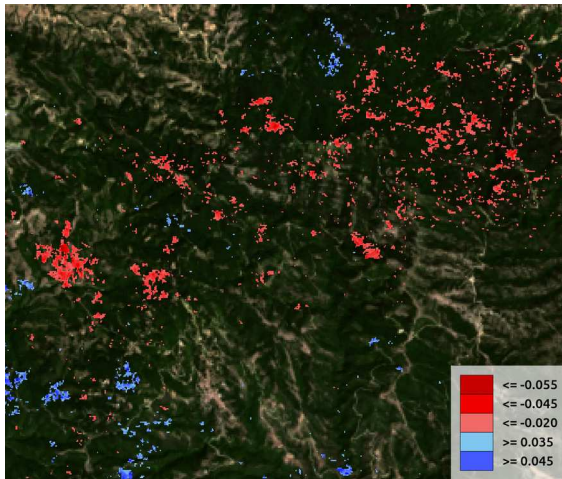


Εικόνα 138: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015



Εικόνα 139: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση

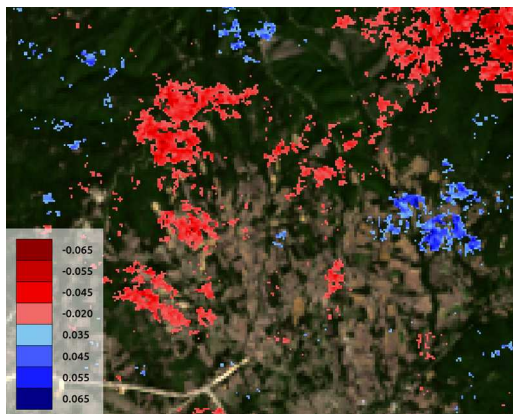
Παρατηρείται ότι οι δύο εικόνες, η μια των μετακινήσεων όπως προέκυψε από την επεξεργασία του ζεύγους S1A και η δεύτερη, όπως προέκυψε από την ανίχνευση μεταβολών στο ζεύγος L-8, παρουσιάζουν ένα κοινό τόπο εικονοστοιχείων. Τα εικονοστοιχεία αυτά εμφανίζουν αρνητικές τιμές κατακόρυφων μετακινήσεων της τάξης των **-4cm** στο χάρτη των μετακινήσεων και από την ανίχνευση μεταβολών σε L8 διαπιστώνεται ότι πρόκειται για τμήματα της περιοχής στα οποία υπάρχει **εποχική μεταβολή της βλάστησης**. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί, εν μέρει, την εμφάνιση μετακίνησης στην περιοχή αυτή, για το λόγο ότι επηρεάζει αρνητικά τη συνάφεια του ζεύγους των SLC εικόνων S1A. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και επιβεβαιώνεται και από τις άλλες δύο υποπεριοχές μελέτης, στις οποίες εμφανίζεται παρόμοια εποχική μεταβολή της βλάστησης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 140: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015



Εικόνα 141: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση

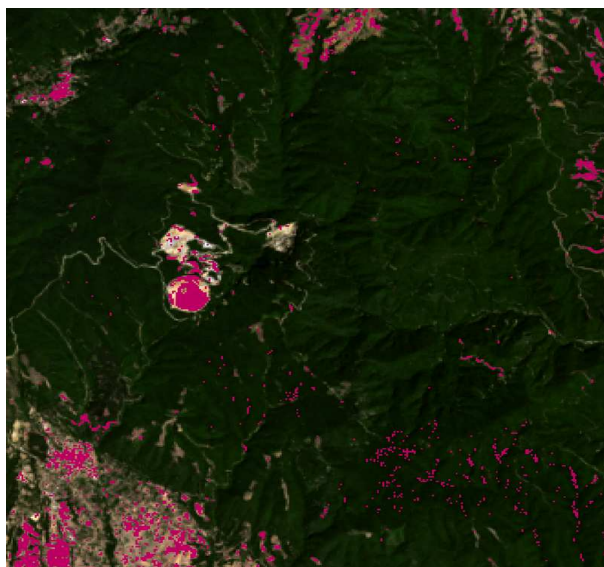


Εικόνα 142: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 28/04/2015



Εικόνα 143: Διαφορά φασματικών γωνιών για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση

Σημειώνεται επίσης ότι οι τιμές μετακίνησης στο χώρο του μεταλλείου των Σκουριών είναι και σε αυτή την περίπτωση αμελητέες, της τάξης του **-1cm**, που θεωρείται μέσα στα όρια του σφάλματος, οπότε και δεν εμφανίζονται. Από την ανίχνευση μεταβολών στο ζεύγος L8, για το έβδομο κανάλι του αλγορίθμου MNF, όπως επιβεβαιώνεται και από το ένατο κανάλι του αλγορίθμου ICA, διαπιστώνεται ότι είναι πιθανό να υπάρχουν μεταβολές στο μεταλλείο για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται, όπως φαίνεται στις δυαδικές εικόνες που ακολουθούν, οι οποίες, όμως, δεν ανιχνεύονται ως κατακόρυφη μετακίνηση από το ζεύγος S1. Τέλος, για την περίοδο αυτή φαίνεται να εμφανίζονται **τμήματα του πρασίνου που έχουν αποψιλωθεί**, τα οποία επιβεβαιώνονται φωτοερμηνευτικά αλλά ανιχνεύονται μόνο από τον αλγόριθμο MNF.



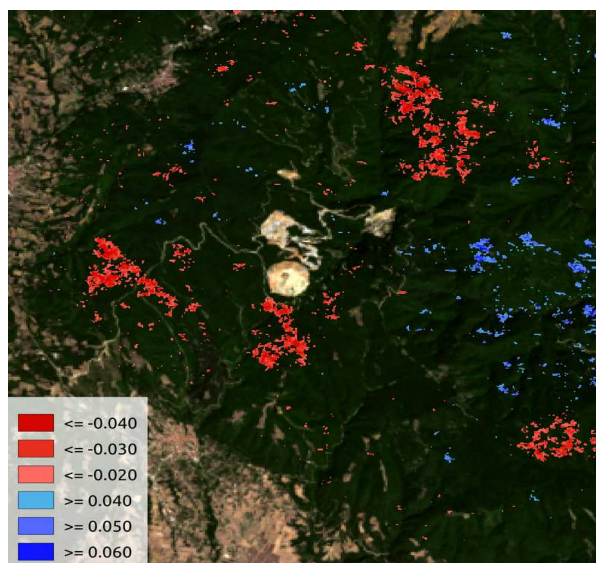
Εικόνα 144: Έβδομο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση



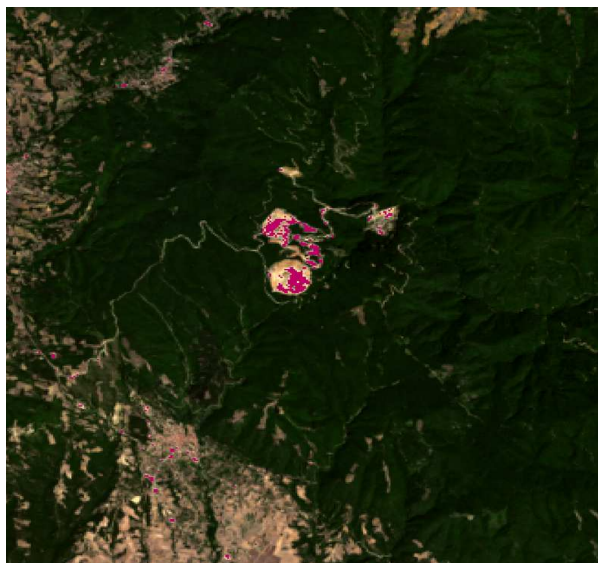
Εικόνα 145: Ένατο κανάλι μετασχηματισμού ICA για το ζεύγος 26/08/2015 - 04/04/2015, μετά την κατωφλίωση

6.3. Χρονική περίοδος : Ιούλιος 2015 - Σεπτέμβριος 2015

Για την πρώτη υποπεριοχή μελέτης που περιλαμβάνει τα δύο μεταλλεία, ο χάρτης των μετακινήσεων και η δυαδική εικόνων των αλλαγών, όπως προέκυψε από την κατωφλίωση του τρίτου καναλιού του αλγορίθμου μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος των εικόνων L8, η οποία συνοψίζει τις μικρής έκτασης **τοπικές μεταβολές** που υφίστανται στο **μεταλλείο**, παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα 146: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 09/07/2015

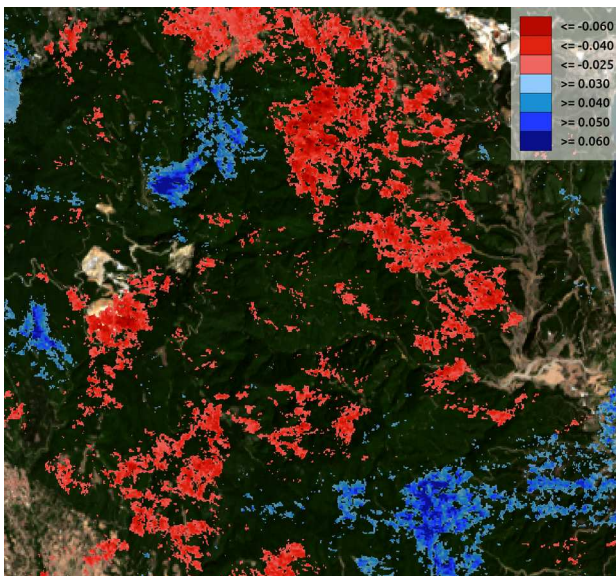


Εικόνα 147: Τρίτο κανάλι μετασχηματισμού MNF για το ζεύγος 26/08/2015 - 25/07/2015, μετά την κατωφλίωση

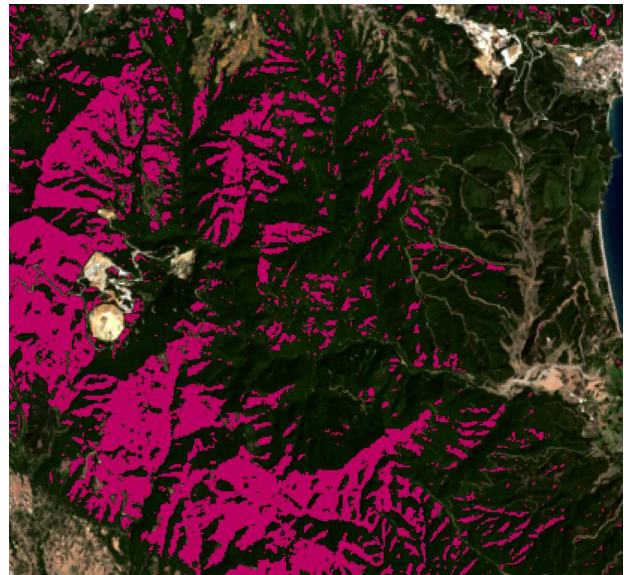
Παρατηρείται στο χάρτη των μετακινήσεων από S1A ότι εμφανίζονται αρνητικές τιμές μετακίνησης της τάξης των **-3cm** σε τμήματα της δασικής έκτασης για τα οποία δεν επιβεβαιώνεται ότι υπάρχει μεταβολή από το ζεύγος L8. Διαπιστώθηκε για τα σημεία αυτά ότι η τιμή της **συνάφειας** κυμαίνεται από **0.15** έως **0.40**, επομένως θεωρείται ότι δεν αποτελούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Όσον αφορά στον χώρο του **μεταλλείου** των Σκουριών, οι τιμές μετακίνησης είναι πολύ μικρές και κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως **1cm**, γι' αυτό και δεν εμφανίζονται στο χάρτη. Από το τρίτο κανάλι του αλγορίθμου MNF για το ζεύγος εικόνων L8, με εφαρμογή κατάλληλου κατωφλίου, διαπιστώνεται ότι, πιθανώς, στο μεταλλείο **λαμβάνουν χώρα μικρής έκτασης μεταβολές, οι οποίες επιβεβαιώνονται και στο τρίτο κανάλι του αλγορίθμου PCA.**

6.4. Χρονική περίοδος : Σεπτέμβριος 2015 - Ιανουάριος 2016

Για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, παρατηρείται από το χάρτη κατακόρυφων μετακινήσεων όπως προέκυψε από το ζεύγος S1A ότι εμφανίζονται **θετικά** και **αρνητικά** ακρότατα τιμών, τάξης μεγέθους **+6cm** και **-5cm**, αντίστοιχα, σε τμήματα του ορεινού όγκου που περιβάλλει το μεταλλείο, σε μερικά από τα οποία ανιχνεύεται εποχική μεταβολή, η εμφάνιση του χιονιού, από το ζεύγος L-8. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις σε αυτή την εποχική μεταβολή, σε αντίθεση με την αλλαγή της βλάστησης, δεν είναι συνεπείς ως προς το πρόσημο τους, καθώς περιλαμβάνουν και θετικές και αρνητικές τιμές. Διαπιστώνεται έτσι, ότι η ύπαρξη χιονιού, όπως ανιχνεύτηκε από το δεύτερο κανάλι του αλγορίθμου PCA, σε συνδυασμό με τις έντονες εναλλαγές αναγλύφου δεν επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστης πληροφορίας για τις μετακινήσεις, που εμφανίζονται στο μεταλλείο και είναι της τάξης των 6cm, καθώς γενικότερα η περιβάλλουσα περιοχή χαρακτηρίζεται από θόρυβο.



Εικόνα 148: Χάρτης μετακίνησης για το ζεύγος εικόνων S1A με Master 19/09/2015 και Slave 05/01/2016



Εικόνα 149: Δεύτερο κανάλι μετασχηματισμού PCA για το ζεύγος 26/08/2015 – 01/01/2016, μετά την κατωφλίωση

Οι τιμές μετακίνησης στο χώρο του μεταλλείου είναι της τάξης **μερικών χιλιοστών** και έχουν τυπική της τάξης των **2cm**, οπότε δεν είναι σαφές το ενδεχόμενο ύπαρξης μετακίνησης. Η συνάφεια των εικόνων εμφανίζει μέση τιμή της τάξης του 0.80, επομένως ο θόρυβος που εμφανίζεται στην εικόνα θα πρέπει να αναζητηθεί σε σφάλματα για τα οποία η συνάφεια δεν είναι ενδεικτική.

7. Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν για την περιοχή των μεταλλείων των Σκουριών, αλλά και την περιβάλλουσα περιοχή, τόσο από την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας σε ζεύγη SLC εικόνων S1A, όσο και από την εφαρμογή των αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών σε ζεύγη εικόνων L8. Πιο αναλυτικά, η περιοχή μελέτης εξετάστηκε σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, στις οποίες αντιστοιχούν μεταβολές στο μεταλλείο, αλλά και εποχικές μεταβολές στη γύρω περιοχή και ανιχνεύτηκε κατά πόσο αυτές επηρεάζουν την επιτυχία εφαρμογής των δύο μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν, σε σχέση και με χαρακτηριστικά γνωρίσματα της περιοχής, όπως η φυσιογνωμία, η βλάστηση, το ανάγλυφο κτλ.

7.1. Γενικά συμπεράσματα

Συνολικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας για τα ζεύγη εικόνων που επιλέχθηκαν, για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και για τις χρονικές περιόδους που μελετήθηκαν, δεν λειτούργησε όπως αναμενόταν και **δεν απέφερε αξιόπιστα αποτελέσματα**, σε αντίθεση με την εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών σε ζεύγη εικόνων L-8, από τους οποίους προέκυψαν δυαδικές εικόνες, που κρίνονται ενδεικτικές για το τι συμβαίνει στην περιοχή σε διαχρονικό επίπεδο. Η αιτία της αστοχίας της εφαρμογής της Διαφορικής Συμβολομετρίας στη συγκεκριμένη περιοχή ανιχνεύεται σε μια **ποικιλία παραμέτρων**, που αφορούν στη γεωμετρία των λήψεων, στη χρονική βάση μεταξύ των λήψεων, στο μήκος κύματος του ραντάρ, στις χρήσεις γης της περιοχής που μελετήθηκε, όπως και στις καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Αρχικά, ο χώρος του μεταλλείου των Σκουριών καταλαμβάνει συνολικά μια έκταση περίπου 350.000 m², η οποία αντιστοιχεί περίπου σε 500 εικονοστοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική ανάλυση (περίπου 25m) του δορυφόρου S1A, κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου και κατά την πλάγια διεύθυνση, μετά την εφαρμογή multiloooking για την απαλοιφή θορύβου στις εικόνες SLC. Διαπιστώνεται ότι οι μεταλλευτικές δραστηριότητες που έλαβαν χώρα στην περιοχή κατά το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε (Οκτώβριος 2014 – Ιανουάριος 2016) ήταν αρκετά **περιορισμένες** σε έκταση και μέγεθος, σε σχέση με τις κύριες εξορυκτικές δραστηριότητες, κατά το προηγούμενο χρονικό διάστημα 2013-2014. Επομένως, η χωρική ανάλυση των δεδομένων που επιλέχθηκαν για την ανίχνευση μεταβολών μικρότερης κλίμακας, όπως στις Σκουριές, κρίνεται ανεπαρκής για τη μελέτη αυτή.

7.2. Ανίχνευση μεταβολών στις εικόνες L-8

Η εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης μεταβολών στις εικόνες L8, παρουσίασε **ικανοποιητικά αποτελέσματα** στην ανίχνευση μεταβολών στο οριζόντιο επίπεδο, όπως επιβεβαιώθηκε από την πλειοψηφία των αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι ακόμα και με

τη χρήση τεχνικών απλής άλγεβρας μεταξύ των εικόνων είναι δυνατό να ανιχνευτούν μεταβολές που υφίστανται στο χώρο του μεταλλείου, αλλά και σε τμήματα της δασικής έκτασης που έχουν αποψιλωθεί, για το μέγιστο χρονικό διάστημα (περίπου ενός χρόνου), που εξετάστηκε αρχικά των εικόνων που αφορούν στην ίδια εποχή μελέτης (Αύγουστος 2014 – Αύγουστος 2015). Μειονέκτημα αποτελεί η εμφάνιση της θάλασσας ως αλλαγή στη διαφορά δεικτών NDVI. Κατά τα άλλα, στη χρονική αυτή περίοδο η πλειοψηφία των αλγορίθμων παρουσίασε παρόμοια αποτελέσματα με τη χρήση κατάλληλων κατωφλίων, αλλά διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή της διαφοράς μεταξύ των φασματικών γωνιών των εικόνων και το έκτο κανάλι του μετασχηματισμού PCA απέδωσαν με τον πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο τις μεταβολές στο μεταλλείο και σε δασικά τμήματα της περιοχής, σε σύγκριση με δεδομένα αναφοράς. Στη μελέτη αυτής της χρονικής περιόδου, οι πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι μετασχηματισμού, ICA και MNF, παρουσίασαν μεν μικρότερο θόρυβο στις δυαδικές εικόνες με τη χρήση των κατωφλίων που επιλέχθηκαν, αλλά φαίνεται ότι υποεκτίμησαν τις μεταβολές. Επιπλέον, κρίνεται ότι απαιτείται μια περισσότερο λεπτομερής και προσαρμοσμένη τεχνική κατωφλίωσης για την ανάδειξη των μεταβολών σε αυτούς τους αλγορίθμους μετασχηματισμού, η οποία δεν εξετάστηκε στη μελέτη αυτή.

Σε αντίθεση με την μέγιστη χρονική περίοδο, στην ανίχνευση των μεταβολών για το χρονικό διάστημα που εμφανίζονται εποχικές μεταβολές στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, οι αλγόριθμοι ICA και MNF, απέδωσαν με επιτυχία τις μεταβολές στο μεταλλείο, καθώς και διέκριναν τις εποχικές μεταβολές από αυτές που οφείλονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες. Σε αυτή τη διάκριση των εποχικών μεταβολών από αυτών στο μεταλλείο, οι τεχνικές απλής άλγεβρας εικόνων απέτυχαν, όπως αναμενόταν, καθώς οι μεταβολές στο μεταλλείο επισκιάστηκαν από τις μεγάλης έκτασης αλλαγές στη βλάστηση. Επιπρόσθετα, οι αλγόριθμοι μετασχηματισμού ICA και MNF, απέδωσαν αντιπροσωπευτικά ακόμα και τις πολύ μικρότερης έκτασης αλλαγές στο μεταλλείο, που αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα Ιουλίου 2015 – Αυγούστου 2015, κατά το οποίο οι εργασίες ήταν πολύ περιορισμένες.

7.2. Ανίχνευση κατακόρυφων μετακινήσεων στις απεικονίσεις S1

Από την ερμηνεία των χαρτών μετακινήσεων από S1A, σε παράθεση με τις δυαδικές εικόνες των μεταβολών που ανιχνεύτηκαν από L8, διαπιστώνεται ότι η ύπαρξη έντονης βλάστησης και, συγκεκριμένα, φυλλοβόλων δέντρων, τα οποία καλύπτουν το 80% περίπου της περιβάλλουσας περιοχής του μεταλλείου, οδηγεί σε χαμηλή συνάφεια μεταξύ των ζευγών S1A, για τις περιόδους που εξετάστηκαν και οδηγεί στην εμφάνιση θορύβου και σε μείωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υγρασίας η οποία εσωκλείεται στη βλάστηση και προκαλεί μεταβολές στην ανάκλαση του σήματος του ραντάρ, ειδικά για το κανάλι C, του οποίου το μήκος κύματος είναι ανάλογο του μεγέθους των μικρής κλίμακας χαρακτηριστικών της βλάστησης, όπως είναι το φύλλωμα των δέντρων και τα συστατικά στοιχεία των καλλιεργειών (Richards, 2007). Έτσι, λοιπόν, αυτή η φαινομενική καθυστέρηση του σήματος, που προκαλείται από την ύπαρξη υγρασίας στη βλάστηση και που ενισχύεται κοντά στις παράκτιες περιοχές, δημιουργεί την εμφάνιση πλασματικών θετικών τιμών μετακίνησης. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να μετριαστεί αν τα ζεύγη των εικόνων που εξετάστηκαν, αντιστοιχούσαν χρονικά στην ίδια εποχή του χρόνου, κατά την οποία τα δέντρα έχουν χάσει τα φύλλα τους, οι καλλιέργειες εμφανίζουν συναφή χαρακτηριστικά και δεν υπάρχει χιόνι, στον ορεινό όγκο που περιβάλλει το

μεταλλείο, όπως συμβαίνει για παράδειγμα κατά τους μήνες του Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου.

Αποδεικνύεται επίσης ότι η εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας σε απεικονίσεις που έχουν προκύψει από μικρότερα μήκη κύματος, όπως αυτές της , όπως προκύπτει από την ευαισθησία του μήκους κύματος στις μικρές κατακόρυφες μετακινήσεις (Ng et al., 2008) και έτσι, για την περίπτωση των μεταλλείων, στα οποία υφίστανται μεγάλης κλίμακας μεταβολές ενδείκνυται μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Επιπρόσθετα, η γωνία πρόσπτωσης στα συγκεκριμένα σημεία στα οποία εμφανίζονται μετακινήσεις διαπιστώθηκε ότι λαμβάνει είτε πολύ μικρές τιμές της τάξης των 10deg είτε μεγάλες τιμές της τάξης των 70deg, γεγονός που οφείλεται στις έντονες κλίσεις που υφίστανται στην περιοχή, με μέση τιμή της τάξης του 10%. Η ύπαρξη έντονου ανάγλυφου προκαλεί φαινόμενα σκίασης και επικάλυψης μεγάλων τμημάτων της περιοχής μελέτης, οπότε δυσχεραίνεται η διαδικασία αποκατάστασης της φάσης και δημιουργούνται μεγάλα σφάλματα υψομέτρου και θόρυβος (M. Eideneer, 2003). Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους υψηλής χωρικής ανάλυσης και κατακόρυφης ακρίβειας, το οποίο θα είναι επίκαιρο σε σχέση με τη “master” εικόνα των ζευγών, που επιλύονται, ώστε να αφαιρεθεί όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά η φάση που οφείλεται στην τοπογραφία της περιοχής. Σημειώνεται ότι με τη χρήση DEM υψηλότερης ανάλυσης από τις απεικονίσεις SAR αναμένεται μικρότερη εναπομείνασα φάση της τοπογραφίας (Ng et al., 2008).

Επίσης, η επιλογή και η επεξεργασία συνδυασμού λήψεων από πολλαπλές τροχιές (καθοδικές και ανοδικές) και γωνίες πρόσπτωσης θα μπορούσε να συμβάλει στην καλύτερη κάλυψη του αντικειμένου μελέτης (Wright et al., 2003), ειδικά σε ένα περιβάλλον με πολύ έντονο ανάγλυφο, όπως συμβαίνει στις Σκουριές. Φυσικά αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την αξιοποίηση της πληροφορίας από ένα δορυφορικό σχηματισμό, όπως συμβαίνει με την περίπτωση του Sentinel-1B, ο οποίος αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία στο μέλλον. Συνδυαστικά με τη εφαρμογή τεχνικών “offset tracking”, οι οποίες εκμεταλλεύονται την πληροφορία του πλάτους στις απεικονίσεις SAR, με υψηλή συσχέτιση της τάξης μερικών εκατοστών του pixel, καθίσταται δυνατή η ανίχνευση μεταβολών τόσο στην πλάγια διεύθυνση αλλά και στη διεύθυνση του αζιμουθίου, με ακρίβειες της τάξης των 10cm, σε σύγκριση με μετρήσεις GPS (Raucoules et al., 2013). Οι τεχνικές αυτές είναι δυνατό να συνδυαστούν με τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών στις οπτικές εικόνες και να δώσουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τη δημιουργία μοντέλων παραμόρφωσης (Yan et al., 2016).

Επιπλέον, η επιλογή ζευγών SLC εικόνων μικρότερης κάθετης βάσης (στην ιδανική περίπτωση μηδενικής) θα μετρίαζε την αρνητική επίδραση της τοπογραφίας στο προϊόν του συμβολογραφήματος και, κατά συνέπεια, της συνολικής διαδικασίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας, γεγονός που δεν ήταν δυνατό να συμβεί στη συγκεκριμένη εφαρμογή, για τη μελέτη του μεταλλείου, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας SLC εικόνων S-1A, του 2014. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι, για την πρώτη περίοδο λειτουργίας του δορυφόρου S-1A, στο διάστημα μεταξύ του Οκτωβρίου 2014 και Μαρτίου 2015, είχαν επισημανθεί ανωμαλίες στην τροχιά πτήσης του, γεγονός που αντανακλάται στις μεγάλες κάθετες βάσεις μεταξύ των εικόνων του 2014 και του 2015 (μετά το Μάρτιο) και επηρεάζει τη διαδικασία της Συμβολομετρίας από το πολύ πρώιμο στάδιο της συμπροσαρμογής των ζευγών των εικόνων.

Άλλη μια σημαντική παράμετρος για την επιτυχημένη εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας, στην περιοχή μελέτης των μεταλλείων, είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας, η οποία δεν γίνεται αντιληπτή και δε μπορεί να διερευνηθεί και να αξιολογηθεί από

την εικόνα της συνάφειας του ζεύγους. Η επίδραση αυτή, η οποία δημιουργεί τιμές μετακίνησης εκεί που δεν υπάρχουν, εξαιτίας των πρόσθετων κροσσών συμβολής που δημιουργεί, θα μπορούσε να μετριάσει με την εκτίμηση της ατμόσφαιρας από επίγειους σταθμούς στην περιοχική μελέτη και την αφαίρεση της φάσης που αντιστοιχεί στην εκτίμηση αυτή από το συμβολογράφημα, πριν τη διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης. Έτσι, οι μετακινήσεις που προκύπτουν είναι απαλλαγμένες, όσο αυτό είναι δυνατόν, από ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα.

Επιπλέον, η επεξεργασία μεγάλου αριθμού συμβολογραφημάτων, αλλά και stack συμβολογραφημάτων (Rocca, 2007), στα οποία η ύπαρξη ατμοσφαιρικών σφαλμάτων θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια τυχαία διαδικασία που συμβαίνει στο χρόνο, συντελεί στην ανίχνευση και το διαχωρισμό των συνιστωσών του σήματος που αντιπροσωπεύουν πραγματικές μετακινήσεις από αυτές που οφείλονται σε ατμοσφαιρικό θόρυβο (Hooper, 2008), (Ng et al., 2010). Παρ' όλα αυτά αυτή η διαδικασία είναι δυνατόν να αποτύχει σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο που επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες και ειδικά στην ανάλυση χωροχρονικών παραμορφώσεων (Samsonof et al, 2011).

Στην περίπτωση αυτή, όπως συμβαίνει και για την περιοχή του μεταλλείου, θα μπορούσε να εφαρμοστεί η μέθοδος των μικρών βάσεων (SBAS), η οποία επιλέγει συμβολογραφήματα με μικρή χρονική και κάθετη βάση, από τα οποία προκύπτει ρυθμός παραμόρφωσης για την περιοχή που μελετάται, για κάθε συμβολογράφημα, και στη συνέχεια συντίθεται η αθροιστική παραμόρφωση, από την οποία προκύπτουν οι συνολικές μετακινήσεις με μαθηματική ολοκλήρωση (Berardino et al, 2002). Έτσι, συν τοις άλλοις, μειώνονται και τα σφάλματα που υπεισέρχονται στη διαδικασία της Συμβολομετρίας λόγω χρονικής και χωρικής αποσυσχέτισης μεταξύ των λήψεων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι He et al. (2015) εφάρμοσαν μια συνδυαστική τεχνική χρονοσειρών που βασίζεται στις αρχές της Διαφορικής Συμβολομετρίας και των μικρών βάσεων και απαιτεί την επεξεργασία συμβολογραφημάτων πολλαπλών ανοιγμάτων (multiple-aperture InSAR), με στόχο την ανίχνευση μετακινήσεων τόσο κατά πλάτος όσο και κατά μήκος της τροχιάς, στις τρεις διαστάσεις. Η μέθοδος παρουσιάζει καλύτερες ακρίβειες από την τεχνική "offset tracking", της τάξης μερικών δεκάτων του εκατοστού στην κατακόρυφη διεύθυνση και της τάξης μερικών εκατοστών στην οριζόντια διεύθυνση, σε σύγκριση με μετρήσεις GPS.

Συνολικά, συμπεραίνεται ότι υπάρχουν προοπτικές και δυνατότητες βελτίωσης της εφαρμογής της μεθόδου της Διαφορικής Συμβολομετρίας για την ανίχνευση μεταβολών σε περιοχές εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Η αξιοποίηση της πληροφορίας του πλάτους του κύματος, με τεχνικές που ανιχνεύουν μεταβολές κατά μήκος της τροχιάς, θα μπορούσε να συνδυαστεί με τεχνικές ανίχνευσης μεταβολών στις οπτικές εικόνες, με απώτερο σκοπό την ανίχνευση μεταβολών στις τρεις διαστάσεις.

Βιβλιογραφία

- S. Berberoglu , A. Akin, Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformatio*, 11, 46–53, 2009
- B. Bigdeli , P. Pahlavani, High resolution multisensor fusion of SAR, optical and LiDAR data based on crisp vs. fuzzy and feature vs. decision ensemble systems, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 126–136, 2016
- X. Blaes, L. Vanhalle, P. Defourny, Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series, *Remote Sensing of Environment*, 96, 352 – 365, 2005
- C. Castañeda, F. Gutiérrez, M. Manunta and J. P. Galve, DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence and landslides, Ebro River, Spain, *Earth Surface Processed and Landforms*, 34, 11, 1562-1574, 2014
- C. Carnec , C. Delacourt, Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France, *Journal of Applied Geophysics* 43, 2000, 43–54, 2000
- S. Dong, H. Yin, S. Yao, F. Zhang, Detecting Surface Subsidence in Coal Mining Area Based on DInSAR Technique, *Journal of Earth Science*, 24, 3, 449–456, 2013
- Z. Du, L.Ge X.Li and A.H-M.Ng, Subsidence Monitoring over the Southern Coalfield, Australia Using both L-Band and C-Band SAR Time Series Analysis, *Remote Sens.*, 8, 543, 2016
- H. Fan , K. Deng, C. Ju ,C. Zhu, J. Xue , Land subsidence monitoring by D-InSAR technique, *Mining Science and Technology (China)*, 21 869–872, 2011
- H. Fan, Xi. Gao , J. Yang , K. Deng and Y. Yu, Monitoring Mining Subsidence Using A Combination of Phase-Stacking and Offset-Tracking Methods, *Remote Sens.*, 7, 9166-9183, 2015
- M. Fang, Y. Mingxing, Q. I. Xiaoying, Y. Chengming, W. Baocun, L. Rui, C. Jianhua, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B1, 2008
- A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, 1, 2001
- R. Grandin , INTERFEROMETRIC PROCESSING OF SLC SENTINEL-1 TOPS DATA, 2015
- Y. Guéguen , B. Deffontaines, B. Fruneau, M. Al Heib, M. de Michele , D. Raucoules , Y. Guise , J. Planchenault, Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France), *Journal of Applied Geophysics*, 69, 24–34, 2009
- L. Ge, H.C. Chang , C. Rizos, C. Carnec ,C. Delacourt, Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France, *Journal of Applied Geophysics*, 43 43–54, 2000
- L. Ge, H. Chang, C. Rizos, Satellite radar interferometry for mine subsidence monitoring
- D. Geudtner, R. Torres, P. Snoeij, M. Davidson, and B. Rommen, SENTINEL-1 SYSTEM CAPABILITIES AND APPLICATIONS, European Space Agency, ESA-ESTEC, IGARSS 2014
- H. Ghassemian, A review of remote sensing image fusion methods, *Information Fusion*, 32, 75–89, 2016
- G. Herrera, R. Tomás, J.M. Lopez-Sanchez , J. Delgado, J.J. Mallorqui, S. Duque , J. Mulas, Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain), *Engineering Geology*, 90, 148 – 159, 2007
- G. Herrera , n , R. Toma´s , F. Vicente, J.M. Lopez-Sanchez , J.J. Mallorqui , J. Mulas, Mapping ground movements in open pit mining areas using differential SAR interferometry, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* ,47 ,1114–1125, 2010

- A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 31, 2004
- H. Jung, W. Lee and L. Zhang, Theoretical Accuracy of Along-Track Displacement Measurements from Multiple-Aperture Interferometry (MAI), *Sensors*, 14, 17703-17724, 2014
- H. Jung, S. Kim, H. Jung, K. Min, J. Won, Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis, *Engineering Geology*, 92, 1–13, 2007
- B. Καραθανάση, Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, 2012
- G. Laurin, V. Liesenberg, Q. Chen, L. Guerriero, F. Frate, A. Bartolini, D. Coomes, B. Wilebore, J. Lindsell, R. Valentini, Optical and SAR sensor synergies for forest and land cover mapping in a tropical site in West Africa, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 7–16, 2013
- R. Latifovic, K. Fytas, J. Chen, J. Paraszczak, Assessing land cover change resulting from large surface mining development, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 29–48, 2005
- E. Lehmann, P. Caccetta, K. Lowell, A. Mitchell, Z. Zhou, A. Held, T. Milne, I. Tapley, SAR and optical remote sensing: Assessment of complementarity and interoperability in the context of a large-scale operational forest monitoring system, *Remote Sensing of Environment*, 156, 335–348, 2015
- Z. LIU, Z. BIAN, S. LEI, D. LIU, A. SOWTER, Evaluation of PS-DInSAR technology for subsidence monitoring caused by repeated mining in mountainous area, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24, 2014
- O. Maksymiuk, C. Mayer, U. Stilla, Velocity estimation of glaciers with physically-based spatial regularization — Experiments using satellite SAR intensity images, *Remote Sensing of Environment*, 172, 190–204, 2016
- D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl & T. Rabaut, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature* 364, 138 – 142, 1993
- J. Mathew, R. Majumdar, K. Kumar, SAR interferometry and optical remote sensing for analysis of co-seismic deformation, source characteristics and mass wasting pattern of Lushan (China, April 2013) earthquake, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 338–349, 2015
- J.C. Mura, W. R. Paradella, F. F. Gama, A. R. Santos, M. Galo, P.O. Camargo, A. Q. Silva, G. G. Silva, Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: A Case Study in the N5W Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data, *Proc. of SPIE*, 9243, 924311-2
- M. Necsoiu, A. Onaca, S. Wigginton, P. Urdea, Rock glacier dynamics in Southern Carpathian Mountains from high-resolution optical and multi-temporal SAR satellite imagery, *Remote Sensing of Environment* 177, 21–36, 2016
- A. Ng, L. Ge, Y. Yan, X. Li, H. Chang, K. Zhang, C. Rizo, Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia, *Engineering Geology*, 115, 1–15, 2010
- Y. Yan, H. Dai, L. Ge, J. Guo, A. Ng, X. Li, Numerical simulation of dynamic surface deformation based on DInSAR monitoring, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, 24, 1248–1254, 2014
- W.R. Paradella, A. Ferretti, J.C. Mura, D. Colombo, F. F. Gama, A. Tamburini, A. R. Santos, F. Novali, M. Galo, P. Camargo, A.Q. Silva, G.G. Silva, A. Silva, L. L. Gomes, Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis, *Engineering Geology*, 193, 61–78, 2015
- P. Potin, B. Rosich, J. Roeder, P. Bargellini, SENTINEL-1 MISSION OPERATIONS CONCEPT, European Space Agency, IGARSS 2014

- A. Pour, M. Hashim, Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran, *Journal of Taibah University for Science*, 9, 155–166, 2015
- R.J. Radke , S. Andra, O. Al-Kofahi, and B. Roysam,, *Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey*, August 19, 2004
- D. Raucoules, M. de Michele, J.-P. Malet., P. Ulrich, Time-variable 3D ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). application to La Valette landslide (South French Alps), *Remote Sensing of Environment*, 139, 198–204, 2013
- J.Reiche, J. Verbesselt, D. Hoekman, M. Herold, Fusing Landsat and SAR time series to detect deforestation in the tropics, *Remote Sensing of Environment*, 156, 276–293, 2015
- M. A. RICHARDS, *A Beginner’s Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing*, *IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE*, 22, 9, 2007
- S. Samsonov, N. d’Oreye, B.Smets , Ground deformation associated with post-mining activity at the French–German border revealed by novel InSAR time series method, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,23, 142–154, 2013
- A. SINGH, Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 10:6, 989-1003,1989
- R. J. Stow, P.Wright, *Mining Subsidence Land Surveying by SAR Interferometry*,1993
- P. A. Townsend, D. P. Helmers , C. C. Kingdon , B. E. McNeil, K. M. de Beurs , K.N. Eshleman , Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976–2006 Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 113, 62–72, 2009
- X. Wang, Y. Zhang , X. Jiang, P. Zhang , A Dynamic Prediction Method of Deep Mining Subsidence Combines D-InSAR Technique, *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2533 – 2539, 2011
- U. Wegmüller, C. Werner, T. Strozzi, A. Wiesmann, O. Frey, and M. Santoro, SENTINEL-1 SUPPORT IN THE GAMMA SOFTWARE
- T. J. Wright, B. E. Parsons, and Z.g Lu , Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 31, 2004
- Y. Xu, P.Ma, H. Lin, E. Ng, Fusion of World-view2 stereo and TerraSAR-X images for 3D building extraction in urban areas, ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate jointly with 12 th Symposium on the Urban Environment
- N. Yague-Martinez, P. Prats-Iraola, F. R. Gonzalez, R. Brcic, R. Shau, D. Geudtner, M. Eineder, and R. Bamler, Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 54, 4, 2016
- H. A. Zebker, Geodetically Accurate InSAR Data Processor, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 48, 12, 2010
- C. ZHAO, Z.LU and Q.ZHANG, Time-series deformation monitoring over mining regions with SAR intensity-based offset measurements, *Remote Sensing Letters* , 4, 436–445, 2013
- Y. Zhang, H. Zhang, H. Lin, Improving the impervious surface estimation with combined use of optical and SAR remote sensing images, *Remote Sensing of Environment*, 141, 155–167, 2014

Παράρτημα

GAMMA PROCESSING

#MASTER AND SLAVE SLC FILES PRE-PROCESSING -----

##20150907.iw1 SLAVE

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/measurement/s1a-iw1-slc-vv-20150907t043033-20150907t043058-007604-00a87e-004.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/s1a-iw1-slc-vv-20150907t043033-20150907t043058-007604-00a87e-004.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw1-slc-vv-20150907t043033-20150907t043058-007604-
00a87e-004.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw1-slc-vv-20150907t043033-20150907t043058-007604-00a87e-
004.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW1.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW1.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW1.slc.tmp.TOPS_par
SLC width: 21876 lines: 13518
```

##20150907.iw2

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/measurement/s1a-iw2-slc-vv-20150907t043034-20150907t043059-007604-00a87e-005.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/s1a-iw2-slc-vv-20150907t043034-20150907t043059-007604-00a87e-005.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw2-slc-vv-20150907t043034-20150907t043059-007604-
00a87e-005.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw2-slc-vv-20150907t043034-20150907t043059-007604-00a87e-
005.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW2.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW2.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW2.slc.tmp.TOPS_par
```

#SLC width: 25738 lines: 13617

##20150907.iw3

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/measurement/s1a-iw3-slc-vv-20150907t043032-20150907t043057-007604-00a87e-006.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/s1a-iw3-slc-vv-20150907t043032-20150907t043057-007604-00a87e-006.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw3-slc-vv-20150907t043032-20150907t043057-007604-
00a87e-006.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150907T043032_20150907T043059_00A87E_081F.
SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw3-slc-vv-20150907t043032-20150907t043057-007604-00a87e-
006.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW3.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW3.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.IW3.slc.tmp.TOPS_par
#SLC width: 24816 lines: 13671
```

##20150919.iw1 MASTER

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/measurement/s1a-iw1-slc-vv-20150919t043033-20150919t043058-007779-00ad22-004.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/s1a-iw1-slc-vv-20150919t043033-20150919t043058-007779-00ad22-004.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw1-slc-vv-20150919t043033-20150919t043058-007779-
00ad22-004.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw1-slc-vv-20150919t043033-20150919t043058-007779-00ad22-
004.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW1.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW1.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW1.slc.tmp.TOPS_par
```

##20150919.iw2

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/measurement/s1a-iw2-slc-vv-20150919t043034-20150919t043059-007779-00ad22-005.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/s1a-iw2-slc-vv-20150919t043034-20150919t043059-007779-00ad22-005.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw2-slc-vv-20150919t043034-20150919t043059-007779-
00ad22-005.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw2-slc-vv-20150919t043034-20150919t043059-007779-00ad22-
005.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW2.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW2.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW2.slc.tmp.TOPS_par
```

##20150919.iw3

```
par_S1_SLC
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/measurement/s1a-iw3-slc-vv-20150919t043032-20150919t043058-007779-00ad22-006.tiff
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/s1a-iw3-slc-vv-20150919t043032-20150919t043058-007779-00ad22-006.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/calibration-s1a-iw3-slc-vv-20150919t043032-20150919t043058-007779-
00ad22-006.xml
/data2/sentinel1/set1/S1A_IW_SLC__1SDV_20150919T043032_20150919T043059_007779_00AD22_6C72
.SAFE/annotation/calibration/noise-s1a-iw3-slc-vv-20150919t043032-20150919t043058-007779-00ad22-
006.xml /data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW3.slc.tmp.par
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW3.slc.tmp
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.IW3.slc.tmp.TOPS_par
```

20150919.SLC_tab

```
echo "20150919.IW1.slc.tmp 20150919.IW1.slc.tmp.par 20150919.IW1.slc.tmp.TOPS_par" >
20150919.SLC_tab.tmp
echo "20150919.IW2.slc.tmp 20150919.IW2.slc.tmp.par 20150919.IW2.slc.tmp.TOPS_par" >>
20150919.SLC_tab.tmp
echo "20150919.IW3.slc.tmp 20150919.IW3.slc.tmp.par 20150919.IW3.slc.tmp.TOPS_par" >>
20150919.SLC_tab.tmp
```

20150919.SLC_tab

```
echo "20150919.IW1.slc 20150919.IW1.slc.par 20150919.IW1.slc.TOPS_par" > 20150919.SLC_tab
echo "20150919.IW2.slc 20150919.IW2.slc.par 20150919.IW2.slc.TOPS_par" >> 20150919.SLC_tab
echo "20150919.IW3.slc 20150919.IW3.slc.par 20150919.IW3.slc.TOPS_par" >> 20150919.SLC_tab
```

```
SLC_copy_S1_TOPS 20150919.SLC_tab.tmp 20150919.SLC_tab 1 8 1 9
```

```

SLC_mosaic_S1_TOPS /data2/ekaiatmp/Documents/20150919.SLC_tab
/data2/ekaiatmp/Documents/20150919.slc /data2/ekaiatmp/Documents/20150919.slc.par 10 2

multi_look 20150919.slc 20150919.slc.par 20150919.slc.mli 20150919.slc.mli.par 10 2
#width: 6857 lines: 1421

# Precise orbit Ephemerides
S1_OPOD_vec 20150919.slc.mli.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20151009T122411_V20150918T225943_20150920T005943.EOF

dispwr 20150919.slc.mli 6857

# 20150907.SLC_tab.tmp
echo "20150907.IW1.slc.tmp 20150907.IW1.slc.tmp.par 20150907.IW1.slc.tmp.TOPS_par" >
20150907.SLC_tab.tmp
echo "20150907.IW2.slc.tmp 20150907.IW2.slc.tmp.par 20150907.IW2.slc.tmp.TOPS_par" >>
20150907.SLC_tab.tmp
echo "20150907.IW3.slc.tmp 20150907.IW3.slc.tmp.par 20150907.IW3.slc.tmp.TOPS_par" >>
20150907.SLC_tab.tmp

echo "20150907.IW1.slc 20150907.IW1.slc.par 20150907.IW1.slc.TOPS_par" > 20150907.SLC_tab
echo "20150907.IW2.slc 20150907.IW2.slc.par 20150907.IW2.slc.TOPS_par" >> 20150907.SLC_tab
echo "20150907.IW3.slc 20150907.IW3.slc.par 20150907.IW3.slc.TOPS_par" >> 20150907.SLC_tab

SLC_copy_S1_TOPS 20150907.SLC_tab.tmp 20150907.SLC_tab 1 8 1 9

SLC_mosaic_S1_TOPS /data2/ekaiatmp/Documents/20150907.SLC_tab
/data2/ekaiatmp/Documents/20150907.slc /data2/ekaiatmp/Documents/20150907.slc.par 10 2

multi_look 20150907.slc 20150907.slc.par 20150907.slc.mli 20150907.slc.mli.par 10 2
#width: 6857 lines: 1421

dispwr 20150907.slc.mli 6857

# Precise orbit Ephemerides
S1_OPOD_vec 20150907.slc.mli.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20150927T122445_V20150906T225943_20150908T005943.EOF

#-----
# DEM PRE-PROCESSING -----
#### tiles : N40E023, N40E024, N40E025, N41E023, N41E024, N41E025####

cd srtm_30_apo_usgs.gov

multi_mosaic list_multi_mosaic2 srtm_mosaic2.hgt srtm_mosaic2.dem_par 0 3
nlines: 3601 width: 14401

replace_values srtm_mosaic2.hgt 0 1 srtm_temp_dem_2 14401 0 4
replace_values srtm_temp_dem_2 -32768 0 srtm_temp_dem2_2 14401 0 4
interp_ad srtm_temp_dem2_2 srtm_mosaic_interp2.dem 14401 9 40 81 2 4
disdem_par srtm_mosaic_interp2.dem srtm_mosaic2.dem_par

#Look-up table master - DEM
cd Documents

create_dem_par srtm_30_apo_usgs.gov/srtm_mosaic_utm_0919.dem_par 20150919.slc.mli.par - -20.0 20.0

#DEM title: DEM : SRTM_MOSAIC
#data format(REAL*4, INTEGER*2): REAL*4 : INTEGER*2
#DEM height offset (m) (nominal=0.0): 0.0000:

```



```

#DEM height scale factor (nominal=1.0): 1.000000:
#DEM width (samples): 13063:
#DEM height (lines): 4747:
#posting (northing (m), easting (m)): -20.000000 20.000000 :
#offset of first DEM sample (northing (m), easting (m)): 4530000.0000 75000.0000 :

cd srtm_30_apo_usgs.gov

dem_trans srtm_mosaic2.dem_par srtm_mosaic_interp2.dem srtm_mosaic_utm_0919.dem_par
srtm_mosaic_utm_0919.dem 1 1 0

cd Documents

gc_map 20150919.slc.mli.par - srtm_30_apo_usgs.gov/srtm_mosaic_utm_0919.dem_par
srtm_30_apo_usgs.gov/srtm_mosaic_utm_0919.dem srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg_par
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt 1 1
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.sim_sar 20150919_srtm_mosaic.u 20150919_srtm_mosaic.v
20150919_srtm_mosaic.inc 20150919_srtm_mosaic.psi 20150919_srtm_mosaic.pix
20150919_srtm_mosaic.ls_map

#DEM segment width: 13034 lines: 4654

#geocoding lookup table: srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt

disdem_par srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg_par
dismph srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt 13034
dispwr srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.sim_sar 13034

# Transformation of the simulated SAR intensity image to sar geometry
geocode srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.sim_sar
13034 srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.sim_sar 6857 1421 1 0

output data width, nlines: 6857 1421

# Comparison between actual and simulated SAR images
dis2pwr srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.sim_sar 20150919.slc.mli 6857 6857
raspwr 20150919.slc.mli 6857 1 0 1 1 1. .35 1 20150919.slc.mli.ras 0
raspwr srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.sim_sar 6857 1 0 1 1 1. .35 1
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.sim_sar.ras 0
disras srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.sim_sar.ras

#Simulated backscatter image, pix_gamma0, based on DEM, in slant range geometry
pixel_area 20150919.slc.mli.par srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg_par
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt
20150919_srtm_mosaic.ls_map 20150919_srtm_mosaic.inc 20150919_srtm_mosaic.pix_sigma0
20150919_srtm_mosaic.pix_gamma0

#SLC slant range pixel spacing (m): 23.295620
#SLC azimuth pixel spacing (m): 27.904820
#number of range samples: 6857
#number of azimuth lines: 1421
#number of range looks: 10
#number of azimuth looks: 2
#DEM width: 13034
#DEM lines: 4654
#number of steps to divide each dimension of the map pixels: 10
#numSteps: 10 elements/triangle: 50 pixfrac: 0.0200

dis2pwr 20150919_srtm_mosaic.pix_gamma0 20150919.slc.mli 6857 6857

```

```

# Compute offset of simulated SAR image to mli image
create_diff_par 20150919.sl.c.mli.par - 20150919_srtm_mosaic.diff_par 1 0

#output DIFF/GEO parameter file: 20150919_srtm_mosaic.diff_par
#number of offsets range: 32 azimuth: 32
#patch size range: 256 azimuth: 256
#cross-correlation threshold: 0.100

offset_pwrn 20150919_srtm_mosaic.pix_sigma0 20150919.sl.c.mli 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 256 256 20150919_srtm_mosaic.offsets 2 64 64
0.5

#number of offsets above correlation threshold: 644 of 4096
#output binary offset data file: 20150919_srtm_mosaic.offfs
#output binary cross-correlation data (ccp) file: 20150919_srtm_mosaic.ccp
#number of offsets range: 64 azimuth: 64
#MLI offset search window size range: 256 azimuth: 256
#output DIFF/GEO parameter file: 20150919_srtm_mosaic.diff_par

offset_fitm 20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.coffs 20150919_srtm_mosaic.coffsets 0.5 1

#total number of culling iterations: 2
#final solution: 630 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -1.28433
#final azimuth offset poly. coeff.: -0.01271
#final range offset poly. coeff. errors: 6.74140e-03
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 3.91595e-03
#final model fit std. dev. (samples) range: 0.1061 azimuth: 0.0616

offset_pwrn 20150919_srtm_mosaic.pix_sigma0 20150919.sl.c.mli 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 256 256 20150919_srtm_mosaic.offsets 4 64 64
0.5

#number of offsets above correlation threshold: 659 of 4096
#output binary offset data file: 20150919_srtm_mosaic.offfs
#output binary cross-correlation data (ccp) file: 20150919_srtm_mosaic.ccp
#number of offsets range: 64 azimuth: 64
#MLI offset search window size range: 256 azimuth: 256
#output DIFF/GEO parameter file: 20150919_srtm_mosaic.diff_par

offset_fitm 20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.coffs 20150919_srtm_mosaic.coffsets 0.5 1

#total number of culling iterations: 2
#final solution: 648 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -1.28040
#final azimuth offset poly. coeff.: -0.00892
#final range offset poly. coeff. errors: 6.91752e-03
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 2.84576e-03
#final model fit std. dev. (samples) range: 0.1114 azimuth: 0.0458

offset_pwrn 20150919_srtm_mosaic.pix_sigma0 20150919.sl.c.mli 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 128 128 20150919_srtm_mosaic.offsets 4 64 64
0.5

```

```

#number of offsets above correlation threshold: 628 of 4096
#output binary offset data file: 20150919_srtm_mosaic.offfs
#output binary cross-correlation data (ccp) file: 20150919_srtm_mosaic.ccp
#number of offsets range: 64 azimuth: 64
#MLI offset search window size range: 128 azimuth: 128
#output DIFF/GEO parameter file: 20150919_srtm_mosaic.diff_par

offset_fitm 20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.coffs 20150919_srtm_mosaic.coffsets 0.5 1

#total number of culling iterations: 3
#final solution: 599 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -1.25474
#final azimuth offset poly. coeff.: -0.00922
#final range offset poly. coeff. errors: 7.74993e-03
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 1.76269e-03
#final model fit std. dev. (samples) range: 0.1223 azimuth: 0.0278

offset_pwrn 20150919_srtm_mosaic.pix_sigma0 20150919.slc.mli 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 128 128 20150919_srtm_mosaic.offsets 8 64 64
0.5

#number of offsets above correlation threshold: 589 of 4096
#output binary offset data file: 20150919_srtm_mosaic.offfs
#output binary cross-correlation data (ccp) file: 20150919_srtm_mosaic.ccp
#number of offsets range: 64 azimuth: 64
#MLI offset search window size range: 128 azimuth: 128
#output DIFF/GEO parameter file: 20150919_srtm_mosaic.diff_par

offset_fitm 20150919_srtm_mosaic.offfs 20150919_srtm_mosaic.ccp 20150919_srtm_mosaic.diff_par
20150919_srtm_mosaic.coffs 20150919_srtm_mosaic.coffsets 0.5 1

#total number of culling iterations: 3
#final solution: 536 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -1.17277
#final azimuth offset poly. coeff.: -0.00579
#final range offset poly. coeff. errors: 6.01206e-03
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 8.92738e-04
#final model fit std. dev. (samples) range: 0.0880 azimuth: 0.0131

gc_map_fine srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.rough.lt 13034 20150919_srtm_mosaic.diff_par
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.fine.lt 1

#range offset polynomial:  $a_0 + a_1*r + a_2*az + a_3*r*az + a_4*r*r + a_5*az*az$ 
#range offset polynomial coeff.: -1.1728 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00

#azimuth offset polynomial:  $b_0 + b_1*r + b_2*az + b_3*r*az + b_4*r*r + b_5*az*az$ 
#azimuth offset polynomial coeff.: -0.0058 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00

#input lookup table width: 13034 lines: 4654

# Geocoding of SAR mli image, i.e. transformation from SAR to map geometry
geocode_back 20150919.slc.mli 6857 srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.fine.lt
20150919.slc.mli.utm 13034 4654 2 0

#output file: 20150919.slc.mli.utm

```

```

#output file width: 13034 lines: 4654

dispwr 20150919.slc.mli.utm 13034

dis2pwr srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.sim_sar 20150919.slc.mli.utm 13034 13034

# Inverse geocoding of the DEM subset, i.e .transformation of DEM subset from map to SAR geometry
geocode srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.fine.lt srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg
13034 srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg 6857 1421 2 0

dishgt srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg 20150919.slc.mli 6857

#-----
# TOPS INTERFEROMETRY -----
# Calculation of the co-registration lookup table

rdc_trans 20150919.slc.mli.par srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg 20150907.slc.mli.par
20150919_20150907.slc.mli.lt

#DEM in range-Doppler coordinates: srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg
#reference SLC/MLI ISP image parameter file: 20150919.slc.mli.par
#reference SLC/MLI slant range pixel spacing (m): 23.295620
#reference SLC/MLI azimuth pixel spacing (m): 27.904800
#reference SLC/MLI radar center frequency (Hz): 5.40500e+09
#reference SLC/MLI PRF (Hz): 486.4863
#reference SLC/MLI Doppler centroid (Hz): 2.709
#reference SLC/MLI center swath inc. angle (deg.): 33.810
#reference SLC/MLI number of range samples: 6857
#reference SLC/MLI number of azimuth lines: 1421
#reference SLC/MLI azimuth angle: 90.0000 (right looking)

#SLC/MLI 2 ISP image parameter file: 20150907.slc.mli.par
#SLC/MLI 2 slant range pixel spacing (m): 23.295620
#SLC/MLI 2 azimuth pixel spacing (m): 27.904820
#SLC/MLI 2 radar center frequency (Hz): 5.40500e+09
#SLC/MLI 2 PRF (Hz): 486.4863
#SLC/MLI 2 Doppler centroid (Hz): -2.683
#SLC/MLI 2 center swath inc. angle (deg.): 33.810
#SLC/MLI 2 number of range samples: 6857
#SLC/MLI 2 number of azimuth lines: 1421
#SLC/MLI 2 deskew ON: 1
#SLC/MLI 2 azimuth angle: 90.0000 (right looking)

*** TCN matrix ***
6.524146e-01 9.610244e-02 -7.517443e-01
3.446513e-01 -9.210439e-01 1.813661e-01
-6.749598e-01 -3.774156e-01 -6.340243e-01

#center time of the reference MLI (s): 16255.91015
#center time of MLI-2 (s): 16255.62846
#image center slant range (m): 880221.781 Doppler frequency (Hz): -2.683
#MLI-1 center lat (deg.): 40.4521602 lon: (deg.) 23.4166655 earth radius (m): 6369178.6761 altitude (m):
701160.3183
#MLI-1 radar velocity (m/s): 7593.149671 approx. SAR focus velocity (m/s): 7206.818060
#MLI-1 position vector (image center) (m) 4.77219442e+06 2.66845599e+06 4.48276662e+06
#MLI-1 SAR velocity vector (image center) (m/s) 4.96074949e+03 7.33562342e+02 -5.70164650e+03
#error threshold for geocoding along track: 0.0001 samples 2.056e-07 sec.

#output lookup table: 20150919_20150907.slc.mli.lt
#width: 6857 lines: 1421

```

```

# Refinement of the co-registration lookup table using matching techniques
echo "20150907.IW1.rslc 20150907.IW1.rslc.par 20150907.IW1.rslc.TOPS_par" > 20150907.RSLC_tab
echo "20150907.IW2.rslc 20150907.IW2.rslc.par 20150907.IW2.rslc.TOPS_par" >> 20150907.RSLC_tab
echo "20150907.IW3.rslc 20150907.IW3.rslc.par 20150907.IW3.rslc.TOPS_par" >> 20150907.RSLC_tab

SLC_interp_lt_S1_TOPS 20150907.SLC_tab 20150907.slc.par 20150919.SLC_tab 20150919.slc.par
20150919_20150907.slc.mli.lt 20150919.slc.mli.par 20150907.slc.mli.par - 20150907.RSLC_tab
20150907.rslc 20150907.rslc.par

# Residual offset between 20150919 SLC mosaic and slave, using cross-correlation method
create_offset 20150919.slc.par 20150907.slc.par 20150919_20150907.off 1 10 2 0

#SLC-1 title: s1a-iw1-slc-vv-20150919t043033-20150919t043058-007779-00ad22-004.tiff S1A-IW-IW1-VV-
7779 (software: Sentinel-1 IPF 002.53)
#SLC-1 Doppler centroid at center swath (Hz): 2.709
#SLC-1 number of range samples: 68576
#SLC-1 number of image lines: 2843
#SLC-1 slant range pixel spacing (m): 2.329562
#SLC-1 azimuth sample spacing (m): 13.952400

#SLC-2 title: s1a-iw1-slc-vv-20150907t043033-20150907t043058-007604-00a87e-004.tiff S1A-IW-IW1-VV-
7604 (software: Sentinel-1 IPF 002.53)
#SLC-2 Doppler centroid at center swath (Hz): -2.683
#SLC-2 number of range samples: 68576
#SLC-2 number of lines: 2843
#SLC-2 slant range pixel spacing (m): 2.329562
#SLC-2 azimuth sample spacing (m): 13.952410

#OFFSET ALGORITHM: intensity cross-correlation
#number of offset locations range: 32 azimuth: 64
#patch size range: 64 azimuth: 64
#offset correlation threshold: 0.100

Interferogram Parameters
*****
range looks: 10
azimuth looks: 2
range width pixels: 6857
azimuth lines: 1421
range pixel spacing (m): 23.29562
azimuth line spacing (m): 27.90480

#output OFF_par file: 20150919_20150907.off

offset_pwr 20150919.slc 20150907.rslc 20150919.slc.par 20150907.rslc.par 20150919_20150907.off
20150919_20150907.off 20150919_20150907.ccp 256 64 - 1 64 64 0.4 4 0 0

#number of offsets above SNR threshold: 451 of 4096
#output binary offset file: 20150919_20150907.off
#output binary cross-correlation peak data (ccp) file: 20150919_20150907.ccp
#number of offsets range : 64 azimuth: 64
#SLC offset search window size range: 256 azimuth: 64
#writing ISP OFF_par file: 20150919_20150907.off

offset_fit 20150919_20150907.off 20150919_20150907.ccp 20150919_20150907.off -- 0.4 1 0

#total number of culling iterations: 5
#final solution: 399 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -0.03165

```



```

#final range offset poly. coeff. errors: 1.88127e-03
#final azimuth offset poly. coeff.: 0.00194
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 1.59465e-03
# final model fit std. dev. (samples) range: 0.0200 azimuth: 0.0170

SLC_interp_lt_S1_TOPS 20150907.SLC_tab 20150907.slc.par 20150919.SLC_tab 20150919.slc.par
20150919_20150907.slc.mli.lt 20150919.slc.mli.par 20150907.slc.mli.par 20150919_20150907.off
20150907.RSLC_tab 20150907.rslc 20150907.rslc.par

#Correction of processor anomaly --> Test for master 20150919
S1_coreg_subswath_overlap 20150919.SLC_tab 20150907.SLC_tab 20150919_20150907
20150919_20150907.off 20150919_20150907.off_shift 0.8 0.01 0.8 1 20150907.RSLC_tab

#SLC_phase_shift

#keyword found: azimuth_offset_polynomial
#current value: -0.01308 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
#new value: -0.013080 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00

#Iteration using a new parameter file .off1
create_offset 20150919.slc.par 20150907.slc.par 20150919_20150907.off1 1 10 2 0

offset_pwr 20150919.slc 20150907.rslc 20150919.slc.par 20150907.rslc.par 20150919_20150907.off1
20150919_20150907.off 20150919_20150907.ccp 256 64 - 1 64 64 0.4 4 0 0

#number of offsets above SNR threshold: 452 of 4096
#output binary offset file: 20150919_20150907.off 20150919_20150907.off
#output binary cross-correlation peak data (ccp) file: 20150919_20150907.ccp
#number of offsets range : 64 azimuth: 64
#SLC offset search window size range: 256 azimuth: 64
#writing ISP OFF_par file: 20150919_20150907.off1

offset_fit 20150919_20150907.off 20150919_20150907.ccp 20150919_20150907.off1 -- 0.4 1 0

#total number of culling iterations: 4
#final solution: 404 offset estimates accepted out of 4096 samples
#final range offset poly. coeff.: -0.00996
#final range offset poly. coeff. errors: 1.87089e-03
#final azimuth offset poly. coeff.: 0.00046
#final azimuth offset poly. coeff. errors: 1.60251e-03
#final model fit std. dev. (samples) range: 0.0200 azimuth: 0.0172
#updating ISP offset parameters: 20150919_20150907.off1

#Include total offset estimated
offset_add 20150919_20150907.off 20150919_20150907.off1 20150919_20150907.off.total

SLC_interp_lt_S1_TOPS 20150907.SLC_tab 20150907.slc.par 20150919.SLC_tab 20150919.slc.par
20150919_20150907.slc.mli.lt 20150919.slc.mli.par 20150907.slc.mli.par 20150919_20150907.off.total
20150907.RSLC_tab 20150907.rslc 20150907.rslc.par

#Estimation of azimuth offset correction based on the phase difference between subsequent bursts
S1_coreg_overlap 20150919.SLC_tab 20150907.RSLC_tab 20150919_20150907
20150919_20150907.off.total 20150919_20150907.off.total.corrected 0.8 0.01 0.8 1

#azimuth_pixel_offset -0.001403 [azimuth SLC pixel]

#keyword found: azimuth_offset_polynomial
#current value: 0.00240 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
#new value: 0.000997 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00

```

Resample again the slave using the corrected lookup table

```
SLC_interp_lt_S1_TOPS 20150907.SLC_tab 20150907.slc.par 20150919.SLC_tab 20150919.slc.par
20150919_20150907.slc.mli.lt 20150919.slc.mli.par 20150907.slc.mli.par
20150919_20150907.off.total.corrected 20150907.RSLC_tab 20150907.rslc 20150907.rslc.par
```

#Azimuth phase deramp

```
S1_deramp_TOPS_reference 20150919.SLC_tab
```

```
SLC_mosaic_S1_TOPS 20150919.SLC_tab.deramp 20150919.slc.deramp 20150919.slc.deramp.par 10 2 1
```

#Alternatively, do the S1_deramp_TOPS_slave manually

```
create_diff_par 20150919.IW1.slc.par - 20150919_20150907.IW1.slc.diff_par 1 0
create_diff_par 20150919.IW2.slc.par - 20150919_20150907.IW2.slc.diff_par 1 0
create_diff_par 20150919.IW3.slc.par - 20150919_20150907.IW3.slc.diff_par 1 0
```

```
sub_phase 20150907.IW1.rslc 20150919.IW1.slc.deramp.dph 20150919_20150907.IW1.slc.diff_par
20150907.IW1.rslc.deramp 1 0
sub_phase 20150907.IW2.rslc 20150919.IW2.slc.deramp.dph 20150919_20150907.IW2.slc.diff_par
20150907.IW2.rslc.deramp 1 0
sub_phase 20150907.IW3.rslc 20150919.IW3.slc.deramp.dph 20150919_20150907.IW3.slc.diff_par
20150907.IW3.rslc.deramp 1 0
```

```
echo "20150907.IW1.rslc.deramp 20150919.IW1.slc.deramp.par 20150919.IW1.slc.deramp.TOPS_par" >
20150907.RSLC_tab.deramp
echo "20150907.IW2.rslc.deramp 20150919.IW2.slc.deramp.par 20150919.IW2.slc.deramp.TOPS_par" >>
20150907.RSLC_tab.deramp
echo "20150907.IW3.rslc.deramp 20150919.IW3.slc.deramp.par 20150919.IW3.slc.deramp.TOPS_par" >>
20150907.RSLC_tab.deramp
```

```
SLC_mosaic_S1_TOPS 20150907.RSLC_tab.deramp 20150907.rslc.deramp 20150907.rslc.deramp.par 10 2 1
20150919.SLC_tab.deramp
```

#output SLC range samples: 68573 azimuth lines: 13348
#output SLC mosaic image: 20150907.rslc.deramp
#output SLC parameter file: 20150907.rslc.deramp.par

```
multi_look 20150919.slc.deramp 20150919.slc.deramp.par 20150919.slc.deramp.mli
20150919.slc.deramp.mli.par 10 2
#width: 6857 lines: 1421
```

```
multi_look 20150907.rslc.deramp 20150907.rslc.deramp.par 20150907.rslc.deramp.mli
20150907.rslc.deramp.mli.par 10 2
#width: 6857 lines: 1421
```

#Refresh master and slave mli and slc parameter files, after deramping

```
S1_OPOD_vec 20150919.slc.deramp.mli.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20151009T122411_V20150918T225943_20150920T005943.EOF
```

```
S1_OPOD_vec 20150919.slc.deramp.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20151009T122411_V20150918T225943_20150920T005943.EOF
```

```
S1_OPOD_vec 20150907.rslc.deramp.mli.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20151009T122411_V20150918T225943_20150920T005943.EOF
```

```
S1_OPOD_vec 20150907.rslc.deramp.par
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20151009T122411_V20150918T225943_20150920T005943.EOF
```

```

#-----
# DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY 2-PASS -----
#Input files:
#20150919.slc.deramp
#20150919.slc.deramp.par
#20150919.slc.deramp.mli
#20150919.slc.deramp.mli.par

#20150907.rslc.deramp
#20150907.rslc.deramp.par
#20150907.rslc.deramp.mli
#20150907.rslc.deramp.mli.par
#width: 6857 lines: 1421

#srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg
#DEM segment width: 13034 lines: 4654
#20150919_20150907.off.total.corrected

#Interferogram calculation and range common-band filtering

dis2SLC 20150919.slc.deramp 20150907.rslc.deramp 6857 6857

dis2pwr 20150919.slc.deramp.mli 20150907.rslc.deramp.mli 6857 6857

raspwr 20150919.slc.deramp.mli 6857 -- 4 4 --- 20150919.slc.deramp.mli.ras
lines: 1640 width: 1714
disras 20150919.slc.deramp.mli.ras
raspwr 20150907.rslc.deramp.mli 6857 -- 4 4 --- 20150907.rslc.deramp.mli.ras
lines: 1640 width: 1714
disras 20150907.rslc.deramp.mli.ras

# Simulation of unwrapped topographic phase and SLC_diff_intf
phase_sim_orb 20150919.slc.deramp.par 20150907.slc.par 20150919_20150907.off.total.corrected
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg 20150919_20150907.sim_unw_b 20150919.slc.deramp.par --12
1 1

SLC_diff_intf 20150919.slc.deramp 20150907.rslc.deramp 20150919.slc.deramp.par
20150907.rslc.deramp.par 20150919_20150907.off.total.corrected 20150919_20150907.sim_unw_b
20150919_20150907.diff_int_b 10 2 0 0 0.2 1 1

#IMAGE/OFFSET PARAMETERS:

#line offset relative to start of SLC-1:      0
#number of lines to process SLC-1:          2842
#SLC-1 range samples:                       68576
#SLC-1 azimuth samples (along-track):       2843
#SLC-1 line header size (bytes)              0
#SLC-1 range pixel size (m):                 2.32956
#SLC-1 azimuth pixel size (m):               13.95240

#SLC-2 range samples:                       68576
#SLC-2 azimuth samples (along-track):       2843
#SLC-2 line header size (bytes)              0

#range_offset_polynomial:  -4.1610e-02  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00
#azimuth_offset_polynomial: 1.0000e-03  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00
#number of lines in the simulated interferogram: 1421
#resampled SLC-2R width (samples):          68576
#interferogram range looks:                  10

```

```

#interferogram azimuth looks:      2
#interferogram range pixel spacing (m): 23.29562
#interferogram azimuth pixel spacing (m): 27.90480
#interferogram width (samples):    6857
#number of azimuth common band filters: 138
#number of lines/input SLC data block: 1024
#filtered lines/input SLC data block: 959
#output lines/input SLC data block: 479

base_orbit 20150919.slc.deramp.par 20150907.slc.par 20150919_20150907.base_orb

#baseline parallel component (m):    8.7325
#baseline perpendicular component (m): 8.7459
#estimated range offset slope (pixels/pixel): -1.20394e-05

dismph_pwr 20150919_20150907.diff_int_b_sm3 20150919.slc.deramp.mli 6857

# Adaptive interferogram filtering with adf
# Running adf several times with a smaller coefficient and decreasing window size (e.g. 128, 64, 32)
# will lead to a better filtering but is time consuming

adf 20150919_20150907.diff_int_b 20150919_20150907.diff_int_b_sm 20150919_20150907.smcc_b
6857 .8 64 5 8 0 - .25

adf 20150919_20150907.diff_int_b_sm 20150919_20150907.diff_int_b_sm2 20150919_20150907.smcc_b
6857 .8 32 5 8 0 - .25

# Phase unwrapping
# using minimum cost flow method (with masking)
discc 20150919_20150907.smcc_b 20150919.slc.deramp.mli 6857
rascc_mask 20150919_20150907.smcc_b 20150919.slc.deramp.mli 6857 1 1 0 1 1 0.15 0.0 0.1 0.9 1. .35 1
20150919_20150907.mask.ras

disras 20150919_20150907.mask.ras

mcf 20150919_20150907.diff_int_b_sm2 20150919_20150907.smcc_b 20150919_20150907.mask.ras
20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw 6857 1 2100 245 2200 900 1 1 - 3023 480 0

***** correcting phase values from initial conditions *****
number of input/output segments: 2
phase at reference point: range: 3024 azimuth: 481 -1.670 radians
phase initialization flag: 0, global phase offset: 0.000 radians
segment: 1 number of lines: 900 phase offset (rad): 0.000
segment: 2 number of lines: 521 phase offset (rad): 0.000

disrmg 20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw 20150919.slc.deramp.mli 6857 1 1 0 1 1 .5 1. .35 0.0

geocode_back 20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw 6857
srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.fine.lt 20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw.utm 13034 4654
2 0

# Conversion of differential interferometric phase to vertical displacement
dispmap 20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg
20150919.slc.deramp.mli.par 20150919_20150907.off.total.corrected 20150919_20150907.displ_b2 1

#unwrapped phase file 20150919_20150907.diff_int_b_sm.unw width: 6857, lines 1421
#height file: srtm_mosaic_chalkidiki_0919.rdc.dem_seg
#output displacement map file: 20150919_20150907.displ_b2
#displacement mode 1: vertical displacement [m] (+: increasing height)
#slant range (near & far edge): 800364.3960 m 960079.1667 m

```

#inc. angle (near & far edge): 30.5268 deg. 45.9646 deg.
#radar center frequency (Hz): 5.40500e+09 wavelength (m): 5.5465760e-02

dishgt 20150919_20150907.displ_b2 20150919.slc.deramp.mli 6857 1 1 0 0.1

Geocoding of the displacement map

geocode_back 20150919_20150907.displ_b2 6857 srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm_to_rdc.fine.lt
20150919_20150907.displ_b2.utm 14644 11799 2 0

dishgt 20150919_20150907.displ_b2.utm 20150919.slc.mli.utm 14644 1 1 0 0.02

Export to geotiff

data2geotiff srtm_mosaic_chalkidiki_0919.utm.dem_seg_par 20150919_20150907.displ_b2.utm 2
20150919_20150907.displ_b2.utm.tif 0.0