



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«Παρακολούθηση της στάθμης νερού με  
χρήση εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος  
(SAR) και τεχνικές συμβολομετρίας (InSAR)»

Διπλωματική εργασία  
Σταυρουλάκη Ελένη

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:  
Καθηγητής Ιωάννης Τσάνης (επιβλέπων)  
Καθηγητής Γεώργιος Καρατζάς  
Δρ. Δημήτριος Αλεξάκης

ΧΑΝΙΑ, 2017

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ιωάννη Τσάνη για την ανάθεση της εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με το Εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής. Επίσης, τον καθηγητή κ. Γεώργιο Καρατζά που δέχτηκε να συμμετάσχει στην εξεταστική επιτροπή και να συνεισφέρει με τις παρατηρήσεις του. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Δρ. κ. Δημήτριο Αλεξάκη για την υποστήριξη, τη διαρκή διαθεσιμότητα και την καθοριστική συνεισφορά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής για τη φιλοξενία και την ειλικρινή φιλική διάθεση. Περισσότερο απ' όλους ευχαριστώ τον Κώστα για την υπομονή που είχε και τις τρεις φορές που χρειάστηκε να μου εγκαταστήσει το ArcGIS, και βέβαια τον Σωτήρη που μοιράστηκε το γραφείο του μαζί μου και έκανε ακόμα και τις δύσκολες μέρες να είναι ευχάριστες.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αγάπη και την εμπιστοσύνη που μου έχουν δείξει. Ακόμη, όλους τους υπέροχους φίλους που έκανα στα Χανιά και μαζί τους γνώρισα και την υπόλοιπη Κρήτη. Ευχαριστώ και εσένα που με έκανες να πιστεύω ότι μπορώ, ακόμα και όταν εγώ δεν το νομίζω.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκε η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας ραντάρ μέσω χρήσης δορυφορικών εικόνων σε σχέση με τη διακύμανση της στάθμης νερού σε δύο υγροτόπους της Κρήτης. Οι υγρότοποι που χρησιμοποιήθηκαν ως περιοχές μελέτης ήταν η τεχνητή λίμνη της Αγιάς και η φυσική λίμνη του Κουρνά. Οι δύο λίμνες βρίσκονται στο νομό Χανίων, στο βορειοδυτικό άκρο της νήσου Κρήτης.

Οι δορυφορικές εικόνες που αποτέλεσαν τα αντικείμενα της επεξεργασίας προήλθαν από λήψεις του δορυφόρου Sentinel-1A, τον οποίο διαχειρίζεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency – ESA). Ο δορυφόρος αυτός κατατάσσεται στα συστήματα ενεργητικής τηλεπισκόπησης, καθώς οι επίγειοι στόχοι ανιχνεύονται με χρήση ραντάρ. Το ραντάρ που χρησιμοποιεί ο Sentinel-1A εκπέμπει σήμα στην περιοχή των μικροκυμάτων με συχνότητα 5,405 GHz και μήκος κύματος 5,6 cm. Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες του δορυφόρου Landsat-8, ο οποίος χρησιμοποιεί σύστημα παθητικής τηλεπισκόπησης, με στόχο τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI.

Οι εικόνες του δορυφόρου Sentinel-1A λήφθηκαν από την ηλεκτρονική βάση δεδομένων ελεύθερης πρόσβασης Copernicus. Η επεξεργασία των εικόνων έγινε στο περιβάλλον του διαθέσιμου από την ESA λογισμικού SNAP (Sentinel Application Form). Από αυτές προέκυψαν ως βασικά προϊόντα συμβολογραφήματα, τα οποία στη συνέχεια υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία. Σημαντικά στάδια στη διαδικασία δημιουργίας των συμβολογραφημάτων ήταν η εγγραφή, ο σχηματισμός συμβολογραφήματος, η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης και η γεωμετρική διόρθωση. Ειδικά για το βήμα της αποκατάστασης του συμβολογραφήματος χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping), ο οποίος αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Stanford και η εφαρμογή Cygwin. Στο τέλος της επεξεργασίας τα δεδομένα των συμβολογραφημάτων εισάχθηκαν στο λογισμικό συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS.

Το λογισμικό SNAP χρησιμοποιήθηκε ακόμη για την επεξεργασία των εικόνων του Sentinel-1A, με σκοπό τον υπολογισμό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Βασικό στάδιο στη διαδικασία αυτή ήταν η ραδιομετρική διόρθωση (radiometric calibration).

Με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS έγινε δυνατή η ποσοτικοποίηση των πληροφοριών των συμβολογραφημάτων για τις περιοχές μελέτης. Έτσι, προέκυψε για την κάθε λίμνη διάγραμμα συσχέτισης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας με τα στάθμη νερού, διάγραμμα συσχέτισης της συνάφειας με τον δείκτη βλάστησης NDVI, διάγραμμα συσχέτισης της αποκατεστημένης ή «ξεδιπλωμένης» φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού, διάγραμμα συσχέτισης της κάθετης μετατόπισης της εξεταζόμενης επιφάνειας που υπολογίστηκε από τα συμβολογραφήματα με τη μεταβολή της στάθμης νερού, διάγραμμα συσχέτισης της «ξεδιπλωμένης» φάσης με τη διαφορά οπισθοσκέδασης (μεταξύ των ημερών των εκάστοτε εικόνων master και slave).

Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε η συμπεριφορά των δεδομένων για όλες τις τιμές, ενώ στο δεύτερο έγινε αφαίρεση των τιμών που αφορούσαν ημερομηνίες λήψεις με ύπαρξη έντονης βλάστησης εντός των λιμνών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν δείχνουν ότι η μέθοδος της συμβολομετρίας έχει δυνατότητες ακόμα και για εφαρμογές σε υγρότοπους. Βέβαια το πεδίο βελτίωσης της μεθόδου παραμένει μεγάλο και για αυτό προτείνονται συγκεκριμένες τεχνικές για βελτίωση των αποτελεσμάτων σε ενδεχόμενες μελλοντικές έρευνες.

## ABSTRACT

This thesis assesses the potential of differential interferometry using satellite imagery regarding the examination of water level fluctuation in two wetlands of Crete. The wetlands that were used as study areas are the artificial lake of Agia and the natural lake of Kournas. The two lakes are positioned in the northwest part of the island of Crete.

The objects of processing were satellite images which derived from acquisitions of the Sentinel-1A satellite, which is managed by European Space Agency – ESA. Sentinel-1A is classified as an active remote sensing system, as the ground targets are identified using radar. The Sentinel-1A radar transmits a microwave signal of 5,405 GHz frequency and 5,6 cm wavelength. Images of Landsat-8 satellite, which uses a passive remote sensing system, contributed additionally in calculating the normalized difference vegetation index NDVI.

The images of Sentinel-1A were downloaded from Copernicus open access hub. The processing was developed using SNAP (Sentinel Application Form) software. The main products were interferograms, which were afterwards further processed. Phase unwrapping was carried out specially using SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) algorithm that was developed by Stanford University as well as the Cygwin application. SNAP software was also used to process images of Sentinel-1A in order to calculate the backscattering coefficient using radiometric calibration. At the end of each process the final data were imported into ArcGIS software.

ArcGIS software was used for the quantitative study of the interferograms. As a result, charts showing the correlation between backscatter and water level were created, as well as charts showing the correlation between coherence and NDVI, unwrapped phase and water level change, vertical displacement and water level change, unwrapped phase and backscatter difference.

Finally, results were compared based on two case studies. In the first one all data values were examined whereas in the second one values that concerned days with increased vegetation were removed. The conclusions of the study show that interferometry and backscatter can be both useful for wetland applications. The ground of improvement stands still vast, therefore specific techniques for future research are suggested.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT .....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	10
1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	12
2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ (REMOTE SENSING) .....	13
2.1 Ορισμός τηλεπισκόπησης .....	13
2.2 Συστήματα δορυφορικής παρακολούθησης.....	13
2.3 Δορυφόρος Sentinel-1A .....	14
2.4 Εφαρμογές του Sentinel – 1A.....	17
2.5 Δορυφόρος Landsat – 8 .....	18
2.6 Δείκτης βλάστησης NDVI .....	19
3 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR.....	20
3.1 Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) .....	20
3.2 Γεωμετρία συστημάτων SAR.....	24
3.3 Συμβολομετρία.....	27
3.4 Συμβολογράφημα .....	29
3.5 Πηγές σφάλματος.....	32
3.6 Τύποι εικόνας .....	33
Εικόνες SLC .....	34
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	34
4.1 Περιοχές μελέτης.....	34
4.1.1 Λίμνη Αγιάς .....	36
4.1.2 Λίμνη Κουρνά .....	37
4.2 Δεδομένα στάθμης .....	38

4.3	Δεδομένα βροχοπτώσεων .....	39
4.4	Δεδομένα εικόνων.....	39
4.5	Βήματα επεξεργασίας.....	41
4.6	Στατιστική ανάλυση.....	43
	Απλός αριθμητικός μέσος .....	43
	Τυπική απόκλιση .....	44
	Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση.....	45
	Συντελεστής προσδιορισμού $R^2$ .....	46
5	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ .....	47
5.1	Λογισμικό SNAP .....	47
5.2	Δημιουργία συμβολογραφήματος.....	48
5.2.1	Εγγραφή εικόνας (Co-registration).....	48
5.2.2	Σχηματισμός συμβολογράφηματος (Interferogram formation) .....	50
5.2.3	Ενοποίηση εικόνας (TOPS-Deburst) και δημιουργία subset .....	51
5.2.4	Αφαίρεση φάσης τοπογραφίας (Topo-phase removal).....	52
5.2.5	Εφαρμογή φίλτρου (Goldstein Filter).....	53
5.2.6	Επεξεργασία πολλαπλών όψεων (Multilook) .....	55
5.2.7	Αποκατάσταση φάσης με χρήση SNAPHU (Phase Unwrapping) .....	56
5.2.8	Μετατροπή της ξεδιπλωμένης φάσης σε κάθετη μετατόπιση (Band Maths) 58	
5.2.9	Γεωμετρική διόρθωση (Range-Doppler Terrain Correction) .....	59
5.3	Επεξεργασία οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (backscatter) .....	61
5.3.1	Ραδιομετρική διόρθωση (Radiometric Calibration).....	61
5.3.2	TOPS-Deburst, Multilook, Speckle Filter, Terrain Correction.....	62
5.3.3	Εισαγωγή επεξεργασμένων εικόνων στο λογισμικό ArcGIS .....	64
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	64
6.1	Διακύμανση στάθμης νερού .....	64
6.2	Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης.....	66

6.3	Οπισθοσκέδαση – Στάθμη νερού .....	68
6.4	Ετήσια διακύμανση συνάφειας .....	71
6.5	Συνάφεια – NDVI .....	74
6.6	Ετήσια διακύμανση ξεδιπλωμένης φάσης .....	76
6.7	Ξεδιπλωμένη φάση – Μεταβολή στάθμης νερού .....	77
	Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης.....	79
6.8	Οπισθοσκέδαση – Ξεδιπλωμένη φάση .....	80
	Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης.....	81
6.9	Διαφορά οπισθοσκέδασης – Ξεδιπλωμένη φάση – Μεταβολή στάθμης νερού.....	82
6.10	Κάθετη μετατόπιση – μεταβολή στάθμης νερού.....	84
	Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης.....	86
7	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	87
	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	91
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	94
	Ξενόγλωσση .....	94
	Ελληνική.....	96
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	98

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ενεργητικό σύστημα και παθητικό σύστημα τηλεπισκόπησης (πηγή: NASA, <a href="https://pmm.nasa.gov/">https://pmm.nasa.gov/</a> ) .....	14
Εικόνα 2: Τύποι εικόνες ανάλογα με τη λήψη από τον δορυφόρο Sentinel-1A (Πηγή: ESA, 2017, <a href="https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes">https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes</a> ).....	15
Εικόνα 3: Τρόπος λειτουργίας ραντάρ (Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada) .....	21
Εικόνα 4: Φυσικό & Συνθετικό άνοιγμα αντένας (Δεληκαράογλου, 2005) .....	22
Εικόνα 6: Η περιοχή του φάσματος των ακτινοβολιών ραντάρ σε σχέση με ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (πηγή: ESA LearnEO! Resource Library).....	23
Εικόνα 7: Γεωμετρικοί παράγοντες δορυφορικού συστήματος InSAR (Luzi, 2010) .....	25
Εικόνα 8: Γεωμετρικές παραμορφώσεις εικόνων SAR λόγω θέσης παρατήρησης και μορφής αναγλύφου (Δεληκαράογλου, 2005) .....	27



Εικόνα: 9: Κλίμακα χρώματος InSAR (COMET, 2013) .....	30
Εικόνα: 10: Αύξηση του εύρους αντιστοιχεί σε καθίζηση και μείωση σε ανύψωση. United States Geological Survey, <a href="https://ca.water.usgs.gov">https://ca.water.usgs.gov</a> .....	30
Εικόνα 11: Συμβολογράφημα ανοδικής τροχιάς του Sentinel-1A που απεικονίζει την έκρηξη του ηφαιστείου Fogo (November 2014). Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε 3 cm εδαφικής μετατόπισης (πηγή: Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tec – Comet, 2014) .....	32
Εικόνα 12: Θέση περιοχών μελέτης .....	35
Εικόνα 13: Η λίμνη της Αγιάς Κουρνά.....	35
Εικόνα 14: Η λίμνη του	
Εικόνα 15: Βήματα επεξεργασίας για τη δημιουργία συμβολογραφήματος .....	42
Εικόνα 16: Βήματα επεξεργασίας για τον υπολογισμό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας .....	42
Εικόνα 17: Η αρχική μορφή της εικόνας του δορυφόρου Sentinel-1A όπως λαμβάνεται από τη βάση Copernicus .....	47
Εικόνα 18: Επιλογή master με το εργαλείο InSAR Stack Overview .....	48
Εικόνα 19: Το παράθυρο διαλόγου για την εφαρμογή TOPSAR-Split.....	49
Εικόνα 20: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της επεξεργασίας back-geocoding ....	49
Εικόνα 21: Τελικό προϊόν της εγγραφής των εικόνων master και slave .....	49
Εικόνα 22: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για τον σχηματισμό συμβ/ματος .....	50
Εικόνα 23: Τελικό προϊόν που προκύπτει από τον σχηματισμό συμβολογραφήματος .....	50
Εικόνα 24: Το ενοποιημένο συμβολογράφημα έπειτα από την αφαίρεση των "bursts" .....	51
Εικόνα 25: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές για τη δημιουργία subset.....	51
Εικόνα 26: Η αποκοπή της περιοχής μελέτης με τη δημιουργία subset .....	52
Εικόνα 27: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για την αφαίρεση της φάσης τοπογραφίας .....	53
Εικόνα 28: Το συμβολογράφημα έπειτα από την αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης .....	53
Εικόνα 29: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για το φίλτρο Goldstein .....	54
Εικόνα 30: Το συμβολογράφημα έπειτα από την εφαρμογή το φίλτρου Goldstein .....	54
Εικόνα 31: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της επεξεργασίας multilook .....	55
Εικόνα 32: Το συμβολογράφημα έπειτα από την επεξεργασία πολλαπλών όψεων multilook .....	55
Εικόνα 33: Εξαγωγή της συμβολομετρικής φάσης για τη μετατροπή σε "ξεδιπλωμένη" με χρήση του αλγορίθμου SNAPHU .....	57
Εικόνα 34: Μετατροπή της φάσης σε "ξεδιπλωμένη" με χρήση του SNAPHU στο περιβάλλον της εφαρμογής Cygwin .....	57
Εικόνα 35: Το παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή της "ξεδιπλωμένης φάσης" .....	57
Εικόνα 36: Το συμβολογράφημα έπειτα από την αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης, δηλαδή τη μετατροπή της σε "ξεδιπλωμένη" .....	58
Εικόνα 37: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για την εισαγωγή της εξίσωσης για την εύρεση της κάθετης μετατόπισης (band maths) .....	59
Εικόνα 38: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της γεωμετρικής διόρθωσης.....	60
Εικόνα 39: Το "ξεδιπλωμένο" συμβολογράφημα μετά την εφαρμογή γεωμετρικής διόρθωσης.....	60
Εικόνα 40: Το τελικό προϊόν της συνάφειας σε οπτικοποιημένη μορφή (με μαύρο απεικονίζονται τα σημεία με τιμή συνάφειας ίση με 0 και με άσπρο τα σημεία με τιμή ίση με 1).....	61
Εικόνα 41: Γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα στην οποία αντιστοιχούν οι τιμές της κάθετης μετατόπισης που υπολογίστηκε με το εργαλείο band maths .....	61

Εικόνα 42: Η εικόνα του Sentinel-1A έπειτα από τη ραδιομετρική διόρθωση (calibration).....	62
Εικόνα 43: Η ραδιομετρικά διορθωμένη εικόνα έπειτα από την αφαίρεση των bursts.....	63
Εικόνα 44: Η εικόνα έπειτα από την επεξεργασία πολλαπλών όψεων multilook .....	63
Εικόνα 45: Η εικόνα έπειτα από την εφαρμογή του φίλτρου για τα στίγματα (speckle filter) .....	63
Εικόνα 46: Το τελικό προϊόν της επεξεργασίας στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές οπισθοσκέδασης στην κλίμακα dB .....	64
Εικόνα 47: Μορφές οπισθοσκέδασης.....	69

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά εικόνων τύπου IW του δορυφόρου Sentinel 1 (ESA, 2017).....	16
Πίνακας 2: Τυπικές εφαρμογές ανάλογα με τον τύπο λήψης (πηγή: ESA,2017).....	18
Πίνακας 3: Φασματική & χωρική ανάλυση καναλιών του Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) (United States Geological Survey, 2014) Κανάλια.....	19
Πίνακας 4: Δεδομένα στάθμης νερού.....	38
Πίνακας 5: Τιμές βροχόπτωσης για τις περιοχές μελέτης.....	39
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά εικόνων Sentinel-1A που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία συμβολογραφημάτων .....	40
Πίνακας 7: Ημερομηνίες λήψης των εικόνων Landsat.....	41
Πίνακας 8: Τιμές οπισθοσκέδασης που υπολογίστηκαν σε μονάδες dB .....	66
Πίνακας 9: Οι μέσες τιμές συνάφειας που υπολογίστηκαν για τις δύο περιοχές μελέτης .....	72
Πίνακας 10: Η μέση τιμή του δείκτη NDVI που υπολογίστηκε για κάθε λίμνη σε κάθε μία από τις περιόδους εξέτασης (1 <sup>η</sup> στήλη). Τα συμβολογραφήματα στα οποία βρέθηκε παρουσία βλάστησης και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν (2 <sup>η</sup> στήλη).....	76
Πίνακας 11: Οι μέσες τιμές ξεδιπλωμένης φάσης για κάθε συμβολογράφημα και αφορούν τις δύο περιοχές μελέτης.....	76

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Διακύμανση στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς.....	65
Διάγραμμα 2: Διακύμανση στάθμης νερού για τη λίμνη του Κουρνά.....	65
Διάγραμμα 3: Απεικόνιση της διακύμανσης της οπισθοσκέδασης για τις δύο περιοχές μελέτης.....	67
Διάγραμμα 4: Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη διακύμανση στάθμης νερού στη λίμνη της Αγιάς.....	69
Διάγραμμα 5: Συσχέτιση οπισθοσκέδασης με το ύψος νερού στη λίμνη της Αγιάς .....	70
Διάγραμμα 6: Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη διακύμανση στάθμης νερού στη λίμνη του Κουρνά.....	70
Διάγραμμα 7: Συσχέτιση οπισθοσκέδασης με το ύψος νερού στη λίμνη του Κουρνά .....	70
Διάγραμμα 8: Διακύμανση των τιμών μέσης συνάφειας για τη λίμνη Αγιάς και τη λίμνη Κουρνά .....	72
Διάγραμμα 9: Η διακύμανση της μέσης συνάφειας σε σχέση με τη διακύμανση της μέσης τιμής NDVI για τη λίμνη της Αγιάς.....	74
Διάγραμμα 10: Η διακύμανση της μέσης συνάφειας σε σχέση με τη διακύμανση της μέσης τιμής NDVI για τη λίμνη Κουρνά .....	74

Διάγραμμα 11: Η διακύμανση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης για τις δύο λίμνες αντίστοιχα .	77
Διάγραμμα 12: Η συσχέτιση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη Αγιάς.....	78
Διάγραμμα 13: Η συσχέτιση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη Κουρνά .....	78
Διάγραμμα 14: Η συσχέτιση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς μετά από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων .....	79
Διάγραμμα 15: Η συσχέτιση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη του Κουρνά μετά από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων .....	79
Διάγραμμα 16: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη της Αγιάς .....	80
Διάγραμμα 17: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη του Κουρνά .....	80
Διάγραμμα 18: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη της Αγιάς έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων.....	81
Διάγραμμα 19: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη του Κουρνά έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων.....	81
Διάγραμμα 20: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στάθμης νερού και των αντίστοιχων τιμών οπισθοσκέδασης και ξεδιπλωμένη φάσης για τη λίμνη της Αγιάς.....	82
Διάγραμμα 21: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στάθμης νερού και των αντίστοιχων τιμών οπισθοσκέδασης και ξεδιπλωμένη φάσης για τη λίμνη του Κουρνά.....	83
Διάγραμμα 22: Η συσχέτιση των μέσω τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη της Αγιάς.....	84
Διάγραμμα 23: Η συσχέτιση των μέσω τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη του Κουρνά.....	85
Διάγραμμα 24: Η συσχέτιση των μέσω τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη της Αγιάς έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων ...	86
Διάγραμμα 25: Η συσχέτιση των μέσω τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη του Κουρνά έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων .....	86
Διάγραμμα 26: Σύγκριση βαθμών συσχέτισης των αποτελεσμάτων για τη λίμνη Αγιάς και τη λίμνη Κουρνά.....	87
Διάγραμμα 27: Κατανομή των βαθμών συσχέτισης για τα αποτελέσματα των συμβολογραφημάτων (Λίμνη Αγιάς) .....	89
Διάγραμμα 28: Κατανομή των βαθμών συσχέτισης για τα αποτελέσματα των συμβολογραφημάτων (Λίμνη Κουρνά) .....	89

## 1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας RADAR συνθετικού ανοίγματος με στόχο την εκτίμηση της στάθμης λίμνης σε δύο λίμνες στην περιφερειακή ενότητα των Χανίων, στην τεχνητή λίμνη της Αγιάς και στη φυσική λίμνη του Κουρνά. Οι δύο λίμνες βρίσκονται στο νομό Χανίων, στο βορειοδυτικό άκρο της νήσου Κρήτης. Η επιλογή των συγκεκριμένων λιμνών έγινε λόγω του σημαντικού ρόλου που έχουν ως υδροβιότοποι στην περιοχή. Η περίπτωση της Αγιάς ξεχωρίζει εξαιτίας των αξιοσημείωτων προβλημάτων που αντιμετωπίζει λόγω ξήρανσης και εμφάνισης βαλτωδών περιοχών. Η περίπτωση του Κουρνά είναι εξίσου ενδιαφέρουσα, καθώς πρόκειται για τη μοναδική φυσική λίμνη γλυκού νερού στο νησί.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων είναι το SNAP (Sentinel Application Platform), το οποίο δημιουργήθηκε από την ESA (European Space Agency - Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος). Για τη διαδικασία αποκατάστασης του συμβολογραφήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping), το οποίο αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Stanford.

Τα κύρια προϊόντα της επεξεργασίας των εικόνων ήταν η «ξεδιπλωμένη» φάση, η οποία προέκυψε από τα συμβολογραφήματα, και η τιμές οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, οι οποίες προέκυψαν με ραδιομετρική διόρθωση στο περιβάλλον του λογισμικού SNAP. Ως συμπληρωματικό μέσο για τη βελτίωση και την περαιτέρω διερεύνηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI, ο οποίος υπολογίστηκε με λήψη εικόνων του δορυφόρου Landsat-8.

## 2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ (REMOTE SENSING)

### 2.1 Ορισμός τηλεπισκόπησης

Ο όρος τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επιστήμη και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για παρατήρηση από απόσταση αντικειμένων, φαινομένων, και χαρακτηριστικών, βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (INFOREST RESEARCH O.C., <http://main.inforest.gr/>). Η λέξη συντίθεται από το επίρρημα «τηλε» και το ρήμα «επισκοπέω» που σημαίνει παρατηρώ από μακριά. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος remote sensing, ο οποίος έχει μεταφραστεί στα ελληνικά και ως τηλεανίχνευση, αλλά έχει επικρατήσει ο όρος τηλεπισκόπηση.

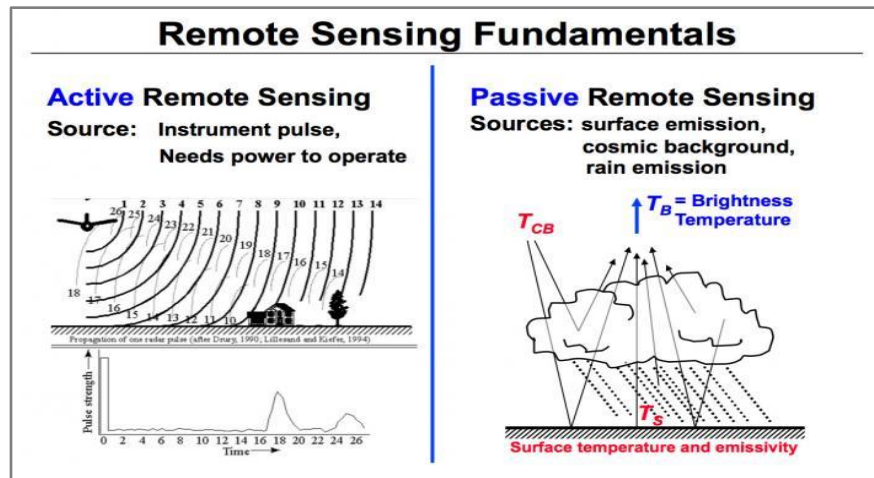
Με άλλα λόγια, τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη απόκτησης πληροφορίας σχετικά με την επιφάνεια της Γης, χωρίς στην πραγματικότητα να απαιτείται επαφή με αυτή. Αυτό γίνεται με την ανίχνευση και καταγραφή, ανάκληση ή εκπομπή ενέργειας και στη συνέχεια με επεξεργασία, ανάλυση και εφαρμογή των εν λόγω πληροφοριών (Ποϊραζίδης, 2013).

### 2.2 Συστήματα δορυφορικής παρακολούθησης

Τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης και απεικόνισης της Γης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την πηγή ακτινοβολίας που καταγράφουν.

- Παθητικά συστήματα

Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία φτάνει στον αισθητήρα του δορυφόρου, προερχόμενη από την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας ή από την εκπομπή λόγω θερμοκρασίας των σωμάτων παρατήρησης στο θερμικό υπέρυθρο (thermal infrared). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος το οποίο εκτείνεται από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα από 0.4μm) της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του μήκους κύματος 1000μm. Η κατάλληλη φασματική περιοχή επιλέγεται σύμφωνα με τις ανάγκες που επιτάσσει η εκάστοτε εφαρμογή.



Εικόνα 1: Ενεργητικό σύστημα και παθητικό σύστημα τηλεπισκόπησης (πηγή: NASA, <https://pmm.nasa.gov/>)

- Ενεργητικά συστήματα

Τα συστήματα τέτοιου τύπου χρησιμοποιούν εξωτερική πηγή (π.χ. radar) για την εκπομπή σήματος και έπειτα ανιχνεύουν το σήμα που επιστρέφει έπειτα από την ανάκλαση του στη γήινη επιφάνεια. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια, η οποία στη συνέχεια ανακλάται, επιστρέφει και καταγράφεται ως ηχώ του σήματος. Ένα από τα πλεονεκτήματα των ενεργητικών συστημάτων είναι ότι έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα, ενώ η λειτουργία τους είναι ανεξάρτητη των καιρικών συνθηκών.

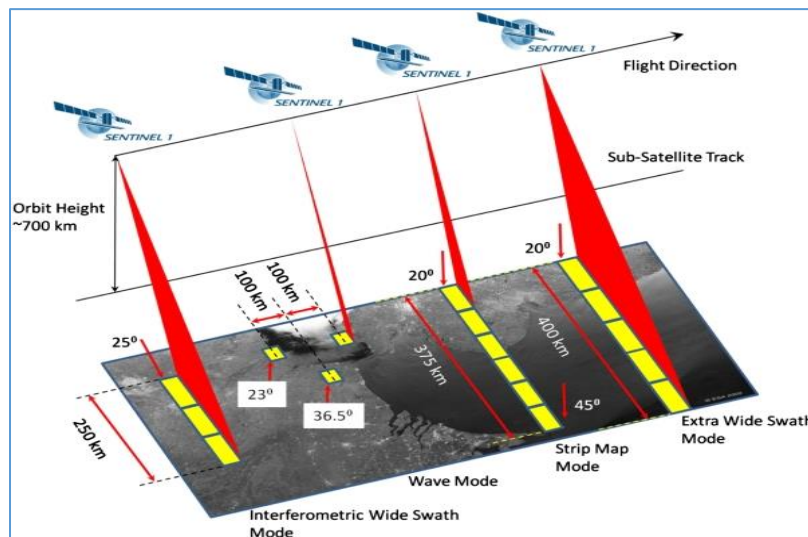
## 2.3 Δορυφόρος Sentinel-1A

Ο δορυφόρος που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας αλλά και για τον υπολογισμό της οπισθοσκέδασης ήταν ο Sentinel – 1A. Η συγκεκριμένη αποστολή «όρασης ραντάρ» χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και διευθύνεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος στα πλαίσια του προγράμματος Copernicus. Πρόκειται για ένα δορυφόρο που λαμβάνει εικόνες με χρήση RADAR εκπέμποντας σήμα στο φάσμα C, πράγμα που καθιστά την ποιότητα της λήψης ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται αξιόπιστα δεδομένα με βελτιωμένο χρόνο επανεξέτασης. Βελτιώνεται επίσης η γεωγραφική κάλυψη και η ταχεία διάδοση δεδομένων για την υποστήριξη εφαρμογών στους τομείς παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της ξηράς και



των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Η κύρια λειτουργία του Sentinel – 1A διαθέτει μια μεγάλη λωρίδα (250 km) με υψηλή γεωμετρική (συνήθως 20 m) και ραδιομετρική ανάλυση, χαρακτηριστικό κατάλληλο για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Ο Sentinel – 1A προσφέρει παγκόσμια συνεχή κάλυψη σαρώνοντας την επιφάνεια της Γης σε κυκλική πολική τροχιά, δηλαδή κατά την κίνησή του τέμνει τη γραμμή του ισημερινού με κλίση ίση με  $98.18^\circ$  και ταυτόχρονα περνά ακριβώς πάνω από τους δύο πόλους του πλανήτη σε κάθε περιφορά του. Αυτό το είδος τροχιάς προσφέρει δυνατότητα λήψης της ίδιας περιοχής από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες σε κάθε περιστροφή του δορυφόρου. Συγκεκριμένα οι εικόνες μπορούν να ληφθούν είτε κατά την ανοδική πορεία του δορυφόρου είτε κατά την καθοδική. Ο εν λόγω δορυφόρος ολοκληρώνει μία περιστροφή γύρω από τη Γη, δηλαδή επισκέπτεται το ίδιο σημείο, κάθε 12 ημέρες (ESA, 2017).



Εικόνα 2: Τύποι εικόνας ανάλογα με τη λήψη από τον δορυφόρο Sentinel-1A (Πηγή: ESA, 2017, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>)

### Προϊόντα του Sentinel-1A

- Raw Level-0 data : για συγκεκριμένη χρήση
- Processed Level-1 Single Look Complex (SLC) data : πολύπλοκες εικόνες με πλάτος και φάση
- Ground Range Detected (GRD) Level-1 data : μόνο με ένταση τύπου multi-looked
- Level-2 Ocean (OCN) data : για την ανάκτηση γεωφυσικών παραμέτρων του ωκεανού

Για την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν εικόνες τύπου SLC.

### Είδη εικόνων

Ο δορυφόρος Sentinel – 1A παρέχει τους παρακάτω τύπους εικόνες:

- **EW:** Ο τύπος εικόνας Extra-Wide Swath παρέχει μεγάλο εύρος εδαφικής κάλυψης με μειωμένη όμως χωρική ανάλυση.
- **WV :** Η βασική εφαρμογή των εικόνων Wave αφορά την ωκεανογραφία.
- **SM:** Η λήψη των εικόνων Stripmap γίνεται με φωτισμό του εδάφους με συνεχές παλμό, ενώ η ακτίνα της κεραίας είναι στραμμένη προς μία σταθερή κατεύθυνση αζιμουθίου και σταθερή γωνία ανύψωσης.
- **IW:** Στις εικόνες τύπου Interferometric Wide Swath οι λήψεις γίνονται συγχρονισμένα σε κάθε πέρασμα του δορυφόρου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευθυγραμμισμένα συμβολομετρικά ζεύγη εικόνων.

Οι εικόνες του Sentinel - 1A χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συμβολογραφημάτων αλλά και για τον υπολογισμό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, οι εικόνες ανήκουν στην τελευταία κατηγορία IW, η οποία αποτελεί και τον βασικό τύπο εικόνας που χρησιμοποιείται για εφαρμογές ξηράς. Κάθε εικόνα χωρίζεται σε τρεις λωρίδες (swaths) και περιλαμβάνει τις πολικότητες VV και VH.

Ο όρος «οπισθοσκέδαση» αντιστοιχεί στο σήμα του ραντάρ που επιστρέφει σε αυτό μετά από την πρόσπτωση του εκπεμπόμενου σήματος στην επιφάνεια της Γης. Το σήμα αυτό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας μελετάται συνήθως σε μονάδες dB, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία. Το επιστημονικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη συγκεκριμένη μορφή σήματος, καθώς είναι θεμιτό να προσδιοριστεί ο βαθμός αλληλεπίδρασής του με τον εκάστοτε στόχο και επιπλέον οι πληροφορίες που παρέχει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του στόχου.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά εικόνων τύπου IW του δορυφόρου Sentinel 1 (ESA, 2017)

Characteristic	Value
Swath width	250 km
Incidence angle range	29.1° - 46.0°
Sub-swaths	3



<b>Azimuth steering angle</b>	$\pm 0.6^\circ$
<b>Azimuth and range looks</b>	Single
<b>Polarisation options</b>	Dual HH+HV, VV+VH Single HH, VV
<b>Maximum Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ)</b>	-22 dB
<b>Radiometric stability</b>	0.5 dB (3 $\sigma$ )
<b>Radiometric accuracy</b>	1 dB (3 $\sigma$ )
<b>Phase error</b>	5°

## 2.4 Εφαρμογές του Sentinel – 1A

Η αποστολή του δορυφόρου Sentinel – 1A είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση των παρακάτω τομέων περιβάλλοντος (ESA, 2017):

- Παρακολούθηση θαλάσσιων περιοχών. Ένας από τους κύριους στόχους είναι η παρακολούθηση των παγετώνων, καθώς και των πλεούμενων πάγων και παγόβουνων. Τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης που παρέχει ο Sentinel - 1A είναι χρήσιμα για τον εντοπισμό των πλοίων, πράγμα που καθιστά ευκολότερη τη διαχείριση της ναυσιπλοΐας. Ακόμη, σημαντικές πληροφορίες προκύπτουν για τις πετρελαιοκηλίδες, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται ο εντοπισμός και η αντιμετώπισή τους. Κρίσιμο ρόλο έχουν και οι θαλάσσιοι άνεμοι, οι οποίοι μπορούν πλέον να καταγράφονται αναλυτικά και να αντιμετωπίζονται άμεσα.
- Παρακολούθηση περιοχών της ενδοχώρας. Ο Sentinel – 1A μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αειφόρο διαχείριση των δασών και πιο συγκεκριμένα στην ταξινόμηση του τύπου των δασών και την εκτίμηση της βιομάζας. Ακόμη, μπορεί να αποκτήσει κρίσιμο ρόλο για την κλιματική αλλαγή, διευκολύνοντας τη χαρτογράφηση των δασικών σημάδιων πυρκαγιάς αλλά και την εκτίμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, έχει δυνατότητες συνεισφοράς στη χαρτογράφηση αστικών πυρήνων, εντοπίζοντας τις εστίες εδαφικής καθίζησης. Τέλος, η αξία του για τις χρήσεις γης είναι μεγάλη και επικεντρώνεται στην παρακολούθηση των φαινομένων ξηρασίας και την αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών.
- Διαχείριση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης. Το 75% των φυσικών καταστροφών παγκοσμίως περιλαμβάνουν φαινόμενα πλημμύρας. Η δυνατότητα των

εικόνων SAR να διαπερνούν τα σύννεφα, τις καθιστά ιδανικές για την παρακολούθηση τέτοιου είδους φαινομένων. Οι εφαρμογές διευρύνονται και στο πεδίο των εδαφικών παραμορφώσεων, όπως είναι η σεισμολογία και οι ηφαιστιογενείς περιοχές.

- Γεωδαιτικές εφαρμογές - εφαρμογές σε χάρτες

Πίνακας 2: Τυπικές εφαρμογές ανάλογα με τον τύπο λήψης (πηγή: ESA,2017)

Εφαρμογή	Mode			
	SM	IW	EW	WV
Arctic and sea-ice		X	X	
Open ocean ship surveillance		X	X	
Oil pollution monitoring		X	X	
Marine winds				X
Forestry		X		
Agriculture		X		
Urban deformation mapping		X		
Flood monitoring	X	X		
Earthquake analysis	X	X		
Landslide and volcano monitoring	X	X		

## 2.5 Δορυφόρος Landsat – 8

Το Πρόγραμμα LANDSAT είναι η επιχείρηση με την μακρύτερη έως τώρα λειτουργία για την απόκτηση εικόνων της γης από το διάστημα. Ο πρώτος δορυφόρος LANDSAT ξεκίνησε από τη NASA (National Aeronautics and Space Administration) το 1972 με το όνομα ERTS-A (Earth Resources Technology Satellite) και στην συνέχεια ακολούθησαν αρκετές αποστολές με σημαντικότερο τον δορυφόρο Landsat 5 ο οποίος ξεπέρασε την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των 3 ετών, συλλέγοντας εικόνες για 27 χρόνια, μέχρι το 2013 που τέθηκε εκτός λειτουργίας. Εν των μεταξύ, μέχρι το 2013 εκτοξεύθηκαν άλλοι 3 δορυφόροι με τελευταίο τον Landsat 8 που είναι και ο πιο σύγχρονος (εκτόξευση 11 Φεβρουαρίου 2013). Ο επόμενος δορυφόρος της σειράς είναι ο Landsat 9, ο οποίος αναμένεται να εκτοξευθεί το 2020 (USGS, 2015).

Για την ερμηνεία των εικόνων του ραδιομέτρου του Landsat 8 χρησιμοποιείται η μέθοδος της φασματικής δειγματοληψίας. Η φασματική δειγματοληψία ενός καταγραφικού συστήματος αναφέρεται στον τρόπο (σε ποια κανάλια-ζώνες) με τον οποίο καταγράφεται η ανακλώμενη ακτινοβολία-ενέργεια. Στην Εικόνα 14 απεικονίζονται τα εύρη των 11 καναλιών του θεματικού χαρτογράφου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συναρτήσει του μήκους κύματος και της ατμοσφαιρικής μετάδοσης.

Οι περιοχές του φάσματος, οι οποίες καταγράφονται αλλά και το εύρος της κάθε μίας από αυτές, έχει σχέση με τις εφαρμογές για τις οποίες έχει σχεδιασθεί το συγκεκριμένο καταγραφικό σύστημα. Όσο πιο πολλές και πιο “στενές” είναι οι ζώνες, με τόσο πιο μεγάλη ακρίβεια καταγράφεται η καμπύλη φασματικής απόκρισης και τόσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του συστήματος (Μηλιαρέσης, 2003). Στον *Error! Reference source not found.*, παρουσιάζονται τα 11 κανάλια του θεματικού χαρτογράφου του Landsat 8 με το αντίστοιχο εύρος και την χωρική ανάλυση τους.

Πίνακας 3: Φασματική & χωρική ανάλυση καναλιών του Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) (United States Geological Survey, 2014) Κανάλια

ΚΑΝΑΛΙΑ LANDSAT - 8	Μήκος Κύματος (μm)	Χωρική Ανάλυση (m)
Κανάλι 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Κανάλι 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Κανάλι 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Κανάλι 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Κανάλι 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30

Οι δορυφορικές εικόνες παθητικής τηλεπισκόπησης καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (ή εκπεμπόμενη αν πρόκειται για το εύρος του θερμικού υπέρυθρου) που συγκεντρώνεται συνολικά στον δορυφόρο αισθητήρα. Η ακτινοβολία όμως που φθάνει στο ραδιόμετρο δεν αντιπροσωπεύει μόνο την ανακλώμενη ακτινοβολία λόγω της γήινης εδαφικής επιφάνειας αλλά αποτελεί προϊόν ατμοσφαιρικών ανακλάσεων και σκεδάσεων (Χρυσουλάκης, 2011). Επομένως κρίνεται απαραίτητη η διόρθωση της δορυφορικής εικόνας, έτσι ώστε να αφαιρεθούν οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές και οι τιμές των εικονοστοιχείων να εκφράζουν την ανακλαστικότητα του εδάφους.

## 2.6 Δείκτης βλάστησης NDVI

Με την χρήση των χαρτών κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ποσοτική εκτίμηση της φυτικής βιομάζας σε μία δεδομένη περιοχή ή σημείο. Γνωρίζοντας την συμπεριφορά της βλάστησης στο φάσμα του ορατού ερυθρού (RED) και στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Near Infrared- NIR) γίνεται συνδυασμός των φασματικών καναλιών και υπολογίζεται μία τιμή για το κάθε εικονοστοιχείο

της εικόνας. Αυτή η παραγόμενη τιμή δείχνει το βαθμό και τη ποσότητα της υγιούς βλάστησης. (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

Δύο βασικοί δείκτες βλάστησης είναι ο λόγος δείκτη βλάστησης ( $Ratio = \frac{NIR}{RED}$ ) και ο NDVI ( $NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$ ). Ο NDVI είναι ο πλέον κοινός δείκτης με πολύ καλά αποτελέσματα, γι' αυτό και επιλέχθηκε για τον σκοπό της παρούσας εργασίας. Ο συγκεκριμένος δείκτης χαρακτηρίζεται από την πρόσθετη δυνατότητα να ελαχιστοποιεί την επίδραση της τοπογραφίας. Επιπλέον, η κλίμακα των τιμών του ορίζεται από -1 έως 1 με την τιμή 0 να είναι το όριο για τη μη βλάστηση. Επίσης, ο δείκτης βλάστησης είναι χρήσιμος για τον προσδιορισμό της κατάστασης της βλάστησης και παρουσιάζει τις μεταβολές και την εκτίμηση της βιομάζας (Μερτίκας, 2006; Συλλαίος, 2000).

Ο δείκτης βλάστησης NDVI υπολογίζεται εύκολα με τη βοήθεια λογισμικών διαχείρισης πληροφοριακών συστημάτων και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcMap.

Το παραγόμενο προϊόν παρουσιάζει τα σημεία στα οποία επικρατεί υψηλή / υγιής βλάστηση με τόνους χρωμάτων κοντά στο λευκό (τιμές εικονοστοιχείων κοντά στο 1), ενώ τα σημεία χωρίς βλάστηση, όπως π.χ. ασφαλτοστρωμένες εκτάσεις και κτίρια, εμφανίζονται σε τόνους κοντά στο μαύρο (τιμές κοντά στο -1). Αξίζει να σημειωθεί ότι η θαλάσσια επιφάνεια δεν αντιπροσωπεύει αξιόπιστες τιμές, καθώς η εναλλαγή κυματισμών, ήρεμης θάλασσας και η μεταβλητότητα του βάθους δημιουργούν ιδιαίτερα έντονα φαινόμενα αντανάκλασης, σκέδασης και απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

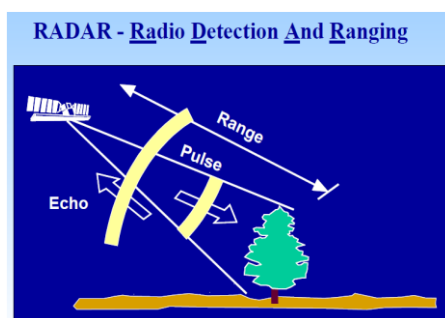
### 3 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR

#### 3.1 Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR)

Η λέξη RADAR προκύπτει από αρκτικόλεξο των αγγλικών όρων "Radio Detection And Ranging", δηλαδή ανίχνευση ραδιοκυμάτων και μέτρηση απόστασης. Αυτή είναι και η βασική λειτουργία των συστημάτων ραντάρ, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στην **Εικόνα 3**. Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος παρέχουν εικόνες της επιφάνειας της Γης σε

υψηλή ανάλυση της τάξης των δεκάδων μέτρων. Είναι συστήματα που εκμεταλλεύονται τη φάση και το πλάτος του σήματος επιστροφής και τα αποτυπώνουν σε μορφή εικόνας.

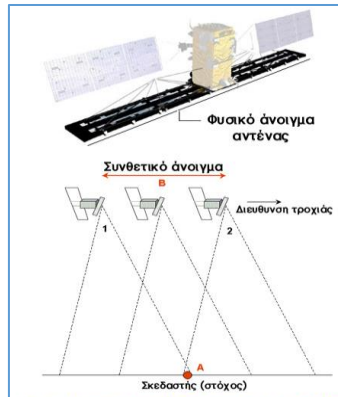
Βασικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την κατανόηση της λειτουργίας των ραντάρ, είναι το μήκος κύματος και η συχνότητα. Το μήκος κύματος αντιστοιχεί στο μήκος μίας περιόδου του κύματος και ισούται με την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κορυφών του κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα λάμδα ( $\lambda$ ). Η συχνότητα αναφέρεται στον αριθμό των περιόδων ενός κύματος που διέρχεται από σταθερό σημείο ανά μονάδα χρόνου και μετράται συνήθως σε Herz ( $Hz$ ), το οποίο ισοδυναμεί με μία περίοδο ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 3: Τρόπος λειτουργίας ραντάρ (Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada)

Η αρχή λειτουργίας των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος βασίζεται στο φαινόμενο Doppler, χάρη στο οποίο είναι δυνατή η σύνθεση της μέτρησης μίας κεραίας μεγάλου μήκους καθώς το σκάφος κινείται μπροστά. Πιο συγκεκριμένα, το ραντάρ εκπέμπει παλμούς σε κάθε θέση κατά τη διάρκεια της κίνησής του. Αφού το ραντάρ κινείται σε σχέση με το έδαφος, η ηχώ επιστρέφει στο δέκτη, όπου και καταγράφεται, μετατοπισμένη εξαιτίας του φαινομένου Doppler (αρνητικά καθώς το ραντάρ πλησιάζει έναν στόχο ή θετικά καθώς απομακρύνεται). Αυτή η λειτουργία είναι γνωστή ως επεξεργασία SAR.

Ο όρος *άνοιγμα* στην προκειμένη περίπτωση υποδηλώνει το (φυσικό) άνοιγμα που χρησιμοποιείται για τη συλλογή της ανακλώμενης ενέργειας του παλμού του ραντάρ. Κατ' επέκταση, ένα *συνθετικό άνοιγμα* κατασκευάζεται με την κίνηση της πραγματικής κεραίας ενός ραντάρ μέσω μιας σειράς θέσεων κατά μήκος της διαδρομής πτήσης του αισθητήρα ραντάρ (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Φυσικό & Συνθετικό άνοιγμα αντένας (Δεληκαράογλου, 2005)

Ως ενεργά συστήματα τηλεπισκόπησης, τα SAR λειτουργούν συγχρόνως ως πομποί και ως δέκτες, δηλαδή:

- Εκπέμπουν το σήμα τους (και την αντίστοιχη ενέργεια) προς τη γήινη επιφάνεια
- Λαμβάνουν πίσω στην αντένα την ενέργεια που ανακλάται από τα διάφορα φυσικά ή άλλα αντικείμενα (τους λεγόμενους στόχους ή σκεδαστές) στην περιοχή υπερπτήσης του αισθητήρα
- Υπολογίζουν την απόσταση των στόχων από την αντένα του αισθητήρα μετρώντας το χρόνο της διπλής διαδρομής του σήματος

Σημειώνεται ότι τα ραντάρ χρησιμοποιούν το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αντιστοιχεί στα μικροκύματα (περίπου 1mm έως 1 m). Τα μικρότερα μήκη κύματος έχουν ιδιότητες παρόμοιες με την περιοχή του θερμικού υπερύθρου, ενώ τα μεγαλύτερα μήκη κύματος παρόμοιες με τα ραδιοκύματα. Η μετατόπιση Doppler που προκαλείται από μετακινούμενο στόχο (αγνοώντας τις απώλειες ραντάρ) εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ και δίνεται από τη **Σχέση 1**.

$$f_D = -2 * V * \lambda$$

Σχέση 1

Όπου,

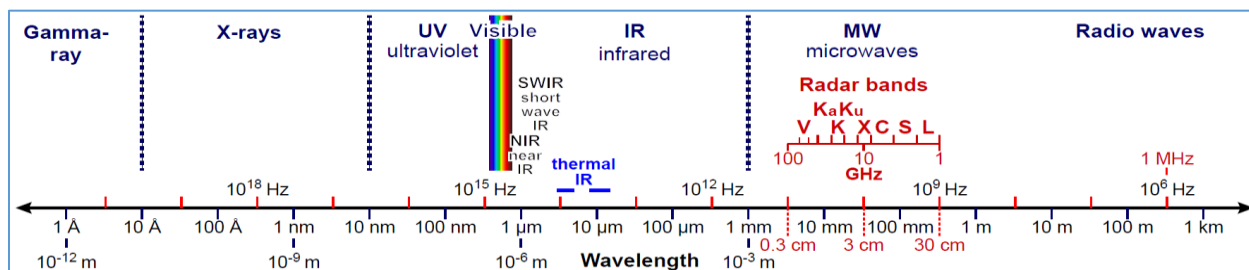
$\lambda$ : μήκος κύματος ραντάρ

$V$ : κατ'ακτίνα (radial) ταχύτητα

Μερικοί από τους δορυφόρους που έχουν ως τώρα κυκλοφορήσει με συσκευές SAR είναι οι Sentinel 1, ERS, ENVISAT, TERRASAR – X και RADARSAT. Αξίζει να αναφερθεί ότι η δέσμη του RADAR εξαρτάται από το μήκος κύματος στο οποίο αυτό εκπέμπει, ενώ η χωρική διακριτικότητα βελτιώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της κεραίας.

Η πρώτη βασική πληροφορία που παρέχει η τεχνολογία SAR αφορά το είδος του επίγειου στόχου. Τόσο το ανακλώμενο σήμα όσο και το εύρος του παλμού επηρεάζονται άμεσα από τις φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας ανάκλασης, συμπεριλαμβανομένης της κλίσης της, του μεγέθους των στοιχείων που τη συνιστούν, την υγρασία του εδάφους, κ.α. Επιπλέον, η μικροκυματική ενέργεια διασκορπίζεται διαφορετικά σύμφωνα με τις διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας ανάκλασης. Για παράδειγμα, σήματα ραντάρ στις συχνότητες X-band (δηλαδή με μικρό μήκος κύματος,  $\lambda=3$  cm) ανακλώνται από τα φυλλώματα στις κορυφές δέντρων, ενώ τα σήματα ραντάρ στις ενδιάμεσες συχνότητες C-band (δηλαδή με μήκος κύματος,  $\lambda=6$  cm) συνήθως δημιουργούν πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις κατά τη διέλευση τους μέσα από τα φυλλώματα των δέντρων.

Η δεύτερη πληροφορία που περιλαμβάνεται στο σήμα επιστροφής του παλμού του ραντάρ αφορά την απόσταση του εκάστοτε στόχου στο έδαφος από το δορυφόρο. Η απόσταση στόχου - δορυφόρου όταν διαιρεθεί με το δεδομένο μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ αντιστοιχεί σε εκατομμύρια κύκλων φάσης του φέροντος κύματος. Το κλασματικό μέρος της απόστασης της διπλής διαδρομής είναι η μετρούμενη φάση του ανακλώμενου σήματος. Έτσι, καθίσταται εφικτή η σύγκριση δύο εικόνων ραντάρ σε διαφορετικούς χρόνους από το ίδιο ακριβώς σημείο στο χώρο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οποιαδήποτε μετακίνηση της επίγειας επιφάνειας προς ή μακριά από το δορυφόρο εκφράζεται ως διαφορά φάσης.



Εικόνα 5: Η περιοχή του φάσματος των ακτινοβολιών ραντάρ σε σχέση με ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (πηγή: ESA LearnEO! Resource Library)

Γενικά, η οπισθοδιασπορά ενός σήματος ραντάρ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (Δεληκαράογλου, 2005), όπως:

- Το μήκος κύματος ή τη συχνότητα του σήματος
- Το μέγεθος και τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών στην εκάστοτε περιοχή που απεικονίζεται. Για παράδειγμα, περιοχές με υγρασία δημιουργούν μεγαλύτερη οπισθοδιασπορά και εμφανίζονται με φωτεινούς τόνους στις εικόνες SAR. Εξάιρεση στον εν λόγω κανόνα αποτελούν οι περιπτώσεις επιφανειών ήρεμων υδάτων, όπως οι λίμνες, που ενεργούν σαν τελείως επίπεδες επιφάνειες (καθρέπτες) και εμφανίζονται με σκούρους τόνους στις εικόνες SAR.
- Την πόλωση/πολικότητα των παλμών του σήματος. Μερικά συστήματα SAR εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα με οριζόντια (H) ή κάθετη (V) πόλωση σε διάφορους συνδυασμούς: HH, VV, HV, VH. Συνεπώς, η μέτρηση της διαφοράς φάσης στα σήματα HH ή VV αντιπροσωπεύει διαφορές στη φυσική σύσταση των σκεδαστών.
- Τη γωνία πρόσπτωσης (*incident angle*) του παλμού σε σχέση με την κατακόρυφο στο εκάστοτε σημείο σκέδασης του σήματος (π.χ. όσο μικρότερες είναι οι γωνίες πρόσπτωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η οπισθοσκέδαση).

### 3.2 Γεωμετρία συστημάτων SAR

Μια βασική παράμετρος της συμβολομετρικής γεωμετρίας αποτελεί το άνυσμα βάσης ή γραμμή βάσης **B** (baseline vector), που ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων (κεραιών), που παρατηρούν κοινούς στόχους στην επιφάνεια της Γης. Το άνυσμα βάσης αναλύεται είτε σε παράλληλη (Parallel Baseline, B//) και εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular Baseline, B<sup>⊥</sup>) στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης είτε σε οριζόντια (B<sub>p</sub>) και κατακόρυφη (B<sub>n</sub>) συνιστώσα. Στην **Εικόνα 6** απεικονίζεται σχηματικά η εγκάρσια γραμμή βάσης, αλλά και η απόσταση αισθητήρα-στόχου R.

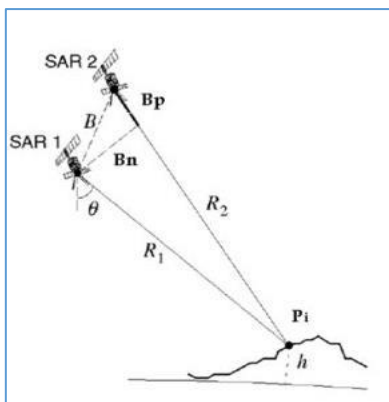
Καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητα ενός ζεύγους SAR απεικονίσεων αποτελεί η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης (Perpendicular baseline), η οποία αντιστοιχεί πρακτικά στην κάθετη προβολή του ενός αισθητήρα στη διεύθυνση λήψης του άλλου. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος της εγκάρσιας συνιστώσας του ανύσματος βάσης που προκαλεί



μετατόπιση του φάσματος ίση προς το εύρος του συστήματος, οδηγεί σε πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος ραντάρ (Φουμέλης, 1999). Γι' αυτό και για κάθε συμβολογράφημα ορίζεται μία κρίσιμη τιμή για τη γραμμή βάσης (critical baseline), η οποία προσφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα, ενώ για τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμης δεν είναι δυνατή εφαρμογή της συμβολομετρίας.

Η λεγόμενη **γωνία όρασης** (look angle) σχηματίζεται από την κατακόρυφο και τη γραμμή που συνδέει την αντένα του ραντάρ με το σημείο στο έδαφος. Λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης, η γωνία όρασης (συμβολίζεται με  $\theta$  στην **Εικόνα 6**) της ακτινοβολίας σε επίπεδο οριζόντιο έδαφος είναι μεγαλύτερη από τη γωνία απόκλισης από το ναδίρ (off-nadir). Παρ' όλα αυτά, για λόγους απλοποίησης η γήινη επιφάνεια θεωρείται επίπεδη και έτσι η γωνία όρασης είναι ίση με τη γωνία απόκλισης από το ναδίρ.

Επίσης, ένα γεωμετρικό χαρακτηριστικό το οποίο επηρεάζει την ποιότητα του συμβολογραφήματος είναι το ύψος ασάφειας (ambiguous height). Αυτή η παράμετρος αντιστοιχεί στην υψομετρική αλλαγή, η οποία απαιτείται για την αλλαγή της διαφοράς φάσης κατά έναν κύκλο. Το μικρό ύψος ασάφειας δηλώνει καλή ευαισθησία στα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας. Επιπλέον, όταν η ανύψωση του στόχο ξεπερνάει το ύψος ασάφειας, εμφανίζεται το φαινόμενο της «διπλωμένης» φάσης.



Εικόνα 6: Γεωμετρικοί παράγοντες δορυφορικού συστήματος InSAR (Luzi, 2010)

Κάθε εικόνα τηλεπισκόπησης, ανεξάρτητα από τον τρόπο απόκτησης, εμφανίζει γεωμετρικές στρεβλώσεις. Οι παράγοντες που προκαλούν αυτά τα γεωμετρικά σφάλματα ποικίλουν ανάλογα με το μέσο και την εφαρμογή, με βασικούς τους παρακάτω (Ποϊραζίδης, 2013).

- Η προοπτική των οπτικών αισθητήρων

- Η κίνηση του συστήματος-ευστάθεια της πλατφόρμας
- Το ύψος, η «συμπεριφορά» και η ταχύτητα της πλατφόρμας
- Το ανάγλυφο του εδάφους
- Η καμπυλότητα και η περιστροφή της Γης

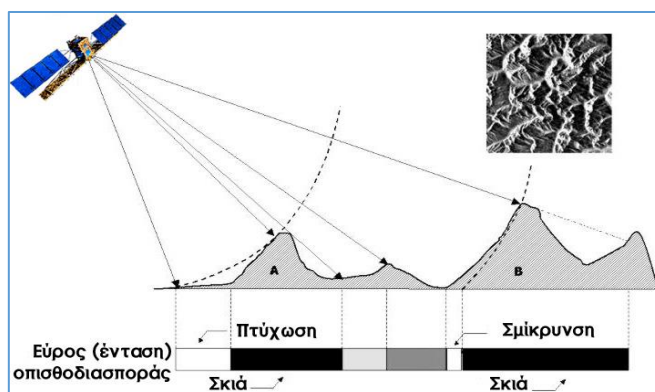
Κάθε σύστημα SAR αποτυπώνει ένα συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας της Γης μέσα από εικονοστοιχεία τα οποία εμπεριέχουν τόσο το εύρος όσο και τη φάση του ανακλώμενου σήματος. Ο μιγαδικός πολλαπλασιασμός δύο SAR απεικονίσεων παράγει το διάγραμμα κροσσών συμβολής ή συμβολόγραμμα (interferogram). Το συμβολόγραμμα είναι ουσιαστικά μία σύνθετη εικόνα η οποία έχει προέλθει από την εγγραφή δύο ή περισσότερων SAR απεικονίσεων.

Για τη δημιουργία του συμβολογραφήματος πρέπει η τρισδιάστατη εικόνα να αποτυπωθεί στις δύο διαστάσεις. Αυτό σε συνδυασμό με τη μορφολογία το εδάφους οδηγεί σε παραμορφώσεις στη δορυφορική εικόνα, οι οποίες παρουσιάζονται στην *Εικόνα 7*. Αναλυτικότερα, οι κύριες παραμορφώσεις κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες (Δεληκαράογλου, 2005):

- Σμίκρυνση (foreshortening). Η εκάστοτε ανύψωση του εδάφους σε ένα συγκεκριμένο σημείο ελαττώνει την απόσταση του εν λόγω σημείου από τον αισθητήρα ραντάρ. Σαν άμεσο αποτέλεσμα, εδάφη που έχουν κλίσεις προσανατολισμένες προς το ραντάρ εμφανίζονται “συμπιεσμένα” σε σχέση με εδάφη που είναι προσανατολισμένα στην αντίθετη προς το ραντάρ κατεύθυνση.

- Πτύχωση (Layover). Παρατηρείται όταν η έμπροσθεν κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη γωνία όρασης του ραντάρ. Έτσι, το ανώτερο μέρος του κεκλιμένου εδάφους φαίνεται να είναι πλησιέστερα στο ραντάρ από ότι το κατώτερο μέρος.

- Σκίαση (Shadowing). Παρατηρείται όταν η όπισθεν κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη γωνία όρασης του ραντάρ. Έτσι, το κεκλιμένο εδάφος δεν είναι ορατό στην εικόνα δεδομένου ότι καλύπτεται από τη σκιά που δημιουργείται από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Το άμεσο αποτέλεσμα της σκιάς είναι ότι το έδαφος απεικονίζεται “τεντωμένο”.



Εικόνα 7: Γεωμετρικές παραμορφώσεις εικόνων SAR λόγω θέσης παρατήρησης και μορφής αναγλύφου (Δεληκαράογλου, 2005)

### 3.3 Συμβολομετρία

Ο ορισμός της συμβολομετρίας προέρχεται από το φαινόμενο της συμβολής του φωτός. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί την κυματική φύση του φωτός και κυρίως τη γωνία φάσης της λαμβανόμενης ακτινοβολίας. Το βασικό επακόλουθο της συμβολομετρίας είναι το συμβολογράφημα, το οποίο αποτελεί έναν “χάρτη” κροσσών της περιοχής για ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι κροσσοί αντιπροσωπεύουν τη μεταβολή της τιμής της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο λήψεων του ραντάρ.

Η συμβολομετρία με ραντάρ είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία χρησιμοποιεί εικόνες SAR και άρχισε να αναπτύσσεται στις αρχές της δεκαετίας του '90. Βασικές χρήσεις της είναι η δημιουργία χαρτών κάλυψης Γης αλλά και η παρακολούθηση μεταβολών των στοιχείων του εδάφους. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες εκτάσεις και για χρονικά διαστήματα μεγάλου εύρους, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη επιτόπιας έρευνας στην περιοχή μελέτης.

Η συμβολομετρία μπορεί να εφαρμοστεί σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις (Δεληκαράογλου, 2005).

**α) Στη διεύθυνση που είναι κάθετη στην τροχιά (across-track interferometry).**

Λόγω της απόστασης  $B$  ( $=\rho_{21}$ ) μεταξύ των δύο αντενών, που αναφέρεται επίσης ως γραμμή βάσης (*baseline*), οι αποστάσεις από τις δύο αντένες μέχρι το μεμονωμένο σημείο

του εδάφους που αντανακλά τον παλμό ραντάρ διαφέρουν κατά ένα μικρό ποσό  $\Delta\rho(=\rho_2-\rho_1)$ . Η διαφορά  $\Delta\rho$  αντιστοιχεί σε μία διαφορά φάσης  $\Delta\phi$ , η οποία παρατηρείται μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων των δύο αντενών.

#### **b) Στη διεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς (along-track interferometry).**

Η πρώτη περίπτωση προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής τοπογραφικών χαρτών. Περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες, σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση μίας γραμμής βάσης.

1. **Συμβολομετρία απλής ή μονής υπερπτήσης (single pass Interferometry):** Σε αυτήν την περίπτωση και οι δύο αντένες τοποθετούνται στην ίδια πλατφόρμα με μια σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

2. **Συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης (two pass interferometry):** Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο μια αντένα σε δύο διαφορετικές θέσεις. Δηλαδή, η πλατφόρμα του αισθητήρα πρέπει να περάσει πάνω από την ίδια περιοχή ενδιαφέροντος στην ίδια κατεύθυνση και κατά μήκος της ίδιας ή μίας τροχιάς παράλληλης στην πρώτη. Μια ειδική τέτοια περίπτωση είναι όταν γίνεται ταυτόχρονη χρήση δύο δορυφόρων που κινούνται σε τροχιές *συνεργασίας* (tandem orbits).

Στα συστήματα SAR, από τη διαφορά φάσης  $\Delta\phi$  των σημάτων ραντάρ που αντανακλούνται από ένα σημείο του εδάφους και λαμβάνονται σε δύο θέσεις της ίδιας αντένας (περίπτωση διπλής υπερπτήσης) που καθορίζουν την γραμμή βάσης  $B$ , υπολογίζεται το υψόμετρο  $h$  του σημείου του εδάφους και η συμβολομετρική φάση.

$$\Phi = \frac{2\kappa\pi}{\lambda} \cdot \Delta\rho + \delta\Delta\phi$$

Σχέση 2

όπου  $\delta\Delta\phi$  είναι η **ασάφεια των ακέραιων κύκλων φάσης**, δεδομένου ότι η μετρούμενη φάση  $\Delta\phi$  αφορά μόνο το δεκαδικό μέρος του κύκλου φάσης του σήματος. Με άλλα λόγια, οι εικόνες SAR, από τη φύση τους, δεν περιέχουν πληροφορίες για την απόλυτη τιμή της φάσης του ανακλώμενου σήματος ραντάρ, δεδομένου ότι η συμβολομετρική φάση  $\Phi$  μετράται στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ .

Μια επέκταση της Συμβολομετρίας διπλής υπερπτήσης είναι η **Διαφορική Συμβολομετρία SAR** (Differential Interferometry ή *dInSAR*). Η Διαφορική Συμβολομετρία

χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει πολύ μικρές υψομετρικές αλλαγές (συνήθως της τάξης  $\pm 1$  cm). Εάν η δεύτερη πτήση ή οι επόμενες πτήσεις αναπαράγουν ακριβώς το επίγειο ίχνος της πρώτης πτήσης, γίνεται δυνατή η μέτρηση των αλλαγών της φάσης των σημάτων ραντάρ μεταξύ των εκάστοτε χρονικών στιγμών λήψης κάθε εικόνας SAR.

Στην περίπτωση που οι δύο σαρώσεις του δορυφόρου γίνονται από διαφορετικές διαδρομές πτήσης, δεν είναι πλέον δυνατό να διακριθούν οι τυχόν αλλαγές στη γήινη επιφάνεια από την παράλλαξη που προκαλείται από την τοπογραφία του εδάφους. Η δυσκολία αυτή παρακάμπτεται με δύο τρόπους:

- Με συνδυασμό με ένα λεπτομερές ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της περιοχής των εικόνων
- Με τη χρήση μιας τρίτης εικόνας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μία από τις δύο πρώτες εικόνες για να αφαιρεθεί η τοπογραφία της περιοχής. Έτσι, μπορούν να παραμείνουν μόνο οι αλλαγές που αφορούν στην τοπογραφία της γήινης επιφάνειας της απεικονιζόμενης περιοχής και εντάσσονται στο χρονικό πλαίσιο μεταξύ της λήψης των δύο εικόνων.

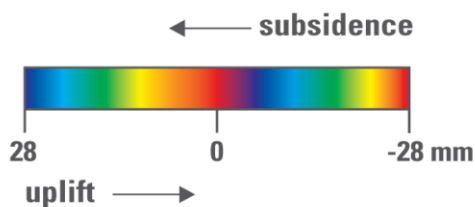
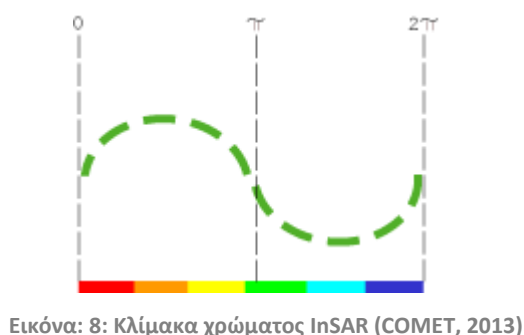
### 3.4 Συμβολογράφημα

Το **συμβολογράφημα** (interferogram) είναι το κύριο προϊόν που λαμβάνεται από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων με χρήση της διαφορικής συμβολομετρίας. Πρόκειται ουσιαστικά για μία εικόνα που προκύπτει από τον συνδυασμό δύο άλλων εικόνων. Η νέα αυτή εικόνα λειτουργεί ως χάρτης μεταβολών της διαφοράς φάσης. Οι τιμές των διαφορών φάσης εκφράζονται με συγκεκριμένο χρώμα, με σκοπό η επανάληψη του ίδιου χρώματος να ορίζει έναν ολοκληρωμένο κύκλο φάσης  $2\pi$ . Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται κροσσοί συμβολής (fringes) στην εικόνα του συμβολογραφήματος, οι οποίοι δηλώνουν τις σχετικές μετακινήσεις το ίδιου του εδάφους. Ουσιαστικά, οι κροσσοί λειτουργούν παρόμοια με τις ισοϋψείς καμπύλες και φανερώνουν αν τα στοιχεία του εδάφους απομακρύνονται ή πλησιάζουν το ραντάρ του δορυφόρου.

Η διαδικασία δημιουργίας του συμβολογραφήματος αποκαλείται και "**παρεμβολομετρία**" των εικόνων, επειδή προκύπτει από τον συνδυασμό δύο φερόντων κυμάτων των σημάτων ραντάρ, από τα οποία προκύπτουν τα εικονοστοιχεία (pixel) κάθε

σημείου του εδάφους. Το αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτού είναι είτε η ενίσχυση είτε η ακύρωση του ενός σήματος από το άλλο, ανάλογα με τις σχετικές φάσεις των εκάστοτε δύο κυμάτων που προέρχονται από το ίδιο σημείο ενός στόχου. Στο συμβολογράφημα η πρώτη περίπτωση (δηλαδή της ενίσχυσης του σήματος) αντιπροσωπεύεται με ένα κόκκινο εικονοστοιχείο και η δεύτερη περίπτωση ως μπλε εικονοστοιχείο. Οι ενδιάμεσες περιπτώσεις αντιπροσωπεύονται με ενδιάμεσα χρώματα του φάσματος από το κόκκινο έως το μπλε.

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία ομόκεντρων ζωνών χρωμάτων, οι οποίες ονομάζονται **κροσσοί συμβολής** (fringes). Γι' αυτόν το λόγο το συμβολογράφημα αποκαλείται και **διάγραμμα κροσσών συμβολής**. Κάθε κροσσός συμβολής αντιστοιχεί στη μετακίνηση της επιφάνειας σε σχέση με τον δορυφόρο. Δηλαδή, κάθε πλήρης φασματικός κύκλος των χρωμάτων (δηλαδή διαβάθμιση από το κόκκινο μέχρι το μπλε) εκφράζει  $\lambda/2$  μετακίνησης της επιφάνειας προς την κατεύθυνση του δορυφόρου. Οι κροσσοί συμβολής καταγράφονται ως τιμές στο διάστημα  $[0, 2\pi]$ .



Εικόνα: 9: Αύξηση του εύρους αντιστοιχεί σε καθίζηση και μείωση σε ανύψωση. United States Geological Survey, <https://ca.water.usgs.gov>

Στη **συμβολομετρική φάση**  $\Phi$ , δηλαδή τη φάση που απεικονίζεται στο συμβολογράφημα συνεισφέρουν ποικίλοι παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, η καμπυλότητα της Γης, η τοπογραφία του εδάφους, οι παραμορφώσεις του εδάφους μεταξύ των

χρονικών στιγμών λήψης των δύο εικόνων, τυχόν τροχιακά σφάλματα, οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας στα σήματα του ραντάρ αλλά και διάφοροι θόρυβοι που αλλοιώνουν τις μετρήσεις. Έτσι, ισχύει ουσιαστικά η παρακάτω σχέση για τη σύνθεση της συμβολομετρικής φάσης (Σχέση 3).

$$\Phi = \Phi_{\text{καμπυλότητα Γης}} + \Phi_{\text{τοπογραφία}} + \Phi_{\text{εδαφική παραμόρφωση}} + \Phi_{\text{τροχιακά σφάλματα}} + \Phi_{\text{επιδράσεις ιονόσφαιρας}} + \Phi_{\text{επιδράσεις τροπόσφαιρας}} + \text{θόρυβοι}$$

Σχέση 3

Η διαφορά φάσης σε κάθε εικονοστοιχείο ενός διαγράμματος κροσσών συμβολής είναι ένα μέτρο της τοπικής γωνίας επίπτωσης ή/και της σχετικής αλλαγής της απόστασης μεταξύ του εκάστοτε συγκεκριμένου σημείου - στόχου και της αντένας του αισθητήρα SAR που είναι ενσωματωμένη στο δορυφόρο. Η τιμή της συμβολομετρικής φάσης (δηλαδή του συνολικού αριθμού των κύκλων φάσης) περιέχει τη ζητούμενη τοπογραφική πληροφορία από την οποία μπορούν να δημιουργηθούν ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος ή να υπολογιστούν τυχόν μικρομετακινήσεις της γήινης επιφάνειας. Μία τυπική μορφή συμβολογραφήματος με σκοπό τον εντοπισμό εδαφικής μετατόπισης φαίνεται στην **Εικόνα 10**. Η συμβολομετρική φάση, με βάση την οποία δημιουργείται το συμβολογράφημα χαρακτηρίζεται από τη **Σχέση 4**. Η διαφορά φάσης, η οποία απεικονίζεται στο συμβολογράφημα μετά τη δημιουργία του και πριν την αποκατάσταση της φάσης ορίζεται από τη **Σχέση 5** (τα φαινόμενα σκέδασης μεταξύ των δύο εικόνων συνήθως απαλείφονται).

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_{\text{scatter}} \pm n \cdot 2\pi$$

Σχέση 4

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \pm n \cdot 2\pi$$

Σχέση 5

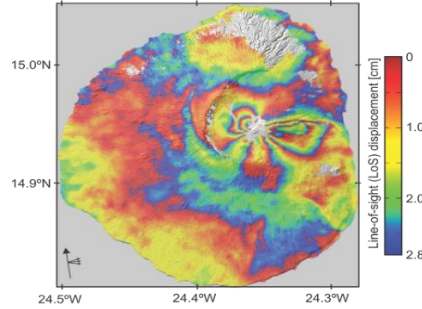
Όπου,

$\lambda$ : το μήκος κύματος του ραντάρ (εδώ 5.6 cm)

$R$ : η απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της Γης στη διεύθυνση της τροχιάς (Line of Sight – LOS)

$\varphi_{\text{scatter}}$ : η φάση που προστίθεται από φαινόμενα σκέδασης

$n$ : ο αριθμός των κύκλων φάσης, ο οποίος μέχρι την αποκατάσταση της φάσης παραμένει άγνωστος



Εικόνα 10: Συμβολογράφημα ανοδικής τροχιάς του Sentinel-1A που απεικονίζει την έκρηξη του ηφαιστείου Fogo (November 2014). Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε 3 cm εδαφικής μετατόπισης (πηγή: Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tec – Comet, 2014)

Σημαντική παράμετρος για την ένδειξη της ποιότητας του συμβολογραφήματος είναι η συνάφεια, η οποία υπολογίζεται μέσω της διαδικασίας της εγγραφής των εικόνων (co-registration). Η εκτίμηση της συνάφειας μεταξύ δύο σύνθετων SAR εικόνων  $u_1$  και  $u_2$  επιτυγχάνεται με χρήση μικρών παραθύρων για όλη την εικόνα (Σχέση 7). Η κανονικοποιημένη συνάφεια υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 6 (SAR EDU, 2014).

$$\gamma = \frac{E\{u_1 u_2^*\}}{\sqrt{E\{|u_1|^2\} E\{|u_2|^2\}}}$$

Σχέση 6

$$|\hat{\gamma}[i, k]| = \frac{\left| \sum_w u_1[i, k] u_2^*[i, k] \right|}{\sqrt{\sum_w |u_1[i, k]|^2 \sum_w |u_2[i, k]|^2}}$$

Σχέση 7

### 3.5 Πηγές σφάλματος

Βασική πηγή σφάλματος σε ένα συμβολογράφημα αποτελεί η συμβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών στη φάση. Εφόσον οι δύο εικόνες SAR έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες, η διαδρομή της ακτινοβολίας είναι διαφορετική σε κάθε μία από αυτές. Η διαδρομή αυτή επηρεάζεται από την υγρασία, τη θερμοκρασία καθώς και την πίεση της ατμόσφαιρας. Ειδικά όταν το κάθετο διάνυσμα βάσης είναι σχετικά μικρό (μικρότερο από 50 μέτρα) οι επιρροές της ατμόσφαιρας γίνονται πιο έντονες.



Στην πραγματικότητα υπάρχουν πολλοί στοιχειώδεις σκεδαστές στην περιοχή που στοχεύει το radar, οι οποίοι είναι πιθανό να μεταβληθούν στο διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στις δύο λήψεις SAR. Αυτές οι μεταβολές προσθέτουν «θόρυβο» στη φάση. Τρεις κύριες πηγές που συμβάλλουν στη δημιουργία θορύβου είναι οι παρακάτω (InSAR Principles - ESA, 2007).

#### 1. Θόρυβος λόγω μεταβολής του σκεδαστή σύμφωνα με το χρόνο

Στην περίπτωση των υδρολογικών λεκανών απορροής ή των περιοχών με πυκνή βλάστηση οι σκεδαστές αλλάζουν μορφή με μεγάλη συχνότητα (της τάξης των milliseconds- χιλιοστών του δευτερολέπτου), ενώ αντίθετα σε βραχώδεις ή αστικές περιοχές παρατηρείται σταθερότητα ακόμα και μετά από την πάροδο ετών.

#### 2. Θόρυβος λόγω της διαφορετικής γωνίας λήψης

Ακόμη και αν οι σκεδαστές δεν παρουσιάσουν σημαντικές αλλαγές με την πάροδο του χρόνου, είναι πιθανή η αλλαγή του «στίγματός» τους λόγω της διαφορετικής μίξης της στοιχειώδους ηχούς που εκπέμπουν. Γι' αυτόν τον λόγο έχει ιδιαίτερη σημασία η κρίσιμη τιμή του διανύσματος βάσης (critical baseline), για την οποία η συμβολομετρική φάση αποτελεί μόνο θόρυβο. Το κρίσιμο διάνυσμα βάσης εξαρτάται από τις διαστάσεις του ground range resolution cell, από τη συχνότητα στην οποία εκπέμπει το radar και από την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου.

#### 3. Θόρυβος λόγω του όγκου του σκεδαστή

Η κρίσιμη τιμή του διανύσματος βάσης μειώνεται στην περίπτωση που οι στοιχειώδεις σκεδαστές δεν εναπόκεινται σε επίπεδη επιφάνεια, αλλά καταλαμβάνουν όγκο. Τότε το σήμα που επιστρέφει παρουσιάζει αλλαγές ανάλογα με το βάθος του εκάστοτε όγκου.

### 3.6 Τύποι εικόνας

Τα προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας είναι δύο εικόνες τύπου SLC (Single Look Complex). Για τη συγκεκριμένη εργασία οι εικόνες λήφθηκαν από τον δορυφόρο Sentinel – 1A μέσω της ιστοσελίδας Scientific Data Hub

Corpernicus. Οι εικόνες από τις οποίες προκύπτει το συμβολογράφημα επιλέγονται με συγκεκριμένα κριτήρια.

### Εικόνες SLC

Οι εικόνες τύπου SLC, δηλαδή Single Look Complex, αποτελούν εικόνες πρώτου επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν με ειδική επεξεργασία (focusing) από τις εικόνες τύπου RAW (επίπεδο μηδέν), οι οποίες περιέχουν πρωτογενή δεδομένα του radar χωρίς αυτά να έχουν υποστεί καμιά επεξεργασία. Οι εικόνες SLC αποτελούνται από εστιασμένα δεδομένα SAR εκφρασμένα σε σύστημα γεωαναφοράς με τη χρήση δεδομένων τροχιάς και θέσης από τον δορυφόρο. Οι εικόνες αυτές ακολουθούν τη γεωμετρία 0-doppler σε κεκλιμένη απόσταση από τον δορυφόρο (slant-range).

Οι δύο εικόνες που προορίζονται για την παραγωγή συμβολογραφήματος πρέπει να έχουν την ίδια τροχιά και να είναι και οι δύο ανοδικής ή και οι δύο καθοδικής πορείας.

## 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 4.1 Περιοχές μελέτης

Το Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης, περιλαμβάνει τρεις (3) Λεκάνες Απορροής Ποταμών:

- **Ρεμάτων Βορείου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου**  
(συνολικής έκτασης 3676 km<sup>2</sup>)
- **Ρεμάτων Νοτίου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου**  
(συνολικής έκτασης 2798 km<sup>2</sup>)
- **Ρεμάτων Ανατολικής Κρήτης**  
(συνολικής έκτασης 1870 km<sup>2</sup>)

Ως «Λεκάνη Απορροής Ποταμού» ορίζεται η εδαφική έκταση από την οποία αποστραγγίζεται το σύνολο της απορροής (βροχόπτωση ή/και χιονόπτωση) μιας περιοχής, μέσω του υδρογραφικού δικτύου της (διαδοχικών ρευμάτων, χειμάρρων, ποταμών, και πιθανώς λιμνών) και παροχετεύεται στη θάλασσα μέσω της εκβολής (ή δέλτα) ποταμού (**Υπουργείο περιβάλλοντος, 2014**). Η λίμνη της Αγιάς αλλά και η λίμνη του Κουρνά ανήκουν στη λεκάνη απορροής ποταμών του βορείου τμήματος Χανίων - Ρεθύμνου – Ηρακλείου με κωδικό GR39.



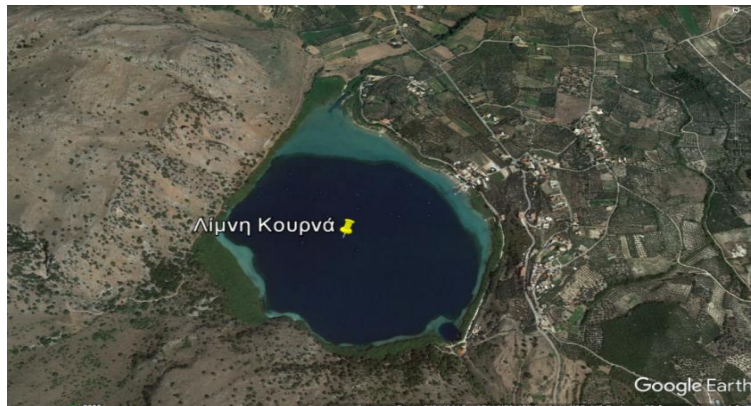
Εικόνα 11: Θέση περιοχών μελέτης

Τα λιμναία συστήματα της Κρήτης είναι περιορισμένα με πολλά από αυτά να είναι ταμειυτήρες που έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια και δύνανται να εξελιχθούν σε αξιόλογους υγρότοπους. Η πλειονότητα των υγροτόπων του νησιού αντιστοιχεί σε ελώδεις εκτάσεις που απαντώνται συνήθως κοντά σε ρεματιές είτε γύρω από παραθαλάσσιες πηγές είτε στις εκβολές ποταμών κοντά στις ακτές, με αρκετούς από αυτούς να έχουν πλέον εξαφανιστεί λόγω αποστραγγιστικών έργων. Λίμνες δεν υπάρχουν στην Κρήτη, εκτός από τη μικρή λίμνη του Κουρνά και το πολύ μικρότερο τέναγος – λίμνη της Αγιάς (Υπουργείο περιβάλλοντος, 2014).

Η θερινή περίοδος διαρκεί από τον Ιούνιο μέχρι τον Σεπτέμβριο και είναι σχετικά δροσερή λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετησίων ανέμων. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία είναι σε ολόκληρη την βόρεια Κρήτη ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο, ενώ στη νότια Κρήτη η ελάχιστη μέση μηνιαία σχετική υγρασία εμφανίζεται τον Ιούλιο. Όσο για τις βροχοπτώσεις, η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη.



Εικόνα 12: Η λίμνη της Αγιάς



Εικόνα 13: Η λίμνη του Κουρνά

#### 4.1.1 Λίμνη Αγιάς

Η λίμνη της Αγιάς βρίσκεται νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων. Έχει κατασκευαστεί στο βόρειο άκρο του ομώνυμου οικισμού, από τον οποίο πήρε και το όνομά της. Η ετυμολογία της ονομασίας του χωριού προέρχεται μάλλον από την αραβική λέξη *αία*=νερό και οφείλεται στις πλούσιες πηγές που αναβλύζουν στην περιοχή και σχηματίζουν τον παραπόταμο του Πλατανιά.

Η λίμνη της Αγιάς έχει έκταση 450 στρεμμάτων και βρίσκεται στην κοιλάδα Κερίτη - Αγιάς. Επικοινωνεί νότια με την κοιλάδα του Φασά, η οποία θεωρείται ως η πιο υγρή της Κρήτης. Η λίμνη δέχεται νερό από υπόγειες πηγές και από τον ποταμό Ξεκλωμένο.

Η τεχνητή λίμνη της Αγιάς υποστηρίζει διαφορετικές υγροτοπικές φυτοκοινωνίες. Η χλωρίδα χαρακτηρίζεται έντονα από τη μεγάλη ποικιλία υδροχαρών φυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλη την έκταση της κοιλάδας του Φασά συναντάται ένα απειλούμενο είδος φτέρης, η *Woodwardia radicans*. Τα σημαντικότερα είδη πανίδας που απαντώνται στον υγρότοπο είναι ορισμένα σπάνια είδη βατράχων, ενώ εκεί βρίσκουν καταφύγιο πολλά αποδημητικά, και μη, πουλιά.

Τα τελευταία χρόνια, η λίμνη αντιμετωπίζει δυσκολίες λόγω των εντατικών αρδευτικών έργων της περιοχής, τα οποία έχουν προκαλέσει τη μείωση του μεγέθους του ταμιευτήρα. Αυτό συνεπάγεται και την παρουσία χαρακτηριστικών έλους σε πολλά σημεία. Επιπλέον, η βιοποικιλότητα της περιοχής έχει υποστεί αλλοιώσεις. Οι κυριότερες από αυτές είναι ο αφανισμός του ενδημικού βατράχου της Κρήτης, αλλά και η εισαγωγή του λατινοαμερικάνικου ζιζανίου *Papsalum distichum*.

Η λίμνη ήταν βάλτος πριν η ΔΕΗ την μετατρέψει σε τεχνητή, για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον, το εργοστάσιο της ΔΕΗ δεν βρίσκεται σε λειτουργία.

Η λίμνη της Αγιάς ανήκει στο δίκτυο Natura 2000 και συγκεκριμένα ως περιοχή κοινοτικής προστασίας (Sites of Community Importance - SCI) ή αλλιώς Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) με κωδικό GR4340006, ενώ ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) ή Special Protection Areas (SPA) έχει κωδικό GR4340020.

#### 4.1.2 Λίμνη Κουρνά

Η λίμνη του Κουρνά αποτελεί τη μοναδική φυσική λίμνη με γλυκό και μόνιμο νερό της νήσου Κρήτης και είναι η νοτιότερη λίμνη στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Βρίσκεται πολύ κοντά στο χωριό Κουρνά, 2,5 χλμ νότια από την παραλία της Γεωργιούπολης, 43 χλμ ανατολικά των Χανίων και 20 χλμ δυτικά του Ρεθύμνου. Η περιοχή υπάγεται διοικητικά στο δήμο Αποκόρωνα και το νομό Χανίων. Στην αρχαιότητα ο ομώνυμος οικισμός υπήρχε με το όνομα Κόριον και η λίμνη ονομαζόταν Κορησία. Είναι πιθανό ότι το όνομα προέρχεται από την αραβική λέξη Kurna που σημαίνει λουτρό.

Το σχήμα της λίμνης είναι κυκλικό με έκταση 579 στρεμμάτων, μέγιστο βάθος 22,5m, μέγιστο μήκος 1080m και μέγιστο πλάτος 880m. Ο όγκος του νερού το καλοκαίρι ανέρχεται περίπου στα 7.5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Η λίμνη ανήκει υδρολογικά στην ορεινή λεκάνη απορροής του χειμάρρου των Βρυσών. Τα νερά της λίμνης μεταφέρονται στη θάλασσα μέσω του ποταμού Δέλφινα.

Η λίμνη δημιουργείται από τη συσσώρευση του υπόγειου νερού, το οποίο καθώς κατεβαίνει από την οροσειρά των Λευκών Ορέων παρεμποδίζεται από τα αδιαπέρατα πετρώματα και την κατάκλιση του φυσικού κοιλώματος. Το νερό, που τροφοδοτεί τη λίμνη, προέρχεται από την πηγή Αμάτι, η οποία το καλοκαίρι εμφανίζεται στην επιφάνεια της λίμνης, ενώ τον χειμώνα βρίσκεται κάτω από αυτήν. Η πηγή βρίσκεται στην νοτιοανατολική πλευρά όπου και παρατηρείται στο έδαφος μεγάλο πορώδες. Η περιοχή από γεωλογική σκοπιά χαρακτηρίζεται σαν ένα τεκτονικό ρήγμα που κατακλύζεται με νερό λόγω των νεογενών αποθέσεων που εξασφαλίζουν τη στεγανότητα της. Η διαφυγή του νερού από τη λίμνη πραγματοποιείται από τις βόρειες και βορειοδυτικές παρυφές της και συγκεκριμένα αποστραγγίζεται μέσω του "αύλακα" προς το ποταμό Δέλφινα (ΕΜΠ, 2010). Σε κάποια τμήματα της λίμνης έχουν γίνει έργα υπερχείλισης και αποστράγγισης του νερού προς τις καλλιεργούμενες εκτάσεις και την θάλασσα.

Πρόκειται για μία από τις λίγες περιοχές της Κρήτης όπου υπάρχει άφθονο γλυκό νερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η χλωρίδα του υδροβιότοπου περιλαμβάνει σπάνια υδροχαρή φυτά και δέντρα. Μάλιστα, το σκοτεινό χρώμα του νερού οφείλεται στα φύκια

που βρίσκονται στο πυθμένα της λίμνης. Από την πανίδα ξεχωρίζει το σπάνιο είδος χελώνας *Malaclemys terrapin*.

Η λίμνη Κουρνά είναι ενταγμένη στο δίκτυο Natura 2000 και συγκεκριμένα ως περιοχή κοινοτικής προστασίας (Sites of Community Importance - SCI) ή αλλιώς Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) με κωδικό GR4340010.

## 4.2 Δεδομένα στάθμης

Τα δεδομένα στάθμης για τη λίμνη της Αγιάς λήφθηκαν από τον Ο.Α.Κ. Α.Ε., δηλαδή τον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης. Τα δεδομένα στάθμης για τη λίμνη του Κουρνά λήφθηκαν από το διαδίκτυο, όπου έχουν αναρτηθεί δημόσια από την Διεύθυνση Υδάτων Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης (<http://www.apdkritis.gov.gr/el/open-data>). Οι τιμές της στάθμης για τις δύο περιοχές μελέτης παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4**.

Πίνακας 4: Δεδομένα στάθμης νερού

Ημερομηνία (dd/mm/yy)	Στάθμη νερού (m)	
	ΚΟΥΡΝΑΣ	ΑΓΙΑ
06/21/2015	3.76	2.10
07/03/2015	3.94	2.07
07/27/2015	4.48	1.97
08/08/2015	4.63	2.02
08/20/2015	4.70	2.03
09/01/2015	4.89	2.00
09/13/2015	5.02	1.91
09/25/2015	5.10	2.05
10/07/2015	5.22	2.03
11/24/2015	5.02	2.02
12/06/2015	4.95	2.04
12/18/2015	5.06	2.12
12/30/2015	4.74	2.05
02/28/2016	4.07	2.07
03/11/2016	4.29	2.04
04/04/2016	4.70	2.01
04/16/2016	4.90	1.84



### 4.3 Δεδομένα βροχοπτώσεων

Με σκοπό τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων και τον ακριβή σχολιασμό τους, έγινε υπολογισμός των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης για τις ημερομηνίες που αντιστοιχούν στις δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δεδομένα λήφθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Αλικιανού για τη λίμνη της Αγιάς και από τον μετεωρολογικό σταθμό Βρυσσών για τη λίμνη Κουρνά. Οι τιμές βροχοπτώσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5**.

Πίνακας 5: Τιμές βροχόπτωσης για τις περιοχές μελέτης

Ημερομηνία (dd/mm/year)	Βροχόπτωση	
	ΑΓΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ
21/06/2015	-	-
03/07/2015	0	0
27/07/2015	0	0
08/08/2015	0	14.2
20/08/2015	0	0
01/09/2015	0	0
13/09/2015	0	0
25/09/2015	0	0.8
07/10/2015	0	0
24/11/2015	0	0
06/12/2015	0	0.2
18/12/2015	33.20	29.60
30/12/2015	2.6	17.2
28/2/2015	0	0.2
11/3/2015	0	0
4/4/2015	0	0
16/4/2015	0	0.2

### 4.4 Δεδομένα εικόνων

Οι εικόνες του Sentinel-1A προσφέρονται δωρεάν στη βάση δεδομένων Copernicus (Copernicus Open Access Hub), την οποία διαχειρίζεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος – ESA. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συμβολογραφημάτων ήταν όπως έχει ήδη αναφερθεί τύπου SLC (Single Look Complex), IW (Interferometric Wide Swath) και ανοδικής τροχιάς. Η πολικότητα για την οποία εφαρμόστηκε η επεξεργασία τόσο για τα συμβολογραφήματα όσο και για την οπισθοσκέδαση ήταν απλή και συγκεκριμένα τύπου VV (Vertical-Vertical).

Οι εικόνες που επιλέχθηκαν ήταν όλες ανοδικής τροχιάς (ascending). Αυτή η επιλογή έγινε με σκοπό να εξασφαλιστεί ομοιομορφία στα αποτελέσματα, αλλά και λόγω της ευκολότερης διαχείρισης των εικόνων ascending, αφού σε αυτές και οι δύο λίμνες βρίσκονταν στην ίδια λωρίδα – swath (συγκεκριμένα στην IW2). Ακόμη, χαρακτηρίζονταν από την ελάχιστη δυνατή χρονική γραμμή βάσης (temporal baseline), η οποία για τον Sentinel-1A ισούται με 12 ημέρες, δηλαδή τον χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψει ο δορυφόρος στο ίδιο σημείο κατά την περιφορά του γύρω από τη Γη. Βασικό κριτήριο για την επιτυχημένη εφαρμογή της συμβολομετρίας είναι η μικρή χρονική μεταξύ των master και slave, διότι έτσι παρέχεται καλύτερη συνάφεια στη συμβολομετρική φάση (Hong & Won, 2006). Επίσης, επιλέχθηκε η πολικότητα VV μεταξύ των υπόλοιπων διαθέσιμων, γιατί ήταν η καλύτερη δυνατή επιλογή, δεδομένου ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του νερού παρέχονται από την πολικότητα HH (Kim et al., 2009), η οποία όμως δεν ήταν διαθέσιμη για τις εικόνες του δορυφόρου Sentinel-1A.

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία συμβολογραφημάτων και τα χαρακτηριστικά τους αντίστοιχα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Η οπισθοσκέδαση, δηλαδή η ακτινοβολία που επιστρέφει στο ραντάρ μετά από την πρόσπτωσή της στην επιφάνεια της Γης, υπολογίστηκε σε μονάδες dB για κάθε μία εικόνα ξεχωριστά.

Οι ημερομηνίες λήψεις των εικόνων του δορυφόρου Landsat παρουσιάζονται στον

Πίνακα 7. Τα δεδομένα των εικόνων αυτών χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βλάστησης σε κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο, δηλαδή για τον υπολογισμό του δείκτη NDVI. Οι συγκεκριμένες ημερομηνίες επιλέχθηκαν με κριτήριο την αντιστοιχία τους στις περιόδους για τις οποίες είχαν κατασκευαστεί τα συμβολογραφήματα.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά εικόνων Sentinel-1A που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία συμβολογραφημάτων

Αριθμός συμβ/ματ ος	Μήνας	Master (dd/mm/yy)	Slave (dd/mm/yy)	B <sub>perp</sub>	Incidence angle midswath	Height Ambiguous	ORBIT
1	ΙΟΥΝΙΟΣ	03/07/2015	21/06/2015	-27.54	39.4	578.48	ASC
2	ΙΟΥΛΙΟΣ	27/07/2015	08/08/2015	-5.01	39.4	3179.72	ASC
3	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	08/08/2015	20/08/2015	43.64	39.4	-362.36	ASC
4	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	01/09/2015	13/09/2015	-18.61	39.3	848.79	ASC
5	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	09/25/2015	07/10/2015	-40.16	39.3	393.32	ASC
6	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	24/11/2015	06/12/2015	-93.05	39.3	169.81	ASC



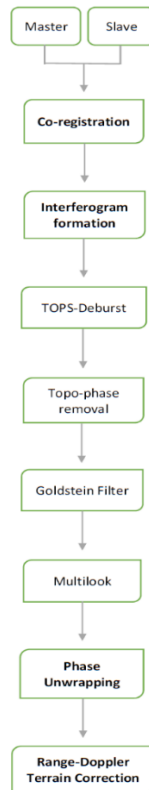
7	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	18/12/2015	30/12/2015	35.27	39.3	-448.92	ASC
8	ΜΑΡΤΙΟΣ	28/02/2016	11/03/2016	-72.74	39.3	217.9	ASC
9	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	04/04/2016	16/04/2016	141.31	39.3	-112.17	ASC

Πίνακας 7: Ημερομηνίες λήψης των εικόνων Landsat

Ημερομηνία λήψης (dd/mm/year)
04/09/2015
18/07/2015
19/08/2015
06/10/2015
23/11/2015
25/12/2016
27/02/2016
15/04/2016

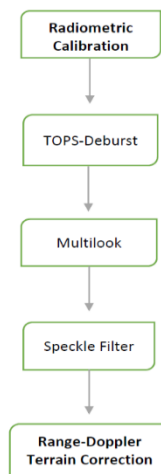
## 4.5 Βήματα επεξεργασίας

Παρακάτω (*Εικόνα 14*) περιγράφεται η διαδικασία της επεξεργασίας των εικόνων σε μορφή διαγράμματος ροής. Πρώτα παρουσιάζεται η μέθοδος σύμφωνα με την οποία κατασκευάστηκαν και επεξεργάστηκαν τα συμβολογραφήματα, η οποία βασίστηκε στις οδηγίες που δίνονται από τον Ευρωπαϊκός Οργανισμό Διαστήματος - ESA στο Sentinel-1 Toolbox – **TOPSAR Interferometry Tutorial** (2016). Έπειτα παρουσιάζεται η μέθοδος σύμφωνα με την οποία υπολογίστηκε η τιμή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας για κάθε μία από τις εικόνες (*Εικόνα 15*), η οποία βασίστηκε τις οδηγίες που δίνονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος – ESA στο Sentinel-1 Toolbox – **SAR Basics Tutorial** (2016).



Εικόνα 14: Βήματα επεξεργασίας για τη δημιουργία συμβολογραφήματος

Μετά το πέρας της εκάστοτε διαδικασίας οι παραγόμενες εικόνες εισάχθηκαν στο λογισμικό ArcGIS όπου επεξεργάστηκαν αξιοποιώντας το εργαλείο της στατιστικής ανάλυσης με στόχο την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 15: Βήματα επεξεργασίας για τον υπολογισμό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας

## 4.6 Στατιστική ανάλυση

Η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του λογισμικού ArcGIS. Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκε μεγάλο πλήθος τυχαίων σημείων (random points) στην περιοχή ενδιαφέροντος κάθε λίμνης, από τα οποία βρέθηκαν οι μέσες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων.

Τα δεδομένα που προέκυψαν από την επεξεργασία των συμβολογραφημάτων αλλά και εκείνα που αφορούν την οπισθοσκέδαση συνδέθηκαν με τις μετρήσεις στάθμης των επίγειων σταθμών με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης. Η κύρια μέθοδος που εφαρμόστηκε με σκοπό να βρεθεί αν υπάρχει συναρτησιακή σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής ήταν γραμμική παλινδρόμηση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση της βλάστησης στα αποτελέσματα της επεξεργασίας των συμβολογραφημάτων αλλά και στην ανταπόκριση των τιμών οπισθοσκέδασης του ραντάρ με την εύρεση της μέσης τιμής του δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς σε κάθε λίμνη και σε κάθε χρονική περίοδο για την οποία είχε παραχθεί συμβολογράφημα. Έτσι, έγινε δυνατή η εκτίμηση της κατάστασης της βλάστησης σε κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο, πράγμα που αποτέλεσε σημαντική πληροφορία για τη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας της βλάστησης εφαρμόστηκε σαν φίλτρο, επιτρέποντας τη σύγκριση των μελετώμενων παραμέτρων σε συνθήκες πραγματικές, όπου η βλάστηση επηρεάζει το αποτέλεσμα, και σε συνθήκες όπου δεν εμφανίζεται βλάστηση.

### Απλός αριθμητικός μέσος

Ο αριθμητικός μέσος είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μέτρο θέσης. Ανάλογα με τη μορφή των στοιχείων διακρίνεται σε απλό αριθμητικό, σταθμικό αριθμητικό, αριθμητικό μέσο ομαδοποιημένου πληθυσμού, αριθμητικό μέσο κατανομής (Ζαΐρης, 2010). Στην παρούσα εργασία ήταν αρκετή η εφαρμογή του απλού αριθμητικού μέσου για τη διαχείριση των αποτελεσμάτων, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^N x_i}{N}$$

Σχέση 8

Όπου,

$\bar{x}$ : ο απλός αριθμητικός μέσος

$x_i$ : η τιμή της εξεταζόμενης παραμέτρου

N: το πλήθος των τιμών

### Τυπική απόκλιση

Τα μέτρα διασποράς ελέγχουν κατά πόσο οι τιμές μιας σειράς ή μιας κατανομής διασπείρονται δεξιά και αριστερά από ένα κεντρικό μέτρο τους, το οποίο συνήθως είναι ο αριθμητικός μέσος  $\bar{x}$ . Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέτρα διασποράς είναι το εύρος μεταβολής, η μέση απόκλιση, η διακύμανση, ο συντελεστής μεταβλητότητας, η τεταρτημοριακή απόκλιση. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η διακύμανση και πιο συγκεκριμένα η «τυπική απόκλιση» για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Η διακύμανση είναι μη αρνητική ποσότητα, λαμβάνει υπόψη όλες τις τιμές και δέχεται αλγεβρικούς χειρισμούς. Παρ' όλα αυτά μειονεκτεί διότι εκφράζεται σε τετράγωνα των μονάδων μέτρησης της παραμέτρου. Για αυτόν τον λόγο υπολογίζεται η τυπική απόκλιση, η οποία αντιστοιχεί ουσιαστικά στην τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης (Ζαΐρης, 2010). Για την ακρίβεια, στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η «δειγματική διακύμανση», η οποία χρησιμοποιείται όταν οι τιμές αποτελούν τυχαίο δείγμα μεγέθους n. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις για τη διακύμανση, την τυπική απόκλιση και τη δειγματική διακύμανση.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Σχέση 9

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Σχέση 10

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Σχέση 11

## Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Η γραμμική παλινδρόμηση έχει ως σκοπό την κατασκευή ενός μοντέλου που να περιγράφει ικανοποιητικά τη σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης συνεχούς μεταβλητής  $Y$  και μίας ή περισσότερων συνεχών ανεξάρτητων μεταβλητών  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Στην περίπτωση που η σχέση της εξαρτημένης μεταβλητής είναι γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων (ανεξάρτητων μεταβλητών) τότε η περιγραφή της σχέσης αυτής γίνεται βάση ενός γραμμικού μοντέλου. (Δημητροπουλάκης, 2013).

Ο όρος «απλή» δηλώνει ότι υπάρχει μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$ . Η μεταβλητή, η οποία είναι εξαρτώμενη της  $X$ , είναι η  $Y$ . Η διερεύνηση του τρόπου και της έντασης της συμμεταβολής των  $X$  και  $Y$  επιτυγχάνεται μέσω του υπολογισμού του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$ .

Στην πράξη, ο πληθυσμός όλων των  $N$  ζευγών  $(x_i, y_i)$  είναι άγνωστος, άρα και οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  του γραμμικού υποδείγματος είναι άγνωστες. Σκοπός είναι η εκτίμησή τους από ένα δείγμα διατεταγμένων ζευγών με την ευθεία δειγματικής παλινδρόμησης ή διαφορετικά ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω (Αδαμόπουλος, Δαμιανού, & Σβέρκος, 1999):

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$$

Σχέση 12

$$\hat{\beta} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

Σχέση 13

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Σχέση 14, Σχέση 15

Όπου,

$n$ : το πλήθος των παρατηρήσεων

$x_i$ : οι παρατηρήσεις της ανεξάρτητης μεταβλητής

$y_i$ : οι παρατηρήσεις της εξαρτημένης μεταβλητής

Στόχος είναι η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της ευθείας στα σημεία  $(x_i, y_i)$  του δείγματος, η οποία σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Ordinary Least Squares – OLS), είναι η εκείνη για την οποία ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων, δηλαδή των κατακόρυφων αποστάσεων των σημείων από την ευθεία παλινδρόμησης. Η αξιολόγηση παλινδρόμησης γίνεται με την χρήση συμπληρωματικών μέτρων που προσδιορίζουν το πόσο καλά η (εκτιμημένη) γραμμή παλινδρόμησης εξηγεί (εφαρμόζει) τα στοιχεία του δείγματος. Τα μέτρα αυτά ονομάζονται στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης της παλινδρόμησης.

### Συντελεστής προσδιορισμού $R^2$

Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  (regression  $R^2$ ) μετρά το ποσοστό της δειγματικής διακύμανσης του  $Y$  που εξηγείται από το  $X$ . Δεν έχει μονάδα μέτρησης και το εύρος τιμών του είναι μεταξύ 0 (καθόλου εφαρμογή) και 1 (τέλεια εφαρμογή) (Κουνδούρη, 2009). Το πηλίκο  $R^2 \in [0, 1]$  της μεταβλητότητας  $\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$  ερμηνεύεται από την  $X$  ως προς τη συνολική μεταβλητότητα της  $Y$ . Ο υπολογισμός του συντελεστή προσδιορισμού πραγματοποιείται με την εφαρμογή του παρακάτω τύπου:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS}$$

Σχέση 16

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2, \quad TSS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

Σχέση 17, Σχέση 18

όπου

$Y_i$ : οι παρατηρούμενες μεταβλητές της εξαρτώμενης μεταβλητής  $Y$

$\bar{Y}$ : ο μέσος όρος της μεταβλητής  $Y$

$\hat{Y}_i$ : οι υπολογιζόμενες από την παλινδρόμηση τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής  $Y$

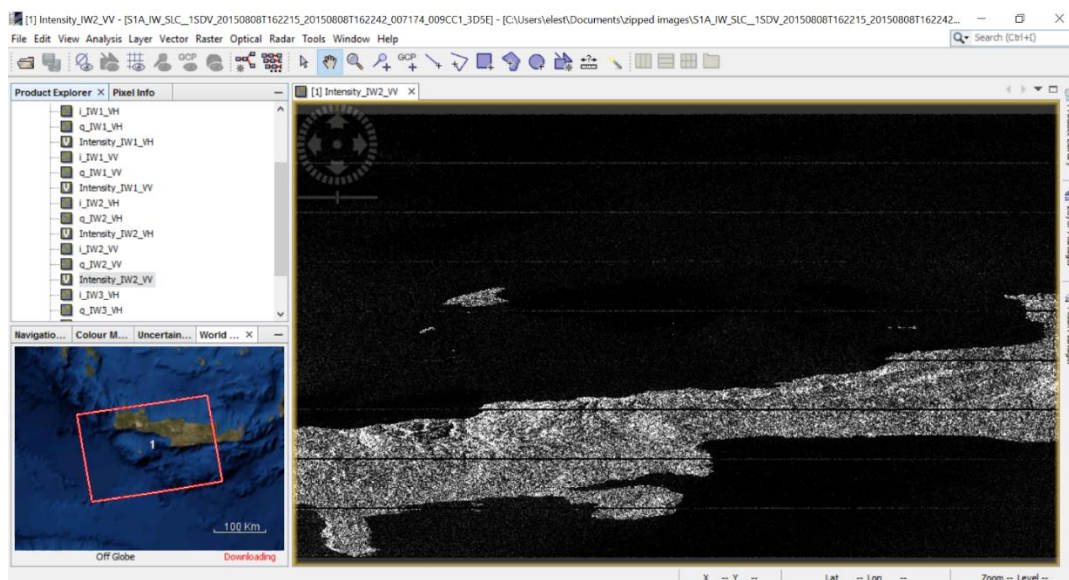
$\bar{\hat{Y}}$ : Ο μέσος όρος των υπολογιζόμενων από την παλινδρόμηση τιμών της εξαρτώμενης μεταβλητής

Ο  $R^2$  είναι δειγματικό μέτρο και ελέγχει το βαθμό προσαρμογής της ευθείας  $\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$  στο νέφος των σημείων του δείγματος. Δίνει το βαθμό εμπιστοσύνης που χαρακτηρίζει την ευθεία παλινδρόμησης, δηλαδή κατά πόσο αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το δείγμα.

## 5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ

### 5.1 Λογισμικό SNAP

Το SNAP (Sentinel Application Platform) είναι ένα λογισμικό, το οποίο ανέπτυξε ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency – ESA) για την επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων. Σε αυτό περιέχονται εργαλειοθήκες ανοικτού κώδικα για την εκμετάλλευση των δεδομένων, τα οποία λαμβάνονται από τις αποστολές των δορυφόρων Sentinel.



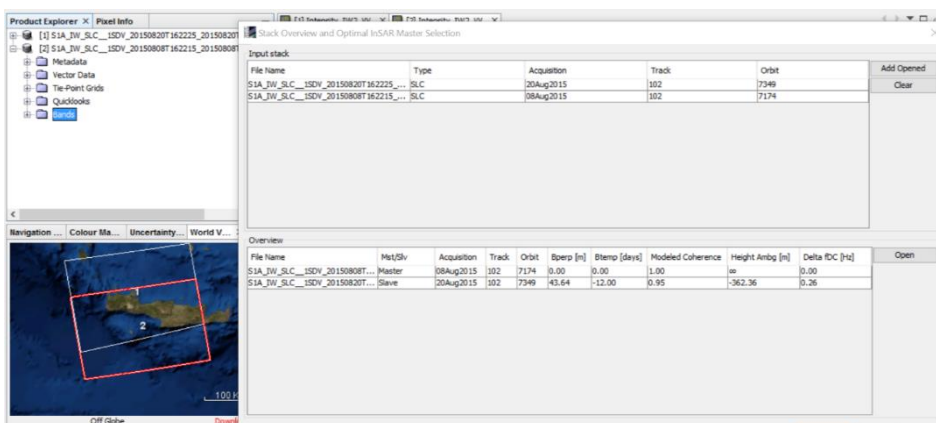
Εικόνα 16: Η αρχική μορφή της εικόνας του δορυφόρου Sentinel-1A όπως λαμβάνεται από τη βάση Copernicus

## 5.2 Δημιουργία συμβολογραφήματος

### 5.2.1 Εγγραφή εικόνας (Co-registration)

Η διαδικασία εγγραφής ή συμπροσαρμογής είναι βήμα απαραίτητο για τον ακριβή προσδιορισμό των διαφορών φάσης, συνεπώς και μετατόπισης. Εφόσον ο δορυφόρος δεν περνάει ακριβώς από την ίδια θέση, είναι αναμενόμενο η λήψη να μην αφορά ακριβώς την ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά να υπάρχει μία μικρή απόκλιση. Ο σκοπός της διαδικασίας είναι να προκύψει μία τελική εικόνα στην οποία θα φαίνεται η διαφορά φάσης μεταξύ της εικόνας αναφοράς master και της εικόνας slave.

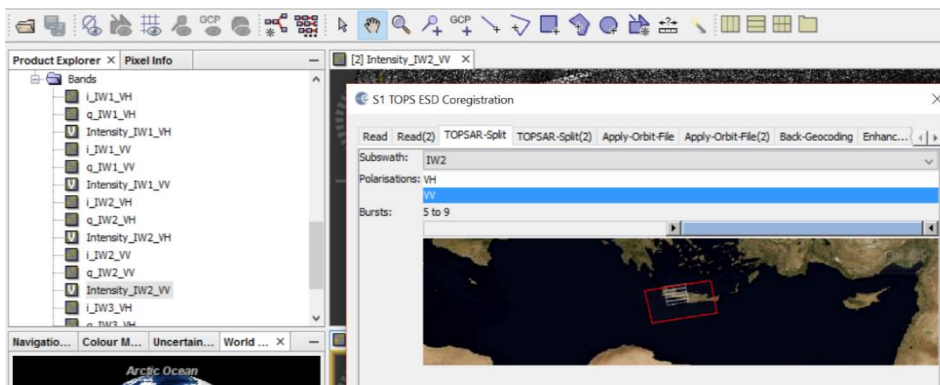
Η επιλογή της εικόνας που είναι καταλληλότερη ως εικόνα αναφοράς (master) έγινε με το εργαλείο InSAR Stack Overview στο περιβάλλον του λογισμικού SNAP. Με αυτόν τον τρόπο το λογισμικό προτείνει απευθείας τη βέλτιστη επιλογή και καταγράφει σημαντικές πληροφορίες για τα στοιχεία που συνδέουν τις δύο εικόνες, όπως για παράδειγμα, τις γραμμές βάσεις (χρονική και κάθετη) και το ύψος ασάφειας (ambiguous height).



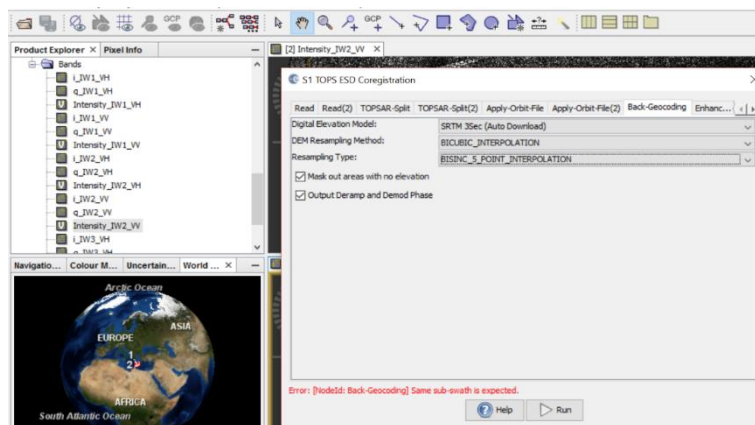
Εικόνα 17: Επιλογή master με το εργαλείο InSAR Stack Overview

Το προϊόν της διαδικασίας αυτής είναι μία νέα εικόνα που αποτελεί συνδυασμό των δύο λήψεων. Οι αρχικές εικόνες ονομάζονται master και slave αντίστοιχα με το ρόλο που επιτελούν. Η διαδικασία γίνεται για κάθε ζευγάρι εικόνων με βάση τη γεωμετρία της εικόνας master, δηλαδή τα pixels της εικόνας slave εγγράφονται με τη βοήθεια μιγαδικών αριθμών στα pixels της εικόνας αναφοράς master. Εκτός από τη μεταβολή της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας, γίνεται και εκ νέου υπολογισμός της φάσης και του πλάτους του σήματος για όλα τα εικονοστοιχεία στις νέες θέσεις με παρεμβολή.

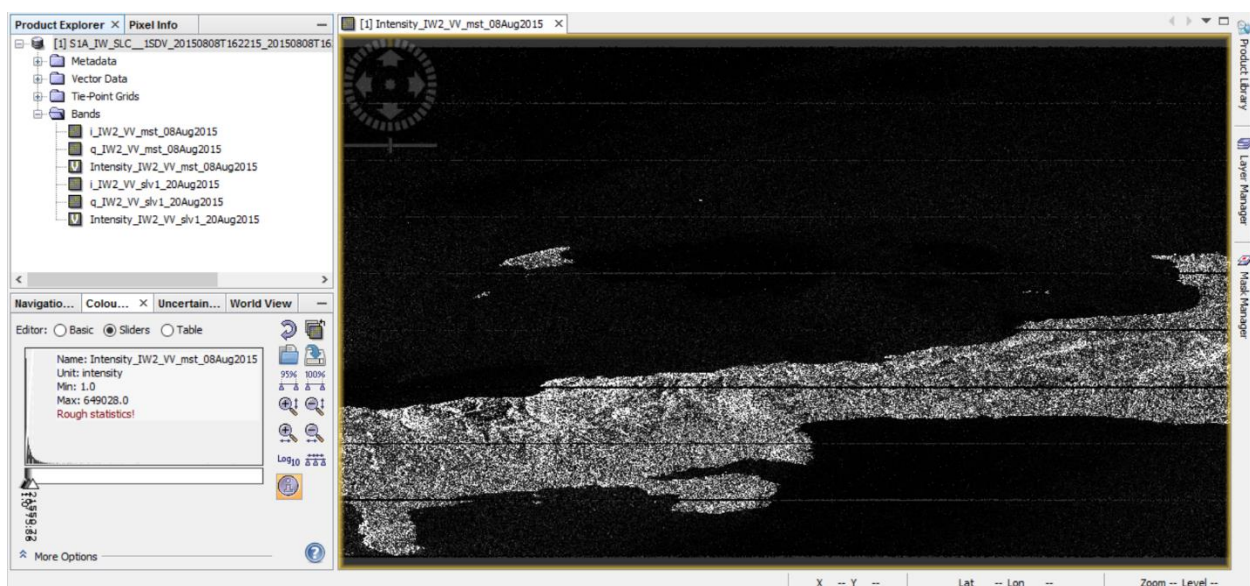




Εικόνα 18: Το παράθυρο διαλόγου για την εφαρμογή TOPSAR-Split



Εικόνα 19: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της επεξεργασίας back-geocoding

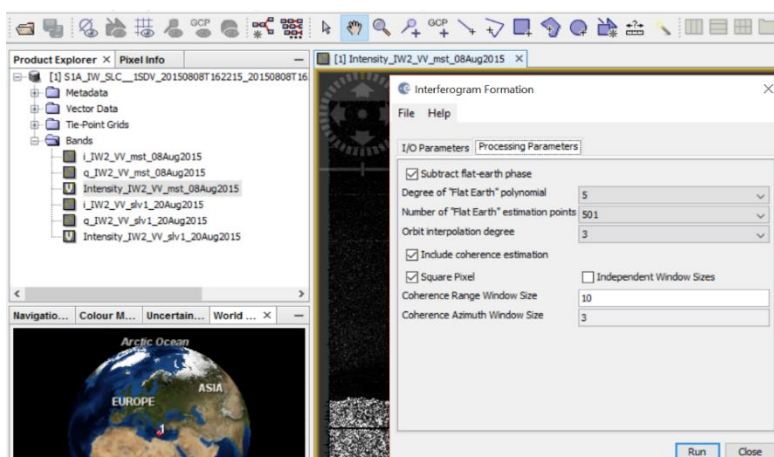


Εικόνα 20: Τελικό προϊόν της εγγραφής των εικόνων master και slave

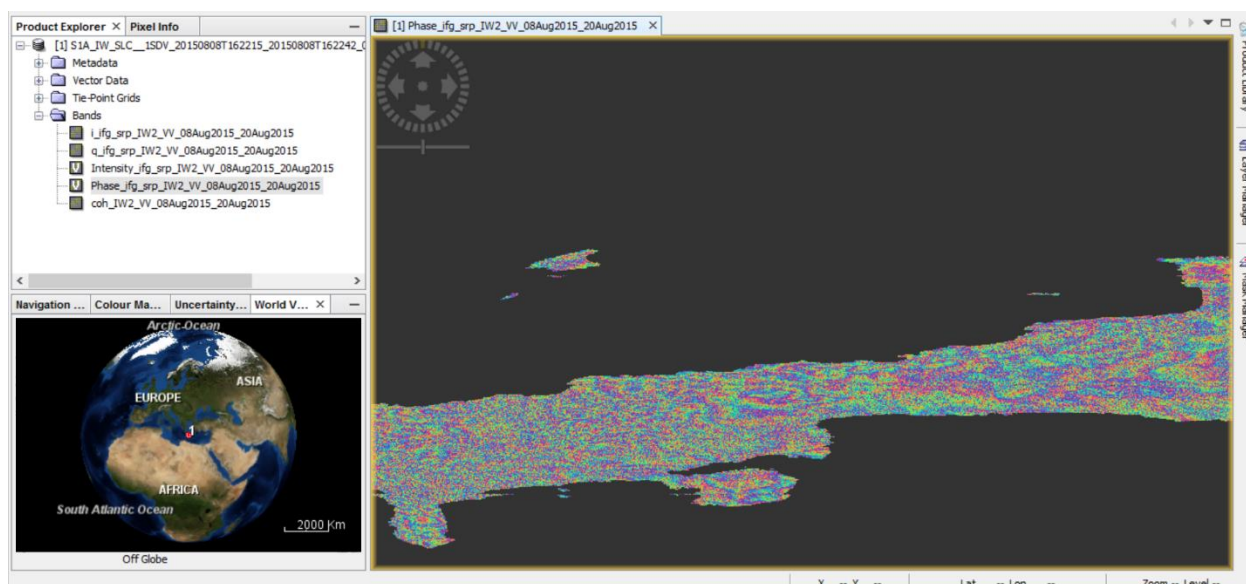
## 5.2.2 Σχηματισμός συμβολογράφηματος (Interferogram formation)

Σε αυτό το στάδιο δημιουργείται το συμβολογράφημα, στο οποίο κάθε pixel εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αρχικών εικόνων. Όταν εξάγεται το συμβολογράφημα είναι σημαντικό να αφαιρείται η συμβολή στη φάση που υπάρχει λόγω της καμπυλότητας της Γης.

Στο συμβολογράφημα έχουμε συνεισφορά φάσης από πέντε πηγές:  $\Delta\phi_{\text{flattening}}$  (καμπυλότητα Γης),  $\Delta\phi_{\text{elevation}}$  (ανύψωση),  $\Delta\phi_{\text{displacement}}$  (μετατόπιση),  $\Delta\phi_{\text{atmosphere}}$  (ατμόσφαιρα),  $\Delta\phi_{\text{noise}}$  (πρόσθετοι θόρυβοι), σύμφωνα με την (Σχέση 1) .



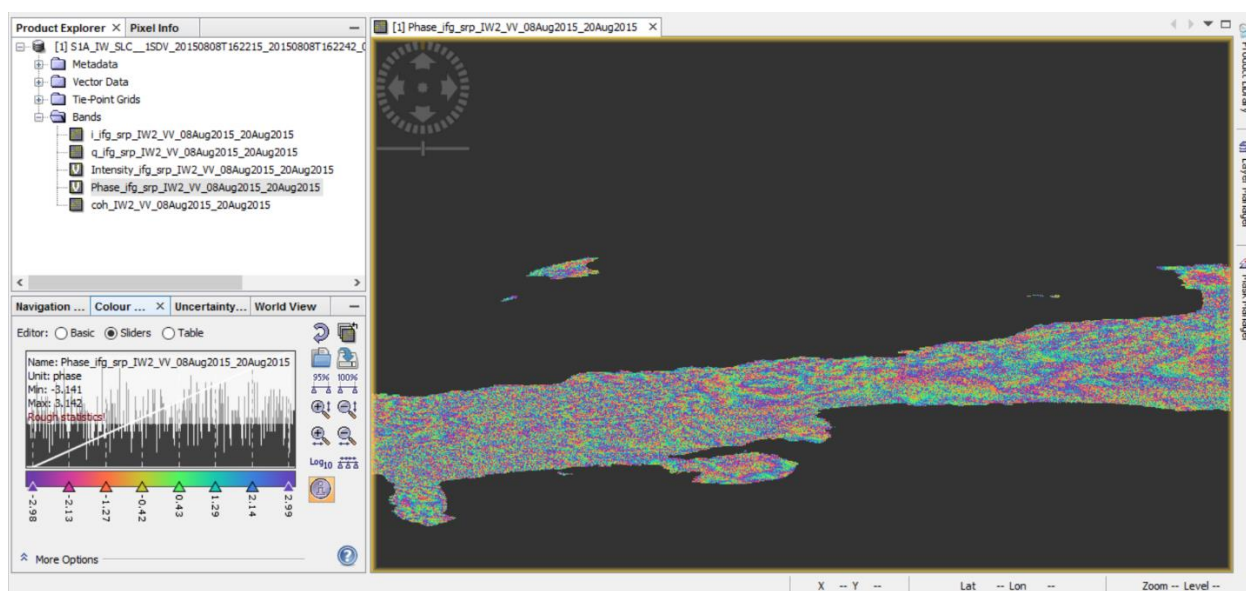
Εικόνα 21: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για τον σχηματισμό συμβολογραφήματος



Εικόνα 22: Τελικό προϊόν που προκύπτει από τον σχηματισμό συμβολογραφήματος

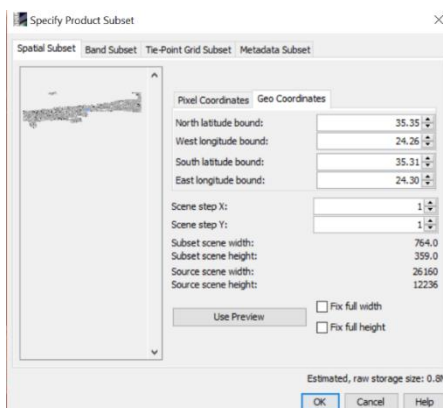
### 5.2.3 Ενοποίηση εικόνας (TOPS-Deburst) και δημιουργία subset

Με αυτήν την εντολή ενώνονται τα bursts σε μία ενιαία εικόνα δίχως ενδιάμεσα κενά. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη συνέχεια της επεξεργασίας του συμβολογραφήματος, αφού ενώνονται τα pixel που βρίσκονται σε διαφορετικά bursts και το τελικό προϊόν είναι το ενοποιημένο συμβολογράφημα (**Εικόνα 23**).



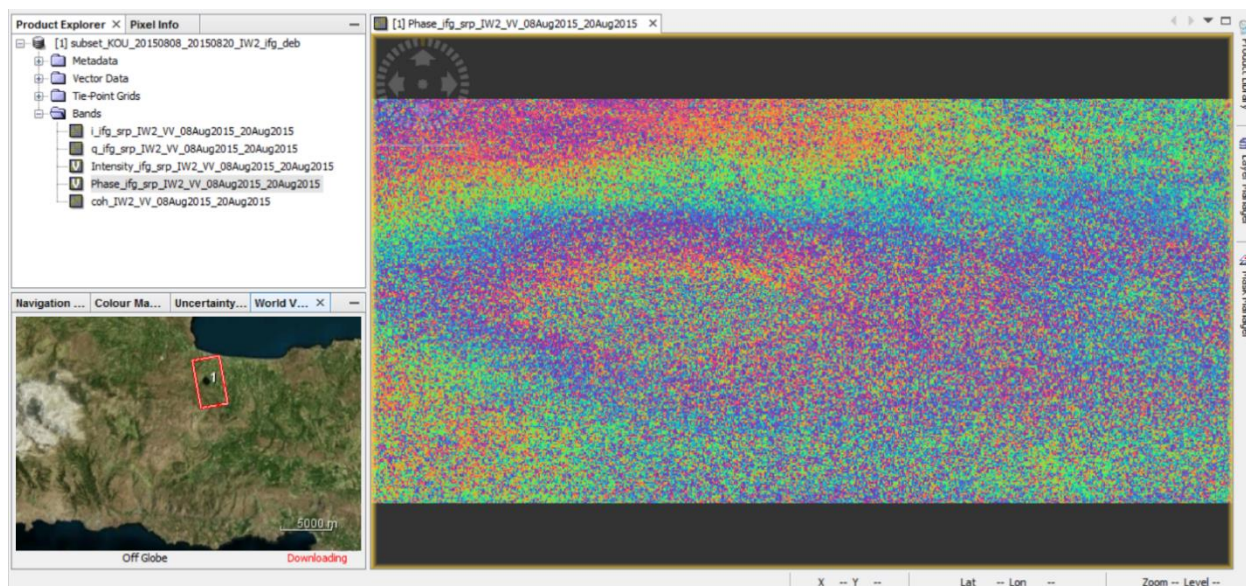
Εικόνα 23: Το ενοποιημένο συμβολογράφημα έπειτα από την αφαίρεση των "bursts"

Μετά την εφαρμογή De-burst είναι δυνατή η αποκοπή της περιοχής ενδιαφέροντος με τη δημιουργία subset (**Εικόνα 25**). Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των γεωγραφικών συντεταγμένων που ορίζουν το πλαίσιο της αποκοπής (**Εικόνα 24**). Το βήμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού έτσι περιορίζεται ο όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία και μειώνεται η διάρκεια κάθε μετέπειτα επεξεργασίας σε δευτερόλεπτα.



Εικόνα 24: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές για τη δημιουργία subset



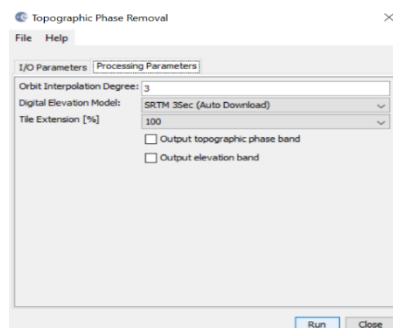


Εικόνα 25: Η αποκοπή της περιοχής μελέτης με τη δημιουργία subset

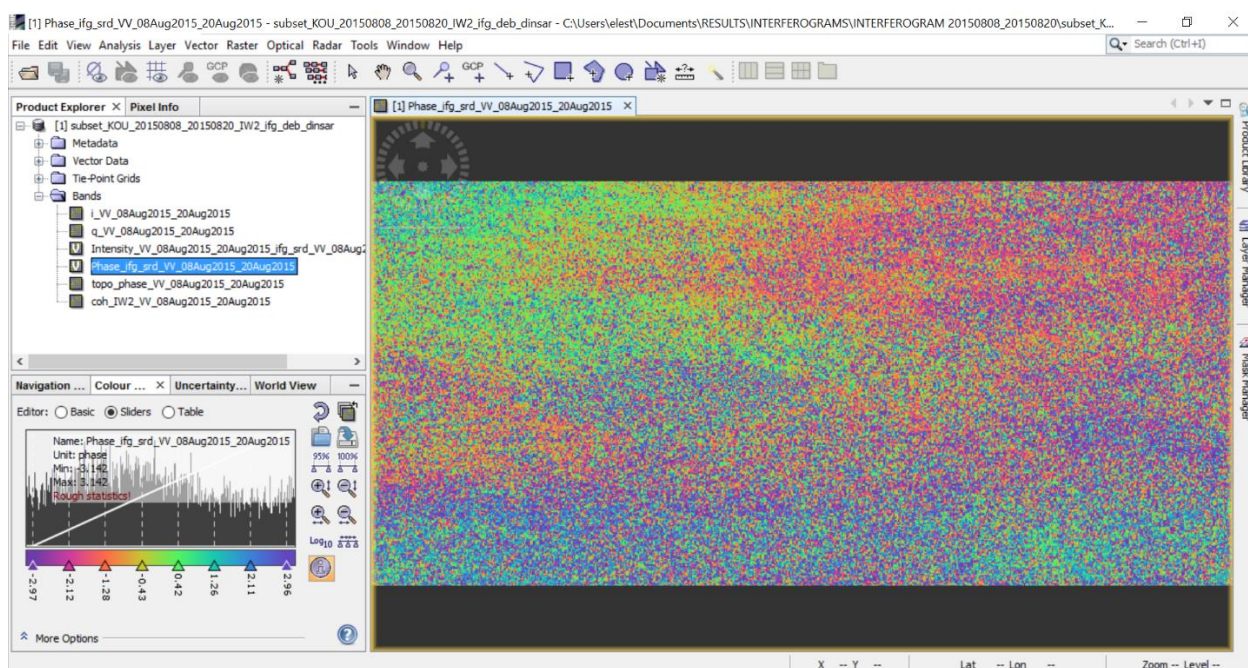
#### 5.2.4 Αφαίρεση φάσης τοπογραφίας (Topo-phase removal)

Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο εικόνων λόγω τοπογραφίας είναι βήμα απαραίτητο για την απομόνωση της επιθυμητής διαφοράς φάσης, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι εκείνη που φορά τη μετατόπιση της εδαφική επιφάνειας και πιο συγκεκριμένα της επιφάνειας νερού. Σημειώνεται ότι για τη λίμνη της Αγιάς δεν εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη επεξεργασία λόγω του ήπιου αναγλύφου της περιοχής. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι σε πεδινές περιοχές η αφαίρεση της τοπογραφίας επιδρά αρνητικά στην ποιότητα του συμβολογραφήματος, γι' αυτό και η λίμνη της Αγιάς εξαιρέθηκε από την επεξεργασία αυτή.

Στην **Εικόνα 26** φαίνεται η εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου SRTM 3Sec σύμφωνα με το οποίο αφαιρείται η πρόσθετη διαφορά φάσης λόγω τοπογραφίας, με αποτέλεσμα να προκύπτει το διορθωμένο πλέον συμβολογράφημα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 27**. Με την απομάκρυνση της τοπογραφικής φάσης που περιλαμβάνεται στο συμβολογράφημα, προκειμένου να προκύψει το διαφορικό συμβολογράφημα. Η διαφορική φάση που προκύπτει εκφράζει τις μεταβολές της απόστασης δορυφόρου – στόχου μεταξύ των λήψεων, συμπεριλαμβανομένων των όποιων επιδράσεων από παράγοντες αποσυσχέτισης, όπως της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 26: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για την αφαίρεση της φάσης τοπογραφίας



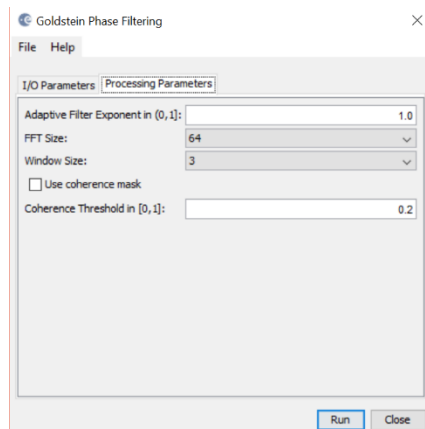
Εικόνα 27: Το συμβολογράφημα έπειτα από την αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης

### 5.2.5 Εφαρμογή φίλτρου (Goldstein Filter)

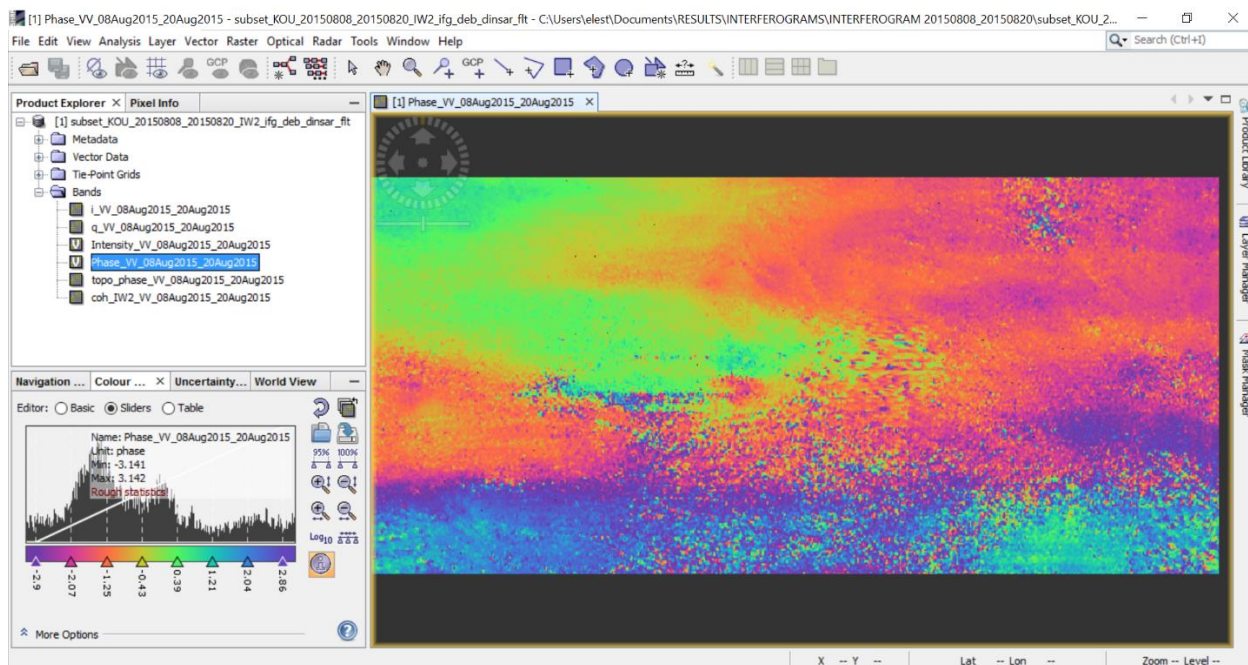
Κατά τη δημιουργία του συμβολογραφήματος, πολλοί στοιχειώδεις ανακλαστές εντός του ίδιου εικονοστοιχείου προκαλούν φαινόμενα στίγμάτων. Τα στίγματα μπορεί να αποφευχθούν αν εφαρμοστούν φίλτρα σε κάθε μία εικόνα, πριν από τη δημιουργία του συμβολογραφήματος (Gatelli et al., 1994). Στο λογισμικό SNAP είναι δυνατή η χρήση φίλτρου μετά από τη δημιουργία του συμβολογραφήματος.

Το φίλτρο που εφαρμόστηκε είναι το λεγόμενο Goldstein Filter, το οποίο σχεδιάστηκε από τους Goldstein και Werner (1998). Στόχος του είναι να φιλτράρει το συμβολομετρικό φάσμα, το οποίο αποτελείται από στενές ζώνες σήματος και φαρδιές ζώνες θορύβου

[Fielding, 2009], αυξάνοντας την αναλογία του σήματος προς το θόρυβο [Fielding, 2009]. Η μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του φίλτρου κατά συχνότητα σε χωρική βάση. Έτσι, βελτιώνεται η εμφάνιση των κροσσών συμβολής, γι' αυτό και το συγκεκριμένο φίλτρο συνίσταται για συμβολομετρικά ζεύγη με χαμηλή συνάφεια.



Εικόνα 28: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για το φίλτρο Goldstein

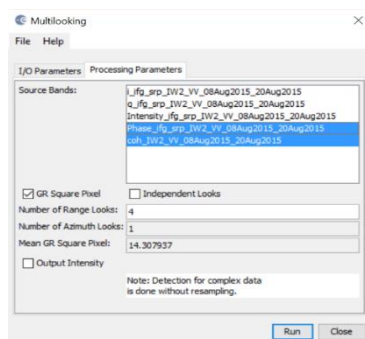


Εικόνα 29: Το συμβολογράφημα έπειτα από την εφαρμογή το φίλτρου Goldstein

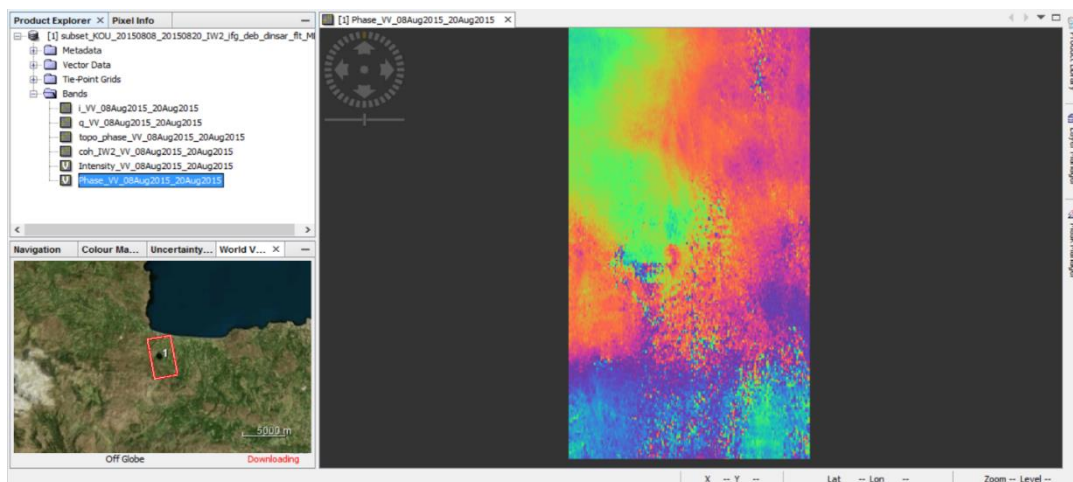


### 5.2.6 Επεξεργασία πολλαπλών όψεων (Multilook)

Με αυτήν την επεξεργασία επιτυγχάνεται η απεικόνιση της εικόνας από διαφορετικές γωνίες χρησιμοποιώντας τον χωρικό μέσο. Έτσι, μειώνονται τα γεωμετρικά σφάλματα. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των διάφορων διαδοχικών εικονοστοιχείων μίας εικόνας SLC στην απόσταση και στη διεύθυνση τροχιάς. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται multilooking. Ο αριθμός των looks μίας εικόνας Multilooked αντιστοιχεί στον μέσο όρο των εικονοστοιχείων. Για παράδειγμα, το 1 x 4 multilooking προκύπτει από τον μέσο όρο 4 εικονοστοιχείων κατά μήκος της γραμμής πτήσης και 1 εικονοστοιχείου εγκάρσια στη γραμμή πτήσης, για την απόκτηση ενός τελικού εικονοστοιχείου. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των «όψεων» (looks) είναι στη διεύθυνση του αζιμουθίου (Azimuth Looks) ίσος με 4 και στην πλάγια διεύθυνση ίσος με 1 (Range Looks). Οι εικόνες μετά το πέρας της επεξεργασίας παρουσιάζουν λιγότερα στίγματα αλλά και υποβάθμιση της χωρικής ανάλυσης, συγκρινόμενες με τις αρχικές εικόνες SLC (Κουρκούλη, 2008).



Εικόνα 30: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της επεξεργασίας multilook



Εικόνα 31: Το συμβολογράφημα έπειτα από την επεξεργασία πολλαπλών όψεων multilook

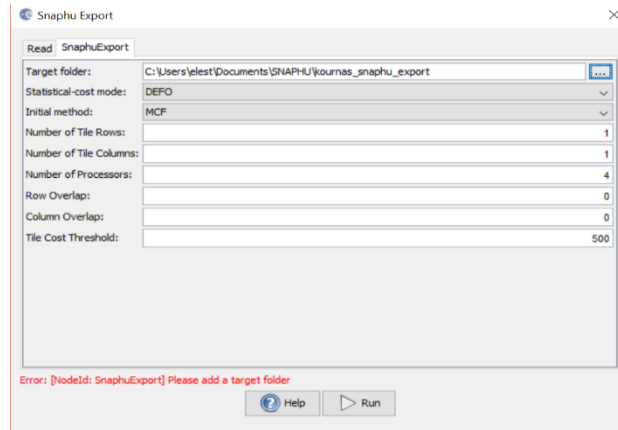
### 5.2.7 Αποκατάσταση φάσης με χρήση SNAPHU (Phase Unwrapping)

Όταν δημιουργείται το συμβολογράφημα παρουσιάζεται το φαινόμενο της διπλωμένης φάσης. Δηλαδή, η φάση που εμφανίζεται είναι παραμορφωμένη λόγω του ανάγλυφου του εδάφους και της γωνίας με βάση την οποία έχει ληφθεί η εικόνα από το radar. Συγκεκριμένα η φάση παίρνει τιμές στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ , χωρίς όμως να είναι γνωστός ο αριθμός των ακέραιων κύκλων φάσης ( $2\pi$ ) του σήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το συμβολογράφημα να μην απεικονίζει την πραγματική κατάσταση του εδάφους. Στην πραγματικότητα, το προϊόν της συμβολομετρίας, το οποίο συγκεντρώνει το επιστημονικό ενδιαφέρον είναι η απόλυτη φάση (absolute phase), η οποία σχετίζεται άμεσα με την τοπογραφία και τις παραμορφώσεις του εδάφους. Η απόλυτη φάση αντιπροσωπεύει τη μετρούμενη «σχετική» φάση στην οποία έχει προστεθεί ή αφαιρεθεί το κατάλληλο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  σύμφωνα με κατάλληλες εκτιμήσεις. Το συμβολογράφημα στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της απόλυτης ή αλλιώς «ξεδιπλωμένης» πλέον φάσης φαίνεται στην *Εικόνα 35*.

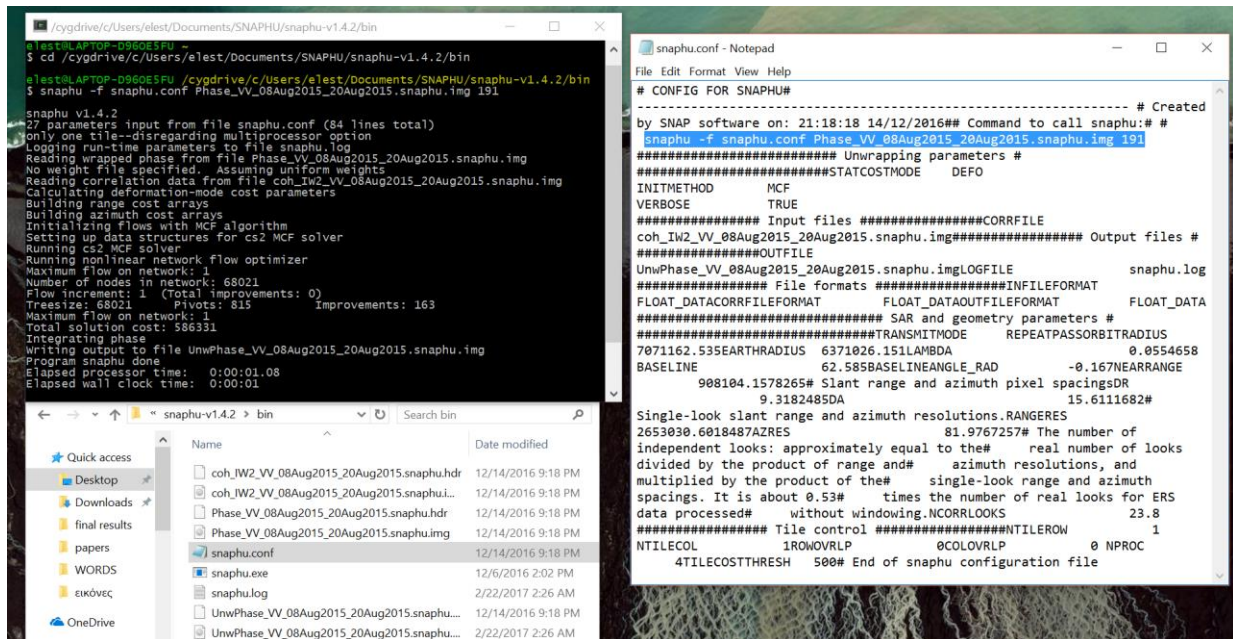
Η αποκατάσταση της «διπλωμένης φάσης» (wrapped phase) μπορεί να γίνει με ορισμένους αλγόριθμους, οι περισσότεροι από τους οποίους έχουν αναπτυχθεί για αυτόν τον σκοπό. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAPHU, το οποίο παρέχεται δωρεάν από το πανεπιστήμιο του Stanford και λειτουργεί σε περιβάλλον Ubuntu. Χρησιμοποιήθηκε ακόμη η εφαρμογή Cygwin (*Εικόνα 33*) για να υποκαταστήσει το περιβάλλον αυτό εντός του λειτουργικού συστήματος των Windows 10. Τα δεδομένα του συμβολογραφήματος εξάγονται από το λογισμικό SNAP με την εντολή SNAPHU Export (*Εικόνα 32*) και μετά την επεξεργασία που υφίστανται εισάγονται πάλι στο SNAP ως "ξεδιπλωμένο" πια συμβολογράφημα με την εντολή SNAPHU Import (*Εικόνα 34*).

Η διαδικασία αποκατάστασης της φάσης παρουσιάζει δυσκολίες σε περιοχές όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές θορύβων ή όπου το σήμα είναι παραποιημένο ή η συνάφεια φάσης είναι χαμηλή, καθώς επίσης και σε περιπτώσεις κακής δειγματοληψίας στην καταγραφή πρωτογενών δεδομένων.

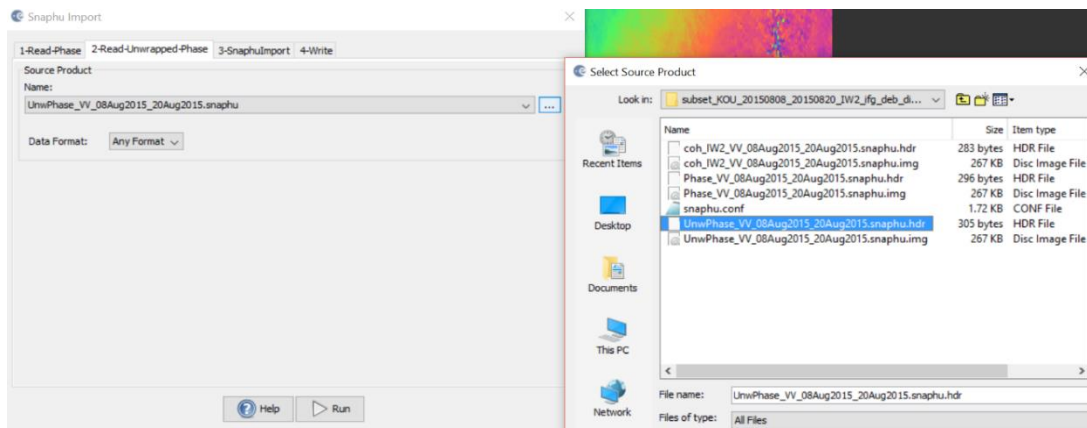




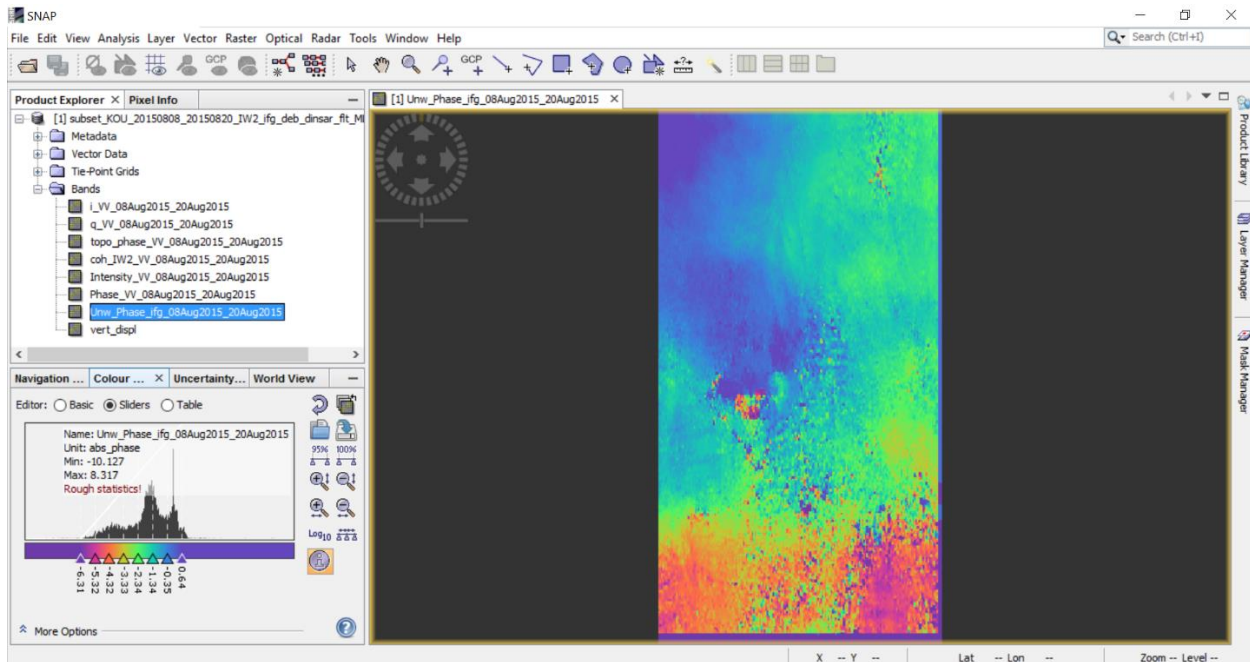
Εικόνα 32: Εξαγωγή της συμβολομετρικής φάσης για τη μετατροπή σε "ξεδιπλωμένη" με χρήση του αλγορίθμου SNAPHU



Εικόνα 33: Μετατροπή της φάσης σε "ξεδιπλωμένη" με χρήση του SNAPHU στο περιβάλλον της εφαρμογής Cygwin



Εικόνα 34: Το παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή της "ξεδιπλωμένης φάσης"



Εικόνα 35: Το συμβολογράφημα έπεται από την αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης, δηλαδή τη μετατροπή της σε "ξεδιπλωμένη"

### 5.2.8 Μετατροπή της ξεδιπλωμένης φάσης σε κάθετη μετατόπιση (Band Maths)

Για τη μετατροπή της ξεδιπλωμένης φάσης σε κάθετη μετατόπιση χρησιμοποιείται η ξεδιπλωμένη φάση πολλαπλασιασμένη με το μήκος κύματος του δορυφόρου δια το τετραπλάσιο του αριθμού  $\pi$  επί το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης εκφρασμένης σε ακτίνια. Έτσι προκύπτουν οι τιμές της κάθετης μετατόπισης. Η σχέση διατυπώνεται μαθηματικά όπως φαίνεται στην **Σχέση 19**.

$$\text{Vertical displacement} = \frac{\varphi_{unwrapped} * \lambda}{-4\pi * \cos(\theta_{incidence})}$$

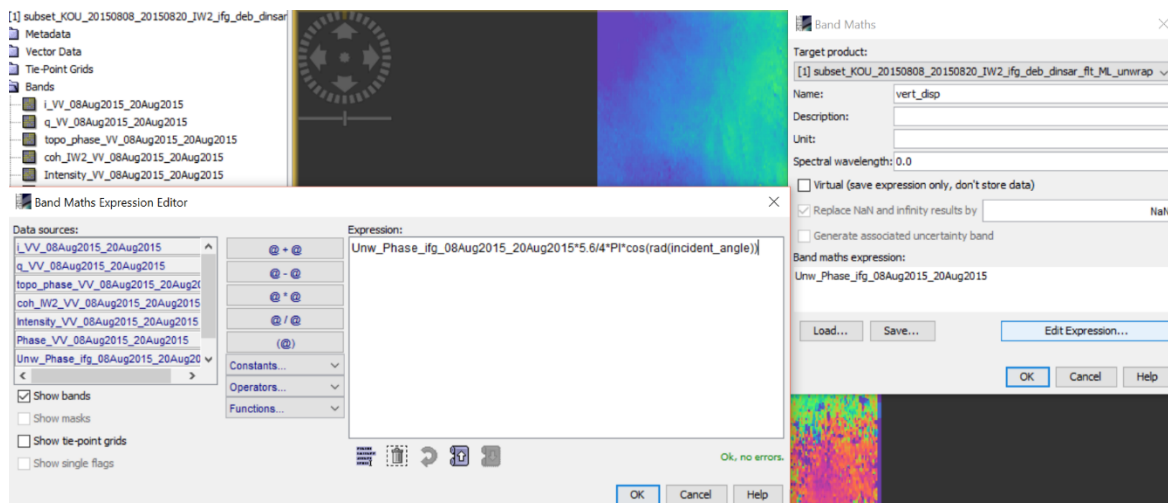
Σχέση 19

Όπου,

$\varphi_{unwrapped}$ : η «ξεδιπλωμένη» φάση

$\lambda$ : το μήκος κύματος του Sentinel-1A (5,6 cm)

$\theta_{incidence}$ : η γωνία πρόσπτωσης εκφρασμένη σε ακτίνια (rad)



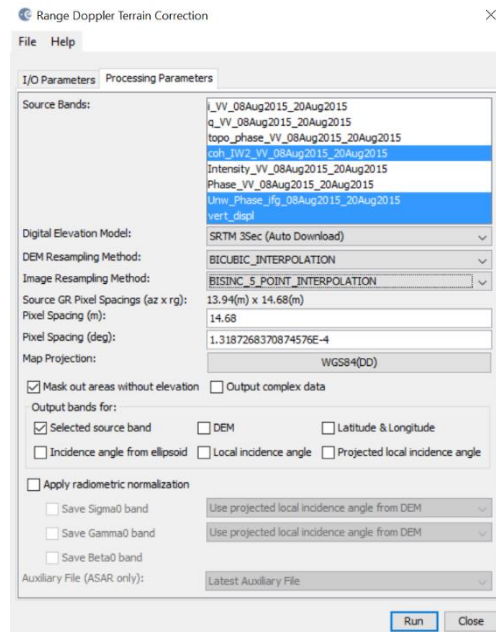
Εικόνα 36: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων για την εισαγωγή της εξίσωσης για την εύρεση της κάθετης μετατόπισης (band maths)

### 5.2.9 Γεωμετρική διόρθωση (Range-Doppler Terrain Correction)

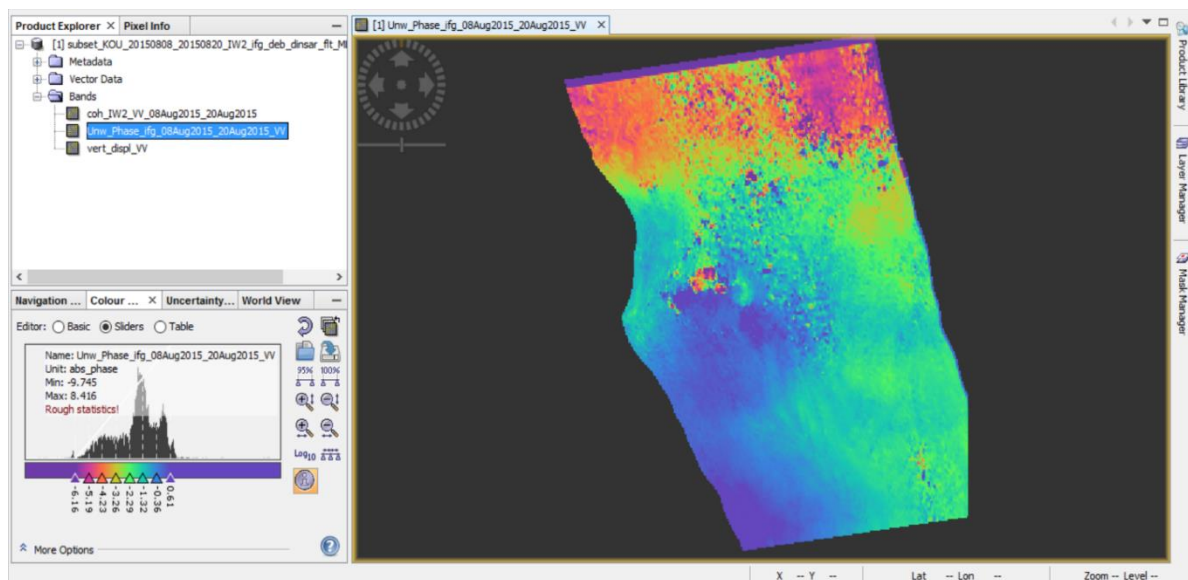
Οι αρχικές εικόνες είναι ανεστραμμένες λόγω της γεωμετρίας του RADAR, το ίδιο και το συμβολογράφημα που προκύπτει από αυτές. Επομένως, γίνεται απαραίτητη η εφαρμογή διόρθωσης, ώστε η τελική απεικόνιση του ανάγλυφου της υπό μελέτης περιοχής να είναι ρεαλιστική. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος Range-Doppler, η οποία είναι στην ουσία ένας αλγόριθμος ορθοαναγωγής. Εφαρμόζοντας γεωμετρική διόρθωση τα εικονοστοιχεία διατάσσονται πλέον σύμφωνα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς του DEM (Digital Elevation Model – Μοντέλο Ψηφιακού Αναγλύφου). Στη συγκεκριμένη εργασία το DEM που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μοντέλο SRTM 3Sec, το οποίο λαμβάνεται αυτόματα από το λογισμικό.

Η διαδικασία είναι σημαντική καθώς, εξαιτίας των ιδιοτήτων του γήινου αναγλύφου και της κλίσης του δορυφορικού αισθητήρα, οι απεικονιζόμενες αποστάσεις είναι παραμορφωμένες. Το φαινόμενο συναντάται κυρίως στις περιοχές οι οποίες δεν είναι ευθυγραμμισμένες με το σημείο ναδίρ του αισθητήρα. Η λειτουργία Range Doppler Terrain Correction του λογισμικού της ESA εφαρμόζει τη μέθοδο της ορθοαναγωγής έτσι ώστε να γεωκωδικοποιήσει τις εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) χρησιμοποιώντας γεωμετρία ραντάρ μονού ψηφιδωτού δύο διαστάσεων (Small & Schubert, 2008). Η

λειτουργία αυτή αξιοποιεί τις πληροφορίες του διανύσματος κατάστασης τροχιάς που είναι διαθέσιμο στα μεταδεδομένα των εικόνων, τις χρονικές καταγραφές του ραντάρ, όπως επίσης και τις παραμέτρους μετατροπής κλίσης προς εύρος εδάφους μαζί με τις πληροφορίες αναφοράς DEM, έτσι ώστε να ανακτήσει την ακριβή γεωτοποθεσία.

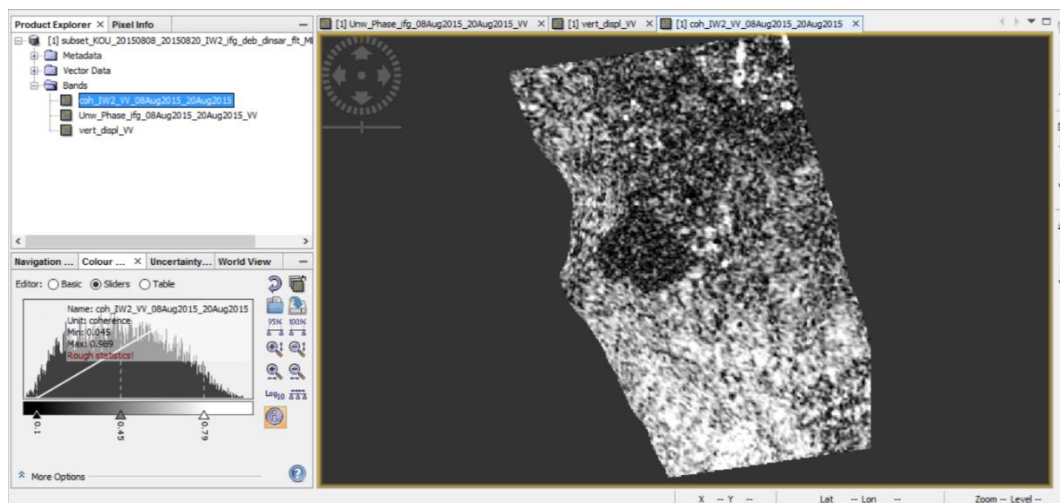


Εικόνα 37: Το παράθυρο διαλόγου με τις επιλογές ρυθμίσεων της γεωμετρικής διόρθωσης

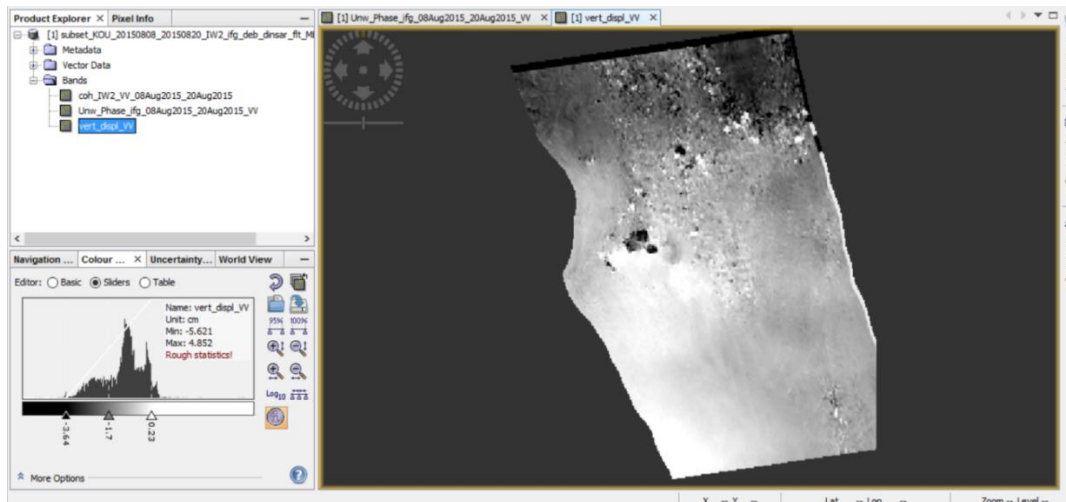


Εικόνα 38: Το "ξεδιπλωμένο" συμβολογράφημα μετά την εφαρμογή γεωμετρικής διόρθωσης





Εικόνα 39: Το τελικό προϊόν της συνάφειας σε οπτικοποιημένη μορφή (με μαύρο απεικονίζονται τα σημεία με τιμή συνάφειας ίση με 0 και με άσπρο τα σημεία με τιμή ίση με 1)



Εικόνα 40: Γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα στην οποία αντιστοιχούν οι τιμές της κάθετης μετατόπισης που υπολογίστηκε με το εργαλείο band maths

## 5.3 Επεξεργασία οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (backscatter)

### 5.3.1 Ραδιομετρική διόρθωση (Radiometric Calibration)

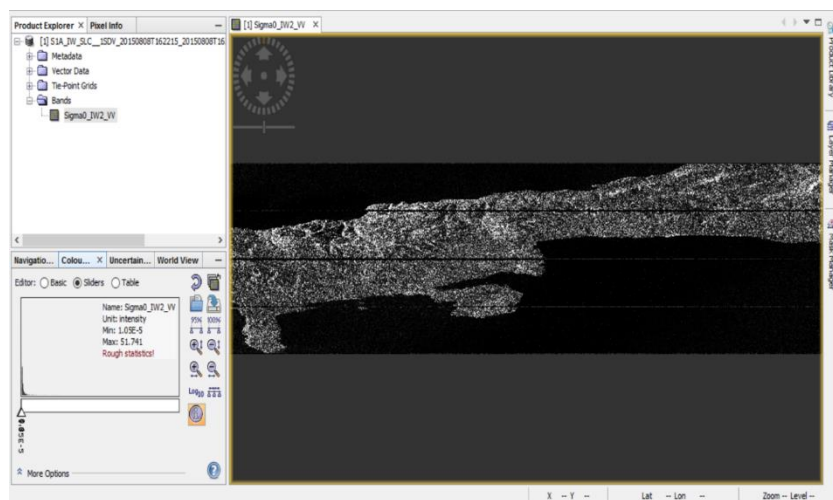
Στις εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) 1ου επιπέδου δεν πραγματοποιούνται ραδιομετρικές διορθώσεις με αποτέλεσμα να παραμένει ενσωματωμένο στις τιμές των εικονοστοιχείων το ραδιομετρικό σφάλμα. Έτσι, το αρχικό προϊόν των εικόνων χρειάζεται ραδιομετρική βαθμονόμηση, με την οποία οι τιμές των εικονοστοιχείων καταλήγουν να

αντιπροσωπεύουν την τιμή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας που δέχεται το ραντάρ από την επιφάνεια ανάκλασης.

Για την βαθμονόμηση των εικόνων του Sentinel-1A, όλες οι απαραίτητες πληροφορίες βρίσκονται στο αρχικό προϊόν που λαμβάνεται από την ιστοσελίδα της ESA. Ο αλγόριθμος αναιρεί την αρχική βαθμονόμηση και εφαρμόζει μια επιθυμητή, η οποία μπορεί να δώσει τεσσάρων διαφορετικών τύπων αποτελέσματα. Τα δεδομένα για την βαθμονόμηση βρίσκονται σε πίνακες (Look Up Tables - LUTs) στο αρχικό προϊόν και υποστηρίζουν τους τύπους δεδομένων Βήτα (β0i), Σίγμα (σ0i), Γάμμα (γi) ή σε ψηφιακή τιμή (Digital Number (DN)). Η αύξηση των τιμών των εικόνων κατά τη βαθμονόμηση διαφέρει ανάλογα το εύρος και γίνεται με βάση τους πίνακες LUTs, ενώ συμβάλλει καθολικά η απόλυτη σταθερά βαθμονόμησης. Η εξίσωση βαθμονόμησης, για τα προϊόντα του Sentinel-1A έχει ως εξής (ESA, 2015c) :

$$value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i^2}$$

Σχέση 20

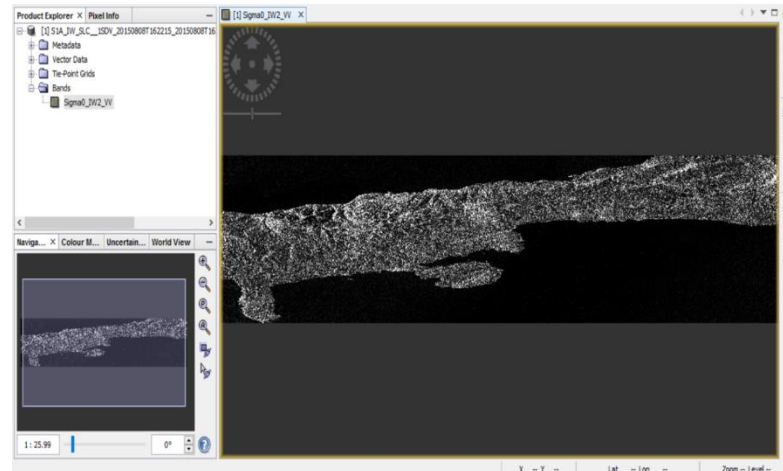


Εικόνα 41: Η εικόνα του Sentinel-1A έπειτα από τη ραδιομετρική διόρθωση (calibration)

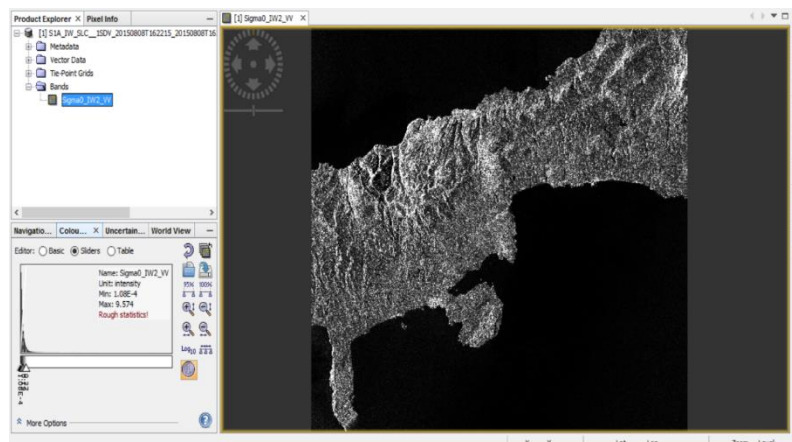
### 5.3.2 TOPS-Deburst, Multilook, Speckle Filter, Terrain Correction

Μετά από τη βαθμονόμηση ακολουθούν ορισμένες επιπλέον διορθώσεις μέχρι το τελικό προϊόν. Η πρώτη από αυτές είναι το TOPS-Deburst (**Εικόνα 42**), το οποίο αφαιρεί τα ενδιάμεσα κενά και δίνει την εικόνα ενοποιημένη. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το Multilook (**Εικόνα 43**), το οποίο βελτιώνει τα γεωμετρικά σφάλματα που προκύπτουν εφόσον η εικόνα λαμβάνεται υπό γωνία. Ακολουθεί το Speckle Filter (**Εικόνα 44**), το οποίο είναι φίλτρο που αφαιρεί τον θόρυβο

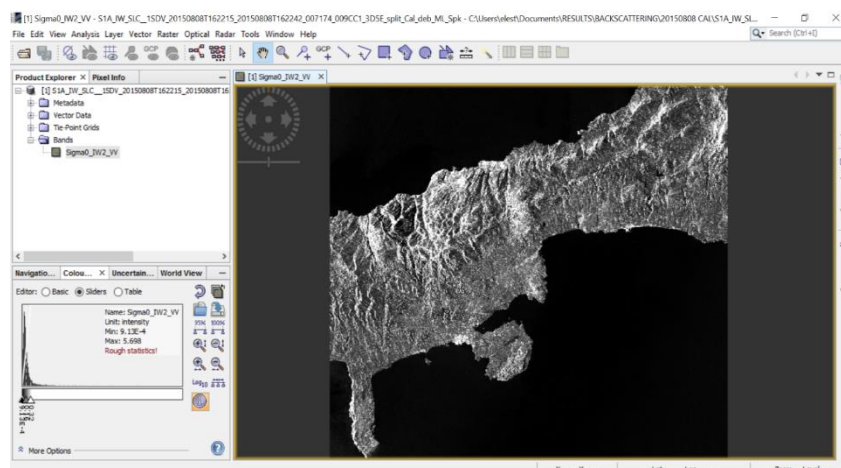
που εμφανίζεται στην εικόνα με μορφή στίγμάτων. Τέλος, η εικόνα διορθώνεται γεωμετρικά με χρήση του εργαλείου Range-Doppler Terrain Correction (**Εικόνα 45**) και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM 3Sec.



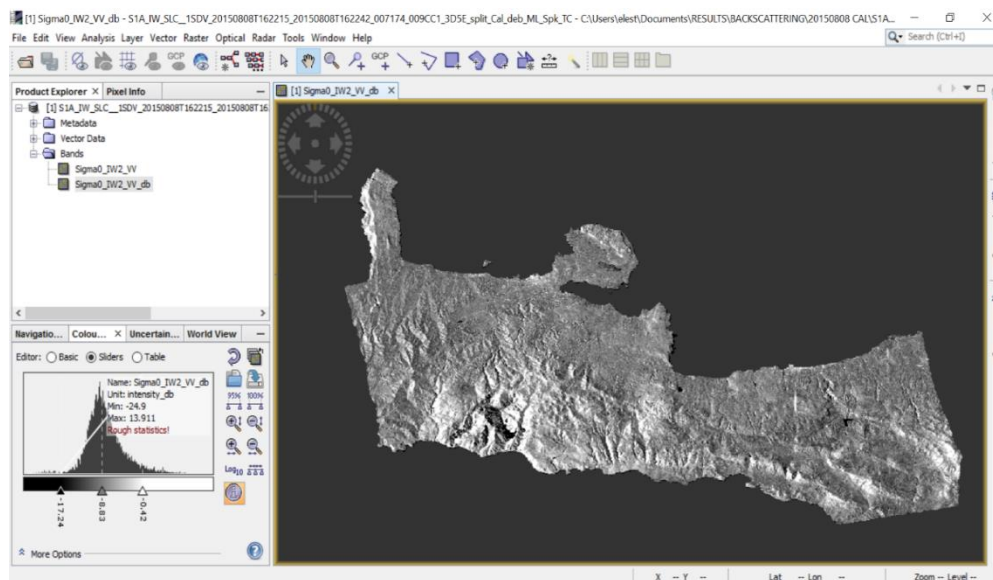
Εικόνα 42: Η ραδιομετρικά διορθωμένη εικόνα έπειτα από την αφαίρεση των bursts



Εικόνα 43: Η εικόνα έπειτα από την επεξεργασία πολλαπλών όψεων multilook



Εικόνα 44: Η εικόνα έπειτα από την εφαρμογή του φίλτρου για τα στίγματα (speckle filter)



Εικόνα 45: Το τελικό προϊόν της επεξεργασίας στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές οπισσοκένωσης στην κλίμακα dB

### 5.3.3 Εισαγωγή επεξεργασμένων εικόνων στο λογισμικό ArcGIS

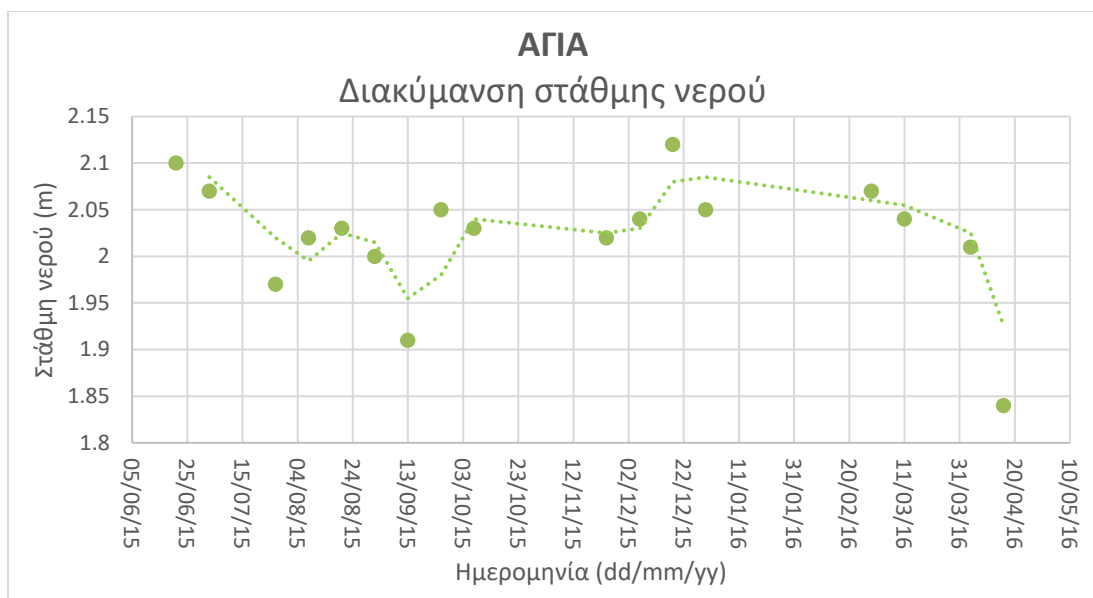
Οι εικόνες που προέκυψαν είτε ως προϊόντα των συμβολογραφημάτων είτε ως προϊόντα της επεξεργασίας της ανακλώμενης ακτινοβολίας μετατράπηκαν σε αρχεία της μορφής .tiff και στη συνέχεια εισήχθησαν στο περιβάλλον του λογισμικού ArcGIS. Εκεί ήταν δυνατή η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της εκάστοτε επεξεργασίας. Αυτό επιτεύχθηκε με τη δημιουργία shapefile και λήψη των στατιστικών στοιχείων από μεγάλο πλήθος σημείων (συγκεκριμένα 100), τα οποία ήταν τυχαία κατανεμημένα στην επιφάνεια της κάθε λίμνης.

## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Διακύμανση στάθμης νερού

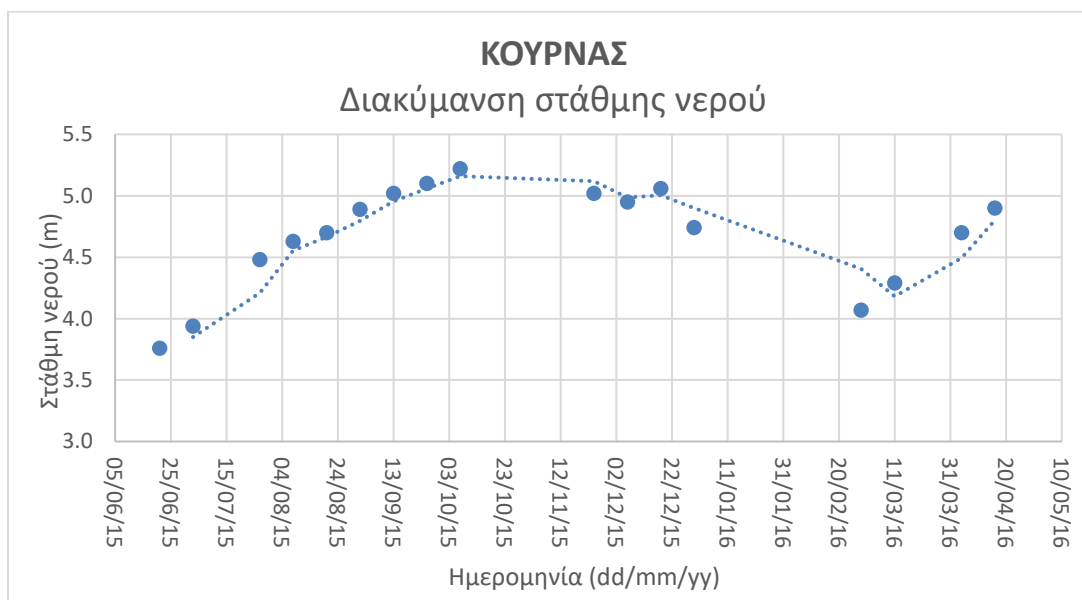
Το αρχικό βήμα για την διερεύνηση και κατανόηση των αποτελεσμάτων είναι η μελέτη της διακύμανσης της στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς (Διάγραμμα 1) και τη λίμνη του Κουρνά (Διάγραμμα 2). Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα, τα οποία κατασκευάστηκαν για τα δεδομένα στάθμης που αντιστοιχούν στις ημερομηνίες λήψεις των εικόνων του Sentinel-1A, επομένως για την περίοδο μεταξύ Ιουνίου του 2015 και Απριλίου του 2016.





Διάγραμμα 1: Διακύμανση στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς

Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα σταθμήμετρα, τα οποία τοποθετούνται κοντά σε υδραυλικές κατασκευές, επηρεάζονται από τη δυναμικότητα της ροής παρέχοντας αναξιόπιστα αποτελέσματα (Lin and Gregg, 1988). Ιδιαίτερα για την περίπτωση της Αγιάς είναι γνωστό ότι το σταθμήμετρο βρίσκεται στο σημείο εισόδου του παρεχόμενου νερού στη λίμνη, γεγονός που ίσως να μειώνει την αξιοπιστία των μετρήσεών του.



Διάγραμμα 2: Διακύμανση στάθμης νερού για τη λίμνη του Κουρνά

Δεδομένων των κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ των δύο λιμνών, δηλαδή βάσει του γεγονότος ότι ανήκουν στην ίδια λεκάνη απορροής (με το νερό τροφοδοσίας να προέρχεται και για τις δύο από πηγές των Λευκών Ορέων) και ότι παρουσιάζουν παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά, θα ήταν αναμενόμενο να υπήρχε συμφωνία μεταξύ των διακυμάνσεων στάθμης. Σύμφωνα όμως με το **Διάγραμμα 1**, είναι φανερό ότι στη λίμνη της Αγιάς παρατηρήθηκαν συχνότερες αυξομειώσεις της στάθμης νερού για το εξεταζόμενο διάστημα. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι το νερό της λίμνης της Αγιάς χρησιμοποιείται και για υδρευτικούς σκοπούς. Παρ' όλα αυτά οι αυξομειώσεις αυτές έχουν εύρος μικρότερο του μισού μέτρου, ενώ στην περίπτωση του Κουρνά το εύρος ξεπερνάει τα ένα μέτρο, δηλαδή είναι περίπου το διπλάσιο. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η λίμνη του Κουρνά εμφανίζει μία περισσότερο σταθερή και σαφή υδρολογική συμπεριφορά, γεγονός το οποίο βοηθάει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

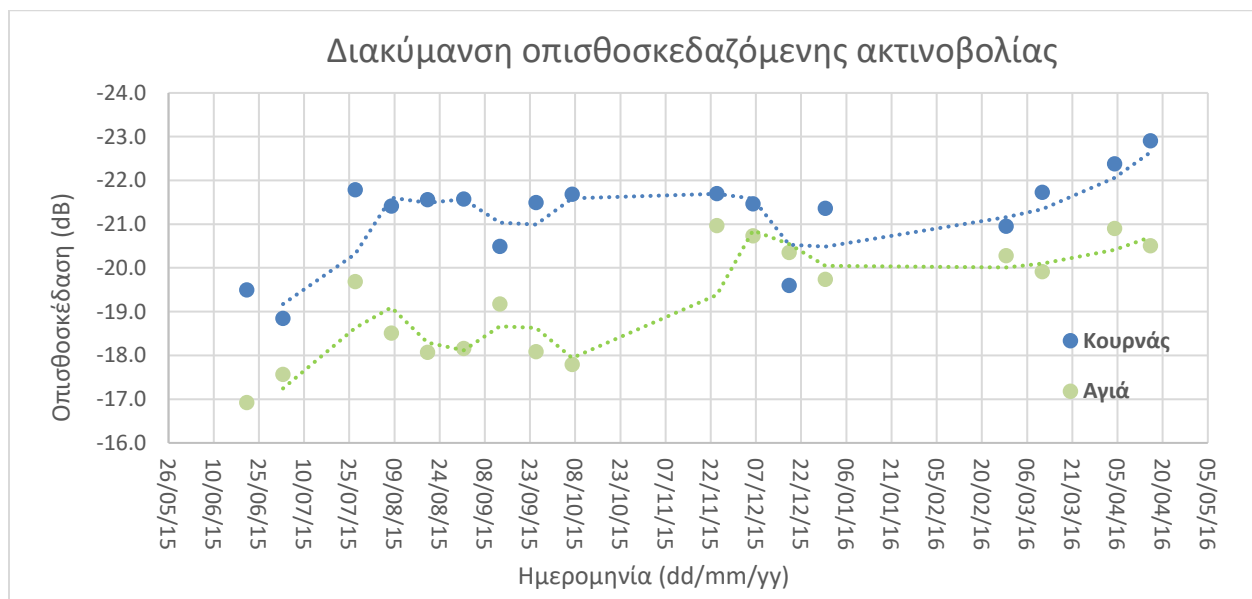
## 6.2 Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης

Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία στο περιβάλλον του λογισμικού SNAP, αλλά και με αξιοποίηση του λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ArcGIS, υπολογίστηκαν οι τιμές οπισθοσκέδασης σε μονάδες decibel (dB) και για τις δύο λίμνες. Για την ακρίβεια, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των εξεταζόμενων παραμέτρων από πλήθος 100 σημείων, τυχαία κατανεμημένων στην επιφάνεια κάθε λίμνης. Έτσι, κατασκευάστηκε το **Διάγραμμα 3**, με σκοπό την απεικόνιση της διακύμανσης οπισθοσκέδασης κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου έτους και η σύγκριση των αντίστοιχων για κάθε λίμνη τιμών.

Πίνακας 8: Τιμές οπισθοσκέδασης που υπολογίστηκαν σε μονάδες dB

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	Οπισθοσκέδαση (dB)	
	ΚΟΥΡΝΑΣ	ΑΓΙΑ
6/21/2015	-19.50	-16.92
7/3/2015	-18.85	-17.57
7/27/2015	-21.79	-19.69
8/8/2015	-21.41	-18.51
8/20/2015	-21.56	-18.07
9/1/2015	-21.57	-18.16
9/13/2015	-20.49	-19.17
9/25/2015	-21.50	-18.08
10/7/2015	-21.69	-17.80
11/24/2015	-21.70	-20.97

12/6/2015	-21.46	-20.74
12/18/2015	-19.60	-20.35
12/30/2015	-21.37	-19.74
2/28/2016	-20.95	-20.28
3/11/2016	-21.73	-19.92
4/4/2016	-22.38	-20.90
4/16/2016	-22.91	-20.51



Διάγραμμα 3: Απεικόνιση της διακύμανσης της οπισθοσκέδασης για τις δύο περιοχές μελέτης

Από το **Διάγραμμα 3** παρατηρείται παρόμοια διακύμανση των τιμών και για τις δύο λίμνες από τις 21/6/2015 μέχρι τις 8/8/2015. Για την περίπτωση του Κουρνά οι τιμές διατηρούνται σταθερές μέχρι και τις 6/12/2015 (με εξαίρεση την αυξημένη τιμή -20,49 dB στις 13/9/2015). Για την αντίστοιχη περίοδο στην Αγιά, δηλαδή από τον Αύγουστο μέχρι τον Νοέμβριο, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ -18,0 dB και -19,0 dB ώσπου στις 24/11/2015 φαίνεται απότομη μείωση έως την τιμή -20,97 dB. Στον Κουρνά παρατηρείται σταδιακή αύξηση των τιμών για τις αρχές του έτους 2016, ενώ στην Αγιά παρουσιάζεται για την περίοδο Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου μικρή μείωση και από τις 28/2/2016 και μετά αύξηση, με μικρότερη όμως κλίση απ' ό,τι στον Κουρνά.

Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει ότι η οπισθοσκέδαση παρουσίασε τελικά παρόμοια διακύμανση για τις δύο λίμνες. Αυτό μπορεί να δικαιολογείται από το γεγονός ότι η γεωγραφική απόσταση μεταξύ των λιμνών είναι μικρή και τα κλιματικά χαρακτηριστικά παρόμοια, παράγοντες που συνεπάγονται την παρόμοια διαμόρφωση των τιμών οπισθοσκέδασης. Από ό,τι φαίνεται όμως η συμφωνία μεταξύ των οπισθοσκεδαζόμενων

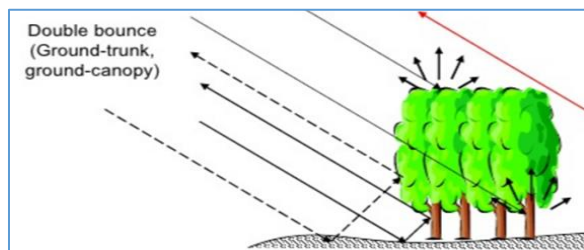
ακτινοβολιών δεν ανταποκρίνεται πιστά στην πραγματικότητα, αφού όπως αποδείχτηκε στην παράγραφο 6.1 η υδρολογική συμπεριφορά δεν είναι ίδια και για τις δύο λίμνες. Σημειώνεται επίσης, ότι την περίοδο του Δεκεμβρίου οι τιμές οπισθοσκέδασης για την Αγιά πλησιάζουν τις τιμές για τον Κουρνά, γεγονός που δικαιολογείται από τις τιμές βροχοπτώσεων που παρουσιάστηκαν στον **Πίνακα 5**, όπου φάνηκε ότι στην περιοχή της Αγιάς υπήρξε έντονη βροχόπτωση. Το γεγονός αυτό καθιστά πιθανή την κάλυψη της βλάστησης με νερό, επομένως και την αύξηση των τιμών οπισθοσκέδασης για τη συγκεκριμένη λίμνη.

### 6.3 Οπισθοσκέδαση – Στάθμη νερού

Οι προσπάθειες μελέτης της μεταβολής της οπισθοσκέδασης σε σχέση με το νερό είναι λίγες. Πιο συγκεκριμένα οι εργασίες των **Hess et al. (1995)**, **Alsdorf et al. (2000)** και **Alsdorf, Smith, and Melack (2001)** ανέδειξαν το γεγονός ότι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης επηρεάστηκε σε συνθήκες πλημμύρας στην περιοχή του Αμαζονίου. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια συσχέτισης των αποτελεσμάτων της οπισθοσκέδασης με το ύψος του νερού σε κάθε λίμνη. Στο **Διάγραμμα 4** για τη λίμνη της Αγιάς και στο **Διάγραμμα 6** για τη λίμνη του Κουρνά φαίνεται η διακύμανση των τιμών οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη διακύμανση της στάθμης νερού που καταγράφηκε στους επίγειους σταθμούς. Επίσης, στο **Διάγραμμα 5** για τη λίμνη της Αγιάς και στο **Διάγραμμα 7** για τη λίμνη του Κουρνά φαίνεται ο βαθμός συσχέτισης της οπισθοσκέδασης και της στάθμης νερού με τη βοήθεια των συντελεστών προσδιορισμού  $R^2$ .

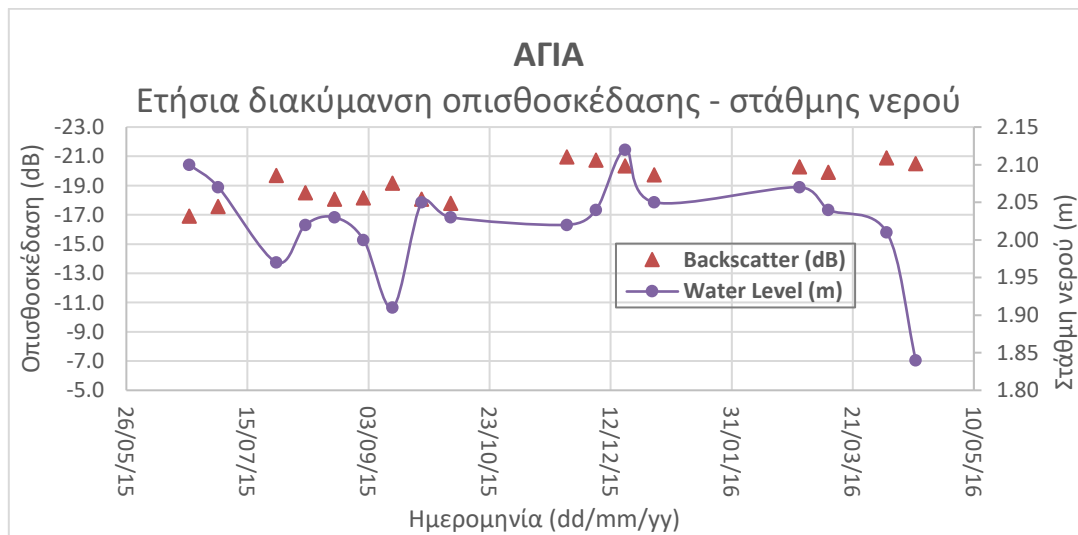
Στην έρευνα μέχρι στιγμής προτιμάται για τη συσχέτιση οπισθοσκέδασης-νερού η ακτινοβολία L-band, η οποία έχει δείξει πολύ καλύτερα αποτελέσματα ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις ελών γλυκού νερού (**Kim et al., 2014**). Επίσης το σήμα πολικότητας HH παρουσιάζει μικρότερη εξασθένηση εξαιτίας των κάθετων μίσχων και των κορμών σε υγρότοπους και λόγω της μεγαλύτερης αντανάκλασης Fresnel σε σχέση με την VV (**Kim et al., 2009**). Γι' αυτόν τον λόγο προτιμάται συνήθως η πολικότητα HH, λόγω της υψηλής συνάφειας σε δεδομένα InSAR και της ευαισθησίας σε συνθήκες πλημμύρας και μη στην οπισθοσκέδαση του ραντάρ SAR (**Kim et al., 2009**). Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι όταν η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται σε σχέση με το ναδίρ, η οπισθοσκέδαση σταδιακά ελαττώνεται.

Γενικά από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι ο κύριος μηχανισμός σκέδασης σε υγρά τοπικούς με βλάστηση είναι η διπλή αναπήδηση. Συγκεκριμένα οι κορμοί δέντρων προκαλούν οπισθοσκέδαση λειτουργώντας ως γωνιακοί ανακλαστές όπως τα κτίρια σε αστικές περιοχές. Το ύψος της βλάστησης είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας ελέγχου του φαινομένου της «διπλής αναπήδησης» (double bounce). Δηλαδή, όταν η βλάστηση στον υγρά τοπο περιλαμβάνει φυτά ύψους δεκάδων μέτρων, τότε η σκέδαση διπλής αναπήδησης ενισχύεται, ενώ αν το μεγαλύτερο μέρος της βλάστησης αποτελείται από χλόη και ποώδη φυτά που δεν ξεπερνούν τα δέκα μέτρα στο ύψος, τότε η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία εξασθενεί (Kim et al., 2014).

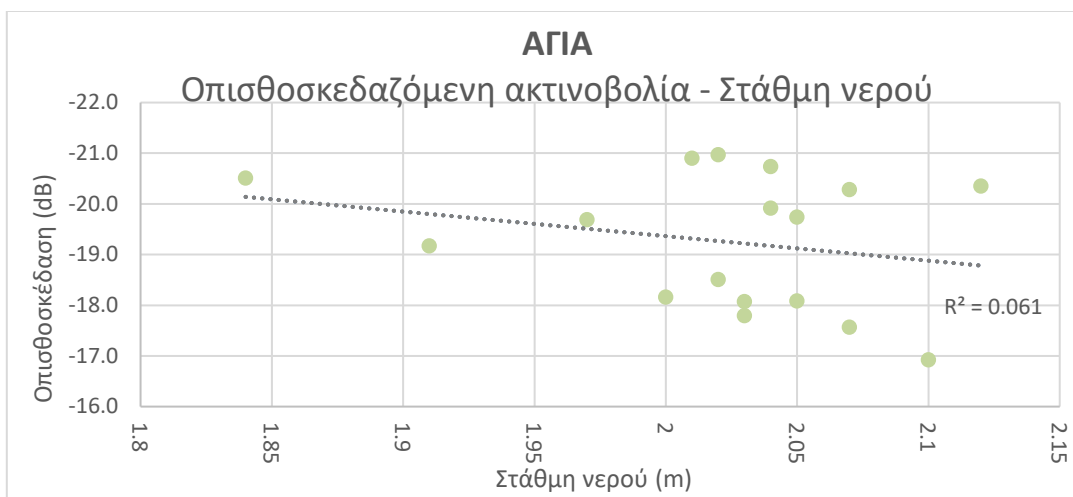


Εικόνα 46: Μορφές οπισθοσκέδασης

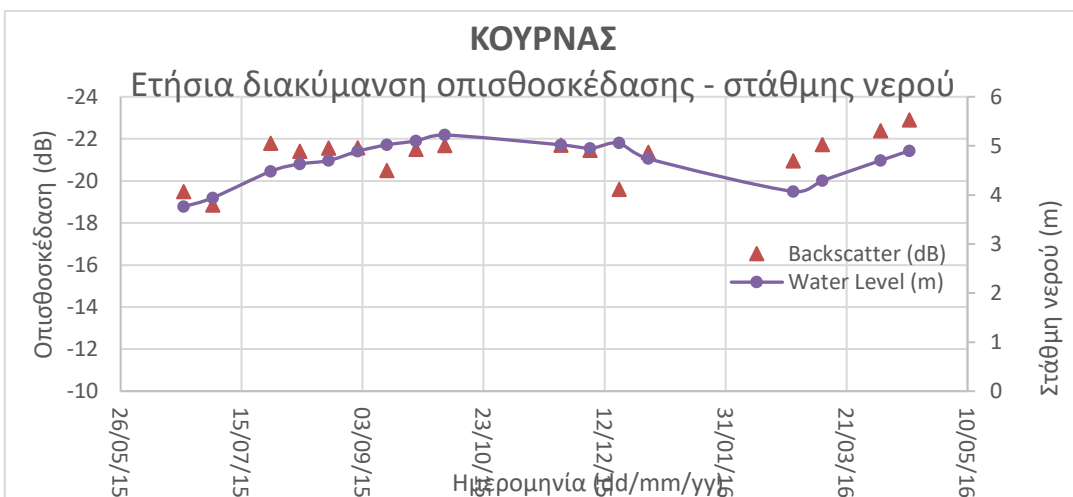
Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία  $\sigma_0$  (sigma naught) σε εικόνες μικροκυματικής ακτινοβολίας C-band παρουσιάζει μικρή συσχέτιση με τη στάθμη νερού, γεγονός που επιβεβαιώνει στη συγκεκριμένη εργασία η λίμνη Αγιάς. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι όταν η στάθμη νερού αυξάνεται σε υγρά τοπικούς με έντονη βλάστηση η οπισθοσκέδαση C-band πολικότητας VV SAR ελαττώνεται, και έτσι η συσχέτιση μεταξύ στάθμης νερού και της έντασης του σήματος SAR μειώνεται (Kasischke et al., 2003).



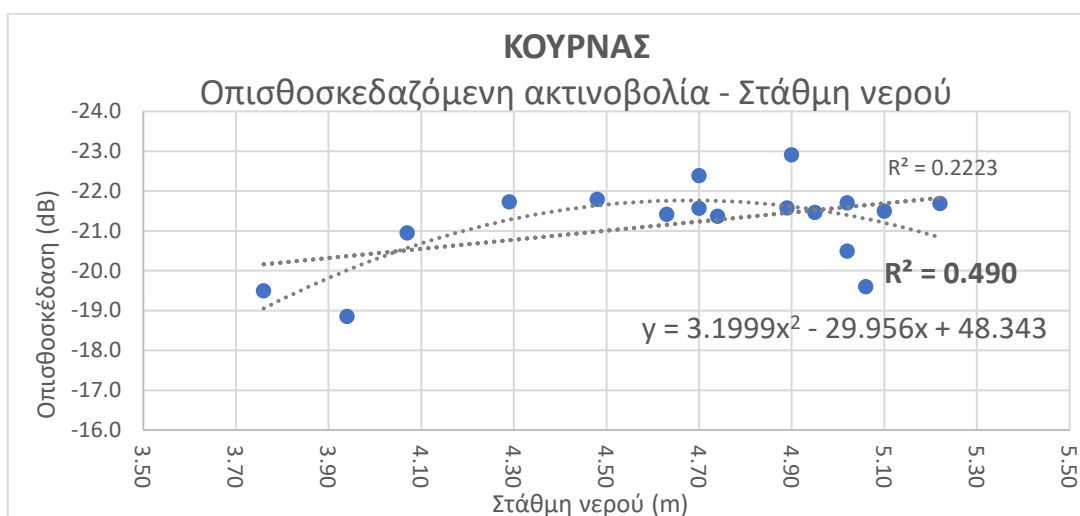
Διάγραμμα 4: Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη διακύμανση στάθμης νερού στη λίμνη της Αγιάς



Διάγραμμα 5: Συσχέτιση οπισθοσκέδασης με το ύψος νερού στη λίμνη της Αγιάς



Διάγραμμα 6: Ετήσια διακύμανση οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη διακύμανση στάθμης νερού στη λίμνη του Κουρνά



Διάγραμμα 7: Συσχέτιση οπισθοσκέδασης με το ύψος νερού στη λίμνη του Κουρνά

Όπως φαίνεται για την Αγιά δεν παρατηρείται συσχέτιση της οπισθοσκέδασης με τη στάθμη νερού, αφού η τιμή του συντελεστή  $R^2$  δεν ξεπερνάει το 0,1. Αντίθετα, στην περίπτωση του Κουρνά εμφανίζεται γραμμική συσχέτιση με συντελεστή  $R^2=0,2$  και πολυωνυμική 2<sup>ου</sup> βαθμού με  $R^2=0,5$ . Η σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων της λίμνης Κουρνά σε σχέση με την Αγιά πιθανόν οφείλεται στο γεγονός της μειωμένης βλάστησης που παρουσιάζει η συγκεκριμένη λίμνη συγκριτικά με την Αγιά. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η βλάστηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα αποσυσχέτισης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος.

Σε παλαιότερες μελέτες επιβεβαιώθηκε ότι υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας SAR είτε C-band είτε L-band και της στάθμης νερού σε πλημμυρισμένες περιοχές (**Ramsey, 1995; Ramsey et al., 2011**). Βέβαια, απαιτείται εκτεταμένη μελέτη για την απόκτηση ενός σαφούς και πλήρους πορίσματος για τη συμπεριφορά της οπισθοσκέδασης σε περιοχές με νερό και ιδιαίτερα για τους υγρότοπους. Αυτή η σκέψη ενισχύεται και από το γεγονός ότι η οπισθοσκέδαση φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από το είδος και ύψος βλάστησης, την εδαφική υγρασία, την τραχύτητα του εδάφους, τη βιομάζα, την τραχύτητα της επιφάνειας του νερού, παράμετροι οι οποίες μεταβάλλονται έντονα από υγρότοπο σε υγρότοπο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συμπεριφορά των υπολογισμένων τιμών οπισθοσκέδασης θεωρείται φυσιολογική λόγω της σύνθεσης της μελετώμενης επιφάνειας. Οι υδάτινες επιφάνειες χαρακτηρίζονται εξ ορισμού από έντονη μεταβλητότητα λόγω της φύσης του νερού. Πέρα από αυτό, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σύνθεση της μελετώμενης επιφάνειας – στόχου, η οποία ιδιαίτερα στην περίπτωση των υγροτόπων είναι απρόβλεπτη καθώς παρουσιάζεται ανομοιομορφία τόσο στο είδος των επίγειων στόχων όσο και στην κατανομή τους.

## 6.4 Ετήσια διακύμανση συνάφειας

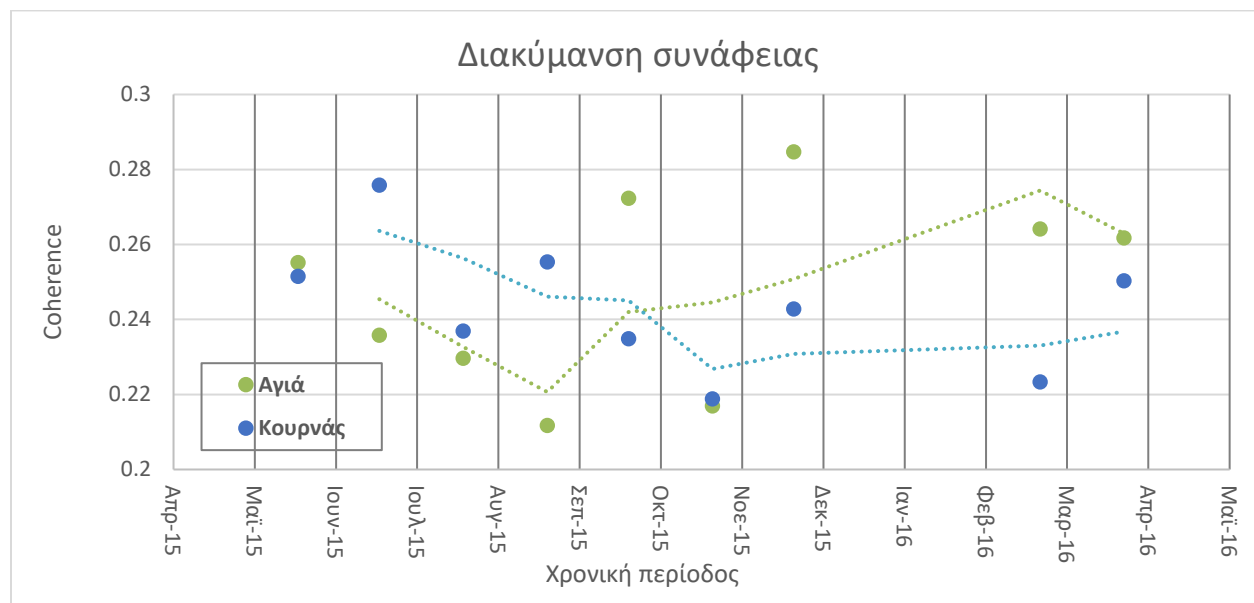
Η συμβολομετρική συνάφεια (interferometric coherence) είναι παραπροϊόν InSAR και μπορεί να αποτελέσει στοιχείο κλειδί για τη διάκριση τύπων υγροτόπου και άλλων βιογεωλογικών παραγόντων. Η συνάφεια αποτελεί ένα μέτρο της ομοιότητας (συσχέτισης) των χρησιμοποιούμενων δεδομένων (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 39**), δηλαδή των εικόνων φάσης,

και συνήθως στους υγράτοπους είναι ευμετάβλητη, επομένως διατηρείται σταθερή μόνο για μικρές χρονικές περιόδους (Hong & Won, 2006; Kim et al.).

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές συνάφειας των εξεταζόμενων συμβολογραφημάτων, καθώς και η συνολική μέση συνάφεια, παράμετροι που υπολογίστηκαν για κάθε λίμνη αντίστοιχα. Για κάθε συμβολογράφημα υπολογίστηκε η μέση τιμή συνάφειας από τον μέσο όρο 100 σημείων στο εσωτερικό της επιφάνειας της κάθε λίμνης. Συνολικά, η λίμνη της Αγιάς παρουσίασε ελαφρά μεγαλύτερη μέση συνάφεια στα συμβολογραφήματα με τιμή **0,248**, ενώ η λίμνη του Κουρνά είχε συνολική μέση συνάφεια **0,243**.

Πίνακας 9: Οι μέσες τιμές συνάφειας που υπολογίστηκαν για τις δύο περιοχές μελέτης

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΣΥΝΑΦΕΙΑ	
		ΑΓΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	0.255	0.252
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.236	0.276
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	0.230	0.237
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	0.212	0.255
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	0.272	0.235
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.217	0.219
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	0.285	0.243
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	0.264	0.223
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	0.262	0.250
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ</b>		<b>0.248</b>	<b>0.243</b>



Διάγραμμα 8: Διακύμανση των τιμών μέσης συνάφειας για τη λίμνη Αγιάς και τη λίμνη Κουρνά



Στο **Διάγραμμα 8** φαίνεται ότι στην περίπτωση της Αγιάς οι μήνες με τη χαμηλότερη συνάφεια ήταν ο Σεπτέμβριος και ο Νοέμβριος (0,212), ενώ οι μήνες με την υψηλότερη ήταν ο Οκτώβριος και ο Δεκέμβριος (0,285). Αντίστοιχα στην περίπτωση του Κουρνά η χαμηλότερη συνάφεια παρατηρήθηκε τους μήνες Νοέμβριο και Μάρτιο (0,219), ενώ οι μήνες με την υψηλότερη ήταν ο Ιούλιος και ο Σεπτέμβριος (0,276). Οι μήνες για τους οποίους παρατηρήθηκε συμφωνία στις τιμές συνάφειας των δύο λιμνών είναι οι Ιούνιος, Αύγουστος, Νοέμβριος, Απρίλιος. Από την άλλη υπήρχε μεγάλη απόκλιση για τους μήνες Ιούλιο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, Δεκέμβριο, Μάρτιο. Ανεξάρτητα της διακύμανσης, το εύρος των τιμών ανταποκρίνεται στα βιβλιογραφικά δεδομένα, σύμφωνα με τα οποία στους υγρότοπους η μέση συνάφεια δεν ξεπερνάει το 0,3.

Παρατηρείται ακόμη ότι η διακύμανση της συνάφειας (γραμμή κινούμενου μέσου όρου) από τον Ιούνιο 2015 έως τον Απρίλιο του 2016 ακολουθεί παρόμοια πορεία και στην Αγιά και στον Κουρνά. Συγκεκριμένα, μειώνεται απότομα μέχρι και τον Σεπτέμβριο, αφού την περίοδο του καλοκαιριού το νερό λιγοστεύει και η βλάστηση εντός της λίμνης αυξάνεται αλλά με αραιή κατανομή στην επιφάνεια, συνθήκες που μειώνουν τη συνάφεια (**Hong et al., 2010**). Επίσης, χαμηλή συνάφεια συναντάται σε περιπτώσεις όπου το φαινόμενο διπλής αναπήδησης (double-bounce) δεν είναι ιδιαίτερα έντονο.

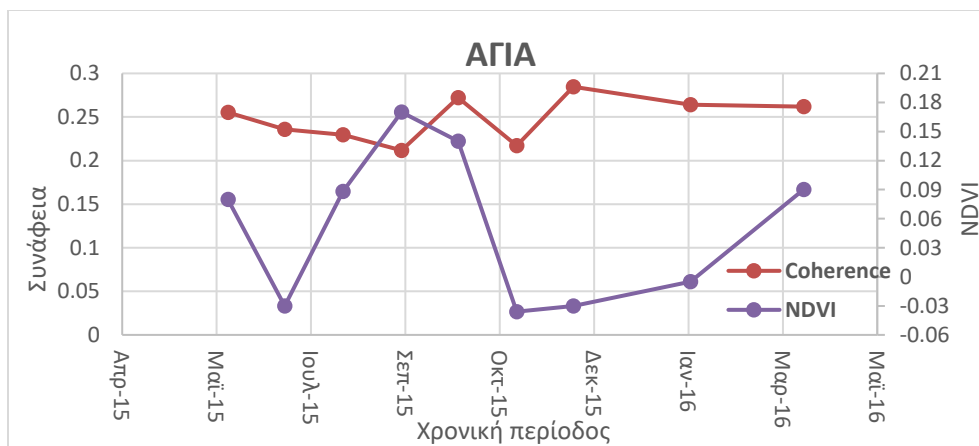
Για την περίοδο του φθινοπώρου στην Αγιά υπάρχει έντονη αύξηση, η οποία γίνεται ηπιότερη αλλά παραμένει μέχρι τον μήνα Μάρτιο, δηλαδή όταν αρχίζει η άνοιξη. Η πορεία αυτή φαίνεται λογική, αφού πρόκειται για περίοδο βροχοπτώσεων, άρα το νερό στην επιφάνεια της λίμνης αυξάνεται (παράλληλα η λιγοστή ηλιοφάνεια παρεμποδίζει τις διαδικασίες φωτοσύνθεσης, άρα και η φυτοκάλυψη στην περιοχή της λίμνης είναι μικρότερη). Ο Απρίλιος παρουσιάζει χαμηλότερη συνάφεια σε σχέση με τον Μάρτιο, συγκριτικά όμως με τις υπόλοιπες τιμές παραμένει υψηλή.

Αντίθετα με την Αγιά, στη λίμνη του Κουρνά παρουσιάζεται ήπια και έπειτα εντονότερη μείωση της συνάφειας κατά τη φθινοπωρινή περίοδο. Αυτό μπορεί να αποδίδεται στο γεγονός ότι δεν υπήρξαν έντονες βροχοπτώσεις μέχρι εκείνο το διάστημα, με αποτέλεσμα μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων των εικόνων να υπήρχε διαφορετική έκταση τη λίμνης καλυμμένη

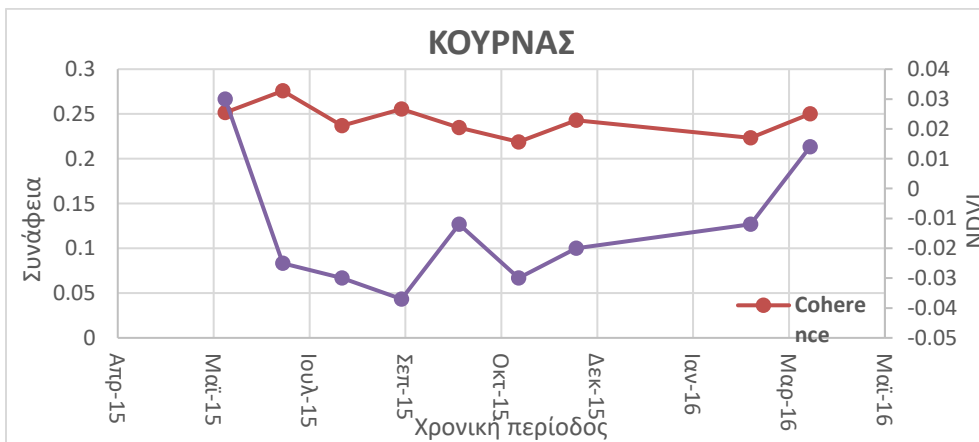
με νερό. Από τον Νοέμβριο μέχρι και τον Απρίλιο οι τιμές της συνάφειας αυξάνονται σταθερά με μικρή κλίση, το οποίο συμφωνεί και με την περίπτωση της Αγιάς.

## 6.5 Συνάφεια – NDVI

Η ποιότητα των συμβολογραφημάτων εξαρτάται άμεσα από την όσο το δυνατό υψηλή συνάφεια και για αυτό γίνεται προσπάθεια για τον εντοπισμό των παραμέτρων που προκαλούν τη μείωσή ή την αύξηση της συνάφειας μεταξύ δύο διαφορετικών λήψεων εικόνων ραντάρ με σκοπό την αντιμετώπιση και εξάλειψή τους. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας, έγινε συσχέτιση του δείκτη βλάστησης NDVI όπως προέκυψε από τις εικόνες του δορυφόρου Landsat 8 με τη συνάφεια των συμβολογραφημάτων μεταξύ δύο εικόνων Sentinel-1A. Τα αποτελέσματα προέκυψαν σύμφωνα με τον **ΠΙΝΑΚΑΣ 4** του Παραρτήματος και για τη λίμνη της Αγιάς φαίνονται στο **Διάγραμμα 9** ενώ για τη λίμνη του Κουρνά στο **Διάγραμμα 10**.



Διάγραμμα 9: Η διακύμανση της μέσης συνάφειας σε σχέση με τη διακύμανση της μέσης τιμής NDVI για τη λίμνη της Αγιάς



Διάγραμμα 10: Η διακύμανση της μέσης συνάφειας σε σχέση με τη διακύμανση της μέσης τιμής NDVI για τη λίμνη Κουρνά

Για τη λίμνη της Αγιάς παρατηρείται μείωση της συνάφειας κατά τη θερινή περίοδο του 2015. Από την άλλη, ο δείκτης βλάστησης για το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου μειώνεται και έπειτα έως τον Σεπτέμβριο αυξάνεται. Για το διάστημα Σεπτεμβρίου- Οκτωβρίου η συνάφεια αυξάνεται ενώ ο δείκτης βλάστησης μειώνεται. Τέλος, για το διάστημα Δεκεμβρίου- Απριλίου τα μεγέθη παρουσιάζουν ξανά αντιστρόφως ανάλογη συσχέτιση.

Για την περίπτωση του Κουρνά και για το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου φαίνεται αύξηση της συνάφειας με ταυτόχρονη μείωση του δείκτη βλάστησης. Επίσης, στο διάστημα Αυγούστου- Οκτωβρίου τα δύο μεγέθη παρουσιάζουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Στη συνέχεια από Δεκέμβριο έως Μάρτιο παρατηρείται μείωση για τη συνάφεια και αύξηση για τον δείκτη βλάστησης.

Φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών δεν παρουσιάζει σταθερό μοτίβο, αλλά σε κάθε περίπτωση για τη λίμνη του Κουρνά η σχέση συνάφειας και δείκτη βλάστησης είναι ακόμα πιο αμφίβολη από ό,τι για τη λίμνη της Αγιάς. Το γεγονός αυτό όμως οφείλεται στην έλλειψη βλάστησης, αφού η πλειονότητα των τιμών βλάστησης για τον Κουρνά εκφράζουν απουσία βλάστησης (αρνητικές τιμές), επομένως οι τάσεις του δείκτη βλάστησης δεν είναι αντιπροσωπευτικές για τη συγκεκριμένη λίμνη.

Συμπερασματικά, δεν παρουσιάζεται ομαλότητα και αναλογία ανάμεσα στη συνάφεια των συμβολογραφημάτων και τον δείκτη βλάστησης NDVI. Αντίθετα, η μορφή της μεταξύ τους συσχέτισής είναι περισσότερο αντιστρόφως ανάλογη (πράγμα που επιβεβαιώνει η λίμνη Αγιάς), έχοντας όμως ως δεδομένο ότι δεν εξαρτάται απόλυτα και άμεσα το ένα μέγεθος με το άλλο. Παρόλα αυτά, η ανάλυση της συσχέτισης των δύο μεγεθών παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς είναι σημαντική η διερεύνηση των παραγόντων, όπως η βλάστηση, που έχουν κρίσιμη επίδραση στη διαμόρφωση των τιμών της συνάφειας.

Από τον υπολογισμό του δείκτη NDVI και σύμφωνα με τις τιμές που προέκυψαν εντοπίστηκαν οι χρονικές περίοδοι στις οποίες υπήρχε βλάστηση στην επιφάνεια κάθε λίμνης. Στο στάδιο κατασκευής των διαγραμμάτων που αφορούν τα συμβολογραφήματα έγινε η επιπλέον προσαρμογή τους στο σενάριο αφαίρεσης του παράγοντα της βλάστησης, δηλαδή της αφαίρεσης της «ξεδιπλωμένης» φάσης των χρονικών περιόδων με παρουσία βλάστησης. Τα δεδομένα που αφαιρέθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10 για κάθε λίμνη αντίστοιχα. Σε αυτό

το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης NDVI παρέχει αποκλειστικά ποσοτική πληροφορία για τη βλάστηση. Δεδομένης όμως της ποικιλίας αλλά και της ανομοιόμορφης κατανομής που χαρακτηρίζει τη βλάστηση σε υγρά τοπία, αναγνωρίζεται η χρησιμότητα που θα είχε η πληροφορία αν επεκτεινόταν τόσο σε ποιοτικά όσο και σε χωρικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 10: Η μέση τιμή του δείκτη NDVI που υπολογίστηκε για κάθε λίμνη σε κάθε μία από τις περιόδους εξέτασης (1<sup>η</sup> στήλη). Τα συμβολογραφήματα στα οποία βρέθηκε παρουσία βλάστησης και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν (2<sup>η</sup> στήλη)

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΓΙΑ		ΚΟΥΡΝΑΣ	
		NDVI	ΑΦΑΙΡΟΥΜΕΝΑ ΣΥΜΒ/ΜΑΤΑ	NDVI	ΑΦΑΙΡΟΥΜΕΝΑ ΣΥΜΒ/ΜΑΤΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	0.080	X	0.030	X
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	-0.030		-0.025	
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	0.088	X	-0.030	
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	0.170	X	-0.037	
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	0.140	X	-0.012	
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	-0.036		-0.030	
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	-0.030		-0.020	
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	-0.005		-0.012	
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	0.090	X	0.014	X

## 6.6 Ετήσια διακύμανση ξεδιπλωμένης φάσης

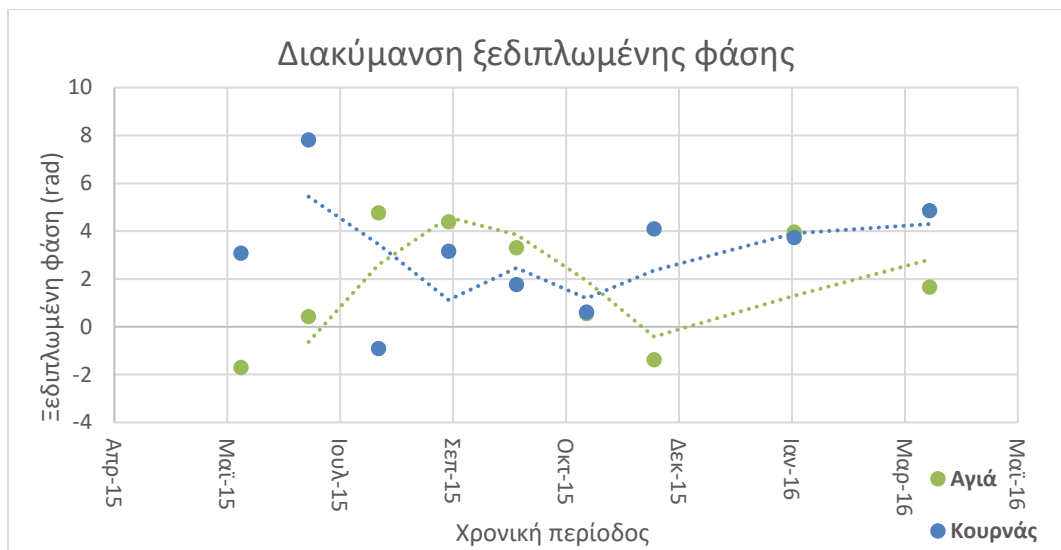
Η ξεδιπλωμένη φάση (unwrapped phase) περιέχει χρονική και χωρική πληροφορία, γι' αυτό και εκφράζει τη σχετική μετατόπιση της επιφάνειας. Στην παρούσα μελέτη μετά την αφαίρεση των πρόσθετων φάσεων (Σχέση 3) κατέληξε να αντιπροσωπεύει τη μεταβολή στάθμης μεταξύ των δύο λήψεων σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς.

Οι τιμές ξεδιπλωμένης φάσης που υπολογίστηκαν για τις δύο λίμνες κυμαίνονται μεταξύ των τιμών -2 και +4,7. Ανάμεσα σε αυτές υπήρχε ακραία τιμή +7,8 (μήνας Ιούλιος) για τον Κουρναά αλλά αφαιρέθηκε λόγω της έντονης απόκλισής της από όλες τις υπόλοιπες. Για την αφαίρεση της τιμής αξιοποιήθηκε η μέθοδος της τυπικής απόκλισης σε συνδυασμό με τον συνολικό μέσο όρο των τιμών ξεδιπλωμένης φάσης.

Πίνακας 11: Οι μέσες τιμές ξεδιπλωμένης φάσης για κάθε συμβολογράφημα και αφορούν τις δύο περιοχές μελέτης

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	Ξεδιπλωμένη φάση (rad)	
		ΑΓΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	-1.70	3.08
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.43	7.81
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	4.76	-0.92

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	4.39	3.16
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	3.31	1.76
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.55	0.61
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	-1.38	4.10
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	3.97	3.73
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	1.66	4.86



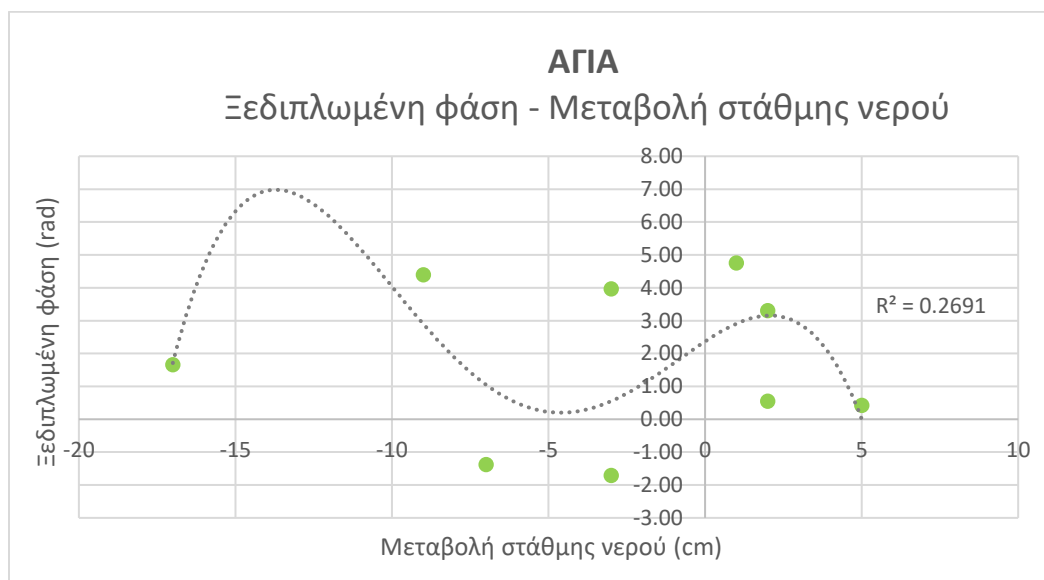
Διάγραμμα 11: Η διακύμανση των μέσω τιμών ξεδιπλωμένης φάσης για τις δύο λίμνες αντίστοιχα

Για τη λίμνη της Αγιάς ακολουθώντας τη γραμμή του κινούμενου μέσου όρου είναι δυνατό να αναγνωρίσουμε ότι οι τιμές ξεδιπλωμένης φάσης αυξάνονται μέχρι τον Αύγουστο και έπειτα μειώνονται μέχρι τον Δεκέμβριο, έπειτα από τον οποίο αυξάνονται ξανά μέχρι και τον Απρίλιο. Οι τιμές Μαρτίου και Απριλίου 2016 είναι κοντά στα επίπεδα των τιμών Ιουνίου και Ιουλίου 2015. Για τη λίμνη του Κουρνά υπάρχει αρχικά μείωση μέχρι τον Νοέμβριο και στη συνέχεια αύξηση ώσπου την άνοιξη του 2016 καταλήγει να έχει τιμές κοντινές σε εκείνες των αρχών του καλοκαιριού του 2015.

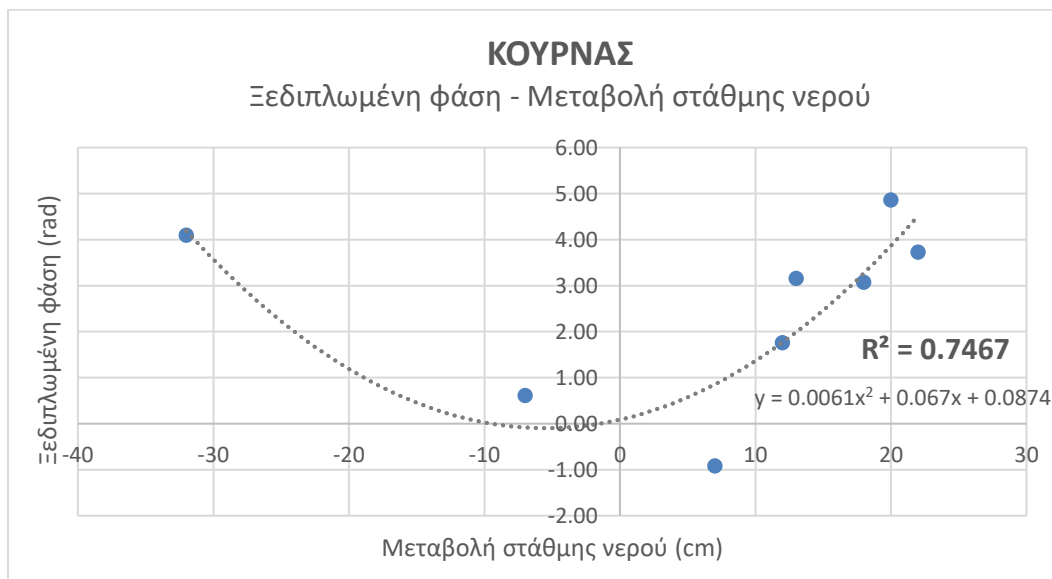
## 6.7 Ξεδιπλωμένη φάση – Μεταβολή στάθμης νερού

Η «ξεδιπλωμένη» φάση, η οποία προέκυψε μετά την αποκατάσταση του συμβολογραφήματος, είναι ο ουσιαστικός παράγοντας που αντικατοπτρίζει την ανίχνευση των μεταβολών στάθμης νερού. Για αυτόν το λόγο, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον το είδος συσχέτισης που παρουσιάζει με το νερό και συγκεκριμένα σε τι βαθμό εκφράζει της

αυξομειώσεις της επιφάνειας της λίμνης. Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για αυτόν τον σκοπό είναι το **Διάγραμμα 12** για τη λίμνη Αγιάς και το **Διάγραμμα 13** για τη λίμνη Κουρνά.



Διάγραμμα 12: Η συσχέτιση των μέσων τιμών ξειπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη Αγιάς

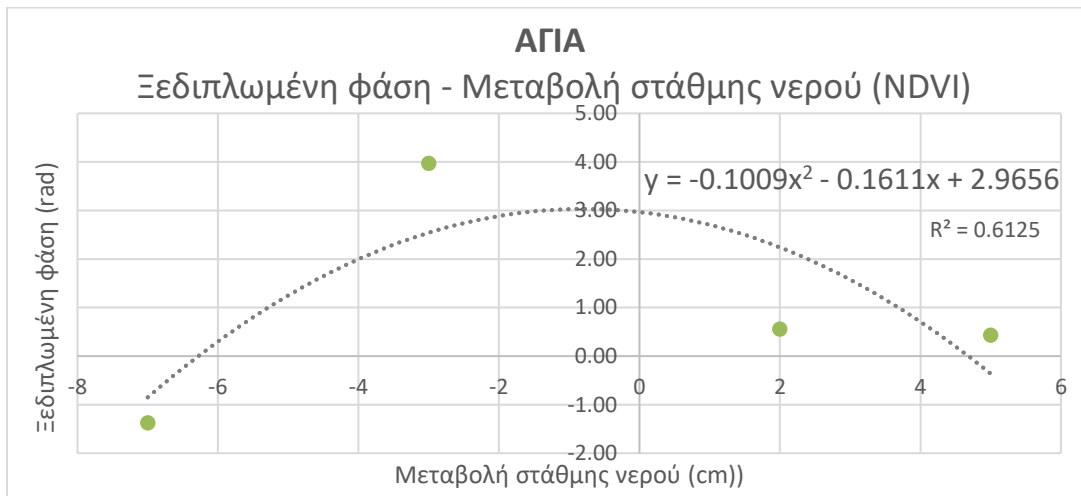


Διάγραμμα 13: Η συσχέτιση των μέσων τιμών ξειπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη Κουρνά

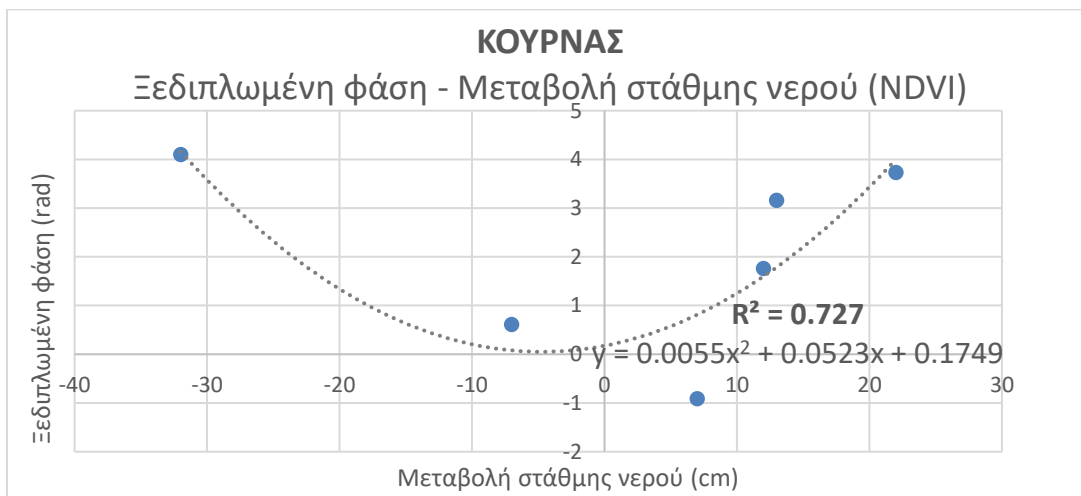
Για όλες τις μέσες τιμές «ξεδιπλωμένης» φάσης που υπολογίστηκαν, προκύπτει στον Κουρνά συσχέτιση πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού με  **$R^2=0,75$** , ενώ στην Αγιά η βέλτιστη συσχέτιση που είναι πολυωνύμου 4<sup>ου</sup> βαθμού με  **$R^2=0,27$** , η οποία δεν θεωρείται αξιόλογη.

## Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά της «ξεδιπλωμένης» φάσης ανεξάρτητα από την παρουσία βλάστησης, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα Διάγραμμα 14 και Διάγραμμα 15, για τη λίμνη Αγιάς και Κουρνά, μετά από αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση τιμών (Πίνακας 10).



Διάγραμμα 14: Η συσχέτιση των μέσων τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς μετά από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων



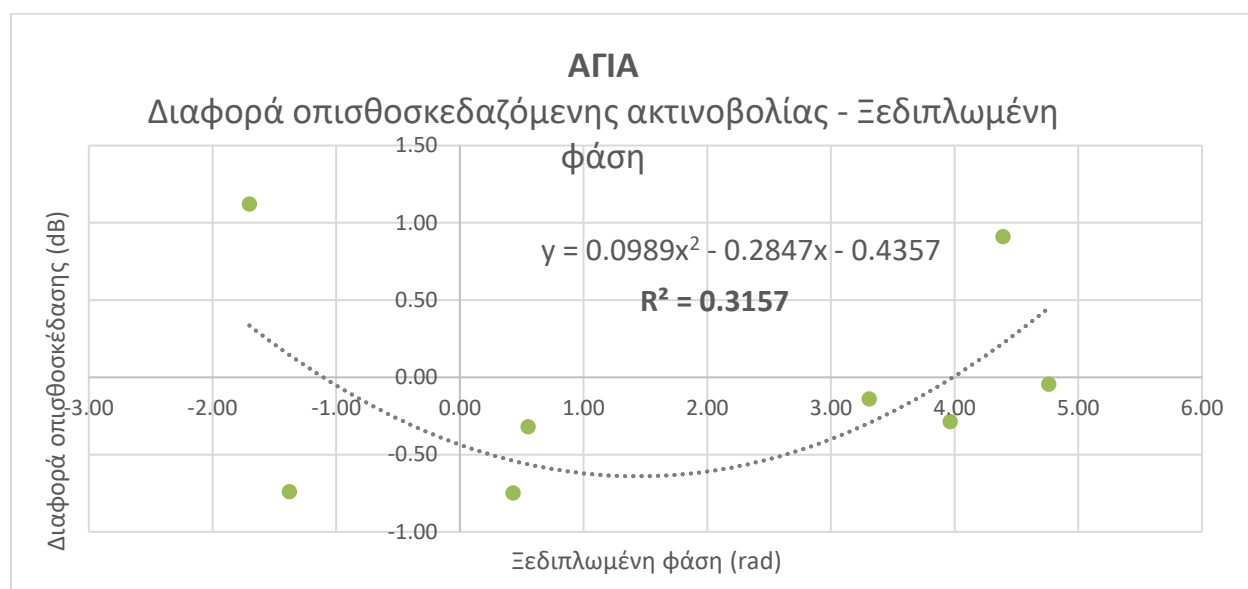
Διάγραμμα 15: Η συσχέτιση των μέσων τιμών ξεδιπλωμένης φάσης με τη μεταβολή της στάθμης νερού για τη λίμνη του Κουρνά μετά από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων

Αν αφαιρεθούν οι τιμές για τους μήνες με έντονη βλάστηση, τότε για τον Κουρνά υπάρχει σχέση πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού με  $R^2=0,73$  και για την Αγιά με  $R^2=0,61$ . Παρατηρείται και πάλι αξιοσημείωτη βελτίωση των αποτελεσμάτων για την λίμνη της Αγιάς, ενώ τα αποτελέσματα του

Κουρνά κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Η βελτίωση αυτή επιβεβαιώνει την έντονη επίδραση της βλάστησης στον σωστό υπολογισμό του ύψους της στάθμης στη λίμνη της Αγιάς.

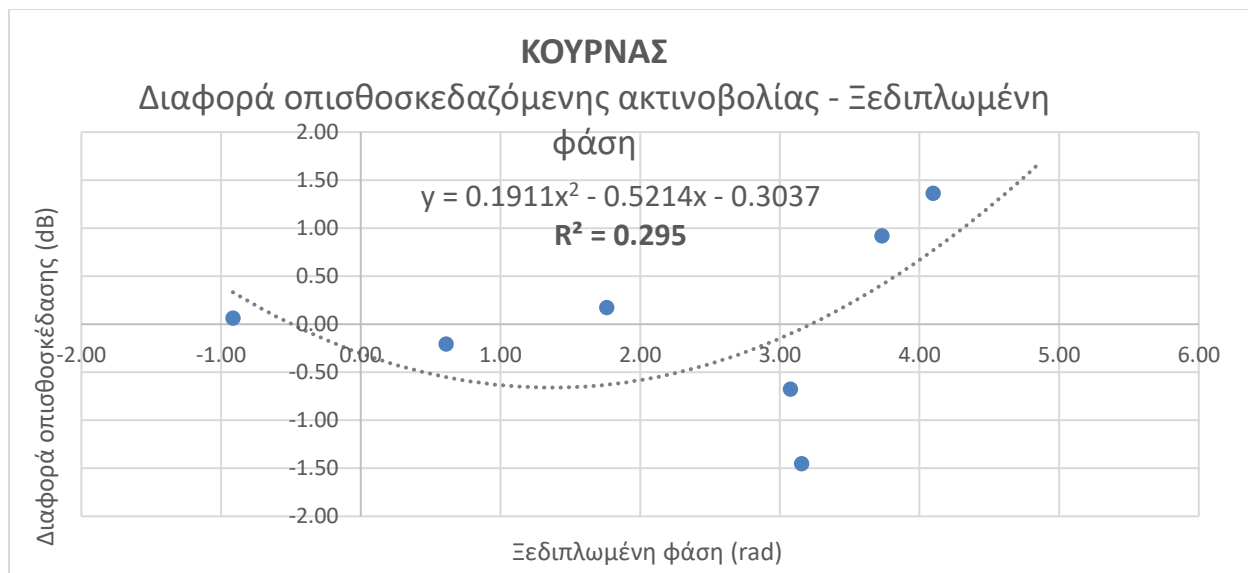
## 6.8 Οπισθοσκέδαση – Ξεδιπλωμένη φάση

Χρησιμοποιώντας εργαλεία του λογισμικού ArcGIS υπολογίστηκε η διαφορά της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας για κάθε συμβολογράφημα που κατασκευάστηκε, δηλαδή για κάθε ζεύγος ημερών (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - ΠΙΝΑΚΑΣ 6). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαγράμματα για την κάθε λίμνη, με σκοπό να συσχετιστεί η διαφορά της τιμής της οπισθοσκέδασης με την υπολογισμένη από το συμβολογράφημα ξεδιπλωμένη φάση.



Διάγραμμα 16: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη της Αγιάς



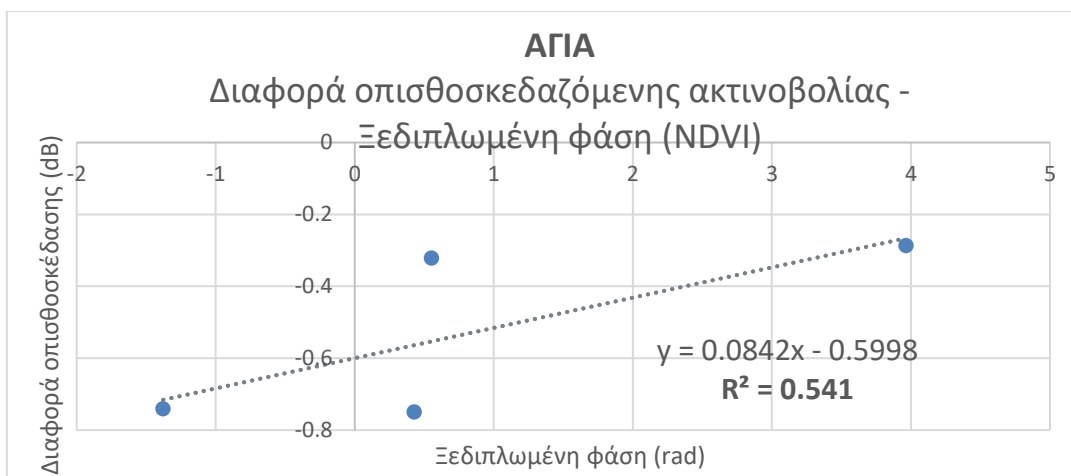


Διάγραμμα 17: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη του Κουρνά

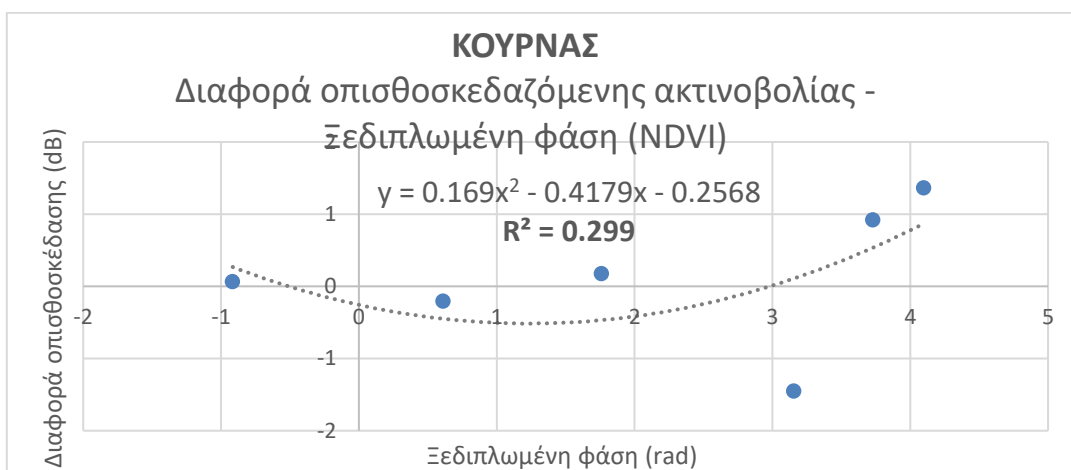
Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα και για τις δύο λίμνες ταυτίζονται, με το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού να έχει συντελεστή για την Αγία  $R^2=0,32$  και για τον Κουρνά  $R^2=0,30$ . Αυτό σημαίνει ότι η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι αδύναμη. Αυτό μάλλον προκύπτει από την ανώμαλη συμπεριφορά των τιμών οπισθοσκέδασης, γεγονός που παρατηρήθηκε και στα σχετικά με την οπισθοσκέδαση διαγράμματα (Διάγραμμα 5, Διάγραμμα 7).

### Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης

Με την ίδια λογική που αναφέρθηκε παραπάνω, αφαιρέθηκαν οι τιμές των ημερών εκείνων όπου παρατηρήθηκε έντονη επίδραση βλάστησης, σύμφωνα με τις τιμές που προέκυψαν από τον δείκτη NDVI (Πίνακας 10).



Διάγραμμα 18: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη της Αγιάς έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων

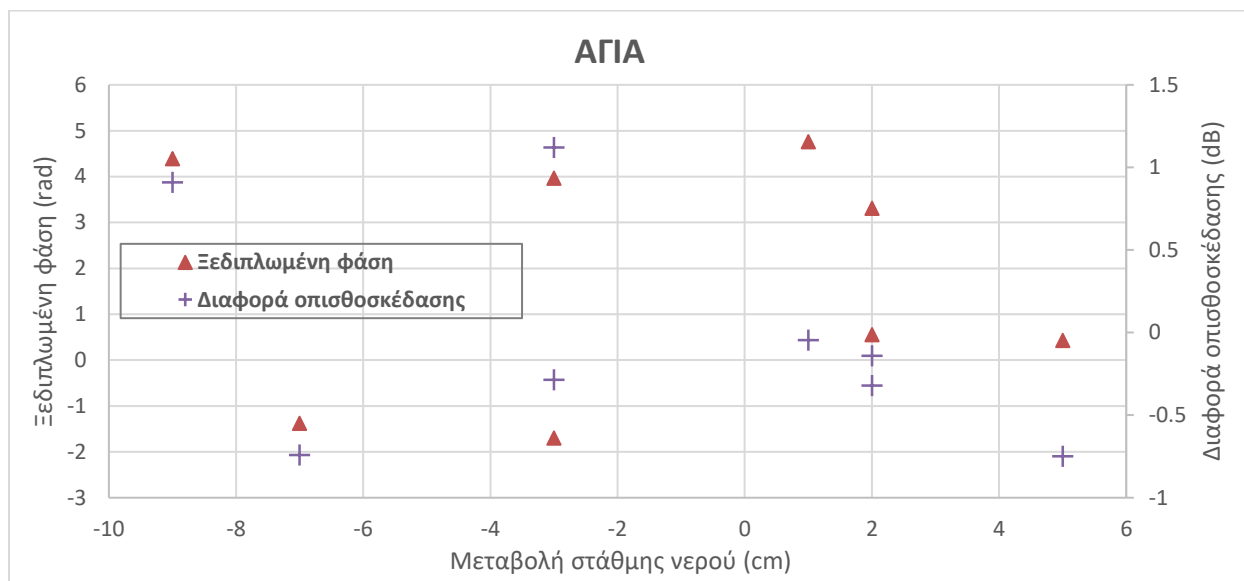


Διάγραμμα 19: Συσχέτιση της υπολογισμένης διαφοράς οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη μέση τιμή ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη του Κουρνά έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφημάτων

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον καθώς υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά για κάθε λίμνη. Δηλαδή, στην περίπτωση της Αγιάς υπάρχει εμφανής βελτίωση των αποτελεσμάτων με τη συσχέτιση να είναι πλέον γραμμική με συντελεστή  $R^2=0,54$ . Από την άλλη στη λίμνη του Κουρνά η συσχέτιση παραμένει ίδια με συντελεστή και πάλι  $R^2=0,30$ . Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τη συνολική συμπεριφορά της λίμνης ως υγροτοπικό σύστημα, γεγονός το οποίο δεν ισχύει στον ίδιο βαθμό για τη λίμνη του Κουρνά.

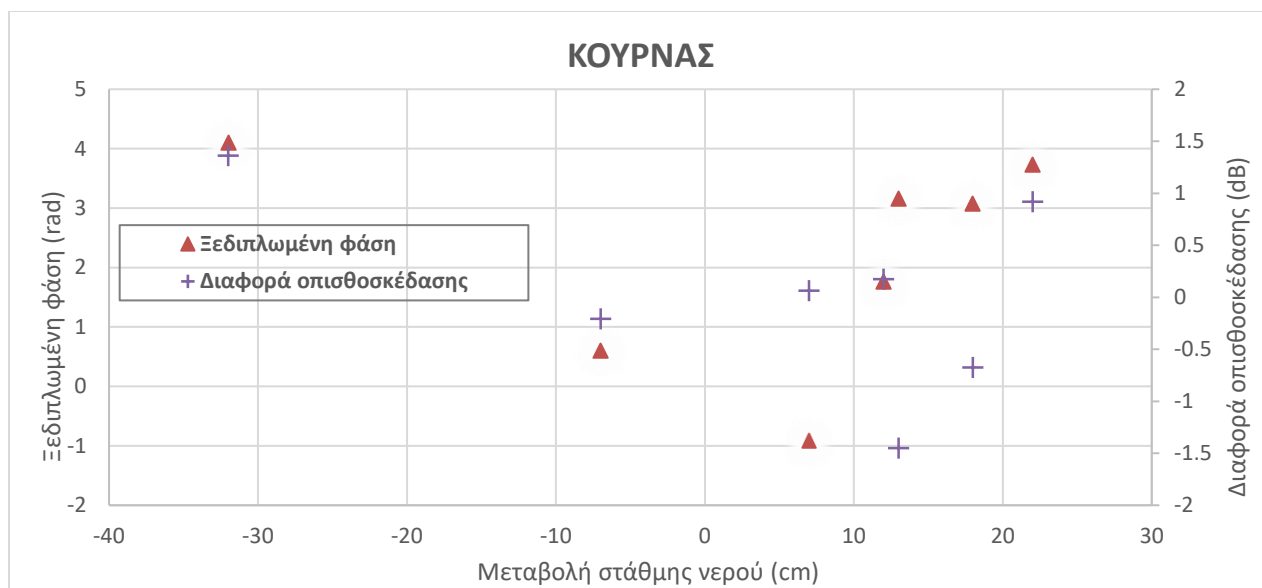
## 6.9 Διαφορά οπισθοσκέδασης – Ξεδιπλωμένη φάση – Μεταβολή στάθμης νερού

Στα πλαίσια συσχέτισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, εξετάστηκε βαθύτερα η διαμόρφωση της διαφοράς οπισθοσκέδασης αλλά και της ξεδιπλωμένης φάσης σε σχέση με τις μεταβολές στη στάθμη νερού για κάθε λίμνη αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για τη λίμνη της Αγιάς παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 20** και για τη λίμνη του Κουρνά στο **Διάγραμμα 21**.



Διάγραμμα 20: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στάθμης νερού και των αντίστοιχων τιμών οπισθοσκέδασης και ξεδιπλωμένης φάσης για τη λίμνη της Αγιάς

Από το **Διάγραμμα 20** φαίνεται ότι καθώς η στάθμη του νερού αυξάνεται, οι τιμές της ξεδιπλωμένης φάσης και της διαφοράς οπισθοσκέδασης μειώνονται. Η συμπεριφορά αυτή συμφωνεί και με την έρευνα των **Kim et al., 2014** όπου προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται με αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη μεταβολή της στάθμης νερού. Αυτό οφείλεται και στη φύση της συμβολομετρικής φάσης, η οποία αυξάνεται καθώς η στάθμη του νερού μειώνει τη σχετική απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του στόχου αλλά και τη διαφορά φάσης μεταξύ των κοντινών pixel σε ένα «ξεδιπλωμένο» συμβολογράφημα. Επομένως, είναι λογικό η ξεδιπλωμένη φάση και μεταβολή ύψους νερού να παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση, ενώ για τη διαφορά στην οπισθοσκέδαση συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή παρουσιάζεται πολύ χαμηλότερη συσχέτιση.



Διάγραμμα 21: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στάθμης νερού και των αντίστοιχων τιμών οπισθοσκέδασης και ξεδιπλωμένη φάσης για τη λίμνη του Κουρνά

Αντίθετα από το προηγούμενο διάγραμμα, στη λίμνη του Κουρνά φαίνεται ότι καθώς η στάθμη αυξάνεται επικρατεί η αύξηση τόσο της ξεδιπλωμένης φάσης όσο και της διαφοράς οπισθοσκέδασης. Το γεγονός αυτό μπορεί να συσχετιστεί είτε με την παρουσία έντονου κυματισμού ή βροχοπτώσεων εντός της περιοχής της λίμνης μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων των εικόνων.

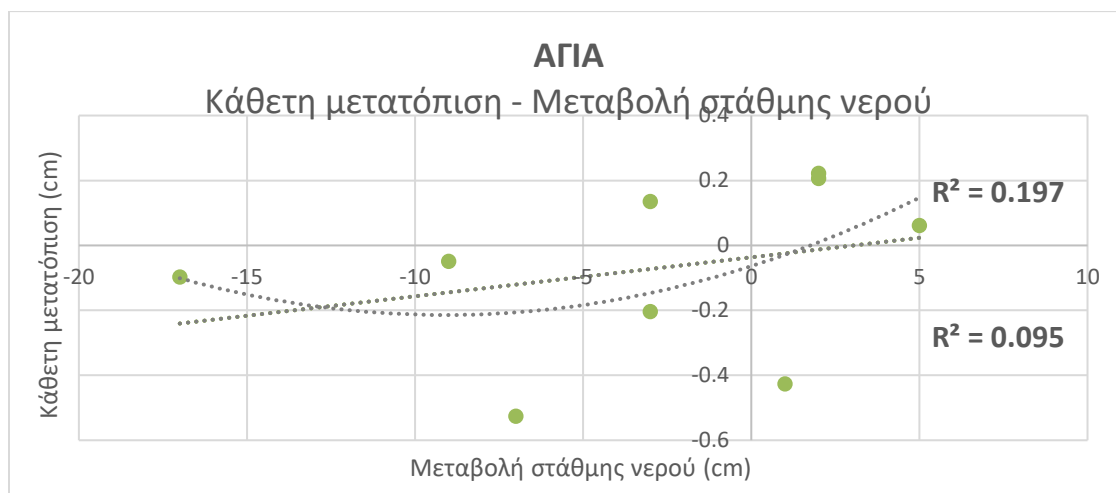
Παρ' όλα αυτά η κατανομή των τιμών ξεδιπλωμένης φάσης παραμένει λογική, με αποτέλεσμα η ασυμφωνία του διαγράμματος με το αντίστοιχο για τη λίμνη της Αγίας να οφείλεται στον παράγοντα της οπισθοσκέδασης. Αυτό είναι επίσης δικαιολογημένο από την ανομοιομορφία που παρουσίασαν τα αποτελέσματα της οπισθοσκέδασης και για τις δύο περιοχές μελέτης, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 8.2.

## 6.10 Κάθετη μετατόπιση – μεταβολή στάθμης νερού

Για την κάθετη μετατόπιση που υπολογίστηκε από το συμβολογράφημα, παρατηρείται σε πρώτη φάση μεγάλη απόκλιση μεταξύ των απόλυτων τιμών της υπολογισμένης μετατόπισης και των μεταβολών στάθμης από τους υδρολογικούς σταθμούς των λιμνών. Αυτή η απόκλιση οφείλεται μάλλον στη φύση του νερού, η οποία παρεμποδίζει την αλληλεπίδραση με το σήμα του ραντάρ λόγω της σύστασης του νερού αλλά και της κίνησης της επιφάνειας. Ο περιορισμός

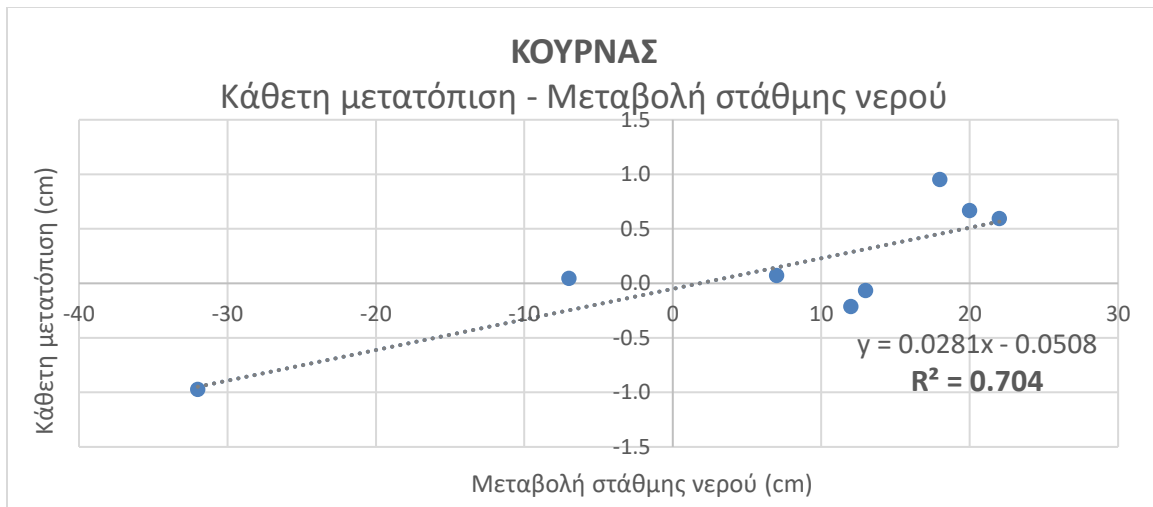
της ποσοτικής αυτής απόκλισης ήταν αναγκαίος και για αυτόν το λόγο έγινε διόρθωση των τιμών κάθετης μετατόπισης βάσει επιλεγμένου σημείου αναφοράς. Η διόρθωση αυτή έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού ArcGIS, αφού πρώτα έγινε έλεγχος μεταξύ των εικόνων για τα σημεία που εμφανίζουν σταθερά υψηλές τιμές συνάφειας.

Τα υποψήφια για τη διόρθωση σημεία επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι δομές που παραμένουν ακίνητες και που αποτελούνται από όσο το δυνατό λείες επιφάνειες και υλικά που αλληλεπιδρούν με το σήμα του ραντάρ. Έτσι, για τη λίμνη της Αγιάς τέτοια σημεία αναφοράς ήταν ένας δρόμος από ασφαλτο και ένα κτίριο, ενώ για τη λίμνη Κουρνά και τα δύο σημεία αντιστοιχούσαν σε οροφές κτιρίων. Από τα σημεία αυτά βρέθηκε ο μέσος όρος της κάθετης μετατόπισης και έπειτα αυτή η τιμή θεωρήθηκε πλεονάζουσα, οπότε προστέθηκε ή αφαιρέθηκε ανάλογα σε όλα τα υπόλοιπα σημεία της εικόνας, δίνοντας έτσι διορθωμένες τιμές κάθετης μετατόπισης στις επιφάνειες των λιμνών.



Διάγραμμα 22: Η συσχέτιση των μέσων τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη της Αγιάς

Η κατασκευή του διαγράμματος για τη λίμνη του Κουρνά έγινε έπειτα από αφαίρεση της τιμής κάθετης μετατόπισης του μήνα Ιουλίου. Η πρωτοβουλία αυτή βασίστηκε στην άμεση εξάρτηση που έχει ο υπολογισμός της κάθετης μετατόπισης με την ξεδιπλωμένη φάση. Η τιμή της ξεδιπλωμένης φάσης για τον μήνα Ιούλιο ήταν αφύσικου μεγέθους, δηλαδή περίπου διπλάσια από τις υπόλοιπες και για αυτό απορρίφθηκε αξιοποιώντας τον μέσο όρο και το μέγεθος της τυπικής απόκλισης των τιμών ξεδιπλωμένης φάσης.



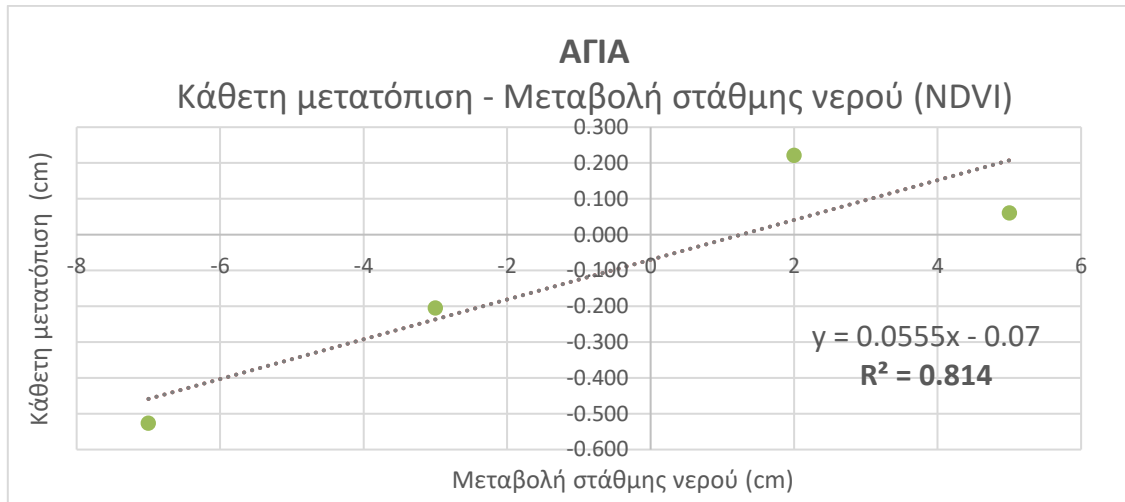
Διάγραμμα 23: Η συσχέτιση των μέσων τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη του Κουρνά

Η μικρότερη απόκλιση μεταξύ κάθετης μετατόπισης και πραγματικής διαφοράς στάθμης είναι για τον Κουρνά περίπου 7 cm (Νοέμβριος) και για την Αγιά περίπου 1.5 cm (Αύγουστος). Η μεγαλύτερη είναι αντίστοιχα για τον Κουρνά περίπου 31 cm (Δεκέμβριος) και για την Αγιά 16 cm (Απρίλιος). Στην περίπτωση του Κουρνά υπάρχει πολύ καλύτερη συμπεριφορά των τιμών, οι οποίες εμφανίζουν γραμμική συσχέτιση με  $R^2=0,70$ . Αντίθετα, για την Αγιά είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα, αφού η τιμή του  $R^2$  φτάνει μόλις το 0,1 γραμμικά και το 0,2 πολυωνμικά.

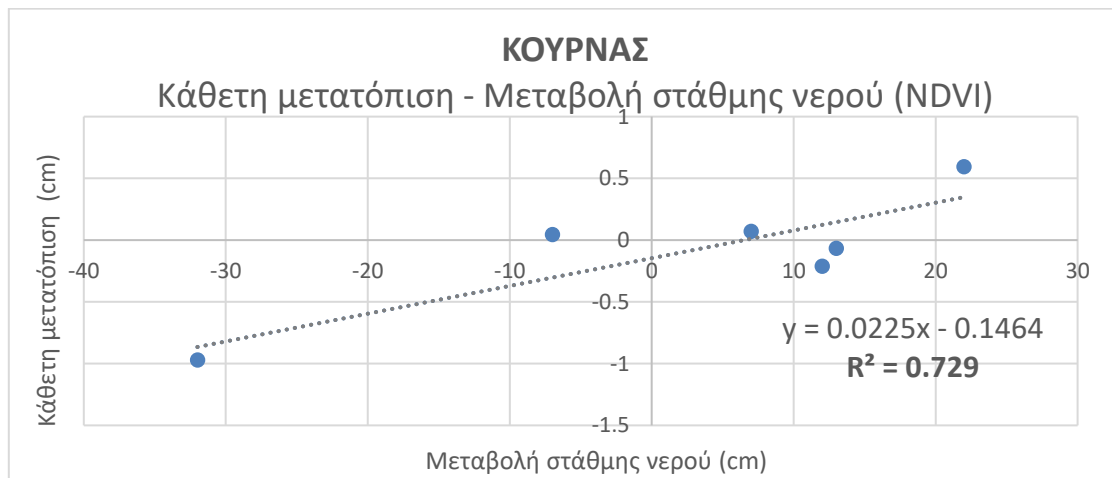
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της αβεβαιότητας αντανακλά συνεισφορές του ατμοσφαιρικού θορύβου, προβλήματα των δεδομένων από τους σταθμούς του πεδίου καθώς και τη χαμηλή συνάφεια. Ακόμη, οι ατμοσφαιρικές εναλλαγές στην τροπόσφαιρα μπορούν να προκαλέσουν δυσκολίες στην ερμηνεία των συμβολογραφημάτων (Hanssen, 2001). Επιπλέον, η αβεβαιότητα που προστίθεται λόγω της μετατροπής του ύψους νερού από σχετική τιμή σε απόλυτη αντανακλά τη διάδοση σφάλματος και υπολογίζεται στα 6-7 cm, σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων RMSE. Το σφάλμα αυτό οφείλεται στη συνεισφορά αβεβαιότητας από τα συμβολογραφήματα και στην αβεβαιότητα που προκύπτει από τη μετατροπή σχετικών τιμών στάθμης νερού σε απόλυτες (Hong et al., 2010).

## Αφαίρεση παράγοντα βλάστησης

Αν ληφθούν υπόψη μόνο οι μετρήσεις που έγιναν στις χρονικές περιόδους όπου υπήρχε μειωμένη παρουσία βλάστησης, δηλαδή όπου η επιφάνεια της λίμνης είχε μόνο νερό, μπορεί να γίνει η αφαίρεση ορισμένων τιμών για κάθε λίμνη (Πίνακας 10).



Διάγραμμα 24: Η συσχέτιση των μέσων τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη της Αγιάς έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφήματων



Διάγραμμα 25: Η συσχέτιση των μέσων τιμών της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη του Κουρνά έπειτα από την αφαίρεση των επηρεασμένων από τη βλάστηση συμβολογραφήματων

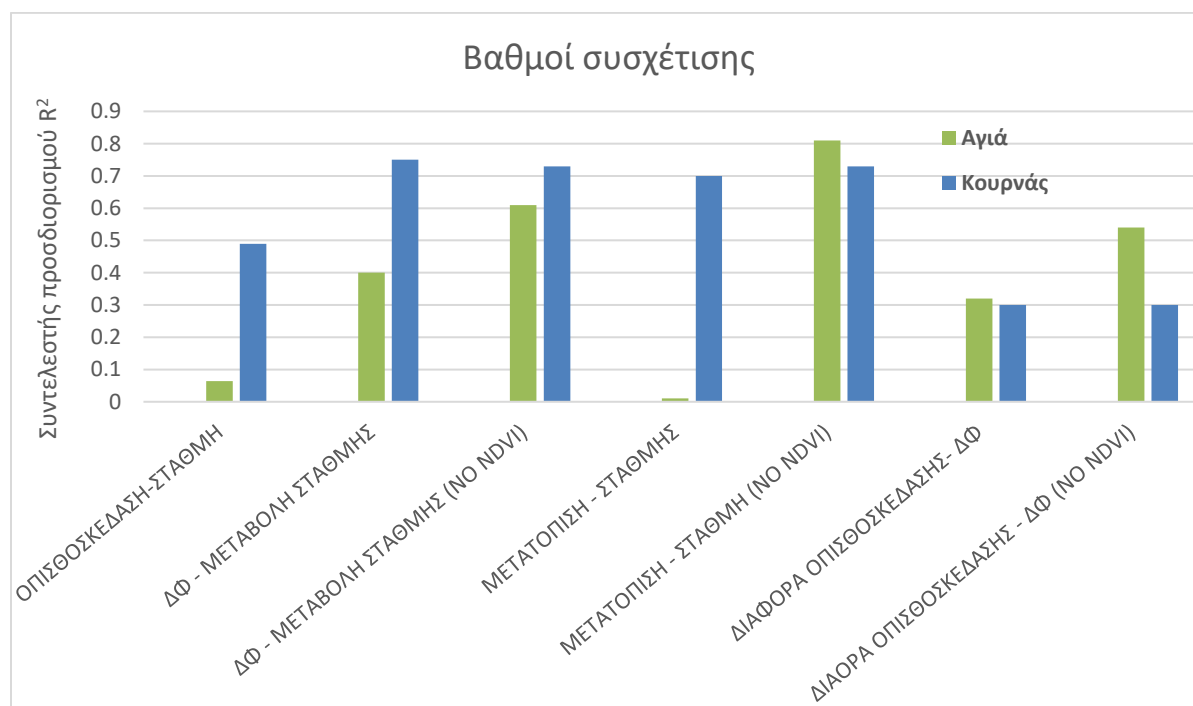
Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αφαιρώντας τις τιμές που φαίνονται έντονα επηρεασμένες από τον παράγοντα της βλάστησης, βελτιώνεται η συσχέτιση και για τις δύο λίμνες. Συγκεκριμένα για τον Κουρνά γραμμική συσχέτιση με  $R^2=0,73$  και για την Αγιά γραμμική



συσχέτιση με  $R^2=0,81$ . Η εντυπωσιακή βελτίωση που παρατηρείται στην λίμνη της Αγιάς, οφείλεται πιθανώς στην εντονότερη παρουσία της βλάστησης σε αυτήν. Επομένως, φαίνεται ότι η πυκνή φυτοκάλυψη της λίμνης είχε κρίσιμο ρόλο στη μορφή και την επεξεργασία των συμβολογραφημάτων.

## 7 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνολικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις στατιστικές αναλύσεις της συνδυαστικής επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων και των δεδομένων στάθμης νερού για τις δύο λίμνες, Αγιάς και Κουρνά, φαίνονται στο **Διάγραμμα 26**. Σε αυτό το διάγραμμα γίνεται δυνατή η σύγκριση μεταξύ των βαθμών συσχέτισης σε πολυώνυμα ίδιο βαθμού που παρουσίασαν τα εξεταζόμενα μεγέθη σε κάθε λίμνη.



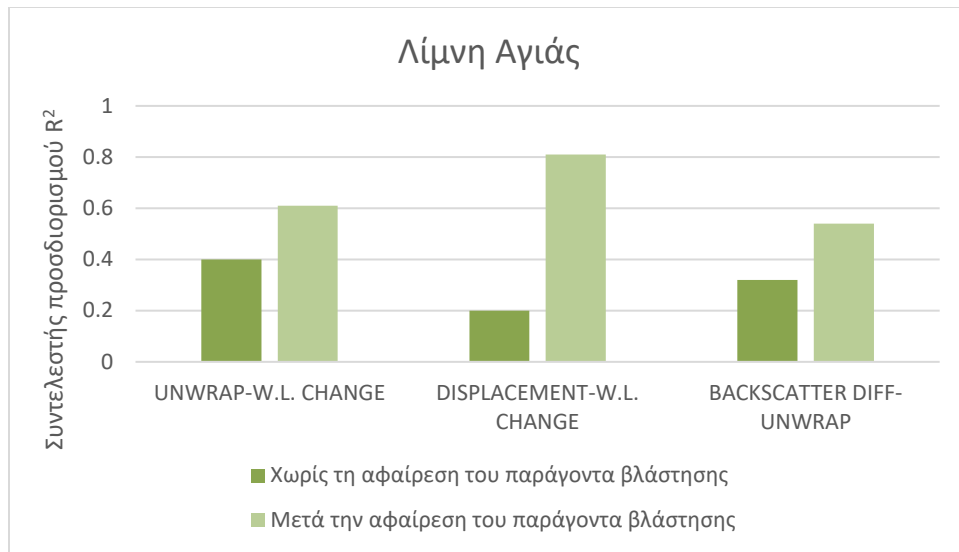
Διάγραμμα 26: Σύγκριση βαθμών συσχέτισης των αποτελεσμάτων για τη λίμνη Αγιάς και τη λίμνη Κουρνά

Στο **Διάγραμμα 26** φαίνεται ότι οι βαθμοί συσχέτισης που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες παραμέτρους είναι γενικά υψηλότεροι για τη λίμνη του Κουρνά. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς η λίμνη Κουρνά αντιπροσωπεύει την περίπτωση της «καθαρής»

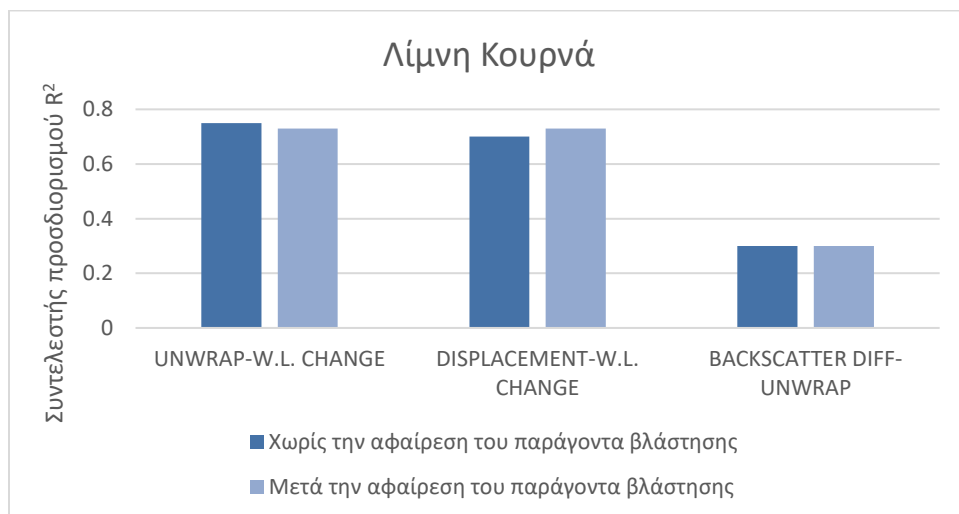
επιφάνειας νερού, επομένως οι παράμετροι δεν επηρεάζονται έντονα από την βλάστηση. Από την έρευνα που διεξήχθη για τη συγκεκριμένη εργασία αποδεικνύεται ότι η σχετική μεταβολή της στάθμης των λιμνών μπορεί να υπολογιστεί με την τεχνική της συμβολομετρίας, εφόσον δεν υπάρχει βλάστηση στις περιοχές που καλύπτονται με νερό. Παρ' όλα αυτά, η απόκλιση κατά απόλυτη τιμή της μεταβολής του ύψους νερού, δηλαδή της κάθετης μετατόπισης που υπολογίστηκε συμβολομετρικά, είναι μεγάλη σε σχέση με τη μεταβολή στάθμης που καταγράφεται σύμφωνα με τους σταθμούς στο πεδίο. Γι' αυτό και δεν μπορεί με τη συγκεκριμένη τεχνική να υπολογιστεί άμεσα η απόλυτη στάθμη, πράγμα που επιβεβαιώνεται και στη βιβλιογραφία (Hong et al., 2010).

Επίσης, ως συμπέρασμα προκύπτει ότι η ακτινοβολία μήκους κύματος C δεν έχει ισχυρή αλληλεπίδραση με τις υδάτινες επιφάνειες. Αυτό επαληθεύουν τα σχετικά με την οπισθοσκέδαση διαγράμματα (*Διάγραμμα 5, Διάγραμμα 7*). Παρ' όλα αυτά, εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα συσχέτισης με το νερό στις περιοχές όπου αυτό δεν καλύπτεται με βλάστηση, συμπέρασμα που προκύπτει από την καλύτερη συμπεριφορά των τιμών για τη λίμνη Κουρνά από ό,τι για τη λίμνη Αγιάς.

Επίσης, στη συγκεκριμένη εργασία η συμβολομετρική συνάφεια φάνηκε να παρεμποδίζεται από τις θετικές τιμές του δείκτη NDVI, όπως αναφέρθηκε στο *Διάγραμμα 9* και στο *Διάγραμμα 10*. Πέρα όμως από αυτήν την ένδειξη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εκτός από την τιμή του δείκτη βλάστησης και το είδος και η πυκνότητα της φυτοκάλυψης. Επομένως, τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα, αλλά σίγουρα απαιτείται περισσότερη και ενδελεχής μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν τη συνάφεια.



Διάγραμμα 27: Κατανομή των βαθμών συσχέτισης για τα αποτελέσματα των συμβολογραφημάτων (Λίμνη Αγιάς)



Διάγραμμα 28: Κατανομή των βαθμών συσχέτισης για τα αποτελέσματα των συμβολογραφημάτων (Λίμνη Κουρνά)

Η βλάστηση είχε άμεση επιρροή στα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων για τη λίμνη της Αγιάς (Διάγραμμα 27), ενώ δε συνέβη το ίδιο για τη λίμνη του Κουρνά (Διάγραμμα 28). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι όταν υπάρχει έντονη φυτοκάλυψη και σε μεγάλη έκταση της επιφάνειας του νερού, τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η παρουσία της βλάστησης ήταν έντονη στη λίμνη της Αγιάς σε σχέση με τη λίμνη του Κουρνά, η συνάφεια παρέμεινε στα ίδια επίπεδα και για τις δύο λίμνες. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο είδος βλάστησης που

παρατηρείται στην Αγιά (υδροχαρή φυτά χαμηλού ύψους), το οποίο μάλλον επηρέασε την τιμή της συμβολομετρικής συνάφειας με αντίστοιχο τρόπο που θα έκανε το νερό.

Η συμβολομετρική συνάφεια είναι γενικά χαμηλή για τις περιοχές που καλύπτονται με νερό, όπως συνέβη και για τους υγρότοπους που εξετάστηκαν. Στην περίπτωση της λίμνης της Αγιάς οι τιμές της συνάφειας επηρεάστηκαν από την έντονη φυτοκάλυψη, ενώ στη λίμνη του Κουρνά είναι πιθανό να εμφανίστηκε αποσυσχέτιση λόγω της θέσης της (πρόποδες Λευκών Ορέων) και της μεγαλύτερης έκτασής της, παράγοντες οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν στην παρουσία επιφανειακού ανέμου και στη δημιουργία κυματισμών.

Η «ξεδιπλωμένη» φάση παρουσιάζει μικρή συσχέτιση με τη διαφορά μεταξύ των τιμών οπισθοσκέδασης (για τις ημέρες ενδιαφέροντος) και παρεμποδίζεται από την έντονη παρουσία βλάστησης στις εξεταζόμενες περιοχές. Αυτό προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την έντονη βελτίωση των αποτελεσμάτων για τη λίμνη της Αγιάς έπειτα από την αφαίρεση των τιμών «ξεδιπλωμένης φάσης» που αφορούσαν τις περιόδους με θετικές τιμές του δείκτη NDVI.

Η βλάστηση τελικά λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας στην επίτευξη καλής συνάφειας των συμβολογραφημάτων, ακόμη και για την περίπτωση λίμνης. Αυτό επιβεβαιώνεται έντονα από την περίπτωση της λίμνης της Αγιάς, για την οποία παρουσιάζονται χαμηλές συσχετίσεις κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των συμβολογραφημάτων. Η επίδραση όμως που έχει στη διαμόρφωση των τιμών συνάφειας εξαρτάται έντονα από το είδος της βλάστησης.

Πρέπει να τονιστεί ότι η βιβλιογραφία σχετικά με τη μέθοδο της συμβολομετρίας σε εφαρμογές υγροτόπων είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Για αυτόν το λόγο, στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που προτείνεται για ανίχνευση μετατοπίσεων εδάφους και μάλιστα σε μεγάλη κλίμακα (π.χ. από σεισμούς ή εκρήξεις ηφαιστειών). Αυτό έγινε γιατί η διαδικασία για τέτοιες εφαρμογές είναι πλέον σε μεγάλο βαθμό αποδεκτή και αυτοματοποιημένη. Οι διαφορές όμως στα χαρακτηριστικά του στόχου, δηλαδή του νερού, ήταν μεγάλες, και έτσι η ερμηνεία των συμβολογραφημάτων απέβη δύσκολη. Ένας λόγος που συνετέλεσε σε αυτό ήταν ότι οι περιοχές μελέτης είχαν μικρή έκταση και μεγάλη

ανομοιομορφία, με αποτέλεσμα να μην είναι ξεκάθαρη η εμφάνιση, επομένως και ο εντοπισμός των κροσσών στο συμβολογράφημα.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί η δυσκολία που αντιμετωπίστηκε σε σχέση με την υπολογιστική ισχύ που απαιτούσε η παραγωγή και επεξεργασία του συμβολογραφήματος με χρήση του λογισμικού SNAP. Αρχικά, ο όγκος των εικόνων αλλά και των προϊόντων της συμβολομετρίας ήταν ιδιαίτερα μεγάλος (ενδεικτικά αναφέρεται ότι το μέσο μέγεθος των αρχικών εικόνων ήταν 4 GB). Αυτό κατέστησε τη διαχείρισή τους αφενός δύσκολη, αφετέρου χρονοβόρα. Συγκεκριμένα, ο χρόνος που απαιτήθηκε για την εξαγωγή των τελικών προϊόντων ενός συμβολογραφήματος υπολογίστηκε περίπου στις 5 ώρες. Σημείο κλειδί για την διευκόλυνση της επεξεργασίας αποτέλεσε η δημιουργία subset, δηλαδή η αποκοπή της περιοχής μελέτης, η οποία λόγω και της μικρής έκτασης των συγκεκριμένων περιοχών μελέτης μείωσε τη διάρκεια επεξεργασίας στο 1/3 της διάρκειας επεξεργασίας της εικόνας αρχικού μεγέθους.

## Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η αξιοποίηση των δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-1A παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της δωρεάν διάθεσής τους στο ευρύ κοινό. Επομένως, αξίζει να σημειθούν οι τρόποι, με τους οποίους τα δεδομένα αυτά είναι δυνατό να παρέχουν ακόμα πιο ακριβή και άμεση πληροφορία για τη διακύμανση της στάθμης υγροτόπων στο μέλλον. Η εφαρμογή των μεθόδων που περιγράφονται στη συνέχεια ήταν αδύνατη στη συγκεκριμένη εργασία αφενός εξαιτίας της περιορισμένης διάθεσης δορυφορικών δεδομένων και αφετέρου λόγω των προχωρημένων τεχνικών που αυτές οι μέθοδοι προϋποθέτουν.

- Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης θα χαρακτηρίζονταν από μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία, αν υπήρχε μεγαλύτερο πλήθος συμβολογραφημάτων διαθέσιμο για επεξεργασία. Αυτό όμως δεν έγινε δυνατό, εξαιτίας της έλλειψης ισχυρής υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την παραγωγή και επεξεργασία συμβολογραφημάτων.

- Η οπισθοσκέδαση δεν δίνει αξιόλογα αποτελέσματα σε σχέση με το νερό όταν χρησιμοποιείται ακτινοβολία C-band μήκους κύματος 5,6 cm. Αντίθετα, ακτινοβολίες μεγαλύτερου μήκους κύματος όπως η ακτινοβολία τύπου L-band (15-30 cm), εμφανίζουν καλύτερη συσχέτιση με τις επιφάνειες γλυκού νερού (**Kim et al., 2014**). Δυστυχώς όμως, δορυφορικές εικόνες τύπου L-band δεν είναι μέχρι στιγμής διαθέσιμες δωρεάν στο ευρύ κοινό, γι' αυτό και δεν μπόρεσαν να αξιοποιηθούν ως πηγή περαιτέρω πληροφοριών.

- Μία καλή μέθοδος επαλήθευσης των αποτελεσμάτων της εργασίας είναι ο συνδυασμός τους με την τεχνική της αλτιμετρίας. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την ανύψωση της επιφάνειας του νερού με αποτελέσματα συγκρίσιμα με τις μετρήσεις των επίγειων σταθμών (Birkett, 1998). Η αλτιμετρία αφορά καθαρά την ανίχνευση υψομετρικών μετατοπίσεων των επίγειων στόχων, η πρόσβαση όμως στα απαιτούμενα δορυφορικά δεδομένα για εφαρμογές τέτοιου τύπου είναι πιο δύσκολη. Τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας θα μπορούσαν επίσης να συσχετιστούν με χρήση της μεθόδου της ταξινόμησης (classification) και αξιοποίηση των πληροφοριών των χρήσεων γης από επεξεργασία εικόνων του δορυφόρου Landsat-8 σε κατάλληλο λογισμικό (π.χ. ArcGIS) όπως η εργασία των **Reis et al., 2008**. Με τα εργαλεία αυτά θα μπορούσε να υπολογιστεί η εκάστοτε επιφάνεια της λίμνης ή αλλιώς η έκταση που καλύπτεται με νερό και κατ' επέκταση να υπολογιστεί η διακύμανση του όγκου του νερού και να συγκριθεί με τις αυξομειώσεις της στάθμης.

- Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (**Kim et al., 2013**) η συμβολομετρική συνάφεια σε περιοχές υγροτόπων βελτιώνεται όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα πολικότητας HH αλλά και όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης. Ακόμη, θα ήταν δυνατή η καλύτερη διαχείριση της συνάφειας των εξεταζόμενων λιμνών αν ήταν διαθέσιμα δεδομένα στάθμης από πολλούς σταθμούς in situ. Αυτό όμως δεν ήταν εφικτό στην παρούσα έρευνα, αφού τόσο η λίμνη της Αγιάς όσο και η λίμνη του Κουρνά διαθέτουν μόνο ένα σταθμήμετρο.

- Υπάρχουν τεχνικές, πιο συγκεκριμένα αλγόριθμοι, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των συμβολογραφημάτων. Αν υπήρχαν

περισσότερα συμβολογραφήματα διαθέσιμα για τη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος θα μπορούσε να αξιοποιηθεί η σώρευση διαφορικών συμβολογραφημάτων (stacking), δηλαδή, ο συνδυασμός των συμβολογραφημάτων με την τοποθέτηση ενός συμβολογραφήματος επάνω σε άλλα. Αυτή η τεχνική έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των θορύβων που παραποιούν τη μορφή της τελικής πληροφορίας. Έτσι, επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια ο εντοπισμός της επιθυμητής πληροφορίας. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού παραμορφωτικών κινήσεων, η ανάγκη διεύρυνσης του χρονικού παράθυρου παρατήρησης, ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση του σήματος, οδηγεί, συνήθως, σε ανεπιτυχή αποτελέσματα, λόγω της έκτασης του φαινομένου της χρονικής αποσυσχέτισης **(Φουμέλης, 2009)**.

Άλλες προχωρημένες τεχνικές είναι η Persistent Scatterers Interferometry ή Permanent Scatter Interferometry - PSI, η Small Baseline Subsets - SBAS, Small Temporal Baseline Subsets – STBAS. Η PSI **(Ferretti et al., 2000, 2001)** είναι μία από τις πιο απαιτητικές τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας SAR και έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα στη διόρθωση των ατμοσφαιρικών θορύβων. Η SBAS **(Bernardino et al., 2002; Lanari et al., 2004)** βασίζεται σε υποσύνολα μικρών χωρικών γραμμών βάσης και έχει στόχο την βελτίωση του συνδυασμού των συμβολογραφημάτων με κριτήριο την ελάττωση όσο το δυνατό της γραμμής βάσης (perpendicular baseline), με αποτέλεσμα τη μείωση των χωρικών φαινομένων αποσυσχέτισης. Τέλος, η STBAS **(Hong et al., 2010)** αποτελεί τροποποίηση της προηγούμενης μεθόδου και λειτουργεί με κριτήριο την ελάττωση όσο το δυνατό της χρονικής απόστασης ή αλλιώς χρονικής γραμμής βάσης μεταξύ των λήψεων των εικόνων master και slave.



## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξενόγλωσση

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation [ESA TM-19]*, ESA Publications

Veci, L., 2016. *TOPS Interferometry Tutorial*, ESA

Eineder, M., Bamler, R., (2014). *Module 1301: SAR Imaging*, SAR EDU (TUM/DLR), Retrieved from [https://saredu.dlr.de/unit/SAR\\_imaging](https://saredu.dlr.de/unit/SAR_imaging)

Auer, S., Bamler, R., (2014). *Module 1104: Radar Physics - Mathematics & Physics*, SAR EDU – TUM, Retrieved from <https://saredu.dlr.de/unit/physics>

Eineder, M., Bamler, R., (2014). *Module 2201: SAR Interferometry Basics*, SAR EDU (TUM/DLR), Retrieved from [https://saredu.dlr.de/unit/insar\\_basics](https://saredu.dlr.de/unit/insar_basics)

Eineder, M., Bamler, R., (2014). *Module 2202: InSAR Error Sources*, SAR EDU (TUM/DLR), Retrieved from [https://saredu.dlr.de/unit/insar\\_errors](https://saredu.dlr.de/unit/insar_errors)

Walter, D., (2014). *Module 3102: Surface subsidence monitoring with NEST*, SAR EDU - SAR Remote Sensing Educational Initiative, Retrieved from [https://saredu.dlr.de/unit/insar\\_deformation](https://saredu.dlr.de/unit/insar_deformation)

USGS. (2017). *Landsat Missions Timeline*. Retrieved October 7, 2015, from [http://landsat.usgs.gov/about\\_mission\\_history.php](http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php)

United States Geological Survey. (2015). *Using the USGS Landsat 8 Product*. Retrieved July 21, 2015, from [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)

ESA, (2017). *SENTINEL-1 SAR User Guide Introduction*, Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>

ESA, (2017). *SENTINEL-1 SAR Technical Guide*, Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar>

ESA, (2014). *Satellite Radars for Remote Sensing*, ESA LearnEO! Resource Library

Hong, S., Wdowinski, S., Kim, S., Won, J., (2010). *Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR)*, Elsevier Publications

Kim, S.-W., Wdowinski, S., Amelung, F., Dixon, T., & Won, J., (2013). *Interferometric Coherence Analysis of the Everglades Wetlands, South Florida*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing

Kim, J., Zhong, L., Jones, J., Shum, C.K., Lee, H., Jia, Y., (2014). *Monitoring Everglades freshwater marsh water level using L-band synthetic aperture radar backscatter*, Elsevier Publications

Zyl, J., (2016). *RADAR REMOTE SENSING FOR EARTH AND PLANETARY SCIENCES*, California Institute of Technology, Retrieved from [http://www.its.caltech.edu/~ee157/lecture\\_note/Radar.pdf](http://www.its.caltech.edu/~ee157/lecture_note/Radar.pdf)

Fakhri, F., (2013). Long and short term monitoring of ground deformation in Thessaly basin using space-based SAR Interferometry, Harokopio University of Athens – Department of Geography

California Institute of Technology, (2016). *Interferometric Synthetic Aperture Radar*, from [http://www.its.caltech.edu/~ee157/lecture\\_note/Interferometry.pdf](http://www.its.caltech.edu/~ee157/lecture_note/Interferometry.pdf)

United States Geological Survey, (2015). *NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology*  
[https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php)

## Ελληνική

Υπουργείο περιβάλλοντος, 2014. *Περιγραφή του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (EL13) – 1<sup>η</sup> Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών*

Δεληκαράογλου, Δ., (2005). *Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Retrieved from  
[http://portal.survey.ntua.gr/geohopper/iCommons/iC\\_OCW/iC\\_OCW\\_STSG/notes\\_STSG/SSG\\_ch7\\_SAR.pdf](http://portal.survey.ntua.gr/geohopper/iCommons/iC_OCW/iC_OCW_STSG/notes_STSG/SSG_ch7_SAR.pdf)

Ποϊραζίδης, Κ., Βούλγαρης, Μ. Δ., Κεφαλάς, Γ., Λορίλια, Ρ. Σ. (2013). *Βασικές Αρχές της Τηλεπισκόπησης*, ΑΤΕΙ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ- ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ. Retrieved from  
[http://envi.teiion.gr/assets/files/Envi%20Management%20Section/REMOTE\\_THEORY/Basikes%20Arxes%20Tis%20Tepiskopisis%20\(1,2,3\).pdf](http://envi.teiion.gr/assets/files/Envi%20Management%20Section/REMOTE_THEORY/Basikes%20Arxes%20Tis%20Tepiskopisis%20(1,2,3).pdf)

Μπικουβαράκη, Μ., (2011). *Συμβολομετρία RADAR στην παρακολούθηση υψομετρικών παραμορφώσεων εδάφους*, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, Χανιά

Μέξης, Φ., (2015). *Συμβολή της τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας*, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Χανιά

Γρυλλάκης, Ε., (2007). *Χρήση τηλεπισκόπησης και ανάπτυξη αλγορίθμων για υδρολογικούς σκοπούς*, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Χανιά

Ανδρικόπουλος, Δ., (2009). *Συμβολομετρία RADAR και εφαρμογές στις γεωεπιστήμες*  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, Χανιά

Κασκαρά, Μ., (2015). *Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης για την χρονική περίοδο 1992-2001. Σύγκριση με δεδομένα GPS*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Αθήνα

Νεοκοσμίδης, Σ., (2014). *Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την ανίχνευση της επιφανειακής παραμόρφωσης στην περιοχή του Φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο (1993-2010)*, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ – ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ, Αθήνα

Τσουχλαράκη, Α., Αχιλλέως, Γ., (2010). *Μαθαίνοντας τα GIS στην πράξη*, Εκδόσεις ΔΙΣΙΓΜΑ

Ζαΐρης, Π., (2010). *ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ*, Εκδόσεις Κριτική ΑΕ

Μπαλτάς, Ε., (2013). *Εφαρμοσμένη Μετεωρολογία*, Εκδόσεις Ζήτη.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τιμές οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας που υπολογίστηκαν με το λογισμικό SNAP σε μονάδες dB

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	Οπισθοσκέδαση (dB)	
	ΚΟΥΡΝΑΣ	ΑΓΙΑ
06/21/2015	-19.50	-16.92
07/03/2015	-18.85	-17.57
07/27/2015	-21.79	-19.69
08/08/2015	-21.41	-18.51
08/20/2015	-21.56	-18.07
09/01/2015	-21.57	-18.16
09/13/2015	-20.49	-19.17
09/25/2015	-21.50	-18.08
10/07/2015	-21.69	-17.80
11/24/2015	-21.70	-20.97
12/06/2015	-21.46	-20.74
12/18/2015	-19.60	-20.35
12/30/2015	-21.37	-19.74
02/28/2016	-20.95	-20.28
03/11/2016	-21.73	-19.92
04/04/2016	-22.38	-20.90
04/16/2016	-22.91	-20.51

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Τιμές οπισθοσκέδασης και στάθμης νερού για τη λίμνη της Αγιάς

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΓΙΑ	
	Οπισθοσκέδαση (dB)	Στάθμη νερού (m)
06/21/2015	-16.92	2.1
07/03/2015	-17.57	2.07
07/27/2015	-19.69	1.97
08/08/2015	-18.51	2.02
08/20/2015	-18.07	2.03
09/01/2015	-18.16	2.00
09/13/2015	-19.17	1.91
09/25/2015	-18.08	2.05
10/07/2015	-17.80	2.03
11/24/2015	-20.97	2.02
12/06/2015	-20.74	2.04
12/18/2015	-20.35	2.12
12/30/2015	-19.74	2.05
02/28/2016	-20.28	2.07

03/11/2016	-19.92	2.04
04/04/2016	-20.90	2.01
04/16/2016	-20.51	1.84

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Τιμές οπισθοσκέδασης και στάθμης νερού για τη λίμνη του Κουρνά**

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ	
	Οπισθοσκέδαση (dB)	Στάθμη νερού (m)
06/21/2015	-19.50	3.76
07/03/2015	-18.85	3.94
07/27/2015	-21.79	4.48
08/08/2015	-21.41	4.63
8/20/2015	-21.56	4.7
09/01/2015	-21.57	4.89
09/13/2015	-20.49	5.02
09/25/2015	-21.50	5.1
10/07/2015	-21.69	5.22
11/24/2015	-21.70	5.02
12/06/2015	-21.46	4.95
12/18/2015	-19.60	5.06
12/30/2015	-21.37	4.74
02/28/2016	-20.95	4.07
03/11/2016	-21.73	4.29
04/04/2016	-22.38	4.7
04/16/2016	-22.91	4.9

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Τιμές μέσης συνάφειας και μέσης τιμής του δείκτη NDVI για τη λίμνη της Αγιάς και τη λίμνη του Κουρνά**

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΓΙΑ		ΚΟΥΡΝΑΣ	
		ΣΥΝΑΦΕΙΑ	NDVI	ΣΥΝΑΦΕΙΑ	NDVI
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	0.255	0.080	0.252	0.030
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.236	-0.030	0.276	-0.025
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	0.230	0.088	0.237	-0.030
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	0.212	0.170	0.255	-0.037
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	0.272	0.140	0.235	-0.012
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.217	-0.036	0.219	-0.030
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	0.285	-0.030	0.243	-0.020
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	0.264	-0.005	0.223	-0.012
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	0.262	0.090	0.250	0.014

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Τιμές της υπολογισμένης από τα συμβολογραφήματα "ξεδιπλωμένης φάσης" και των μεταβολών στάθμης για τη λίμνη της Αγιάς και τη λίμνη του Κουρνά**

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΓΙΑ		ΚΟΥΡΝΑΣ	
		Ξεδιπλωμένη φάση (mean)	Μεταβολή στάθμης νερού (cm)	Ξεδιπλωμένη φάση (mean)	Μεταβολή στάθμης νερού (cm)
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	-1.70	-3	3.08	18
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.43	5	7.81	15
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	4.76	1	-0.92	7
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150913_20150901	4.39	-9	3.16	13
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	3.31	2	1.76	12
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.55	2	0.61	-7
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	-1.38	-7	4.10	-32
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	3.97	-3	3.73	22
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	1.66	-17	4.86	20

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Οι τιμές της "ξεδιπλωμένης" φάσης και της διαφοράς οπισθοσκεδάσης για τη λίμνη της Αγιάς και για τη λίμνη του Κουρνά αντίστοιχα**

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΞΕΔΙΠΛΩΜΕΝΗ ΦΑΣΗ (rad)		Διαφορά οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (dB)	
		ΑΓΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ	ΑΓΙΑ	ΚΟΥΡΝΑΣ
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	-1.70	3.08	1.12	-0.68
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.43		-0.75	
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	4.76	-0.92	-0.05	0.06
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	4.39	3.16	0.91	-1.45
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	3.31	1.76	-0.14	0.18
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.55	0.61	-0.32	-0.21
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	-1.38	4.10	-0.74	1.36
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	3.97	3.73	-0.29	0.92
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	1.66	4.86		



**ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Οι τιμές της κάθετης μετατόπισης που προέκυψαν από τα συμβολογραφήματα και των μεταβολών στάθμης νερού από τους επίγειους σταθμούς για τη λίμνη της Αγίας και τη λίμνη του Κουρνά αντίστοιχα**

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΓΙΑ		ΚΟΥΡΝΑΣ	
		Κάθετη μετατόπιση (cm)	Μεταβολή στάθμης νερού (cm)	Κάθετη μετατόπιση (cm)	Μεταβολή στάθμης νερού (cm)
ΙΟΥΝΙΟΣ	20150703_20150621	0.135	-3	0.952	18
ΙΟΥΛΙΟΣ	20150808_20150727	0.061	5	-0.197	15
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20150808_20150820	-0.426	1	0.071	7
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	20150901_20150913	-0.049	-9	-0.066	13
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20150925_20151007	0.207	2	-0.212	12
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	20151124_20151206	0.222	2	0.044	-7
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	20151218_20151230	-0.526	-7	-0.972	-32
ΜΑΡΤΙΟΣ	20160311_20160228	-0.204	-3	0.594	22
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	20160404_20160416	-0.097	-17	0.669	20