



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ & ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

ΠΜΣ: ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δεδομένα Ραντάρ: ανάλυση επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων
μέσω συμβολομετρίας στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας**

Φοιτητής: Λέτσιος Βασίλης

Επιβλέπων: Κων/νος Περάκης

ΒΟΛΟΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017

Δήλωση

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του ΤΜΧΠΠΑ και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του ΠΘ ή και του ΤΜΧΠΠΑ.

Ημερομηνία: 07/02/2017

Ονοματεπώνυμο: ΛΕΤΣΙΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

Υπογραφή:

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μια δυναμική μέθοδο της τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό των εδαφικών παραμορφώσεων μέσω της επεξεργασία δεδομένων ραντάρ. Εκμεταλλεύεται την διαφορά φάσης της ανακλώμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον στόχο στο έδαφος και μπορεί να την ερμηνεύσει με μεγάλη ακρίβεια σε τιμές μετατοπίσεων στην κλίμακα του εκατοστού. Ο θεσσαλικός κάμπος λόγω της χρόνιας υπεράντλησης του υπόγειου υδροφορέα μέσα από την αγροτική δραστηριότητα, έχει παρουσιάσει έντονα προβλήματα εδαφικών υποχωρήσεων. Το πρόβλημα επηρεάζει και οικισμούς της ευρύτερης περιοχής, όπου έχουν παρουσιασθεί στο παρελθόν καθιζήσεις και ρηγματώσεις σε κτίσματα και άλλες υποδομές. Η εργασία αποσκοπεί στην εισαγωγή του θεωρητικού υποβάθρου λειτουργίας ενός συστήματος ραντάρ. Παρουσιάζει τις εφαρμογές που προσφέρονται και αναλύει τον τρόπο επεξεργασίας της διαφορικής συμβολομετρίας. Τέλος, παρουσιάζει κάποια αποτελέσματα της περιοχής μελέτης που αφορά ένα μικρό κομμάτι του θεσσαλικού κάμπου, εμπεριέχοντας την λίμνη Κάρλα και κάποιους οικισμούς που έχουν παρουσιάσει έντονα προβλήματα καθιζήσεων στο παρελθόν.

ABSTRACT

The differential interferometry (DinSAR) is a powerful remote sensing technique for the detection of ground deformation by processing radar data. Exploits the phase difference of the reflected electromagnetic radiation from the target of ground and can interpret deformation values with accuracy in the range of centimeters. Region of Thessaly plain, due to the chronic over-pumping of the aquifer through the agricultural activity, has presented serious problems of ground deformations. This affects settlements of the wider region, which have presented in the past, subsidence and cracks in buildings and other infrastructure. The thesis aims to introduce the theoretical background of operation of a radar system. Displays the applications offered and analyze the handling of differential interferometry. Finally, it presents some results on a small part of Thessaly plain, including Carla lake and some settlements that have presented intense subsidence problems in the past.

Λέξεις-Κλειδιά: Τηλεπισκόπηση, Ραντάρ, Συμβολομετρία, έδαφος, παραμορφώσεις, SAR

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την στήριξη και την προσφορά τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τον Ιωάννη Φαρασλή (ΕΔΙΠ), του ΤΜΧΠΠΑ για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την στήριξη που μου προσέφερε κατά την συγγραφή της έρευνάς μου. Τον καθηγητή του ΤΜΧΠΠΑ, Κων/νο Περάκη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.2	ΣΚΟΠΟΣ	7
1.3	ΔΟΜΗ.....	8
2.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (SAR).....	8
2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	8
2.2	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ	9
2.3	ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	12
2.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ	12
2.5	ΣΤΙΓΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ	14
2.6	ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΑΝΤΑΡ	15
3.	SENTINEL-1 ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ.....	16
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΔΟΡΥΦΟΡΟ ΡΑΝΤΑΡ SENTINEL-1	16
3.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ (SAR)	17
3.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (INTERFEROMETRY)	19
3.4	ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (DinSAR)	21
3.5	ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ PSI	23
4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΗΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ.....	25
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ	27
4.3	ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL-1 ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	30
4.4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	34
4.4.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΖΕΥΓΟΥΣ (COREGISTRATION)	36
4.4.2	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ (INTERFEROGRAM)	38
4.4.3	ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	41
4.4.4	ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ	43
4.4.5	«ΞΕΤΥΛΙΓΜΑ» ΦΑΣΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ	45
4.4.6	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	48
5.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
5.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
5.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	57
5.2.1	ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	57

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Πίνακας Συντομογραφιών

ESA: European Space Agency

SAR: Synthetic Aperture Radar

InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar

DinSAR: Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

PSI: Persistent or Permanent Scatterer Interferometry

SBAS: Small Baseline Subset

PS: Persistent or Permanent Scatterer

DS: Distributed Scatterer

SLC: Single Look Complex

GRD: Ground Range Detection

NASA: National Aeronautics and Space Administration

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SNR: Sound to Noise Ratio

B_p: Perpendicular Baseline

H: Horizontal

V: Vertical

HH: Horizontal to Horizontal

VV: Vertical to Vertical

HV: Horizontal to Vertical

VH: Vertical to Horizontal

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δεδομένα ραντάρ αποτελούν ένα ανεξερεύνητο κομμάτι στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης, στην Ελλάδα. Αυτό συμβαίνει κατά βάση λόγω του πολύ υψηλού χρηματικού κόστους για την απόκτηση τέτοιων δεδομένων. Η βασική διαφορά των δορυφορικών συστημάτων ραντάρ, από τα βασικά γνωστά παθητικά συστήματα (πχ Landsat), είναι ότι το ραντάρ, αποτελεί ένα ενεργό σύστημα, το οποίο λειτουργεί και καταγράφει, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών (χιόνι, βροχή, πυκνή νεφοκάλυψη) και ανεξαρτήτως μέρας ή νύχτας. Βέβαια τα τελευταία χρόνια η πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), για ανοιχτά δεδομένα μέσω του δορυφόρου ραντάρ Sentinel 1, δίνει την ευκαιρία για εξερεύνηση των δεδομένων ραντάρ, αλλά και για εφαρμογές όπου στο παρελθόν φάνταζαν αρκετά δύσκολες. Μία από τις βασικές εφαρμογές των δεδομένων ραντάρ αποτελεί η εφαρμογή της συμβολομετρίας. Μία εικόνα ραντάρ περιέχει την πληροφορία της έντασης και την πληροφορία της φάσης του επιστρεφόμενου σήματος στον αισθητήρα του δορυφόρου, από την επιφάνεια της γης. Έτσι λοιπόν, με την τεχνική της συμβολομετρίας, συνδυάζοντας την φάση δύο εικόνων ραντάρ, έχουμε την δυνατότητα να εξάγουμε ένα υψηλής ποιότητας ψηφιακού μοντέλου εδάφους (InSAR) ή να εντοπίσουμε επιφανειακές εφαιδικές παραμορφώσεις (DinSAR). Η συμβολομετρία λοιπόν, έρχεται να καλύψει το κενό στην ζήτηση υψηλής ανάλυσης μοντέλων εδάφους, αλλά και στον εντοπισμό εδαφικών παραμορφώσεων όπου μέχρι πρότινος ήταν εφικτό μόνο με μελέτη στο πεδίο.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να γίνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στα συστήματα ραντάρ και ειδικότερα να αναλυθεί η εφαρμογή της συμβολομετρίας. Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, η συμβολομετρία ασχολείται με την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους και την μελέτη των εδαφικών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, πέραν της βασικής περιγραφής των συστημάτων ραντάρ και του θεωρητικού υποβάθρου, θα γίνει μία παρουσίαση ολοκληρωμένης εφαρμογής επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων για την ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας, με σκοπό την κατανόηση της συλλογής δεδομένων, της διαδικασίας επεξεργασίας και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

1.3 ΔΟΜΗ

Η δομή της εργασίας ξεκινάει με το εισαγωγικό κομμάτι, εν συνεχεία θα αναφερθεί το βασικό θεωρητικό πλαίσιο, δηλαδή θα γίνει μία πλήρης περιγραφή ενός συστήματος ραντάρ με όλες τις παραμέτρους που το αφορούν. Επίσης θα γίνει μία αναφορά στην αποστολή Sentinel της ESA, στις γενικότερες εφαρμογές που πραγματεύονται τα συστήματα ραντάρ και θα πραγματοποιηθεί μία εμβάθυνση στην εφαρμογή της συμβολομετρίας. Η μεγαλύτερη έμφαση θα δοθεί στην περιοχή μελέτης και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των εδαφικών παραμορφώσεων. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, όπως και το λογισμικό στο οποίο έγινε η επεξεργασία είναι δωρεάν και ανοιχτά προς όλους και αποτελούν μία προσφορά, όπως προαναφέραμε του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA). Τέλος θα αναφερθούν τα γενικά και ειδικά συμπεράσματα που αφορούν γενικά τα συστήματα ραντάρ και ειδικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής στην περιοχή μελέτης.

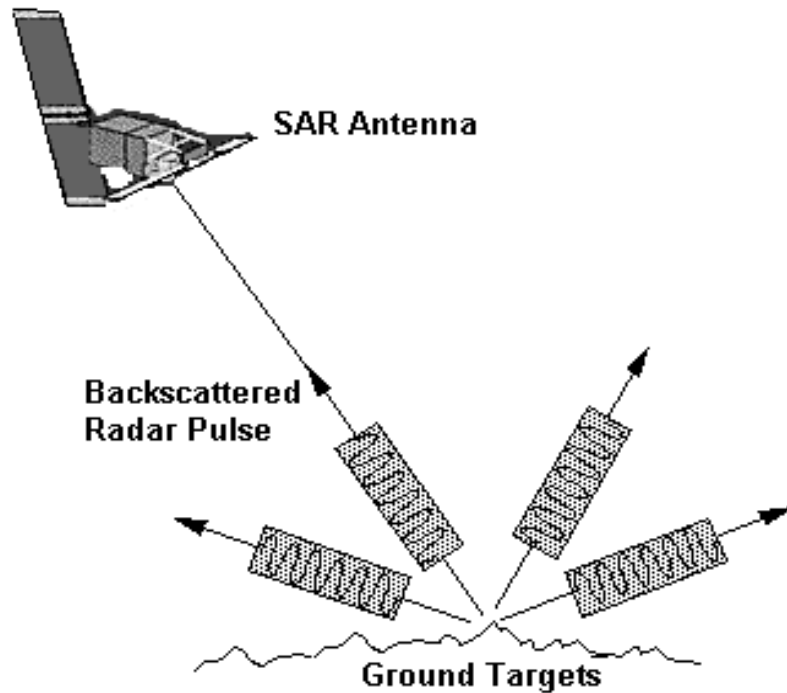
2. ΣΥΣΤΗΜΑ PANTAP ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (SAR)

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το SAR (synthetic aperture radar), όπως συναντάται σε όλη την διεθνή βιβλιογραφία, είναι ένα οπτικό σύστημα βασιζόμενο στην ακτινοβολία μικροκυμάτων. Λόγω της ελάχιστης ατμοσφαιρικής απορρόφησης και σκέδασης που υπάρχουν στα περισσότερα μήκη κύματος, αλλά και λόγω ότι ένα σύστημα SAR, αποτελεί ένα ενεργό σύστημα, δηλαδή λειτουργεί και καταγράφει ανεξάρτητα από την ηλιακή ενέργεια, έχει την δυνατότητα λειτουργίας σε όλες τις καιρικές συνθήκες και ανεξαρτήτως αν είναι μέρα ή νύχτα. Ποιο συγκεκριμένα ένα σύστημα SAR, λειτουργεί στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων και ανιχνεύει την ανακλώμενη ή ακτινοβολούμενη ενέργεια από το έδαφος. Το ερώτημα που γεννάται είναι: γιατί τα δεδομένα ραντάρ είναι τόσο σημαντικά; Η απάντηση στο ερώτημα είναι ότι:

- Ένα σύστημα ραντάρ έχει την δυνατότητα καταγραφής μέρα και νύχτα.
- Καταγράφει ανεξαρτήτως καιρικών φαινομένων (διείσδυση χιόνι, βροχή, νεφοκάλυψη, πάγο, βλάστηση, άμμο.

- Τα δεδομένα ραντάρ βασίζονται στην συνοχή (coherent), μεταξύ τους, καθώς σε ένα σύστημα SAR, η αλλαγή του χρόνου επιστροφής της ακτινοβολίας από τον στόχο στον δέκτη μπορεί να μετρηθεί με την ακρίβεια ενός κλάσματος του μήκους κύματος.



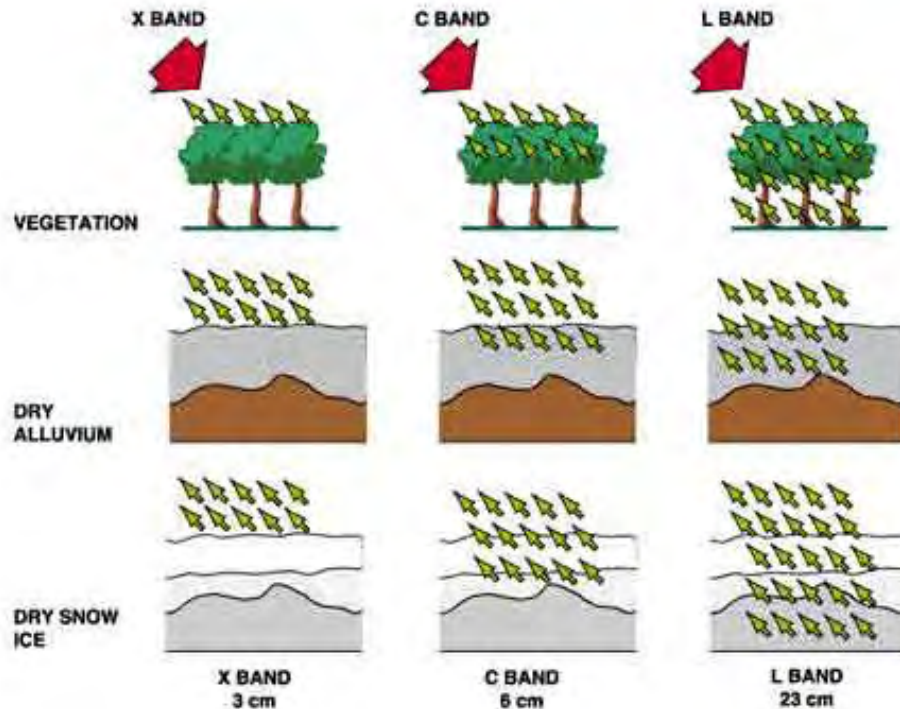
Εικόνα 2.1 Απεικόνιση λειτουργίας ενός συστήματος SAR(google)

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας και καταγραφής ενός συστήματος SAR. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με ένα πομποδέκτη ραντάρ, ο οποίος εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας μικρής διάρκειας και καταγράφει τις επιστροφές τους από τους στόχους της επιφάνειας (Μερτίκας, 2006). Η ονομασία ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας, δόθηκε λόγω της ικανότητας του συστήματος, να συνθέτει μια πολύ μεγάλη εικονική κεραία, χρησιμοποιώντας την κίνηση του δορυφόρου σε συνδυασμό με το φαινόμενο Doppler.

2.2 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ

Τα ραδιοκύματα αποτελούν το κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που έχουν μήκη κύματος μετρούμενα στην κλίμακα των εκατοστών. Η ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία, ανάλογα το μήκος κύματος, έχει την ικανότητα διείσδυσης στην βλάστηση και στο έδαφος. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος (μικρότερη συχνότητα), τόσο ισχυρότερη είναι η διείσδυση της ακτινοβολίας στην βλάστηση και στο έδαφος. Έτσι λοιπόν, η διείσδυση αποτελεί τον παράγοντα κατά τον

οποίο επιλέγετε το μήκος κύματος του εκάστοτε δορυφόρου ραντάρ, για την αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση της αποστολής για την οποία προορίζεται (Sarmar, 2009).



Εικόνα 2.2 Διείσδυση ακτινοβολίας βάση του μήκος κύματος (google)

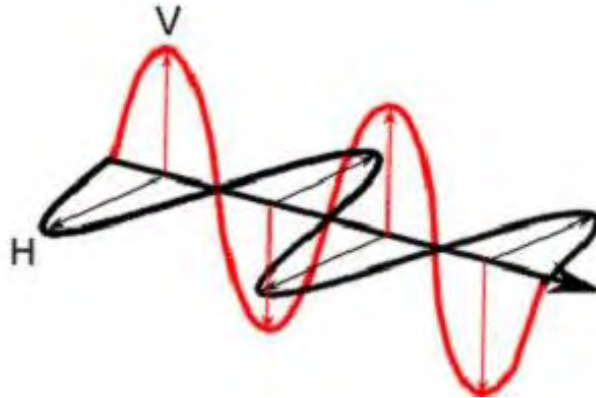
Για παράδειγμα ο δορυφόρος Sentinel 1 έχει συχνότητα εκπομπής 5.405 GHz (C-band). Κάθε συχνότητα (ν) της ακτινοβολίας σε GHz, μπορεί να μετατραπεί σε μήκος κύματος λ (cm) από την σχέση (Μερτίκας, 2006):

$$\nu \text{ (GHz)} = 30 / \lambda \text{ (cm)}$$

Τα βασικότερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι ραντάρ είναι:

P-band	~ 65 cm	AIRSAR
L-band	~ 23 cm	ALOS PALSAR, JERS-1
S-band	~ 10 cm	Almaz-1
C-band	~ 5 cm	Sentinel 1, ERS 1-2, RADARSAT 1-2, ENVISAT ASAR
X-band	~ 3 cm	TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
K-band	~ 1.2 cm	Εφαρμογές του στρατού

Βέβαια, πέραν της σημαντικότητας του μήκος κύματος, όταν αναφερόμαστε σε ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία, η πόλωση της ακτινοβολίας είναι επίσης πολύ σημαντική. Με τον όρο πόλωση αναφερόμαστε στον προσανατολισμό της ακτινοβολίας στο ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η πόλωση ή ο προσανατολισμός της ακτινοβολίας μπορεί να είναι κάθετος ή οριζόντιος.



Εικόνα 2.3 Πόλωση ακτινοβολίας στο ηλεκτρικό πεδίο(*google*)

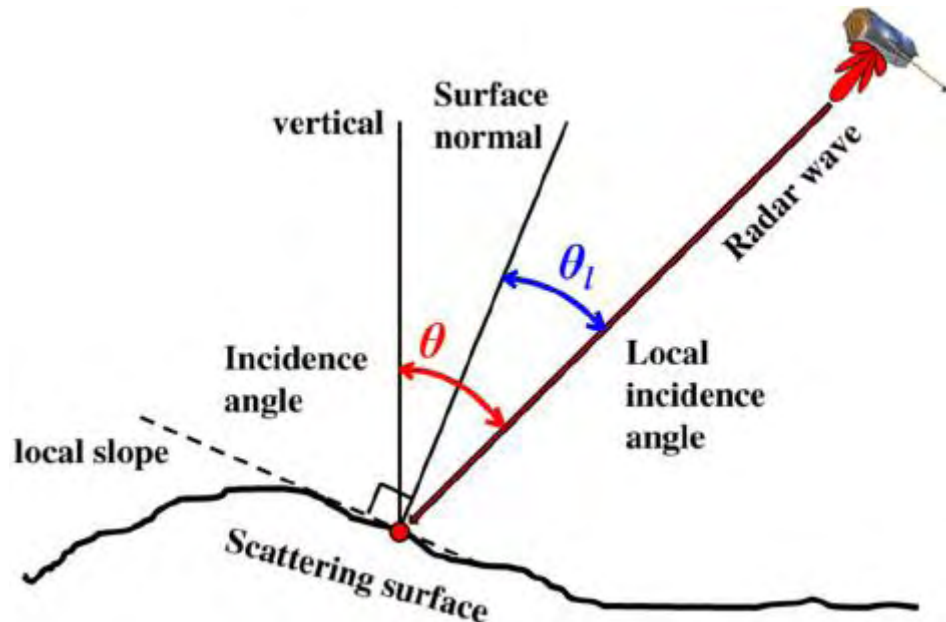
Τα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να μεταδίδουν την ακτινοβολία είτε σε οριζόντια πόλωση (H), είτε σε κάθετη πόλωση (V). Αντίστοιχα η λήψη της ακτινοβολουμένης ή ανακλώμενης ενέργειας από την επιφάνεια της γης προς τον δορυφόρο, μπορεί να γίνει είτε κάθετα (H), είτε οριζόντια (V). Επίσης κάποια ραντάρ μπορούν να λάβουν και τις δύο πολώσεις. Έτσι λοιπόν μπορεί να δημιουργηθούν 4 συνδυασμοί πόλωσης της ακτινοβολίας, αυτοί είναι (*Sarmap, 2009*):

- ❖ HH - Για οριζόντια μετάδοση και λήψη της ακτινοβολίας.
- ❖ VV - Για κάθετη μετάδοση και λήψη της ακτινοβολίας.
- ❖ HV - Για οριζόντια μετάδοση και κάθετη λήψη της ακτινοβολίας.
- ❖ VH - Για κάθετη μετάδοση και οριζόντια λήψη της ακτινοβολίας.

Η πόλωση της εκπεμπόμενης και ληφθείσας ακτινοβολίας, αλλά και η δυνατότητα του εκάστοτε ραντάρ, για το πλήθος των πολώσεων που μπορεί να λάβει, παίζουν σημαντικό ρόλο και επηρεάζουν τον τρόπο κατά τον οποίο ένα σύστημα ραντάρ καταγράφει την επιφάνεια. Ως εκ τούτου οι εικόνες ραντάρ που χρησιμοποιούν διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης, μπορούν να παρέχουν διαφορετικές και συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με τους στόχους της επιφάνειας.

2.3 ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η γωνία πρόσπτωσης (θ), ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην δέσμη της ακτινοβολίας που εκπέμπει το ραντάρ και στην κάθετη γραμμή προς την επιφάνεια.



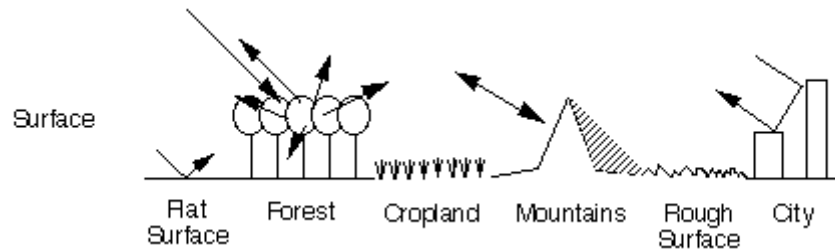
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση δημιουργίας γωνίας πρόσπτωσης (google)

Γενικά η αλληλεπίδραση των μικροκυμάτων με την επιφάνεια πρόσπτωσης, είναι αρκετά περίπλοκη και διάφορες ανακλάσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορούν να προκληθούν από διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης (Sarmar, 2009). Θέτοντας, ένα γενικό κανόνα για την περιγραφή της γωνίας πρόσπτωσης, θα μπορούσαμε να πούμε ότι όσο μικρότερη είναι η γωνία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Βέβαια η ανάκλαση δεν βασίζεται μόνο στην γωνία πρόσπτωσης, αλλά στους μηχανισμούς ανάκλασης και στις διηλεκτρικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τους εκάστοτε στόχους στην επιφάνεια της γης.

2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Οι εικόνες ραντάρ, στην ουσία δημιουργούνται και αντιπροσωπεύουν την ανακλώμενη ακτινοβολία από τους στόχους στην επιφάνεια της γης. Γενικά, στόχοι ή περιοχές που ανακλούν περισσότερη ακτινοβολία, εμφανίζονται φωτεινότερες από στόχους οι περιοχές, που ανακλούν λιγότερη ακτινοβολία. Η ανάκλαση της ακτινοβολίας μίας περιοχής ή ενός στόχου, μπορεί να επηρεαστεί από την τοπογραφία (βραχώδεις ή τραχύτερες επιφάνειες ανακλούν περισσότερη ακτινοβολία), από την διηλεκτρική

ιδιότητα του στόχου, από την περιεκτικότητα σε υγρασία και όπως έχουμε αναφέρει στις προηγούμενες ενότητες από το μήκος κύματος, την πόλωση και την γωνία πρόσπτωσης (Ferretti et.al, 2007).



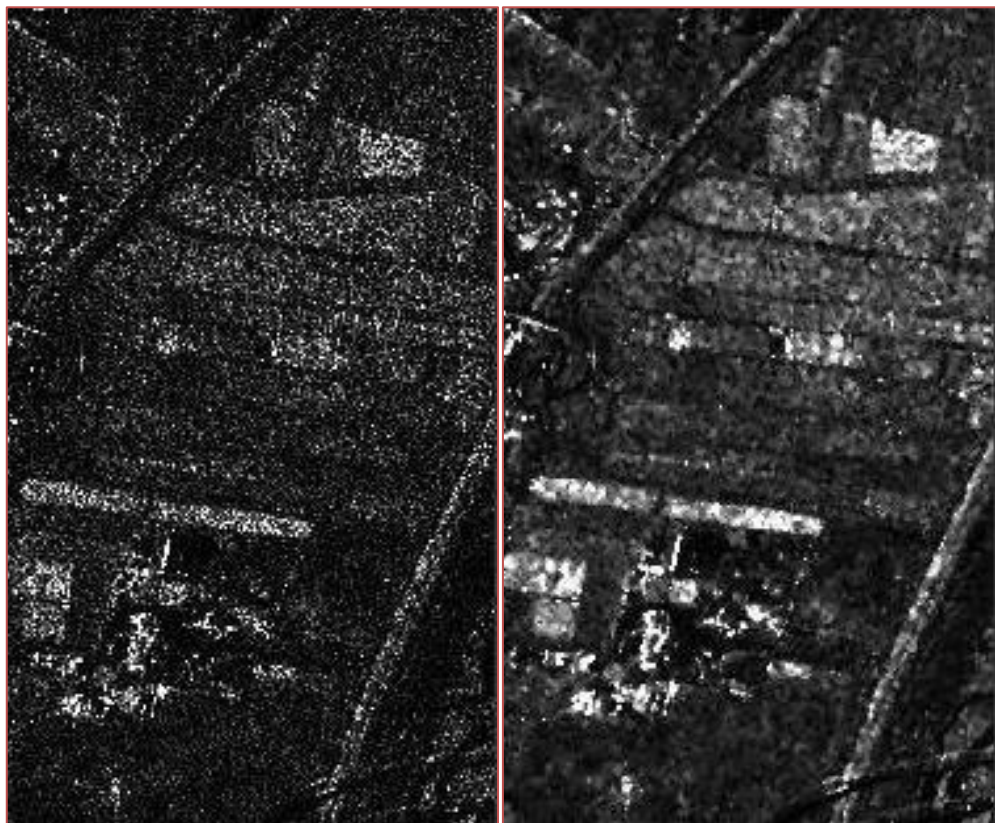
Εικόνα 2.5 Μηχανισμοί ανάκλασης επιφανειών (Sarpap, 2009)

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται οι βασικές επιφάνειες που συναντά και καταγράφει ένας δορυφόρος ραντάρ. Παρατηρούμε ότι ο μηχανισμός ανάκλασης διαφέρει από επιφάνεια σε επιφάνεια. Για παράδειγμα, καθώς το ραντάρ αποτυπώνει την κορυφή ενός βουνού δημιουργείτε μία σκίαση αναγλύφου, λόγω της τοπογραφίας, σε συνδυασμό με την τροχιά του δορυφόρου (αύξουσα, φθίνουσα). Επίσης στην περίπτωση καταγραφής αστικού χώρου, δηλαδή κτηρίων δημιουργείτε το φαινόμενο «**double bounce**». Αυτό μπορεί να συμβεί καθώς οι δρόμοι ή τα κτήρια σε μία πόλη μπορεί να παρατάσσονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα κτίριο να μην επιστρέψει αμέσως στον δέκτη του δορυφόρου, αλλά να αναπηδήσει σε ένα άλλο ψηλότερο ή χαμηλότερο κτήριο και στην συνέχεια να επιστρέψει στον δέκτη. Πέραν, των μηχανισμών ανάκλασης, σημαντικό ρόλο παίζει και η διηλεκτρική σταθερά. Για παράδειγμα τα κτήρια ή τα μεταλλικά αντικείμενα (πχ πλοία), λόγω της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών, ανακλούν περισσότερη ενέργεια και εμφανίζονται πιο φωτεινά σε μία εικόνα ραντάρ. Άλλο ένα παράδειγμα στο φυσικό περιβάλλον, αποτελεί η υγρασία του εδάφους. Η υγρασία σε μία περιοχή μπορεί να αυξήσει την ανάκλαση ακτινοβολίας, σε σύγκριση, όταν η περιοχή θα βρίσκεται υπό ξηρές συνθήκες. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η υγρασία του εδάφους μπορεί να αυξήσει την ανάκλαση της ακτινοβολίας, αυτό δεν σημαίνει όμως ότι τα υδάτινα σώματα (πχ λίμνες), ανακλούν μεγάλα ποσά ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει, διότι ένα υδάτινο σώμα αποτελεί, βάση τοπογραφίας, μία επίπεδη επιφάνεια, το οποίο συνεπάγεται με μικρή ανάκλαση ακτινοβολίας στον δέκτη του δορυφόρου. Ως αποτέλεσμα, το υδάτινο σώμα θα εμφανίζεται σκούρο σε μία εικόνα ραντάρ, σε σχέση με άλλες επιφάνειες, οι οποίες ανακλούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, για τους λόγους που έχουμε προαναφέρει (Sarpap, 2009). Γίνεται, λοιπόν αντιληπτή, η πολυπλοκότητα των μηχανισμών ανάκλασης της

ακτινοβολίας και των παραγόντων που επηρεάζουν μία εικόνα ραντάρ. Είναι αρκετά σημαντικό να μπορούμε να ερμηνεύσουμε τι αποτυπώνει μία εικόνα ραντάρ.

2.5 ΣΤΙΓΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

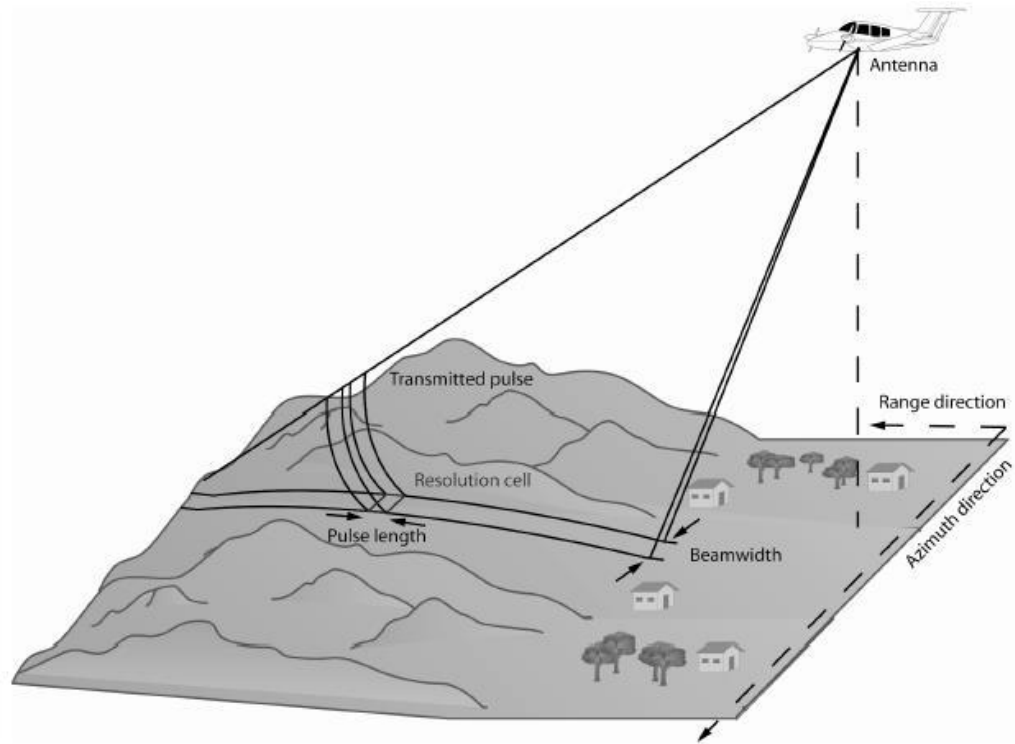
Όπως κάθε εικόνα, έτσι και οι εικόνες ραντάρ αποτελούνται από εικονοστοιχεία, που περιέχουν την πληροφορία, τα γνωστά «**pixels**». Η παρουσία αρκετών αντικειμένων που ανακλούν ακτινοβολία σε κάθε κελί μίας εικόνας ραντάρ, δημιουργεί στίγματα, τα λεγόμενα «**speckles**». Αποτελεί το πιο κοινό φαινόμενο στις εικόνες ραντάρ και το οπτικό αποτέλεσμα ονομάζεται στην διεθνή βιβλιογραφία «**salt and pepper**», λόγω των ασπρόμαυρων στιγμάτων που απαρτίζουν την εικόνα. Τα στίγματα αλλοιώνουν την ποιότητα της εικόνας ραντάρ και μπορεί να επηρεάσουν την χρησιμότητά τους (Ferretti *et.al*, 2007). Τα στίγματα κατατάσσονται στους θορύβους μίας εικόνας ραντάρ και οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να μειωθούν, είναι το φιλτράρισμα της εικόνας κατά την επεξεργασία (speckle filter) και η μέθοδος «**multilooking**», κατά την οποία όμως μειώνεται η χωρική ανάλυση της εικόνας. Παρακάτω θα παρατεθεί ένα παράδειγμα εικόνας ραντάρ, πριν και μετά το φιλτράρισμα των στιγμάτων.



Εικόνα 2.6 Αριστερά εικόνα με στίγματα, Δεξιά εικόνα μετά από φιλτράρισμα
(ιδία επεξεργασία)

2.6 ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΑΝΤΑΡ

Η γεωμετρική απεικόνιση και χωρική ανάλυση ενός συστήματος ραντάρ, διαφέρει κατά πολύ από τα γνωστά οπτικά συστήματα. Τα ραντάρ αποτυπώνει την επιφάνεια σε λωρίδες (swath), και η ανάλυση της εικόνας ραντάρ, ερμηνεύεται ως ανάλυση στο εύρος (range) και ανάλυση στο αζιμούθιο (azimuth).



Εικόνα 2.7 Απεικόνιση αποτύπωσης και χωρικής ανάλυσης ενός συστήματος ραντάρ (google)

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει με απόλυτη ακρίβεια τον μηχανισμό καταγραφής και χωρικής ανάλυσης μίας εικόνας ραντάρ. Ο δέκτης καθώς ταξιδεύει με βάση την πορεία πτήσης, εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας, όπου στην νοητή λωρίδα καταγραφής της επιφάνειας που σχηματίζεται, η αποτύπωση γίνεται με βάση την διάσταση που είναι μόνιμα κάθετη στην πτήση (range direction) και την διάσταση που είναι μόνιμα παράλληλη στην πτήση (azimuth direction). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτελεί τυπικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος ραντάρ (Canada Center for Remote Sensing). Οι μαθηματικές σχέσεις οι οποίες υπολογίζουν την χωρική ανάλυση μίας εικόνας ραντάρ είναι (J.A. Johannessen, et.al, 2013):

- Ανάλυση στο εύρος: $X_r = c * \tau / 2 \sin \Phi$ (c = speed of light, τ = pulse length, Φ = incidence angle)

- Ανάλυση στο αζιμούθιο: $X_a = D / 2$ (D = antenna length)

3. SENTINEL-1 ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΔΟΡΥΦΟΡΟ PANTAP SENTINEL-1

Ο Sentinel-1, αποτελεί τον πρώτο δορυφόρο της αποστολής Sentinel του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA). Στην ουσία ο Sentinel-1, αποτελεί τον σχηματισμό δύο δορυφόρων (Sentinel-1A & Sentinel-1B), όπου μαζί μπορούν να καταγράφουν την ίδια περιοχή με επαναληψιμότητα 6 ημερών. Αποτελεί ένα δορυφόρο, ηλιοσύγχρονο, κυκλικής τροχιάς με υψόμετρο 693 km, από την επιφάνεια της γης. Ο Sentinel-1A, εκτοξεύθηκε στις 3/4/2014 και ο Sentinel-1B, στις 25/4/2016 (*Geudtner et.al, 2014*). Ο σκοπός της αποστολής είναι η παρακολούθηση των εδαφών και των ωκεανών, αλλά και η συνέχεια των αποστολών ERS-2 και Envisat. Συγκεκριμένα ο Sentinel 1, προσφέρει μία πληθώρα εφαρμογών στου ερευνητές οι οποίες είναι (*ESA, 2013*):

- ❖ Παρακολούθηση των πάγων
- ❖ Παρακολούθηση πλοίων
- ❖ Παρακολούθηση μολύνσεων από πετρελαιοκηλίδες
- ❖ Παρακολούθηση ανέμων και ωκεανών
- ❖ Βιώσιμη διαχείριση δασών
- ❖ Ταξινόμηση τυπολογίας δασών
- ❖ Εκτίμηση βιομάζας
- ❖ Χαρτογράφηση καταστροφών από πυρκαγιές
- ❖ Παρακολούθηση κατάστασης καλλιεργειών στον αγροτικό χώρο
- ❖ Ταξινόμηση τύπου καλλιεργειών
- ❖ Παρακολούθηση των εδαφών
- ❖ Παρακολούθηση πλημμύρων
- ❖ Ανάλυση σεισμών
- ❖ Παρακολούθηση αστικού χώρου
- ❖ Παρακολούθηση επιφανειακών εφαιδικών παραμορφώσεων
- ❖ Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Η πληθώρα εφαρμογών καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο ερευνητικό πεδίο, όπως είναι αυτό του φυσικού περιβάλλοντος, αλλά και του αστικού χώρου. Η συγκεκριμένη εργασία βέβαια πραγματεύεται την εφαρμογή της συμβολομετρίας, η οποία χωρίζεται σε δύο παρακλάδια αναλύσεων τα οποία είναι:

- Επιφανειακές εδαφικές παραμορφώσεις
- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

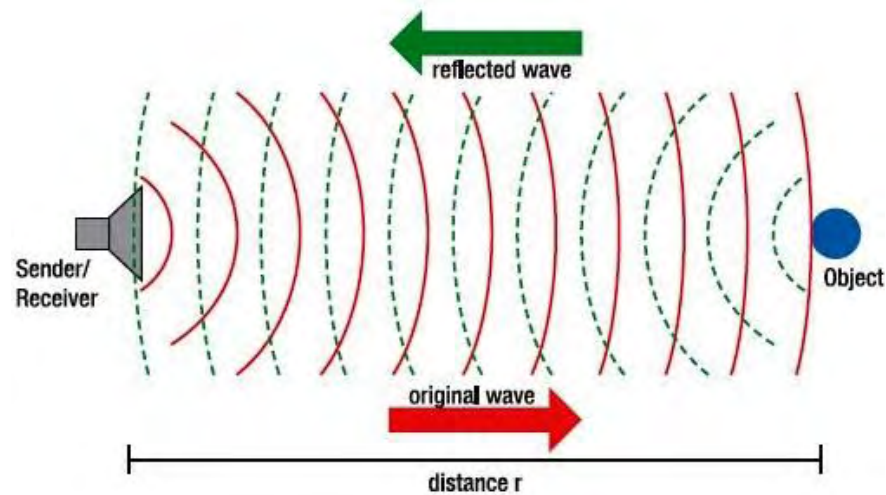
Αν και για την ορθότητα της περιγραφής της εφαρμογής θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ανάλυση των εδαφικών παραμορφώσεων αποτελεί μία επέκταση της διαδικασίας για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Συγκεκριμένα, στο παρακάτω κεφάλαιο θα γίνει μία παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου παραδείγματος επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-1, διατίθενται δωρεάν στους ερευνητές μέσα από την ιστοσελίδα <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, όπως επίσης διατίθεται και πρόγραμμα επεξεργασίας ανοιχτού κώδικα, με πολύ φιλικό περιβάλλον προς τον χρήστη, με την ονομασία SNAP.

3.2 ΠΕΡΙΓΑΦΗ ΕΙΚΟΝΑΣ PANTAP (SAR)

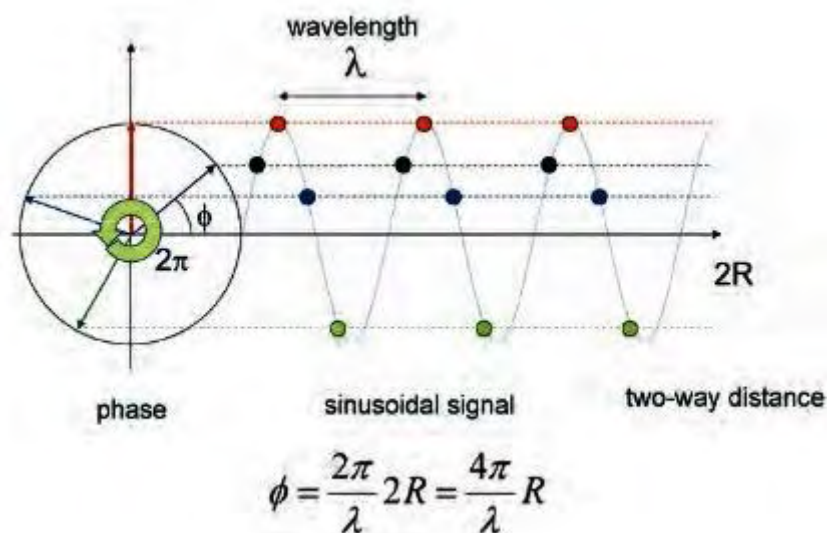
Μία ψηφιακή εικόνα ραντάρ, είναι ένα σύνολο εικονοστοιχείων, όπου το κάθε ένα απεικονίζει ένα μικρό κομμάτι της επιφάνειας καταγραφής και αποτελείται από ένα σύνολο μιγαδικών αριθμών, όπου διαθέτουν την πληροφορία του εύρους και της φάσης, της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τους στόχους της επιφάνειας (Ferretti *et.al*, 2007). Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό, να αποσαφηνιστεί ότι μία εικόνα ραντάρ ανάλογα την πληροφορία που διαθέτει, διαχωρίζεται κα στην ανάλογη κατηγορία. Πιο συγκεκριμένα όταν η εικόνα διαθέτει την πληροφορία του εύρους (amplitude), κατηγοριοποιείτε με την ονομασία «Ground Range Detection» ή με την συντομογραφία της όπως συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία «GRD». Η πληροφορία του εύρους και κατ'επέκταση μία εικόνα GRD, εξαρτάται από τα ποσά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλώνται πίσω στον δορυφόρο από τους στόχους, σε συνδυασμό με την τραχύτητα της επιφάνειας και όχι τόσο με την χημική σύνθεση των στόχων, δηλαδή της διηλεκτρικής σταθεράς. Οι εικόνες GRD μπορούν να χρησιμοποιηθούν στερεοσκοπικά για την παραγωγή εδαφικών αναγλύφων, μέσω της διαδικασίας «Radargrammetry». Αντιθέτως, όταν μία εικόνα ραντάρ, διαθέτει την πληροφορία της φάσης (phase), κατηγοριοποιείτε με την ονομασία «Single Look Complex» ή με την συντομογραφία της όπως συναντάται στην διεθνή

βιβλιογραφία «SLC». Η πληροφορία της φάσης σχετίζεται με την απόσταση αισθητήρα - στόχου.



Εικόνα 3.1 Συσχέτιση πληροφορίας φάσης με την απόσταση αισθητήρα – στόχου (google)

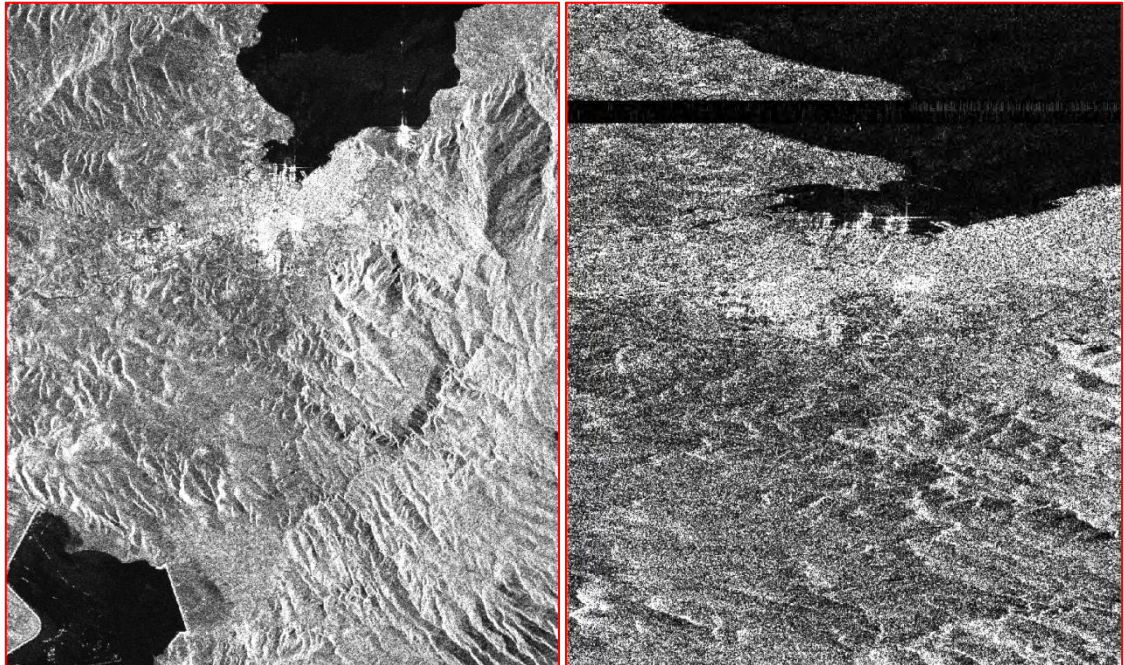
Πιο συγκεκριμένα η ακτινοβολία που μεταδίδεται από τον αισθητήρα ραντάρ, πρέπει να προσεγγίσει τους στόχους στην επιφάνεια του εδάφους και στην συνέχεια οι στόχοι να ανακλάσουν την ακτινοβολία πίσω στον αισθητήρα. Με βάση αυτή την διαδρομή μπορούμε να πούμε ότι η ακτινοβολία κάνει ένα ταξίδι διπλής κατεύθυνσης (two-way travel). Από την εκπομπή της ακτινοβολίας μέχρι και την επιστροφή της, υπάρχει μία καθυστέρηση, αυτή είναι η πληροφορία της φάσης.



Εικόνα 3.2 Μέτρηση πληροφορίας φάσης (Ferretti et.al, 2007)

Λόγω της σχεδόν ημιτονοειδούς φύσης του μεταδιδόμενου σήματος, η καθυστέρηση ανάμεσα στην μετάδοση και στην λήψη ισοδυναμεί με μία αλλαγή φάσης (ϕ). Η αλλαγή

φάσης, λοιπόν είναι ανάλογη προς την αμφίδρομη απόσταση ($2R$) της ακτινοβολίας διαιρούμενη με το μήκος κύματος (λ). Με βάση όλα τα παραπάνω, η μονάδα μέτρησης της φάσης σε μία εικόνα ραντάρ είναι το 2π (Ferretti *et.al*, 2007). Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα εικόνας GRD και εικόνας SLC.



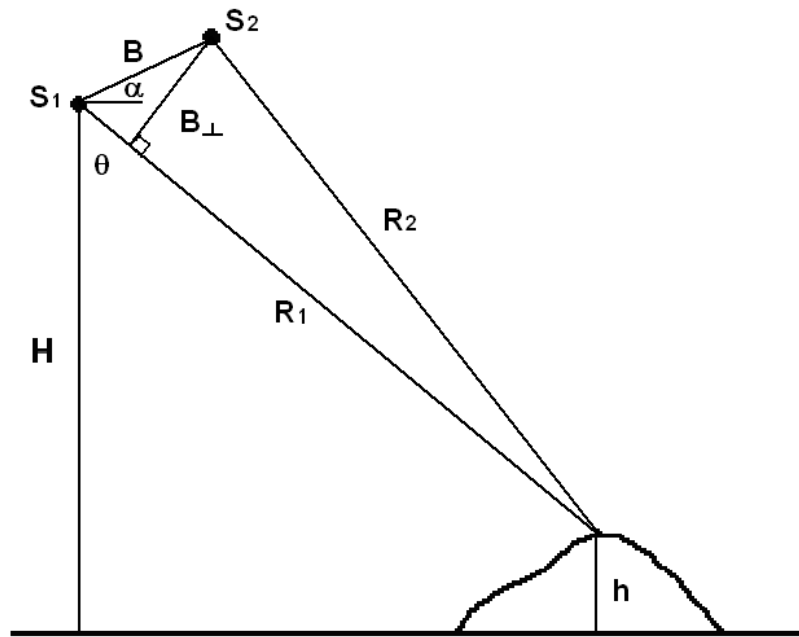
Εικόνα 3.3 Αριστερά εικόνα GRD, Δεξιά εικόνα SLC (ίδια επεξεργασία)

Οι εικόνες SLC, είναι οι κατάλληλες για χρήση στην εφαρμογή της συμβολομετρίας, καθώς είναι αυτές που περιέχουν την πληροφορία της φάσης. Το κοινό που έχουν οι εικόνες GRD και SLC είναι ότι και οι δύο διαθέτουν πάντα ένα κανάλι ή μία μπάντα έντασης (intensity), η οποία εξαρτάται από τα ποσά ανακλώμενης ακτινοβολίας σε συνδυασμό με όλους τους μηχανισμούς ανάκλασης που αναλύθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, στην ενότητα 2.4. Αυτή είναι η βασική διαφορά της έντασης (intensity), από το εύρος (amplitude) για το οποίο έχουμε αναφέρει παραπάνω από τι εξαρτάται.

3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (INTERFEROMETRY)

Στην παραπάνω ενότητα έγινε μία περιγραφή των εικόνων ραντάρ και αποσαφηνίστηκε, ότι οι κατάλληλες εικόνες για την εφαρμογή της συμβολομετρίας είναι οι εικόνες SLC, καθώς περιέχουν την πληροφορία της φάσης. Η φάση μίας μόνο εικόνας ραντάρ δεν έχει πρακτική χρήση. Το μυστικό της συμβολομετρίας είναι η προσπάθεια της σύγκρισης δύο εικόνων ραντάρ, εξάγοντας την πληροφορία της διαφοράς της φάσης μεταξύ των δύο εικόνων. Η συμβολομετρία αποτελεί μία μέθοδο με την οποία είναι εφικτή η εξαγωγή πληροφοριών στις 3 διαστάσεις για την τοπογραφία του εδάφους. Για την συγκεκριμένη

μέθοδο, χρειάζεται στο ελάχιστο ένα ζεύγος εικόνων ραντάρ. Η εξαγωγή της πληροφορίας της διαφοράς της φάσης ανάμεσα στις δύο εικόνες επιτυγχάνεται, διότι ένα σύστημα ραντάρ (SAR), έχει την δυνατότητα να παρατηρεί την ίδια περιοχή από ελαφρώς διαφορετική οπτική γωνία (Crosetto, 2002). Ένας από τους θεμελιώδεις παράγοντες για την ορθότητα της διαδικασίας, αποτελεί η κατανόηση της βασικής γεωμετρίας ενός συμβολομετρικού συστήματος SAR, καθώς βοηθάει τον ερευνητή να κατανοήσει τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που χρειάζεται και το τι θέλει ακριβώς να κάνει.



Εικόνα 3.4 Βασική γεωμετρία συμβολομετρικού συστήματος SAR (google)

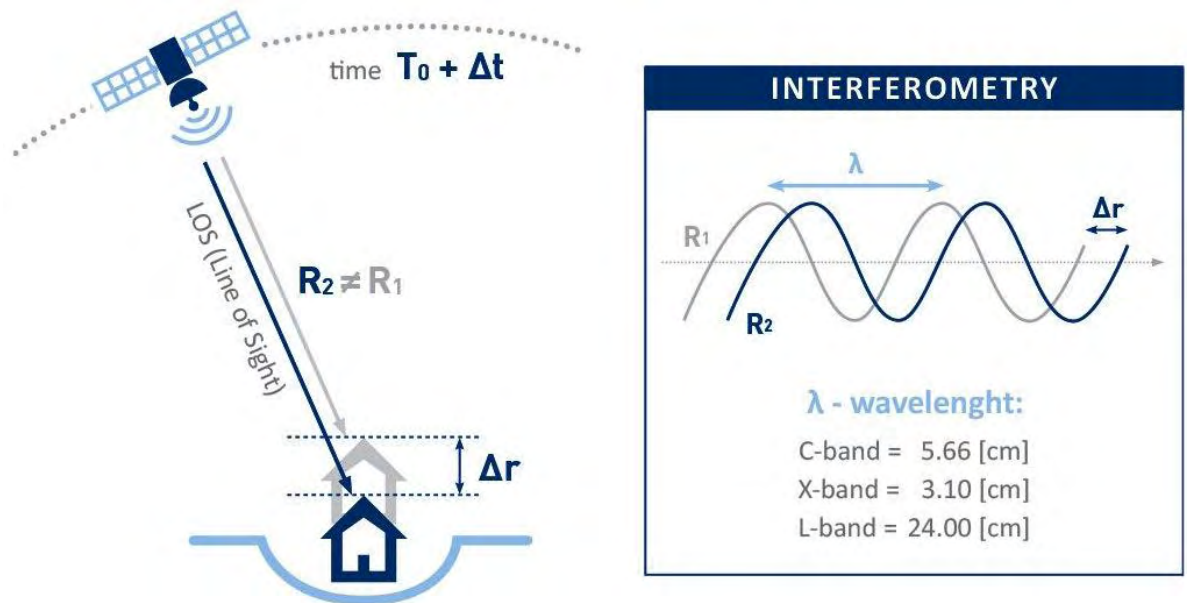
Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την βασική γεωμετρία της διαδικασίας της συμβολομετρίας. Ερμηνεύοντας την εικόνα μπορούμε να πούμε ότι, S_1 είναι η πρώτη τροχιά λήψης του δορυφόρου και S_2 είναι η δεύτερη τροχιά λήψης του δορυφόρου, η διαφορά απόστασης της τροχιάς μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων της ίδιας περιοχής ονομάζεται βασική συμβολομετρική γραμμή (**B**). Η κάθετη προβολή της στο εύρος κλίσης ονομάζεται βασική κάθετη γραμμή (**B_⊥**). Ένας πολύ βασικός κανόνας είναι, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η βασική κάθετη γραμμή (**B_⊥**), τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή της τοπογραφίας στο συμβολογράφημα. Αυτό έχει τεράστια σημασία καθώς αποτελεί το πρώτο χαρακτηριστικό επιλογής ζεύγους εικόνων ραντάρ, που θα χρησιμοποιηθούν στην αντίστοιχη εφαρμογή. Για παράδειγμα στην διαδικασία δημιουργίας ψηφιακού μοντέλου εδάφους, στην οποία χρειάζεται η συμμετοχή της τοπογραφίας να είναι σημαντική, ένα ζεύγος εικόνων με μικρή βασική κάθετη γραμμή (πχ 30m), δεν είναι πρακτικά χρήσιμο

για την εφαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, η συμβολομετρία απαιτεί στο ελάχιστο δύο διαφορετικές εικόνες ραντάρ, συγχωνεύοντας την μία εικόνα στην άλλη, δηλαδή γίνεται μία ευθυγράμμιση των pixel της μίας εικόνας, στα pixel της άλλης. Επιπλέον το εύρος της συμβολομετρίας, είναι το εύρος της μίας εικόνας πολλαπλασιαζόμενο από το εύρος της άλλης. Έτσι λοιπόν η μέθοδος της συμβολομετρίας, μας δείχνει την πληροφορία της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών εικόνων ραντάρ. Στην αρχή της ενότητας αναφέραμε πως η συμβολομετρία αποτελεί μία μέθοδο για την εξαγωγή πληροφοριών στις 3 διαστάσεις για την τοπογραφία του εδάφους. Συγκεκριμένα με την βασική μέθοδο της συμβολομετρίας είναι εφικτή η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η συντομογραφία της συμβολομετρίας που συναντάται σε όλη την διεθνή βιβλιογραφία είναι InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Όσο αναφορά την εφαρμογή των επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων, στην ουσία αποτελεί μία επέκταση της βασικής συμβολομετρίας, όπου αφαιρώντας της τοπογραφία από ένα συμβολογράφημα μπορούμε να εξάγουμε την πληροφορία των παραμορφώσεων. Αυτή η επέκταση ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία, και στην διεθνή βιβλιογραφία συναντάται με την συντομογραφία DinSAR (Differential SAR Interferometry). Βέβαια η έρευνα και η βιβλιογραφία εξελίσσονται και νέες μέθοδοι παρουσιάζονται από τους ερευνητές. Έτσι λοιπόν για την διαφορική συμβολομετρία έχει παρουσιασθεί μία νέα μέθοδος που αποτελεί επέκταση της DinSAR. Αυτή είναι η PSI (Permanent or Persistent Scatterer Interferometry), η οποία χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη δυναμική (*Mouratidis and Costantini, 2011*). Στις επόμενες ενότητες θα γίνει μία ανάλυση των επεκτάσεων της βασικής συμβολομετρίας, που αφορούν της επιφανειακές εδαφικές μετατοπίσεις, μία εφαρμογή που πραγματεύεται και η συγκεκριμένη εργασία.

3.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (DinSAR)

Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μία επέκταση της βασικής συμβολομετρίας και μας δίνει την δυνατότητα της παρακολούθησης των επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων, δηλαδή μπορούμε να δημιουργήσουμε χάρτες παραμορφώσεων σε κλίμακα εκατοστού έως χιλιοστού. Ένας αποτελεσματικός τρόπος καταγραφής και παρακολούθησης φαινομένων εδαφικών παραμορφώσεων είναι μέσω της δημιουργίας χρονοσειρών (*De Luca et.al, 2016*). Για παράδειγμα η καταγραφή παραμορφώσεων μεταξύ ενός μικρού χρονικού διαστήματος (πχ 1 μήνα), μπορεί να μην περιέχει σημαντική πληροφορία, εάν δεν έχει συμβεί κάποιο ακραίο φυσικό φαινόμενο όπως ένας μεγάλος

σεισμός. Η καταγραφή όμως των παραμορφώσεων του κάθε μήνα και ο συνδυασμός τους για την δημιουργία μιας χρονοσειράς ενός έτους, μπορεί να μας δώσει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την εκάστοτε περιοχή που γίνεται η μελέτη. Για παράδειγμα μια μελέτη στον αστικό χώρο μπορεί να μας υποδείξει εδαφικές υποχωρήσεις σε κτήρια ή σε έργα υποδομής. Η συγκεκριμένη πληροφορία μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο πρόληψης για μελλοντικές κατασκευές, συνεπάγοντας με εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος.



Εικόνα 3.5 Απεικόνιση λειτουργίας διαφορικής συμβολομετρίας (TRE Altamira)

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει το σκεπτικό υπόβαθρο της διαφορικής λειτουργίας. Δηλαδή το συγκεκριμένο παράδειγμα αναφέρεται σε ένα στόχο της επιφάνειας του εδάφους που έχει υποστεί εδαφική υποχώρηση. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων, μπορεί να υπολογιστεί και να ερμηνευθεί σαν την εδαφική υποχώρηση σε κλίμακα εκατοστού. Βέβαια υπάρχουν κάποιοι βασικοί περιορισμοί που χαρακτηρίζουν την διαδικασία της διαφορικής συμβολομετρίας. Αυτοί είναι:

- Γεωμετρική αποσυσχέτιση, λόγω χρήσης συμβολογραφημάτων με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή
- Απώλεια συνοχής μεταξύ των εικόνων, λόγω της χρονικής αποσυσχέτισης μεταξύ των λήψεων
- Ενδεχόμενες δυσκολίες στο «ξετύλιγμα» των συμβολογραφημάτων, λόγω χρήσης μεγάλων βασικών κάθετων γραμμών.

- Ατμοσφαιρικές επιδράσεις, όπως υδρατμοί της τροπόσφαιρας και η πυκνότητα των ιονοσφαιρικών ηλεκτρονίων.

Έτσι λοιπόν, η PSI, αποτελεί μία τεχνική που αναπτύχθηκε για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί (Parcharidis *et al.*, 2013).

3.5 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ PSI

Η τεχνική PSI αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο (Politecnico di Milano), με σκοπό να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που χαρακτηρίζουν την διαφορική συμβολομετρία και να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι μηχανισμοί ανάκλασης της ακτινοβολίας από τους στόχους. Λόγω αυτών των μηχανισμών και της έννοιας της διηλεκτρικής σταθεράς, κάποιοι στόχοι ή ανακλαστές στην επιφάνεια του εδάφους, ανακλούν μεγάλα και σταθερά στον χρόνο ποσά ενέργειας πίσω στον αισθητήρα του δορυφόρου. Αυτοί οι ανακλαστές ονομάζονται σταθεροί (permanent or persistent scatterers), τέτοιοι είναι συνήθως κτήρια ή άλλες αντίστοιχες κατασκευές, μεταλλικά αντικείμενα, βραχώδεις περιοχές κ.α. Έτσι λοιπόν, η τεχνική PSI βασισμένη στα πλεονεκτήματα της σταθερής στο χρόνο ανάκλασης, έχει την δυνατότητα της ανίχνευσης πολυάριθμων στόχων σταθερής ανάκλασης, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να εξάγει πολύ ακριβείς πληροφορίες όσο αφορά τις εδαφικές παραμορφώσεις. Η τεχνική PSI στην ουσία αποτελεί έναν αλγόριθμο ο οποίος διατίθεται από τα αντίστοιχα software και είναι ένα από τα βήματα κατά την διαδικασία επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων ραντάρ (Ferretti *et al.*, 2006). Γενικά κατά καιρούς έχουν γίνει διάφορες προσεγγίσεις στην τεχνική PSI, όπου διάφοροι ερευνητές αναπτύσσουν αλγόριθμους που εκτελούν την τεχνική PSI. Η πρώτη προσέγγιση φυσικά, είναι αυτή των σταθερών ανακλαστών, που παρουσίασε ο Alessandro Ferretti στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο και είναι ο ερευνητής που μαζί με την ομάδα του δημιούργησαν την ανάλυση PSI. Ο ίδιος κατά την περίοδο 2010 – 2011, πρότεινε την ανάπτυξη του αλγορίθμου και δημιούργησε τον αλγόριθμο SqueeSAR (Crosetto *et al.*, 2015). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος πέρα από την δυνατότητα ανίχνευσης πολυάριθμων σταθερών ανακλαστών (PS)¹, πλέον ανιχνεύει και ομοιογενείς χωρικά κατανομημένους ανακλαστές (DS)² οι οποίοι συνήθως αφορούν ομοιογενείς εδαφικές επιφάνειες, ακαλλιέργητες εκτάσεις,

¹ PS: Permanent Scatterer

² DS: Distributed Scatterer

εξημερωμένες επιφάνειες κ.α., βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο τα αποτελέσματα (Lagios *et al.*, 2013). Πέραν των αρκετών προσεγγίσεων της τεχνικής PSI, ένας εναλλακτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται εκτεταμένα είναι ο SBAS (Small Baseline Subset) του Paolo Berardino, ο οποίος αλγόριθμος βασίζεται στον συνδυασμό συμβολογραφημάτων με μικρή βασική κάθετη γραμμή (Crosetto *et al.*, 2015). Παρακάτω θα παρατεθεί ένας πίνακας με τις βασικές προσεγγίσεις της τεχνικής PSI.

PSI method reference	Baseline configuration	Pixel selection criterion	Deformation model
Ferretti <i>et al.</i> (2000, 2001)	Single master	Amplitude dispersion	Linear deformation in time
Berardino <i>et al.</i> (2002)	Small baselines	Coherence	Spatial smoothness
Mora <i>et al.</i> (2003)	Small baselines	Coherence	Linear deformation in time
Schmidt and Bürgmann (2003)	Small baselines	Coherence	Spatial and temporal smoothness
Werner <i>et al.</i> (2003)	Single master	Amplitude dispersion & Spectral phase diversity	Linear deformation in time
Duro <i>et al.</i> (2003) and Crosetto <i>et al.</i> (2008)	Small baselines	Amplitude dispersion, coherence, spectral coherence	Linear deformation in time
Kampes (2006)	Single master	Amplitude dispersion & Signal to clutter ratio	Different types of deformation models
Hooper <i>et al.</i> (2004)	Single master	Amplitude and phase criterion	Spatial smoothness
Crosetto <i>et al.</i> (2005)	Small baselines	Coherence	Stepwise linear function in time
Costantini <i>et al.</i> (2008)	Single master	Amplitude dispersion	Linear deformation in time
López-Quiroz <i>et al.</i> (2009)	Small baselines	Coherence	Spatial smoothness
Ferretti <i>et al.</i> (2011)	Single master after triangulation	Statistical homogeneity test	Deformation model in time
Perissin and Wang (2012)	Target-dependent interferogram subset	Quasi-PS approach	Linear deformation in time
Hetland <i>et al.</i> (2012)	Small baselines	Coherence	Different types of deformation models
van Leijen (2014)	Single master	Amplitude dispersion	Different types of deformation models
Goel and Adam (2014)	Small baselines	Statistical homogeneity test	Linear deformation in time
Ly <i>et al.</i> (2014)	Single master	Statistical homogeneity test	Linear deformation in time
Devanathéry <i>et al.</i> (2014)	Small baselines	Amplitude dispersion & Cousin PS	Spatial smoothness

Εικόνα 3.6 Πίνακας βασικών προσεγγίσεων τεχνικής PSI (Crosetto *et al.*, 2015)

Στο επόμενο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιασθεί ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων με περιοχή μελέτης την ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλα. Θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή των βημάτων επεξεργασίας και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΗΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περίληπτικά με βάση όλα τα παραπάνω, με την συμβολομετρία μπορούμε να εξάγουμε την διαφορά φάσης μεταξύ δύο δορυφορικών εικόνων ραντάρ, των οποίων οι λήψεις έχουν γίνει από ελαφρώς διαφορετική οπτική γωνία και να εξάγουμε πληροφορίες για την τοπογραφία του εδάφους. Εάν από το παραγόμενο συμβολογράφημα αφαιρέσουμε την τοπογραφία μέσω κάποιου ήδη υπάρχοντος ψηφιακού μοντέλου εδάφους (πχ SRTM), τότε οδηγούμαστε στην διαφορική συμβολομετρία μέσα από την οποία μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες για τις επιφανειακές εδαφικές παραμορφώσεις. Γιατί όμως είναι σημαντική η παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων; Η απάντηση είναι διότι το έδαφος μεταβάλλεται συνεχώς λόγω φυσικών, γεωλογικών και ανθρωπογενών διεργασιών. Αυτές οι εδαφικές παραμορφώσεις μπορούν να αποδοθούν ως εδαφικές υποχωρήσεις ή εδαφικές ανυψώσεις. Για παράδειγμα, οι εδαφικές υποχωρήσεις μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα είτε στον αστικό χώρο όπως καθιζήσεις και ρηγματώσεις σε κτίσματα ή άλλα έργα υποδομής, είτε στον περί-αστικό ή αγροτικό χώρο. Η διεθνής βιβλιογραφία προσφέρει πάρα πολλές μελέτες που αποτελούν παραδείγματα εφαρμογών σε διάφορα πεδία έρευνας. Επιγραμματικά θα αναφερθούν κάποιες μελέτες από την διεθνή βιβλιογραφία, σαν παραδείγματα πεδίων εφαρμογής της διαφορικής συμβολομετρίας. Η μελέτη με τίτλο «**SqueeSAR and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992 – 2012): Tectonic implications**» (Lagios *et al.*, 2013), η μελέτη «**Satellite interferometry for monitoring ground deformations in the urban environment**» (Ferretti *et al.*, 2006), η μελέτη «**Time – series analysis of surface deformation at Brady Hot Springs geothermal field (Nevada) using interferometric synthetic aperture radar**» (Ali *et al.*, 2016), η μελέτη «**Differential SAR Interferometric technique for land subsidence monitoring due to groundwater over-exploitation in the Hashtgerd**» (Ashrafiyanfar *et al.*, 2009), η μελέτη «**Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring**» (Ferretti *et al.*, 2011), η μελέτη «**3D displacement field retrieved by integrating Sentinel-1 InSAR and GPS data: the 2014 South Napa earthquake**» (Polcari *et al.*, 2016), η μελέτη «**Monitoring Building Stability in Port-Said City, Egypt Using Differential SARI nterferometry**» (Gaber *et al.*, 2014). Είναι εμφανές, ότι η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί εφαρμογή για αρκετά πεδία έρευνας, τα παραπάνω παραδείγματα ερευνών το αντικατοπτρίζουν στο σύνολό τους.

Αντίστοιχα η συγκεκριμένη εργασία ερευνά τις εδαφικές επιφανειακές παραμορφώσεις στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας, μία περιοχή έντονου μεταβαλλόμενου εδαφικού χαρακτήρα, καθώς είναι γνωστό εδώ και χρόνια ότι στην περιοχή εμφανίζονται ρηγματώσεις του εδάφους, καθιζήσεις οικισμών και ρηγματώσεις των ίδιων των κτιρίων, που κατά βάση οφείλονται στην έντονη αγροτική δραστηριότητα, όπου μέσα από τις χιλιάδες παράνομες ή μη γεωτρήσεις, παρατηρείται μία αλόγιστη χρήση αρδευόμενου νερού και υπεράντληση του υπόγειου υδροφορέα. Επίσης η έρευνα βασίζεται εξ'ολοκλήρου σε ανοιχτά δεδομένα μέσω του δορυφόρου ραντάρ Sentinel-1 της ESA, αλλά και σε λογισμικό επεξεργασίας ανοιχτού κώδικα, το SNAP, που διατίθεται από την ίδια υπηρεσία. Η φιλοσοφία και τα οφέλη των ανοιχτών και ελεύθερων προς όλους δεδομένων είναι γνωστά και δεν θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Επιπλέον η διαδικασία επεξεργασίας βασίστηκε στην απλή διαφορική συμβολομετρία (DinSAR) γνωρίζοντας όλους του περιορισμούς που την χαρακτηρίζουν και όχι σε κάποια από τις επεκτάσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο όπως την PSI. Αυτό συνέβη διότι το λογισμικό επεξεργασίας δεν διαθέτει κάποιον αλγόριθμο PSI, και προσφέρει την βασική διαδικασία της διαφορικής συμβολομετρίας. Αν και το τελευταίο διάστημα μετά από αναβάθμιση του λογισμικού δίνεται η επιλογή της εξαγωγής των δεδομένων σε μορφή η οποία αναγνωρίζεται από το λογισμικό επεξεργασίας με την ονομασία StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), το οποίο έχει την δυνατότητα του αλγορίθμου PSI. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ανοιχτού κώδικα και είναι διαθέσιμο μόνο για μη εμπορικές εφαρμογές, η ανάπτυξή του έγινε από το πανεπιστήμιο του Stanford (Stanford University), αλλά μετέπειτα ανάπτυξή του έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Ισλανδίας (University of Iceland), στο πανεπιστήμιο του Delft (Delft University of Technology) και στο πανεπιστήμιο του Leeds (University of Leeds). Επίσης έγινε συνεισφορά χρηστών από άλλα ιδρύματα (Hooper *et al.*, 2013). Επιπλέον είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι απαιτείται αρκετά μεγάλος χώρος αποθήκευσης δεδομένων, όπως και αρκετά μεγάλη υπολογιστική ισχύ (hardware) καθώς η διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων ραντάρ είναι αρκετά απαιτητική όσο αναφορά τις προδιαγραφές hardware.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ

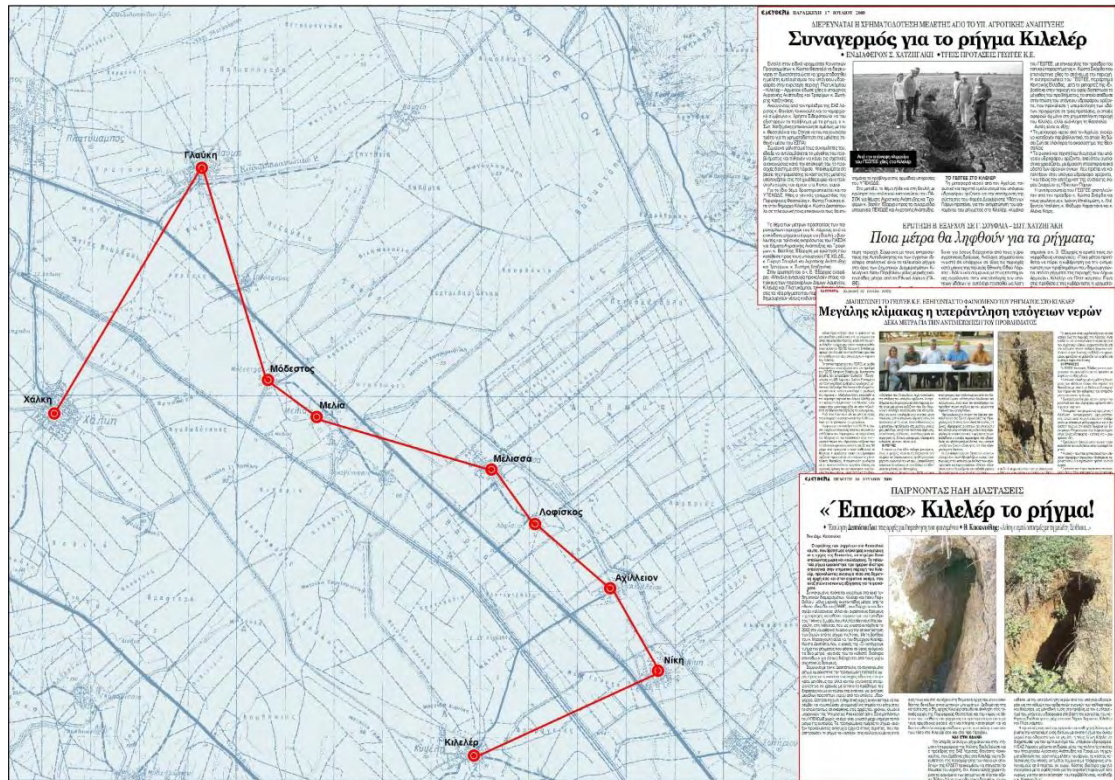
Ο θεσσαλικός κάμπος αποτελεί ίσως την μεγαλύτερη αγροτική δύναμη της χώρας, βέβαια αυτή η ανθρωπογενής δραστηριότητα απαιτεί και τεράστιους όγκους νερού για την εξυπηρέτηση της άρδευσης των καλλιεργειών. Η περιοχή και αντίστοιχα το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας δεν χαρακτηρίζεται από πληθώρα φυσικών πηγών γλυκού νερού και ταυτοχρόνως η ανάγκη για ύδρευση των 4 μεγάλων αστικών κέντρων (Λάρισα, Βόλος, Καρδίτσα, Τρίκαλα), αλλά και η ανάγκη άρδευσης των χιλιάδων στρεμμάτων καλλιεργούμενων εκτάσεων ασκούν ακόμα μεγαλύτερη πίεση για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων στην ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 4.1 Χάρτης απεικόνισης υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ιδία επεξεργασία)

Το ερώτημα που γεννάται σε αυτό το σημείο είναι με ποιόν τρόπο εξυπηρετείται η ζήτηση νερού για ύδρευση και κυρίως για άρδευση; Η απάντηση είναι φυσικά μέσω των χιλιάδων γεωτρήσεων παράνομων ή μη που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή. Μία από τις πολλές επιπτώσεις αυτής της πρακτικής είναι η ανεξέλεγκτη χρήση νερού και η υπεράντληση του υπόγειου υδροφορέα, ως αποτέλεσμα η εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων, ρηγματών, καθιζήσεων ολόκληρων οικισμών και ρηγματώσεων σε κτίσματα. Το φαινόμενο έχει έντονη εμφάνιση κυρίως στους οικισμούς μεταξύ του δίπολου Λάρισας – Βόλου, με το γνωστό προ ετών ρήγματος στο Κιλελέρ, τις έντονες καθιζήσεις και ρηγματώσεις στον

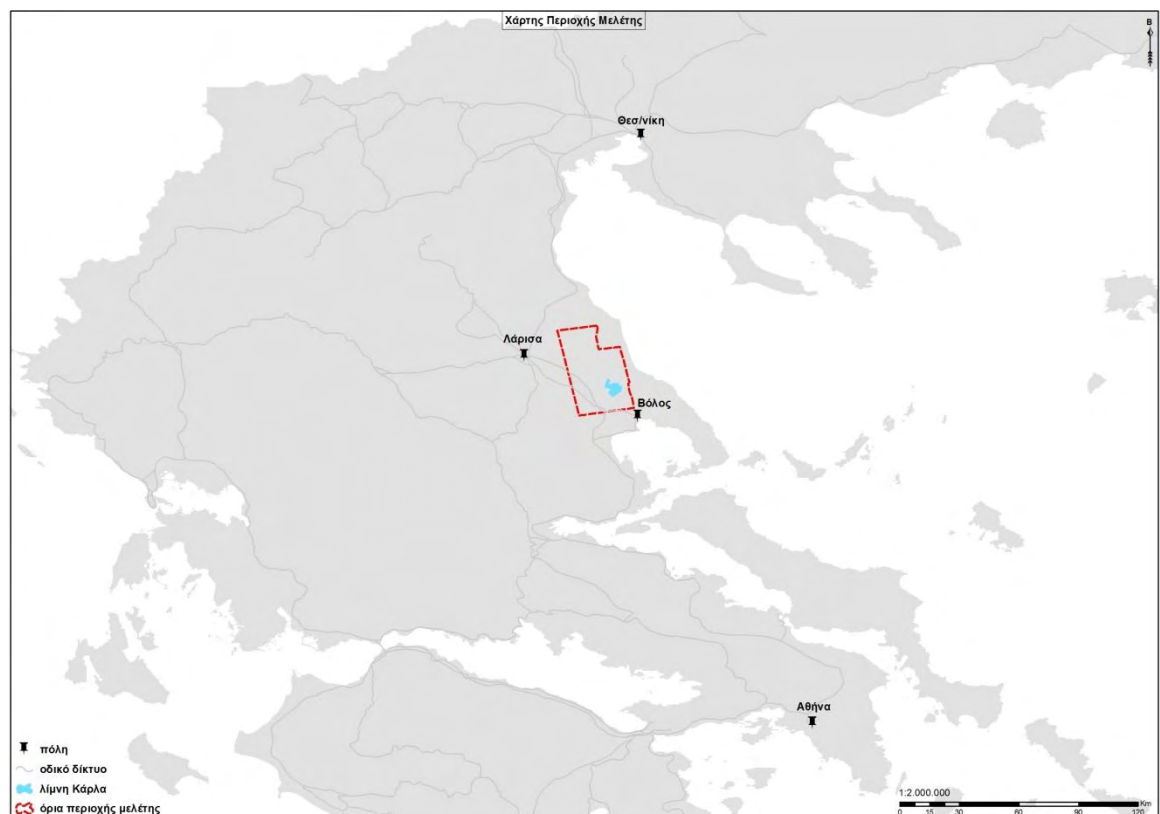
οικισμό Νίκη και φυσικά την εμφάνιση του φαινομένου και σε άλλους γειτονικούς οικισμούς.



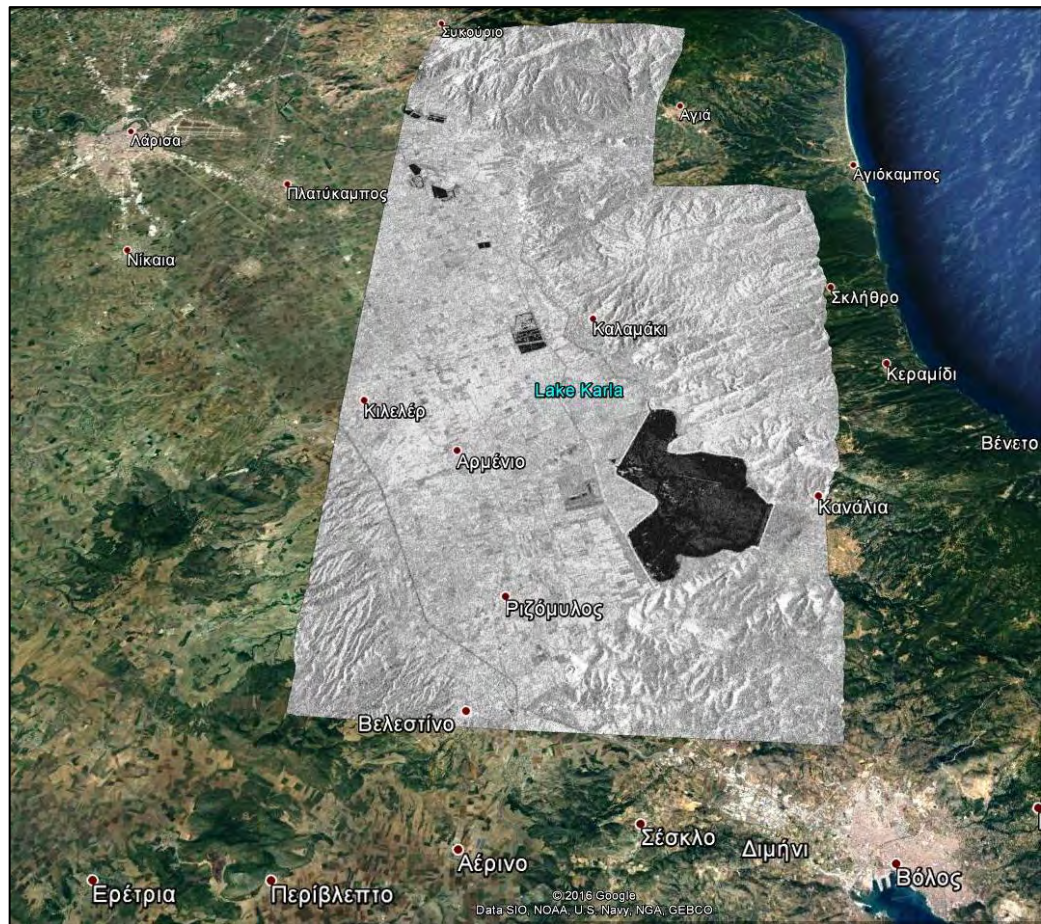
Εικόνα 4.2 Θεματικός χάρτης οικισμών εμφάνισης έντονου φαινομένου (ιδία επεξεργασία)

Γίνεται αντιληπτό ότι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ασκούν μεγάλες πιέσεις στην μεταβολή του εδάφους, με αποτέλεσμα να υπάρξουν καταστάσεις όπου να κινδυνέψουν μέχρι και οι ίδιοι κάτοικοι οικισμών. Βέβαια, οι έντονες ρηγματώσεις και καθιζήσεις, δεν πραγματοποιούνται από την μία μέρα στην άλλη, αλλά είναι διεργασίες χρόνων. Το κλειδί σε περιστατικά καταστροφών ή ανεπιθύμητων καταστάσεων είναι η συνεχής παρακολούθηση και η πρόληψη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση που αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχει κάποιος τρόπος παρακολούθησης και πρόληψης; Η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας, έρχεται να καλύψει το κενό στην παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων και να προσφέρει πολύτιμο χρόνο στους ειδικούς για την εύρεση λύσεων. Με την δυνατότητα παρακολούθησης των εδαφικών υποχωρήσεων σε κλίμακα εκατοστού έως χιλιοστού και την δυνατότητα μετρήσεων πολύ μεγάλων εκτάσεων, κάτι δεν το επιτρέπει η μελέτη στο πεδίο, αποτελεί ίσως την δυνατότερη εφαρμογή για την πρόληψη τέτοιων αθέμιτων καταστάσεων, ως αποτέλεσμα πρωταρχικά την ασφάλεια των κατοίκων και εν συνεχεία την εξοικονόμηση οικονομικών πόρων από την διαδικασία αναδόμησης και επαναφοράς των προβλημάτων που εμφανίστηκαν.

Τα όρια της περιοχής μελέτης για την εφαρμογή της μεθόδου διαφορικής συμβολομετρίας έγιναν με διάφορα κριτήρια και λαμβάνοντας υπόψη την απαιτητικότητα της διαδικασίας επεξεργασίας. Τα κριτήρια επιλογής αφορούν ότι εντός της περιοχής μελέτης θα πρέπει να βρίσκονται η λίμνη της Κάρλας καθώς και κάποιοι οικισμοί που εμφανίζουν τα εντονότερα προβλήματα με ιδιαίτερη έμφαση στον οικισμό του Κιλελέρ και της Νίκης. Ταυτόχρονα όμως η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί και μία εισαγωγή στην διαφορική συμβολομετρία, ως αποτέλεσμα εντός της περιοχής μελέτης γεννάται η ανάγκη να υπάρχουν διαφορετικές τοπογραφίες, δηλαδή επίπεδες αγροτικές επιφάνειες, βραχώδεις ή τραχύτερες επιφάνειες, βλάστηση, υδάτινα σώματα, οικισμοί και γενικά να υπάρχει μία ποικιλομορφία στην περιοχή μελέτης καθώς πέραν της ανάδειξης των αποτελεσμάτων και των δυνατοτήτων της εφαρμογής, να παρουσιασθούν και οι περιορισμοί. Όλα τα παραπάνω πρέπει να συνδυαστούν σε μία οριοθέτηση περιοχής όπου τεχνικά το υποσύνολο (subset), της εικόνας ραντάρ που θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία να είναι τέτοιο το μέγεθός του (MB), ώστε να είναι και δυνατή η ολοκλήρωση της διαδικασίας επεξεργασίας από το σύστημα hardware.



Εικόνα 4.3 Χάρτης απεικόνισης περιοχής μελέτης (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση περιοχής μελέτης σε υπόβαθρο google earth (ιδία επεξεργασία)

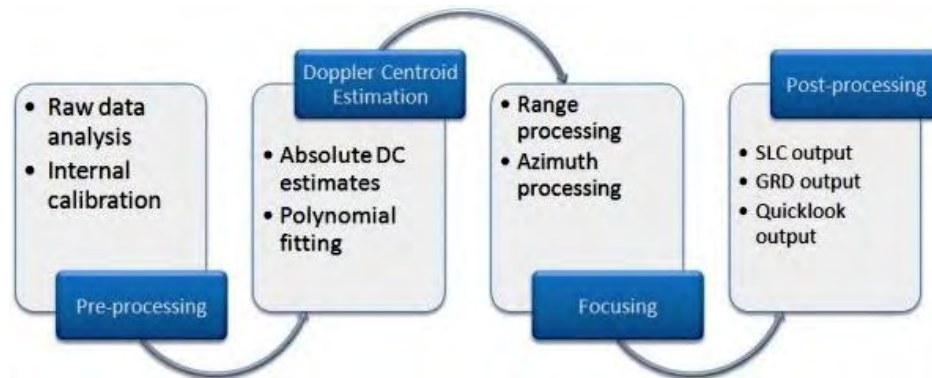
4.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL-1 ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ο χρονικός προσδιορισμός της έρευνας αφορά μία χρονοσειρά παρακολούθησης των εδαφικών επιφανειακών παραμορφώσεων στην περιοχή μελέτης για την περίοδο Δεκέμβριος 2015 έως Δεκέμβριος 2016 και αποτελεί έναν ετήσιο κύκλο. Στην εισαγωγή του κεφαλαίου αναφέρθηκε ότι χρειάζεται μεγάλος χώρος αποθήκευσης δεδομένων, αναλογικά λοιπόν όσο αφορά δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-1, για την διεκπεραίωση μίας έρευνας ετήσιας χρονοσειράς, το συνολικό μέγεθος των συλλεγόμενων δεδομένων, με κάποιες ελλείψεις λήψεων κάποιων μηνών λόγω μη διαθεσιμότητας, ανέρχεται στο ποσό των 173,6 GB σε συμπιεσμένη μορφή. Σε συνδυασμό με το μέγεθος ενός μόνο παραγόμενου συμβολογραφήματος που αφορά δύο εικόνες ραντάρ με βάση το υποσύνολο (subset) της συνολικής εικόνας που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα το οποίο αντιστοιχεί σε 50 MB, το μέγεθος χωρητικότητας ενός μόνο συμβολογραφήματος ανέρχεται στα 8.7 GB και όλα αυτά αφορούν για δεδομένα παραγόμενα μόνο από την μία τροχιά του δορυφόρου την αύξουσα. Είναι εμφανές ότι ο χώρος αποθήκευσης καθίσταται ιδιαίτερα απαιτητικός, ειδικά σε ολοκληρωμένη έρευνα η οποία αντιστοιχεί σε δεδομένα αύξουσας

και φθίνουσας τροχιάς του δορυφόρου. Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικός πίνακας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

α/α	Ημερομηνία	Τροχιά	Τύπος	Δορυφόρος
1	06/12/2015	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
2	18/12/2015	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
3	30/12/2015	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
4	11/01/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
5	23/01/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
6	16/02/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
7	28/02/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
8	11/03/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
9	23/03/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
10	04/04/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
11	16/04/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
12	28/04/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
13	10/05/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
14	03/06/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
15	15/06/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
16	09/07/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
17	21/07/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
18	02/08/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
19	14/08/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
20	26/08/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
21	07/09/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
22	01/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
23	07/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
24	13/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
25	19/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
26	25/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
27	31/10/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
28	06/11/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
29	12/11/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
30	18/11/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
31	24/11/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
32	30/11/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
33	06/12/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
34	12/12/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
35	18/12/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B
36	24/12/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1A
37	30/12/2016	Αύξουσα	SLC	Sentinel-1B

Ο πίνακας δεδομένων, αναδεικνύει τις ελλείψεις που υπάρχουν για συγκεκριμένες ημερομηνίες και ειδικά για τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο δορυφόρος Sentinel-1A, έδινε λήψεις για την ίδια περιοχή ανά 12 ημέρες και ο συνδυασμός των δορυφόρων Sentinel-1A και Sentinel-1B, δίνουν λήψεις της ίδιας περιοχής ανά 6 ημέρες. Οι ελλείψεις ευθύνονται καθαρά σε μη διαθεσιμότητα των συγκεκριμένων δεδομένων από την υπηρεσία της ESA. Έχει ξαναγίνει αναφορά στην συγκεκριμένη εργασία για την ελεύθερη πρόσβαση των δεδομένων, τα οποία είναι διαθέσιμα από το <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δεδομένα διατίθενται διορθωμένα και έτοιμα προς χρήση, κάτι το οποίο εξοικονομεί αρκετό χρόνο επεξεργασίας. Βέβαια υπάρχει και η δυνατότητα απόκτησης των πρωτογενών δεδομένων (Raw Data), όπου αντίστοιχα και αυτά είναι διαθέσιμα προς όλους.



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροής διαδικασίας μετατροπής πρωτογενών δεδομένων

(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel>)

Όσο αφορά την συλλογή των δεδομένων, είναι αρκετά σημαντικό να γνωρίζουμε ποια δεδομένα είναι κατάλληλα για την εφαρμογή που πραγματεύεται η εκάστοτε έρευνα. Στο 3^ο κεφάλαιο έγινε μία περιγραφή που αφορά τις εικόνες ραντάρ και αναδείχθηκε η διαφοροποίηση, μεταξύ των εικόνων SLC και GRD. Πέραν του τύπου της εικόνας, ιδιαίτερη σημαντικότητα έχει και η έκδοση λειτουργικότητας (acquisition mode). Συγκεκριμένα για τον δορυφόρο Sentinel-1, διατίθενται δεδομένα με 4 διαφορετικές λειτουργίες αισθητήρα οι οποίες είναι:

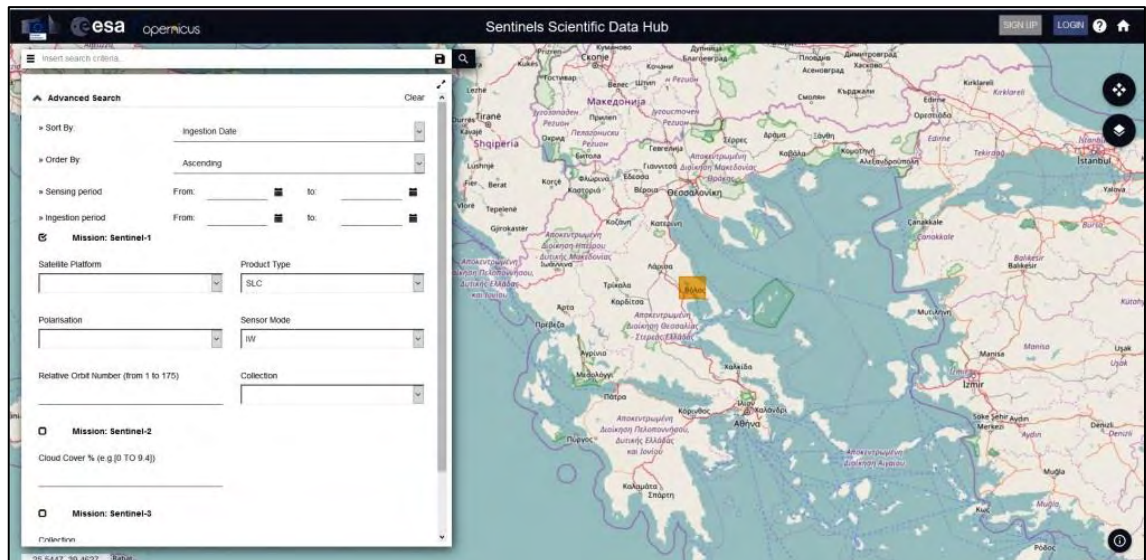
- Stripmap mode (SM)
- Interferometric Wide Swath mode (IW)
- Extra-Wide Swath mode (EW)
- Wave mode (WV)

Η κάθε έκδοση έχει τον δικό της σκοπό και εξυπηρετεί διαφορετικό εύρος ερευνών. Η πιο συνηθισμένη έκδοση δεδομένων χρήσης είναι η IW και είναι αυτή που χρησιμοποιείται και στην συγκεκριμένη εργασία, τα χαρακτηριστικά της είναι:

Characteristic	Value
Swath width	250 km
Incidence angle range	29.1° - 46.0°
Sub-swaths	3
Azimuth steering angle	± 0.6°
Azimuth and range looks	Single
Polarisation options	Dual HH+HV, VV+VH Single HH, VV
Maximum Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ)	-22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)
Phase error	5°

Εικόνα 4.6 Χαρακτηριστικά IW mode (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel>)

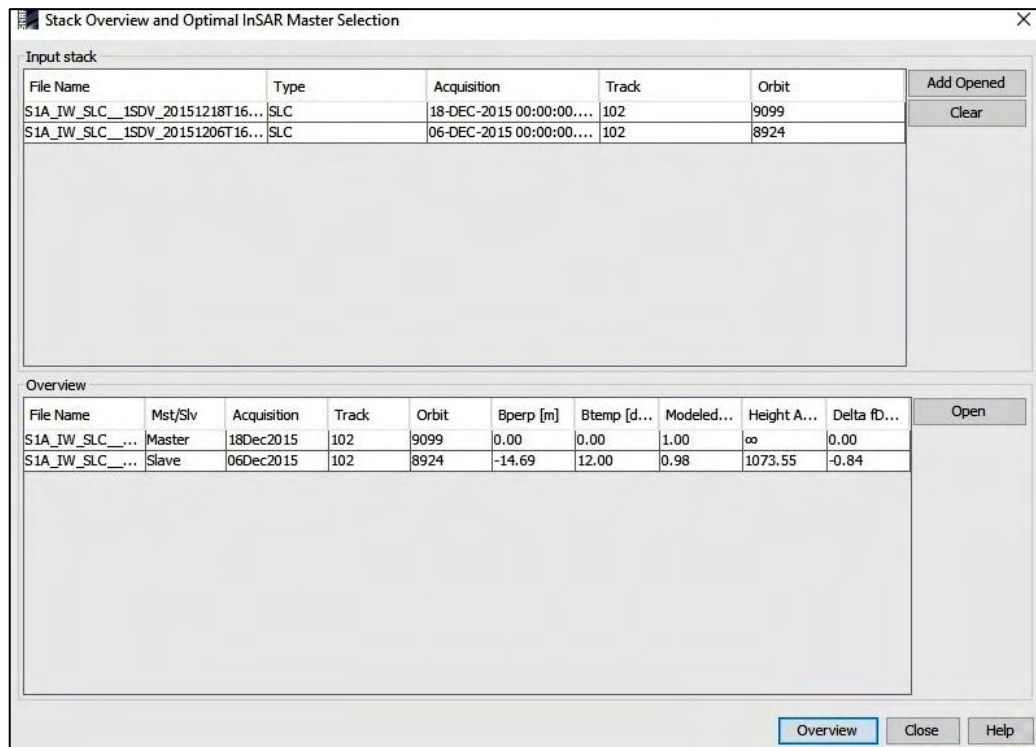
Γενικά δεν μπορούν να βρεθούν αρνητικά σημεία όσο αφορά τα δεδομένα και τον τρόπο διάθεσής τους προς τους ερευνητές. Αποτελεί μία εξαιρετική προσπάθεια του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος, η οποία χαρακτηρίζεται από μία εξαιρετική πλατφόρμα διάθεσης δεδομένων, ένα πολύ δυνατό λογισμικό επεξεργασίας με πολύ συχνές βελτιώσεις και αναβαθμίσεις και από αρκετό εκπαιδευτικό υλικό. Όλα αυτά που αναφέρθηκαν συνοδευόμενα από την λογική των ανοιχτών δεδομένων προς όλους. Η μόνη λεπτομέρεια που θα μπορούσε να σχολιασθεί για την γενική προσπάθεια είναι ότι, τα χωρικά όρια (footprint) των εικόνων είναι αρκετά μεγάλα, με αποτέλεσμα να είναι και το μέγεθος εξίσου μεγάλο, κάτι το οποίο επηρεάζει αρνητικά τον χρόνο λήψης. Αναφορικά μία εικόνα SLC - IW, χαρακτηρίζεται από μέγεθος 3.8 - 4.0 GB σε συμπιεσμένη μορφή. Γίνεται λοιπόν, αντιληπτό ότι η διαδικασία λήψης των δεδομένων και ειδικά στην Ελλάδα αποτελεί μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, ιδιαίτερα όσο αναφορά έρευνες που στηρίζονται σε χρονοσειρές και απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων. Παρακάτω παρατίθεται μία εικόνα της μορφής της πλατφόρμας όπου είναι δυνατή η αναζήτηση και η συλλογή δεδομένων. Υπάρχουν κάποιες επιλογές αναζήτησης που βοηθούν για την ανεύρεση των κατάλληλων δεδομένων. Οι επιλογές αφορούν την ημερομηνία, την πόλωση, τον τύπο της εικόνας, την λειτουργία του αισθητήρα και την τροχιά λήψης.



Εικόνα 4.7 Μορφή πλατφόρμας συλλογής δεδομένων (ιδία επεξεργασία)

4.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με την ολοκλήρωση της συλλογής των δεδομένων, ακολουθεί το βασικότερο κομμάτι, το οποίο είναι η επεξεργασία τους και πραγματοποιήθηκε στο ανοιχτού κώδικα λογισμικό SNAP. Αποτελεί μία ακολουθία βημάτων, όπου το κάθε ένα χαρακτηρίζετε από ιδιαίτερη σημαντικότητα και απαιτεί την ανάλογη προσοχή. Είναι μία περίπλοκη διαδικασία και ειδικά σε περιπτώσεις επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, όπου τα βήματα επαναλαμβάνονται αρκετές φορές, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και επανέλεγχος για την αποφυγή αστοχιών εντός της επεξεργασίας και αλλοίωσης του τελικού αποτελέσματος. Το κάθε ζεύγος εικόνων θα μελετηθεί ξεχωριστά και αποτελείται από δύο διαφορετικές ημερομηνίες λήψεων σε αύξουσα σειρά (πχ 6/12/15 – 18/12/15). Ξεκινώντας την διαδικασία της επεξεργασίας, το πρώτο βήμα είναι η εύρεση των πληροφοριών που χαρακτηρίζουν το ζεύγος, με βασικότερη της πληροφορία της βασικής κάθετης γραμμής (perpendicular baseline), για την οποία έχει αναφερθεί τι ισχύει. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει της σημαντικές πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την χρήση του ζεύγους εικόνων. Οι σημαντικότερες πληροφορίες που μας δίνονται είναι αυτή της βασικής κάθετης γραμμής (perpendicular baseline) και ένας υπολογισμός της συνοχής των εικόνων (modeled coherence), ο οποίος βέβαια μπορεί να είναι ελαφρώς παραπλανητικός καθώς το τεράστιο footprint που χαρακτηρίζει μία εικόνα SLC-IW του δορυφόρου Sentinel-1 μπορεί να έχει πολύ υψηλή συνοχή, αλλά η περιοχή μελέτης (subset) που θα επιλέξουμε από την συνολική εικόνα να μην χαρακτηρίζεται από την ίδια συνοχή.



Εικόνα 4.8 Πληροφορίες ζεύγους εικόνων (ιδία επεξεργασία)

Βέβαια είναι πολύ σημαντική πληροφορία που βοηθάει για την επιλογή εικόνων. Παρακάτω θα παρατεθεί πίνακας με τις σημαντικές πληροφορίες των ζευγών, δηλαδή βασική κάθετη γραμμή και συνοχή. Να σημειωθεί ότι οι τιμές της συνοχής που αναγράφονται στον πίνακα, αντιστοιχούν στην μέση τιμή της περιοχής μελέτης που επιλέχτηκε από ολόκληρη της εικόνα SLC-IW.

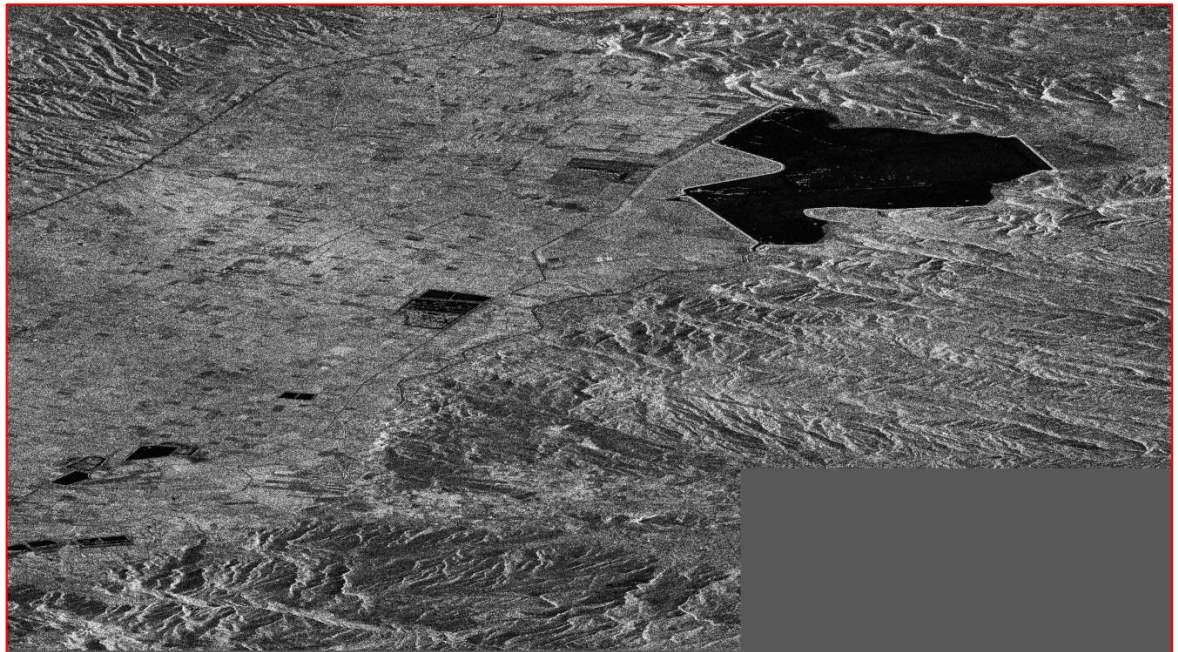
<i>a/a</i>	<u>Bperp</u> <u>(m)</u>	<u>Btemp</u> <u>(days)</u>	<u>Mean</u> <u>Coher.</u>	<i>a/a</i>	<u>Bperp</u> <u>(m)</u>	<u>Btemp</u> <u>(days)</u>	<u>Mean</u> <u>Coher.</u>	<i>a/a</i>	<u>Bperp</u> <u>(m)</u>	<u>Btemp</u> <u>(days)</u>	<u>Mean</u> <u>Coher.</u>
1	-14.69	12	0.63	13	75.96	24	0.36	25	-102.45	6	0.52
2	29.45	12	0.49	14	-36.14	12	0.44	26	89.65	6	0.54
3	-81.81	12	0.47	15	-14.14	24	0.40	27	-103.31	6	0.51
4	-19.44	12	0.50	16	110.58	12	0.48	28	94.57	6	0.48
5	96.91	24	0.42	17	-69.78	12	0.51	29	76.32	6	0.55
6	-44.99	12	0.49	18	-32.46	12	0.54	30	76.32	6	0.64
7	74.28	12	0.43	19	-42.10	12	0.55	31	35.42	6	0.42
8	-7.61	12	0.46	20	62.44	12	0.44	32	-124.51	6	0.50
9	-34.13	12	0.44	21	63.12	24	0.39	33	133.56	6	0.55
10	125.38	12	0.36	22	-82.85	6	0.33	34	-123.53	6	0.56
11	124.87	12	0.38	23	49.88	6	0.34	35	63.74	6	0.65
12	-42.37	12	0.44	24	52.66	6	0.55	36	19.28	6	0.61

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ζεύγη χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρή βασική κάθετη γραμμή, αυτό ευνοεί την διαδικασία της διαφορικής

συμβολομετρίας καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η βασική κάθετη γραμμή, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή της τοπογραφίας, ως αποτέλεσμα να χρειάζεται υψηλότερης ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους για την βελτίωση των αποτελεσμάτων στο βήμα της αφαίρεσης της τοπογραφίας από το συμβολογράφημα. Επίσης παρατηρείται ότι κάποια ζεύγη έχουν μεγάλη διαφορά στις ημερομηνίες λήψεων, κάτι το οποίο μπορεί να επηρεάσει την συνοχή του ζεύγους, λόγο της χρονικής αποσυσχέτισης. Ο συνδυασμός με τον χαρακτήρα της περιοχής μελέτης ο οποίος είναι κατά βάση αγροτικός χώρος μαζί με περιοχές εντονότερου ανάγλυφου καλυπτόμενου από πυκνή βλάστηση επηρεάζει την συνοχή, κάτι το οποίο φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα όπου οι περισσότερες τιμές μέσης συνοχής είναι μικρότερες του $\text{coh.} < 0.5$, βέβαια δεν σημαίνει ότι αυτά τα ζεύγη δεν προσφέρουν σημαντική πληροφορία.

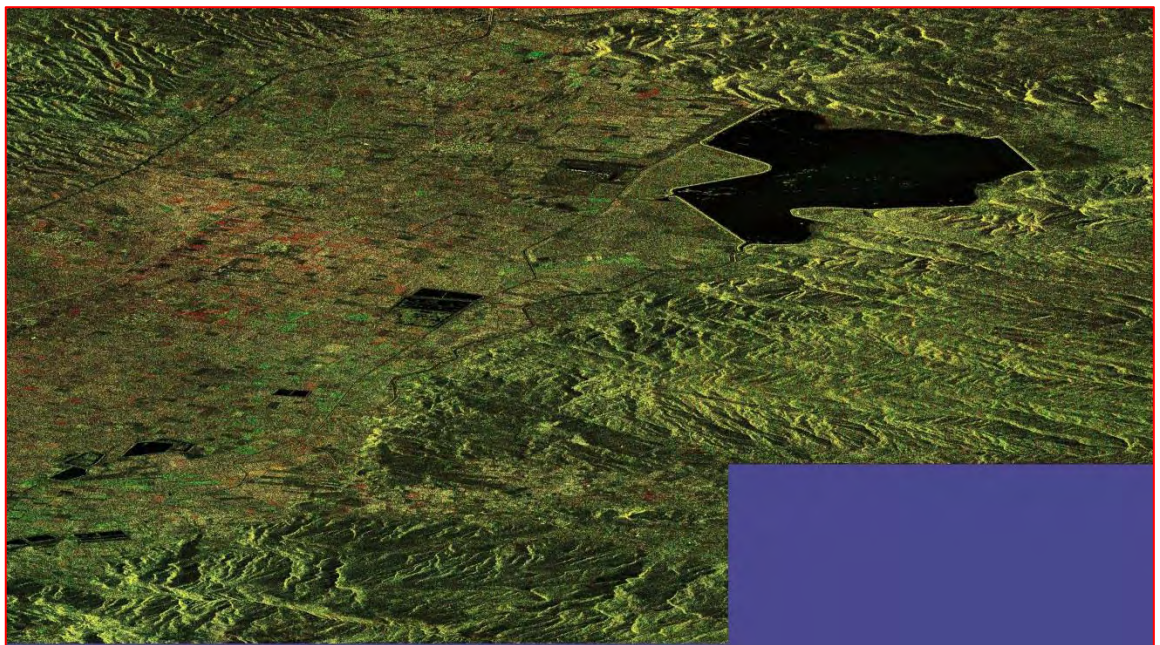
4.4.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΖΕΥΓΟΥΣ (COREGISTRATION)

Η δημιουργία ζεύγους αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα για κάθε επεξεργασία συμβολομετρίας και είναι ένα σημαντικό βήμα για τον ακριβή προσδιορισμό της διαφοράς φάσης μεταξύ των εικόνων. Η μία εικόνα επιλέγεται ως «master» και η δεύτερη ως “slave”, όπου πραγματοποιείται μία ευθυγράμμιση των pixel της μίας εικόνας στα pixel της άλλης. Στην ουσία γίνεται μία συγχώνευση των δύο εικόνων, όπου το κάθε pixel των εικόνων βρίσκεται στο ίδιο εύρος και αξιμούθιο.



Εικόνα 4.9 1^ο Ζεύγος περιοχής μελέτης (ιδία επεξεργασία)

Η παραπάνω εικόνα αποτελεί το αποτέλεσμα της δημιουργίας ζεύγους εικόνων. Ένας τρόπος για τον έλεγχο της ορθότητας του βήματος είναι να δημιουργήσουμε μία εικόνα RGB του ζεύγους. Αυτό είναι εφικτό καθώς το ζεύγος αποτελείται από δύο μπάντες (band), τα οποία είναι η εικόνα «master» και η εικόνα «slave». Στην κόκκινη μπάντα αντιστοιχεί η εικόνα «master» και στην πράσινη μπάντα η εικόνα «slave», με την σωστή δημιουργία ζεύγους η εικόνα RGB θα πρέπει στο μεγαλύτερο μέρος της να εμφανίζεται κίτρινη καθώς τα pixel της μίας εικόνας έχουν ευθυγραμμιστεί με τα pixel της άλλης. Επιπλέον η συγκεκριμένη πρακτική βοηθάει στην ανίχνευση αλλαγών στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, καθώς κάποια pixel μπορεί να ευθυγραμμίζονται στο ίδιο εύρος και αζιμούθιο, αλλά να έχουν διαφορετική πληροφορία λόγω της αλλαγής στον χώρο τον οποίο απεικονίζουν (Luis Veci, 2015).

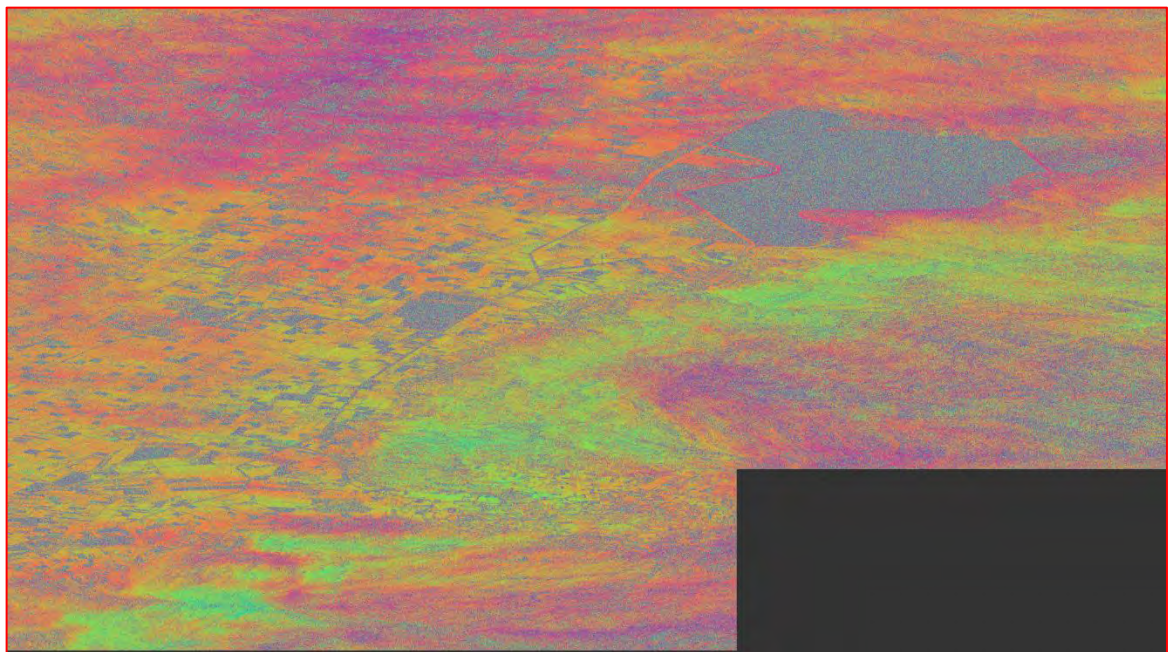


Εικόνα 4.10 RGB εικόνα 1^{ου} ζεύγους περιοχής μελέτης (ιδία επεξεργασία)

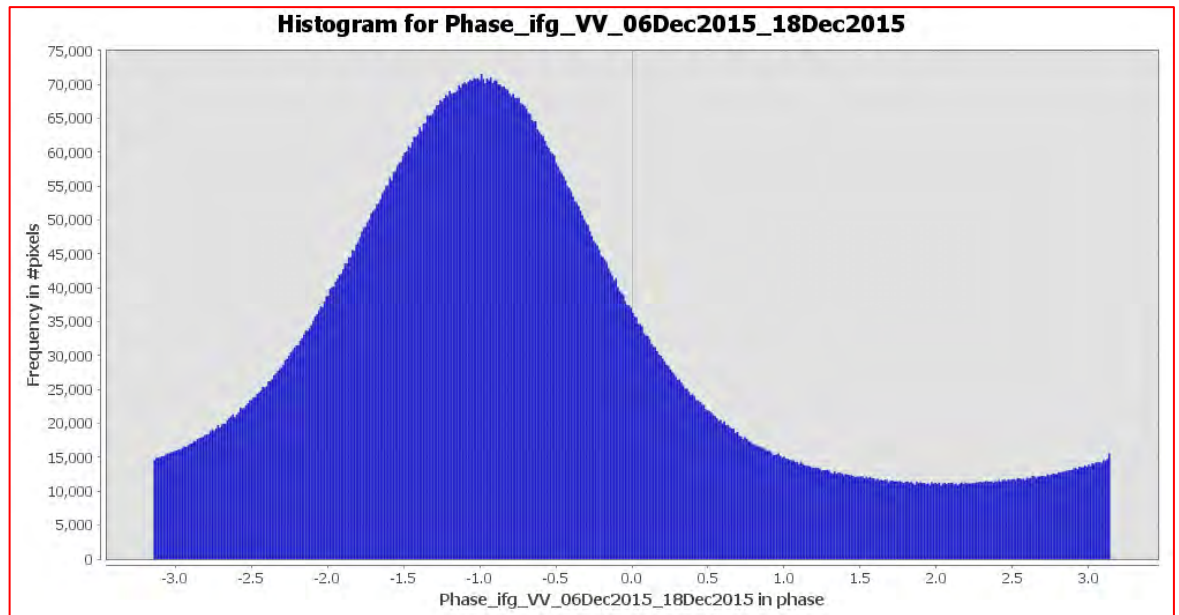
Η παραπάνω εικόνα RGB της περιοχής μελέτης αναδεικνύει ότι έχει γίνει μια καλή δημιουργία ζεύγους, λόγω του κίτρινου χρώματος στο μεγαλύτερο κομμάτι της εικόνας. Ταυτόχρονα στο αριστερό μέρος παρατηρούνται κόκκινα και πράσινα pixels. Αυτό μας δείχνει ότι υπήρξε κάποια αλλαγή στον χώρο, κάτι το οποίο είναι πολύ συχνό φαινόμενο στον αγροτικό χώρο, όπως είναι ο συγκεκριμένος. Επιπλέον παρατηρούμε ότι η λίμνη Κάρλα και ταμειωτήρες της περιοχής συνεχίζουν και εμφανίζονται με χρώμα μαύρο, καθώς όπως έχει αναφερθεί σε παραπάνω ενότητες τα υδάτινα σώματα ανακλούν πάρα πολύ μικρά ποσά ακτινοβολίας.

4.4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ (INTERFEROGRAM)

Η συμβολομετρία αναδεικνύει την διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαφορετικών λήψεων της ίδιας περιοχής. Η φάση αντιστοιχεί στην απόσταση που διανύει η ακτινοβολία από τον δορυφόρο στον στόχο και ξανά πίσω στον δορυφόρο. Ας υποθέσουμε ότι κατά την πρώτη λήψη η ακτινοβολία διανύει απόσταση X_1 και κατά την δεύτερη λήψη απόσταση X_2 , έστω ότι ο στόχος στο έδαφος έχει μετατοπιστεί προς τα κάτω κατά την δεύτερη λήψη, αυτή η διαφορά της απόστασης αντιστοιχεί στην διαφορά φάσης και μπορεί να μετρηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ένα συμβολογράφημα απεικονίζει την διαφορά φάσης σε χρωματικού κύκλους και μετριέται σε κλίμακα 2π . Επιπλέον οι χρωματικοί κύκλοι του συμβολογραφήματος επηρεάζονται από την συμμετοχή της τοπογραφίας του εδάφους, η οποία συμμετοχή εξαρτάται από την βασική κάθετη γραμμή μεταξύ των λήψεων. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχής της τοπογραφίας, τόσο εντονότερη είναι η εμφάνιση των χρωματικών κύκλων.

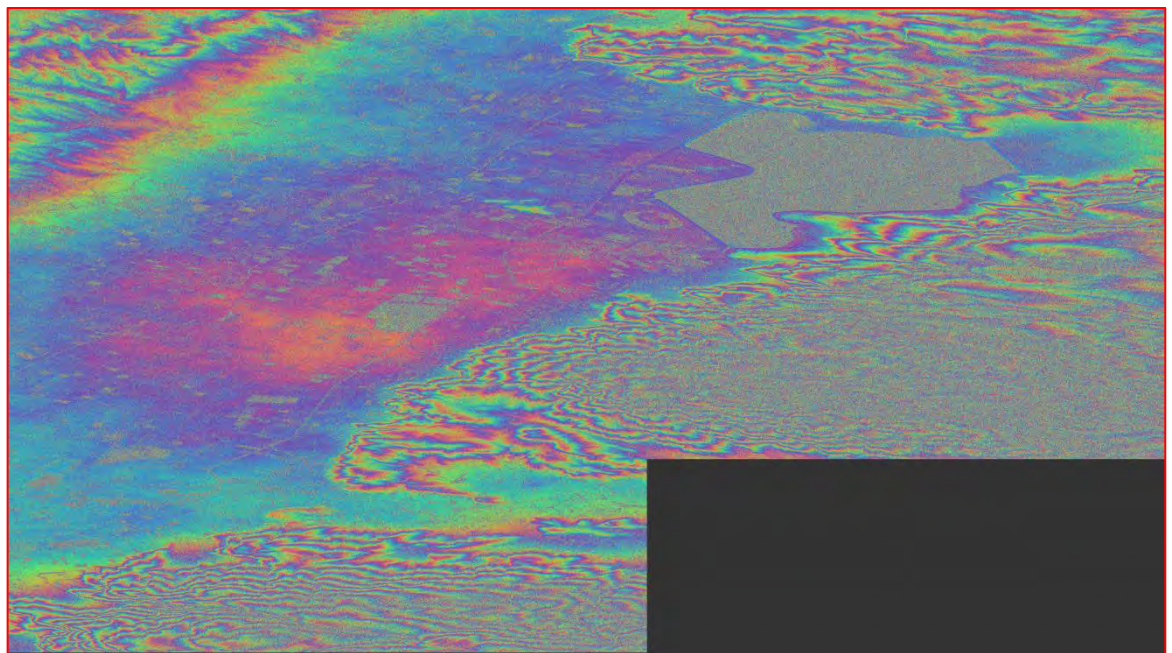


Εικόνα 4.11 Συμβολογράφημα περιοχής μελέτης με μικρή βασική κάθετη γραμμή -14.69 m.
(ιδία επεξεργασία)

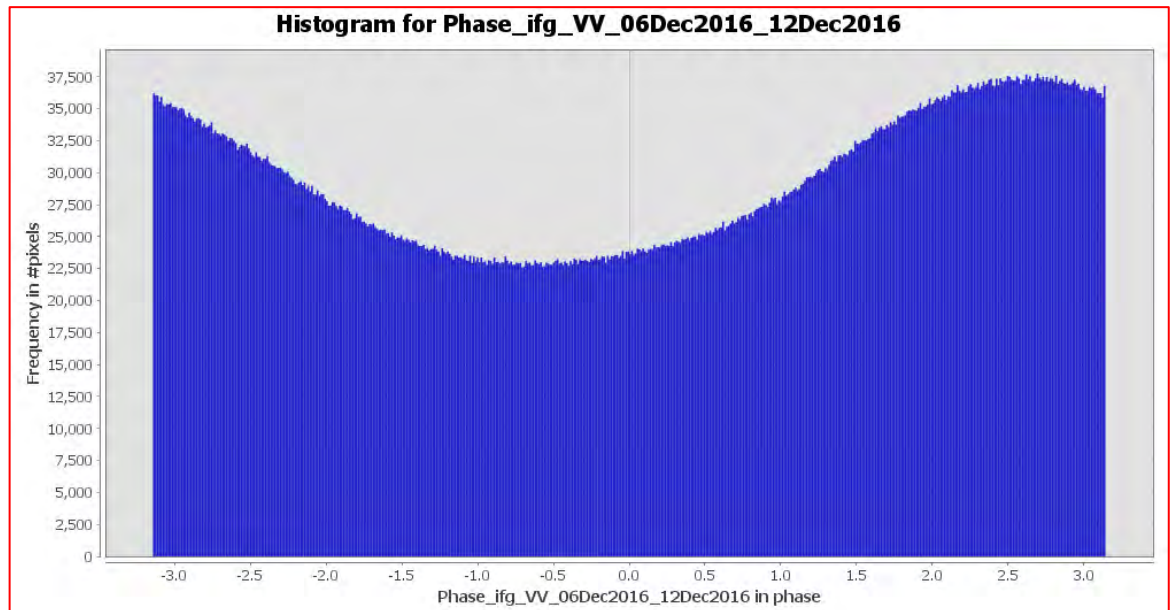


Εικόνα 4.12 Ιστόγραμμα συμβολογραφήματος με μικρή βασική κάθετη γραμμή (ιδία επεξεργασία)

Παρατηρείται ότι οι χρωματικοί κύκλοι δεν είναι έντονοι και ευδιάκριτοι λόγω της πολύ μικρής συμμετοχής της τοπογραφίας η οποία οφείλεται στην μικρή βασική κάθετη γραμμή του ζεύγους εικόνων.

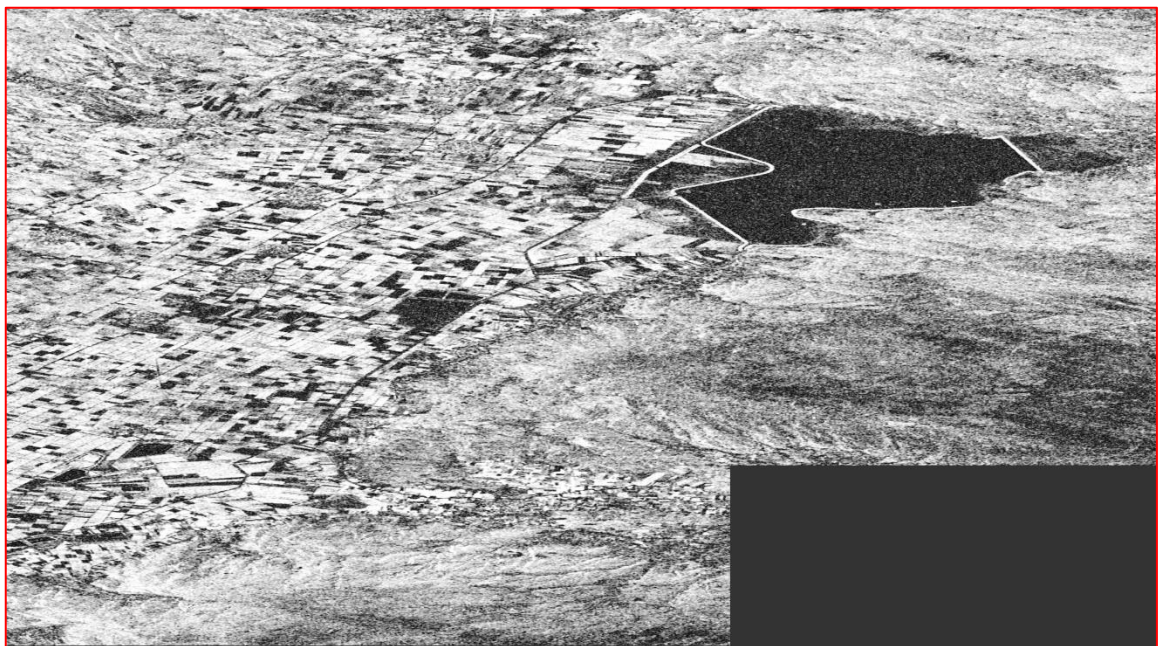


Εικόνα 4.13 Συμβολογράφημα περιοχής μελέτης με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή 133.56 m. (ιδία επεξεργασία)

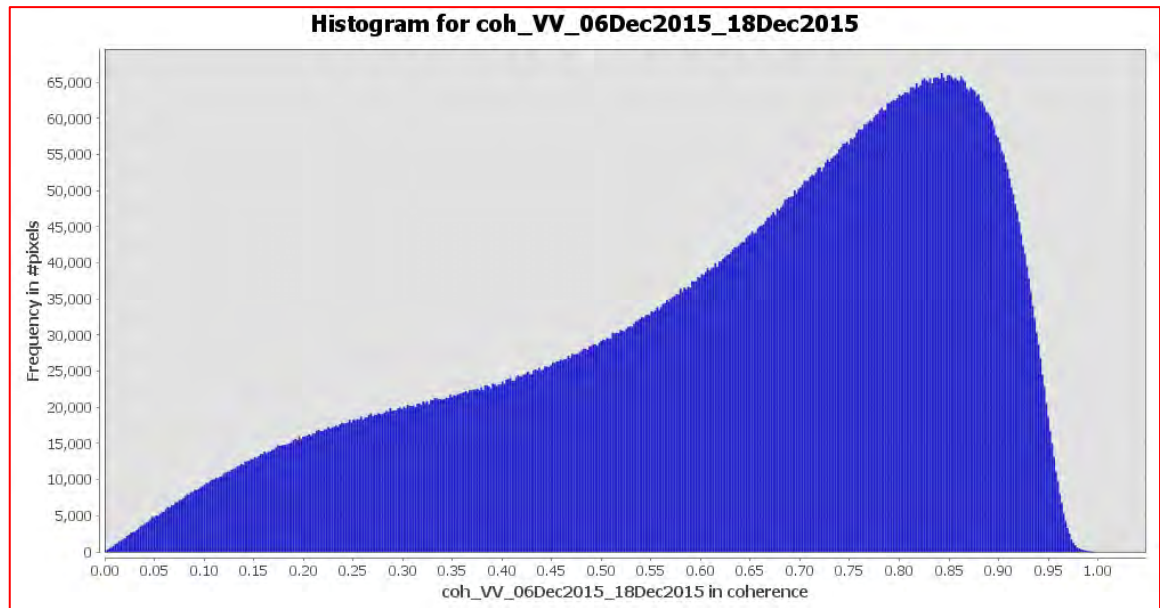


Εικόνα 4.14 Ιστόγραμμα συμβολογραφήματος με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή (ιδία επεξεργασία)

Σε αυτό το συμβολογράφημα παρατηρείται η εντονότερη συμμετοχή της τοπογραφίας καθώς η χρωματικοί κύκλοι είναι ευδιάκριτοι, κάτι το οποίο οφείλεται στην μεγάλη βασική κάθετη γραμμή του ζεύγους εικόνων. Επίσης κατά τον υπολογισμό του συμβολογραφήματος, υπολογίζεται και η μπάντα με την συνοχή ή συνάφεια (coherence), του ζεύγους εικόνων η οποία δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα του συμβολογραφήματος, αλλά και για την ένταση των ανακλάσεων της ακτινοβολίας από τους στόχους της επιφάνειας.



Εικόνα 4.15 Συνοχή ζεύγους εικόνων (ιδία επεξεργασία)



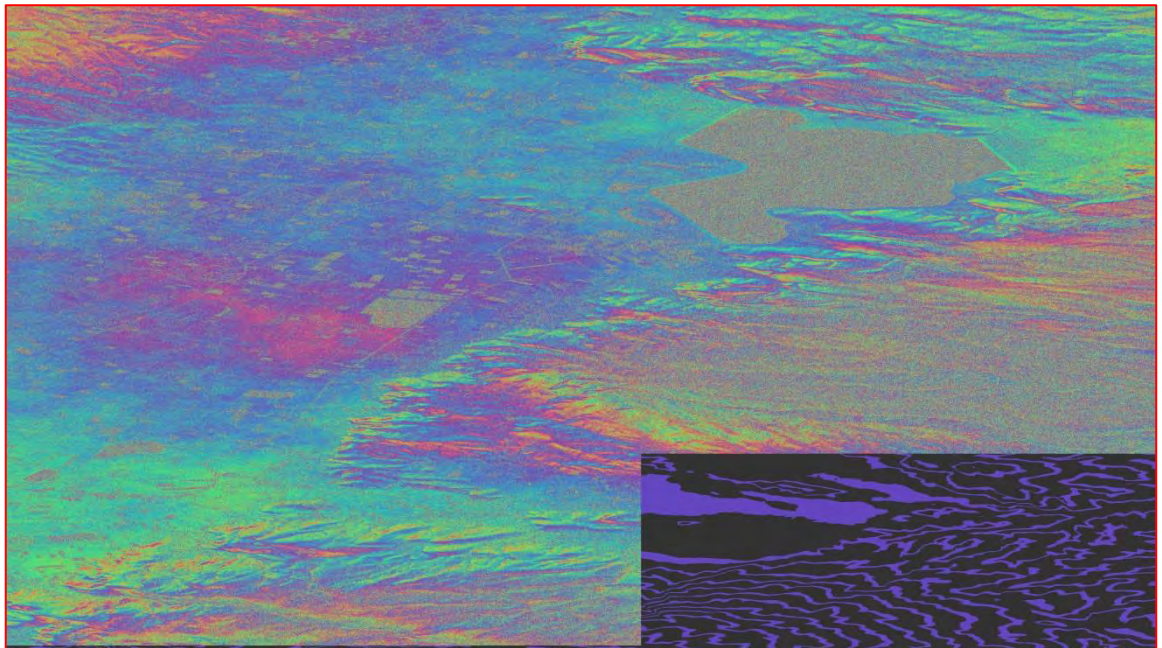
Εικόνα 4.16 Ιστόγραμμα συνοχής ζεύγους εικόνων (ιδία επεξεργασία)

Το συγκεκριμένο ζεύγος χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλή συνοχή, κάτι το οποίο είναι εμφανές και από το ιστόγραμμα. Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των στόχων αντανακλούν μεγάλα ποσά ακτινοβολίας και εμφανίζονται φωτεινότερα από άλλους στόχους που ανακλούν πολύ μικρά ποσά. Πέραν της δυνατότητας ανάκλασης, κάποια pixel κυρίως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο εμφανίζονται μαύρα, το οποίο οφείλεται στις σκιάσεις του ανάγλυφου που δημιουργούνται κατά την τροχιά καταγραφής (αύξουσα ή φθίνουσα) του δορυφόρου.

4.4.3 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ

Η αφαίρεση της τοπογραφίας είναι το βήμα που διαχωρίζει την βασική συμβολομετρία, η οποία χρησιμοποιείται για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους, με την διαφορική συμβολομετρία, η οποία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου βήματος απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής το οποίο αποτελεί το κλειδί της αφαίρεσης της τοπογραφίας από την περιοχή μελέτης. Υπάρχουν αρκετά ελεύθερα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που καλύπτουν την παγκόσμια κλίμακα, τα οποία βέβαια δεν χαρακτηρίζονται για την υψηλή τους ανάλυση. Έχει αναφερθεί ότι όσο καλύτερο είναι το μοντέλο εδάφους, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα της αφαίρεσης της τοπογραφίας. Βέβαια αυτό επηρεάζει ζεύγη εικόνων με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη συμμετοχή της τοπογραφίας, ενώ ζεύγη με μικρή βασική κάθετη γραμμή απαιτούν μοντέλα εδάφους με πολύ χαμηλότερη ανάλυση.

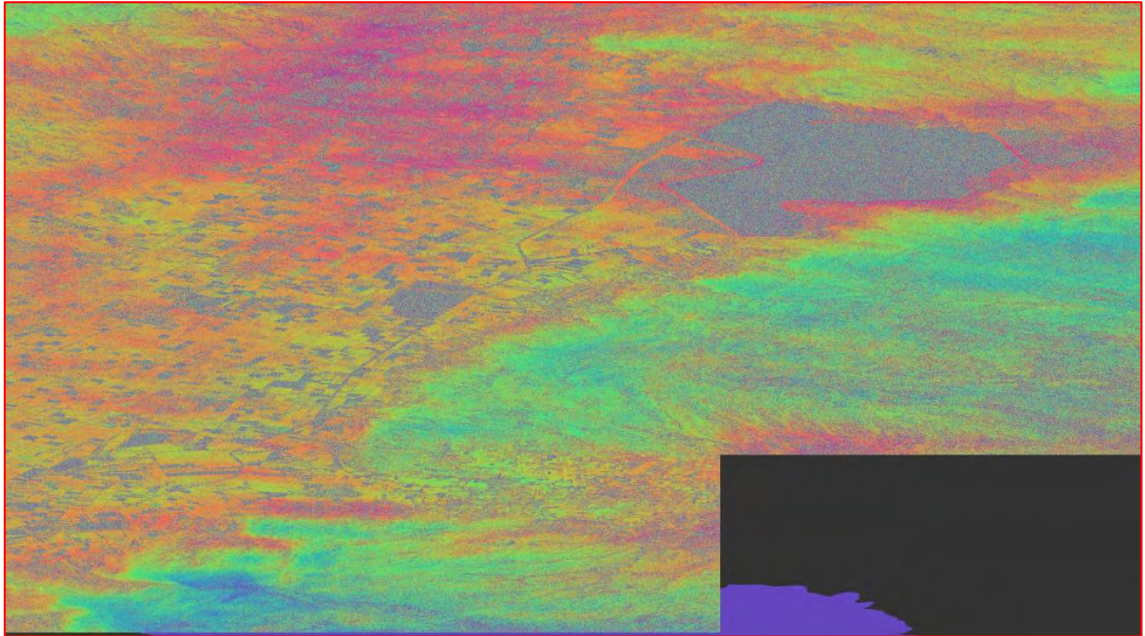
Ένα παράδειγμα θα αποτελέσει το συμβολογράφημα (εικόνα 4.12) της προηγούμενης υποενότητας το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλη βασική κάθετη γραμμή.



Εικόνα 4.17 Διαφορικό συμβολογράφημα μεγάλης βασικής κάθετης γραμμής (ιδία επεξεργασία)

Η αφαίρεση της τοπογραφίας του συγκεκριμένου συμβολογραφήματος, όπως και όλων των υπόλοιπων που παράχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, έγινε βάση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM (3 arc-seconds), το οποίο διατίθεται από την υπηρεσία της NASA, είναι άμεσα διαθέσιμο μέσα από το λογισμικό επεξεργασίας και έχει χωρική ανάλυση 90 μέτρων. Στο παραπάνω διαφορικό συμβολογράφημα, μετά την αφαίρεση της τοπογραφίας, συνεχίζεται να παρατηρείται μία συμμετοχή της, το οποίο σημαίνει ότι η αφαίρεση δεν ήταν απόλυτα επιτυχής. Αυτό έγινε διότι ο συνδυασμός της μεγάλης βασικής κάθετης γραμμής του ζεύγους, με την χρήση ενός σχετικά χαμηλής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους αποτέλεσαν τους παράγοντες ώστε να μην επιτευχθεί απόλυτη αφαίρεση της τοπογραφίας και να παραμείνει κάποια μικρή συμμετοχή της, η οποία μπορεί να δημιουργήσει θορύβους και σφάλματα στην μετέπειτα επεξεργασία. Σίγουρα θα μπορούσε να γίνει χρήση ενός καλύτερου ψηφιακού μοντέλου εδάφους για καλύτερα αποτελέσματα, αλλά ο σκοπός της εργασίας πέρα από την παρουσίαση της εφαρμογής της συμβολομετρίας στοχεύει και στην ανάδειξη των περιορισμών και αστοχιών που μπορεί να υπάρξουν. Βέβαια, αντίστοιχα με τις αστοχίες του παραπάνω συμβολογραφήματος, θα παρατεθεί και το παράδειγμα αφαίρεσης της τοπογραφίας της εικόνας 4.11, η οποία αποτελεί ένα συμβολογράφημα με μικρή βασική

κάθετη γραμμή, επομένως με μικρή συμμετοχή της τοπογραφίας απαιτούμενης μικρότερης ανάλυσης μοντέλου εδάφους.



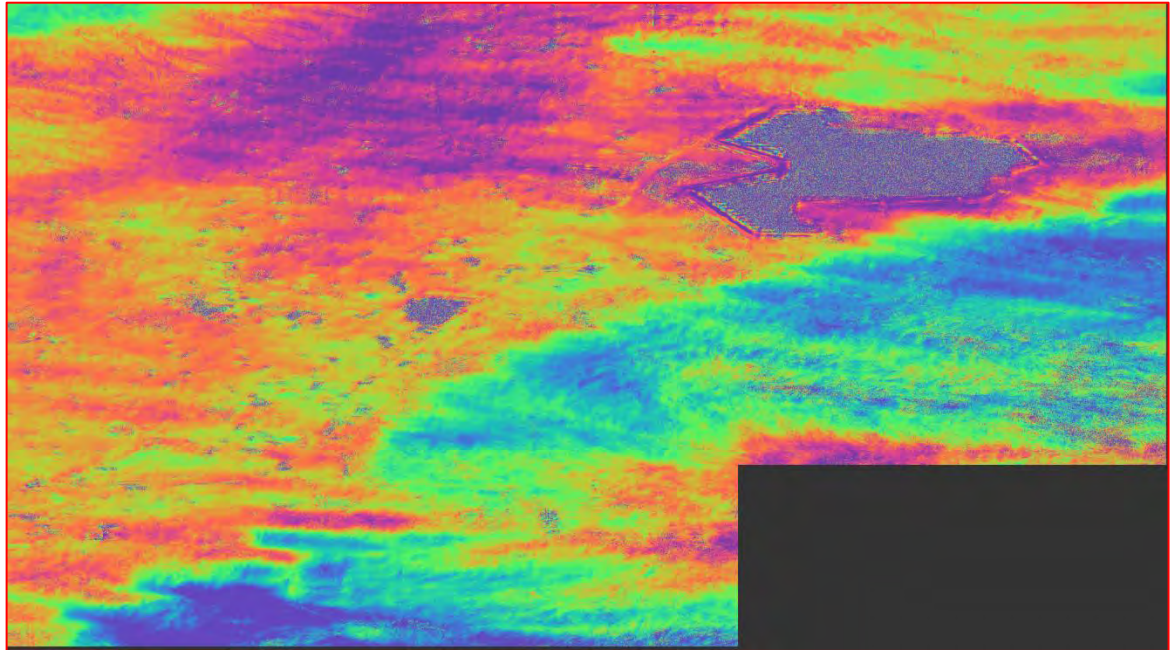
Εικόνα 4.18 Διαφορικό συμβολογράφημα μικρής βασικής κάθετης γραμμής (ιδία επεξεργασία)

Στο παραπάνω συμβολογράφημα η αφαίρεση της τοπογραφίας έχει γίνει με επιτυχία και οι διαφορές ανάμεσα στα δύο διαφορικά συμβολογραφήματα είναι αισθητή και ευδιάκριτη. Η χρησιμότητα του βήματος της αφαίρεσης της τοπογραφίας, στην ουσία είναι ότι κωδικοποιεί το διαθέσιμο μοντέλο εδάφους στο πλάτος και μήκος του συστήματος ραντάρ, αφαιρεί της τοπογραφία και «ισοπεδώνει» το συμβολογράφημα, έτσι ώστε η διαφορά της φάσης να μπορέσει να ερμηνευθεί σε τιμές μετατοπίσεων των στόχων και όχι σε υψομετρικές.

4.4.4 ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

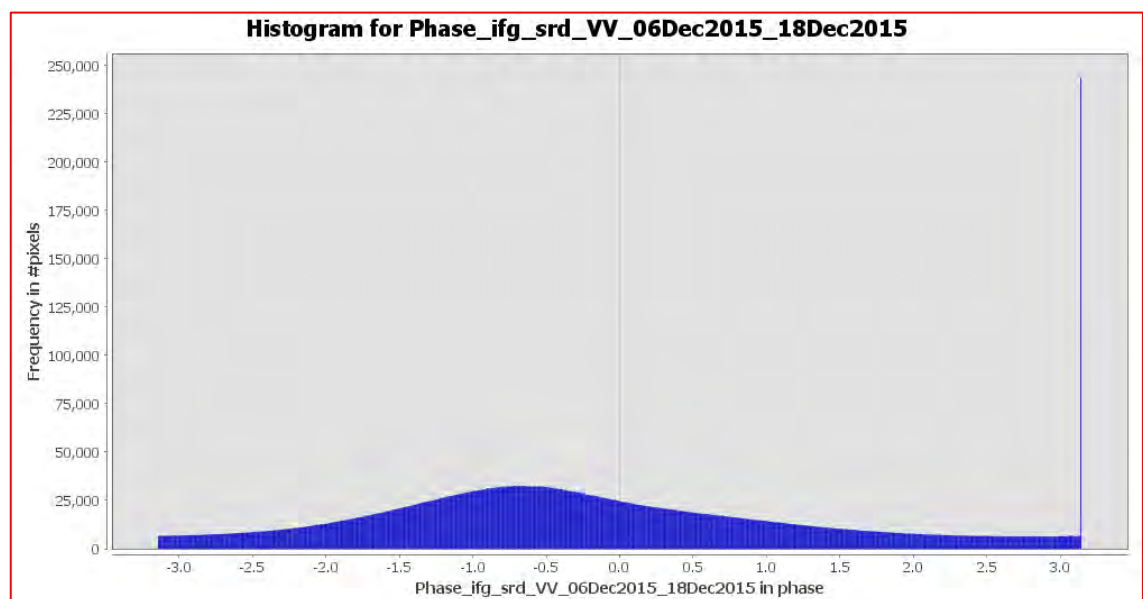
Τα συμβολογραφήματα, είτε βασικά, είτε διαφορικά, μέχρι και στο προηγούμενο βήμα που αναφέρθηκε, χαρακτηρίζονται από κάποιους σημαντικούς θορύβους οι οποίοι μπορούν να αλλοιώσουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Είναι αναγκαία λοιπόν, μία πρακτική για την βελτίωση αυτών των θορύβων, η οποία δόθηκε το 1998 από τους Goldstein και Werner. Οι πηγές θορύβου στην φάση ενός συμβολογραφήματος είναι η γεωμετρική αποσυσχέτιση, η χρονική αποσυσχέτιση, θερμικοί θόρυβοι, διαβρώσεις και αλλαγές στην κάλυψη του εδάφους. Η μέθοδος φιλτραρίσματος που προτάθηκε (Goldstein Phase Filtering Method), αποτελεί έναν μη γραμμικό αλγόριθμο, ο οποίος αφαιρεί του θορύβους, αυξάνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο ή όπως συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία SNR (signal-to-noise ratio), το οποίο βελτιώνει την ποιότητα του

συμβολογραφήματος και βοηθάει στην μετέπειτα επεξεργασία. Βέβαια οι περιοχές ή στόχοι που χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνοχή (coherence), παραμένουν θορυβώδεις (Goldstein *et.al*, 1998). Παρακάτω θα παρατεθεί ένα παράδειγμα φιλτραρίσματος φάσης της εικόνας 4.18.

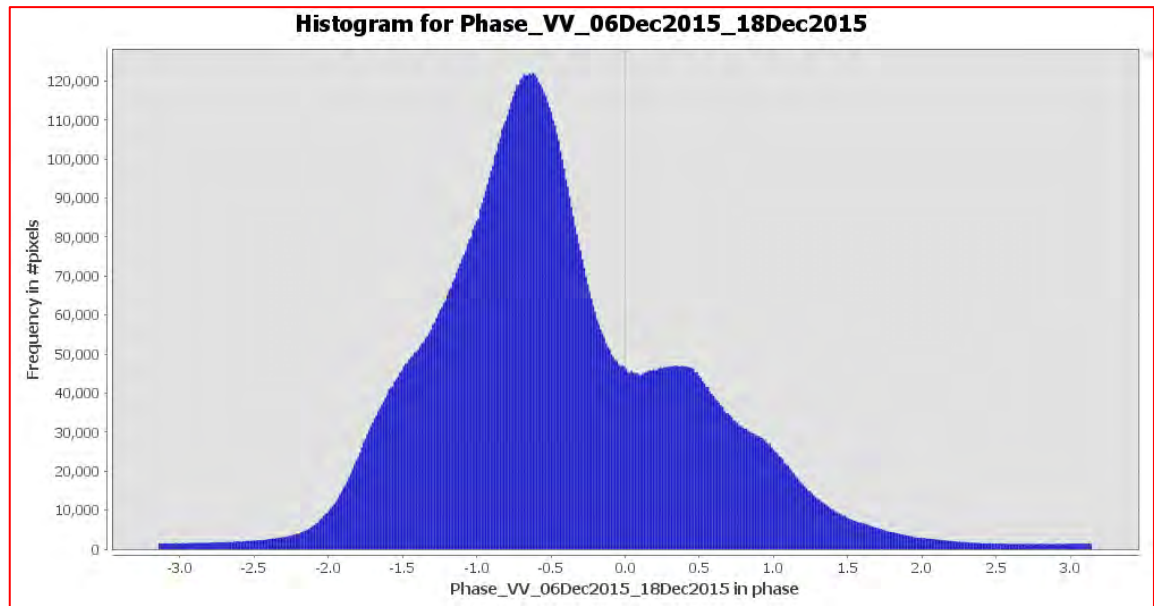


Εικόνα 4.19 Φιλτραρισμένο διαφορικό συμβολογράφημα (ιδία επεξεργασία)

Η βελτίωση της ποιότητας ανάμεσα στα δύο διαφορικά συμβολογραφήματα (εικόνες 4.18 – 4.19), είναι εμφανής και η βελτίωση του SNR, γίνεται ακόμη πιο εμφανής μελετώντας τα ιστογράμματα των δύο συμβολογραφημάτων.



Εικόνα 4.20 Ιστόγραμμα μη φιλτραρισμένης φάσης (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 4.21 Ιστόγραμμα φιλτραρισμένης φάσης (ιδία επεξεργασία)

Η τεράστια αύξηση του SNR, των pixel που χαρακτηρίζονται από μια αξιόλογη συνοχή περιγράφεται με ακρίβεια από την μελέτη των δύο ιστογραμμάτων.

4.4.5 «ΞΕΤΥΛΙΓΜΑ» ΦΑΣΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

Το φιλτραρισμένο συμβολογράφημα χαρακτηρίζεται από το διαφορούμενο υψόμετρο (altitude of ambiguity), δηλαδή η φάση του συμβολογραφήματος παρέχει μία διαφορούμενη μέτρηση των σχετικών υψομέτρων του εδάφους, λόγω της κυκλικής φύσης της μέτρησής της στην κλίμακα 2π . Αυτό το διαφορούμενο ύψος ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά, η οποία δημιουργεί μία αλλαγή φάσης 2π . Ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού του είναι (Ferretti *et.al*, 2007):

$$ha = \frac{\lambda R \sin \theta}{2Bp}$$

Οι ερμηνεία των παραμέτρων τη εξίσωσης είναι:

- λ = μήκος κύματος
- R = απόσταση δορυφόρου-στόχου
- θ = γωνία πρόσπτωσης.
- Bp = βασική κάθετη γραμμή.

Το «ξετύλιγμα» της φάσης λοιπόν, λύνει το πρόβλημα των διαφορούμενων μετρήσεων, ενσωματώνοντας την διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών pixels. Αυτό επιτυγχάνει την μέτρηση των απόλυτων τιμών, στις πραγματικές υψομετρικές μεταβολές (Luis Veci, 2015).

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξαρτώνται από την συνοχή που χαρακτηρίζει το κάθε συμβολογράφημα. Έχουν γίνει αρκετές προσεγγίσεις για την διαδικασία του «ξετυλίγματος», της φάσης. Μία από τις επικρατέστερες προσεγγίσεις αποτελεί ο αλγόριθμος «Snaphu», γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C, από τους Chen και Zebker. Αποτελεί έναν αλγόριθμο στατιστικού κόστους, όπου θέτει το «ξετύλιγμα» της φάσης ως πρόβλημα και βρίσκει την καλύτερη δυνατή λύση. Χρησιμοποιείται για την βασική και διαφορική συμβολομετρία, είναι ανοιχτού κώδικα και λειτουργεί μόνο σε περιβάλλον Unix/Linux. Οπότε γίνεται αντιληπτό ότι το «ξετύλιγμα της φάσης» αποτελεί ένα βήμα το οποίο εκτελείται εκτός του λογισμικού επεξεργασίας και προϋποθέτει κάποιες πολύ λίγες βασικές γνώσεις πάνω σε περιβάλλον Linux. Επίσης με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο εκτελέστηκαν όλα τα «ξετυλίγματα» φάσεων που παράχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Παρακάτω παρατίθεται μία εικόνα παράδειγμα κατά την επεξεργασία του αλγορίθμου Snaphu.

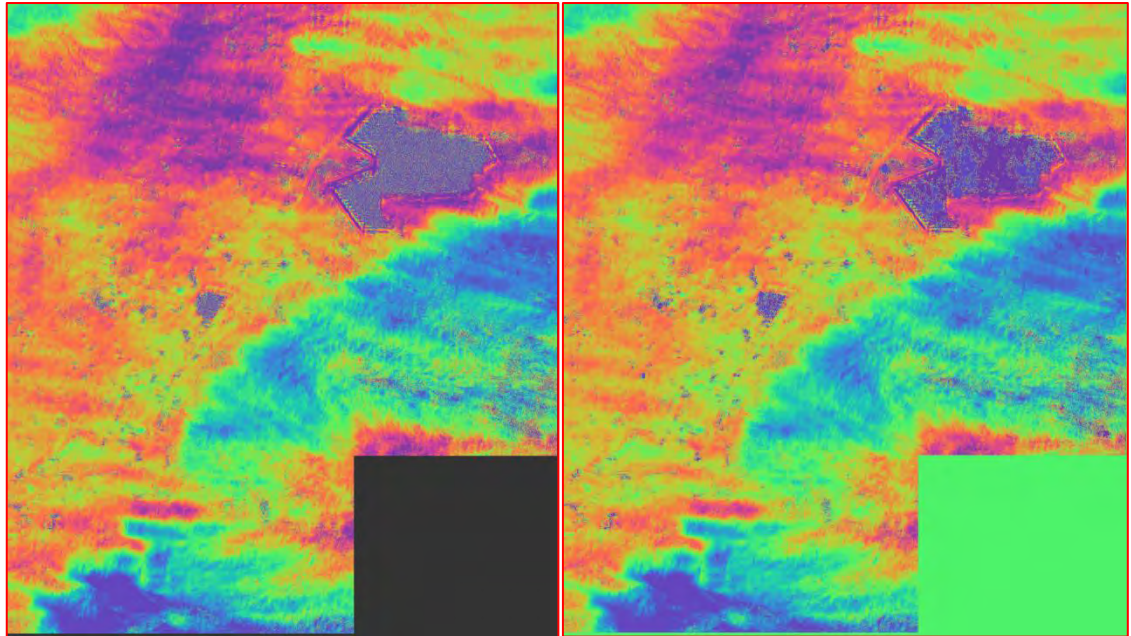
```

vasilisgeo@vasilis-ubuntu: /media/vasilisgeo/7B8E-C10A/snaphu/subset_0_of_interferogram_deb_fit$
Unwrapping tile at row 7, column 7 (pid 4338)
Unwrapping tile at row 7, column 8 (pid 4339)
Unwrapping tile at row 7, column 9 (pid 4340)
Unwrapping tile at row 8, column 0 (pid 4341)
Unwrapping tile at row 8, column 1 (pid 4342)
Unwrapping tile at row 8, column 2 (pid 4343)
Unwrapping tile at row 8, column 3 (pid 4344)
Unwrapping tile at row 8, column 4 (pid 4345)
Unwrapping tile at row 8, column 5 (pid 4347)
Unwrapping tile at row 8, column 6 (pid 4348)
Unwrapping tile at row 8, column 7 (pid 4349)
Unwrapping tile at row 8, column 8 (pid 4351)
Unwrapping tile at row 8, column 9 (pid 4352)
Unwrapping tile at row 9, column 0 (pid 4353)
Unwrapping tile at row 9, column 1 (pid 4354)
Unwrapping tile at row 9, column 2 (pid 4355)
Unwrapping tile at row 9, column 3 (pid 4356)
Unwrapping tile at row 9, column 4 (pid 4357)
Unwrapping tile at row 9, column 5 (pid 4358)
Unwrapping tile at row 9, column 6 (pid 4359)
Unwrapping tile at row 9, column 7 (pid 4360)
Unwrapping tile at row 9, column 8 (pid 4361)
Unwrapping tile at row 9, column 9 (pid 4364)
Assembling tiles
Running optimizer for secondary network
Flow increment: 1 (Total improvements: 0)
28 incremental costs clipped to avoid overflow (0.000%)
Treesize: 40585 Pivots: 212816 Improvements: 3207
Flow increment: 2 (Total improvements: 3207)
6 incremental costs clipped to avoid overflow (0.000%)
Treesize: 40585 Pivots: 30 Improvements: 0
Flow increment: 3 (Total improvements: 3207)
6 incremental costs clipped to avoid overflow (0.000%)
Treesize: 40585 Pivots: 1 Improvements: 0
Flow increment: 4 (Total improvements: 3207)
6 incremental costs clipped to avoid overflow (0.000%)
Treesize: 40585 Pivots: 0 Improvements: 0
Integrating secondary flows
Output written to file UnwPhase_ifg_srp_IW2_VV_16Feb2016_10Apr2015.snaphu.img
Program snaphu done
Elapsed processor time: 0:05:49.48
Elapsed wall clock time: 0:03:33
vasilisgeo@vasilis-ubuntu: /media/vasilisgeo/7B8E-C10A/snaphu/subset_0_of_interferogram_deb_fit$

```

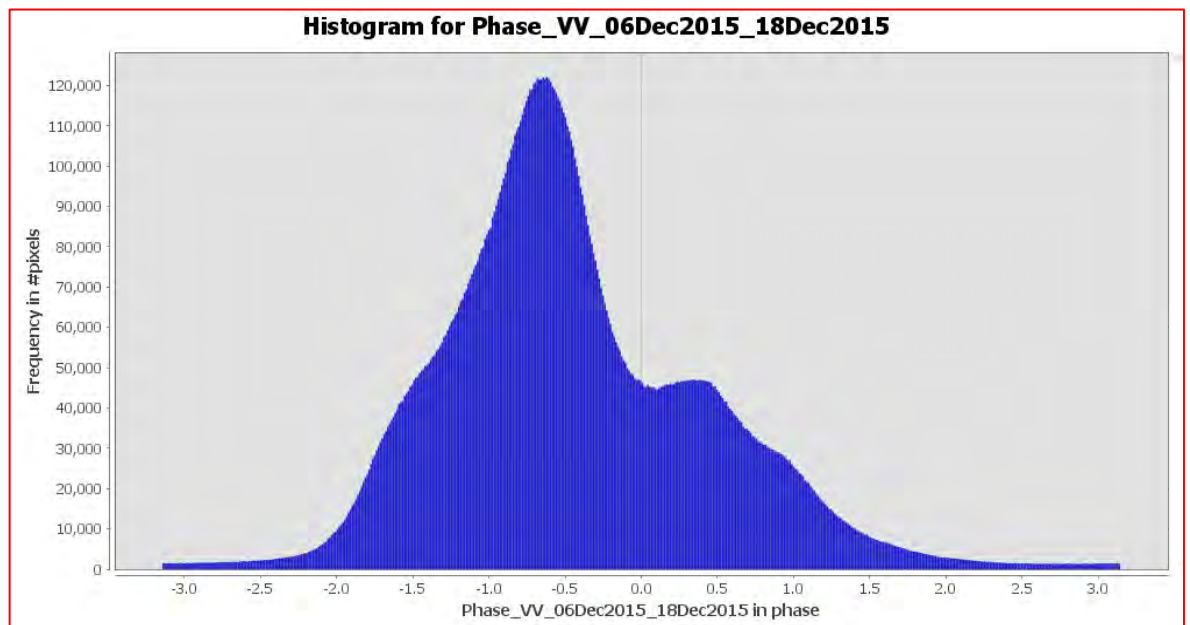
Εικόνα 4.22 Επεξεργασία αλγορίθμου Snaphu (ιδία επεξεργασία)

Ένα παράδειγμα αποτελέσματος μετά το «ξετύλιγμα» της φάσης αποτελεί το παρακάτω

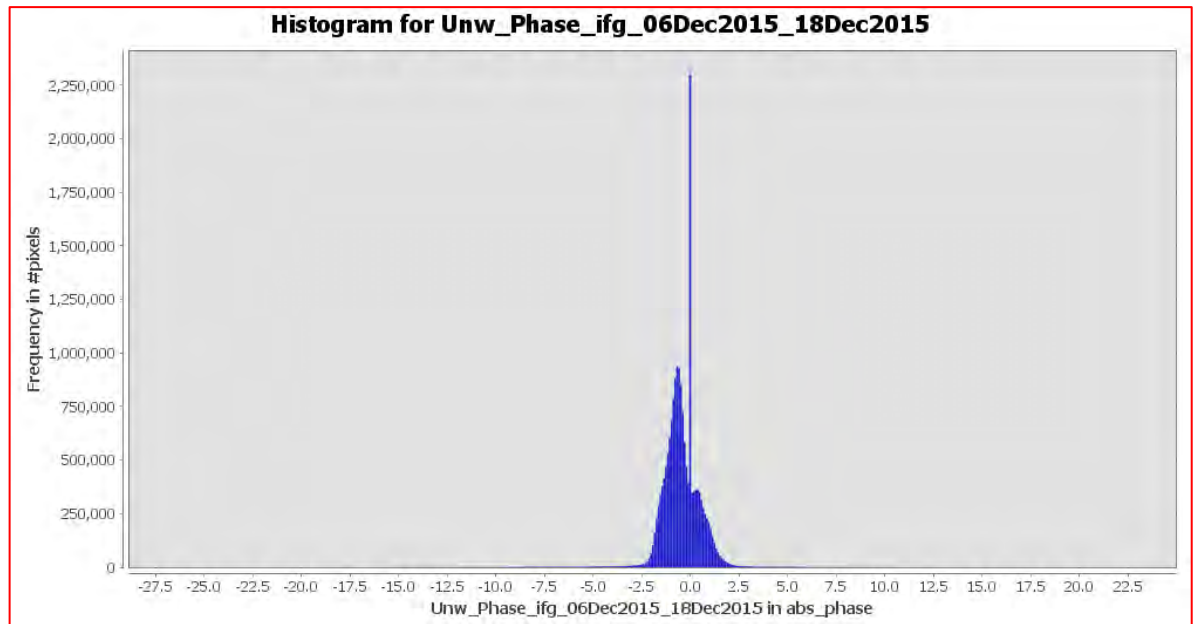


Εικόνα 4.23 Αριστερά φιλτραρισμένο συμβολογράφημα, Δεξιά φιλτραρισμένο συμβολογράφημα μετά το ξετύλιγμα της φάσης (ιδία επεξεργασία)

Η διαφορά των παραπάνω εικόνων δεν είναι ευδιάκριτη αλλά οι αλλαγές εμφανίζονται στα συμβολογραφήματα των δύο εικόνων.



Εικόνα 4.24 Ιστόγραμμα φιλτραρισμένου συμβολογραφήματος (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 4.25 Ιστόγραμμα μετά το «ξετύλιγμα» της φάσης (ιδία επεξεργασία)

Παρατηρούμε ότι στο ιστόγραμμα του «ξετυλίγματος», η φάση πλέον δεν είναι μετρήσιμη στην κλίμακα 2π , αλλά έχει λυθεί το πρόβλημα των διφορούμενων μετρήσεων και η μέτρηση εκφράζεται με τις απόλυτες τιμές της φάσης (*abs_phase*), όπου το μόνο που χρειάζεται είναι η μετατροπή σε τιμές μετατοπίσεων, το οποίο αποτελεί το επόμενο βήμα της διαδικασίας επεξεργασίας.

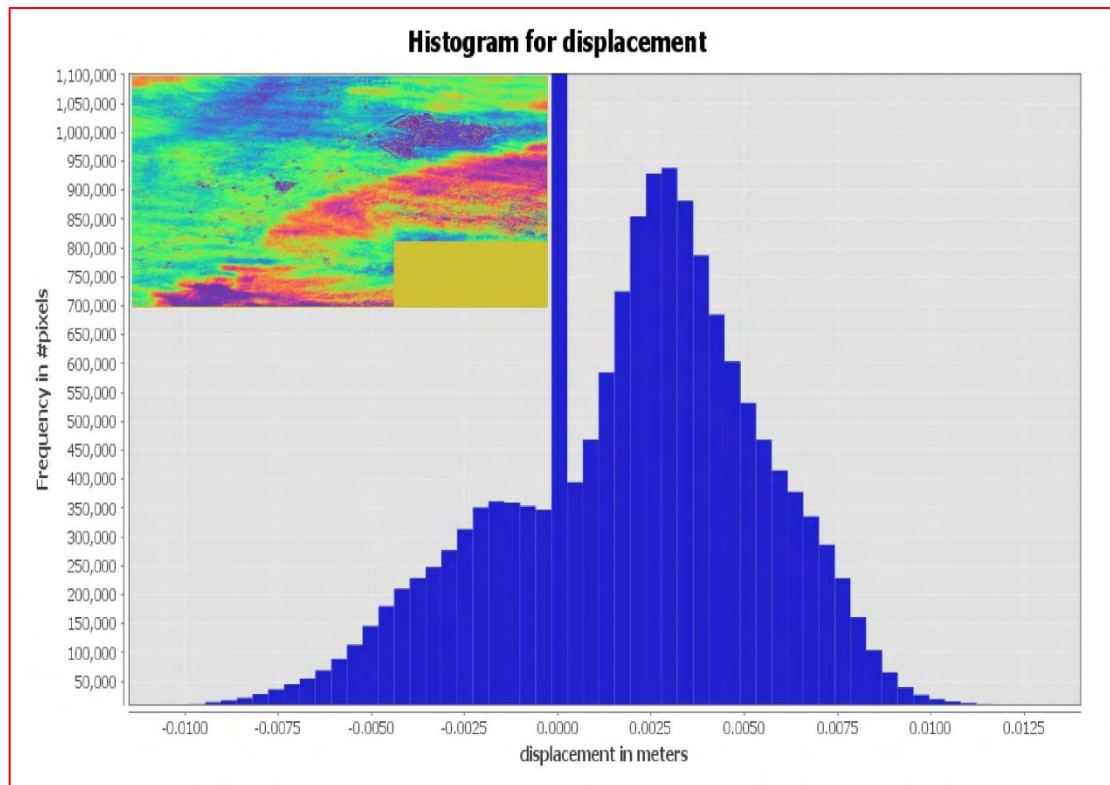
4.4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η μετατροπή σε τιμές μετατοπίσεων είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία η οποία εκτελείται από το λογισμικό επεξεργασίας. Βέβαια μέσα από το «help contents», του λογισμικού είναι διαθέσιμος ο τύπος μετατροπής της «ξετυλιγμένης» φάσης σε τιμές μετατοπίσεων. Η σχέση είναι:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi$$

- d = μετατόπιση
- λ = μήκος κύματος
- $\Delta\varphi$ = φάση συμβολομετρίας

Ένα παράδειγμα μετατροπής της φάσης σε τιμές μετατοπίσεων είναι το παρακάτω



Εικόνα 4.26 Χάρτης και ιστόγραμμα μετατοπίσεων (ιδία επεξεργασία)

Είναι εμφανές από το ιστόγραμμα ότι οι τιμές έχουν αλλάξει σε μέτρα εκφράζοντας τις τιμές των μετατοπίσεων. Το επόμενο βήμα αποτελεί την γεωμετρική διόρθωση του χάρτη μετατοπίσεων καθώς μέχρι στιγμής εκφράζεται από την γεωμετρία του συστήματος ραντάρ. Στην ουσία πραγματοποιείται μία ορθοαναγωγή για τον ορισμό προβολικού συστήματος μέσω του αλγορίθμου «Range Doppler Terrain Correction», ο οποίος με την βοήθεια ενός διαθέσιμου ψηφιακού μοντέλου εδάφους αναγάγει τον χάρτη μετατοπίσεων σε ένα από τα γνωστά συστήματα συντεταγμένων της επιλογής μας. Να αναφερθεί ότι υπάρχει η επιλογή άμεσης αναγωγής του χάρτη στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87'. Βέβαια τα αποτελέσματα και όλοι οι χάρτες της συγκεκριμένης εργασίας είναι στο παγκόσμιο προβολικό σύστημα WGS 84. Πλέον ο χάρτης μετατοπίσεων εκφράζεται από σύστημα συντεταγμένων, μόνο που οι τιμές είναι σχετικές καθώς αποδίδονται από την οπτική γραμμή (line of sight) του δορυφόρου. Είναι σημαντικό λοιπόν να επιλεγεί ένα σημείο αναφοράς στην περιοχή μελέτης για την εξάρτηση των υπόλοιπων σημείων. Αυτό χρειάζεται καθώς ο γενικός κανόνας είναι ότι το σημείο A έχει μετατοπιστεί x μέτρα από το σημείο B. Έτσι λοιπόν η μετατόπιση του σημείου αναφοράς μηδενίζεται και θεωρείται σταθερό, όπου οι τιμές μετατοπίσεων των υπόλοιπων σημείων εξαρτώνται από αυτό. Είναι ορθό, η επιλογή του σημείου αναφοράς να γίνεται βάση της συνοχής (coherence)

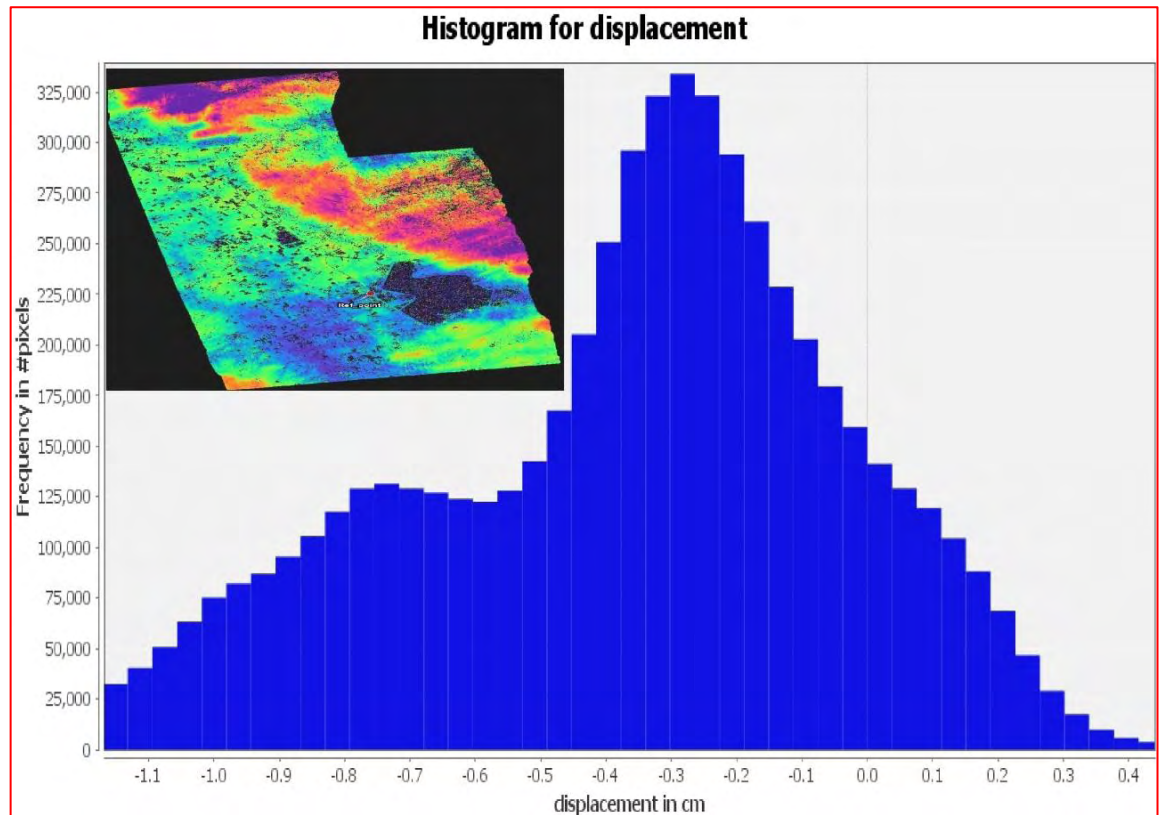
που παρουσιάζει το σημείο σε βάθος χρόνου. Παράδειγμα η επιλογή ενός κτιρίου σαν σημείο αναφοράς είναι αρκετά καλή, καθώς γνωρίζουμε ότι αποτελεί ένα σταθερό ανακλαστή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία δεν μεταβάλλεται στον χρόνο και έτσι μπορούμε να το θεωρήσουμε ως ένα σταθερό σημείο. Επίσης είναι σημαντικό σε μία μελέτη χρονοσειράς το σταθερό σημείο να είναι το ίδιο. Το σταθερό σημείο που επιλέχθηκε για την εργασία αποτελεί ένα κτίριο της μονάδας Αεροπορίας Στρατού στον οικισμό Στεφανοβίκειο.



Εικόνα 4.27 Χρήση κτιρίου ως σημείο αναφοράς (ιδία επεξεργασία)

Το συγκεκριμένο σημείο παρατηρήθηκε να παρουσιάζει μεγάλα και συνεχόμενα ποσά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αμετάβλητα στον χρόνο, ως αποτέλεσμα να θεωρηθεί ένας σταθερός ανακλαστής και να αποτελέσει το σταθερό σημείο αναφοράς. Επιπλέον στο τελικό αποτέλεσμα κάθε συμβολογραφήματος είναι σημαντικό να αφαιρεθούν τα pixels τα οποία χαρακτηρίζονται από αρκετά χαμηλή συνοχή. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της δημιουργίας μάσκας με βάση την συνοχή στον τελικό χάρτη. Η επιλογή του εύρους τιμών της μάσκας συνοχής, καθώς έχουμε αναφέρει ότι μετράται σε μία κλίμακα από το 0 έως 1, είναι σχετική. Σίγουρα σε οποιαδήποτε περιοχή μελέτης αφαιρούνται σημεία που παρουσιάζουν συνοχή $\text{coherence} < 0.3$, καθώς αυτά τα σημεία αποτελούν σχεδόν μόνο θορύβους. Στην συγκεκριμένη εργασία έγιναν διάφορες προσεγγίσεις όσο αναφορά το εύρος της μάσκας συνοχής και για κάθε συμβολογράφηκα έχει δημιουργηθεί ένας χάρτης μετατοπίσεων με μάσκες, $\text{coh} \geq 0.3$ και $\text{coh} \geq 0.6$.

Παρακάτω θα παρατεθεί ένα παράδειγμα μετατοπίσεων εξαρτώμενο από το σταθερό σημείο με μάσκα συνοχής $\text{coh.} \geq 0.3$.



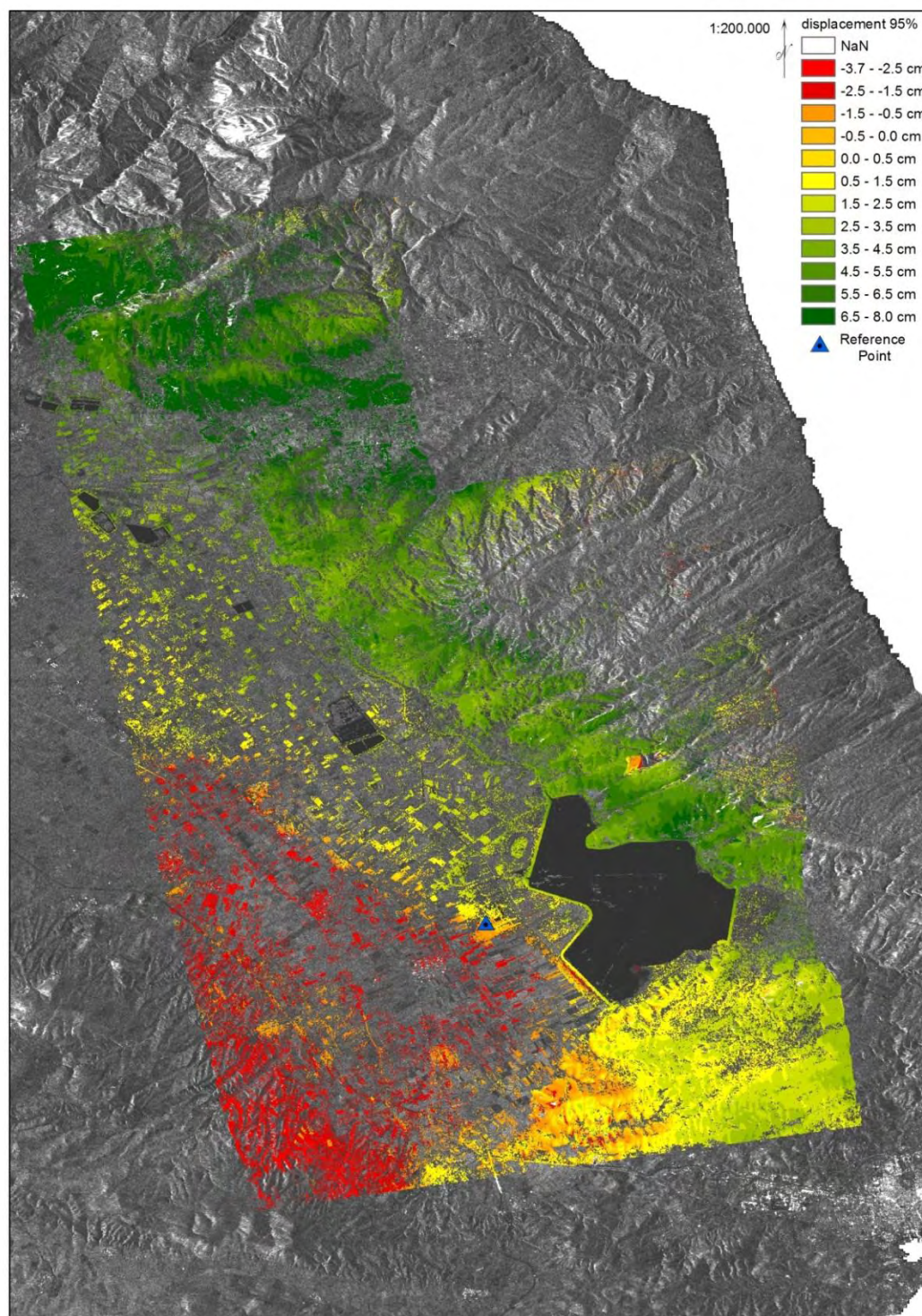
Εικόνα 4.28 Χάρτης μετατοπίσεων με μάσκα $\text{coh.} \geq 0.3$ μαζί με το ιστόγραμμα
(ιδία επεξεργασία)

Το αποτέλεσμα εκφράζεται σε ένα σύστημα αναφοράς και οι τιμές των μετατοπίσεων εκφράζονται στην κλίμακα των εκατοστών με βάση το σταθερό σημείο. Αν παρατηρήσουμε το ιστόγραμμα βλέπουμε στην τιμή μηδέν ότι υπάρχει μία πολύ λεπτή γραμμή. Αυτή εκφράζει το pixel του σημείου αναφοράς καθώς η τιμή του μηδενίστηκε.

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία της επεξεργασίας ολοκληρώθηκε, υπολογίζοντας 36 διαφορεικά συμβολογραφήματα, με χωρική ανάλυση 13 μέτρα. Σε αρκετά από αυτά, παρατηρήθηκε μία σχετικά χαμηλή μέση συνοχή, για το οποίο ευθύνεται ο συνδυασμός, των χρονικών αποσυσχετίσεων λόγω της μη διαθεσιμότητας κάποιων δεδομένων με βάση το χρονικό διάστημα επαναληψιμότητας λήψεων του δορυφόρου, με τον χαρακτήρα της περιοχής μελέτης, ο οποίος περιγράφεται ως αγροτικός και χαρακτηρίζεται από συνεχόμενες αλλαγές στην κάλυψη του εδάφους. Επιπλέον σε κάποια συμβολογραφήματα με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή, παρατηρήθηκαν κάποιες ακραίες τιμές μετατοπίσεων, οι οποίες ερμηνεύονται ως σφάλματα της αφαίρεσης της τοπογραφίας, λόγω της χρήσης χαμηλής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Οι παραπάνω περιορισμοί δεν επιτρέπουν την χρήση όλων των συμβολογραφημάτων για τον υπολογισμό της ετήσιας συνολικής μετατόπισης. Θα πρέπει κάποια να απορριφτούν για την ορθότητα των αποτελεσμάτων, οδηγώντας σε μία δειγματοληπτική έρευνα για την περιοχή μελέτης. Βέβαια, αυτό δεν σημαίνει ότι τα συμβολογραφήματα με χαμηλή συνοχή δεν είναι χρήσιμα, καθώς διαθέτουν χρήσιμες πληροφορίες για την μελέτη υπό-περιοχών, όπως οι οικισμοί ή η λίμνη Κάρλα, που παρουσιάζουν σταθερά μεγάλη συνοχή κατά την συνολική χρονική διάρκεια της έρευνας, προσφέροντας αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια. Το ερώτημα είναι με ποιόν τρόπο θα μπορούσαν να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί; Η απάντηση είναι με την προσέγγιση της έρευνας βάση της τεχνικής PSI, η οποία έχει την δυνατότητα να ξεπερνάει τους παραπάνω περιορισμούς. Παρακάτω θα παρατεθεί το πρώτο αποτέλεσμα, το οποίο αφορά την συνολική περιοχή μελέτης. Τα κριτήρια με τα οποία απορρίφθηκαν κάποια συμβολογραφήματα αποτελούν η μικρή μέση συνοχή και οι μεγάλες βασικές κάθετες γραμμές. Με τεχνικούς όρους τα συμβολογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν για το αποτέλεσμα χαρακτηρίζονται από μέση συνοχή $coh. \geq 0.49$ και βασική κάθετη γραμμή $Bp \leq 80.00$ m. Επίσης αποτελούν δείγματα που αφορούν όλους τους μήνες, εκτός του μήνα Μαΐου. Το αποτέλεσμα θα παρουσιασθεί με μία τυπική απόκλιση 95% για την απόρριψη κάποιων ακραίων τιμών.

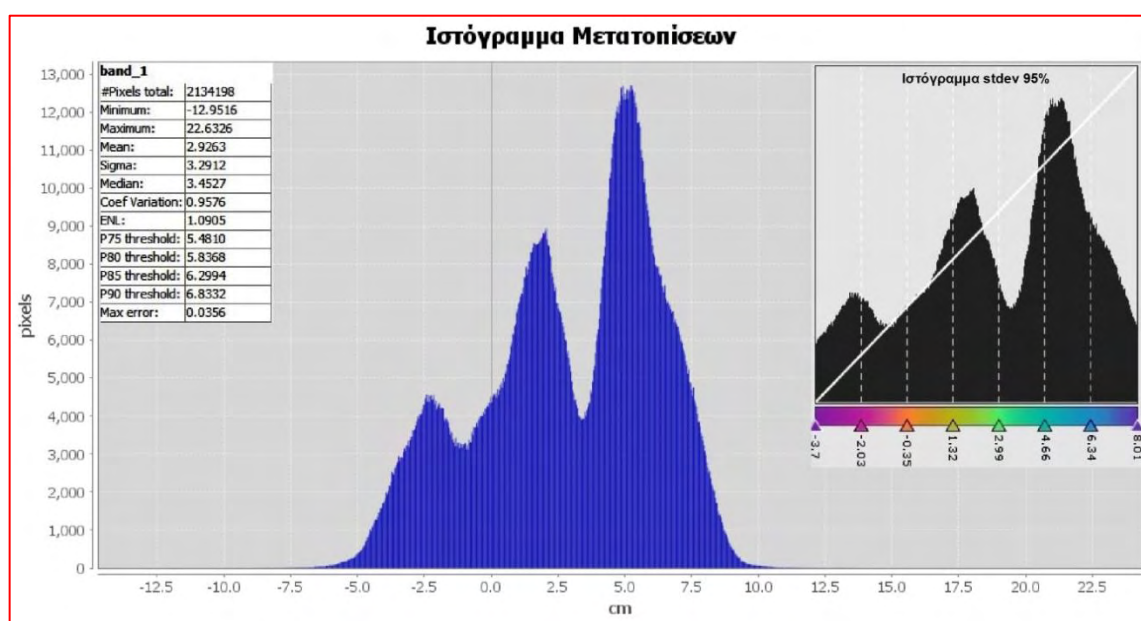


Εικόνα 5.1 Χάρτης συνολικής ετήσιας μετατόπισης βάση δειγματοληψίας (ιδία επεξεργασία)

Στον τελικό χάρτη των αποτελεσμάτων παρατηρείται μία ετήσια εδαφική υποχώρηση στο ΝΔ κομμάτι της περιοχής μελέτης, όπου εμπίπτουν οικισμοί, όπου στο παρελθόν έχουν παρουσιάσει σοβαρά προβλήματα καθιζήσεων και ρηγματώσεων, λόγω της αλόγιστης χρήσης και υπεράντλησης του υπόγειου υδροφορέα για αρδευτικούς κυρίως σκοπούς.

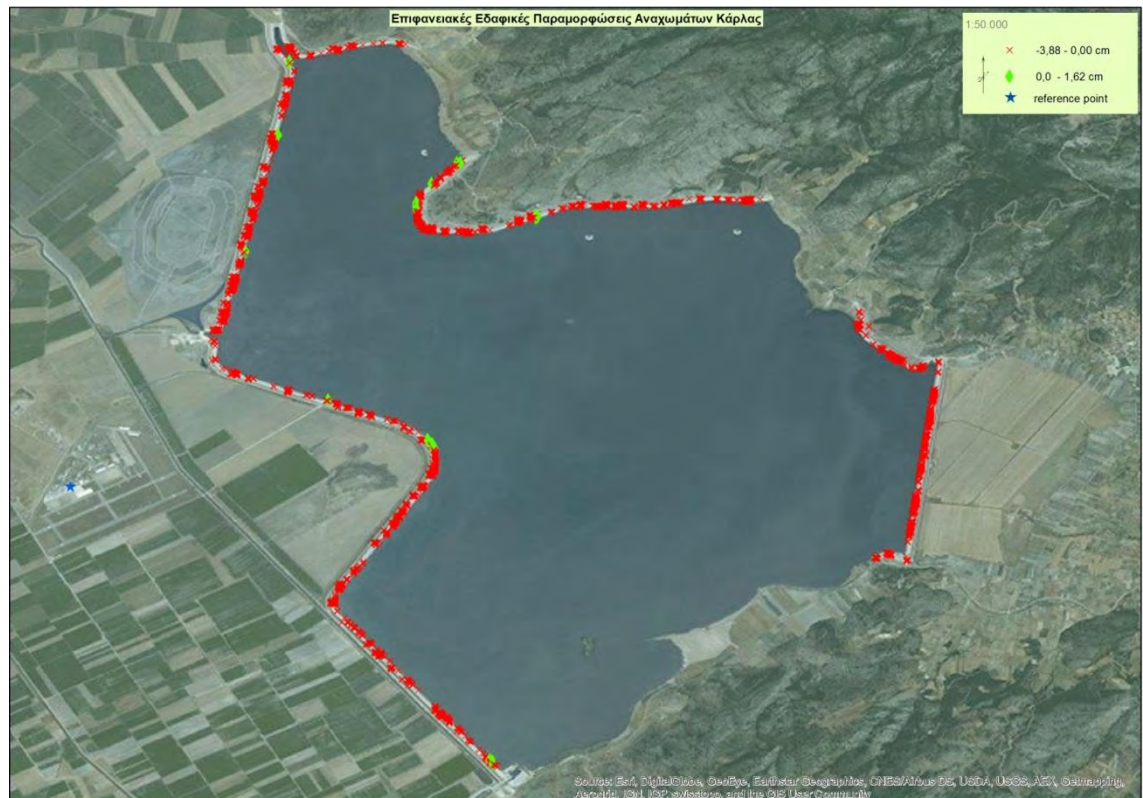


Εικόνα 5.2 Εδαφικές υποχωρήσεις ετήσιας δειγματοληψίας (ιδία επεξεργασία)

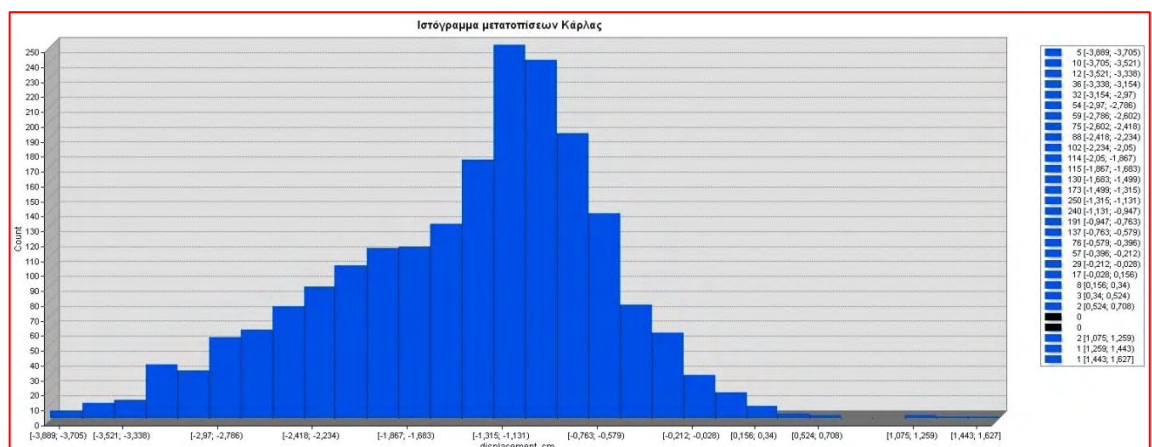


Εικόνα 5.3 Ιστογράμματα και στατιστικά (ιδία επεξεργασία)

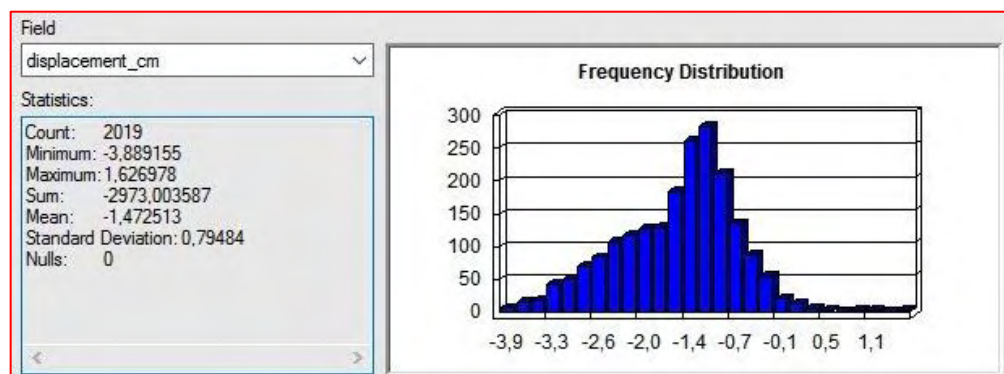
Το επόμενο αποτέλεσμα αφορά τα αναχώματα περιμετρικά της λίμνης Κάρλας, για το οποίο έχουν αξιοποιηθεί όλα τα συμβολογραφήματα που παράχθηκαν, καθώς η περιοχή αποτέλεσε σταθερό ανακλαστή κατά την συνολική χρονική διάρκεια της έρευνας. Επιπλέον, αυτό επέτρεψε την χρήση μάσκας με πολύ υψηλή συνοχή coherence ≥ 0.6 , κάτι το οποίο βοηθάει στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.4 Χάρτης ετήσιων εδαφικών παραμορφώσεων περιμετρικά της λίμνης Κάρλας (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 5.5 Ιστογράμμο εδαφικών παραμορφώσεων της Κάρλας (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 5.6 Στατιστικά εδαφικών παραμορφώσεων της Κάρλας (ιδία επεξεργασία)

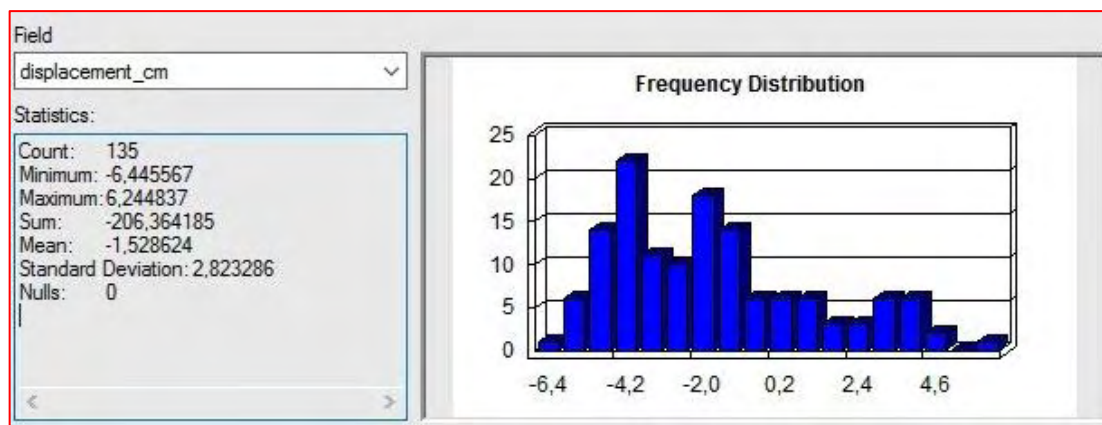
Από τον χάρτη αποτελεσμάτων παρατηρείται μια μία γενική ετήσια επιφανειακή εδαφική υποχώρηση των αναχωμάτων της λίμνης, όπου βάση των στατιστικών η μέση τιμή ισούται με -1.47 cm. Το τελευταίο αποτέλεσμα αφορά επιλεγμένους οικισμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης, όπου κατά το παρελθόν έχουν εμφανίσει έντονα φαινόμενα καθιζήσεων και ρηγματώσεων, όπως παράδειγμα οι οικισμοί του Κιλελέρ και της Νίκης. Έγινε χρήση όλων των παραγόμενων συμβολογραφημάτων και η μάσκα συνοχής παραμένει υψηλή και σε αυτό το αποτέλεσμα coherence ≥ 0.6 , για την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.7 Χάρτης εδαφικών παραμορφώσεων οικισμών (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 5.8 Ιστόγραμμα εδαφικών παραμορφώσεων οικισμών (ιδία επεξεργασία)



Εικόνα 5.9 Στατιστικά εδαφικών παραμορφώσεων οικισμών (ιδία επεξεργασία)

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μία σημαντική ετήσια εδαφική υποχώρηση στους οικισμούς Αρμένιο, Σωτήριο και Νίκη. Αντιθέτως οι οικισμοί του Κιλελέρ και του Αχίλλειου παρουσιάζουν μία εδαφική ανύψωση. Γενικά βάση των στατιστικών η μέση τιμή παραμορφώσεων της περιοχής είναι αρνητική και ανέρχεται στην τιμή -1.52 cm. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι οι ακραίες τιμές των παραμορφώσεων ταυτίζονται όπως φαίνεται από των πίνακα των στατιστικών με την αρνητική ακραία τιμή να ανέρχεται στα -6.44 cm και την θετική ακραία τιμή να ανέρχεται στα 6.24 cm.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.2.1 ΕΙΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

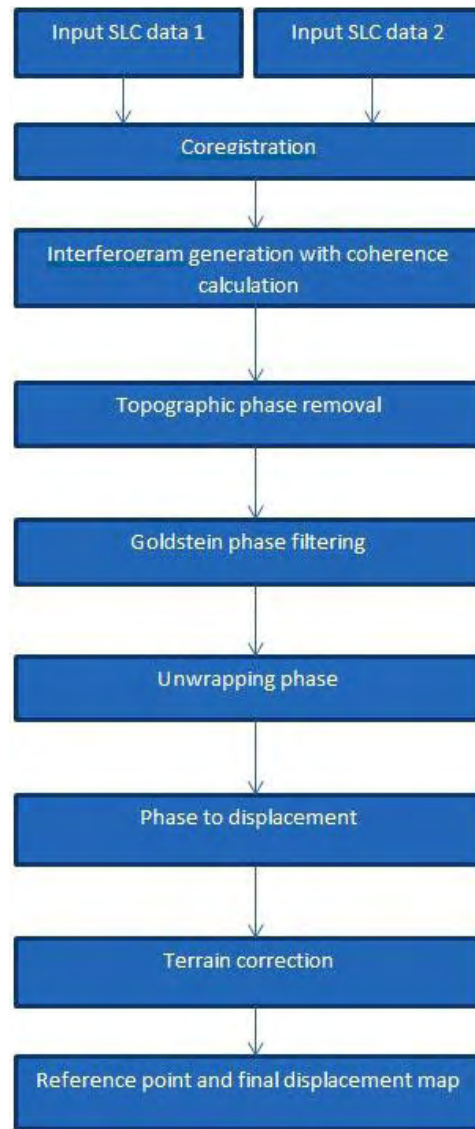
Η εργασία αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση των δεδομένων ραντάρ και έχει ως βασικό σκοπό την ανάδειξη της εφαρμογής της διαφορικής συμβολομετρίας με τους περιορισμούς που την χαρακτηρίζουν. Τα αποτελέσματα ενδεχομένως να μην παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, καθώς υπήρχε έλλειψη δεδομένων και έγινε χρήση χαμηλής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η βελτίωση αυτών των δύο παραγόντων θα έπαιζαν σημαντικό ρόλο στην βελτίωση των αποτελεσμάτων, τα οποία παραμένουν υπό διερεύνηση. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν μόνο τη αύξουσα τροχιά του δορυφόρου, ως αποτέλεσμα το πρόβλημα των σκιάσεων του ανάγλυφου να παρουσιάζεται συστηματικά στα αποτελέσματα και να χάνεται ένα κομμάτι της πληροφορίας. Η ορθότερη προσέγγιση και η προοπτική της έρευνας είναι να συλλεχθούν περισσότερα δεδομένα και από τις δύο τροχιές του δορυφόρου (αύξουσα και φθίνουσα) τα οποία πλέον θα προσφέρουν μεγαλύτερη συνοχή, καθώς το σύστημα

Sentinel-1 λειτουργεί ολοκληρωμένα (Sentinel 1A/B) και να γίνει μία προσέγγιση τεχνικής PSI, όπου οι περιορισμοί της απλής διαφορικής συμβολομετρίας που παρουσιάστηκαν θα είναι εφικτό να ξεπεραστούν. Επιπλέον θα γίνει μία δειγματοληπτική μελέτη επαλήθευσης στο πεδίο μέσω της χρήσης GPS Rover, όπου θα μπορέσει να γίνει μία ακριβής εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Όσο αναφορά την περιοχή μελέτης, η κατάσταση των υδάτων και του εδάφους του θεσσαλικού κάμπου είναι γνωστή εδώ και αρκετά χρόνια, μέσα από τις επιστημονικές έρευνες που έχουν γίνει για την περιοχή, αλλά και από τα ίδια τα γεγονότα που κατά καιρούς έχουν παρουσιαστεί. Από το 1962 με την αποξήρανση της λίμνης Κάρλας, ίσως το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό σφάλμα που έγινε στην Ελλάδα, μέχρι και σήμερα όπου το πρόβλημα της μη ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων παραμένει, με το νερό να χάνετε μέσα από τις χιλιάδες γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή, ο Θεσσαλικός κάμπος δείχνει να «βυθίζεται». Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν κάτι αντίστοιχο, ότι εντός ενός ετήσιου κύκλου, παρουσιάστηκαν εδαφικές υποχωρήσεις σε ένα μικρό κομμάτι του θεσσαλικού κάμπου που μελετήθηκε, με πιο έντονη εμφάνιση του φαινομένου στους οικισμούς που και στο παρελθόν έχουν παρουσιάσει παρόμοια προβλήματα. Ταυτόχρονα, από το 2010 γίνεται μια πολύ αξιόλογη προσπάθεια ανασύστασης της λίμνης Κάρλας, το οποίο θα προσφέρει πολύ θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στην ευρύτερη περιοχή. Η εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας αποτελεί την πλέον κατάλληλη μεθοδολογία παρακολούθησης του θεσσαλικού κάμπου που μπορεί να πλαισιώσει την προσπάθεια ανασύστασης της λίμνης, αλλά και να εντοπίσει διάφορα εδαφικά προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν κατά καιρούς. Επίσης μέσω της εφαρμογής θα προσφερθεί η δυνατότητα πρόληψης προβληματικών καταστάσεων και χρόνος για την λήψη αποφάσεων. Σίγουρα, ο χαρακτήρας της περιοχής είναι αποδεκτός και αμετάβλητος, αποτελεί την μεγαλύτερη αγροτική δύναμη της χώρας με μεγάλο αντίκτυπο στην οικονομία. Αυτό σημαίνει ότι η ζήτηση νερού και η εκμετάλλευση μεγάλων εκτάσεων θα αυξάνεται προσθέτοντας ακόμη μεγαλύτερη πίεση στο ήδη επιβαρυνμένο περιβάλλον, κάνοντας αναγκαία την σπατάλη οικονομικών πόρων για την ανεύρεση νέων υδατικών πηγών και την κατασκευή αντίστοιχων έργων (εγγειοβελτιωτικά έργα, φράγματα κ.α). Αυτό δεν σημαίνει όμως, ότι το περιβάλλον πρέπει να αφεθεί σε υποβάθμιση. Μέχρι και σήμερα έχουν σπαταληθεί εκατομμύρια για έργα που θα συμβάλλουν στην βελτίωση του περιβάλλοντος, αρκετά από αυτά δεν προσέφεραν τα ανάλογα αποτελέσματα και άλλα δεν ολοκληρώθηκαν ποτέ. Για παράδειγμα το σχέδιο εκτροπής του Αχελώου για την υδροδότηση του Θεσσαλικού κάμπου και της λίμνης Κάρλας.. Ένα σχέδιο το οποίο βρήκε

οριστικό τέλος μετά από αρκετά χρόνια διαβουλεύσεων, ταυτόχρονα όμως δέσμευσε ένα τεράστιο ποσό οικονομικών πόρων για την κατασκευή έργων και η ολοκλήρωσή του θα ήταν λανθασμένη από περιβαλλοντικής άποψης. Το ερώτημα είναι με ποια κριτήρια λαμβάνονται οι αποφάσεις για την δημιουργία μεγάλων έργων; Όταν την ίδια στιγμή δεν έχει γίνει μία πλήρης καταγραφή της κατάστασης στην περιοχή και το κομμάτι της παρακολούθησης είναι ελλιπές. Αποτελεί επιτακτική ανάγκη, η χρήση νέων τεχνολογιών στον τομέα της παρακολούθησης. Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μία τέτοια τεχνολογία, όπου καθιστά δυνατή της παρακολούθηση τεράστιων εκτάσεων χωρίς την ανάγκη μετρήσεων στο πεδίο και μπορεί να εντοπίσει άμεσα εδαφικά προβλήματα και να μειώσει αρκετά το κόστος για την δημιουργία έργων υποδομής, καθώς προσφέρει μία νέα οπτική για την αναγκαιότητά τους.

5.2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα ραντάρ, ως ένα ενεργό σύστημα παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα έναντι των γνωστών παθητικών συστημάτων. Αυτά είναι η δυνατότητα παρακολούθησης μέρα και νύχτα και η δυνατότητα καταγραφής ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών. Επίσης το σύστημα ραντάρ λειτουργεί με ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία, κάτι που επιτρέπει την οποιαδήποτε αλλαγή της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας, να μπορεί να μετρηθεί με την ακρίβεια κλάσματος. Γίνεται αντιληπτή, η προσφορά πληροφοριών που αδυνατούν να δώσουν τα γνωστά παθητικά συστήματα (πχ Landsat) και ανοίγεται ένα νέο πεδίο έρευνας στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης. Οι εφαρμογές που προσφέρει το σύστημα ραντάρ είναι αρκετές και κάποιες φάνταζαν αδύνατες στο παρελθόν. Μία από τις εφαρμογές που πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη εργασία, αφορά την συμβολομετρία και πιο συγκεκριμένα την διαφορική συμβολομετρία. Μία τεχνική εντοπισμού εδαφικών παραμορφώσεων στην κλίμακα του εκατοστού. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν έρχεται να ανανεώσει κάποια του παρελθόντος καθώς δεν υπήρχε κάποια αντίστοιχη στην Ελλάδα, αλλά να καλύψει ένα μεγάλο κενό στον τομέα της παρακολούθησης της επιφάνειας του εδάφους. Βέβαια αποτελεί μία τεχνική αρκετά σύνθετη και απαιτεί τεράστια προσοχή για την αποφυγή αστοχιών. Στην εργασία έγινε μία ολοκληρωμένη ανάδειξη της πολυπλοκότητας της διαδικασίας, αλλά και των πολλών παραμέτρων που απαρτίζουν την διαφορική συμβολομετρία και διαδραματίζουν ένα τεράστιο ρόλο στην έκβαση της εφαρμογής και των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής που αφορά την διαδικασία επεξεργασίας.



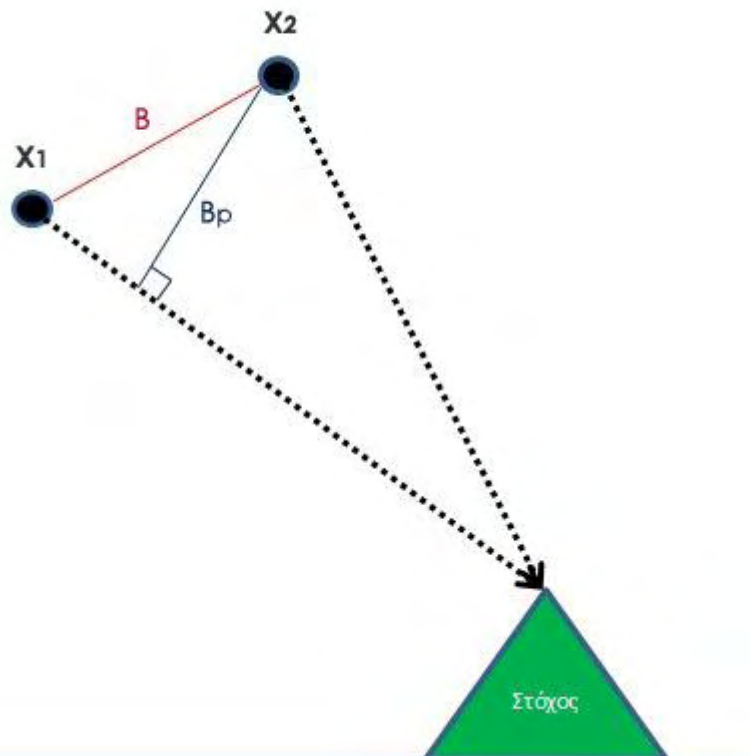
Εικόνα 5.10 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας (ιδία επεξεργασία)

Επίσης είναι εξίσου σύνθετη και σημαντική η ικανότητα ερμηνείας μίας εικόνας ραντάρ, των χαρακτηριστικών της και των τελικών αποτελεσμάτων. Όλο αυτό βέβαια ξεπερνάτε με την απόκτηση τεχνογνωσίας πάνω στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Η εργασία απέδειξε τις δυνατότητες την διαφορικής συμβολομετρίας και πως μπορεί να φανεί μία εξαιρετικά σημαντική και ενδιαφέρουσα εφαρμογή, δίνοντας αποτελέσματα τα οποία μέχρι και σήμερα είναι αρκετά δύσκολο να συλλεχθούν. Στην ουσία, η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μία εξαιρετικά δυναμική τεχνική, η οποία εκμεταλλεύεται την διαφορά φάσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταξύ δύο εικόνων ραντάρ και μπορεί να την εκφράσει σε τιμές εδαφικών παραμορφώσεων με μεγάλη ακρίβεια σε κλίμακα εκατοστού έως χιλιοστού. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας απαιτεί προσεκτική επιλογή των

δεδομένων και αποφυγή λαθών κατά την διαδικασία επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας εξαρτώνται από δύο πολύ βασικούς παράγοντες, αυτοί είναι:

- ❖ Η συνοχή (coherence) μεταξύ των εικόνων
- ❖ Η βασική κάθετη γραμμή μεταξύ των λήψεων

Η συνοχή ή συνάφεια, εξαρτάται από την σταθερότητα που παρουσιάζει ο στόχος στο έδαφος, της ανακλώμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα στον χρόνο. Για παράδειγμα κτίρια και μεταλλικά αντικείμενα ανακλούν μεγάλα ποσά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αντιθέτως επίπεδες επιφάνειες και υδάτινα σώματα ανακλούν ελάχιστα ποσά ακτινοβολίας. Η ανάκλαση επηρεάζεται από την τοπογραφία, τις διηλεκτρικές ιδιότητες των στόχων και από την κάλυψη του εδάφους. Όσο αναφορά την βασική κάθετη γραμμή, αυτό το χαρακτηριστικό εμπίπτει στην βασική γεωμετρία που παρουσιάζει ο δορυφόρος μεταξύ δύο διαφορετικών λήψεων.



Εικόνα 5.11 Βασική γεωμετρία δορυφόρου μεταξύ δύο λήψεων (ιδία επεξεργασία)

Ας υποθέσουμε ότι η πρώτη λήψη του στόχου πραγματοποιείται από την θέση X_1 και η δεύτερη λήψη από την θέση X_2 , η απόσταση σε μέτρα (**B**), μεταξύ τους ονομάζεται συμβολογραφική γραμμή και η κάθετη προβολή της στο εύρος ονομάζεται βασική κάθετη

γραμμή (**Bp**). Όσο μεγαλύτερη είναι η βασική κάθετη γραμμή, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή της τοπογραφίας, ένα χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί την εφαρμογή της δημιουργίας ψηφιακού μοντέλου εδάφους (InSAR), από την εφαρμογή του εντοπισμού των εδαφικών παραμορφώσεων (DinSAR). Στην ουσία, μεγάλες βασικές κάθετες γραμμές απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου εδάφους, καθώς χρειάζεται η έντονη συμμετοχή της τοπογραφίας και μικρές βασικές κάθετες γραμμές απαιτούνται για την εφαρμογή των εδαφικών παραμορφώσεων, καθώς η τοπογραφία αφαιρείται μέσω ενός διαθέσιμου μοντέλου εδάφους και η ανάλυσή του επηρεάζει τα αποτελέσματα κατά την διαδικασία της αφαίρεσης της τοπογραφίας. Βέβαια υπάρχουν κάποια προβλήματα που επηρεάζουν την συμβολομέτρία και πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη. Αυτά τα προβλήματα είναι:

- ❖ Η χρονική αποσυσχέτιση, η οποία αφορά την διαφορά της χρονικής περιόδου που πραγματοποιήθηκαν οι λήψεις. Για παράδειγμα, μία λήψη του μήνα Ιανουαρίου, με μία λήψη του μήνα Μαΐου, παρουσιάζουν μεγάλη χρονική αποσυσχέτιση και επηρεάζεται η συνοχή μεταξύ των εικόνων.
- ❖ Οι φυσικές αλλαγές που υφίσταται η κάλυψη του εδάφους (βροχή, χιόνι, πάγος), που επηρεάζουν τον μηχανισμό ανάκλασης του στόχου και υπάρχει επίδραση στην συνοχή των εικόνων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η έρευνα θα ήταν αρκετά δύσκολο να ολοκληρωθεί χωρίς την πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), για ελεύθερα δεδομένα μέσω του δορυφόρου Sentinel-1, αλλά και προσφοράς λογισμικού επεξεργασίας ανοιχτού κώδικα. Έτσι λοιπόν, η διαφορική συμβολομετρία, αλλά και οι υπόλοιπες εφαρμογές που προσφέρει το σύστημα ραντάρ, όχι μόνο παρουσιάζουν τεράστιο επιστημονικό ενδιαφέρον, αλλά μπορούν να υλοποιηθούν μέσω ελεύθερων δεδομένων, το οποίο βοηθάει αρκετά στην γρήγορη εξέλιξη και βελτίωση των γνώσεων και των εφαρμογών. Το σύστημα ραντάρ χρόνο με τον χρόνο φαίνεται να κερδίζει μεγαλύτερο έδαφος στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης, καθώς παρατηρείται ραγδαία εξέλιξη των μεθοδολογιών και προσεγγίσεων κυρίως από πρωτοπόρες χώρες στον τομέα όπως η Ιταλία και η Γερμανία όπου έχουν εδραιώσει τα ραντάρ στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης εδώ και αρκετά χρόνια. Οι δυνατότητες της εφαρμογής και τα ελεύθερα δεδομένα, αποτελούν μία μεγάλη ευκαιρία προσχώρησης την έρευνας στην Ελλάδα, σε τέτοιου είδους εφαρμογές, δημιουργώντας νέα πεδία μελέτης και νέα πρότυπα στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Βέβαια απαιτείται αρκετά εξειδικευμένο ερευνητικό

προσωπικό, το οποίο μπορεί να προσφέρουν τα πανεπιστήμια της χώρας και σε συνεργασία με τους τοπικούς φορείς να υλοποιηθούν μελέτες και έρευνες αρκετά ωφέλιμες. Ένα δείγμα των εφαρμογών που προσφέρουν τα δεδομένα ραντάρ είναι:

- δημιουργία υψηλής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους
- εντοπισμός εδαφικών παραμορφώσεων
- εκτίμηση υγρασίας εδάφους
- χαρτογράφηση και παρακολούθηση υδάτινων σωμάτων
- χαρτογράφηση καταστροφών από πυρκαγιές
- παρακολούθηση του αγροτικού και η ταξινόμηση καλλιεργειών
- παρακολούθηση και ανάπτυξη αστικού χώρου
- παρακολούθηση των δασών και η εκτίμηση της βιομάζας
- εντοπισμός αλλαγών χρήσεων γης
- ανάλυση σεισμών
- ανάλυση πλημμύρων
- παρακολούθηση ωκεανών
- παρακολούθηση ανέμων
- εντοπισμός και παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων
- παρακολούθηση πάγων
- εντοπισμός πλοίων κ.α

Προφανώς όλες οι παραπάνω εφαρμογές δεν υλοποιούνται μόνο από την συμβολομετρία, αλλά και από άλλες τεχνικές που χαρακτηρίζουν τα δεδομένα ραντάρ, όπως η μέτρηση της πόλωσης (Polarimetry), ή ο συνδυασμός της με την συμβολομετρία. Επίσης εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χαρακτηρίζουν τον εκάστοτε δορυφόρο. Τα βασικότερα που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές με δεδομένα ραντάρ είναι:

- ❖ C-band = 5.66 cm (πχ Sentinel - 1)
- ❖ X-band = 3.10 cm (πχ TerraSAR – X)
- ❖ L-band = 24.00cm (πχ ALOS – PALSAR)

Το κάθε μήκος κύματος παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά διείσδυσης σε επιφάνειες και στόχους του εδάφους, ως αποτέλεσμα οι δυνατότητες να διαφοροποιούνται ανάλογα την εφαρμογή. Ολοκληρώνοντας λοιπόν, η τηλεπισκόπηση αποτελεί μία επιστήμη συνεχόμενης εξέλιξης με έμφαση στην παρακολούθηση, καταγραφή και κατανόηση της γήινης επιφάνειας. Τα δεδομένα ραντάρ ίσως αποτελούν την αιχμή της

επιστήμης και προσφέρουν εφαρμογές και πληροφορίες πολύ σημαντικές για τον σχεδιασμό μίας πιο ορθολογικής διαχείρισης του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Αυτό δεν σημαίνει ότι αντικαθιστά τα οπτικά συστήματα τα οποία είναι εξίσου σημαντικά, αλλά ο συνδυασμός τους είναι εξαιρετικά ωφέλιμος. Στην Ελλάδα η επιστήμη της τηλεπισκόπησης δεν είναι τόσο διαδεδομένη και δεν χαρακτηρίζεται από την ραγδαία εξέλιξη που παρουσιάζουν άλλες χώρες του εξωτερικού. Ενδεχομένως ένας λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ότι η απόκτηση δεδομένων υψηλής ποιότητας, είναι αρκετά δύσκολη και υψηλά κοστολογημένη. Με τις εξελίξεις όμως στην παροχή δεδομένων και κυρίως με την ενέργεια της ESA, όπου μέσω του προγράμματος Copernicus και της αποστολής Sentinel προσφέρει δωρεάν δεδομένα υψηλής ανάλυσης, εμφανίζεται μία μεγάλη ευκαιρία για επένδυση στην έρευνα της επιστήμης της τηλεπισκόπησης στην Ελλάδα. Τα πανεπιστήμια και εκπαιδευτικά ιδρύματα της χώρας με αρχηγικό ρόλο και η μετέπειτα διάδοση της επιστήμης στους κρατικούς φορείς και στην αγορά εργασίας, μπορούν να προσφέρουν στην τηλεπισκόπηση την αντίστοιχη ραγδαία εξέλιξη άλλων χωρών και να φανεί αρκετά ωφέλιμη για το εθνικό και τοπικό συμφέρον του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία:

- [1] Μερτίκας, Σ. (2006) *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Αθήνα: ΙΩΝ.

Ξένη βιβλιογραφία:

- [2] Goldstein, R., M., Werner, C., L. (1998) *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. Geophysical Research Letters **vol. 25**, No. 21 (1998), 4035-4038.
- [3] Zebker, H., A., Rosen, P., A., Goldstein, R., M., Gabriel, A., Werner, C., L. (1994) *On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake*. Journal of Geophysical Research **vol. 99**, No. B10 (1994), 19,617-19,634.
- [4] Massonnet, D., Feigl, K., L. (1998) *Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface*. Reviews of Geophysics **36**, 441-500.
- [5] Rosen, P., A., Hensley, S., Joughin, I., R., Li, F., Madsen, S., N., Rodriguez, E., Goldstein, R., M. (1999) *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Proceeding of the IEEE **vol. XX**, No. Y (1999), 1-110.
- [6] Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Belloti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., Dietrich, V. (2013) *SquueeSAR and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992-2012): Tectonic implications*. Tectonophysics **594** (2013), 38-59.
- [7] Paradella, W., R., Ferretti, A., Mura, J., C., Colombo, D., Gama, F., F., Tamburini, A., Santos, A., R., Novali, F., Galo, M., Camargo, P., O., Silva, A., Q., Silva, G., G., Silva, A., Gomes, L., L. (2015) *Mapping surface deformation in open iron mines of Carajas Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis*. Engineering Geology **193** (2015), 61-78.
- [8] Heleno, S., I.N., Oliveira, L., G.S., Henriques M., J., Falcao, A., P., Lima, J., N.P., Cooksley, G., Ferreti, A., Fonseca, A., M., Lobo-Ferreira, J., P., Fonseca, J., F.B.D. (2011) *Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon*. Remote Sensing of Environmetn **115** (2011), 2152-2167.
- [9] Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., Jung, H., Feng, G., Lee, C. (2011) *Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin*. Remote Sensing of Environment **117** (2012), 429-439.
- [10] Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., Rocca, F. (2011) *Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements*. Remote Sensing of Environment **120** (2012), 156-163.
- [11] Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2002) *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique*. Engineering Geology **68** (2003), 3-14.

- [12] Ali, S.T., Akerley, J., Baluyut, E.C., Cardiff, M., Davatzes, N.C., Feigl, K.L., Foxall, W., Fratta, D., Mellors, R.J., Spielman, P., Wang, H.F., Zemach, E. (2016) *Time-series analysis of surface deformation at Brady Hot Springs geothermal field (Nevada) using interferometric synthetic aperture radar*. *Geothermics* **61** (2016), 114-120.
- [13] Crosetto, M. (2002) *Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **57** (2002), 213-227.
- [14] Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, N., Crippa, B. (2015) *Persistent Scatterer Interferometry: A review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **115** (2016), 78-89.
- [15] Salvi, S., Stramondo, S., Funning, G., J., Ferretti, A., Sarti, F., Mouratidis, A. (2011) *The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle*. *Remote Sensing of Environment* **120** (2012), 164-174.
- [16] Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Wegmuller, U., Rizzetto, F. (2005) *Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system*. *Remote Sensing of Environment* **98** (2005), 403-413.
- [17] Mouratidis, A., Constantini, F. (2011) *PS and SBAS Interferometry over the broader area of Thessaloniki, Greece, using the 20-Year archive of ERS and ENVISAT data*. ESA, 'Fringe 2011 Workshop', Frascati, Italy.
- [18] Parcharidis, I., Fomelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U. (2009) *Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformations over Rio-Antirio area (Western Greece) for period 1992-2000*. *Journal of Applied Geophysics* **68** (2009), 348-355.
- [19] Papanikolaou, L., D., Fomelis, M., Parcharidis, L., Lekkas, E., L., Fountoulis, I., G. (2010) *Deformation pattern of the 6 and 7 April 2009, $M_w=6.3$ and $M_w=5.6$ earthquakes in L' Aquila (Central Italy) revealed by ground and space observations*. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **10** (2010), 73-87.
- [20] Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G., Rucci, A. (2011) *Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring*. *Energy Procedia* **4** (2011), 3465-3471.
- [21] Prati, C., Ferretti, A., Perissin, D. (2009) *Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations*. *Journal of Geodynamics* **49** (2010), 161-170.
- [22] Mahmud, M., U., Yakubu, T., A., Oluwafemi, O., Sousa, J., J., Ruiz-Armenteros, A., M., Arroyo-Parras, J., G., Bakon, M., Lazecky, M., Perissin, D. (2016) *Application of Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar (MT-DInSAR) technique to Land Deformation Monitoring in Warri metropolis, Delta State, Nigeria*. *Procedia Computer Science* **100** (2016), 1220-1227.

- [23] De Luca, C., Bonano, M., Casu, F., Fusco, A., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Pepe, A., Zinno, I. (2016) *Automatic and Systematic Sentinel-1 SBAS-DinSAR processing chain for deformation time-series generation*. *Procedia Computer Science* **100** (2016), 1176-1180.
- [24] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., Wasowski, J. (2006) *Satellite interferometry for monitoring ground deformations in the urban environment*. The Geological Society of London, IAEG 2006, paper number 284.
- [25] Kadlecik, P., Kajzar, V., Nekvasilova, Z., Wegmuller, U., Dolezalova, H. (2015) *Evaluation of the subsidence of DinSAR and GPS measurements near Karvina, Czech Republic*. *AUC Geographica* **50**, No.1 (2015), 51-61.
- [26] Gaber, A., Darwish, N., Sultan, Y., Arafat, S., Koch, M. (2014) *Monitoring Building Stability in Port-Said City, Egypt Using Differential SAR Interferometry*. *International Journal of Environment and Sustainability* **vol. 3**, No. 1 (2014), 14-22.
- [27] Dai, K., Liu, G., Li, Z., Li, T., Yu, B., Wang, X., Singleton, A. (2015) *Extracting Vertical Displacement Rates in Shanghai (China) with Multi-Platform SAR Images*. *Remote Sensing* **7** (2015), 9542-9562.
- [28] Polcari, M., Palano, M., Fernandez, J., Samsonov, S., V., Stramondo, S., Zerbini, S. (2016) *3D displacement field retrieved by integrating Sentinel-1 InSAR and GPS data: the 2014 South Napa earthquake*. *European Journal of Remote Sensing* **49** (2016), 1-13.
- [29] Yague-Martinez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F., R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., Bamler, R. (2016) *Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data*. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* **vol. 54**, No. 4 (2016), 2220-2234.
- [30] Richards, M., A. (2006) *A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing*. *IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE* **vol. 22**, No. 9, part 2 (2007), 5-29.
- [31] Ostir, K., Komac, M. (2007) *PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations – A case of NW Slovenia*. *Geologija* **50/1** (2007), 77-96.
- [32] Ashrafiyanfar, N., Busch, W., Dehghani, M., Haghighatmehr, P. (2009) *Differential SAR Interferometric Technique for Land Subsidence Monitoring due to Groundwater Over-exploitation in the Hashtgerd*. ESA, 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy.
- [33] Raspini, F., Ciampalini, A., Del Conte, S., Lombardi, L., Nocentini, M., Gigli, G., Ferretti, A., Casagli, N. (2015) *Exploitation of Amplitude and Phase of Satellite SAR Images for Landslide Mapping: The Case of Montescaglioso (South Italy)*. *Remote Sensing* **7** (2015), 14576-14596.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία:

- [34] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., P. (2013) *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING MAGAZINE. Available from: http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/PPRS/PPRS_7/esa_sar_tutorial.pdf [downloaded: 14 Σεπτεμβρίου 2016].
- [35] Veci, L. (2016) *Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial*, Array Systems Computing Inc. Available from: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf> [downloaded: 16 Νοεμβρίου 2016].
- [36] Sarmap. (2009) *Synthetic Aperture Radar and SARscape*, Sarmap. Available from: <http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf> [downloaded: 9 Οκτωβρίου 2016].
- [37] Abdelfattah, R. (2009) *InSAR phase analysis: Phase unwrapping for noisy SAR interferograms*, Advances in Geoscience and Remote Sensing, Gary Jedlovec (Ed.), ISBN: 978-953-307-005-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-geoscience-and-remote-sensing/insar-phase-analysis-phase-unwrapping-for-noisy-sar-interferograms> [downloaded: 10 Σεπτεμβρίου 2016].
- [38] Pepe, A. (2012) *Advanced Multitemporal Phase Unwrapping Techniques for DInSAR Analyses*, Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, Dr Ivan Padron (Ed.), ISBN: 978-953-51-0404-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/recent-interferometry-applications-in-topography-and-astronomy/advanced-multitemporal-phase-unwrapping-techniques-for-differential-synthetic-aperture-radar-dinsar> [downloaded: 10 Σεπτεμβρίου 2016].
- [39] Marghany, M. (2012) *Simulation of 3-D Coastal Spit Geomorphology Using Differential Synthetic Aperture Interferometry (DInSAR)*, Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, Dr Ivan Padron (Ed.), ISBN: 978-953-51-0404-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/recent-interferometry-applications-in-topography-and-astronomy/simulation-of-3-d-coastal-spit-geomorphology-using-differential-synthetic-aperture-interferometry-di> [downloaded: 10 Σεπτεμβρίου 2016].
- [40] ESA. (2007) *Sentinel-1 The Radar Mission for GMES Operational Land and Sea Services*. Available from: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin131/bul131a_attema.pdf [downloaded: 10 Σεπτεμβρίου 2016].
- [41] Canada Centre for Remote Sensing. *Fundamental of Remote Sensing*. Available from: http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf [downloaded: 3 Νοεμβρίου 2016].
- [42] Rosen, P., A. (2014) *Principles and Theory of Radar Interferometry*. UNAVCO Short Course. Available from: <https://www.unavco.org/education/advancing-geodetic-skills/short->

[courses/course-materials/insar/2014-insar-isce-course-](#)

[materials/InSARPrinciplesTheory_UNAVCO_14.pdf](#) [downloaded: 3 Νοεμβρίου 2016].

[43] Sentinel-1 Team. (2013) *Sentinel-1 User Handbook*, ESA. Available from: [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1 User Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook) [downloaded: 24 Απριλίου 2016].

[44] Fomelis, M. (2015) *Sentinel-1 TOPS Interferometry*. ‘Advanced training on land remote sensing’, ESA-MOST Dragon Cooperation, China. Available from: [https://dl.dropboxusercontent.com/u/83876162/D3S_P2_DRAGON LTC2015 InSAR.pdf](https://dl.dropboxusercontent.com/u/83876162/D3S_P2_DRAGON_LTC2015_InSAR.pdf) [downloaded: 5 Οκτωβρίου 2016].

[45] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. (2007) *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. **TM-19** (part A-B). Netherlands: ESA Publications. Available from: [http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation br ESA TM-19](http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19) [downloaded: 24 Απριλίου 2016].