



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ- ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

TRAIN ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ
ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΑΠΟΓΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

A.M RS13412

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

.....

Β. Καραθανάση
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....

Ν. Δουλάμης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Β. Γκίκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Δημήτρη Αγάπογλου, φοιτητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και αφορά τη μείωση της ατμοσφαιρικής φάσης εικόνων ραντάρ μέσω του λογισμικού TRAIN TOOLBOX.

Όλα τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας που αφορούν αυτή τη διπλωματική εργασία ανήκουν στον συγγραφέα. Απαγορεύεται οποιαδήποτε αντιγραφή, αναπαραγωγή, διανομή, δημόσια εκτέλεση ή μετάδοση του περιεχομένου της εργασίας αυτής χωρίς τη ρητή γραπτή άδεια του συγγραφέα.

© 2024 Δημήτρης Αγάπογλου. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

.....

Αγάπογλου Δημήτρης,

Διπλωματούχος Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός – Μηχανικός Γεωπληροφορικής, Ε.Μ.Π



ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Έχει ως στόχο να αναλυθούν και να αξιολογηθούν κάποιες από τις μεθόδους του ελεύθερου λογισμικού TRAIN το οποίο έχει δημιουργηθεί για μείωση του θορύβου σε συμβολογράμματα που έχουν προέλθει από δορυφορικά προϊόντα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR).

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Βασιλεία Καραθανάση για την καθοδήγηση της, το επιστημονικό υπόβαθρο που μου προσέφερε ,το ενδιαφέρον και την υπομονή της καθ' όλη την διάρκεια αυτής της εργασίας. Επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες Πελαγία Κουτσαντώνη και Κλεάνθη Καράμβαση, υποψήφιους διδάκτορες, για την συνεχή βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφεραν είτε σε τεχνικό είτε ακόμα και σε προσωπικό επίπεδο χωρίς τους οποίους η περάτωση της συγκεκριμένης εργασίας θα ήταν αδύνατη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους , φίλους και συγγενείς, οι οποίοι με στήριξαν πίστεψαν σε μένα και έκαναν όλη αυτή την δύσκολη προσπάθεια να ανταμειφθεί και να αποφέρει καρπούς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	6
ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	12
ABSTRACT.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	14
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	14
1.1.RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ.....	14
1.2.1 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ.....	15
1.2.2 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΦΑΣΗ.....	17
1.2.3 ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΦΑΣΗ.....	19
1.3. ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΣΚΕΔΑΣΤΕΣ.....	20
1.4 ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ.....	21
1.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ.....	23
1.5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	24
1.5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	27
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	27
2.1 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	27
2.2 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	30
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ,ΔΕΔΟΜΕΝΑ,ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ.....	30
3.1.1 ΝΗΣΟΣ ΡΟΔΟΥ.....	30
3.1.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	31
3.1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΛΥΨΕΙΣ ΓΗΣ - ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	32
3.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	35
3.2.2 ΕΙΚΟΝΕΣ.....	36
3.3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ.....	38
3.3.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ StaMPS.....	39
3.3.2 TRAIN TOOLBOX.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	43
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	43
4.1. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ TRAIN	43
4.2. ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	44
4.3. ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	45
4.4. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ POWER-LAW.....	46
4.5. GENERIC ATMOSPHERIC CORRECTION ONLINE SERVICE (GACOS).....	50
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ (WEATHER MODEL METHODS)	50
4.6. ERA 5 (ECMWF) GLOBAL REANALYSIS	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	55
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ	55
5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	55
5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	59
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ (PHASE BASED METHODS)	59
5.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	64
5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ POWER-LAW.....	65
5.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ POWER-LAW	71
5.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GACOS	72
5.4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GACOS	77
5.5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ERA5	78
5.5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ERA5.....	83
5.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	89
ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	89
6.1. ΜΙΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ.....	89
6.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	108
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	108
7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	108
7.2. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΕΠΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Βασικές αρχές λειτουργίας SAR (DLR SAR Course 2010)	15
Εικόνα 2: Γεωμετρία λήψης επαναληπτικής συμβολομετρίας (Xiao-li Ding 2008).....	16
Εικόνα 3 : Επαναληπτική και μίας λήψης συμβολομετρία (Σημειώσεις μαθήματος Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση-Συμβολομετρία).....	16
Εικόνα 4: Κατά μήκος κατά πλάτος συμβολομετρία (Σημειώσεις μαθήματος Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση-Συμβολομετρία).....	16
Εικόνα 5: Σήμα σταθερών σκεδαστών (A. Hooper 2016).....	21
Εικόνα 6: Απεικόνιση γεωμετρίας παρατήρησης συμβολομετρικού ζευγαριού(F. Xue et al., 2020).	22
Εικόνα 7 : Περιοχή Μελέτης Νησί της Ρόδου.....	30
Εικόνα 8: Μετεωρολογικοί Σταθμοί Νησί Ρόδο	31
Εικόνα 9: Υψομετρική Μορφολογία.....	32
Εικόνα 10: Χρήσεις Γης Corine Land Cover 2018 (Copernicus)	33
Εικόνα 11: Χάρτης απεικόνισης της ευρύτερης περιοχής της ανατολικής Μεσογείου με το γεωδυναμικό καθεστώς και την ταχύτητα κίνησης (Στεφάτος 2005).	33
Εικόνα 12: Χάρτης επικέντρων επιφανειακών σεισμών που έγιναν στο Νότιο Αιγαίο (Μ.Σ.Καμπούτση,2022).....	34
Εικόνα 13: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 55	57
Εικόνα 14: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 97	57
Εικόνα 15: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 103	57
Εικόνα 16: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 76	57
Εικόνα 17: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 79	57
Εικόνα 18: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 111	57
Εικόνα 19: Συμβολόγραμμα 8	60
Εικόνα 20: Συμβολόγραμμα 34	60
Εικόνα 21: Συμβολόγραμμα 55	60
Εικόνα 22: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση Linear)	60
Εικόνα 23: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση Linear)	60
Εικόνα 24: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55(Διόρθωση Linear)	60
Εικόνα 25: Συμβολόγραμμα 97	61
Εικόνα 26: Συμβολόγραμμα 103	61
Εικόνα 27: Συμβολόγραμμα 115	61
Εικόνα 28: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση Linear)	61
Εικόνα 29: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση Linear)	61
Εικόνα 30: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση Linear)	61
Εικόνα 31: Συμβολόγραμμα 18	62
Εικόνα 32: Συμβολόγραμμα 58	62
Εικόνα 33: Συμβολόγραμμα 76	62
Εικόνα 34: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση Linear)	62
Εικόνα 35: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση Linear)	62
Εικόνα 36: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση Linear)	62
Εικόνα 37: Συμβολόγραμμα 79	63
Εικόνα 38: Συμβολόγραμμα 105	63
Εικόνα 39: Συμβολόγραμμα 111	63
Εικόνα 40: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση Linear)	63

Εικόνα 41: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση Linear)	63
Εικόνα 42: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση Linear)	63
Εικόνα 43: Συμβολόγραμμα 8	67
Εικόνα 44: Συμβολόγραμμα 34	67
Εικόνα 45: Συμβολόγραμμα 55	67
Εικόνα 46: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση Power-law)	67
Εικόνα 47: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση Power-law)	67
Εικόνα 48: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση Power-law)	67
Εικόνα 49: Συμβολόγραμμα 97	68
Εικόνα 50: Συμβολόγραμμα 103	68
Εικόνα 51: Συμβολόγραμμα 115	68
Εικόνα 52: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση Power-law)	68
Εικόνα 53: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση Power-law)	68
Εικόνα 54: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση Power-law)	68
Εικόνα 55: Συμβολόγραμμα 18	69
Εικόνα 56: Συμβολόγραμμα 58	69
Εικόνα 57: Συμβολόγραμμα 76	69
Εικόνα 58: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση Power-law)	69
Εικόνα 59: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση Power-law)	69
Εικόνα 60: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση Power-law)	69
Εικόνα 61: Συμβολόγραμμα 79	70
Εικόνα 62: Συμβολόγραμμα 105	70
Εικόνα 63: Συμβολόγραμμα 111	70
Εικόνα 64: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση Power-law)	70
Εικόνα 65: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση Power-law)	70
Εικόνα 66: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση Power-law)	70
Εικόνα 67: Συμβολόγραμμα 8	73
Εικόνα 68: Συμβολόγραμμα 34	73
Εικόνα 69: Συμβολόγραμμα 55	73
Εικόνα 70: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση GACOS)	74
Εικόνα 71: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση GACOS)	74
Εικόνα 72: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση GACOS)	74
Εικόνα 73: Συμβολόγραμμα 97	74
Εικόνα 74: Συμβολόγραμμα 103	74
Εικόνα 75: Συμβολόγραμμα 115	74
Εικόνα 76: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση GACOS)	75
Εικόνα 77: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση GACOS)	75
Εικόνα 78: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση GACOS)	75
Εικόνα 79: Συμβολόγραμμα 18	75
Εικόνα 80: Συμβολόγραμμα 58	75
Εικόνα 81: Συμβολόγραμμα 76	75
Εικόνα 82: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση GACOS)	76
Εικόνα 83: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση GACOS)	76
Εικόνα 84: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση GACOS)	76
Εικόνα 85: Συμβολόγραμμα 79	76
Εικόνα 86: Συμβολόγραμμα 105	76
Εικόνα 87: Συμβολόγραμμα 111	76
Εικόνα 88: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση GACOS)	77
Εικόνα 89: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση GACOS)	77
Εικόνα 90: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση GACOS)	77
Εικόνα 91: Συμβολόγραμμα 8	79

Εικόνα 92: Συμβολόγραμμα 34	79
Εικόνα 93: Συμβολόγραμμα 55	79
Εικόνα 94: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση ERA5).....	80
Εικόνα 95: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση ERA5).....	80
Εικόνα 96: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση ERA5).....	80
Εικόνα 97: Συμβολόγραμμα 97	80
Εικόνα 98: Συμβολόγραμμα 103	80
Εικόνα 99: Συμβολόγραμμα 115	80
Εικόνα 100: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97(Διόρθωση ERA5).....	81
Εικόνα 101: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση ERA5).....	81
Εικόνα 102: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115(Διόρθωση ERA5).....	81
Εικόνα 103: Συμβολόγραμμα 18	81
Εικόνα 104: Συμβολόγραμμα 58	81
Εικόνα 105: Συμβολόγραμμα 76	81
Εικόνα 106: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση ERA5).....	82
Εικόνα 107: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση ERA5).....	82
Εικόνα 108: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση ERA5).....	82
Εικόνα 109: Συμβολόγραμμα 79	82
Εικόνα 110: Συμβολόγραμμα 105	82
Εικόνα 111: Συμβολόγραμμα 111	82
Εικόνα 112: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση ERA5).....	83
Εικόνα 113: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση ERA5).....	83
Εικόνα 114: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111(Διόρθωση ERA5).....	83
Εικόνα 115: Χάρτης μικρομετακινήσεων (mm/έτος) νησί της Ρόδου (EGMS).....	89
Εικόνα 116: Πολυγωνικά σημεία, Βόρειο τμήμα (Παλαιά και Νέα Πόλη Ρόδου)	90
Εικόνα 117: Πολυγωνικά σημεία, Κεντρικό - Δυτικό τμήμα (Βουνό του Αττάρυβου)	90
Εικόνα 118: Πολυγωνικά σημεία Νότιο τμήμα (Περιοχές Κατταβιά, Μαχαίρια).....	90
Εικόνα 119: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος ERA5).....	93
Εικόνα 120: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος GACOS).....	93
Εικόνα 121: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος Power-law)	93
Εικόνα 122: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Γραμμική Μέθοδος) .	93
Εικόνα 123: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Βόρειο τμήμα (ακτίνα 100m).....	94
Εικόνα 124: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Βουνό Αττάρυβου (ακτίνα 100m).....	94
Εικόνα 125: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Νότιο τμήμα (ακτίνα 100m)	94

ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Γεωμετρία λήψεων SAR σε ένα επίπεδο κάθετο σε δύο τροχιές του δορυφόρου S1 και S2.....	17
Σχήμα 2: Γεωμετρία λήψεων SAR σε ένα επίπεδο κάθετο σε δύο τροχιές του δορυφόρου S1 και S2.....	17
Σχήμα 3: Οι σημαντικότεροι δορυφόροι για ανάλυση χρονοσειρών συμβολομετρικών δεδομένων SAR (F.Xue et al., 2020).....	23
Σχήμα 4: Ποσοστά υγρασίας μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk)	37
Σχήμα 5: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk).....	37
Σχήμα 6: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk).....	37
Σχήμα 7: Διάγραμμα Ροής Λογισμικού StaMPS	40
Σχήμα 8: Στροφή δεδομένων(συμβολογραμμάτων) προς την πορεία του δορυφόρου (Πηγή:D.Bekaert 2015c)	48
Σχήμα 9: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 500m-1km	49
Σχήμα 10: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 1km-2km	49
Σχήμα 11: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 2km-4km	49
Σχήμα 12: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 4km-8km	49
Σχήμα 13: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 8km-16km	50
Σχήμα 14: Τυπική Απόκλιση Αποκατεστημένης Φάσης	55
Σχήμα 15: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων της αποκατεστημένης και διορθωμένης φάσης με την Γραμμική μέθοδο.....	59
Σχήμα 16: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με την μέθοδο Power-law.	66
Σχήμα 17: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με τη μέθοδο GACOS.....	72
Σχήμα 18: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με την μέθοδο ERA5	79
Σχήμα 19: Συγκεντρωτικό σχήμα τυπικών αποκλίσεων μεθόδων αξιολόγησης πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.....	87
Σχήμα 20: Μέσος όρος τυπικών αποκλίσεων ατμοσφαιρικών διορθώσεων.	88
Σχήμα 21: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Βόρειο τμήμα), περιόδου 2018/01//06 - 2022/09/12 (ΠΗΓΗ EGMS)	90
Σχήμα 22: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Κέντρο-Δυτικό τμήμα),περιόδου 2018/01/06 - 2022/09/06 (ΠΗΓΗ EGMS).....	91
Σχήμα 23: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Νότιο τμήμα), περιόδου 2018/01/06 - 2022/09/06 (ΠΗΓΗ EGMS).....	91
Σχήμα 24: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Βόρειο τμήμα)	94
Σχήμα 25: Χρονοσειρά μικρομετακίνησης επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Βουνό Αττάρυβου)	94
Σχήμα 26: Χρονοσειρά μικρομετακίνησης επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Νότιο τμήμα).....	94
Σχήμα 27: Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Βόρειο τμήμα)	94
Σχήμα 28 :Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Βουνό Αττάρυβου) 94	
Σχήμα 29: Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Νότιο τμήμα)	94
Σχήμα 30:Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46)	96
Σχήμα 31: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46).....	96
Σχήμα 32: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46).....	96

Σχήμα 33: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55).....	97
Σχήμα 34: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55).....	97
Σχήμα 35: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)	97
Σχήμα 36: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58).....	98
Σχήμα 37: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58).....	98
Σχήμα 38: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)	98
Σχήμα 39: Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα τον μήνα Δεκέμβριο (2017) για το νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58).....	98
Σχήμα 40: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76)	99
Σχήμα 41: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76).....	99
Σχήμα 42: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76).....	99
Σχήμα 43: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79).....	100
Σχήμα 44: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79).....	100
Σχήμα 45: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79)	100
Σχήμα 46: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84).....	101
Σχήμα 47: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84).....	101
Σχήμα 48: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84)	101
Σχήμα 49: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97)	102
Σχήμα 50: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97).....	102
Σχήμα 51: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97).....	102
Σχήμα 52: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111).....	103
Σχήμα 53: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111).....	103
Σχήμα 54: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111)	103
Σχήμα 55: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115).....	104
Σχήμα 56: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115).....	104
Σχήμα 57: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115).....	104

Σχήμα 58: : Γράφημα τυπικών αποκλίσεων και διαφοράς ατμοσφαιρικής πίεσης (Master - Slave) εικόνας για ένα σύνολο 25 συμβολογραμμάτων. 105

ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Αναλυτικός Πίνακας Μετεωρολογικού Σταθμού ΕΜΠΩΝΑ (Meteo.gr)	32
Πίνακας 2: Τεχνικές Διόρθωσης Ατμοσφαιρικής Φάσης με την εργαλειοθήκη TRAIN	43
Πίνακας 3: Πρόγραμμα ανάκτησης ατμοσφαιρικών δεδομένων της ERA5 με την γλώσσα Python.....	53
Πίνακας 4: Ημερομηνίες και τυπικές αποκλίσεις συμβολογραμμάτων αξιολόγησης	56
Πίνακας 5: Πίνακας τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης συμβολογραμμάτων	58
Πίνακας 6: Μηνιαία απόκλιση υετού για τον μήνα Δεκέμβριο 2017 (Ε.Μ.Υ).....	65
Πίνακας 7: Συγκεντρικός συγκριτικός πίνακας ατμοσφαιρικών διορθώσεων συμβολογραμμάτων αξιολόγησης 79 και 103 (Υψηλότερη-Χαμηλότερη διασπορά τιμών) πριν και μετά την εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης που χρησιμοποιήθηκαν	87
Πίνακας 8: Συμπερασματικός πίνακας ατμοσφαιρικών διορθώσεων.	88
Πίνακας 9: Συγκεντρικός πίνακας ατμοσφαιρικών δεδομένων Master εικόνας (17/11/2019)και 9 άλλων εικόνων που δημιουργούν τα συμβολογράμματα 46, 55, 58, 76, 79, 84, 97, 111, 115.	105

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάκτηση διορθωμένης φάσης από εικόνες Synthetic Aperture Radar (SAR) με χρήση εξειδικευμένων τροποσφαιρικών μεθόδων διόρθωσης. Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) είναι μια προηγμένη τεχνολογία απεικόνισης για να καταγράφει υψηλής ανάλυσης εικόνες της επιφάνειας της Γης και είναι εγκατεστημένο σε πολλούς δορυφόρους οι οποίοι πλέον μας παρέχουν συχνές λήψεις. Ωστόσο, οι εικόνες SAR επηρεάζονται από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις της ατμόσφαιρας, που παρεμποδίζουν την ακριβή ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιήσαμε το ελεύθερο λογισμικό TRAIN Toolbox το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Leeds University από τον Bekaert.D.P.S και παρέχει εργαλεία και αλγορίθμους για την επεξεργασία εικόνων SAR. Συγκεκριμένα, εφαρμόσαμε τις τέσσερις μεθόδους Linear, Power-law, ERA5 και GACOSs για την τροποσφαιρική διόρθωση των εικόνων SAR. Η γραμμική μέθοδος εφαρμόζει μια γραμμική διόρθωση μεταξύ τοπογραφίας και τροποσφαιρικής φάσης, η Power-law χρησιμοποιεί έναν δυναμικό νόμο για την διόρθωση της φάσης, η ERA5 βασίζεται στη χρήση δεδομένων από το μοντέλο κλιματικών δεδομένων ERA5, ενώ η GACOS χρησιμοποιεί τεχνικές αριθμητικών μοντέλων καιρού για την διόρθωση της φάσης.

Μέσω της εφαρμογής αυτών των μεθόδων σε ένα σύνολο 116 εικόνων SAR οι οποίες είχαν αναφορά το νησί της Ρόδου και είχαν επεξεργαστεί ήδη με το λογισμικό StaMPS για την παραγωγή συμβολογραμμάτων, την αποκατάσταση της φάσης και την εύρεση σταθερών σκεδαστών, καταφέραμε να διορθώσουμε την καθυστέρηση του σήματος λόγω ατμόσφαιρας και να ανακτήσουμε την πραγματική φάση του σήματος σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε, η Ρόδος, παρουσιάζει ενδιαφέρον για μικρομετακινήσεις του φλοιού οι οποίες οφείλονται στους συχνούς σεισμούς που παρατηρούνται διαχρονικά στο τμήμα του Νότιου Αιγαίου πελάγους λόγω τεκτονικής δραστηριότητας.

Οι διορθωμένες φάσεις από την επίδραση της ατμόσφαιρας μπορούν να επιτρέψουν ακριβέστερη ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων SAR, καθιστώντας δυνατή την εξαγωγή αξιόπιστων πληροφοριών για εφαρμογές περιβαλλοντικής μελέτης, γεωεπιστημών και άλλων επιστημονικών πεδίων.

Επιπλέον, η εργασία περιγράφει αναλυτικά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνοντας την επεξήγηση των αλγορίθμων, των μέτρων αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν ενώ επισημαίνονται και σφάλματα που προέκυψαν κατά την διαδικασία. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και συζητούνται οι πιθανοί περιορισμοί και προοπτικές για μελλοντικές βελτιώσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στον τομέα της ανάκτησης διορθωμένης φάσης από εικόνες SAR και ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτόν.

ABSTRACT

Title: Atmospheric Phase Correction in Synthetic Aperture Radar (SAR) Images Using Specialized Methods: A Case Study in the Region of Rhodes Island

This dissertation aims to retrieve the corrected phase from Synthetic Aperture Radar (SAR) images using specialized tropospheric correction methods. SAR is an advanced imaging technology that employs synthetic aperture radar to capture high-resolution images of the Earth's surface, deployed on numerous satellites providing frequent acquisitions. However, SAR images are susceptible to unwanted atmospheric effects, hindering accurate analysis and interpretation of the data.

To address this issue, we utilized the open-source software, TRAIN Toolbox, developed at Leeds University by Bekaert, D.P.S, providing tools and algorithms for SAR image processing. Specifically, we applied four methods—Linear, Power-law, ERA5, and GACOS—for tropospheric correction of SAR images. The linear method implements a linear correction between topography and tropospheric phase, Power-law employs a power-law function for restoration, ERA5 utilizes climate data from the ERA5 model, and GACOS employs numerical weather modeling techniques for phase correction.

Applying these methods to a set of 116 SAR images referencing the island of Rhodes, which had already undergone phase restoration and persistent scatterer identification using StaMPS software, we successfully mitigated atmospheric distortion and recovered the true signal phase to a satisfactory degree.

The study area is found in the South Aegean region, a region that is of interest due to micro displacements in the crust attributed to frequent seismic activity. Corrected phases due to atmospheric effects enable more accurate analysis and interpretation of SAR data, facilitating the extraction of reliable information for environmental studies, geosciences, and other scientific fields.

Additionally, this work provides a detailed description of the methodology, including algorithm explanations and the evaluation metrics used. The analysis results are presented, and potential limitations and prospects for future improvements are discussed.

This dissertation contributes to the field of corrected phase retrieval from SAR images, paving the way for further research and development in this area.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1. RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή αλλιώς SAR (Synthetic Aperture Radar) τα τελευταία χρόνια έχουν αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον ως προς τα προϊόντα που μπορούν προκύψουν από αυτά όπως η εξαγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ) η αλλιώς DEM καθώς και η παρακολούθηση μικρομετακινήσεων της γήινης επιφάνειας.

Τα συγκεκριμένα συστήματα αποκαλούνται ενεργά μονοστατικά επειδή χρησιμοποιούν την ίδια κεραία για την εκπομπή και την λήψη των παλμών του RADAR. Τα RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) συνδυάζουν μια σειρά λήψεων από μια μικρή κεραία ώστε να προσομοιάσουν την λήψη μιας μεγάλης συνθετικής κεραίας.

Επίσης μπορούν να απεικονίσουν μια εικόνα οποιαδήποτε στιγμή της μέρας (ακόμα και την νύχτα) καθώς και κάτω από συνθήκες που εμποδίζουν την θέαση όπως ομίχλη, συννεφιά, αιθαλομίχλη, στις οποίες ορατά και υπέρυθρα όργανα αδυνατούν να λειτουργήσουν. Ως εκ τούτου τα συστήματα SAR έχουν υψηλή διακριτική ικανότητα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες.

Η ιδιότητα των RADAR να είναι “παντός καιρού” και ανεξάρτητα της νεφοκάλυψης (η οποία δημιουργεί περιορισμούς στην περίπτωση των οπτικών δεκτών) οφείλεται στο μήκος κύματος τους λόγω του μεγέθους του έχει την ικανότητα να διαπερνάει την ατμόσφαιρά παρουσιάζοντας ελάχιστη εξασθένηση.

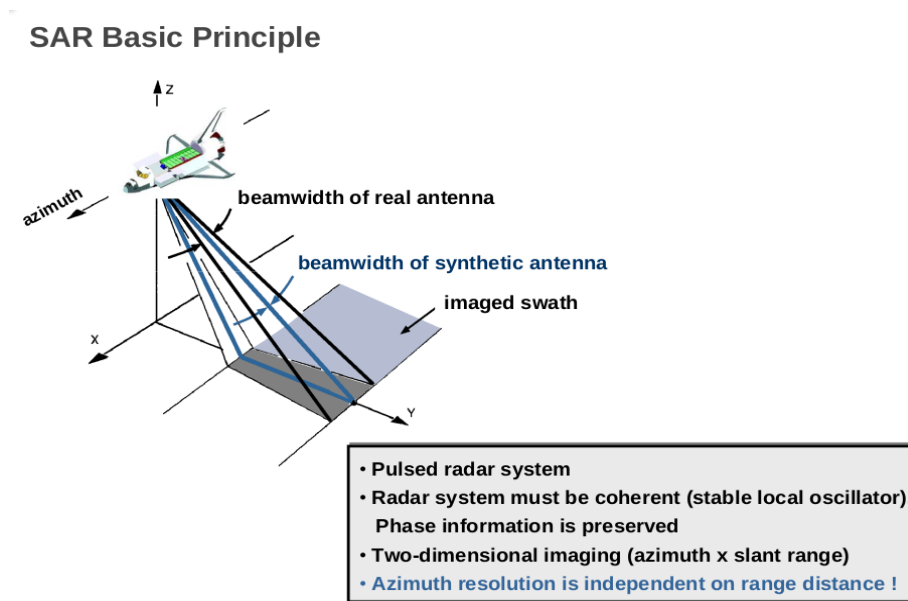
Επιπλέον, καιρικά φαινόμενα όπως η ομίχλη και μικρή βροχόπτωση δεν επηρεάζουν σχεδόν καθόλου το σήμα, ενώ κατά την καταιγίδα παρατηρείται απόσβεση της μικροκυματικής ακτινοβολία για τα μικρότερα μήκη κύματος ($\lambda < 3$ cm) (B. Καραθανάση, 2014).

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχουν τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτά των οπτικών δεκτών :

- Ικανότητες συνεχούς απεικόνισης ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες και φωτισμό (ήλιο).
- Προηγμένες επιδόσεις στην ανίχνευση μεταβολών, λόγω της σταθερής γεωμετρίας των εικόνων και δική τους πηγή ακτινοβολίας.
- Συμπληρωματικά χαρακτηριστικά με τους οπτικούς δέκτες

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar - SAR) χρησιμοποιούν την τεχνική της ανίχνευσης της φάσης του σήματος για τη δημιουργία εικόνων συμβολογραμμάτων (Interferograms). Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην αρχή της αποστάσεως μεταξύ αντικειμένου και ραντάρ κεραίας και την αξιοποίηση της φάσης των επιστρεφόμενων ραντάρ σημάτων για τον υπολογισμό αυτής της απόστασης.

Τα SAR αξιοποιούν το γεγονός ότι καθώς ο δορυφόρος ταξιδεύει πάνω από μία περιοχή εκπέμπει σήμα πολλές φορές με αποτέλεσμα να βλέπει το ίδιο αντικείμενο πολλαπλές φορές. Όλες οι ξεχωριστές λήψεις που πραγματοποιούνται με την μικρή κεραία συνδυάζονται μαθηματικά, αξιοποιώντας το γεγονός ότι η συχνότητα των σημάτων τα οποία λαμβάνονται μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της σχετικής θέσης του RADAR ως προς τον στόχο (φαινόμενο Doppler), και συνθέτουν μια συνθετική εικόνα που καταγράφεται με μία πολύ μεγαλύτερη συνθετική κεραία. Συγκεκριμένα, η συνθετική κεραία έχει μήκος αντίστοιχο με την απόσταση από το πρώτο σημείο λήψης ενός αντικειμένου μέχρι το τελευταίο σημείο λήψης (Rocca et al., 2000).



Εικόνα 1: Βασικές αρχές λειτουργίας SAR (DLR SAR Course 2010)

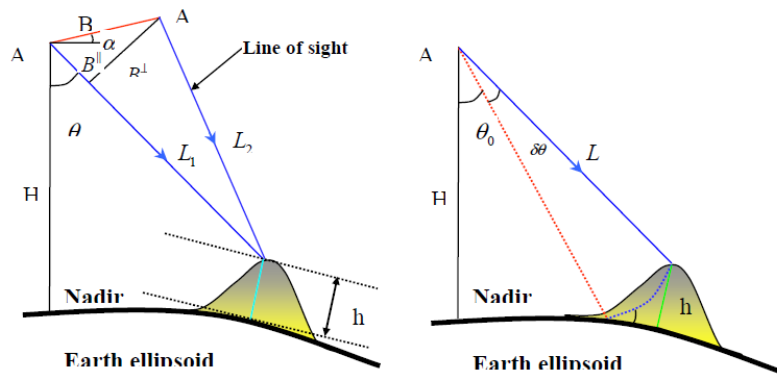
1.2.1 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

Συμβολομετρία (interferometry) ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία γίνεται ο υπολογισμός του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Ψ.Μ.Ε ή DEM) μια περιοχής με την χρήση SAR απεικονίσεων. Η συμβολομετρία SAR (SAR Interferometry (InSAR)) αναφέρεται στη διαδικασία συμβολής των σημάτων από δύο SAR απεικονίσεις για την παραγωγή ενός διαγράμματος κροσσών συμβολής, που μπορεί να αξιοποιηθεί για την παρακολούθηση μεταβολών στην γήινη επιφάνεια (Massonnet & Rabaute et al., 1993).

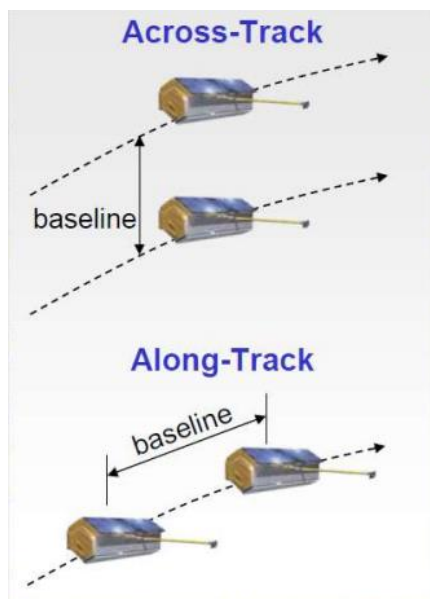
Η εικόνα κροσσών συμβολής αποτελεί τη φάση του συμβολογράμματος και είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της μιας μιγαδικής SAR απεικόνισης με την συζυγή μιγαδική μιας άλλης, οι οποίες έχουν μια μικρή διαφορά στην γωνία όρασης (συμβολομετρικό ζεύγος) (B. Καραθανάση, 2014).

Τα κύρια είδη συμβολομετρίας είναι τα παρακάτω:

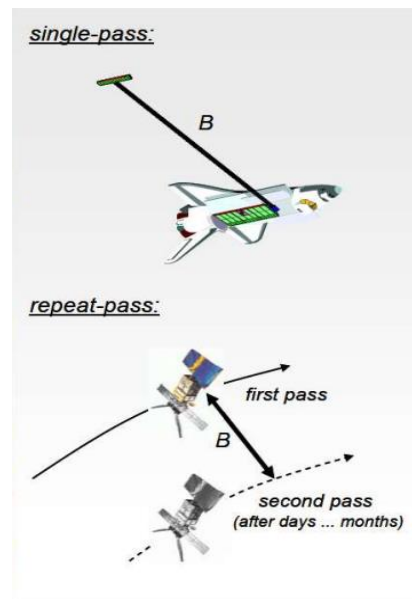
- Μίας τροχιάς συμβολομετρία (Single pass) : Ένα πέρασμα του δορυφόρου με μία ή και δύο κεραίες λήψης. Χαρακτηριστικά της είναι η μικρή γραμμή βάσης (small baseline) και η δυνατότητα παραγωγής real-time συμβολογράμματος.
- Επαναληπτική συμβολομετρία (Repeat-pass InSAR) : Λήψη δύο SAR απεικονίσεων που έχουν χρονική και χωρική απόκλιση μεταξύ τους. (διαφορετικές τροχιές λήψης του δορυφόρου). Οι τροχιές πρέπει να είναι παράλληλες και η διαφοροποίηση της θέσης του δορυφόρου είναι κατά πλάτος (across-track).
- Διαφορική συμβολομετρία (Differential InSAR ή DInSAR) :Στηρίζεται σε διαστημικά δεδομένα SAR.Χρησιμοποιούνται περισσότερες από δύο SAR απεικονίσεις ή εναλλακτικά δύο SAR απεικονίσεις και ένα βοηθητικό Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ ή DEM).
- Κατά μήκος της τροχιάς συμβολομετρία (Along-Track InSAR). Δυο κεραίες τοποθετούνται κατά μήκος της πορείας πτήσης (κατά μήκος της ατράκτου). Η μία κεραία λειτουργεί ως πομπός και η άλλη ως δέκτης. Συχνή εφαρμογή από το γερμανικό ινστιτούτο DLR για συμβολομετρία μικρής έκτασης.



Εικόνα 2: Γεωμετρία λήψης επαναληπτικής συμβολομετρίας (Xiao-li Ding 2008)



Εικόνα 4: Κατά μήκος κατά πλάτος συμβολομετρία (Σημειώσεις μαθήματος Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση-Συμβολομετρία)



Εικόνα 3 : Επαναληπτική και μίας λήψης συμβολομετρία (Σημειώσεις μαθήματος Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση-Συμβολομετρία)

1.2.2 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΦΑΣΗ

Το σήμα που καταγράφεται από τον δέκτη στα συστήματα SAR περιέχει την πληροφορία της έντασης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος (Amplitude) από όπου προκύπτουν και οι τιμές της φάσης των εικόνων. Η φάση κάθε εικονοστοιχείου (Pixel) μιας SAR απεικόνισης αποτελείται από δύο μέρη:

- Το πρώτο μέρος της φάσης είναι μια συνάρτηση της απόστασης δέκτη – στόχου ($\psi(r)$).
- Το δεύτερο μέρος σχετίζεται με την τυχαία μεταβολή της φάσης που προκαλείται από τον τρόπο με το οποίο συνδυάζονται όλες οι σκεδάσεις των σημάτων στο εικονοστοιχείο (ψ_{scatt}).

Συμπεραίνουμε ότι το σήμα μιας μοναδικής SAR απεικόνισης δεν έχει κάποια πρακτική χρήση από μόνο του, όμως μπορεί να συνδυαστεί με το σήμα μιας δεύτερης SAR απεικόνισης, με την οποία υπάρχει μια μικρή διαφορά στην γωνία όρασης, για την αφαίρεση του δεύτερου όρου (ψ_{scatt}).

Αν λοιπόν $\psi_{scatt,1} = \psi_{scatt,2}$ τότε έχουμε :

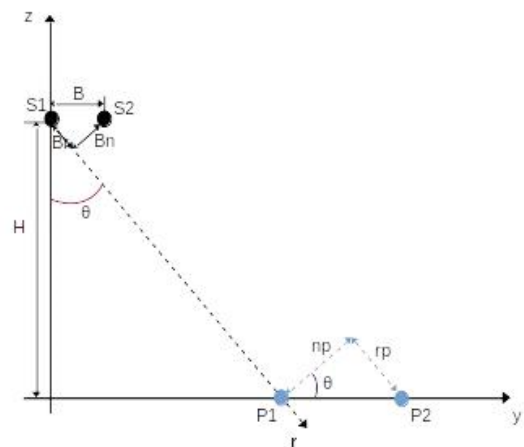
$$\varphi = \psi_1 - \psi_2 = \psi_1(r) + \psi_{scatt,1}(r) - \psi_2(r + \Delta r) - \psi_{scatt,2} = \varphi(\Delta r) \quad (1)$$

Άρα, σε δύο μιγαδικές SAR εικόνες που απεικονίζουν την ίδια περιοχή με ελάχιστα διαφορετική γωνία λήψης, η διαφορά φάσης (φ) μεταξύ των αντίστοιχων μιγαδικών εικονοστοιχείων είναι ανάλογη με την διαφορά αποστάσεων δεκτών-στόχου (Δr) όπως δείχνει το Σχήμα 1.

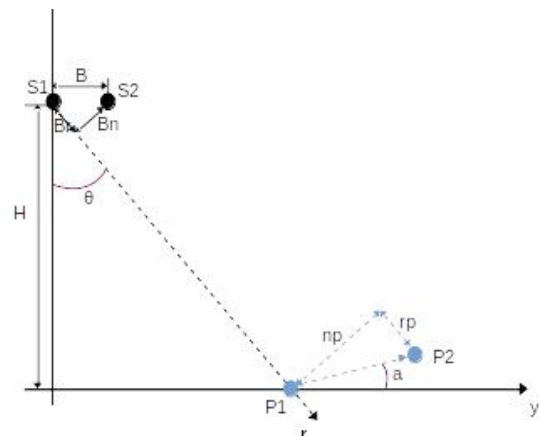
$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2)$$

Όπου λ το μήκος κύματος.

Λόγω του ότι η βάσης λήψης (B) μεταξύ των δεκτών είναι σημαντικά μικρότερη από την απόσταση δέκτη



Σχήμα 1: Γεωμετρία λήψεων SAR σε ένα επίπεδο κάθετο σε δύο τροχιές του δορυφόρου S1 και S2



17

Σχήμα 2: Γεωμετρία λήψεων SAR σε ένα επίπεδο κάθετο σε δύο τροχιές του δορυφόρου S1 και S2

– στόχου η διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων δηλαδή ησυμβολομετρική φάση δίνεται από την εξίσωση :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r) = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r} \quad (3)$$

Στην περίπτωση σημείων που έχουμε δύο αποκλίσεις δηλαδή οριζοντιογραφική και υψομετρική (Σχήμα 2) η πλευρική απόσταση και η διαφορά φάσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$n_p = n_{flat} + n_{dem} = \frac{\Delta r}{\tan\alpha} + \frac{\Delta r}{\sin\alpha} \quad (4)$$

Επομένως :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{dem} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \left(\frac{\Delta r}{\tan\alpha} + \frac{\Delta h}{\sin\alpha} \right) \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_{dem} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \frac{\Delta h}{\sin\alpha} \quad \text{και} \quad \Delta\varphi_{flat} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \frac{\Delta r}{\tan\alpha} \quad (6)$$

Επομένως, η εικόνα της συμβολομετρικής φάσης αναπαριστά έναν χάρτη σχετικών υψομετρικών διαφορών αν από την συμβολομετρική φάση αφαιρεθεί η φάση της επίπεδης γης. Όμως η συμβολομετρική φάση περιέχει και άλλους όρους εκτός από αυτούς της επίπεδης γης και της τοπογραφίας, οι οποίοι συνοψίζονται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi^{flat} + \Delta\varphi^{dem} + \Delta\varphi^{def} + \Delta\varphi^{aps} + \Delta\varphi^{noise}. \quad (7)$$

$\Delta\varphi^{flat}$: Όρος της επίπεδης γης.

$\Delta\varphi^{dem}$: Όρος της τοπογραφίας, σχετίζεται με την υψομετρία της περιοχής.

$\Delta\varphi^{def}$: Όρος που σχετίζεται με παραμορφώσεις του εδάφους.

$\Delta\varphi^{aps}$: Όρος που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική καθυστέρηση.

$\Delta\varphi^{noise}$: Όρος που σχετίζεται με τον θόρυβο του συστήματος.

1.2.3 ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΦΑΣΗ

Η αποκατεστημένη φάση ενός συμβολογράμματος αφορά τις αλλαγές της φάσης του σήματος SAR που συνδέεται με τις μεταβολές στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάρκεια του χρόνου.

Το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης ενός συμβολογράμματος (διάγραμμα κροσσών συμβολής) αποτελεί ένα από τα πιο περίπλοκα, απαιτητικά και δύσκολα βήματα κάθε συμβολομετρικής διαδικασίας της οποίας η επιτυχία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η παρατήρηση του κάθε συμβολομετρικού ζευγαριού είναι η συμβολομετρική φάση που είναι “τυλιγμένη” (wrapped) δηλαδή έχει πεδίο τιμών από $-\pi$ μέχρι π .

Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι λόγω της αναλογίας του μεταβαλλόμενου ύψους και της μετρημένης συμβολομετρικής φάσης δεν γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό ακέραιων κύκλων οι οποίοι έχουν χαθεί κατά την αποκατάσταση, αφού το καταγραφόμενο σήμα επιστροφής ,επιστρέφει τιμές στο διάστημα $[0-2\pi)$. Όταν η τιμή φτάσει τα 2π τότε μηδενίζεται χωρίς να υπάρχει ένδειξη για το πόσοι ακέραιοι κύκλοι προηγήθηκαν. Η συμβολομετρική φάση έχει την ίδια ιδιότητα καθώς προκύπτει από την αφαίρεση του σήματος των φάσεων δύο εικόνων SAR στο διάστημα $[0-2\pi)$

Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται και στο διάγραμμα των κροσσών συμβολής καθώς οι καμπύλες του είναι ισοφασικές $(-\pi,0,\pi)$ όπως αναφέραμε και άνωθεν. Το γεγονός ότι η πληροφορία των φάσεων είναι μέτρο του 2π προσθέτει το πρόβλημα της αβεβαιότητας στον υπολογισμό των πραγματικών αριθμών ακεραίων κύκλων που χρειάζεται να προστεθούν σε όλες τις μετρημένες τιμές της φάσης έτσι ώστε να υπολογιστεί η πραγματική πλάγια απόσταση ανάμεσα στο σύστημα RADAR και τον στόχο.

Η πυκνότητα των κροσσών εξαρτάται από την αλλαγή της τοπογραφίας, τη γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού, το μήκος κύματος των SAR συστήματος. Η διακριτότητα των κροσσών συμβολής σχετίζεται με την ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης.

Η διαδικασία επίλυσης αυτού του προβλήματος αποκαλείται αποκατάσταση ή ξετύλιγμα της φάσης (Phase unwrapping). Η αποκατάσταση λοιπόν της φάσης έχει ως σκοπό την απόδοση των πραγματικών τιμών της .

Η σχέση που ενώνει τις αποκατεστημένες τιμές φάσεις με τις τιμές των φάσεων που προκύπτουν από τα διαγράμματα των κροσσών συμβολής για κάθε εικονοστοιχείο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varphi_{Un} = \Delta\varphi_{\rho\nu} + \nu 2\pi \quad (8)$$

Όπου : $\varphi_{\rho\nu}$ η αρχική τιμή της φάσης , φ_{Un} η αποκατεστημένη τιμή (unwrapped) και ν ο ακέραιος αριθμός κύκλων που καλείται ασάφεια φάσης (Phase Ambiguity).

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι για την εξαγωγή της εδαφικής παραμόρφωσης είναι απαραίτητη η αφαίρεση των όρων της επίπεδης γης και τοπογραφίας από την συμβολομετρική φάση. Η ατμοσφαιρική επίδραση συνήθως υπολογίζεται από τριτογενείς παρατηρήσεις ή μοντελοποιείται και αφαιρείται όπως είναι και το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας.

Στην ανάλυση χρονοσειρών συμβολομετρικών δεδομένων, πολλά συμβολογράμματα που αναφέρονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα επεξεργάζονται συγχρόνως. Το κάθε

συμβολόγραμμα αντιπροσωπεύει την πληροφορία στο χώρο (2D-Azimuth/Range). Η επεξεργασία πολλών συμβολομετρικών δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή πληροφορίας εδαφικών παραμορφώσεων στο χωρόχρονο (3D-Azimuth/Range/Time),(B.Καραθανάση 2021).

1.3. ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΣΚΕΔΑΣΤΕΣ

Τα είδη των σημείων μπορούν να διακριθούν κυρίως σε σταθερούς σκεδαστές (Permanent Scatterers) και κατανεμημένους σκεδαστές (Distributed Scatterers). Οι διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις μπορεί να εξάγουν πληροφορία για σταθερούς, κατανεμημένους αλλά και συνδυασμό των συγκεκριμένων σκεδαστών. (A.Hooper 2016)

Ένα εικονοστοιχείο κατανεμημένων σκεδαστών αποτελείται από μικρούς σκεδαστές χωρίς να υπάρχει κάποιος που να οπισθοσκεδάζει το σήμα με σημαντικά μεγαλύτερη ένταση από τους υπόλοιπους. Οι κατανεμημένοι σκεδαστές συναντώνται κυρίως σε αγροτικές και ορεινές περιοχές. Οι συγκεκριμένοι σκεδαστές έχουν χαμηλότερη τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο σε σχέση με τους σταθερούς σκεδαστές. Για την ανάλυση ενός κατανεμημένου σκεδαστή συνήθως γίνεται η χρήση πολλών εικονοστοιχείων με στόχο τον περιορισμό του θορύβου, την αύξηση της συνάφειας της φάσης και την εξαγωγή ποιοτικής πληροφορίας.

Οι σταθεροί σκεδαστές (PS) στην συμβολομετρία ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR) είναι σημεία της γήινης επιφάνειας τα οποία παρουσιάζουν συνάφεια και συνοχή στο σήμα που οπισθοσκεδάζουν στους δέκτες του ραντάρ ακόμα και μετά από πολλαπλές λήψεις στην πάροδο του χρόνου παρά τις όποιες αλλαγές στην παραμέτρους καταγραφής της εικόνας και του σήματος όπως ατμοσφαιρικές επιδράσεις και μικρομετακινήσεις στο έδαφος.

Στις εικόνες SAR, κάθε εικονοστοιχείο αποτελείται από ένα σύνολο σκεδαστών. Ένα εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται ως “PS” όταν εμπεριέχει έναν σταθερό σκεδαστή. Η πληροφορία της φάσης για τα εικονοστοιχεία PS έχει μεγάλη τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Με άλλα λόγια, ο θόρυβος της φάσης είναι μικρός και δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από φαινόμενα χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης. Συνεπώς, η συνάφεια της φάσης είναι υψηλή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η σταθερότητα της συμβολομετρικής φάσης σχετίζεται με την σταθερότητα του πλάτους του σήματος (Ferretti et al.2001).

Για τιμές SNR >10 η διασπορά του πλάτους κύματος αντικατοπτρίζει την τυπική απόκλιση της φάσης οπότε η μέθοδος έχει υψηλά ποσοστά επιτυχίας στην επιλογή “φωτεινών” σταθερών σκεδαστών (Ferretti et al.2001).

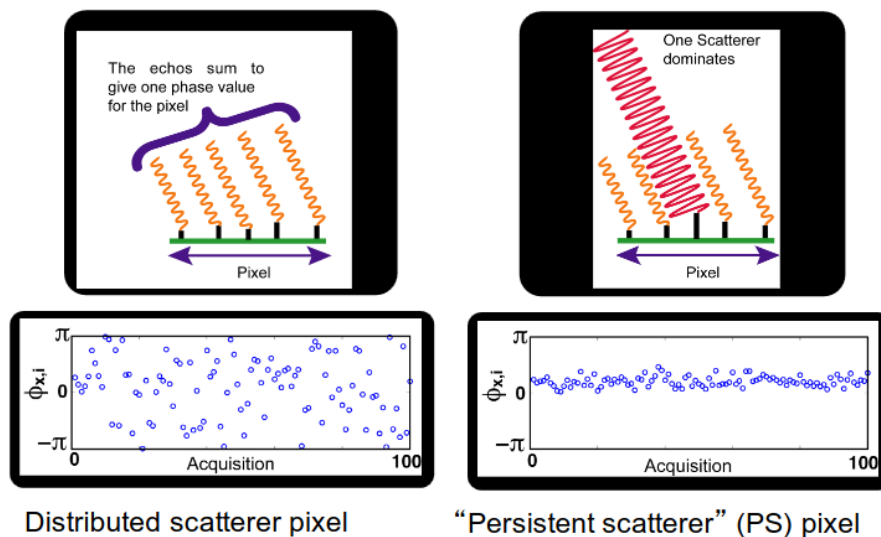
Ωστόσο για σταθερούς σκεδαστές με χαμηλό SNR η απλή αυτή μαθηματική σχέση δεν είναι αρκετή όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω ο (A.Hooper, 2006) ανέπτυξε έναν πιο εξελιγμένο αλγόριθμο για την εύρεση σταθερών σκεδαστών).

Πρακτικά ο δείκτης διασποράς του πλάτους είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος για την εύρεση εικονοστοιχείων σταθερής σκέδασης και εκφράζεται με το λόγο της τυπικής απόκλισης του πλάτους προς τη μέση τιμή του πλάτους κύματος για κάθε εικονοστοιχείο Τα εικονοστοιχεία με τιμή δείκτη

διασποράς του πλάτους μικρότερη από 0.25 μπορούν να θεωρηθούν εικονοστοιχεία σταθερής σκέδασης.

Η συμβολομετρία σταθερών σκεδαστών (PSI) είναι μία καινοτόμος διαδικασία η οποία επικεντρώνεται στην αναγνώριση αυτών των σταθερών “στόχων” ραντάρ για να απονείμει ακριβείς διορθώσεις παραμόρφωσης. Η επιλογή των σημείων αυτών είναι μία δύσκολη διαδικασία και πολλές φορές μη αυτοματοποιημένη. Τα σημεία που επιλέγονται συνήθως βρίσκονται σε ανθρωπογενείς κατασκευές (κτίρια, δρόμοι, λιμάνια) αλλά και σε περιοχές με λιγότερη βλάστηση (βράχια, κορυφές βουνών) όπου με την πάροδο του χρόνου όπως είπαμε είναι λιγότερο πιθανό να υπάρξει αλλοίωση του περιβάλλοντα χώρου.

Persistent Scatterer (PS) Pixel



Εικόνα 5: Σήμα σταθερών σκεδαστών (A. Hooper 2016)

Όπως βλέπουμε και από την άνωθεν εικόνα οι σταθεροί σκέδαστες παρουσιάζουν “συνέπεια” στο σήμα που οπισθοσκεδάζουν μετά από διαφορετικές λήψεις και μάλιστα όπου υπάρχει ένας κυριαρχεί στο σήμα ενός pixel από τους υπόλοιπους .

Οι σταθεροί σκεδαστές στην παρούσα έρευνα είναι στο πλήθος τους 284041 διασκορπισμένοι σε όλο το νησί (βουνά, ακτές, πόλεις, περιοχές με έντονο ανάγλυφο) με τους περισσότερους να βρίσκονται στο Βόρειο - Ανατολικό τμήμα όπου βρίσκεται και η πόλη της Ρόδου.

1.4 ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

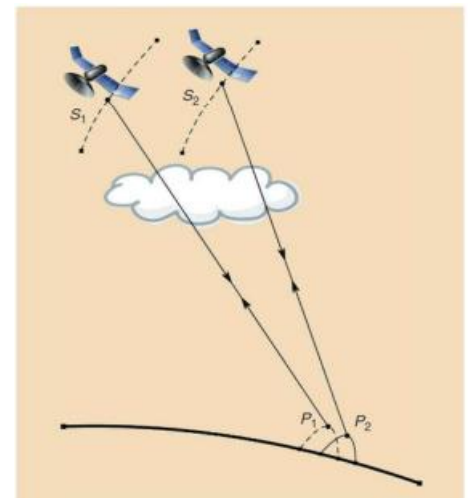
Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι τεχνικές επεξεργασίας χρονοσειρών δορυφορικών συμβολομετρικών δεδομένων ραντάρ (InSAR) έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό κυρίως για την εκτίμηση

παραμέτρων επιφανειακής παραμόρφωσης εδάφους. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι ικανές να εξάγουν πληροφορία παραμόρφωσης μεγάλης κλίμακας με ακρίβεια χιλιοστού και έχουν εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς, όπως παρακολούθηση αστικού ιστού, παρακολούθηση ορυχείων και κατολισθήσεων. Η παραμόρφωση του εδάφους στο χρόνο έχει μεγάλη σημασία για πληθώρα εφαρμογών.

Οι χρονοσειρές InSAR είναι στην πραγματικότητα ένας γενικός όρος για μια κατηγορία τεχνικών, επίσης γνωστές στη βιβλιογραφία ως multibaseline, multitrack, multitemporal, repeat pass και repeat track InSAR. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαφορική συμβολομετρία οι τεχνικές ανάλυσης χρονοσειρών InSAR έχουν τα εξής διακριτικά χαρακτηριστικά.

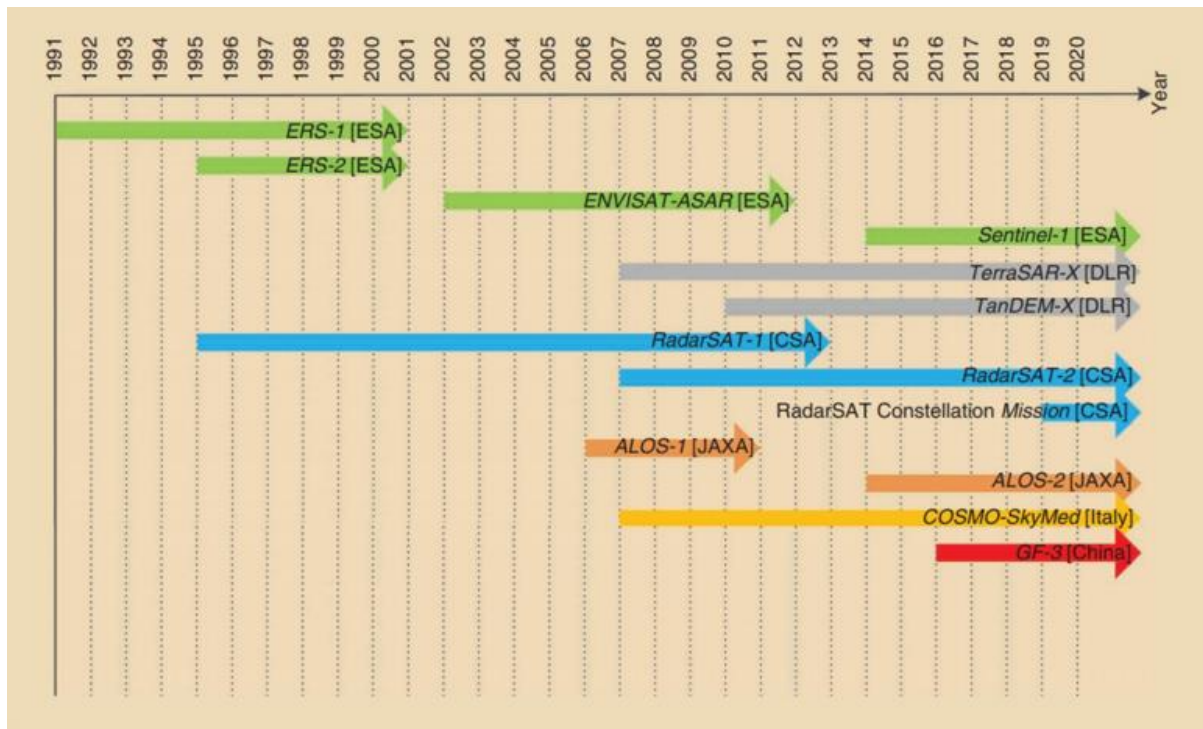
- Απαιτούν μεγάλο αριθμό απεικονίσεων SAR (κατά κύριο λόγο περισσότερες από 20 απεικονίσεις) στην ίδια περιοχή σε διαφορετικούς χρόνους, ενώ η διαφορική συμβολομετρία μπορεί να χωριστεί σε συμβολομετρία που αποτελείται από δύο, τρεις και τέσσερις εικόνες.
- Εξάγουν σήματα μόνο για τα σημεία με ιδιότητες σταθερής σκέδασης, ενώ η διαφορική συμβολομετρία λειτουργεί σε ολόκληρη την εικόνα, δηλαδή σε ένα 2D πλέγμα. Πρακτικά όπως έχει παρατηρηθεί είναι ευκολότερο να εξασφαλιστεί υψηλή συνάφεια σε συγκεκριμένα σημεία από ό,τι είναι να διατηρείται στον χρόνο υψηλή συνάφεια για μια ολόκληρη επιφάνεια.
- Στη διαφορική συμβολομετρία, η χωρική γραμμή βάσης των δυο εικόνων για την παραγωγή ενός συμβολογράμματος καλής συνάφειας αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό ιδιαίτερα σε περιοχές που καλύπτονται από βλάστηση, επειδή μπορεί να οδηγήσει στην αποσυσχέτιση της φάσης. Με τις τεχνικές χρονοσειρών InSAR, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές εικόνες SAR στην περιοχή παρακολούθησης με διαφορετικές χωρικές και χρονικές γραμμές βάσεων σε σχέση με τις απαιτήσεις της διαφορικής συμβολομετρίας.
- Με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά της επίδρασης της ατμόσφαιρας, οι τεχνικές χρονοσειρών InSAR μπορούν σε μεγάλο βαθμό να μετριάσουν τα σφάλματα που οφείλονται

στη διαφορική καθυστέρηση του σήματος λόγω της ατμόσφαιρας σε διαφορετικές εικόνες. Η διαφορική συμβολομετρία μπορεί να εκτιμήσει τη φάση της ατμόσφαιρας μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις, υποθέτοντας μία γραμμική σχέση μεταξύ της καθυστέρησης φάσης και της τοπογραφίας, υπόθεση που δεν ισχύει πάντα σε περιοχές με έντονη συσσώρευση υδρατμών (π.χ. σύννεφα).



Εικόνα 6: Απεικόνιση γεωμετρίας παρατήρησης συμβολομετρικού ζευγαριού(F. Xue et al., 2020).

- Οι τεχνικές χρονοσειρών InSAR ξεπερνούν προβλήματα αποκατάστασης φάσης που αντιμετωπίζει η διαφορική συμβολομετρία οι οποίες προέρχονται από την χρονική αποσυσχέτιση των εικόνων και από διαφορετικές ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις. Τέλος, οι τεχνικές χρονοσειρών InSAR έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν παραμορφώσεις μεγάλης έκτασης μέσω ενός πολύ πυκνού δικτύου παρατηρήσεων, σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές μέτρησης της παραμόρφωσης όπως τη χωροστάθμηση και το GPS που είναι σημειακές.
- Οι τεχνικές χρονοσειρών InSAR αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο για παρακολούθηση εδαφικής παραμόρφωσης μεγάλης χωρικής κλίμακας .



Σχήμα 3: Οι σημαντικότεροι δορυφόροι για ανάλυση χρονοσειρών συμβολομετρικών δεδομένων SAR (F.Xue et al., 2020)

1.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

Όταν το σήμα διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας της Γης, η οποία έχει λίγο μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το κενό, η ταχύτητα διάδοσης του σήματος μειώνεται ελάχιστα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται χωρικά μεταβαλλόμενες καθυστερήσεις που αλλοιώνουν τις παρατηρήσεις. Η μικροκυματική ακτινοβολία επηρεάζεται από τρεις συνιστώσες την **πίεση**, την **θερμοκρασία** και την **υγρασία της ατμόσφαιρας (water vapor)** (Hanssen et al., 2001).

Στη δορυφορική επαναληπτική συμβολομετρία, όπου το συμβολομετρικό ζεύγος αποκτάται σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές (δηλαδή παρουσιάζεται χρονική αποσυσχέτιση), παρουσιάζονται διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης του σήματος κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης λόγω των ατμοσφαιρικών μεταβολών μεταξύ των δύο λήψεων, με αποτέλεσμα η φάση του συμβολογράμματος

να περιέχει πληροφορίες που δεν σχετίζονται με την τοπογραφία ή την παραμόρφωση του εδάφους αλλά με τη μεταβολή των ατμοσφαιρικών χαρακτηριστικών (Rocca et al., 2000).

Πιο αναλυτικά οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις συναντώνται σε δύο στρώματα της ατμόσφαιρας, την **Ιονόσφαιρα** και τη **Τροπόσφαιρα**, των οποίων οι επιδράσεις τους αναφέρονται παρακάτω ξεχωριστά.

1.5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ιονόσφαιρα εκτείνεται στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, περίπου από 50 έως και τα 1000 km κατά προσέγγιση. Ακτινοβολία υψηλής ενέργειας που έρχεται από τον ήλιο οδηγεί στον ιονισμό μέρους των μορίων της ατμόσφαιρας και δημιουργεί ένα μείγμα ελεύθερων ηλεκτρονίων, ιόντων, και ευγενών αερίων. Λόγω του ιονισμού ο αέρας γίνεται ηλεκτροαγώγιμος και ραδιοκύματα που διασχίζουν την ιονόσφαιρα παρουσιάζουν καθυστέρηση κατά μήκος της πορείας τους λόγω της επίδρασης των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Μεγαλύτερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και ισχυρότερες χωρικές αλλαγές παρατηρούνται κυρίως στους πόλους λόγω του σχήματος του γήινου μαγνητικού πεδίου. (Wegmuller et al., 2006).

Η επίδραση της ιονόσφαιρας στη συμβολομετρία SAR σχετίζεται άμεσα με τη συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η μεταβολή της ιονοσφαιρικής φάσης σε μια διάδοση διπλής διαδρομής :

$$\Delta\varphi_{iono} = 1.69 \times 10^{-6} N f \quad (9)$$

Όπου N [μ^{-2}] ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά τμ. και f η συχνότητα του σήματος ραντάρ σε Hz. Ο αριθμός N μπορεί να εκφραστεί και ως το ολικό περιεχόμενο ιόντων που είναι γνωστό ως TEC (Total Electron Contents) και η μονάδα μέτρησης του είναι TECU (TEC Units). Μια σχετικά ισχυρή μεταβολή στην συγκέντρωση των ηλεκτρονίων της τάξης του 1 TECU ($= 1 \cdot 10^{16} m^{-2}$) οδηγεί σε μεταβολή της ιονοσφαιρικής φάσης 2,0 κύκλων φάσης στο κανάλι L, περίπου σε 0,5 κύκλων φάσης στο κανάλι C και περίπου σε 0,3 κύκλους φάσης στο κανάλι X. Φαίνεται, λοιπόν, ότι επίδραση της ιονόσφαιρας είναι σημαντικότερη στα κανάλια P και L που έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος σε σχέση με τα κανάλια X και C (Gray et al., 2000).

1.5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η Τροπόσφαιρα είναι το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας από της επιφάνειας της Γης, πάχους έως και 18 km στον Ισημερινό, 10 - 13 km στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και 8 km στους πόλους (την εποχή του καλοκαιριού - αντιθέτως, τον χειμώνα η τροπόσφαιρα στους πόλους είναι ακαθόριστη). Σχεδόν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα στην ατμόσφαιρα της Γης, όπως σύννεφα, ομίχλη, βροχή, χιόνι, χαλάζι, κεραυνοί κλπ. εκδηλώνονται σε αυτό το στρώμα, περιέχει το 99% της υγρασίας της και για αυτόν τον λόγο θα επικεντρωθούμε σε αυτό το στρώμα για τις διορθώσεις που θα προβούμε σε επόμενα κεφάλαια.

Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις μπορεί να μην είναι προβλέψιμες λόγω:

- Ατμοσφαιρικών Διαταραχών (Turbulence) -Εκθετική σχέση στο χώρο και τυχαία χρονικά.

Ο όρος Ατμοσφαιρική Διατάραξη αναφέρεται συνήθως στην ανομοιόμορφη και συχνά απρόβλεπτη κίνηση του αέρα στην ατμόσφαιρα, η οποία μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις στο δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Αυτή η μεταβολή του δείκτη διάθλασης μπορεί να επηρεάσει τη διαδρομή του σήματος των δεκτών ραντάρ, καθώς ταξιδεύουν μέσα από την ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε παραμορφώσεις ή σφάλματα στις μετρήσεις του ραντάρ. (Stull, R.B 1988)

- Εποχικά πρότυπα καιρού

Τα εποχικά πρότυπα καιρού αναφέρονται στις τυπικές και χαρακτηριστικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά μέσο όρο κατά μήκος των διαφόρων εποχών του χρόνου. Κάθε εποχή έχει τα δικά της εποχικά πρότυπα, που περιλαμβάνουν τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποσότητα των βροχοπτώσεων, η συχνότητα των ανέμων, και άλλες καιρικές παράμετροι. (Barry et al., 2009)

- Στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας (λόγω τοπογραφίας)

Η στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας (atmospheric stratification) αναφέρεται στην οργάνωση των διάφορων στρωμάτων της ατμόσφαιρας με βάση τις μεταβολές των μετεωρολογικών μεγεθών όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και η κίνηση του αέρα με το ύψος. Στη μελέτη του καιρού και στην κλιματολογία, η κατανόηση της στρωματοποίησης της ατμόσφαιρας είναι σημαντική καθώς επηρεάζει τις καιρικές συνθήκες και τη μεταφορά της θερμότητας και της υγρασίας στην ατμόσφαιρα.

(Holton, J.R 2004)

Η ατμοσφαιρική επίδραση μπορεί να φτάσει ως και **2 κροσσούς συμβολής**. Αυτή η επίδραση, μπορεί να επιδράσει στην εκτίμηση υψομέτρου ανάλογα με την κάθετη συνιστώσα της γεωμετρικής βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού.

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση αποτελείται από δύο μέρη: τη συνιστώσα της ξηρής ατμόσφαιρας (**dry atmosphere component**) η οποία αναφέρεται και σαν (**hydrostatic component**) και τη συνιστώσα της υγρής τροπόσφαιρας (**wet atmosphere component**) ή αλλιώς (**water vapor delay**) η οποία αναφέρεται και σαν περιεκτικότητα υδρατμών.

► Η καθυστέρηση λόγω της συνιστώσας της υγρής ατμόσφαιρας σχετίζεται με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλες χωρικές και χρονικές μεταβολές, και για αυτό είναι αρκετά δύσκολο να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια ακόμα και με την χρήση μετεωρολογικών δεδομένων.

► Η καθυστέρηση λόγω της συνιστώσας της ξηρής ατμόσφαιρας αφορά κυρίως τη πίεση του αέρα και την θερμοκρασία. Έχει ομαλή και αργή μεταβολή στο χρόνο και σχετίζεται με το βαρυτικό πεδίο και την μεταβολή της πυκνότητας του αέρα με το ύψος. (B.Καραθανάση, 2012)

Η σχέση μεταξύ της υδροστατικής συνιστώσας, της πίεσης και της θερμοκρασίας είναι περίπλοκη και περιλαμβάνει τον νόμο του ιδανικού αερίου, τον νόμο του Boyle-Mariotte και το νόμο της παρακείμενης θερμότητας. Ας εξετάσουμε συνοπτικά πώς σχετίζονται αυτοί οι παράγοντες:

1. **Πίεση (P):** Η πίεση αυξάνεται με το βάθος της ατμόσφαιρας. Αυτό σημαίνει ότι όσο προχωράμε προς τον υψηλότερο χώρο, η πίεση μειώνεται. Η υδροστατική συνιστώσα αντιπροσωπεύει τη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων σε διαφορετικά ύψη.
2. **Θερμοκρασία (T):** Η θερμοκρασία επίσης επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, ο αέρας γίνεται λιγότερο πυκνός και ανεβαίνει. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία μειώνεται, ο αέρας γίνεται πυκνότερος και κατεβαίνει. Η θερμοκρασία επηρεάζει την υδροστατική συνιστώσα μέσω της πυκνότητας του αέρα.

Αντίθετα με τους υδρατμούς, η υδροστατική συνιστώσα είναι σχετικά σταθερή και μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τυπικά προφίλ πίεσης της ατμόσφαιρας. Για τη διόρθωση της υδροστατικής συνιστώσας, οι αλγόριθμοι διόρθωσης του ραντάρ συνήθως βασίζονται σε ευρέως αποδεκτά μοντέλα πίεσης της ατμόσφαιρας και αντίστοιχα δεδομένα.

► Η υγρή συνιστώσα, επίσης γνωστή ως "συνιστώσα του υδρατμού," αναφέρεται στο τμήμα της ατμόσφαιρας όπου συναντώνται υδρατμοί σε μεγάλη περιεκτικότητα. Ο υδρατμός είναι ένα μεταβλητό στοιχείο της ατμόσφαιρας, και η πυκνότητά του μπορεί να αλλάζει με το ύψος και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Είναι υπεύθυνο για τις αλλαγές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας και μπορεί να επηρεάσει τη διαδρομή των ραντάρ σημάτων καθώς ταξιδεύουν μέσα από την ατμόσφαιρα. Για να γίνει διόρθωση για την υγρή συνιστώσα, οι αλγόριθμοι διόρθωσης του ραντάρ συνήθως χρησιμοποιούν δεδομένα από πηγές όπως μετεωρολογικά μπαλόνια ή αριθμητικά μοντέλα καιρού για να εκτιμήσουν και να λάβουν υπόψη την επίδραση του υδρατμού στα σήματα του ραντάρ (B. Καραθανάση, 2014).

Στην δορυφορική επαναληπτική συμβολομετρία παρουσιάζονται τεχνουργήματα τα οποία σχετίζονται κυρίως με τη χρονική και χωρική μεταβολή των τροποσφαιρικών **υδρατμών**. Άλλες τροποσφαιρικές μεταβλητές, όπως η **πίεση** και η **θερμοκρασία**, επίσης συμβάλλουν στην καθυστέρηση του σήματος, αλλά η επίδραση τους είναι μικρότερη σε μέγεθος και πιο ομοιόμορφα κατανομημένη στο συμβολόγραμμα.

Χωρικές και χρονικές μεταβολές της τάξης του 20% στη σχετική υγρασία μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα των 10 cm σε χάρτες παραμόρφωσης και σε σφάλματα 100 μ. σε τοπογραφικούς χάρτες για τα συμβολομετρικά ζεύγη που έχουν δυσμενείς γεωμετρικές βάσεις (Zebker et al., 1997).

Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, εφόσον τα SAR δεδομένα είναι στο κανάλι C, η ιονοσφαιρική φάση είναι πολύ μικρότερη της τροποσφαιρικής και θεωρείται αμελητέα. Η ατμοσφαιρική καθυστέρηση, λοιπόν αποτελείται κυρίως από την τροποσφαιρική καθυστέρηση και οι δύο όροι θα χρησιμοποιούνται ισότιμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Επειδή η επίδραση της ατμόσφαιρας επηρεάζει σημαντικά την πληροφορία και την ακρίβεια των SAR συμβολογραμμμάτων έχουν γίνει αρκετές μελέτες και προσπάθειες ιδιαίτερα τα τελευταία 20 χρόνια για την εύρεση και μείωση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης στα παραγόμενα συμβολογράμματα ώστε η απόδοση της συμβολομετρικής μεθοδολογίας να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη. Υπάρχουν λοιπόν δύο κύριες τεχνικές διόρθωσης όπου θα αναλύσουμε και παρακάτω:

- Διορθώσεις ατμοσφαιρικών επιδράσεων με χρήση της συμβολομετρικής φάσης.
- Διορθώσεις ατμοσφαιρικών επιδράσεων με βάση εξωτερικά δεδομένα (Αριθμητικά Μοντέλα Καιρού, Μετρήσεις GPS, Παρατηρήσεις Πολυφασματικών Δεκτών).

2.1 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗ ΦΑΣΗΣ

Με βάση την συγκεκριμένη μεθοδολογία η τροποσφαιρική φάση μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψιν την συμβολομετρική φάση και την τοπογραφία της περιοχής. Οι μέθοδοι αυτοί πλεονεκτούν στο γεγονός ότι δεν υπάρχει ανάγκη ανάκτησης εξωτερικών δεδομένων και μετρήσεων οπότε μειώνεται και ο όγκος δεδομένων και εργαλείων για την επεξεργασία της ατμόσφαιρας ,με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των παραμορφώσεων και των ατμοσφαιρικών φάσεων στα διάφορα συμβολογράμματα. Υπάρχει αδυναμία διόρθωσης των σφαλμάτων εάν η συσχέτιση είναι μικρή.

Η πρώτη προσπάθεια πραγματοποιήθηκε από τον (Zebker et al., 2007) ο οποίος ασχολήθηκε με την μέθοδο του στοιβάγματος (**stacking**) η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μέσου όρου N-ανεξαρτήτων συμβολογραμμμάτων για την μείωση του χρονικά αποσυσχετισμένου θορύβου κατά $\frac{1}{\sqrt{N}}$ (Zebker et al.,1996). Ο Zebker επικεντρώθηκε κυρίως στα σφάλματα από την υγρασία της ατμόσφαιρας και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των συμβολογραμμμάτων προκύπτει από μεγάλα μήκη κύματος και ειδικότερα την L-band. Η μέθοδος θεωρούταν για καιρό η μοναδική λύση στο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης.

Έπειτα έγιναν προσπάθειες η τροποσφαιρική καθυστέρηση να υπολογιστεί απευθείας από το συμβολόγραμμα με μία νέα μέθοδο, την γραμμική διόρθωση (**Linear Correction**) . Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η $\Delta\varphi_{tropo} = K_{\Delta\varphi} h + \Delta\varphi_0$, δηλαδή μία σχέση μεταξύ τοπογραφίας (h) και συμβολομετρικής φάσης ($\Delta\varphi$) σε μία περιοχή χωρίς παραμόρφωση (non-deforming region) αρχικά από τον (Wicks et al.,2002) και στην συνέχεια από τους (Lin,Simons,Hetland,Muse & Di Caprio 2010) σε ένα κανάλι (band) που δεν σχετίζεται με την παραμόρφωση, όπου $K_{\Delta\varphi}$ είναι ένας συντελεστής που συσχετίζει την φάση με την τοπογραφία και $\Delta\varphi_0$ μια σταθερά που λόγω της συνεχούς μετατόπισης της σε όλο το συμβολόγραμμα, μπορεί να μην ληφθεί υπόψιν.

Αργότερα οι (Elliott, John R. et al., 2008) πρότειναν μία τροποποίηση της μεθόδου προσδιορίζοντας μία αρχική 'προκαταρκτική' εκτίμηση από την παραμόρφωση που προκαλούν οι μετατοπίσεις πριν εκτιμήσουν τον $K_{\Delta\phi}$.

Οι μέθοδοι που βασίζονται στις τιμές της φάσης (Phase-Based) ήταν αποτελεσματικές στη μείωση του τροποσφαιρικού σήματος αλλά περιορίζονται καθώς υποθέτουν ότι δεν υπάρχει χωρική μεταβλητότητα των τροποσφαιρικών ιδιοτήτων. Κάποιοι ερευνητές προσπάθησαν να παρακάμψουν το πρόβλημα εφαρμόζοντας αποσπασματικά διορθώσεις κλίσεων σε πολλαπλά 'παράθυρα' διόρθωσης, (Bejar, Pizzaro et al, 2013). Ωστόσο αυτή η μέθοδος ήταν ελλειμματική καθώς το πλευρικά-διαφέρον τροποσφαιρικό σήμα απαιτεί ένα κοινό σημείο αναφοράς μεταξύ των παραθύρων επομένως η εκτίμηση της σταθεράς $\Delta\phi_0$ εντός των παραθύρων καθώς άλλες ιδιότητες της φάσης επηρεάζουν την σταθερά.

Καταλήγοντας οι (Bekaert et al., 2015b) ανέπτυξαν μία νέα μέθοδο ατμοσφαιρικής διόρθωσης, την **Powerlaw Phase Correction** που έχει εφαρμογή μέχρι και σήμερα και αποτελεί αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης εργασίας, και η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

2.2 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η διόρθωση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης μπορεί να γίνει με την χρήση Αριθμητικών Μοντέλων Καιρού (ERA-Interim, (ERA-I), ERA5, WRF, GFS, CFSR, HRES κλπ.) από παρατηρήσεις πολυφασματικών δεκτών όπως ο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) που βρίσκεται στους δορυφόρους TERRA και AQUA, ο MERIS (Medium Moderate Resolution Imaging Spectrometer) που άνηκε στον δορυφόρο Envisat (τα δεδομένα υπάρχουν ως το 2012 καθώς μετά χάθηκε η επικοινωνία με τον δορυφόρο), καθώς και από παρατηρήσεις GPS.

Τα μοντέλα καιρού αυτά μπορούν να έχουν παγκόσμια ή τοπική κάλυψη και η χωρική τους ανάλυση είναι συνήθως αρκετά μικρή. Τα Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα προσφέρουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας (πίεση, θερμοκρασία, και σχετική υγρασία) και κάνουν εφικτό τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Τα προϊόντα των Πολυφασματικών Δεκτών προσφέρουν πληροφορίες για τις κατακρημνίσεις (Precipitable Water Vapor (PWV)). Οι μετρήσεις GPS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βαθμονόμηση των δεδομένων και αφαίρεση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης. Παρακάτω παρατίθενται παραδείγματα ερευνών των μεθόδων που αναφέραμε.

Οι Li et al., (2006), πρότειναν ένα στατιστικό κριτήριο για την εξέταση αν ένα ανεξάρτητο προϊόν υδρατμών μπορεί να μειώσει την επίδραση των υδρατμών στα συμβολογράμματα. Επιπρόσθετα, αξιολόγησαν τη χρήση του προϊόντος υδρατμών του MERIS για τη διόρθωση δεδομένων Advanced SAR (ASAR). Σύγκριση των αποτελεσμάτων με προϊόντα υδρατμών από GPS/radiosonde μετρήσεις, παρουσιάζουν συμφωνία της τάξης του 1.1 mm όσον αφορά την τυπική απόκλιση.

Οι Yu et al., (2006), χρησιμοποίησαν σημειακές μετρήσεις GPS για τη μείωση της επίδρασης της τροπόσφαιρας σε δορυφορικές μετρήσεις RADAR. Εφαρμόστηκε και αναπτύχθηκε περαιτέρω το μοντέλο ITD (Iterative Tropospheric Decomposition) για τον διαχωρισμό των στρωματοποιημένων και ταραχωδών συνιστωσών του σήματος ατμοσφαιρικής καθυστέρησης και στην συνέχεια για την παραγωγή χαρτών τροποσφαιρικής διόρθωσης. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε Sentinel-1A συμβολογράμματα σε δύο περιοχές μελέτης: στην Νότια Καλιφόρνια, ΗΠΑ και στη Νότιο Αγγλία, Ηνωμένο Βασίλειο. Τα αποτελέσματα δείχνανε βελτίωση της αποκατεστημένης φάσης, (i) του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) με μετρήσεις GPS, της τάξης του 45–79% και 59–71%, αντίστοιχα για κάθε περιοχή μελέτης και (ii) της τυπικής απόκλισης 38–61% και 65–79%, αντίστοιχα.

Οι Jolivet et al., (2011), χρησιμοποίησαν το καιρικό μοντέλο ERA-I για το υπολογισμό χαρτών τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Για τον σκοπό της έρευνάς τους χρησιμοποιήθηκαν συμβολογράμματα μη αποκατεστημένης φάσης. Επίσης, αποδείχθηκε ότι εάν εφαρμοστεί διόρθωση πριν γίνει αποκατάσταση της φάσης μειώνει σημαντικά τα σφάλματα που προκύπτουν σε περιοχές με έντονες και διαφορετικές διακυμάνσεις τοπογραφίας.

Οι Yu et al. (2018), ανέπτυξαν ένα μοντέλο γενικευμένης ατμοσφαιρικής διόρθωσης InSAR. Ενσωμάτωσαν δεδομένα από το αριθμητικό καιρικό μοντέλο HRES της ECMWF και παρατηρήσεις GPS για την παραγωγή χαρτών τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Βάσει του μοντέλου αυτού υλοποιήθηκε η υπηρεσία GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) που προσφέρει χάρτες τροποσφαιρικής καθυστέρησης παγκόσμιας κάλυψης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, μετά από αίτημα του χρήστη.

Οι Hu & Mallorquí (2019), χρησιμοποίησαν δεδομένα από την ERA5, την υπηρεσία που δημιουργήθηκε μετά την ERA-I (και εκείνη που θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς παρακάτω στις διορθώσεις μας) για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης στην διεύθυνση της γραμμής θέασης (Direct Intergration Method Along The Line-of-Sight, (D-LOS)) του δορυφόρου, κάτι που πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά σε μελέτη, αντί να υπολογιστεί μόνο η κατακόρυφη καθυστέρηση της ατμόσφαιρας (Zenith Convention to Line-of Sight-Direction, (Z-LOS)). Οι ερευνητές ασχολήθηκαν και με τις δύο μεθόδους μετατροπής. Για την αξιολόγηση των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον δορυφόρο Sentinel-1 σε τρεις περιοχές μελέτης: Νήσος Τενερίφη και Αλμερία, Ισπανία, και νήσος Κρήτη, Ελλάδα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος (D-LOS) ξεπέρασε σε επιδόσεις την (Z-LOS) μέθοδο σε όλες τις περιοχές μελέτης, με μέση μείωση της τυπικής απόκλισης της συμβολομετρικής φάσης 50% στη νήσο Τενερίφη, 38% στη νήσο Κρήτη, και 29% στην Αλμερία, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την μέθοδο (Z-LOS) ήταν 37%, 22%, και 14% .

Οι Darvishi et al., (2020), μελέτησαν την απόδοση των ατμοσφαιρικών διορθώσεων της φάσης από καιρικά μοντέλα (ERA-Interim, ERA5, MERRA2, WRF) και μοντέλα αμιγώς διόρθωσης της φάσης (Linear Power-law , από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-1 για την καθίζηση του εδάφους στην περιοχή Corvara των Άλπεων (Corvara Landslide), χρησιμοποιώντας μετρήσεις GPS και δεδομένα

της υπηρεσίας GACOS για αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η έρευνα έδειξε ότι η διόρθωση με το μοντέλο της ERA5 ξεπέρασε κατά πολύ τα υπόλοιπα καιρικά μοντέλα με μείωση της τυπικής απόκλισης της συμβολομετρικής φάσης κατά 77.7%. Επιπρόσθετα φαίνεται ότι η μέθοδος Linear είχε την καλύτερη απόδοση με μείωση της τυπικής απόκλισης της συμβολομετρικής φάσης κατά 80.2 % κάτι που πολύ πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης ήταν αρκετά μικρή περίπου 15*15km.

Οι Zhang, et al. (2022), χρησιμοποίησαν 48 ζευγάρια συμβολογραμμμάτων από τον δορυφόρο Sentinel-1 A/B σε εννιά υπό περιοχές της Κίνας στην προσπάθεια τους να εξετάσουν πως συμπεριφέρονται τα αριθμητικά μοντέλα καιρού (numerical weather models (NWMs)), αναλύοντας δεδομένα από τα μοντέλα του European Centre Medium-range Weather Forecast (ECMWF) και συγκεκριμένα από τα ERA-I και ERA5 σε μη γραμμικά στοιχεία των συμβολογραμμμάτων. Τα συμπεράσματα που κατέληξαν παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς τα δύο προϊόντα ανασύνθεσης μετεωρολογικών δεδομένων (reanalysis products), ERA-I και ERA5, έχουν καλύτερη απόδοση τον χειμώνα σε σχέση με άλλες εποχές λόγω μικρότερης μεταβολής και ποσότητας των υδρατμών της ατμόσφαιρας. Το ίδιο συμβαίνει σε περιοχές με μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος και μεγαλύτερη απόσταση από την θάλασσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

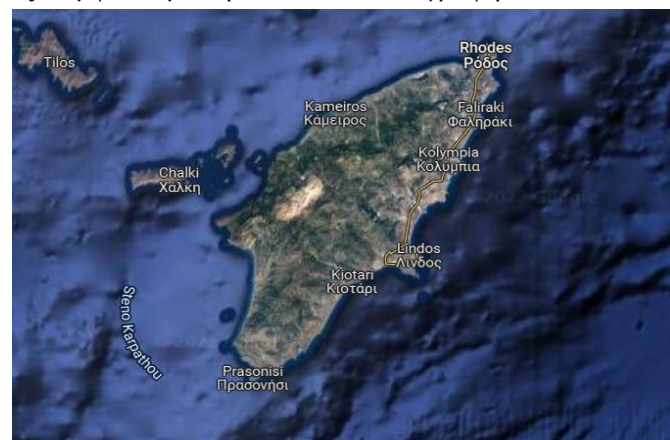
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

3.1.1 ΝΗΣΟΣ ΡΟΔΟΥ

Η Ρόδος, η οποία είναι η μεγαλύτερη νήσος του αρχιπελάγους των Δωδεκανήσων, βρίσκεται στο νοτιοανατολικό Αιγαίο Πέλαγος, ανοικτά των ακτών της Τουρκίας. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της Ρόδου είναι 36.4347° Βόρεια γεωγραφικό πλάτος και 28.2269° Ανατολικά γεωγραφικό μήκος. Έχει έκταση 1407.94 km² και πληθυσμό 117.007 κατοίκους σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2021, οι οποίοι ασχολούνται κυρίως με τις τοπικές επιχειρήσεις, τον τουρισμό, την γεωργία και κτηνοτροφία.

Η νήσος διαθέτει πλούσιο πολιτιστικό και ιστορικό παρελθόν, με την παλιά πόλη της Ρόδου να αποτελεί μια από τις καλύτερα διατηρημένες μεσαιωνικές πόλεις στον κόσμο. Επιπλέον, η νήσος φημίζεται για το εντυπωσιακό Κάστρο των Ιπποτών, ένα από τα σημαντικότερα μνημεία της αρχαίας Ελλάδας.

Αυτά τα γενικά χαρακτηριστικά περιγράφουν τη Ρόδο ως μια νήσο με πλούσιο πολιτιστικό παρελθόν, εξαιρετικές παραλίες και ευνοϊκές φυσικές συνθήκες για γεωργία και τουρισμό.

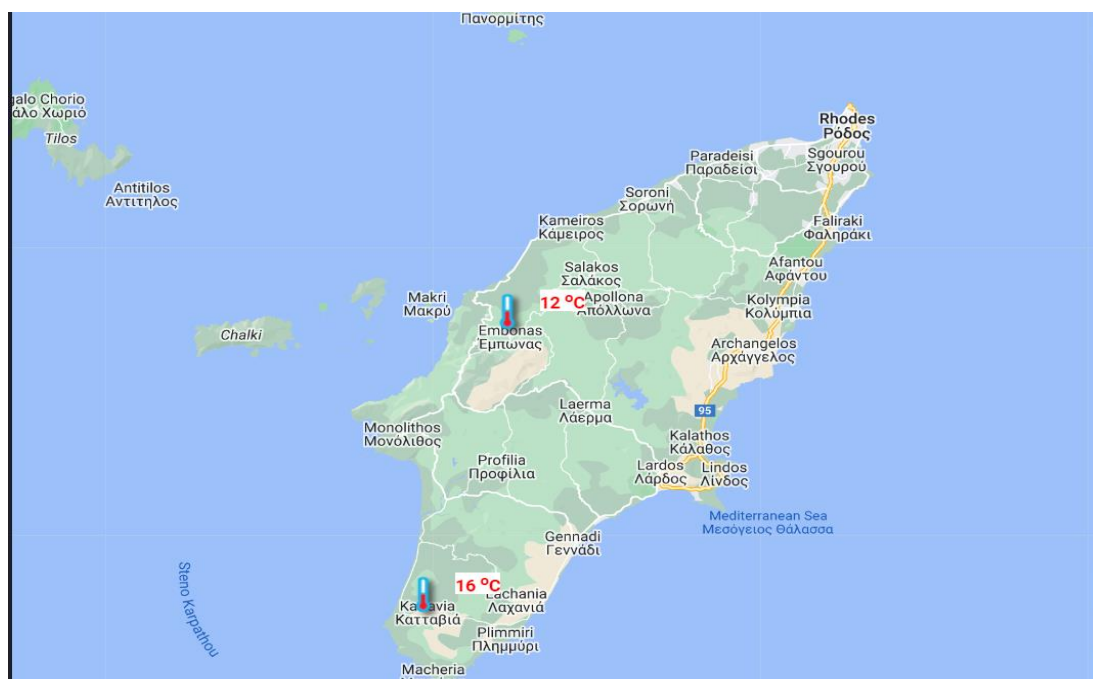


Εικόνα 7 : Περιοχή Μελέτης Νησί της Ρόδου.

3.1.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το κλίμα της Ρόδου είναι μεσογειακό, με ήπιους και βροχερούς χειμώνες και ζεστά, ηλιόλουστα και ξηρά καλοκαίρια. Οι καλοκαιρινές θερμοκρασίες στη Ρόδο ανεβαίνουν συχνά πάνω από τους 30°C . Οι χειμερινοί μήνες είναι ήπιοι, με μέσες θερμοκρασίες που σπάνια πέφτουν κάτω από τους 10°C. Οι βροχοπτώσεις στη νήσο είναι συγκεντρωμένες κυρίως στους χειμερινούς μήνες, ενώ το καλοκαίρι οι βροχές είναι σπάνιες. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του κλίματος της Ρόδου είναι οι δυνατοί άνεμοι που πνέουν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπως και στο υπόλοιπο Αιγαίο Πέλαγος γνωστοί και ως μελτέμια.

Στην περιοχή λειτουργούν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί αυτός του Έμπωνα στο Δυτικό τμήμα του νησιού ο οποίος παρέχει και τα περισσότερα κλιματολογικά δεδομένα και εκείνος της Κατταβιάς στο νότιο τμήμα.



Εικόνα 8: Μετεωρολογικοί Σταθμοί Νησί Ρόδο

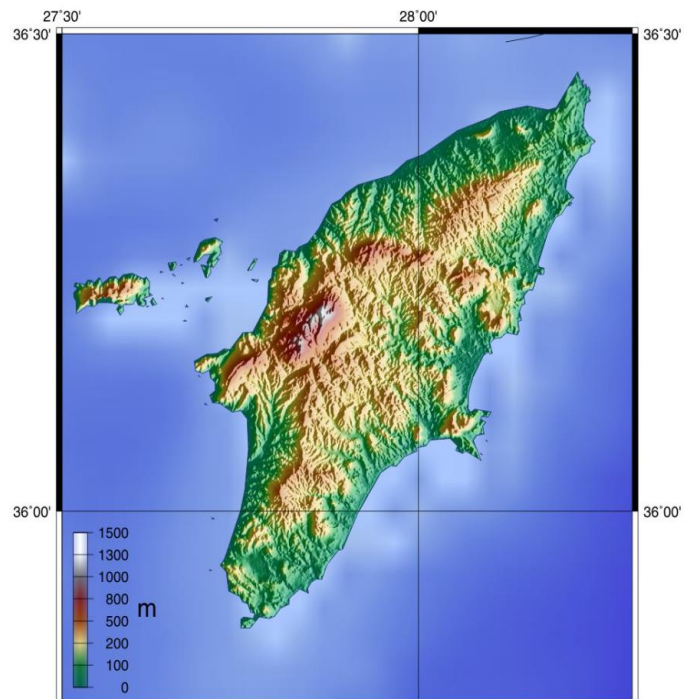
- Θα παρατηρήσουμε και από τα παρακάτω δεδομένα ότι η μέση θερμοκρασία είναι κοντά στους 20° δίχως ακραίες τιμές τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού και αντίστοιχα του χειμώνα. Επίσης κατά την διάρκεια των μηνών Νοεμβρίου-Μαρτίου οι βροχοπτώσεις είναι πολύ συχνές και με όγκο βροχής 232 mm για τον μήνα Ιανουάριο. Παρ'ότι τα δεδομένα είναι του περσινού έτους μας δίνουν μια εικόνα για το πόσο μπορεί να επηρεάζεται η ατμόσφαιρα καθώς και ποιους μήνες κατά προσέγγιση συμβαίνει αυτό.

NAME: embonas		CITY:		STATE:		ELEV: 430 m		LAT: 36° 13' 31" N		LONG: 27° 51' 19" E		TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3			
YR	MO	MEAN MAX	MEAN MIN	MEAN	DEP. FROM NORM	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	HI	DATE	LOW	DATE	MAX >=32	MAX <=0	MIN <=0	MIN <=-18
22	1	10.4	6.1	8.2	0.0	316	0	16.3	1	-0.2	23	0	0	2	0
22	2	12.4	7.6	9.9	0.0	237	0	16.6	20	4.2	9	0	0	0	0
22	3	11.0	5.5	8.2	0.0	314	0	18.1	28	-0.9	13	0	0	1	0
22	4	20.5	13.1	16.4	0.0	80	24	25.8	7	7.6	12	0	0	0	0
22	5	24.4	16.7	20.4	0.0	29	92	32.4	27	10.9	5	3	0	0	0
22	6	27.8	20.6	24.0	0.0	0	170	31.5	23	17.6	21	0	0	0	0
22	7	31.7	23.8	27.5	0.0	0	284	34.7	26	18.7	10	16	0	0	0
22	8	29.5	22.4	25.7	0.0	0	229	34.4	19	19.4	25	5	0	0	0
22	9	27.0	20.1	23.2	0.0	3	150	31.4	11	14.7	23	0	0	0	0
22	10	22.5	16.3	19.2	0.0	21	46	32.5	1	14.1	23	1	0	0	0
22	11	18.5	13.4	15.7	0.0	85	7	22.8	3	9.1	25	0	0	0	0
22	12	15.5	11.7	13.3	0.0	155	0	19.3	19	9.1	21	0	0	0	0
		21.0	14.8	17.7	0.0	1239	1002	34.7	JUL	-0.9	MAR	25	0	3	0
PRECIPITATION (mm)															
YR	MO	TOTAL	DEP. FROM NORM	MAX OBS. DAY	DATE	DAYS OF RAIN OVER									
22	1	232.1	0.0	57.0	11	17	11	4							
22	2	156.6	0.0	43.4	3	12	10	2							
22	3	105.2	0.0	48.0	2	13	11	1							
22	4	19.6	0.0	19.4	19	2	1	0							
22	5	0.6	0.0	0.2	2	3	0	0							
22	6	2.2	0.0	1.8	16	2	0	0							
22	7	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0							
22	8	4.0	0.0	3.8	24	2	1	0							
22	9	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0							
22	10	39.8	0.0	23.0	15	3	2	1							
22	11	210.2	0.0	118.6	28	11	7	3							
22	12	43.6	0.0	21.0	11	7	4	1							
		814.0	0.0	118.6	NOV	72	47	12							

Πίνακας 1: Αναλυτικός Πίνακας Μετεωρολογικού Σταθμού ΕΜΠΩΝΑ (Meteo.gr)

3.1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΛΥΨΕΙΣ ΓΗΣ - ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η νήσος της Ρόδου παρουσιάζει μια ποικιλία καλύψεων και χρήσεων γης που επηρεάζονται από τη γεωμορφολογία της. Η γεωμορφολογία της Ρόδου περιλαμβάνει τοπογραφικά χαρακτηριστικά όπως βουνά, κοιλάδες, πεδιάδες και ακτογραμμή, δημιουργώντας ένα μοναδικό φυσικό περιβάλλον. Το νησί δεν θεωρείται πεδινό αλλά αποτελείται κυρίως από ορεινό έδαφος. Το υψόμετρο κυμαίνεται από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι την κορυφή του Αττάρυβου στα 1.215 m.



Εικόνα 9: Υψομετρική Μορφολογία

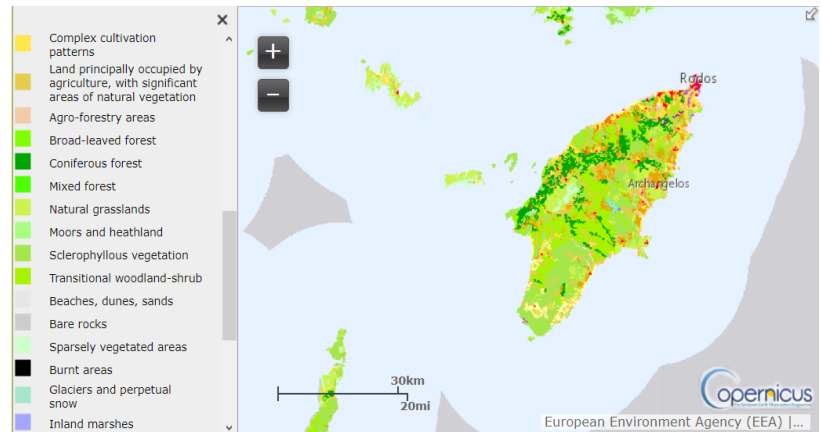
Το νησί της Ρόδου εμφανίζει και μεγάλη ποικιλομορφία όσον αφορά τις χρήσεις Γης. Ο αστικός ιστός είναι έντονο στο βορειοανατολικό τμήμα του νησιού. Το μεγαλύτερο κομμάτι του νησιού περιλαμβάνει δάση από πλατύφυλλα, χαμηλές θαμνώδεις και λιβαδικές εκτάσεις αλλά και γεωργικές καλλιέργειες σε μικρότερο ποσοστό. Η γεωργία είναι μια σημαντική δραστηριότητα στη νήσο, με την καλλιέργεια ελαιόδεντρων, αμπελιών, και εσπεριδοειδών να αποτελεί τους κύριους γεωργικούς τομείς. Η εύφορη γη και ο ευνοϊκός κλιματικός χαρακτήρας της Ρόδου συμβάλλουν στην επιτυχία αυτής της βιομηχανίας.

Αξιοσημείωτο είναι και το πλήθος των κωνοφόρων δέντρων κατά μήκος κιάλας του βουνού Αττάβουρου στο ξεκινώντας από το Νότιο - Δυτικό τμήμα του νησιού και καταλήγοντας Βόρειο - Ανατολικά. Παρ'ότι το μεσογειακό κλίμα και την ξηρότητα που υπάρχει τους καλοκαιρινούς μήνες τα κωνοφόρα μικρά δάση που έχει το νησί αποτελούνται από κυπαρίσσια

και πεύκα τα οποία μπορούν αν ευδοκιμήσουν σε αυτές τις συνθήκες.

Επιπλέον, η τουριστική βιομηχανία αποτελεί σημαντικό τμήμα της οικονομίας της Ρόδου. Οι παραλίες της νήσου, οι αρχαιολογικοί χώροι, και η παλιά πόλη της Ρόδου, που αποτελεί παγκόσμια κληρονομιά της UNESCO, προσελκύουν εκατομμύρια τουρίστες κάθε χρόνο. Η ανάπτυξη του τουρισμού έχει οδηγήσει σε αυξημένη οικονομική δραστηριότητα και υποδομές, όπως ξενοδοχεία, εστιατόρια, και ψυχαγωγικά κέντρα.

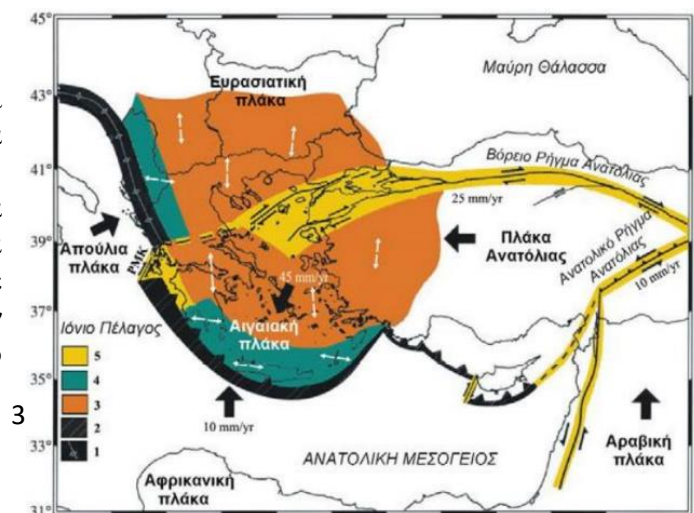
Συνοψίζοντας, η Ρόδος παρουσιάζει μια ποικιλία καλύψεων/χρήσεων γης, που πηγάζουν από την ποικιλία γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της. Η γεωργία, ο τουρισμός, η βιομηχανία και η αστική ανάπτυξη αποτελούν τις κύριες δραστηριότητες που διαμορφώνουν την οικονομία και το περιβάλλον της περιοχής.



Εικόνα 10: Χρήσεις Γης Corine Land Cover 2018 (Copernicus)

3.1.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Η περιοχή του Νοτίου Αιγαίου χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα, η οποία συχνά περιλαμβάνει την γένεση ισχυρών σεισμών. Αυτή η σεισμικότητα οφείλεται σε ποικίλα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά, τα οποία καθιστούν την περιοχή ιδιαίτερα ευάλωτη σε σεισμικές δραστηριότητες. Η κατανομή των επικέντρων σε όλη την έκταση του Νοτίου

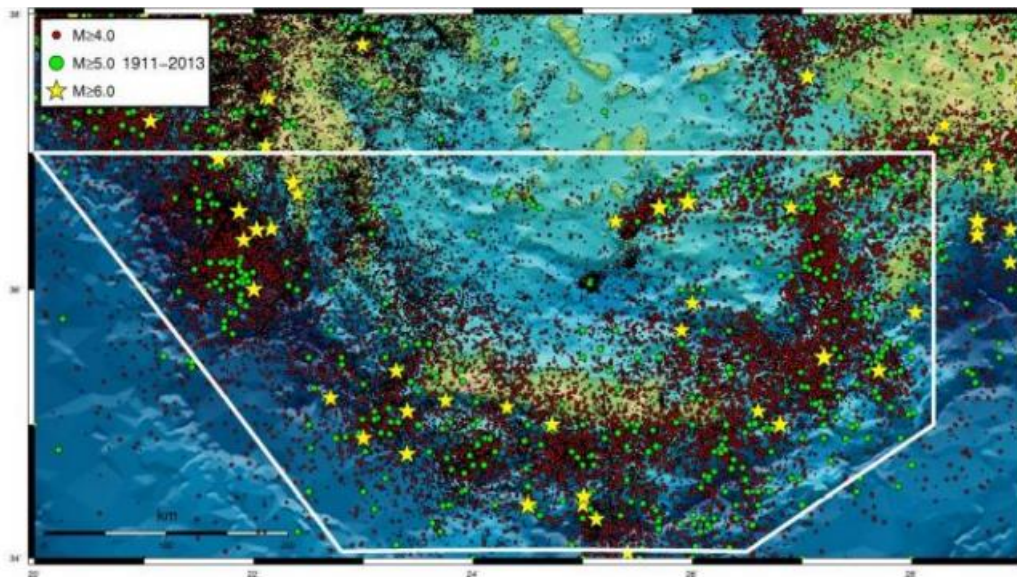


Εικόνα 11: Χάρτης απεικόνισης της ευρύτερης περιοχής της ανατολικής Μεσογείου με το γεωδυναμικό καθεστώς και την ταχύτητα κίνησης (Στεφάτος 2005).

Αιγαίου σκιαγραφεί ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά, όπως το Ελληνικό Τόξο, το οποίο συνδέεται με υψηλή σεισμική δραστηριότητα. (Μ.Σ.Καμπούτση,2022).

Η περιοχή της Ρόδου βρίσκεται στο σταυροδρόμι των Αφρικανικής και Ευρασιατικής πλακών. Η σύγκρουση αυτών των πλακών οδηγεί σε συνεχείς τεκτονικές κινήσεις, προκαλώντας σεισμούς και γεωλογικές αλλαγές στην περιοχή. Οι τελευταίες έρευνες δείχνουν ότι η Ρόδος εμφανίζει συνεχή σεισμική δραστηριότητα, με καταγραφή μικρών έως μεσαίων σεισμών (Jones & Brown, 2023). Οι μηχανισμοί αυτών των σεισμών συνδέονται κυρίως με τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών, ειδικότερα στις περιοχές των τεκτονικών συνόρων.

Στον παρακάτω χάρτη, παρατηρούμε ότι οι κύριες εδαφικές μετατοπίσεις με εστιακά βάθη μεγαλύτερα από 40 km εντοπίζονται κυρίως στο εσωτερικό μέρος του Ελληνικού Τόξου. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης της σεισμικής ζώνης Benioff (περιοχή υποβύθισης μιας τεκτονικής πλάκας κάτω από την άλλη ,μέχρι και 700 km) στο Νότιο Αιγαίο. Μια σημαντική συγκέντρωση σεισμών ενδιάμεσου βάθους βρίσκεται στην περιοχή κοντά στην Κω, όπου έχουν εντοπιστεί και τα μεγαλύτερα εστιακά βάθη των σεισμών.



Εικόνα 12: Χάρτης επικέντρων επιφανειακών σεισμών που έχουν καταγραφεί στο Νότιο Αιγαίο (Μ.Σ.Καμπούτση,2022)

Όπως μπορούμε να αντιληφθούμε από τα παραπάνω δεδομένα η σεισμική δραστηριότητα είναι αρκετά έντονη και συχνή στον νησί μελέτης μας και στην γύρω περιοχή. Το συμπέρασμα που πηγάζει είναι ότι υπάρχουν πολλές μικρομετακινήσεις του φλοιού κάτι που επηρεάζει τα δεδομένα μας και την φάση που επεξεργαζόμαστε, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω στις αξιολογήσεις που επιχειρήσουμε να κάνουμε μετά την διόρθωση.

3.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για την παραγωγή των συμβολογραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν Sentinel 1 Level-1 Single Look Complex (SLC) προϊόντα. Τα προϊόντα SLC είναι εικόνες στην πλευρική απόσταση προς το επίπεδο της διεύθυνσης των αζιμουθίων, στο επίπεδο της εικόνας της λήψης των δορυφορικών δεδομένων. Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας αντιπροσωπεύεται από μια μιγαδική τιμή (I και Q) και επομένως περιέχει πληροφορίες τόσο για την ένταση όσο και για τη φάση. Η επεξεργασία για όλα τα προϊόντα SLC έχει ως αποτέλεσμα να περιλαμβάνουν μια single look εικόνα χρησιμοποιώντας το πλήρες διαθέσιμο εύρος ζώνης σήματος. Οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες χρησιμοποιώντας δεδομένα τροχιάς και θέσης του δορυφόρου.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αποκτήθηκαν σε λειτουργία Interferometric Wide (IW) Swath. Ο Sentinel-1 IW χρησιμοποιεί δύο λωρίδες συχνοτήτων, την συχνότητα X-band (5,405 GHz) και την συχνότητα C-band (5,685 GHz). Η λωρίδα αναφέρεται στην περιοχή της επιφάνειας της Γης που καλύπτεται από ένα πέρασμα του δορυφόρου. Είναι η ζώνη που σαρώνεται από το ραντάρ κατά τη διάρκεια μιας πτήσης ή μιας τροχιακής διαδρομής του δορυφόρου. Η λειτουργία IW είναι η κύρια μέθοδος λήψης δεδομένων επί της ξηράς και τα δεδομένα αποκτούνται με πλάτος λήψης 250 km. και χωρική ανάλυση 5 m. επί 20 m. (single look). Σε αυτήν την λειτουργία, τα SLC προϊόντα περιέχουν μία εικόνα ανά υπο-λωρίδα και μία ανά κανάλι πόλωσης (συνολικά 3 μονοπολικές εικόνες ή 6 διπολικές ανά προϊόν). Η υπο-λωρίδα είναι μια διαίρεση της λωρίδας σε μικρότερες, διαχειρίσιμες περιοχές. Αυτό γίνεται για να επιτευχθεί υψηλότερη ανάλυση ή για να βελτιωθεί η ακρίβεια και η λεπτομέρεια των δεδομένων (ESA Sentinel-1 User Guide). Κάθε εικόνα υπο-λωρίδας αποτελείται από μια σειρά ριπών (bursts), όπου κάθε ριπή έχει υποστεί επεξεργασία ως ξεχωριστή εικόνα SLC (Jacob, A. et al.,2020). Οι εικόνες που ανατέθηκαν για την περιοχή μελέτης της Ρόδου είναι 117. Από 01/01/2016 έως 05/11/2019 δηλαδή καλύπτουν την χρονική περίοδο τεσσάρων χρόνων.

3.2.2 ΕΙΚΟΝΕΣ

Οι εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος και των γεωλογικών φαινομένων. Ωστόσο, η ατμοσφαιρική διασπορά του σήματος SAR μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στις εικόνες. Για τη διόρθωση αυτών των σφαλμάτων, χρησιμοποιείται η ατμοσφαιρική διόρθωση.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση στις εικόνες SAR βασίζεται στη χρήση μιας Master εικόνας που θεωρείται ότι έχει χαμηλότερο επίπεδο ατμοσφαιρικής διασποράς. Αυτή η εικόνα χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στις υπόλοιπες εικόνες (Slave).

- ❖ Αρχικά, τα συμβολογράμματα παράχθηκαν με τη χρήση του λογισμικού SNAP2STAMPS (<https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps>). Τα στάδια επεξεργασίας της συμβολομετρικής διαδικασίας που εφαρμόστηκαν με το εν λόγω λογισμικό ήταν : συν προσαρμογή Sentinel-1 απεικονίσεων, εφαρμογή τροχιακών διορθώσεων, αφαίρεση όρου φάσης επίπεδης γης και ψηφιακού μοντέλου εδάφους και παραγωγή συμβολογραμμάτων. Στη συνέχεια με την χρήση του λογισμικού STAMPS (<https://github.com/dbekaert/StaMPS>) τα στάδια επεξεργασίας που εφαρμόστηκαν ήταν: διόρθωση συμβολομετρικής φάσης, επιλογή σταθερών σκεδαστών, διόρθωση της φάσης του δικτύου σταθερών σκεδαστών και αποκατάσταση της φάσης των επιλεγμένων σταθερών σκεδαστών. Τα παραγόμενα συμβολογράμματα περιέχουν την αποκατεστημένη φάση των σταθερών σκεδαστών. Η παρακάτω σχέση εκφράζει την αποκατεστημένη διαφορά φάσης μεταξύ δυο εικόνων A και B για ένα σκεδαστή j .

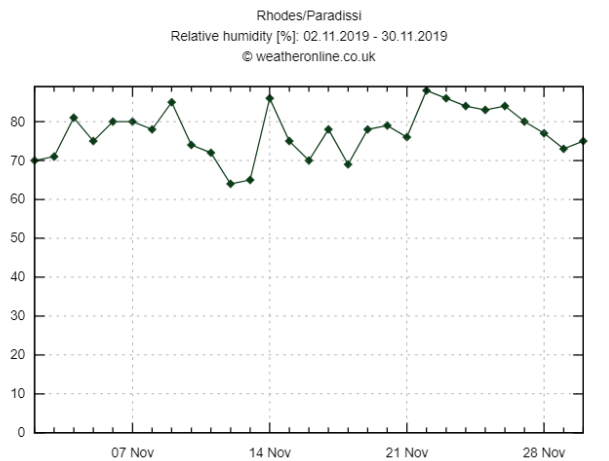
$$\Delta\varphi_{InSAR} = \varphi_{Master} - \varphi_{Slave} \quad \text{αποκατεστημένη} \quad (10)$$

$$\Delta\varphi_{InSAR}^j = \varphi_{Master}^j - \varphi_{Slave}^j \quad (11)$$

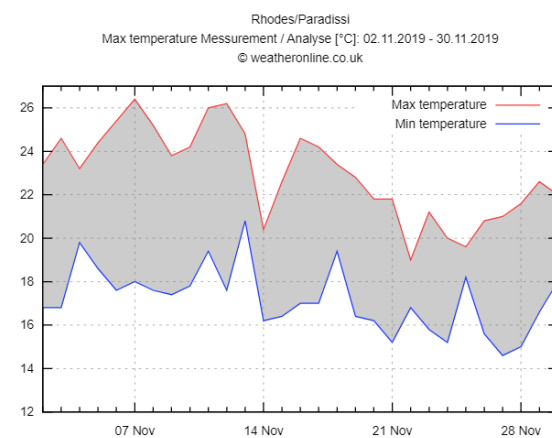
- ❖ Για την διορθωμένη φάση λόγω ατμόσφαιρας αφαιρείται από κάθε συμβολόγραμμα η τροποσφαιρική φάση (που υπολογίζεται από το λογισμικό του TRAIN) από την αποκατεστημένη φάση δηλαδή :

$$\Delta\varphi_{Corr} = \Delta\varphi_{InSAR} - \Delta\varphi_{Tropo} \quad (12)$$

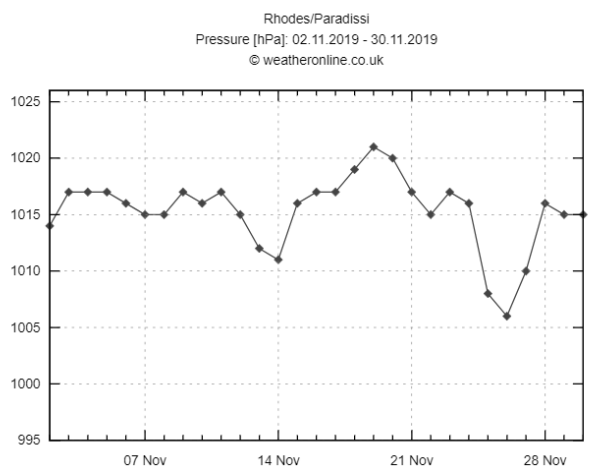
Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικοί πίνακες των ατμοσφαιρικών δεδομένων της ημερομηνίας λήψης της Master εικόνας. Θα παρατηρήσουμε ότι η ο δείκτης υγρασίας είναι κοντά στο **80%**, η ατμοσφαιρική πίεση είναι κοντά στα **1017 hPa** και η θερμοκρασία την συγκεκριμένη ημερομηνία κυμαινόταν μεταξύ **19° – 24° C** .



Σχήμα 4: Ποσοστά υγρασίας μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk)



Σχήμα 5: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk)



Σχήμα 6: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης μήνα Νοεμβρίου 2019 για το Νησί της Ρόδου (Πηγή : weatheronline.co.uk)

3.3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

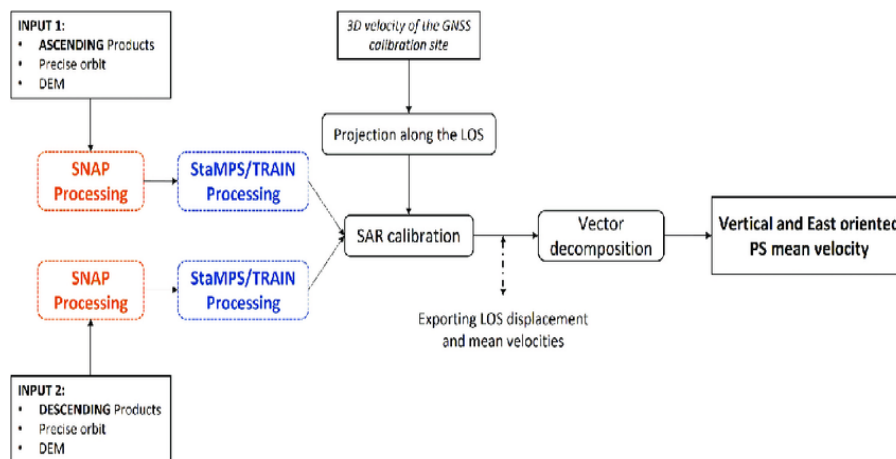
Για την έρευνα και την διεκπεραίωση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αρκετά λογισμικά που αφορούν την επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς το αντικείμενο της εργασίας αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που δεν μπορεί να το καλύψει πλέον μόνο ένα λογισμικό ή μία γλώσσα προγραμματισμού. Χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά STAMPS καθώς και το TRAIN TOOLBOX. Αναφορικά με τις γλώσσες προγραμματισμού:

- ❖ Η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για την επεξεργασία των δεδομένων και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με τις μεθόδους του *TRAIN TOOLBOX*. Με την χρήση της Matlab έγινε η τροποσφαιρική διόρθωση των δεδομένων με τις μεθόδους Linear, Power-law, GACOS, ERA5, παρήχθησαν εικόνες που δηλώνουν την μεταβολή της φάσης των συμβολογραμμάτων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα τυπικών αποκλίσεων της αποκατεστημένης φάσης, της τροποσφαιρικά διορθωμένης φάσης και υπολογίστηκε η μεταβολή τους. Για τις συγκεκριμένες ενέργειες που αναφέρθηκαν υπάρχουν ελεύθεροι αλγόριθμοι βιβλιοθήκες και 'ρουτίνες' στην γλώσσα (αναφέρονται και στο επόμενο κομμάτι της εργασίας) που επιτρέπουν αυτή την λεπτομερή αναπαραγωγή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
<https://github.com/dbekaert/TRAIN>.
- ❖ Η γλώσσα προγραμματισμού Python όπου συγκεκριμένα για τη μέθοδο με το μοντέλο ERA5 χρειάστηκε να δημιουργηθεί αλγόριθμος για την εισαγωγή, αποθήκευση, επεξεργασία και εξαγωγή των εικόνων και στην συνέχεια επεξεργασία με το λογισμικό του TRAIN . Χρησιμοποιήθηκαν οι εξειδικευμένες βιβλιοθήκες numpy, netcdf4 και matplotlib.
- ❖ SNAP2STAMPS. Λογισμικό προετοιμασίας συμβολογραμμάτων από δεδομένα Sentinel-1 <https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps> με σκοπό να εισαχθούν στο λογισμικό STAMPS
- ❖ Στο τέλος χρησιμοποιήθηκαν το Google Earth και το ελεύθερο λογισμικό QGIS για την κατανόηση της περιοχής μελέτης καθώς και την περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων όπου κρίθηκε αναγκαίο.

3.3.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ StaMPS

Το λογισμικό StaMPS (Stanford Method for PS) έχει αναπτυχθεί στο Stanford University της California και συγκεκριμένα με μεγάλη συνεισφορά από τον **ANDREW JOHN HOOPER** και έχει ως στόχο την αναγνώριση σταθερών σκεδαστών σε μία περιοχή μελέτης ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συμβολομετρική διαδικασία να είναι τα αποδοτικότερα και να οδηγούν σε αξιόπιστες αναλύσεις. Ο Hooper στηρίχθηκε σε προηγούμενες μελέτες για την εύρεση σταθερών σκεδαστών (e.g., Ferretti et al., 2001, Crosetto et al., 2003, Lyons and Sandwell, 2003, Werner et al., 2003, Kampes, 2005) και ανέπτυξε τον δικό του αλγόριθμο στη διδακτορική διατριβή του το 2006 για την παραμόρφωση του φλοιού λόγω ηφαιστειακής παραμόρφωσης με την επιλογή σταθερών σκεδαστών. Συνοπτικά η διαδικασία προϋποθέτει:

1. Σύνθεση συμβολογράμματος : Για την εφαρμογή του αλγορίθμου 12 συμβολογράμματα είναι ικανοποιητικά για τους αλγόριθμους εξαγωγής PS. Επιλογή της Master εικόνας με βάση τη μέγιστη συνάφεια της με τις υπόλοιπες, διόρθωση της φάσης της επίπεδης γης (flattening), υπολογισμός γωνιών κλίσης και θέασης, γεωαναφορά (geocoding) με τα δεδομένα τροχιάς και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής.
2. Αναγνώριση των σταθερών σκεδαστών (PS): Αρχικά αναλύεται η ένταση του ανακλώμενου σήματος των υποψήφιων σταθερών σκεδαστών για να υπολογιστεί η πιθανότητα (PS Probability) να υπάρχουν σταθεροί σκεδαστές σε μεμονωμένα Pixel, έπειτα ενισχύεται αυτή η επιλογή αναλύοντας την φάση τους μέσω επαναληπτικών διαδικασιών. Τέλος υπολογίζεται η πιθανότητα για τα Pixel τα οποία δεν ελήφθησαν υπόψιν στην αρχική εκτίμηση.
3. Επιλογή σταθερών σκεδαστών: Γίνεται η επιλογή των Pixels με βάση την πιθανότητα να είναι ένα εικονοστοιχείο PS η οποία έχει υπολογιστεί νωρίτερα, απορρίπτοντας εκείνα τα εικονοστοιχεία τα οποία είναι σταθερά μόνο σε συγκεκριμένα συμβολογράμματα και εκείνα των οποίων το σήμα υπερκαλύπτεται (Dominated) από σκεδαστές γειτονικών Pixel.
4. Εκτίμηση μετατόπισης: Μετά την επιλογή των σταθερών σκεδαστών απομονώνεται το σήμα λόγω παραμόρφωσης στα Pixels που υπάρχουν σταθεροί σκεδαστές. Η μέθοδος περιλαμβάνει την διαδικασία αποκατάστασης (Unwrapping) των τιμών της φάσης και την αφαίρεση εκτιμήσεων που παρεμβάλλουν στο σήμα, όπως ο ατμοσφαιρικός θόρυβος, μέσω αλγορίθμων. (Hooper, Andrew John, 2006)



Σχήμα 7: Διάγραμμα Ροής Λογισμικού StaMPS

3.3.2 TRAIN TOOLBOX

Το TRAIN Toolbox είναι μία προσπάθεια επιστημόνων από το Πανεπιστήμιο του Leeds (D.Bekaert et al., 2015c) να συμπεριλάβουν την ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων στο κομμάτι επεξεργασίας των εικόνων InSAR και δημοσιεύθηκε πρώτη φορά το 2014.

Είναι μία “εργαλειοθήκη” η οποία έχει μία σειρά από προγράμματα και αλγορίθμους (scripts) τα οποία υποστηρίζει η γλώσσα MATLAB αλλά και το λογισμικό της StaMPS εφόσον τα δεδομένα που εισάγουμε είναι συμβατά, κάτι που πολλές φορές έχει να κάνει με τη μορφοποίηση που υποστηρίζει (data format).

Βασικός στόχος του είναι η καλύτερη δυνατή απεικόνιση των συμβολογραμμάτων με αφαίρεση της ατμοσφαιρικής φάσης από την φάση του συμβολογράμματος (Slave-Master) ώστε να πάρουμε την σωστά διορθωμένη φάση απαλλαγμένη όσον το δυνατόν περισσότερο από ατμοσφαιρικά σφάλματα.

Το λογισμικό είναι ελεύθερο, είναι αδειοδοτημένο από την GNP GPL και οι χρήστες έχουν την επιλογή να το χρησιμοποιήσουν είτε μέσω του StaMPS είτε όχι. Υπάρχει και οργανωμένη κοινότητα χρηστών όπου σε συνεργασία με τους δημιουργούς του λογισμικού είναι πρόθυμη στο να απαντήσει ερωτήματα που δημιουργούνται από την διαδικασία της έρευνας.

Αναλυτικά το λογισμικό TRAIN περιλαμβάνει:

- Διόρθωση με δεδομένα από μετεωρολογικά μπαλόνια ή αερόσφαιρες (Weather Balloons):

Τα weather balloons, ή μετεωρολογικά μπαλόνια, είναι μέσα παρατήρησης που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων στην ατμόσφαιρα. Κατά κύριο λόγο, αυτά τα μπαλόνια χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν τις διάφορες στρώσεις της ατμόσφαιρας καθώς ανεβαίνουν σε υψόμετρα. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως "weather balloon sounding" ή "radiosonde sounding."

Τα weather balloons φέρουν έναν ειδικό αισθητήρα ραδιοβόλισης (radiosonde). Αυτός ο αισθητήρας περιέχει διάφορα μέσα μέτρησης όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση και συχνότητα ραδιοκυμάτων. Κρεμιέται από το μπαλόνι καθ' ύψος μέσω μιας λεπτής συρματοπλέξης (Patrick Santurette & Christo G.Georgiev, 2005).

Η διαδικασία ξεκινά όταν το μπαλόνι γεμίζεται με ήλιο ή υδρογόνο για να αναδυθεί. Καθώς το μπαλόνι ανεβαίνει, ο αισθητήρας συλλέγει συνεχώς δεδομένα και τα μεταδίδει πίσω στον υπολογιστή στο έδαφος μέσω ραδιοκυμάτων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα μπαλόνια βοηθούν τους μετεωρολόγους να κατανοήσουν την τρέχουσα κατάσταση της ατμόσφαιρας και να κάνουν προβλέψεις για τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Τα δεδομένα από τα μετεωρολογικά μπαλόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά στις τεχνικές διόρθωσης (Power-law Correction, MODIS Correction, MERRIS Correction) για να γίνει μία εκτίμηση των κλιμακωτών συντελεστών των τεχνικών διόρθωσης καθώς και να υπολογιστεί ο συντελεστής μετατροπής τιμών ακτινοβολίας σε τιμές οπισθοσκέδασης *PI-conversion factor*. Ωστόσο ο (Walters et al., 2013) έδειξε ότι οι τιμές αυτών των παραμέτρων δεν επηρεάζουν τον χάρτη καθυστέρησης.

- Το TRAIN περιλαμβάνει τον αλγόριθμο για την συλλογή των δεδομένων (Download Script)
- Εργαλειοθήκη για εκτίμηση των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων από τα μπαλόνια.

Ωστόσο στην περιοχή μελέτης μας δεν υπήρχαν δεδομένα από αυτές τις αερόσφαιρες και δεν χρησιμοποιήθηκε αυτή η επιλογή του TRAIN, αντίθετα χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές για τις παραμέτρους.

Τεχνικές τροποσφαιρικής διόρθωσης με χρήση συμβολογραμμάτων χρονοσειράς InSAR:

- Phase-Based Powerlaw correction:
 - Υπάρχει επιλογή να εισαχθούν συντελεστές των μεταβλητών της Powerlaw μεταξύ των συμβολογραμμάτων
 - Σταθερά αναπαραγωγή "παραθύρων" χρησιμοποιώντας πληροφορίες κορυφογραμμών του αναγλύφου της περιοχής.
- Phase-Based Linear correction
 - Εισάγεται ολόκληρο συμβολόγραμμα της περιοχής που δεν έχει υποστεί παραμόρφωση.
- Τεχνικές τροποσφαιρικής διόρθωσης με χρήση δεδομένων από το φασματό-ραδιόμετρο MERRIS:
 - Επιλογή να διαφέρουν οι συντελεστές μετατροπής για κάθε ημερομηνία SAR.
 - Αυτόματη προβολή των γεωδαιτικών συντεταγμένων.

Ωστόσο τα δεδομένα του φασματό-ραδιομέτρου MERRIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) το οποίο ήταν εγκατεστημένο στον δορυφόρο Envisat δεν μπορούσαν να ανακτηθούν και να συνεισφέρουν στη μελέτη μας καθώς η αποστολή του δορυφόρου τερματίστηκε το 2012

καθώς χάθηκε η “επικοινωνία” με τον δορυφόρο και οι προσπάθειες ανάκτησης της ήταν ανεπιτυχείς. Συνακόλουθα με τα προηγούμενα η μελέτη μας δεν περιλαμβάνει διόρθωση με δεδομένα MERRIS.

- Τεχνικές τροποσφαιρικής διόρθωσης με χρήση δεδομένων από το φασματό-ραδιομέτρου MODIS:
 - Επιλογή να διαφέρουν οι συντελεστές μετατροπής για κάθε ημερομηνία SAR.
 - Αυτόματη ανάκτηση και συγχώνευση δεδομένων από την υπηρεσία OSCAR.
 - Επιλογή επαναβαθμονόμησης του δείκτη MODIS PWV (Precipitable Water Vapor) με τον αντίστοιχο του MERRIS PWV*.

*Αν υπάρχουν δεδομένα από τους δέκτες MODIS και MERIS πραγματοποιείται μία νέα εκτίμηση του παράγοντα βαθμονόμησης με βάση τις τιμές του δείκτη PWV μεταξύ MERIS και MODIS χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο υπολογισμού. Ένα όριο συσχέτισης και ένα ελάχιστο ποσοστό 10% κοινών εικονοστοιχείων χρησιμοποιούνται ως ποσοτικό μέτρο για να αποφασιστεί εάν η εκτίμηση πρέπει να διατηρηθεί ή όχι. Εάν βρεθούν ημερομηνίες SAR που δεν υπάρχουν δεδομένα είτε για το MERIS είτε για το MODIS συμπληρώνονται με μία εκτιμώμενη μέση τιμή. Το αποτέλεσμα είναι οι τιμές που έχει καταγράψει ο δέκτης MODIS να επαναβαθμονομούνται.

Τα δεδομένα του δέκτη MODIS μπορούσαν να αποκτηθούν μέσω του TRAIN από μία ειδικά διαμορφωμένη πλατφόρμα, την OSCAR (Online Service For Correcting Atmosphere in Radar) που προσφερόταν από την υπηρεσία JPL με τυποποίηση(format) τέτοια ώστε να είναι συμβατή με το TRAIN. Η υπηρεσία αυτή καταργήθηκε το 2017. Έγιναν προσπάθειες να ανακτηθούν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα χειροκίνητα όπως και κατορθώθηκε αλλά παρουσιάστηκε και μετέπειτα το πρόβλημα της συμβατότητας των δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν οι γλώσσες GDAL και Python και η GMT (Generic Mapping Tools) ώστε το format και η προβολή να είναι τα κατάλληλα (από netCDF σε grd), μία διαδικασία που γινόταν αυτόματα από το λογισμικό του OSCAR αλλά στην διόρθωση της ατμοσφαιρικής φάσης τα αποτελέσματα ήταν λανθασμένα, η φάση που πρόκυπτε είχε πολύ υψηλές τιμές που δεν μπορούσαν να δικαιολογηθούν, οπότε η μέθοδος δεν συμπεριλήφθηκε στο τεύχος αυτό. Η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποτελέσει έρευνα για μελλοντικές μελέτες.

- Τεχνικές τροποσφαιρικής διόρθωσης με χρήση δεδομένων μοντέλων καιρού:
 - Από MERRA και MERRA2.
 - Από Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS).
 - Από Weather Research and Forecasting Model (WRF)
 - Από ERA5

Τέλος τα δεδομένα του MERRA-2 (καθώς το MERRA είναι εκτός λειτουργίας από το 2016) και της WRF δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς υπήρχαν προϊόντα από δύο μετεωρολογικά μοντέλα αυτά του GACOS και εκείνα της ERA5 οπότε δεν κρίθηκε απαραίτητο. Εν κατακλείδι καταλήξαμε σε 4 μεθόδους ατμοσφαιρικής διόρθωσης που παρουσιάζονται αναλυτικά στα παρακάτω κεφάλαια.

<i>Techniques</i>	<i>Hydrostatic delay</i>	<i>Wet delay</i>
MERIS (Spectrometer)	NO*	YES – Including turbulent
MODIS (Spectrometer)	NO*	YES – Including turbulent
WRF (Weather model)	YES	YES – Including turbulent
ERA (weather model)	YES	YES – Including turbulent
MERRA/MERRA2 (weather model)	YES	YES – Including turbulent
GACOS (weather model-based)	Yes - Combined (Including turbulent)	
Linear correction (uniform troposphere)	Yes - Combined (no turbulence)	
Power-law correction (spatially-varying troposphere)	Yes - Combined (no turbulence)	

Πίνακας 2: Τεχνικές Διόρθωσης Ατμοσφαιρικής Φάσης με την εργαλειοθήκη TRAIN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ TRAIN

Το λογισμικό για να εκτελέσει την διαδικασία της διορθώσεως προϋποθέτει τα αρχεία αποθήκευσης και εισόδου να έχουν συγκεκριμένη δομή και διάταξη. Τα αρχεία αυτά είναι αρχεία μεταδεδομένων της εκάστοτε περιοχής μελέτης και οι δορυφορικές λήψεις. Ωστόσο όσοι έχουν επεξεργαστεί τα αρχεία δεδομένων με το λογισμικό StaMPS μπορούν να παραλείψουν την συγκεκριμένη προεργασία καθώς οι θέσεις των παραμέτρων (Paths) έχουν ήδη δημιουργηθεί ώστε το λογισμικό να αναζητήσει αυτά τα αρχεία και να εκτελέσει τον αλγόριθμο διόρθωσης. Συγκεκριμένα χρειάζονται :

- Το αρχείο τοπογραφίας – υψομέτρου το οποίο περιέχει πληροφορία για το υψόμετρο των σταθερών σκεδαστών ([hgt_matfile](#)). Χρησιμοποιείται στην μέθοδο Linear και Power-law.

- Το αρχείο των αποκατεστημένων συμβολογραμμάτων αποθηκευμένο σε μορφή πίνακα (*phuw_matfile*). Χρησιμοποιείται μόνο στη μέθοδο Linear και Power-law.
- Το αρχείο με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής (γεωγραφικό μήκος – γεωγραφικό πλάτος) ορισμένες σε μοίρες (*ll_matfile*). Χρησιμοποιείται σε κάθε μέθοδο.
- Το αρχείο με τις ημερομηνίες των συμβολογραμμάτων (*ifgday_matfile*) στο κατάλληλο αριθμητικό format (YYYYMMDD). Οι τιμές στην πρώτη στήλη του πίνακα αντιπροσωπεύουν την Master εικόνα ενώ οι τιμές στην δεύτερη στήλη την Slave. Χρησιμοποιείται σε όλες τις μεθόδους.
- Το αρχείο με την ώρα “περάσματος” του δορυφόρου πάνω από την περιοχή μελέτης (UTC_sat) στην μορφή “HH:MM” δηλαδή ώρες και λεπτά. Χρησιμοποιείται σε όλες τις μεθόδους με μοντέλα καιρού και στην επίλυση MODIS.
- ❖ Το αρχείο με την γωνία θέασης (*look_angle*). Η γωνία πρόσπτωσης είναι τις περισσότερες φορές και η σωστή εναλλακτικά όμως μπορεί να υπολογιστεί η γωνία θέασης σε rad. Η γωνία θέασης έχει προεπιλεγμένη τιμή αυτή στις 21 °. Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί γωνία θέασης για κάθε εικονοστοιχείο ή για κάθε σταθερό σκεδαστή, δημιουργώντας ένα καινούργιο αρχείο κάτι που δεν κρίθηκε απαραίτητο καθώς οι διορθώσεις μας δεν φτάνουν σε τέτοιο βαθμό εξειδίκευσης. Χρησιμοποιείται στις διορθώσεις καιρικών μοντέλων και στην επίλυση MODIS.

$$look\ angle = \frac{21}{180} \cdot \pi \quad (13)$$

- Το αρχείο με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής (*demfile*). Μπορεί να είναι της μορφής *grd*, *rsc*, *xml*. Περιέχει πληροφορίες για την ανάλυση των Pixel και το γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Χρησιμοποιείται στις διορθώσεις καιρικών μοντέλων.

4.2. ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η εξαγωγή της τροποσφαιρικής φάσης ή τροποσφαιρικής καθυστέρησης πραγματοποιήθηκε με τέσσερις μεθόδους του λογισμικού:

- Από την γραμμική σχέση συσχέτισης της συμβολομετρικής φάσης με την τοπογραφία (Linear Correction).
- Από την εκθετική σχέση συσχέτισης συμβολομετρικής φάσης και τοπογραφίας (Power-law Correction).
- Από αριθμητικά μοντέλα καιρού της υπηρεσίας GACOS.
- Από μοντέλα ανασύνθεσης για την πρόγνωση καιρού της υπηρεσίας ERA5.

4.3. ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Η γραμμική μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης της φάσης είναι μια μέθοδος όπου η τροποσφαιρική καθυστέρηση θεωρείται ότι εξαρτάται από την τοπογραφία της περιοχής (Phase Based Method) και μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά κατευθείαν από το συμβολόγραμμα.

Η διόρθωση είναι σημαντική για την ακριβή εκτίμηση της φάσης του σήματος και την ανάλυση της εικόνας για την εξαγωγή πληροφοριών όπως η ανίχνευση και παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων, η μέτρηση της απόστασης, η εκτίμηση του υψομέτρου και άλλων γεωφυσικών παραμέτρων.

Βασίζεται στην παρατήρηση ότι η φάση του σήματος που παράγεται από τον RADAR εξαρτάται γραμμικά από την πορεία του σήματος μέσω της ατμόσφαιρας. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά της φάσης μεταξύ δύο σημείων στην εικόνα SAR εξαρτάται από την πορεία του σήματος μέσω της ατμόσφαιρας μεταξύ αυτών των σημείων.

Πραγματοποιείται με τη χρήση μοντέλων που εκτιμούν την κλίση της φάσης στην εικόνα. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων για την εκτίμηση της κατακόρυφης και οριζόντιας κατανομής του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, καθώς και στη χρήση δεδομένων SAR για την εκτίμηση της κλίσης της φάσης στην εικόνα.

Η σχέση που την περιγράφει είναι **γραμμική** και δίνεται από τον τύπο :

$$\Delta\varphi_{tropo} = K_{\Delta\varphi} h + \Delta\varphi_0 \quad (14)$$

Όπου $K_{\Delta\varphi}$ είναι ένας συντελεστής χωρικά μεταβαλλόμενος ο οποίος συνδέει την τροποσφαιρική φάση με την τοπογραφία και χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το τροποσφαιρικό σήμα σε όλο το συμβολόγραμμα και $\Delta\varphi_0$ η συμβολομετρική φάση η οποία αναπαριστά μία σταθερά σε περιοχή που δεν έχει υποστεί παραμόρφωση και μπορεί να μην ληφθεί υπόψιν καθώς απλώς αναπαριστά μια σταθερή μεταβολή.

► Υπάρχουν δύο περιορισμοί για την γραμμική αυτή διόρθωση, ο πρώτος προϋποθέτει να γίνει σε περιοχή που δεν έχει υποστεί παραμόρφωση (**non-deforming region**). Ο δεύτερος περιορισμός υποθέτει ότι η σχέση παραμένει γραμμική μεταξύ τοπογραφίας και φάσης σε όλο το συμβολόγραμμα όσο αυτό δεν συνεισφέρει στην χωρική μεταβολή των τροποσφαιρικών ιδιοτήτων.

► Η Γραμμική Τροποσφαιρική διόρθωση συνήθως δίνει καλή εκτίμηση για **μικρές εκτάσεις**. Σε μεγαλύτερες εκτάσεις άνω των 100 km. δεν μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα εξαιτίας της χωρικής μεταβολής και δομής της ατμόσφαιρας .

Για την υλοποίηση της μεθόδου μέσα από την εργαλειοθήκη του TRAIN έπρεπε να καθοριστούν μια σειρά παραμέτρων όπως η τοπογραφία της περιοχής, η πρόσβαση στα αρχεία με τα 116 συμβολογράμματα της περιοχής, οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τους, καθώς και να επιλεγεί η διόρθωση να γίνει σε όλο το συμβολόγραμμα όπως αναφέραμε στην προετοιμασία του λογισμικού.

Σε επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση της διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με την γραμμική μέθοδο και σε συνάρτηση με αυτή η τυπική απόκλιση της αποκατεστημένης φάσης των συμβολογραμμάτων ώστε να υπάρχει μία ενδεικτική εικόνα των αποτελεσμάτων.

Η ανάλυση της τυπικής απόκλισης της διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης σε σχέση με την αποκατεστημένη φάση πριν τη διόρθωση των εικόνων σε διαγράμματα αποτελεί σημαντική ένδειξη της διόρθωσης. Η απόκλιση αυτή προκύπτει από την επίδραση της ατμόσφαιρας στην παρατήρηση των αντικειμένων και μπορεί να οδηγήσει σε ασάφεια και σφάλματα στις εικόνες. Με τη χρήση προηγμένων τεχνικών διόρθωσης, είναι δυνατόν να ανακτηθεί η αποκατεστημένη φάση των εικόνων, ενισχύοντας την αξιοπιστία των αναλύσεων, κάτι που θα εξετάσουμε μετέπειτα.

Η σύγκριση των συμβολογραμμάτων πριν και μετά τη διόρθωση αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για την αξιολόγηση της απόδοσης των μεθόδων διόρθωσης και την προσαρμογή τους για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.

4.4. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ POWER-LAW

Η Power-law είναι και αυτή άλλη μία διόρθωση με βάση το συμβολόγραμμα (Phase-Based Method) η οποία δίνει μια δυναμική προσέγγιση στην ατμοσφαιρική διόρθωση σε σχέση με την Γραμμική διόρθωση. Η σχέση που την περιγράφει είναι εκθετική και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

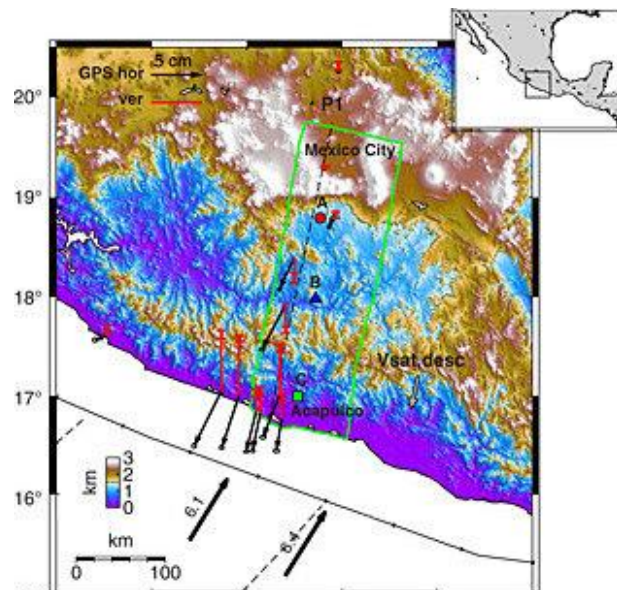
$$\Delta_{\phi_{tropo}} = K'_{\Delta\phi}(h_0 - h)^{\alpha} \quad (15)$$

$$K'_{\Delta\phi} = K'_{\phi_{master}} - K'_{\phi_{slave}} \quad \text{όπου } h < h_0 \quad (16)$$

Όπου όπως και στην Γραμμική μέθοδο, η $K'_{\Delta\phi}$ είναι μια χωρικά μεταβαλλόμενη και άγνωστη παράμετρος που περιγράφει την σχέση τοπογραφίας και τροποσφαιρικής φάσης, και α είναι σταθερά η οποία αποκτάται από μετεωρολογικά μπαλόνια (**Balloon Sound Data**) τα οποία δεν λάβαμε υπόψη στις μετρήσεις μας καθώς δεν υπήρχαν σταθμοί στην περιοχή για να ανακτηθούν όποτε χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη τιμή. Αυτή είναι **1.6**. Το h_0 είναι το ύψος εκείνο στο οποίο δεν υπάρχει τροποσφαιρική καθυστέρηση του σήματος και θεωρείται ότι το σήμα μηδενίζεται. Αυτό έχει οριστεί στα 10 χιλιόμετρα στην περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα από τα μπαλόνια, διαφορετικά ορίζεται από την μηδενική μέτρηση των μπαλονιών.

► Η μέθοδος χωρίζει την εικόνα μελέτης σε πολλαπλά ορθογώνια τμήματα “παράθυρα” (Windows) τα οποία καθορίζουμε εμείς κατά την εκτίμηση μας και στα οποία υπολογίζεται η σχέση τοπογραφίας και φάσης. Η σχέση αυτή παρεμβάλλει σε όλα τα σημεία (data points) σταθμίζοντας τα ορθογώνια παράθυρα με την απόσταση τους από τα σημεία.

► Η επιλογή αυτών των παραθύρων είναι αρκετά κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου καθώς ο συντελεστής $K'_{\Delta\phi}$ υπολογίζεται “τοπικά” σε κάθε ένα τέτοιο παράθυρο. Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής παρεμβάλλεται σε όλα τα σημεία του συμβολογράμματος. Αυτή η τιμή παρεμβολής κάθε σημείου συνεισφέρει στον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου όρου της άγνωστης σταθεράς $K'_{\Delta\phi}$ με το βάρος να είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης του παραθύρου από το σημείο. Έπειτα το τροποσφαιρικό σήμα υπολογίζεται αντικαθιστώντας τις εκτιμώμενες τιμές στην εξίσωση (16). Εάν δεν χρησιμοποιηθεί κανένα παράθυρο και έχουμε μόνο μία τιμή για την $K'_{\Delta\phi}$ για όλο το συμβολόγραμμα, η μέθοδος μετατρέπεται σε γραμμική (Linear), (Bekaert et al.,2015).



► Ο αλγόριθμος του TRAIN ζητάει από τον χρήστη να παραχωρήσει κάποιες παραμέτρους προτού προβεί στην ατμοσφαιρική διόρθωση.

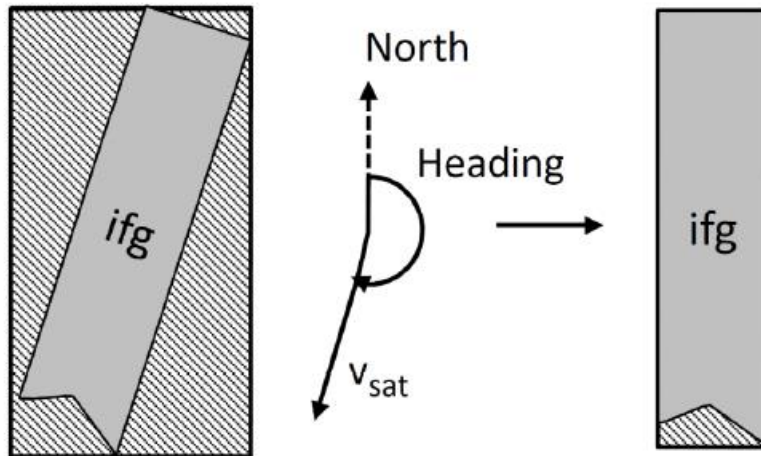
► Ο αλγόριθμος σου δίνει την επιλογή να ορίσεις εσύ μία έκταση λαμβάνοντας υπόψη τις κορυφογραμμές που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης, καθώς μόνο τα “παράθυρα” εκείνα που δεν εμποδίζονται από μεγάλες κορυφές συμβάλλουν στην σταθμισμένη εκτίμηση των σημείων.

► Παρ’ όλα αυτά επειδή η διόρθωση που μας ενδιαφέρει δεν περιορίζεται μόνο στο βουνό του Αττάρυβου και καθώς το υψόμετρο του όπως αναφέραμε νωρίτερα είναι μικρό δηλώσαμε η μεταβλητή `powerlaw_ridge_constraint` να έχει μηδενική τιμή. *Ενδεχομένως σε μελλοντικές μελέτες όπου βουνοκορφές μεταβάλλουν σημαντικά την τοπογραφία η προσέγγιση χρειάζεται να είναι διαφορετική.*

► Έπειτα ζητούνται δεδομένα από τα μετεωρολογικά μπαρόνια ώστε να υπολογιστεί μια μέση τιμή για της μεταβλητές της Power-law δηλαδή το h_0 και το α . Επειδή δεν είχαμε αυτά τα δεδομένα και επειδή αυτό το βήμα δεν είναι υποχρεωτικό πήραμε τις προτεινόμενες τιμές και προχωρήσαμε στο επόμενο στάδιο εφόσον δεν υπάρχουν δεδομένα για την περιοχή (όπως αναφέραμε προηγουμένως).

► Στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου τα δεδομένα InSAR στρέφονται προς την κύρια γωνία πορείας. Ακόλουθα τα δεδομένα μας παρεμβάλλονται από ένα πλέγμα το οποίο ορίζει ο χρήστης από το αρχείο `powerlaw_xy_res` όπου στην ουσία είναι το μέγεθος του πλέγματος το οποίο δεν πρέπει να είναι μικρότερο της ανάλυσης της οποία λήφθηκαν τα InSAR δεδομένα.

► Στην συνέχεια πραγματοποιείται μετασχηματισμός Fourier. Από προεπιλογή ο μετασχηματισμός αυτός είναι δισδιάστατος από το πεδίο του χώρου στο πεδίο της συχνότητας (2D). Χρησιμοποιούνται φίλτρα συχνοτήτων για να περιορίσουν τον λευκό θόρυβο (White Noise).



Σχήμα 8: Στροφή δεδομένων(συμβολογραμμάτων) προς την πορεία του δορυφόρου (Πηγή:D.Bekaert 2015c)

► Στο τέταρτο βήμα γίνεται η επιλογή των χωρικών φίλτρων. Τα χωρικά φίλτρα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος είναι τα φίλτρα **Butterworth**. Τα χωρικά φίλτρα Butterworth είναι μια κατηγορία φίλτρων που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία σήματος και εικόνας. Αυτά τα φίλτρα είναι γνωστά για την ομαλότητα τους στο πεδίο της συχνότητας.

Τα χωρικά φίλτρα Butterworth εφαρμόζονται σε εικόνες και χρησιμοποιούνται για τη μείωση του θορύβου ή την εξομάλυνση των συνθέτων συχνοτήτων ενός σήματος. Έχουν την ιδιότητα να παρέχουν ομαλή μετάβαση μεταξύ των περιοχών υψηλής και χαμηλής συχνότητας, χωρίς να προκαλούν απότομες αλλαγές στο πεδίο της συχνότητας.

Το χωρικό φίλτρο Butterworth προκαλεί την απομάκρυνση ή τη μείωση των συχνοτήτων που βρίσκονται πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο κοπής. Το όριο κοπής καθορίζεται από την τάξη του φίλτρου και τον αριθμό των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του.

Το μέγεθος τους δεν πρέπει να ξεπερνάει την μεγαλύτερη διάσταση της εικόνας (401*273 μέτρα) ούτε να είναι δύο φορές μικρότερο από την χωρική ανάλυση των δεδομένων (**Nyquist Theory**) η οποία είναι 200*200 (μέγεθος κανάβου) **μέτρα**.

► Στο τελευταίο βήμα γίνεται σύγκριση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE της Powe-law με κάποια άλλη ατμοσφαιρική διόρθωση που έχουμε πραγματοποιήσει. .

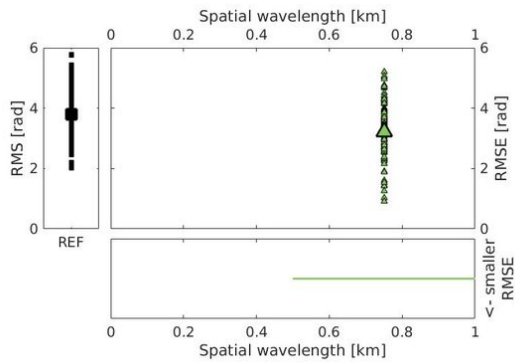
Μετά από πολλές δοκιμές (trial and error) συνδυασμού των μεταβλητών οι οποίες είναι κρίσιμες για τα αποτελέσματα της μεθόδου καταλήξαμε στις παραμέτρους εκείνες που δίνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα και αυτό σε σύγκριση με το τελευταίο βήμα της μεθόδου δηλαδή το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE.

Συμπερασματικά η επιλογή των μεταβλητών που έγινε κατά την μέθοδο είναι η εξής:

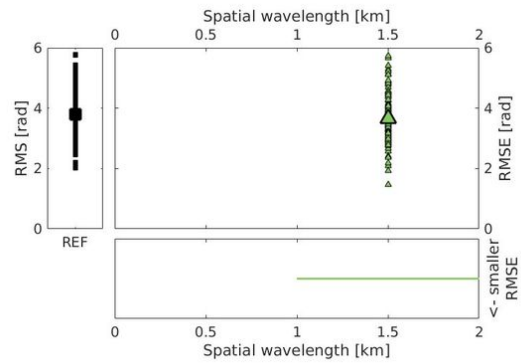
- Το σύνολο των “παραθύρων” για κάθε συμβολόγραμμα είναι 6 και για να δημιουργηθούν, η μεταβλητή *powerlaw number of patches* πρέπει να πάρει την τιμή 1.
- Η ανάλυση των δεδομένων επιλέχθηκε να είναι 500*500 μέτρα και για χάρη υπολογιστικού χρόνου. Δεν επηρεάζονται τα αποτελέσματα αν οριστεί μικρότερη, λόγω χάρη 200*200 μέτρα, καθώς

καθοριστικό ρόλο παίζουν η επιλογή των χωρικών φίλτρων αλλά και η επιλογή του πλήθους των ορθογώνιων παραθύρων.

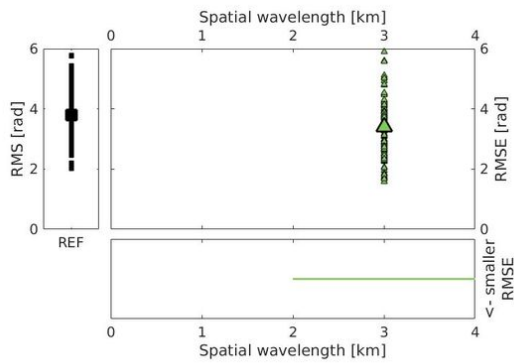
- Τα μεγέθη των χωρικών φίλτρων των καναλιών με βάση τις αρχές διατήρησής τους και την επιλέχθηκαν να είναι τα εξής : [500,1000],[1000,2000],[2000,4000],[4000,8000],[8000,16000].
- Η διόρθωση έγινε με καθένα από αυτά τα χωρικά φίλτρα ξεχωριστά και παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες αντίστοιχα με αύξουσα σειρά.



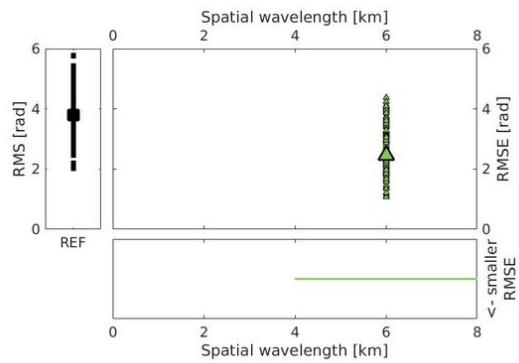
Σχήμα 9: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 500m-1km



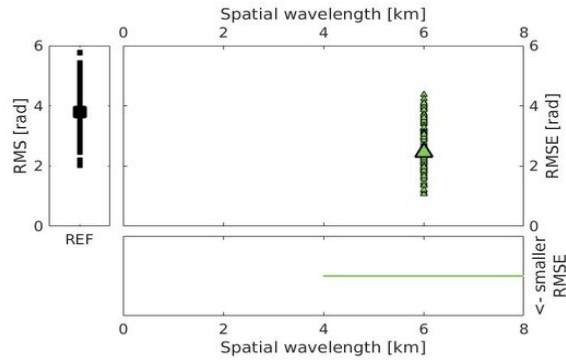
Σχήμα 10: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 1km-2km



Σχήμα 11: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 2km-4km



Σχήμα 12: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 4km-8km



Σχήμα 13: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE χωρικού φίλτρου 8km-16km

• Συμπερασματικά δύο χωρικά φίλτρα έδιναν την μικρότερη τιμή σφάλματος (αριστερά στο διάγραμμα με την μαύρη γραμμή φαίνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της ERA5) και αυτά ήταν των 4km-8km και 8km-16km όπου η τιμή σφάλματος είναι κοντά στο 2, αλλά επιλέχθηκε το φίλτρο 4km με 8km καθώς το μεγαλύτερο φίλτρο των 8km-16km είχε δύο τιμές που παρέκκλιναν περισσότερο από την μέση τιμή. Πρακτικά υπάρχουν μικρές διαφορές στην τιμή της διορθωμένης φάσης οπότε οποιοδήποτε φίλτρο από τα δύο μπορούσε να επιλεγεί.

• Οι επιλογές που είχαμε για να γίνει η σύγκριση του ατμοσφαιρικού σφάλματος ήταν η μέθοδος της αποκατεστημένης φάσης για μικρές βάσεις (small baselines), δεδομένα δεκτών MODIS και MERIS, όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα και με μεθόδους καιρικών μοντέλων όπου προτιμήθηκε η ERA5. Η επιλογή της μεθόδου ERA5 κρίνεται ικανοποιητική καθώς η μέθοδος περιέχει τις συνιστώσες της ξηρής και υγρής ατμόσφαιρας όπως και η μέθοδος της Power-law αλλά και της ατμοσφαιρικής διατάραξης (turbulence) οπότε είναι μία αντιπροσωπευτική μέθοδος για σύγκριση.

4.5. GENERIC ATMOSPHERIC CORRECTION ONLINE SERVICE (GACOS)

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ (WEATHER MODEL METHODS)

Η υπηρεσία ατμοσφαιρικής διόρθωσης GACOS έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Newcastle (2016) και εξαρτάται από αριθμητικά μοντέλα καιρού NWM (Numerical Weather Models). Η υπηρεσία χρησιμοποιεί ένα μοντέλο επαναληπτικής τροποσφαιρικής αποσύνθεσης ITD για να ξεχωρίσει τα στρωματοποιημένα και “ταραχώδη” σήματα από την τροποσφαιρική καθυστέρηση, ώστε να παράγει προϊόντα υψηλής χωρικής ανάλυσης, χάρτες ζενίθ (ZTD Maps) της συνολικής καθυστέρησης οι οποίοι χρησιμοποιούνται για διόρθωση των μεθόδων INSAR καθώς και για άλλες εφαρμογές. Η υπηρεσία έχει τα εξής πλεονεκτήματα :

- Παγκόσμια διαθεσιμότητα και δεδομένα.
- Λειτουργία σε δεδομένα πραγματικού χρόνου (real time mode).

- Εύκολα προσβάσιμη και λειτουργική.

- Οι χρήστες ενημερώνονται για την απόδοση του μοντέλου και για το αν ενδείκνυται διόρθωση στα δεδομένα τους.

Ακόμα οι βάσεις δεδομένων της υπηρεσίας χρησιμοποιούν :

- Δεδομένα υψηλής ανάλυσης από μοντέλα καιρού (weather model ECMWF) με χωρική ανάλυση 0.125 μοίρες και περιοδικότητα 6 ώρες.

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους STRM DEM (S60 – N60) το οποίο έχει δημιουργηθεί από την αποστολή Shuttle Radar Topography Mission. Το μοντέλο περιέχει πληροφορίες για σχεδόν το 80% της γήινης επιφάνειας. Η συλλογή των δεδομένων έχει γίνει από δύο κεραίες.

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM (Global Digital Elevation Map) από την κοινή αποστολή Ιαπωνίας και Η.Π.Α Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) με 99% παγκόσμια κάλυψη και προϊόντα σε Geotiff format.

Τα δεδομένα χρειάστηκε να ανακτηθούν από τον σύνδεσμο <http://www.gacos.net/> . Οι ημερομηνίες είχαν το εύρος 2016-01-01 έως 2019-11-17.

Για να μπορέσουμε να έχουμε ταύτιση με τα συμβολογράμματα της αποκατεστημένης φάσης χρειάστηκε να ορίσουμε στο σύστημα παραμέτρους οι οποίες εκτός αυτής της ημερομηνίας ήταν και η ώρα που περνάει ο δορυφόρος σε UTC : time (για τα δεδομένα ήταν η 16:07) καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Για την ακρίβεια χρειάστηκε να δώσουμε το μέγιστο και ελάχιστο γεωγραφικό μήκος και πλάτος συντεταγμένων για να οριστεί η περιοχή.

Η μέθοδος της ατμοσφαιρικής διόρθωσης GACOS μαζί με την Γραμμική μέθοδο ήταν οι πιο απλουστευμένες και εύκολες στην εκτέλεση μέθοδοι. Τα βήματα για την ολοκλήρωση της μεθόδου ήταν τα εξής:

- ❖ Ανάκτηση των δεδομένων με τις σωστές γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής, παραμετροποίηση των ημερομηνιών λήψης στο κατάλληλο format για να υπολογιστούν από τον αλγόριθμο του TRAIN (YYYYMMDD), εισαγωγή της ώρας λήψης και σύνδεση του φακέλου των δεδομένων με τον αλγόριθμο (Path).
- ❖ Στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου υπολογίζονται η ζενίθια τροποσφαιρική καθυστέρηση για υγρή και ξηρή ατμόσφαιρα (zenith **dry** and **wet** delay). Οι παράμετροι που χρειάζονται είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής και η ψηφιακή αναπαράσταση της τοπογραφίας της περιοχής (DEM).
- ❖ Υπολογισμός της τροποσφαιρικής InSAR καθυστέρησης, οπτικοποίηση και παραγωγή συμβολογραμμάτων. Για το τρίτο βήμα χρειάζεται να ορισθούν η γωνία θέασης (**look angle**) και το μήκος κύματος του ραντάρ (**wavelength**). Το μήκος κύματος είχε προεπιλεγμένη επιλογή όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, στα 0.00562 m.

Για την εξακρίβωση και κατανόηση της μεθόδου ατμοσφαιρικής διόρθωσης GACOS, αναπτύξαμε ένα προγραμματιστικό εργαλείο στο περιβάλλον MATLAB. Χρησιμοποιήσαμε γραφικές

παραστάσεις παρόμοιες με προηγούμενες μεθόδους, με σκοπό την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και των διαδικασιών που εφαρμόζονται κατά την ατμοσφαιρική διόρθωση. Μέσω αυτών των γραφικών παραστάσεων, αναλύσαμε συμβολογράμματα με μικρή και μεγάλη τυπική απόκλιση με σκοπό να κατανοήσουμε πώς η μέθοδος GACOS λειτουργεί σε διαφορετικές συνθήκες.

Κατά την ανάλυση, εστιάζουμε στις αλλαγές που συμβαίνουν στις γραφικές παραστάσεις και στα συμβολογράμματα όταν παράμετροι, όπως η τυπική απόκλιση του συμβολογράμματος, διαφέρουν. Μελετάμε τις επιδράσεις των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια και τη σταθερότητα της διόρθωσης, και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα με ερμηνείες για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης.

Η χρήση των γραφικών παραστάσεων και των συμβολογραμμάτων σε συνδυασμό με την ανάλυση των διαφορετικών σεναρίων μας επιτρέπει να κατανοήσουμε πλήρως την λειτουργία της μεθόδου ατμοσφαιρικής διόρθωσης GACOS και να εξασφαλίσουμε την κατάλληλη προσαρμογή και βελτιστοποίηση για διάφορες συνθήκες και απαιτήσεις εφαρμογών.

4.6. ERA 5 (ECMWF) GLOBAL REANALYSIS

Η ERA 5 είναι η πέμπτη γενιά ανάλυσης της υπηρεσίας ECMWF (European Center Of Medium – Range Weather Forecasts). Είναι ένα μοντέλο ανάλυσης καιρού (weather model) που χρησιμοποιεί δεδομένα δορυφορικής παρατήρησης και προηγμένες τεχνικές αφομοίωσης (assimilation) τα οποία καταλήγουν σε ένα ποιοτικότερο “προϊόν”.

Συλλέγει παγκόσμια δεδομένα και μάλιστα σε ωριαία βάση, σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα προϊόντων που αφορούν την ατμόσφαιρα (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) τους ανέμους, την ακτινοβολία, την βλάστηση, τα κύματα της θάλασσας καθώς και τον ηπειρωτικό φλοιό κτλ, τα οποία ανανεώνονται καθημερινά.

Χρησιμοποιεί την τεχνική της ανασύνθεσης (reanalysis) όπου μία παλαιότερη πρόβλεψη συνδυάζεται με νέες παρατηρήσεις ώστε να γίνει μία καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας. Επειδή δεν υπάρχει ο περιορισμός της ωριαίας πρόβλεψης των συνθηκών, οι παρατηρήσεις μπορούν να συνδυαστούν με δεδομένα αρκετά παλαιότερων ετών ώστε το τελικό προϊόν να είναι υψηλής ποιότητας.

Η επιλογή των προϊόντων μπορεί να γίνει για διάφορα υψόμετρα και χωρικές αναλύσεις κάτι πολύ εύχρηστο για διαφορετικούς χρήστες και έρευνες.

Η υπηρεσία χρησιμοποιείται στην πρόγνωση μετεωρολογικών δεδομένων, στην κλιματική έρευνα καθώς και στην περιβαλλοντολογική παρατήρηση.

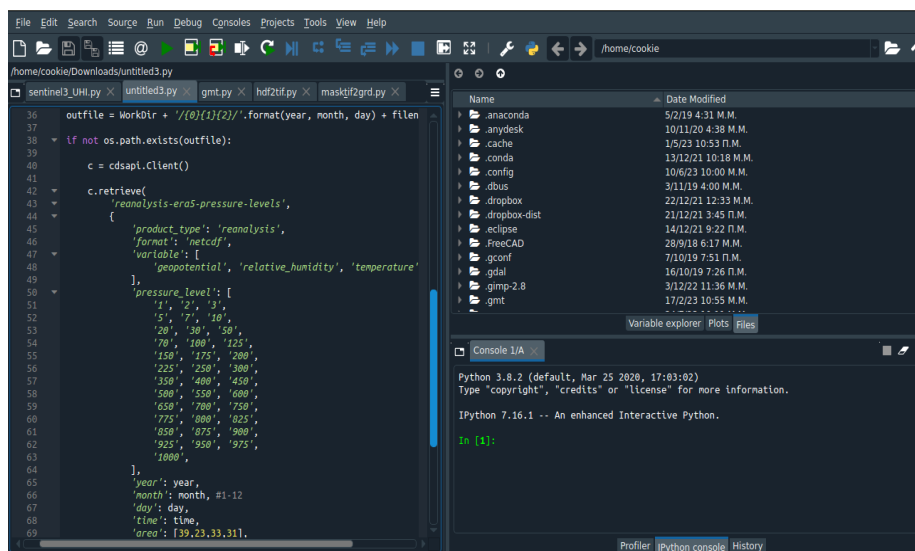
Όσον αφορά την ατμοσφαιρική διόρθωση με την εργαλειοθήκη TRAIN, το λογισμικό είχε δημιουργηθεί για να υποστηρίζει τα μοντέλα ERA I. Ο αλγόριθμος ήταν σχετικά απλός και είχε ως παραμέτρους το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και την ώρα τροχιάς του δορυφόρου πάνω από την περιοχή.

Τα δεδομένα της ERA I ήταν αποθηκευμένα και επεξεργασμένα στην βάση BADC και ήταν εύκολο κάποιος να τα κατεβάσει και να υπολογίσει την ατμοσφαιρική διόρθωση. Επειδή όμως η πλατφόρμα καταργήθηκε και η υπηρεσία αναβαθμίστηκε με τα μοντέλα ERA5, για να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε τα δεδομένα με το TRAIN έπρεπε να γράψουμε ένα πρόγραμμα - αλγόριθμο στην

Python ώστε να μπορέσουμε να ανακτήσουμε τα δεδομένα της ERA5 που χρειαζόμασταν για την ατμοσφαιρική διόρθωση να τα επεξεργαστούμε και τελικά να προβούμε στην διόρθωση .

Αναλυτικά η λειτουργία του αλγορίθμου :

- Εισάγουμε την υπηρεσία CDSAPI (Climate Data Service Application Programme Interface) που παρέχεται από το κέντρο European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) το οποίο εξυπηρετεί 2 υπηρεσίες της COPERNICUS. Η υπηρεσία CDSAPI επιτρέπει στον χρήστη να αναζητά δεδομένα από βάσεις CDS μέσω ενός προγράμματος στην Python (script).
- Το API αναφέρεται σε ένα σύνολο κανόνων, πρωτοκόλλων και εργαλείων που επιτρέπουν σε διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες να επικοινωνούν μεταξύ τους. Στην ουσία, το API καθορίζει πώς μια εφαρμογή πρέπει να αιτείται και να μοιράζεται δεδομένα ή λειτουργίες με άλλες εφαρμογές ή υπηρεσίες.
- Τα API είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τον προγραμματισμό εφαρμογών, καθώς επιτρέπουν στους προγραμματιστές να χρησιμοποιούν λειτουργίες ή δεδομένα που παρέχονται από άλλες πηγές χωρίς να χρειάζεται να κατανοήσουν λεπτομερείς λειτουργίες αυτών των πηγών. Αυτό κάνει την ανάπτυξη λογισμικού πιο αποτελεσματική και επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφόρων υπηρεσιών και λειτουργικοτήτων σε μια εφαρμογή.
- Στην συνέχεια μέσω της υπηρεσίας αναζητούμε γεωδυναμικά δεδομένα, δεδομένα σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας και θερμοκρασίας για διαφορετικά επίπεδα πίεσης (pressure levels). Το προϊόν που αναζητούμε στην εφαρμογή για την ανάκτηση των δεδομένων ονομάζεται ‘reanalysis’ και το format του είναι της μορφής “netcdf” .
- Τα στοιχεία που χρειάζεται να γνωρίζουμε και να εισάγουμε στο πρόγραμμα είναι ο χρόνος, ο μήνας, η μέρα και η ώρα λήψης των εικόνων του δορυφόρου, καθώς και το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής. Έπειτα τα δεδομένα εισάγονται στον επιθυμητό φάκελο και είναι έτοιμα και διαμορφωμένα για χρήση με το λογισμικό, ώστε να υπολογιστεί η ατμοσφαιρική καθυστέρηση τους απευθείας στο τρίτο βήμα του αλγορίθμου του (`aps_weather_model(model_type,3,3)`).



```
36 outfile = WorkDir + '/' + '{0}{1}{2}'.format(year, month, day) + file_n
37
38 if not os.path.exists(outfile):
39
40 c = cdsapi.Client()
41
42 c.retrieve(
43     'reanalysis-era5-pressure-levels',
44     {
45         'product_type': 'reanalysis',
46         'format': 'netcdf',
47         'variable': [
48             'geopotential', 'relative_humidity', 'temperature'
49         ],
50         'pressure_level': [
51             '1', '2', '3',
52             '5', '7', '10',
53             '20', '30', '50',
54             '70', '100', '125',
55             '150', '175', '200',
56             '225', '250', '300',
57             '350', '400', '450',
58             '500', '550', '600',
59             '650', '700', '750',
60             '775', '800', '825',
61             '850', '875', '900',
62             '925', '950', '975',
63             '1000',
64         ],
65         'year': year,
66         'month': month, #1-12
67         'day': day,
68         'time': time,
69         'area': [39,23,33,31],
```

Πίνακας 3: Πρόγραμμα ανάκτησης ατμοσφαιρικών δεδομένων της ERA5 με την γλώσσα Python.

4.7. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Η τυπική απόκλιση, γνωστή και ως τυπική απόκλιση συστήματος (standard deviation), είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το βαθμό διασποράς ή απόκλισης ενός συνόλου δεδομένων από τη μέση τους τιμή. Είναι ένα στατιστικό μέτρο που παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο διαφορετικές είναι οι τιμές ενός συνόλου από την μέση τους τιμή, και επομένως πώς κατανέμονται αυτές οι τιμές γύρω από τη μέση τιμή.

Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης (variance) και μετρείται στις ίδιες μονάδες με τα δεδομένα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τυπική απόκλιση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός της διασποράς των τιμών.

Στην δικιά μας περίπτωση αξιολόγησης, η τυπική απόκλιση χρησιμοποιείται για να μετρήσει το βαθμό απόκλισης των τιμών της φάσης πριν και μετά από τη ατμοσφαιρική διόρθωση τους, προσφέροντας έτσι πληροφορίες σχετικά με την ακρίβεια της διαδικασίας διόρθωσης. Τυπικά η μείωση της τυπικής απόκλισης είναι ένας δείκτης μείωσης της ατμοσφαιρικής επίδρασης .

Η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της αποκατεστημένης φάσης των συμβολογραμμάτων πριν την ατμοσφαιρική διόρθωση, τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση και την σύγκριση τους. Πραγματοποιείται η εξαγωγή της τροποσφαιρικής φάσης με τις τέσσερις μεθόδους και στη συνέχεια γίνεται η αφαίρεση της από την αποκατεστημένη φάση για να πάρουμε τελικά την διορθωμένη ([εξίσωση 12](#)).

- Ειδικότερα επιλέχθηκαν συνολικά **12** συμβολογράμματα για κάθε μέθοδο, εκείνα με τις χαμηλότερες τυπικές αποκλίσεις και εκείνα με τις υψηλότερες καθώς κρίναμε ότι θα παρουσιάζει ενδιαφέρον ο σχολιασμός της απόδοσης του κάθε αλγορίθμου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

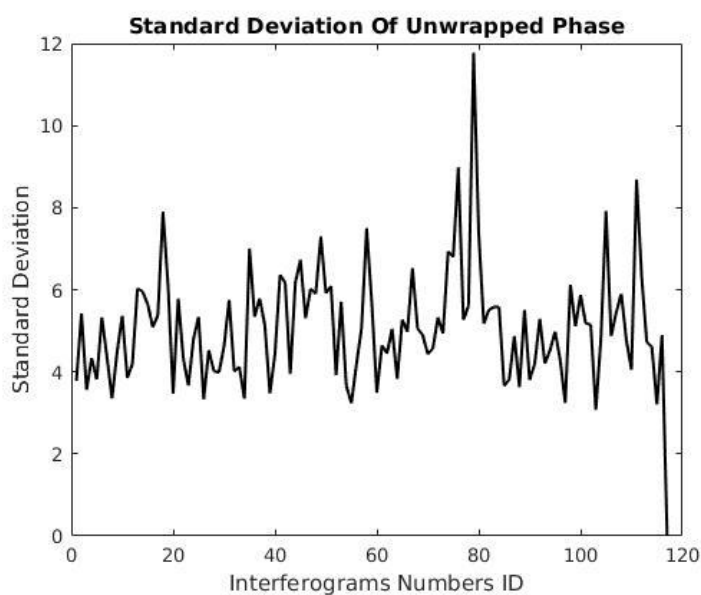
5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ

Στη παρούσα λοιπόν διπλωματική εργασία, εξετάζουμε την τυπική απόκλιση ως δείκτη της αξιοπιστίας των τιμών της φάσης στα συμβολόγραμμα της αποκατεστημένης φάσης, όπως αυτά προκύπτουν από το λογισμικό StaMPS. Οι τυπικές αποκλίσεις λειτουργούν ως κρίσιμο μέτρο για τη διακύμανση και την αβεβαιότητα στις ανακτηθείσες τιμές, προσδίδοντας βαθύτερη κατανόηση στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε πώς υψηλές τιμές τυπικής απόκλισης μπορούν να υποδείξουν περιοχές με αυξημένη αβεβαιότητα ή αστάθεια στις ανακτηθείσες τιμές της φάσης. Υπερβολικές αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται σε πολύπλοκες συνθήκες που δυσκολεύουν τη μέτρηση της φάσης, και αυτό να οδηγεί σε πιθανή παρερμηνεία των δεδομένων.

Συγκρίνοντας τις τυπικές αποκλίσεις μεταξύ περιοχών, αναλύουμε την ομοιογένεια ή τη διαφοροποίηση της κίνησης της επιφάνειας. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσουμε περιοχές με σημαντικές μεταβολές ή με ανεπαίσθητες αλλαγές που ίσως να μην είναι φανερές με μεμονωμένες μετρήσεις.

Στην τελική ανάλυση, προτείνουμε βελτιώσεις στις μεθόδους επεξεργασίας για τη μείωση της τυπικής απόκλισης, ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων και ακριβών μετρήσεων της φάσης σε μελλοντικές εφαρμογές. Παρακάτω παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση της αποκατεστημένης φάσης για τα 116 συμβολογράμματα αποκατεστημένης φάσης:



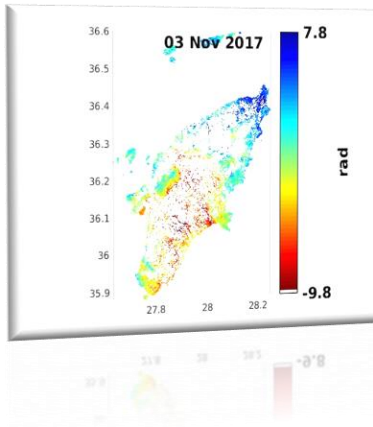
Σχήμα 14: Τυπική Απόκλιση Αποκατεστημένης Φάσης

Όπως φαίνεται και από την γραφική παράσταση της τυπικής απόκλισης σε έναν αριθμό 116 συμβολογραμμάτων (το 117 περιέχει την Master εικόνα οπότε όπως είναι λογικό η τυπική απόκλιση είναι 0) οι τιμές κυμαίνονται από ≈ 3.0 έως ≈ 12.0 . Στην προσπάθεια λοιπόν μιας πιο μαθηματικής αξιολόγησης αυτού του διαγράμματος δημιουργήθηκε ένας πίνακας τυπικών αποκλίσεων στην Matlab για την ανάγνωση των διαγραμμάτων. Οι μικρότερες τιμές τυπικής απόκλισης παρατηρούνται στα συμβολογράμματα με αριθμό 8, 34, 55, 97, 103 και 115 ενώ αντίστοιχα οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στα συμβολογράμματα 18, 58, 76, 79, 105 και 111.

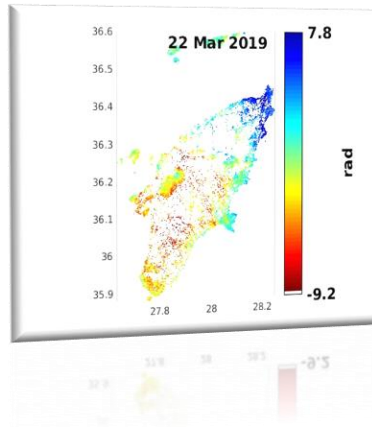
Παραθέτουμε τον συγκεντρωτικό πίνακα με τις ημερομηνίες αυτών των συμβολογραμμάτων, τις τιμές των τυπικών αποκλίσεων τους, καθώς και εξετάζουμε ενδεικτικά 6 από αυτά για να έχουμε μία εικόνα για την αποκατεστημένη φάση πριν την διόρθωση.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ
06/04/2016	8	3.35
24/02/2017	34	3.35
03/11/2017	55	3.23
22/04/2019	97	3.24
02/07/2019	103	3.07
24/10/2019	115	3.20
16/08/2016	18	7.90
09/12/2017	58	7.50
13/07/2018	76	8.98
18/08/2018	79	11.78
26/06/2019	105	7.92
06/09/2019	111	8.69

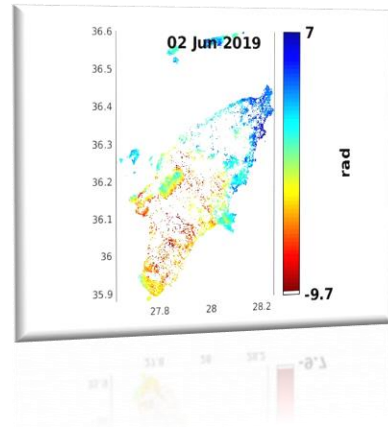
Πίνακας 4: Ημερομηνίες και τυπικές αποκλίσεις συμβολογραμμάτων αξιολόγησης



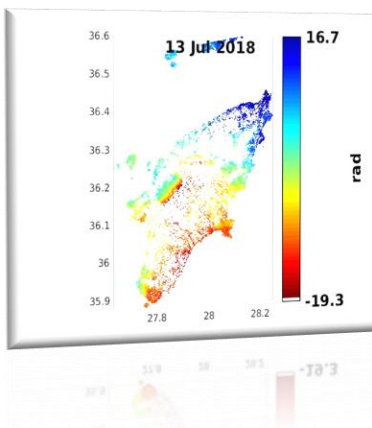
Εικόνα 13: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 55



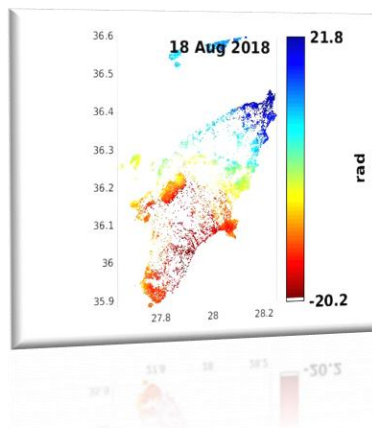
Εικόνα 14: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 97



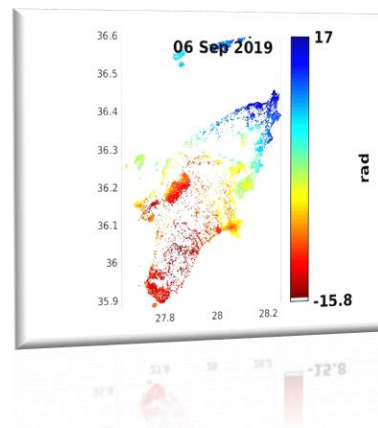
Εικόνα 15: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 103



Εικόνα 16: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 76



Εικόνα 17: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 79



Εικόνα 18: Αποκατεστημένη φάση συμβολογράμματος 111

- ❖ Η πρώτη εκτίμηση από αυτά τα έξι ενδεικτικά συμβολογράμματα με την απόδοση των τιμών της αποκατεστημένης φάσης πριν την διόρθωση της ατμόσφαιρας είναι ότι οι μεγαλύτερες τιμές της φάσης παρουσιάζονται σε περιοχές με έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα (Πόλη της Ρόδου Βόρεια, Λίνδος - Ανατολικά) , και σε περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο και έντονο ανάγλυφο Ατάρυβος - Δυτικά, Μαχαιριά, Μονόλιθος-Νότια (ενδεικτικά συμβολογράμματα 79 και 111) .

- ❖ Επιπρόσθετα το Πρασονήσι ένα μικρό νησάκι - χερσόνησος Νότια της Ρόδου φαίνεται σε κάποια συμβολογράμματα να παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές φάσης κάτι που ακόμα δεν μπορούμε να δικαιολογήσουμε και ενδεχομένως να οφείλεται σε μικρομετακινήσεις στην γύρω περιοχή.
- ❖ Τα αποτελέσματα της αποκατεστημένης φάσης μετά την αφαίρεση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης θα τα εξετάσουμε εκ νέου σε επόμενα κεφάλαια αφού έχουμε προβεί σε διόρθωση για να καταλήξουμε σε πιο ασφαλή συμπεράσματα και εξηγήσεις. Στον επόμενο πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται επίσης οι τυπικές αποκλίσεις όλων των συμβολογραμμάτων.

1	3.7778	29	3.9852	57	5.0700	85	3.6567	113	4.7207
2	5.4192	30	4.6231	58	7.4992	86	3.8102	114	4.6112
3	3.5625	31	5.7505	59	5.6954	87	4.8699	115	3.2043
4	4.3355	32	4.0064	60	3.4909	88	3.6277	116	4.8912
5	3.8124	33	4.1209	61	4.6428	89	5.5061		
6	5.3280	34	3.3452	62	4.4467	90	3.8020		
7	4.3655	35	7.0068	63	5.0469	91	4.1923		
8	3.3498	36	5.3419	64	3.8300	92	5.2921		
9	4.4809	37	5.7867	65	5.2708	93	4.2035		
10	5.3636	38	5.1424	66	4.9746	94	4.5219		
11	3.8523	39	3.4737	67	6.5255	95	4.9780		
12	4.1909	40	4.4367	68	5.0521	96	4.2889		
13	6.0304	41	6.3629	69	4.8971	97	3.2396		
14	5.9548	42	6.1717	70	4.4304	98	6.1208		
15	5.6470	43	3.9445	71	4.5645	99	5.1101		
16	5.0884	44	6.1751	72	5.3245	100	5.8739		
17	5.3758	45	6.7279	73	4.9353	101	5.1822		
18	7.9015	46	5.3082	74	6.9360	102	5.1495		
19	6.1065	47	6.0232	75	6.7983	103	3.0717		
20	3.4694	48	5.8984	76	8.9804	104	4.8019		
21	5.7856	49	7.2965	77	5.2654	105	7.9219		
22	4.3184	50	5.9135	78	5.6068	106	4.8749		
23	3.6633	51	6.0924	79	11.7757	107	5.4399		
24	4.8014	52	3.9171	80	7.3890	108	5.9002		
25	5.3396	53	5.7082	81	5.1729	109	4.7706		
26	3.3300	54	3.6614	82	5.5081	110	4.0478		
27	4.5228	55	3.2318	83	5.5786	111	8.6851		
28	4.0172	56	4.1863	84	5.5815	112	6.3175		

Πίνακας 5: Πίνακας τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης συμβολογραμμάτων

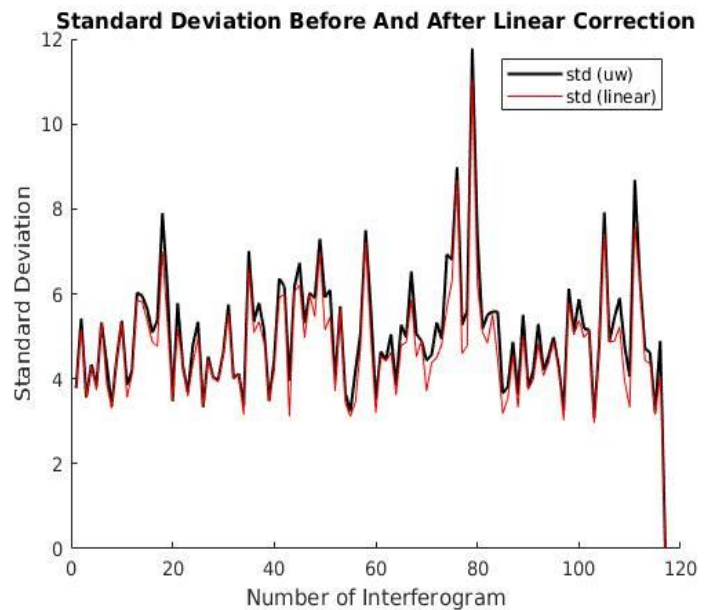
5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

ΑΤΜΟΣΦΑΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ (PHASE BASED METHODS)

Εφόσον έχουμε εξάγει την τροποσφαιρική φάση των συμβολογραμμάτων με την γραμμική μέθοδο και έχουμε αφαιρέσει αυτή την φάση από την αποκατεστημένη, υπολογίζουμε την νέα τυπική απόκλιση και την συγκρίνουμε με την αρχική.

Σε μία πρώτη προσέγγιση όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα των τυπικών αποκλίσεων δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στις τιμές της τυπικής απόκλισης της αποκατεστημένης φάσης των συμβολογραμμάτων και της διορθωμένης από την ατμόσφαιρα φάσης κάτι που δείχνει ότι τα διαγράμματα είναι σχεδόν ταυτόσημα.

Ο μέσος όρος της τυπικής απόκλισης της αποκατεστημένης φάσης είναι **5.0752** ενώ της διορθωμένης **4.7488** που συνεπάγεται ότι η ποσοστιαία μεταβολή της είναι **-6.43 %** όπως υπολογίστηκαν και επομένως μειώνεται. Συμπερασματικά υπάρχει μικρή διόρθωση λόγω ατμόσφαιρας με την Γραμμική μέθοδο .



Σχήμα 15: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων της αποκατεστημένης και διορθωμένης φάσης με την Γραμμική μέθοδο

$$\frac{\sigma_c^- - \sigma_o^-}{\sigma_o^-} \quad (19)$$

Όπου σ_o^- η αρχική μέση τυπική απόκλιση της αποκατεστημένης φάσης των συμβολογραμμάτων και σ_c^- η μέση τυπική απόκλιση μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση

Σε μία δεύτερη προσέγγιση ανάλυσης θα εξετάσουμε την διαφοροποίηση ειδικότερα σε περιοχές και συμβολογράμματα με μεγάλη τυπική απόκλιση και αντίστοιχα με μικρή και θα δούμε τη μεταβολή τους. Στις εικόνες εμφανίζονται και οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων από τον δορυφόρο.

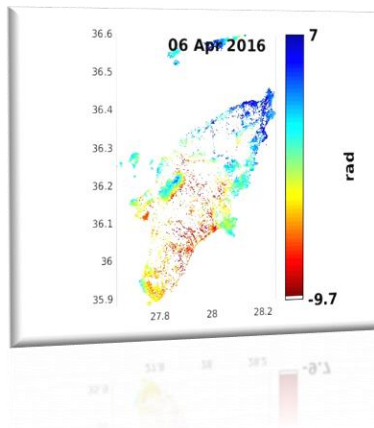
Αρχικά επιλέγουμε τα συμβολογράμματα με την πιο μικρή τυπική απόκλιση (τα 6 χαμηλότερα), συγκεκριμένα τα νούμερα (8),(34), (55),(97),(103),(115).

Η αποκατεστημένη φάση των συμβολογραμμάτων πριν την ατμοσφαιρική διόρθωση παρουσιάζεται στις εικόνες (α) έως (ζ) ενώ η διορθωμένη φάση από ατμόσφαιρα στις εικόνες (1α) έως (1ζ).

Αντίστοιχα για τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση (τα 6 υψηλότερα) επιλέγουμε τα συμβολογράμματα (18),(58),(76),(79),(105),(111) που παρουσιάζονται στις εικόνες (η) έως (μ) ενώ τα απαλλαγμένα από ατμοσφαιρική φάση συμβολογράμματα τους φαίνονται στις αντίστοιχες (1η) έως (1μ).

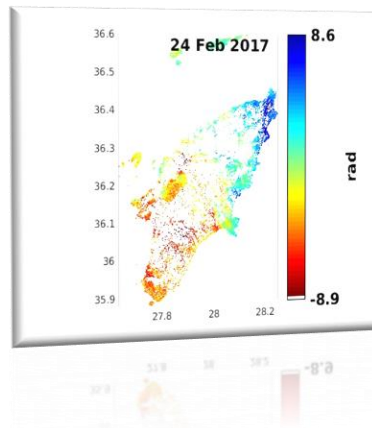
- Το συμβολόγραμμα με τη μικρότερη τυπική απόκλιση είναι το νούμερο 103 με $S = 3.07$.
- Το συμβολόγραμμα με τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση είναι το νούμερο 79 με $S = 11.77$.

(α)



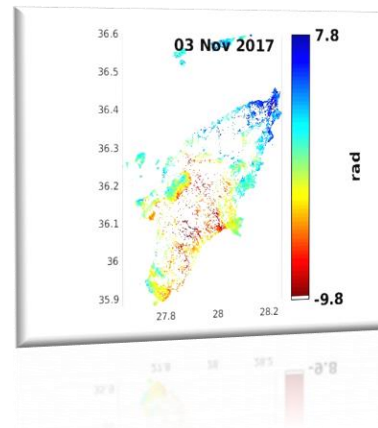
Εικόνα 19: Συμβολόγραμμα 8

(β)



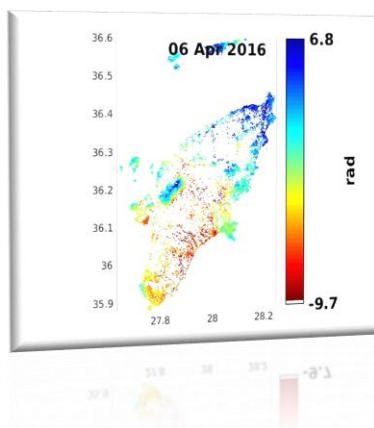
Εικόνα 20: Συμβολόγραμμα 34

(γ)



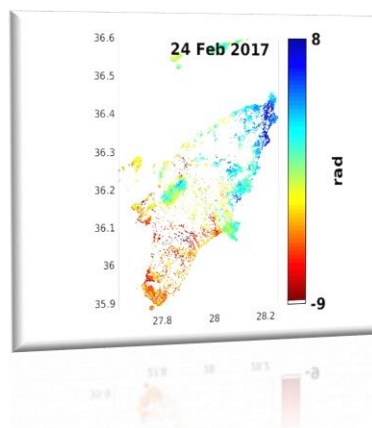
Εικόνα 21: Συμβολόγραμμα 55

(1α)



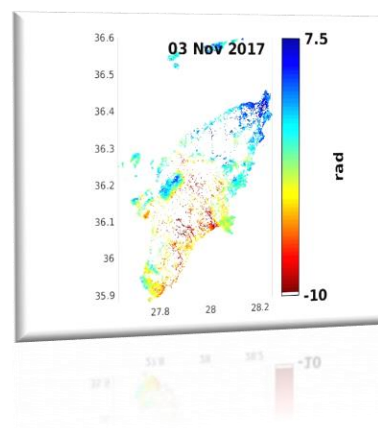
Εικόνα 22: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση Linear)

(1β)



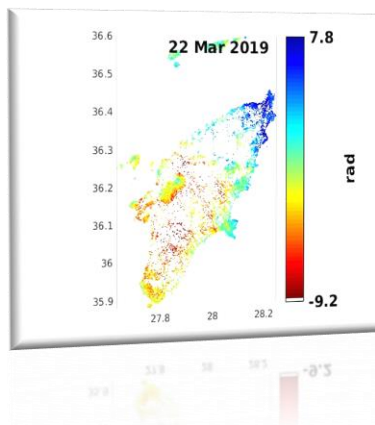
Εικόνα 23: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση Linear)

(1γ)



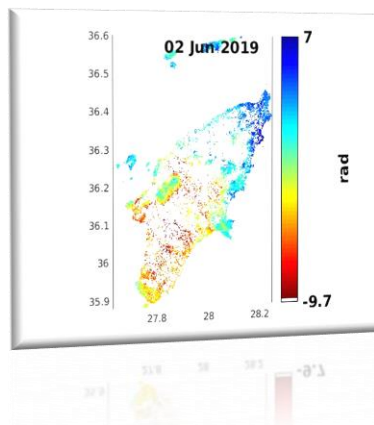
Εικόνα 24: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση Linear)

(δ)



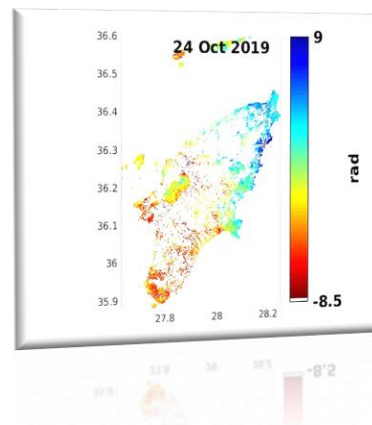
Εικόνα 25: Συμβολόγραμμα 97

(ε)



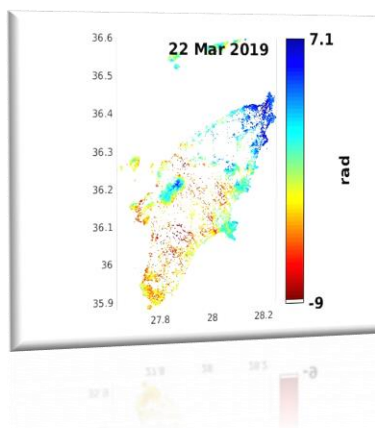
Εικόνα 26: Συμβολόγραμμα 103

(ζ)



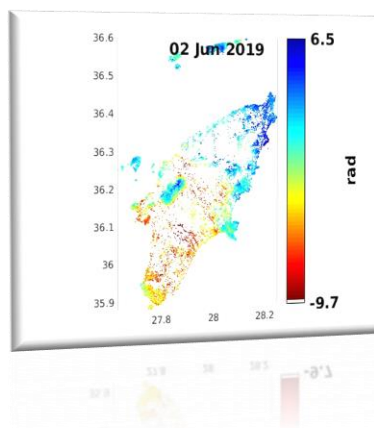
Εικόνα 27: Συμβολόγραμμα 115

(1δ)



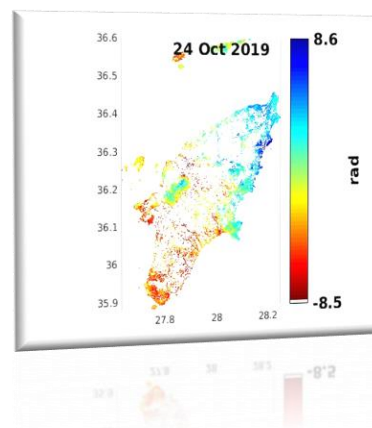
Εικόνα 28: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση Linear)

(1ε)



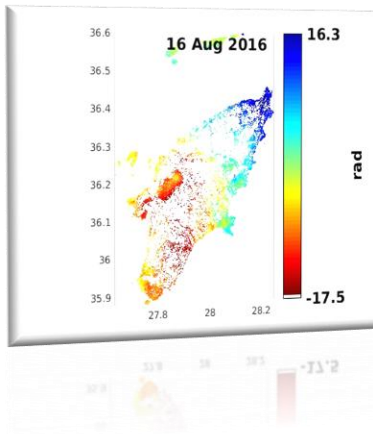
Εικόνα 29: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση Linear)

(1ζ)



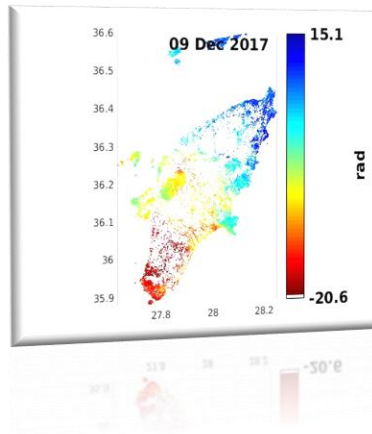
Εικόνα 30: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση Linear)

(η)



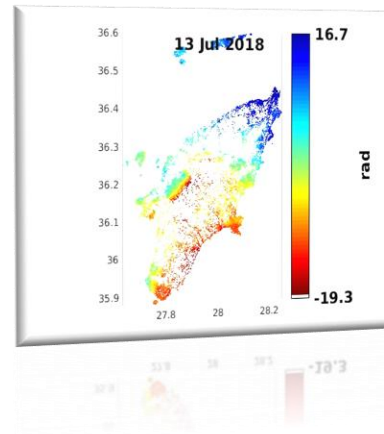
Εικόνα 31: Συμβολόγραμμα 18

(θ)



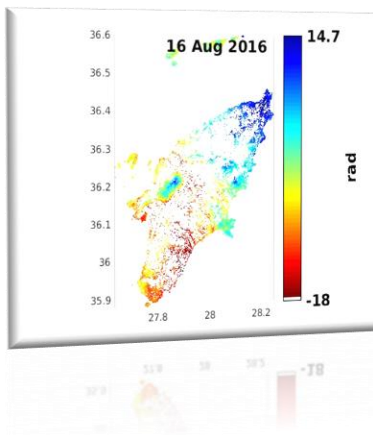
Εικόνα 32: Συμβολόγραμμα 58

(ι)



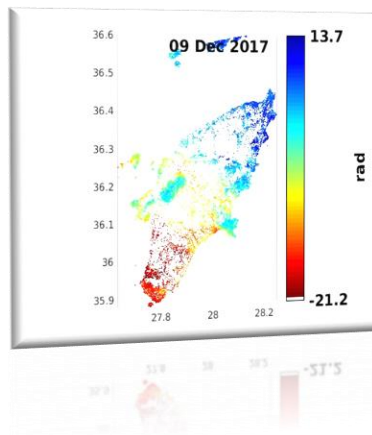
Εικόνα 33: Συμβολόγραμμα 76

(1η)



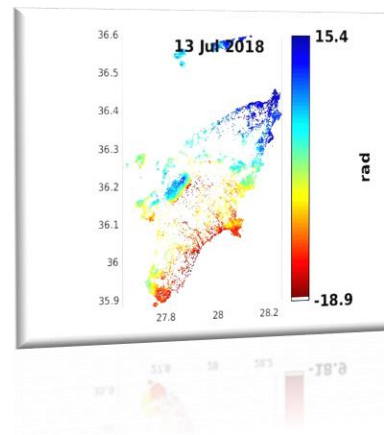
Εικόνα 34: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση Linear)

(10)



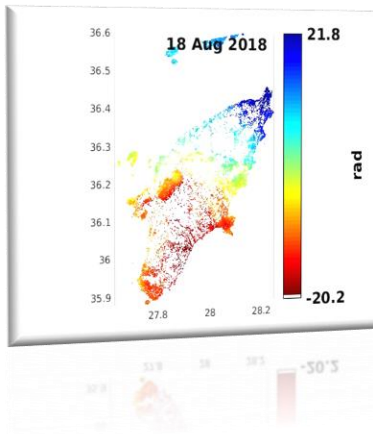
Εικόνα 35: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση Linear)

(1ι)



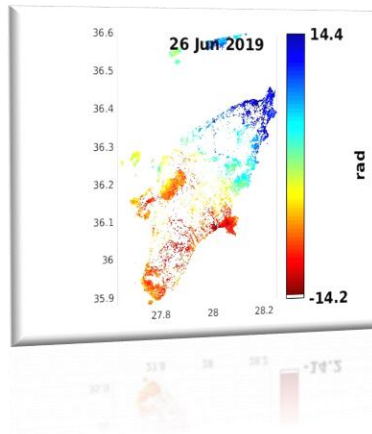
Εικόνα 36: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση Linear)

(κ)



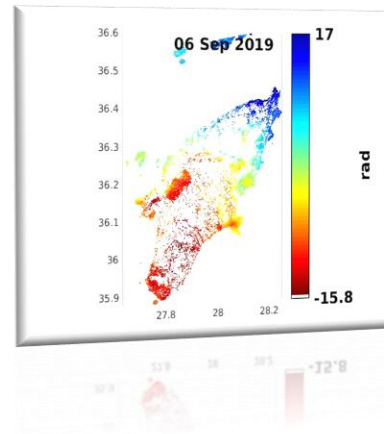
Εικόνα 37: Συμβολόγραμμα 79

(λ)



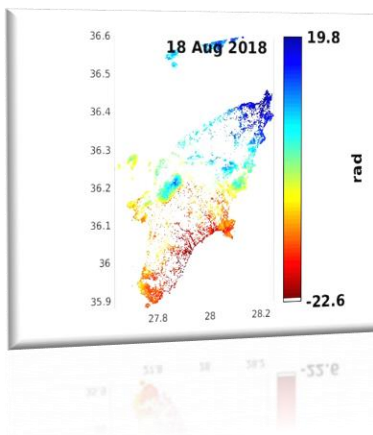
Εικόνα 38: Συμβολόγραμμα 105

(μ)



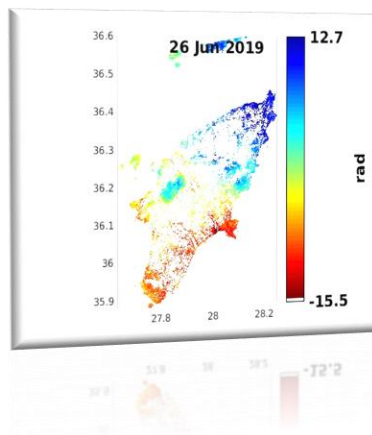
Εικόνα 39: Συμβολόγραμμα 111

(1κ)



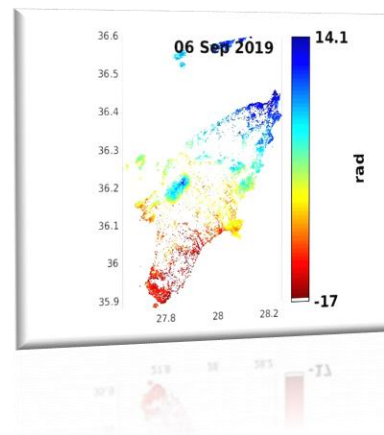
Εικόνα 40: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση Linear)

(1λ)



Εικόνα 41: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση Linear)

(1μ)



Εικόνα 42: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση Linear)

5.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις παραπάνω εικόνες συγκλίνουν με αυτά της τυπικής απόκλισης και είναι αυτά τα οποία περιμέναμε στην πρώτη ανάλυση της μεθόδου.

Πιο αναλυτικά :

- Στα συμβολογράμματα με μικρή τυπική απόκλιση η διόρθωση είναι απειροελάχιστη αλλά και *ομοιόμορφη* με την μεγαλύτερη να είναι 0.7 rad (*εικόνα 1δ*) στο συμβολλόγραμμα 97.

- Στα συμβολογράμματα με μεγαλύτερη τυπική απόκλιση η διόρθωση είναι μεγαλύτερη όπως συμπεραίνουμε (αν και μη ικανοποιητική) και φθάνει τα 2 rad στο συμβολλόγραμμα 79 (*εικόνα 1κ*) το οποίο έχει και την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση από όλα όπως έχουμε αναφέρει. Παράλληλα όμως παρατηρούμε το εξής παράδοξο στα υπόλοιπα συμβολογράμματα υψηλής μεταβλητότητας τιμών, ενώ μειώνονται οι θετικές τιμές της φάσης αυξάνονται οι αρνητικές τιμές *οπότε υπάρχει αύξηση κατά απόλυτη τιμή*, εκτός του συμβολογράμματος 76 (*εικόνα 1ι*) το οποίο επιφέρει τη μικρότερη μείωση, αλλά είναι ομοιόμορφη.

- Παρ' όλα αυτά η συμπεριφορά της μεθόδου όσον αφορά την διόρθωση της φάσης σε περιοχή έντονου ανάγλυφου όπως του βουνό του Αττάρυβου είναι καλή, εφόσον αυτό που παρατηρούμε από τα συμβολογράμματα (*1η, 1κ, 1λ, 1μ,*) οι τιμές της φάσης από μέγιστες αρνητικές που είναι στο βουνό διορθώνονται και πλησιάζουν το 0.

Επίσης αυτά η τυπική απόκλιση των συμβολογραμμάτων μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση μειώνεται. Το σφάλμα αυτό είναι δύσκολο να αποδοθεί κάπου συγκεκριμένα και πιθανώς να είναι συστηματικό σφάλμα του αλγορίθμου.

- Οι μεγαλύτερες τιμές φάσης συνακόλουθα και τυπικής απόκλισης παρατηρούνται κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες (αλλά και τον μήνα Σεπτέμβριο) στο νησί όπου και η ατμόσφαιρα είναι αρκετά πιο ξηρή στην τετραετή χρονοσειρά που διαθέτουμε δηλαδή από 2016 έως και το 2019 με εξαίρεση το συμβολόγραμμα 58 (*εικόνα θ*) η εικόνα του οποίου έχει ληφθεί στις 9 Δεκεμβρίου 2017.

- Σύμφωνα με στοιχεία της Ε.Μ.Υ ο υετός στο νησί παρουσιάζεται στα **13mm**. Η μηνιαία απόκλιση του υετού στην Ρόδο για τον μήνα Δεκέμβριο ήταν **23%** το οποίο πρακτικά δείχνει ότι ήταν περίοδος με αυξημένη υγρασία στην ατμόσφαιρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

ΣΤΑΘΜΟΣ	Απόκλιση T μέσης (I)	% κλάσμα υετού (II)
ΣΕΡΡΕΣ	2.2	78
ΦΛΩΡΙΝΑ		
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	2.3	51
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	2.4	93
ΚΟΖΑΝΗ	2.2	75
ΚΕΡΚΥΡΑ	0	88
ΙΩΑΝΝΙΝΑ	-0.1	122
ΛΑΡΙΣΑ	0.7	115
ΛΗΜΝΟΣ	1.3	150
ΑΓΧΙΑΛΟΣ	1	49
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	1.4	104
ΑΓΡΙΝΙΟ		
ΣΚΥΡΟΣ	0.7	137
ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	-0.8	142
ΑΡΑΞΟΣ	-1	112
ΧΙΟΣ	1.6	71
ΕΛΛΗΝΙΚΟ	0.6	41
ΖΑΚΥΝΘΟΣ	-1.3	115
ΣΑΜΟΣ	0.8	67
ΚΑΛΑΜΑΤΑ	-1.1	71
ΝΑΞΟΣ	1	87
ΜΕΘΩΝΗ		
ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ	1.9	59
ΣΟΥΔΑ	0.4	81
ΡΟΔΟΣ	1.5	23
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	0.7	74
ΣΗΤΕΙΑ	1.1	56

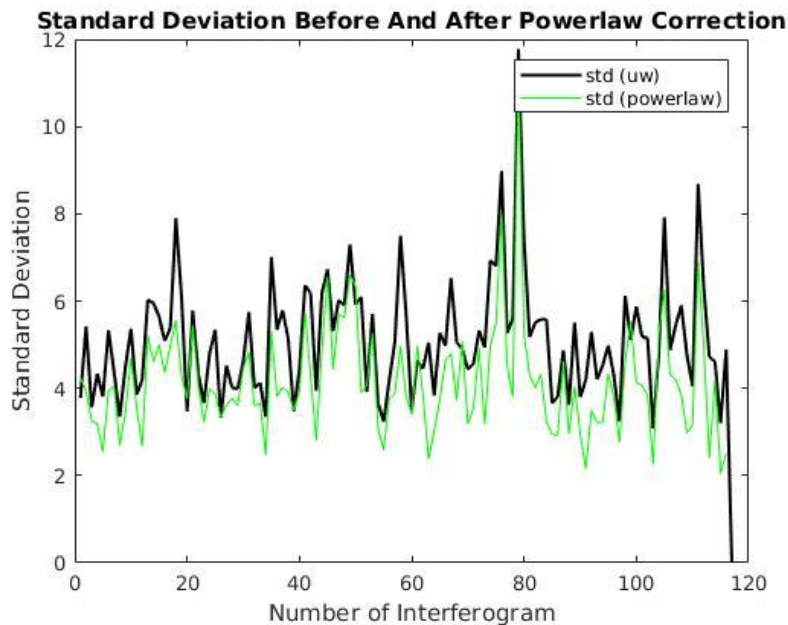
Πίνακας 6: Μηνιαία απόκλιση υετού για τον μήνα Δεκέμβριο 2017 (Ε.Μ.Υ)

- Οι μικρότερες τυπικές αποκλίσεις είναι “διασκορπισμένες” τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου και όχι σε κάποια συγκεκριμένη περίοδο.
- Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω η Γραμμική μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης αν και η πιο απλουστευμένη σε εκτέλεση αλλά και σε μαθηματική επίλυση (γραμμική), κρίνεται αναποτελεσματική στην διόρθωση της ατμοσφαιρικής φάσης. Επιπλέον δεν μπορεί να υπολογίσει την συνιστώσα της διαταραχής της ατμόσφαιρας (turbulence) ώστε να γίνει σύγκριση με άλλη μέθοδο που την περιέχει.

5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ POWER-LAW

Η διαδικασία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου Power-law που ακολουθεί είναι παρόμοια με αυτή της Γραμμικής μεθόδου. Οδηγός δηλαδή θα είναι η τυπική απόκλιση της μεθόδου

σε όλα τα συμβολογράμματα αλλά και πιο ειδικά για συμβολογράμματα με χαμηλές και υψηλές τιμές πριν την διόρθωση, ώστε να παρατηρήσουμε τη μεταβολή τους. Επειδή και οι δύο μέθοδοι καθορίζονται από την χωρικά μεταβαλλόμενη μεταβλητή $K_{\Delta\phi}$ (η μία είναι γραμμική και η άλλη εκθετική όπως αναφέραμε στα κεφάλαια 4.3 και 4.4), περιμένουμε παρόμοια αποτελέσματα ίσως λίγο καλύτερα αυτά της Power-law λόγω εξειδικευμένων ενεργειών και αλγορίθμων. Παρατίθεται η τυπική απόκλιση των συμβολογραμμάτων μετά τη διόρθωση της μεθόδου σε σύγκριση με αυτήν της αποκατεστημένης φάσης.



Σχήμα 16: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με την μέθοδο Power-law.

Ειδικεύοντας στην αρχική εκτίμηση μας πράγματι βλέπουμε ότι η μέθοδος να δίνει βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την Γραμμική (υπενθυμίζουμε ότι και οι δύο είναι *Phase – Based Methods* και η συνάρτησή τους εξαρτάται από την φάση) αφού στο διάγραμμα σύγκρισης η τυπική απόκλιση μειώνεται αισθητά.

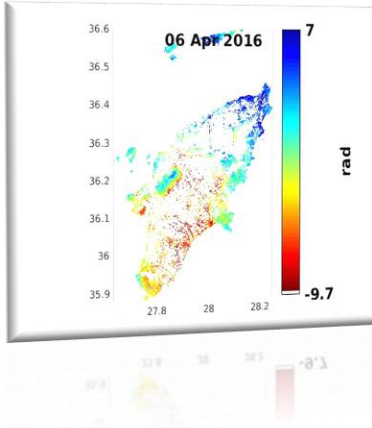
Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο αξιολόγησης βρίσκουμε τον μέσο όρο της τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων μετά την διόρθωση ο οποίος ισούται με **4.1099** για την διορθωμένη ατμοσφαιρική φάση. Η ποσοστιαία μεταβολή της τυπικής απόκλισης είναι **-19.02 %**. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση της τυπικής απόκλισης. Το πρώτο λοιπόν θετικό συμπέρασμα είναι ότι υπάρχει αισθητή μείωση της τάξης των **13** περίπου μονάδων.

Θα εξετάσουμε εκ νέου τα συμβολογράμματα με υψηλή τυπική απόκλιση αλλά και χαμηλή για να δούμε πως μεταβλήθηκαν με την συγκεκριμένη μέθοδο.

- ❖ Τα συμβολογράμματα με χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης όπως και πριν είναι τα (8),(34)(55),(97),(103),(115) και παρουσιάζονται κατά σειρά στις εικόνες (α) έως (ζ). Τα διορθωμένα τους συμβολογράμματα παρουσιάζονται στις εικόνες (2α) έως (2ζ).

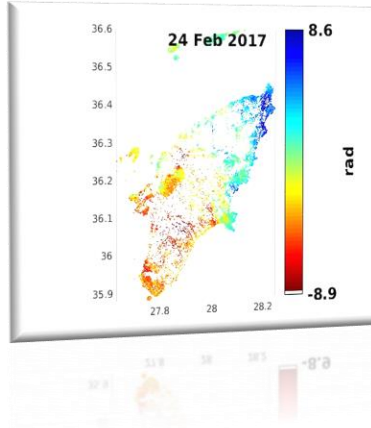
- ❖ Αντίστοιχα τα συμβολογράμματα με υψηλή τυπική απόκλιση είναι τα (18),(58),(76),(79),(105),(111) και παρουσιάζονται στις εικόνες (η) έως (μ) με τα διορθωμένα τους να παρουσιάζονται στις εικόνες (2η) έως (2μ).

(α)



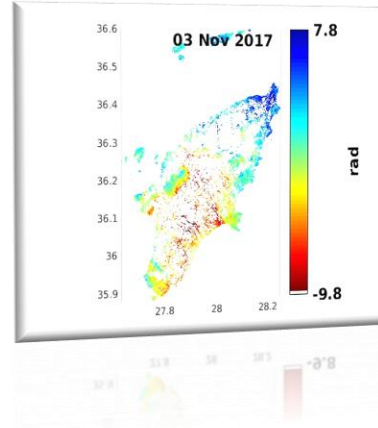
Εικόνα 43: Συμβολόγραμμα 8

(β)



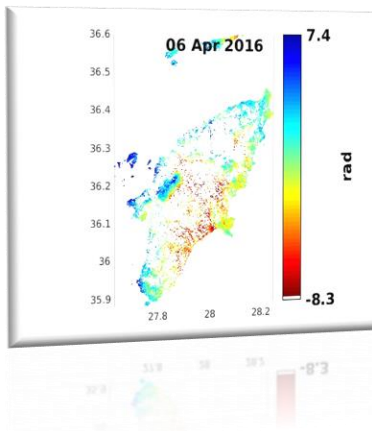
Εικόνα 44: Συμβολόγραμμα 34

(γ)



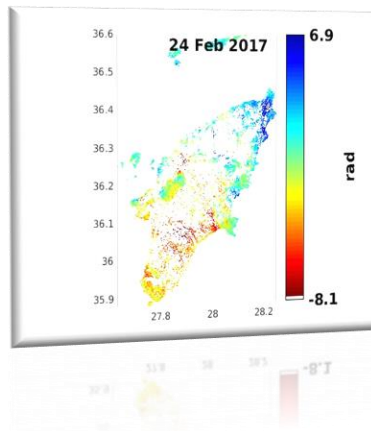
Εικόνα 45: Συμβολόγραμμα 55

(2α)



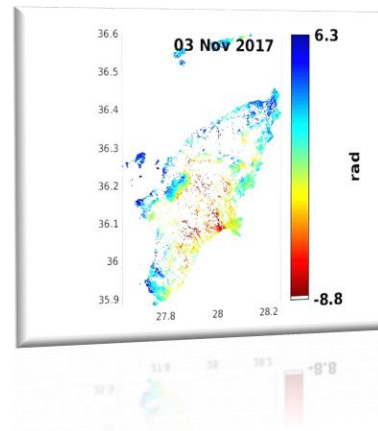
Εικόνα 46: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση Power-law)

(2β)



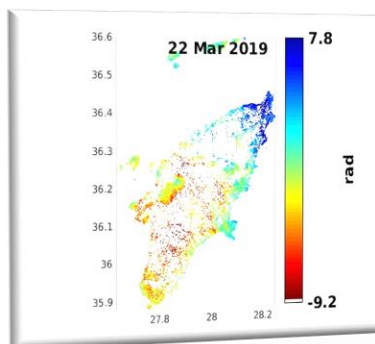
Εικόνα 47: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση Power-law)

(2γ)



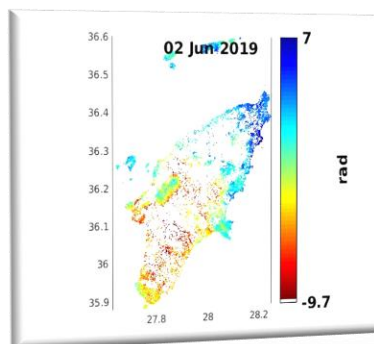
Εικόνα 48: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση Power-law)

(δ)



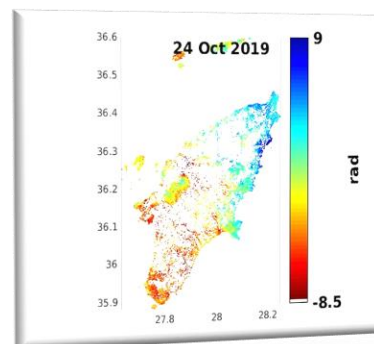
Εικόνα 49: Συμβολόγραμμα 97

(ε)



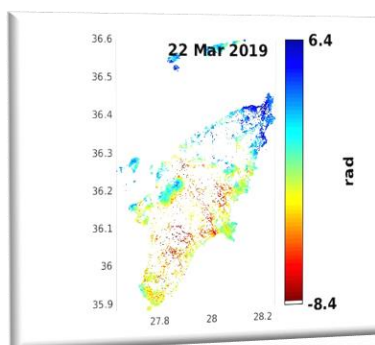
Εικόνα 50: Συμβολόγραμμα 103

(ζ)



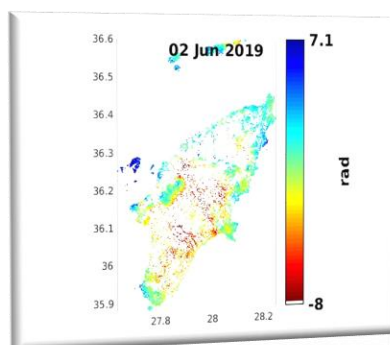
Εικόνα 51: Συμβολόγραμμα 115

(2δ)



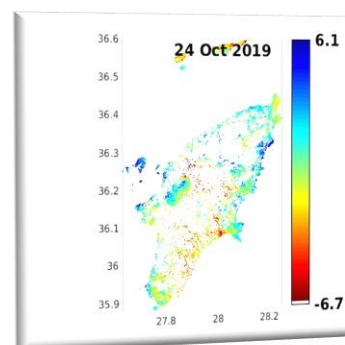
Εικόνα 52: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση Power-law)

(2ε)



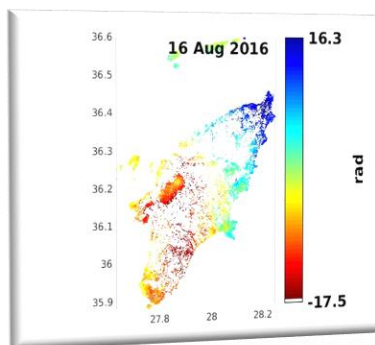
Εικόνα 53: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση Power-law)

(2ζ)



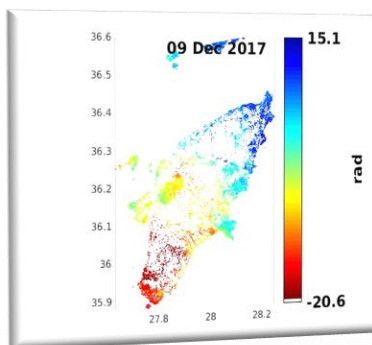
Εικόνα 54: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση Power-law)

(η)



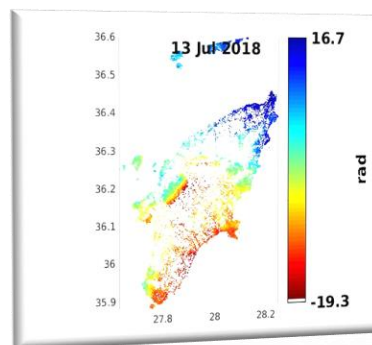
Εικόνα 55: Συμβολόγραμμα 18

(θ)



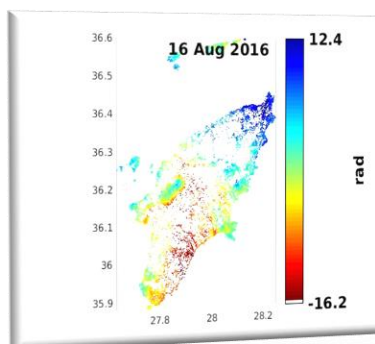
Εικόνα 56: Συμβολόγραμμα 58

(ι)



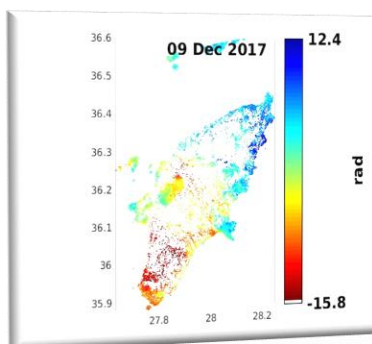
Εικόνα 57: Συμβολόγραμμα 76

(2η)



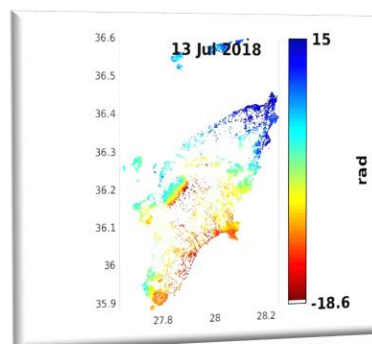
Εικόνα 58: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση Power-law)

(2θ)



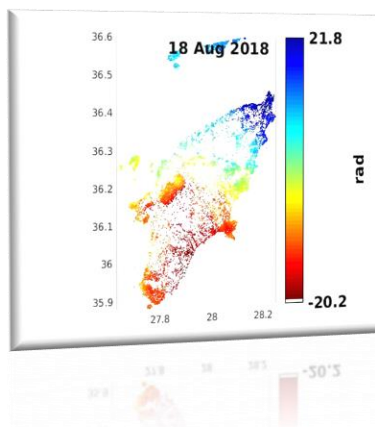
Εικόνα 59: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση Power-law)

(2ι)



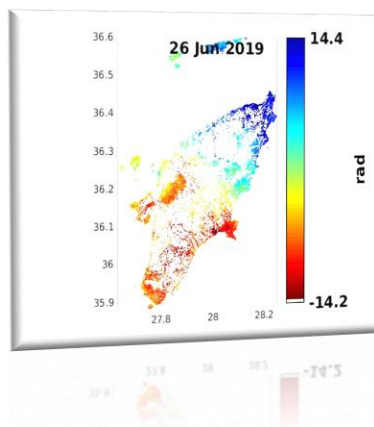
Εικόνα 60: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση Power-law)

(κ)



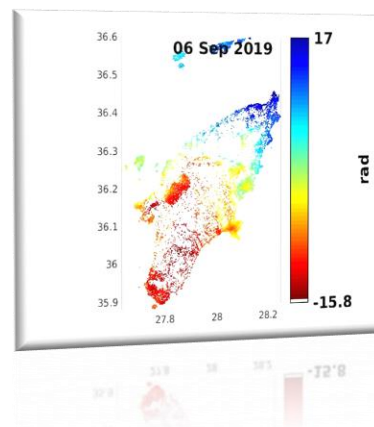
Εικόνα 61: Συμβολόγραμμα 79

(λ)



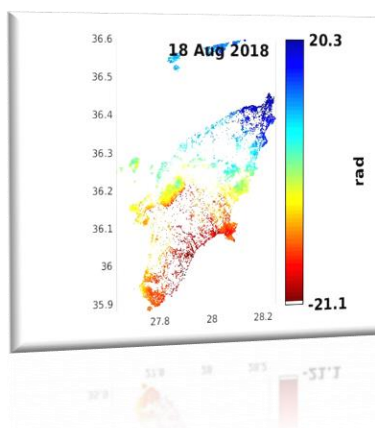
Εικόνα 62: Συμβολόγραμμα 105

(μ)



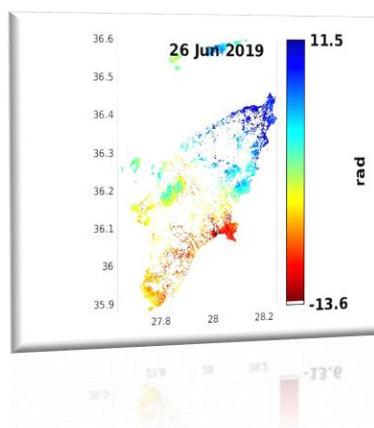
Εικόνα 63: Συμβολόγραμμα 111

(2κ)



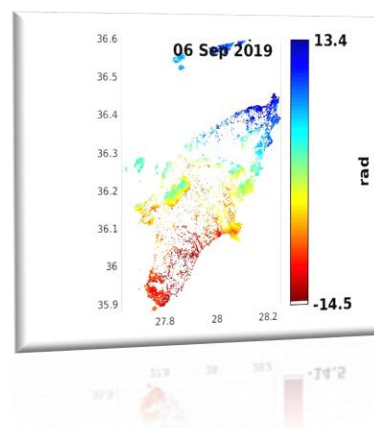
Εικόνα 64: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση Power-law)

(2λ)



Εικόνα 65: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση Power-law)

(2μ)



Εικόνα 66: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση Power-law)

5.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ POWER-LAW

Τα αποτελέσματα της διόρθωσης με τη μέθοδο Power-law είναι εμφανώς καλύτερα από εκείνα της γραμμικής μεθόδου και όπως παρατηρούμε από τις εικόνες που έχουν επιλεγεί υπάρχει σε όλες μείωση της φάσης του σήματος μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση. Αναλυτικότερα :

- ❖ Στα συμβολογράμματα χαμηλού εύρους τιμών φάσης σε αντίθεση με την Γραμμική μέθοδο η διόρθωση είναι αισθητή με την σημαντικότερη να παρατηρείται στο συμβολόγραμμα 115 *εικόνα (2ζ)* εικόνα όπου οι μέγιστες θετικές τιμές της φάσης μειώνονται κατά 2.9 rad ενώ οι μέγιστες αρνητικές κατά 1.8 rad. Η μόνη παραφωνία συναντάται στην *εικόνα (1α)* όπου ενώ έχουμε μείωση 1.4 rad των αρνητικών τιμών παρατηρούμε αύξηση 0.4 rad στις μέγιστες θετικές.
- ❖ Στα συμβολογράμματα υψηλού εύρους τιμών φάσης παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση των τιμών μέχρι και 4.8 rad στο συμβολόγραμμα 58 *εικόνα (2θ)*. Στο μόνο συμβολόγραμμα που κρίνεται ανεπαρκής η διόρθωση, όπως παρατηρήσαμε και στην πρώτη μέθοδο, είναι το συμβολόγραμμα 79 *εικόνα (1κ)* όπου η διόρθωση δεν το επηρεάζει αισθητά αφού υπάρχει μείωση της φάσης 1.5 rad στις μέγιστες θετικές τιμές στο Βόρειο - Ανατολικό τμήμα του νησιού αλλά αύξηση των αρνητικών τιμών κατά 0.9 rad. Η τυπική του απόκλιση έχει μικρή μείωση της τάξης του **4%** από 11.77 σε 11.25.

Στις επόμενες μεθόδους που θα εξετάσουμε θα επανέλθουμε στο συγκεκριμένο συμβολόγραμμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον για να δούμε αν μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα εναλλακτικά.

- ❖ Παρ' όλα αυτά όπως και με τη γραμμική μέθοδο οι υψηλές τιμές της φάσης στο βουνό του Αττάρυβου συμβολογράμματα (2η, 2κ, 2λ, 2μ) διορθώνονται και πλησιάζουν 0. Εφόσον λοιπόν και οι δύο μέθοδοι εξαρτώνται από την τοπογραφία της περιοχής όπως έχουμε αναφέρει, πράγματι είναι λογική αυτή η διόρθωση.
- ❖ Όμως ένα ασφαλές συμπέρασμα λοιπόν που μπορούμε να καταλήξουμε είναι ότι σε συμβολογράμματα με υψηλές τιμές φάσης και μεγάλο εύρος τιμών, οι μέθοδοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης με βάση το συμβολόγραμμα (Phase Based) κρίνονται ανεπαρκείς.

Σε αυτό το συμπέρασμα οφείλεται και το γεγονός ότι και οι δύο μέθοδοι που εξαρτώνται από την τοπογραφία της περιοχής δεν είναι ικανές να υπολογίσουν την τροποσφαιρική καθυστέρηση που οφείλεται σε αναταράξεις της ατμόσφαιρας (turbulence) και πολύ πιθανό να επηρεάζει τα συμβολογράμματα με μεγάλο εύρος τιμών (*Πίνακας 2*).

- ❖ Η μέθοδος ακόμα μπορεί να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα στην επίλυση και δίνει την δυνατότητα σύγκρισης σφαλμάτων με κάποια διαφορετική μέθοδο. Παρ' όλα αυτά στην εκτέλεσή της είναι μία πολύπλοκη μέθοδος καθώς οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σχετίζονται άμεσα με την περιοχή μελέτης (το υψόμετρο, η τοπογραφία, η ύπαρξη βουνοκορφής, το μέγεθος της έκτασης της περιοχής) τα οποία επηρεάζουν το μέγεθος των

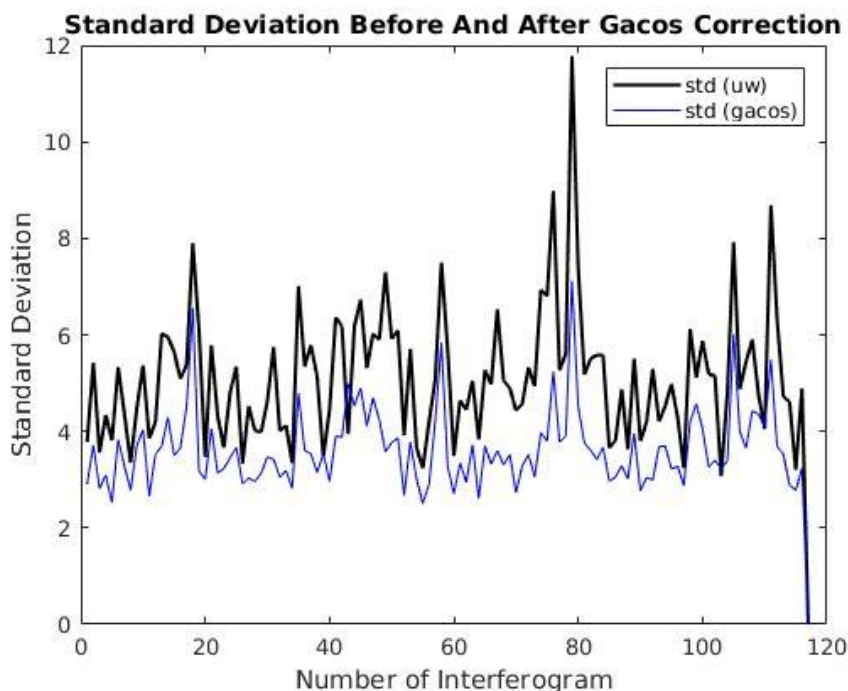
φίλτρων, την ανάλυση των εικονοστοιχείων, το μέγεθος των παραθύρων διόρθωσης. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα μπορούν να διαφέρουν σημαντικά από την επιλογή των παραμέτρων και χρειάζεται πολύ καλή κατανόηση αλλά και πολλές επαναληπτικές μέθοδοι για να καταλήξει κάποιος στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπρόσθετα και λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου και του αλγορίθμου χρειάζεται αρκετός υπολογιστικός χρόνος αλλά και υπολογιστική ισχύ για να επιλυθεί η διόρθωση.

Λαμβάνοντας υπόψιν λοιπόν όλα τα παραπάνω δεν θα προτεινάμε η μέθοδος διόρθωσης Power-law να αποτελεί πρωταρχική επιλογή για την επίλυση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας αλλά ίσως εναλλακτική λύση.

5.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GACOS

Η μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης GACOS (Global Atmospheric Correction System) έχει εμφανίσει υποσχόμενα αποτελέσματα στη διόρθωση της ατμοσφαιρικής παραμόρφωσης στις εικόνες InSAR. Ενώ η ακριβής λειτουργία και η αποτελεσματικότητά της εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, υπάρχουν λόγοι που η μέθοδος GACOS μπορεί να θεωρηθεί πιο επιθυμητή σε σύγκριση με μεθόδους όπως η γραμμική και η Power-Law.

Επειδή ακριβώς παράγει προϊόντα υψηλής ανάλυσης με ακρίβεια και αξιοπιστία καθώς οι αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι της επεξεργάζονται δεδομένα από πολλές πηγές, περιμένουμε τα αποτελέσματα της να είναι καλύτερα από τις προηγούμενες μεθόδους.



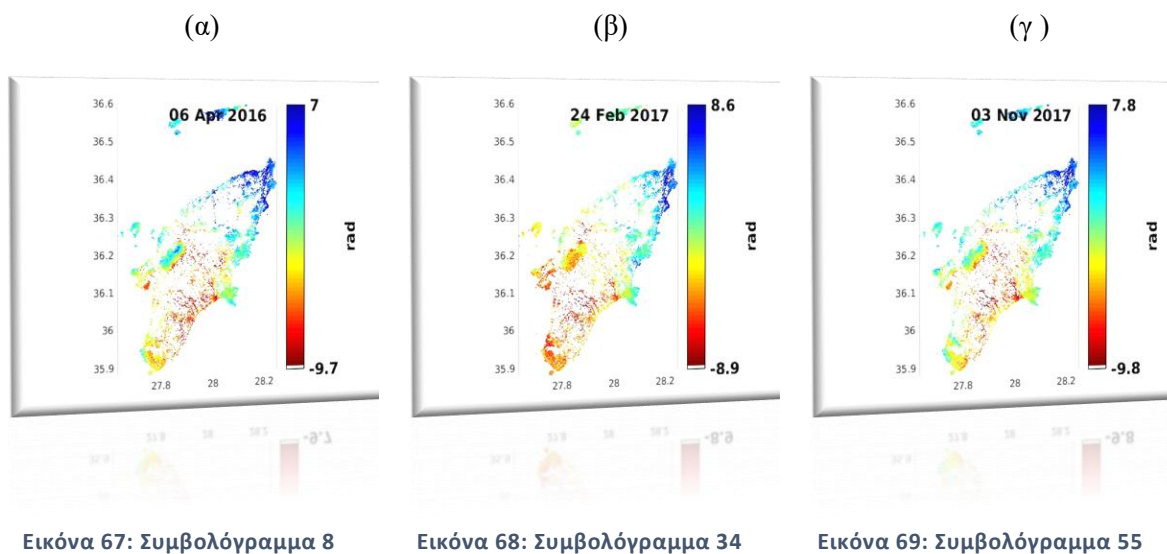
Σχήμα 17: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με τη μέθοδο GACOS

Πράγματι όπως γίνεται αισθητό στο (Σχήμα 17) από τις γραφικές παραστάσεις, με τη μέθοδο GACOS η τυπική απόκλιση μειώνεται αρκετά περισσότερο από τις μέχρι τώρα μεθόδους που βασίζονται στο συμβολόγραμμα και τις οποίες έχουμε αναλύσει .

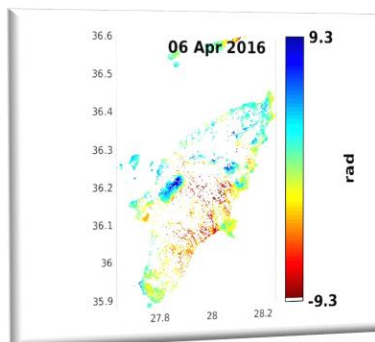
Χρησιμοποιώντας και πάλι τον τύπο της ποσοστιαίας μεταβολής από την εξίσωση (7) βρίσκουμε ότι η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων μετά την διόρθωση είναι **3.5991** οπότε συνακόλουθα η μεταβολή της είναι **-29.08%** περίπου δηλαδή στο **1/3** της αρχικής τιμής αλλά και **10** μονάδες περισσότερες από εκείνη της Power-law.

Παρακάτω παρατίθενται και πάλι εκείνα τα συμβολογράμματα που έχουμε επιλέξει για την αξιολόγηση των ατμοσφαιρικών διορθώσεων, για να καταλήξουμε σε περαιτέρω συμπεράσματα.

- ❖ Τα συμβολογράμματα με χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης όπως και στις προηγούμενες αξιολογήσεις, παρουσιάζονται κατά σειρά στις εικόνες (α) έως (ζ). Τα διορθωμένα τους συμβολογράμματα παρουσιάζονται στις εικόνες (3α) έως (3ζ).
- ❖ Αντίστοιχα τα συμβολογράμματα με υψηλή τυπική απόκλιση παρουσιάζονται στις εικόνες (η) έως (μ) με τα διορθωμένα τους να παρουσιάζονται στις εικόνες (3η) έως (3μ).

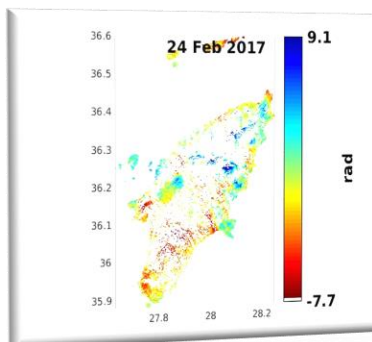


(3α)



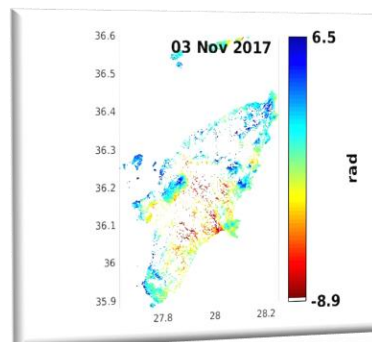
Εικόνα 70: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση GACOS)

(3β)



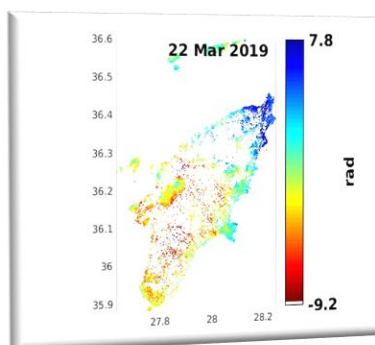
Εικόνα 71: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση GACOS)

(3γ)



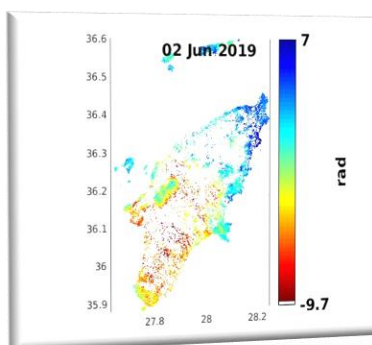
Εικόνα 72: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση GACOS)

(δ)



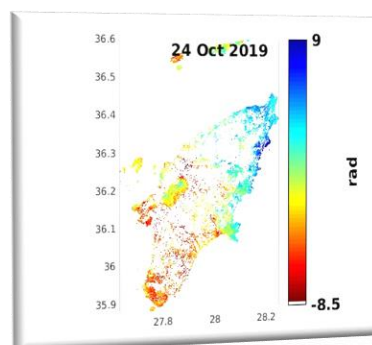
Εικόνα 73: Συμβολόγραμμα 97

(ε)



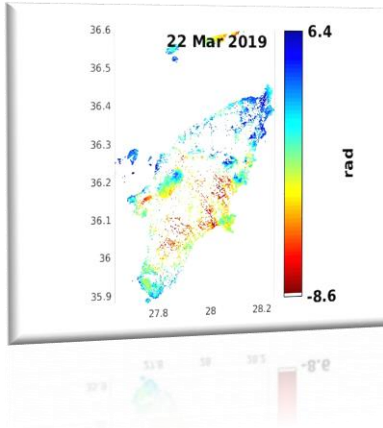
Εικόνα 74: Συμβολόγραμμα 103

(ζ)



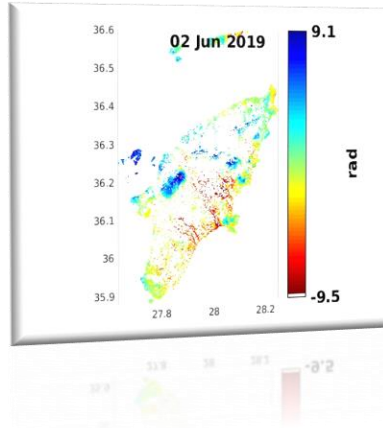
Εικόνα 75: Συμβολόγραμμα 115

(3δ)



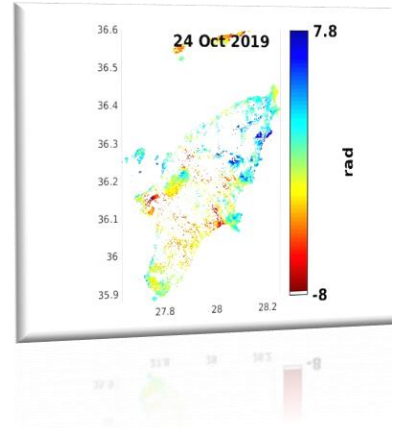
Εικόνα 76: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97 (Διόρθωση GACOS)

(3ε)



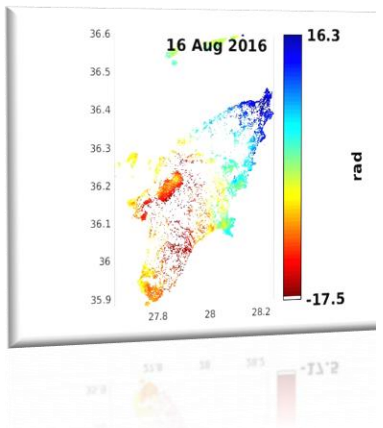
Εικόνα 77: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση GACOS)

(3ζ)



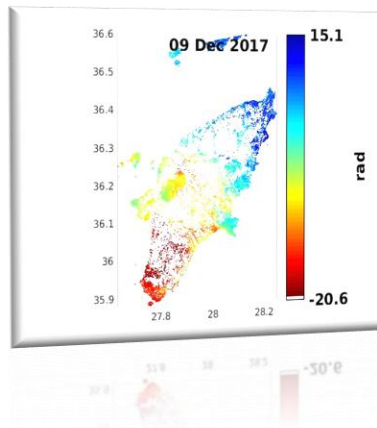
Εικόνα 78: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115 (Διόρθωση GACOS)

(η)



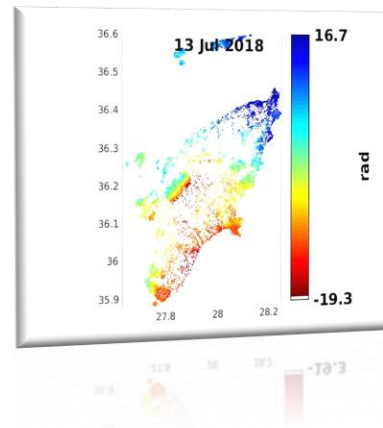
Εικόνα 79: Συμβολόγραμμα 18

(θ)



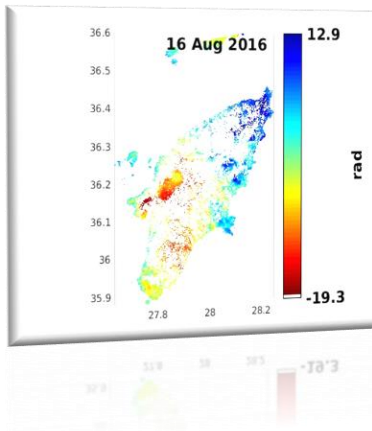
Εικόνα 80: Συμβολόγραμμα 58

(ι)



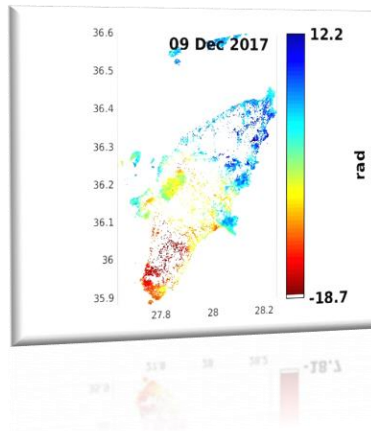
Εικόνα 81: Συμβολόγραμμα 76

(3η)



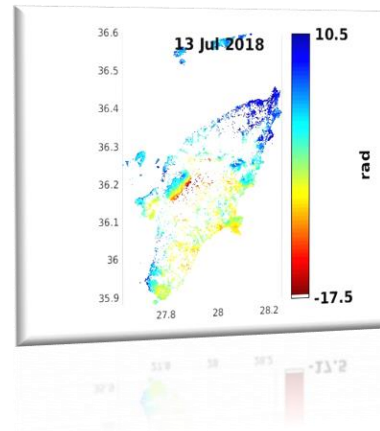
Εικόνα 82: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση GACOS)

(3θ)



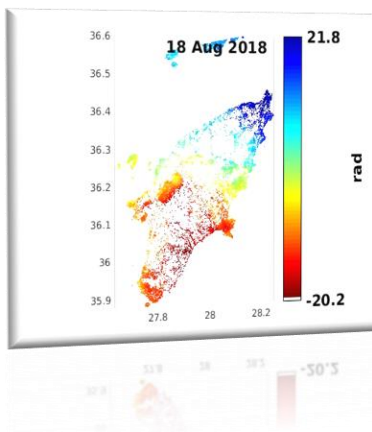
Εικόνα 83: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση GACOS)

(3ι)



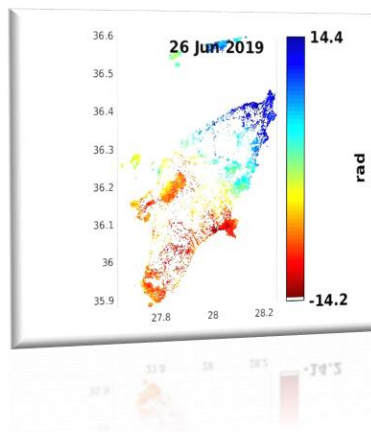
Εικόνα 84: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση GACOS)

(κ)



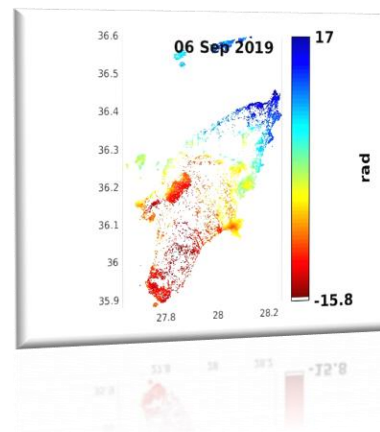
Εικόνα 85: Συμβολόγραμμα 79

(λ)



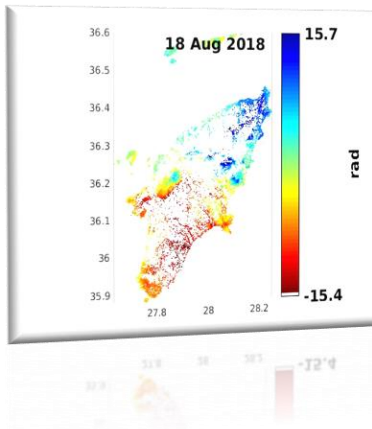
Εικόνα 86: Συμβολόγραμμα 105

(μ)



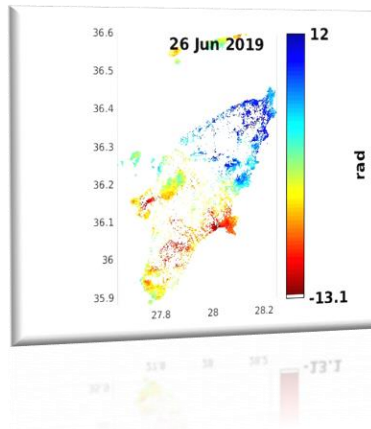
Εικόνα 87: Συμβολόγραμμα 111

(3κ)



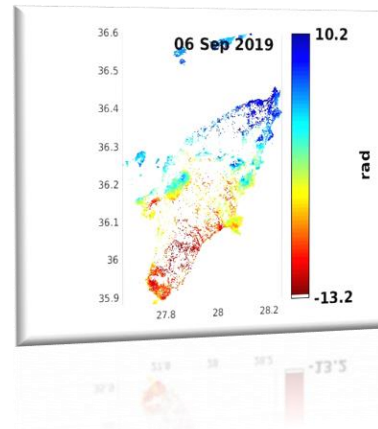
Εικόνα 88: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση GACOS)

(3λ)



Εικόνα 89: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση GACOS)

(3μ)



Εικόνα 90: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111 (Διόρθωση GACOS)

5.4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ GACOS

Τα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον αν και σε αρκετά συμβολογράμματα είναι αμφιλεγόμενα. Σαφώς και συναντάμε όπως περιμέναμε από τις γραφικές παραστάσεις μείωση των τιμών της φάσης και της τυπικής απόκλισης αλλά η μέθοδος συμπεριφέρεται διαφορετικά στις χαμηλές κα διαφορετικά στις υψηλές τιμές.

Αναλυτικότερα:

- ❖ Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το συμβολόγραμμα (8) *εικόνα (3α)* όπου παρά το γεγονός ότι η τυπική απόκλιση έχει μειωθεί και συγκεκριμένα από **3.3498** σε **2.7791** οι μέγιστες τιμές της φάσης αυξάνονται κατά 2.3 rad από 7 σε 9.3.
- ❖ Ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι οι τιμές της φάσης σήματος πριν την διόρθωση ήταν μεγαλύτερες στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα του νησιού όπου βρίσκεται και η πόλη της Ρόδου. Μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση όμως οι ακόμα μεγαλύτερες τιμές που δημιουργούνται βρίσκονται αν παρατηρήσει κανείς στο βουνό του Αττάρυβου ενώ οι τιμές στην πόλη μειώνονται.
- ❖ Ακριβώς η ίδια διαπίστωση γίνεται και για το συμβολόγραμμα 103 *εικόνα (3ε)* όπου δημιουργούνται πάλι μεγαλύτερες τιμές στον βουνό του Αττάρυβου αλλά και στο νησί της

Αλίμιας Δυτικά της νήσου της Ρόδου. Όπως όμως υπολογίσαμε με το πρόγραμμα στην MATLAB, η τυπική απόκλιση του συμβολογράμματος αυξάνεται από 3.0717 σε 3.2240 κάτι που αν παρατηρήσουμε προσεκτικά φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις.

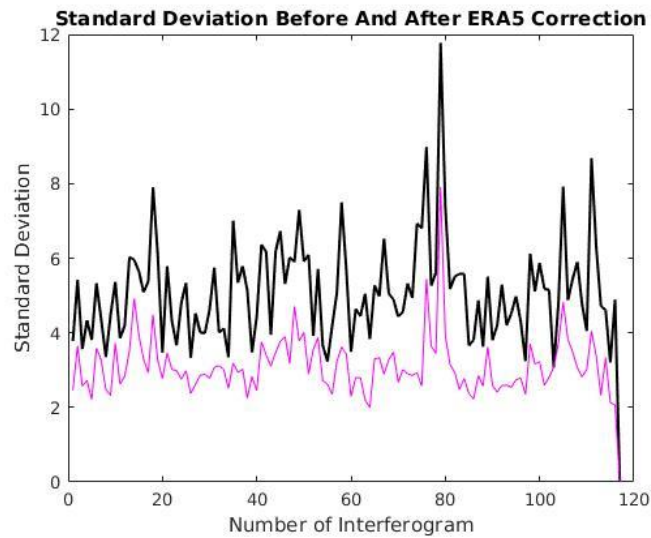
- ❖ Στα υπόλοιπα συμβολογράμματα φαίνεται να υπάρχει μία ομοιογενής μείωση τιμών (εκτός από το 34, εικόνα 1β όπου και πάλι οι μέγιστες τιμές της φάσης αυξάνονται αλλά η τυπική του απόκλιση μειώνεται) όπου φτάνει και τα 1.4 rad στο συμβολόγραμμα 97 και *εικόνα (3δ)*.
- ❖ Όσον αφορά τα συμβολογράμματα με τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση η μείωση της φάσης λόγω αφαίρεσης της ατμόσφαιρας είναι αρκετά μεγάλη και εμφανής και φτάνει μέχρι και τα 6.8 rad συμβολόγραμμα 111 *εικόνα (3μ)* και 6.1 rad στο συμβολόγραμμα 76 και εικόνα (1ι).
- ❖ Επίσης στο συμβολόγραμμα 79 *εικόνα (3κ)* όπου είχαμε αναφέρει πιο πάνω ότι οι προηγούμενες μέθοδοι προέβησαν σε ανεπιτυχή διόρθωση, έχουμε μείωση των μέγιστων θετικών τιμών κατά 6.1 rad και 4.8 των αρνητικών κατά απόλυτη τιμή με συνολική μείωση της τυπικής απόκλισης **39.5%**.
- ❖ Εξάιρεση αποτελεί το συμβολόγραμμα 18 *εικόνα (3η)* όπου μετά τη διόρθωση αυξάνονται οι μέγιστες τιμές φάσης κατά απόλυτη τιμή. Παρόλα αυτά στο βουνό του Αττάρυβου που μας έχει απασχολήσει, όπως φαίνεται η φάση έχει μειωθεί.

Συμπερασματικά, από τα άνωθεν αποτελέσματα μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος παρουσίασε αστοχία σε δύο συμβολογράμματα χαμηλής τυπικής απόκλισης ενώ η διόρθωση των τιμών δεν διαφέρει πολύ από τη Γραμμική και τη μέθοδο Power-law. Οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι ισότιμη και ίσως λιγότερο αξιόπιστη όταν έχουμε να ερευνήσουμε εικόνες με μικρό εύρος τιμών φάσης και χαμηλές τυπικές αποκλίσεις.

Στον αντίποδα η μέθοδος έχει συμπεριφερθεί αρκετά ικανοποιητικά στα συμβολογράμματα με μεγάλο εύρος τιμών φάσης και υψηλές τυπικές αποκλίσεις (μεγάλη μείωση τιμών) *καθώς είναι και η μόνη έως τώρα που διόρθωσε το πιο κρίσιμο συμβολόγραμμα (79)*. Οπότε είναι ασφαλές να αναφέρουμε ότι είναι μία πολύ αξιόπιστη μέθοδος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν έχουμε δεδομένα μετρήσεων με πολύ υψηλές τιμές φάσεις επηρεασμένα από την ξηρή ή την υγρή ατμόσφαιρα.

5.5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ERA5

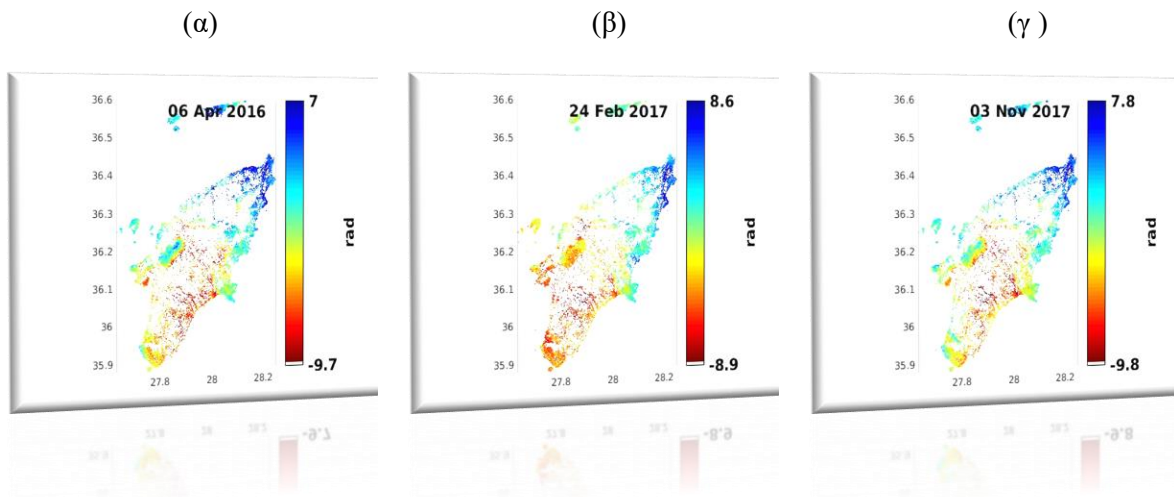
Η ατμοσφαιρική διόρθωση με τη μέθοδο ERA5 θεωρητικά πρέπει να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς οι διαδικασίες που χρησιμοποιεί για την ανασύνθεση είναι αρκετά εξειδικευμένες και υπάρχει η πρόσβαση σε έναν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων παγκόσμιας κλίμακας (παλαιότερων ετών) ώστε να γίνει η σύγκριση των μετεωρολογικών δεδομένων (όπως αναφέρθηκε αναλυτικά και στο κεφάλαιο 4.6) . Αυτό παρέχει σε όποιον χρησιμοποιεί την υπηρεσία σταθερότητα υψηλή χωρική και χρονική ακρίβεια και αξιοπιστία στα προϊόντα του σε σχέση με πιο απλουστευμένες μεθόδους που στηρίζονται στην φάση (κατά γενική ομολογία και όχι απόλυτα). Η διόρθωση ανταποκρίθηκε σε αυτές τις προσδοκίες και τα αποτελέσματα της ακολουθούν παρακάτω:



Σχήμα 18: Σύγκριση τυπικών αποκλίσεων αποκατεστημένης φάσης και διορθωμένης ατμοσφαιρικής φάσης με την μέθοδο ERA5

Εξετάζοντας την γραφική παράσταση της τυπικής απόκλισης των διορθωμένων από την ατμόσφαιρα συμβολογραμμάτων (Σχήμα 18) παρατηρούμε τη μεγαλύτερη έως τώρα μείωση τιμών (με εξαίρεση ένα συμβολόγραμμα που θα αναφέρουμε παρακάτω).

Αναλύοντας διεξοδικά τις μετρήσεις με τη βοήθεια του προγράμματος που αναπτύχθηκε στη MATLAB βρίσκουμε ότι η μέση τυπική απόκλιση της ERA5 είναι **3.0928** οπότε σύμφωνα με την [εξίσωση \(7\)](#) η ποσοστιαία μεταβολή της είναι **39.06 %** το οποίο επιβεβαιώνει την αρχική μας εκτίμηση ότι πρόκειται για τη μεγαλύτερη μείωση έως τώρα. Συνεχίζοντας την διερεύνηση παραθέτουμε και πάλι τα ίδια συμβολογράμματα που έχουμε επιλέξει πριν και μετά την διόρθωση με την μέθοδο ERA5 ώστε να αξιολογήσουμε επιπλέον την ορθότητα της μεθόδου.

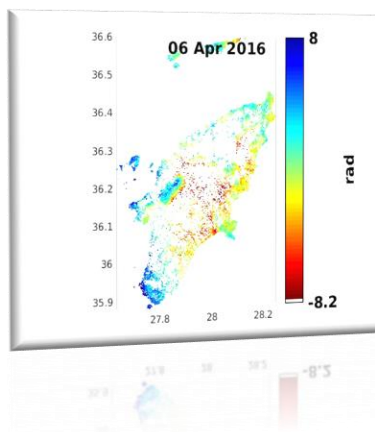


Εικόνα 91: Συμβολόγραμμα 8

Εικόνα 92: Συμβολόγραμμα 34

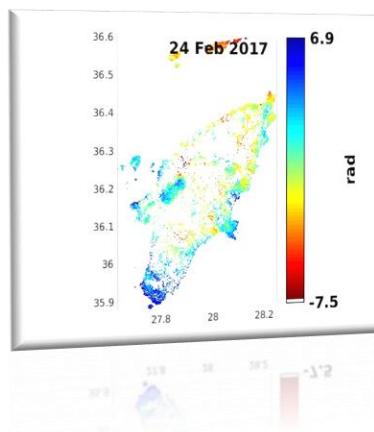
Εικόνα 93: Συμβολόγραμμα 55

(4α)



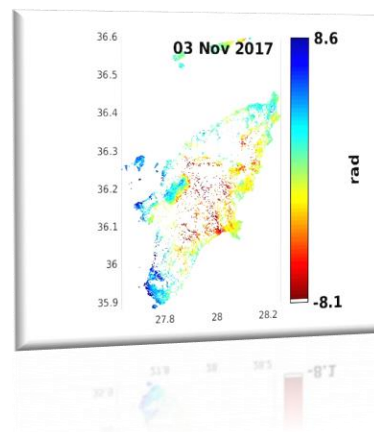
Εικόνα 94: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 8 (Διόρθωση ERA5)

(4β)



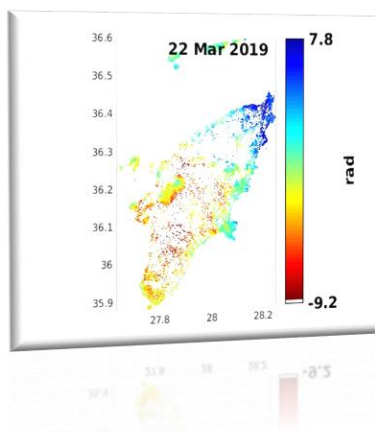
Εικόνα 95: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 34 (Διόρθωση ERA5)

(4γ)



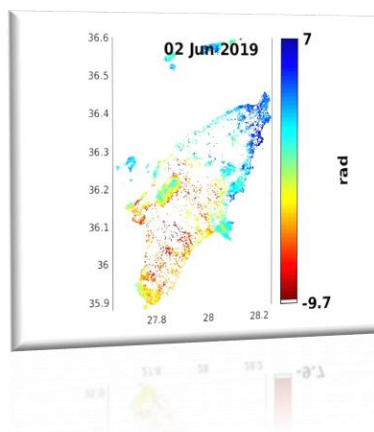
Εικόνα 96: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 55 (Διόρθωση ERA5)

(δ)



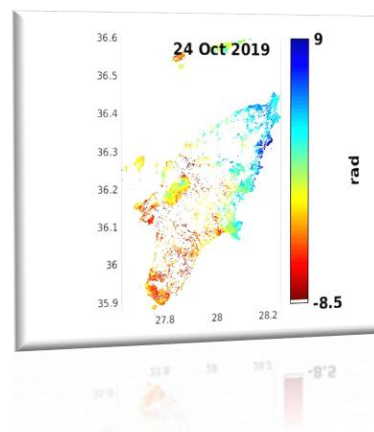
Εικόνα 97: Συμβολόγραμμα 97

(ε)



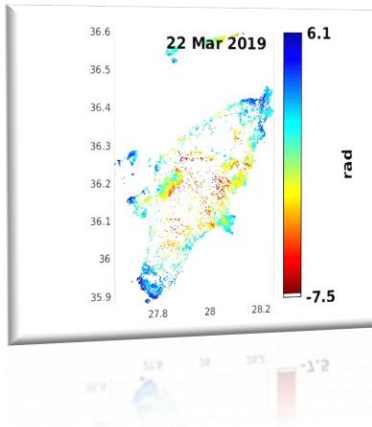
Εικόνα 98: Συμβολόγραμμα 103

(ζ)



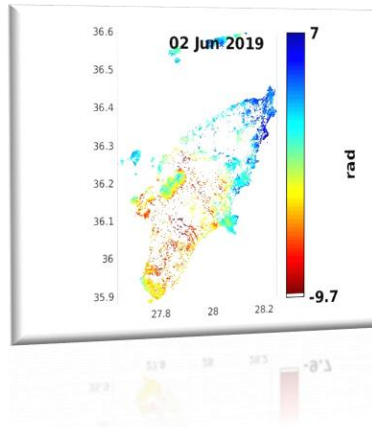
Εικόνα 99: Συμβολόγραμμα 115

(4δ)



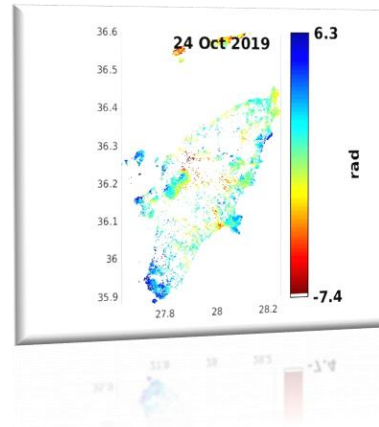
Εικόνα 100: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 97(Διόρθωση ERA5)

(4ε)



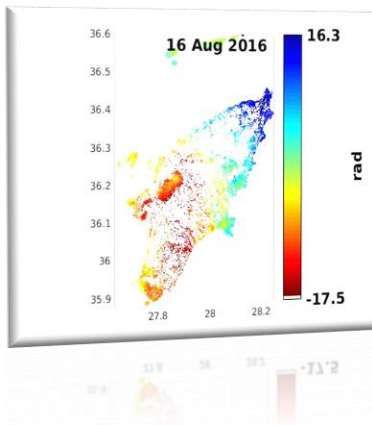
Εικόνα 101: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 103 (Διόρθωση ERA5)

(4ζ)



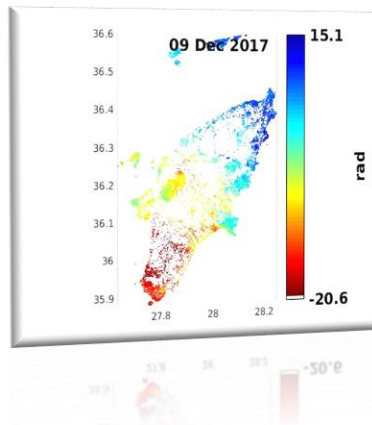
Εικόνα 102: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 115(Διόρθωση ERA5)

(η)



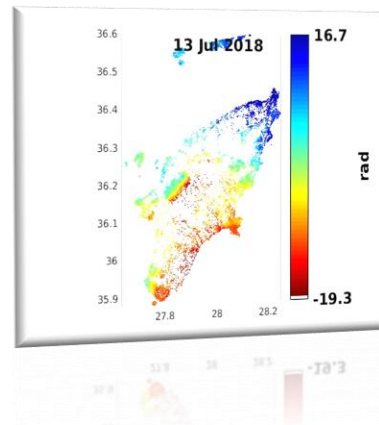
Εικόνα 103: Συμβολόγραμμα 18

(θ)



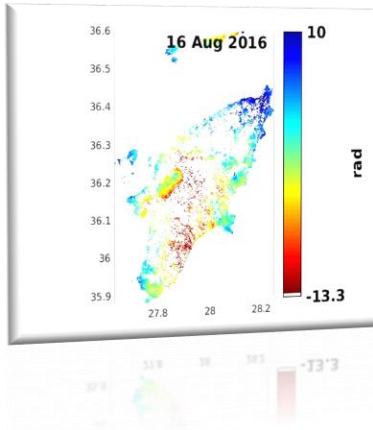
Εικόνα 104: Συμβολόγραμμα 58

(ι)



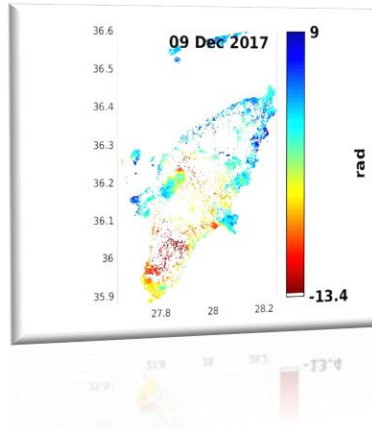
Εικόνα 105: Συμβολόγραμμα 76

(4η)



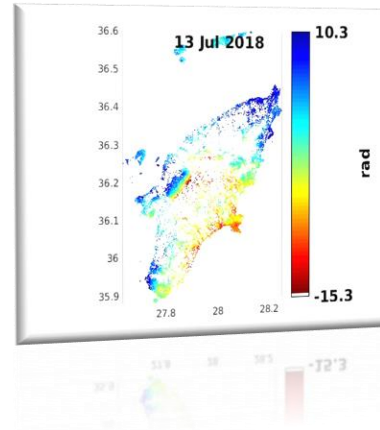
Εικόνα 106: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 18 (Διόρθωση ERA5)

(4θ)



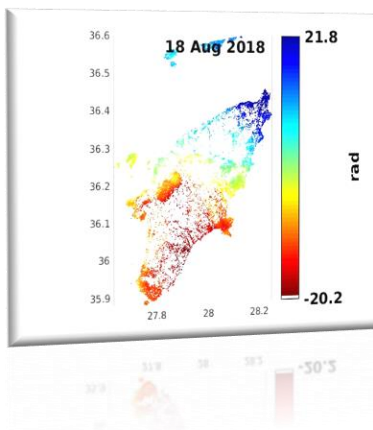
Εικόνα 107: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 58 (Διόρθωση ERA5)

(4ι)



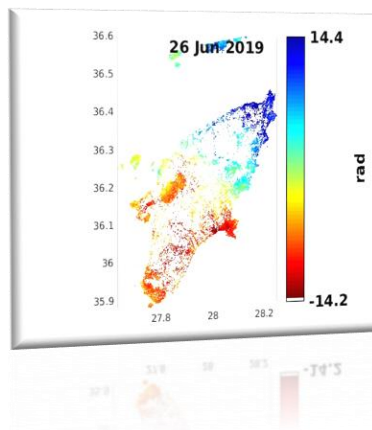
Εικόνα 108: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 76 (Διόρθωση ERA5)

(κ)



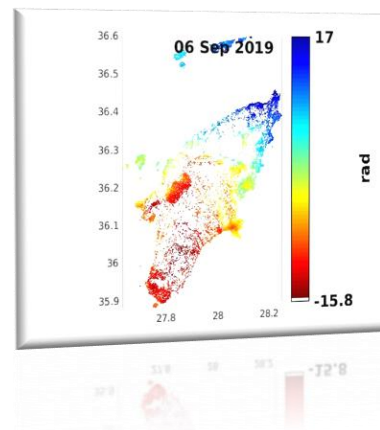
Εικόνα 109: Συμβολόγραμμα 79

(λ)

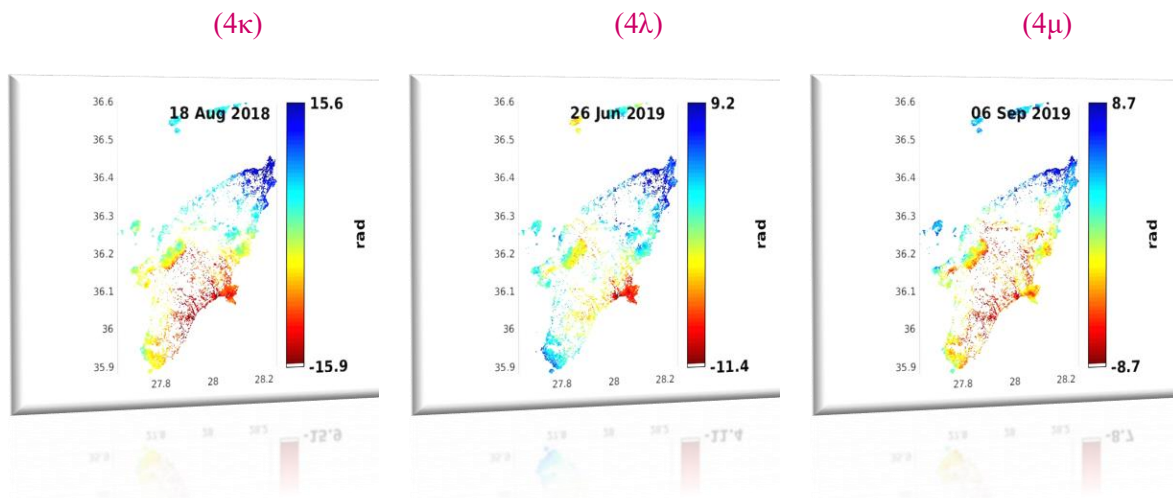


Εικόνα 110: Συμβολόγραμμα 105

(μ)



Εικόνα 111: Συμβολόγραμμα 111



Εικόνα 112: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 79 (Διόρθωση ERA5)

Εικόνα 113: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 105 (Διόρθωση ERA5)

Εικόνα 114: Ατμοσφαιρικά διορθωμένο συμβολόγραμμα 111(Διόρθωση ERA5)

5.5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ERA5

Τα αποτελέσματα της μεθόδου όσον αφορά την σύγκριση των συμβολογραμμμάτων πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση που παρουσιάζονται στις παραπάνω εικόνες είναι αρκετά υποσχόμενα ώστε η ERA5 να συμπεραίνεται ότι είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος για την διόρθωση της ατμόσφαιρας των εικόνων και την καλύτερη ανάδειξη των τιμών της φάσης. Υπάρχουν όμως και κάποια αμφιλεγόμενα σημεία στην αξιολόγηση της. Αναλυτικά τα συμπεράσματα όσον αφορά τα συμβολογράμματα με τις πιο χαμηλές αποκλίσεις είναι τα παρακάτω:

- ❖ Αστοχία στο συμβολόγραμμα 103 *εικόνα (4ε)* το οποίο παρέμεινε αμετάβλητο.
- ❖ Στο συμβολόγραμμα 8 *εικόνα (4α)* αλλά και 55 *εικόνα (4γ)* οι μεγαλύτερες θετικές τιμές της φάσης αυξάνονται από 7 σε 8 και από 7.8 σε 8.6 rad ενώ οι μέγιστες αρνητικές μειώνονται 1.5 και 1.7 rad αντίστοιχα κατά απόλυτη τιμή. Οι τυπικές αποκλίσεις όμως παράλληλα μειώνονται σχεδόν μία μονάδα για το συμβολόγραμμα 8 (από 3.3498 σε 2.4788) και 0.6 για το συμβολόγραμμα 55 (από 3.2318 σε 2.6232).
- ❖ Μεγάλη διόρθωση παρατηρούμε και στο συμβολόγραμμα 115 (*εικόνα 1ζ*) από 3.2043 σε 2.1250 και μεταβολή τυπικής απόκλισης **34%**. Παρόμοια μείωση παρουσιάζει το συμβολόγραμμα 97 *εικόνα (1δ)* με μεταβολή **28%**.

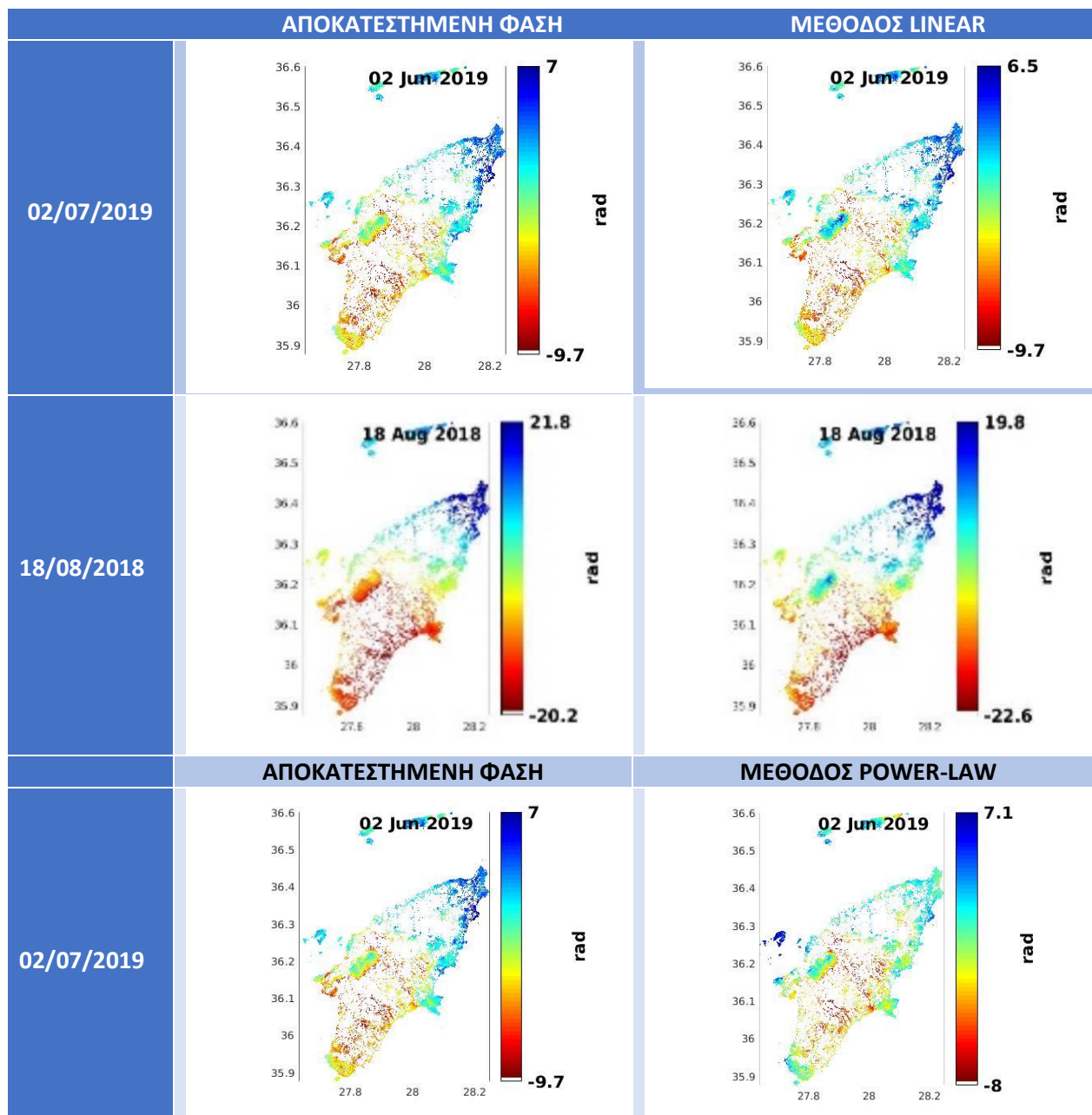
- ❖ Σημαντικό επίσης είναι ότι η διόρθωση φαίνεται να έχει ένα μοτίβο. Κατά κύριο λόγο εξαλείφει την φάση όπως φαίνεται σε πεδινές περιοχές σε όλο το νησί, μειώνει την φάση κατά τόπους στο βουνό του Αττάρυβου αλλά και κατά πολύ στην Βόρειο-Ανατολική πλευρά στην πόλη της Ρόδου. Αντίθετα αυξάνει την φάση (ή τουλάχιστον την “συντηρεί”) στη Νότια πλευρά, στην περιοχή της Μαχαιριάς και Δυτικά στο διπλανό νησί της Αλίμιας και μάλιστα με αντιστροφή τιμών.

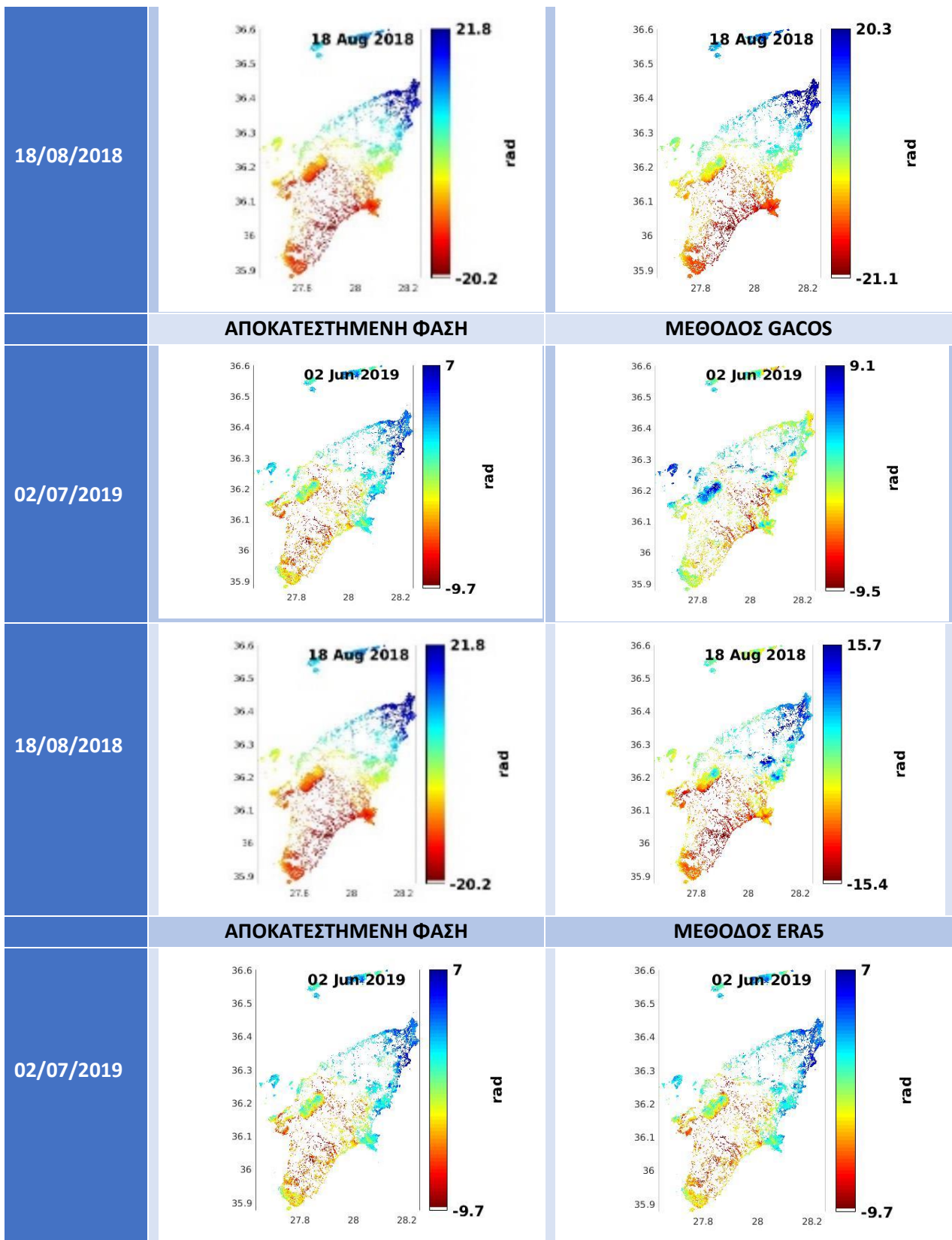
Όσον αφορά τα διαγράμματα με τις υψηλότερες τυπικές αποκλίσεις :

- ❖ Η διόρθωση είναι πιο απλουστευμένη αφού είναι ομοιόμορφη και πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια στις περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές φάσης (εξαιρέση ίσως αποτελεί το *συμβολόγραμμα 76 εικόνα 4δ*). Παρόλα αυτά η μείωση είναι εξαιρετικά μεγάλη (όπως είδαμε και αρχικά από τα διαγράμματα). Σημείο αναφοράς αποτελεί το *συμβολόγραμμα 111 (εικόνα 4μ)* όπου η τυπική απόκλιση από 8.6851 μονάδες ελαττώνεται σε 4.0515 και σε ποσοστό **53.35% !**
- ❖ Επίσης είναι εμφανής και πάλι η διόρθωση στο κρίσιμο *συμβολόγραμμα 79 (εικόνα 4κ)* όπου η τυπική απόκλιση μειώθηκε κατά 3.8 μονάδες και ποσοστό **32.8%** όπως συνέβη και με τη μέθοδο GACOS 4.6 μονάδες (**39.5%**).
- ❖ *Καταλήγοντας, η μέθοδος της ατμοσφαιρικής διόρθωσης ERA5 φαίνεται να επιφέρει τις σημαντικότερες διορθώσεις στις εικόνες και είναι και εκείνη με τα λιγότερα σφάλματα και αστοχίες σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους, είτε όταν έχουμε να μελετήσουμε *συμβολογράμματα με σχετικά χαμηλές τιμές φάσης ή όταν η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι μεγάλη και οι τιμές μέγιστες.**
- ❖ Υπάρχουν τρία ακόμα επιπλέον συμπεράσματα που μας οδηγούν στο να κάνουμε μία περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα αποτελέσματα των μεθόδων. Το πρώτο είναι ότι τα *συμβολογράμματα με τις μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις φαίνεται να παρουσιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες σε αυτήν την τετραετή χρονοσειρά με εξαίρεση το *συμβολόγραμμα της 09/12/2017.**
- ❖ Το δεύτερο είναι ότι η *φάση δεν μηδενίζεται* μετά την διόρθωση η τουλάχιστον να είναι κοντά σε μηδενικές τιμές κάτι που θεωρητικά θα περιμέναμε μετά την αφαίρεση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης.
- ❖ Το τρίτο είναι ένα παρατηρηθέν μοτίβο αυξομείωσης της φάσης από τον Βορρά στο Νότο.

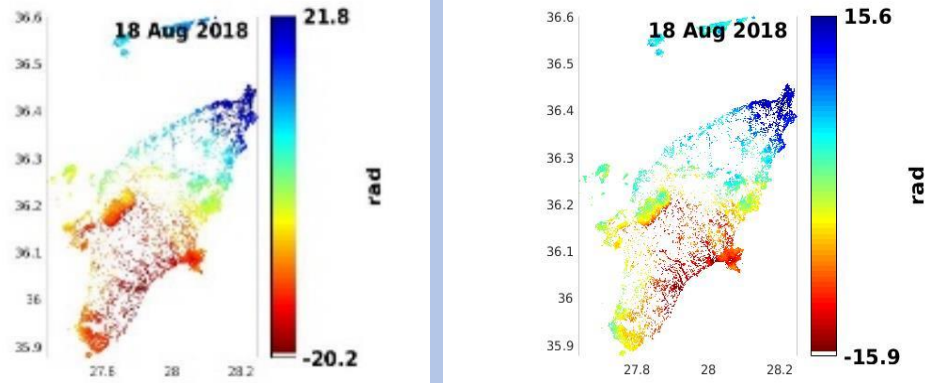
5.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο παραθέτουμε πίνακες και σχήματα που αφορούν την απόδοση των μεθόδων και τα κριτήρια αξιολόγησης τους ως προς την αποδοτικότητα τους και την ευχέρεια χρήσης τους. Ακολουθούν λοιπόν συγκριτικά διαγράμματα του δείκτη σύγκρισης δηλαδή της τυπικής απόκλισης, πίνακες αξιολόγησης καθώς και εικόνες απόδοσης των μεθόδων, όπου γίνεται εμφανές (τουλάχιστον για το συγκεκριμένο αντικείμενο έρευνας) όπως έχουμε αναφέρει στην ανώτερη παράγραφο η αποδοτικότερη μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης είναι εκείνη της ERA5.

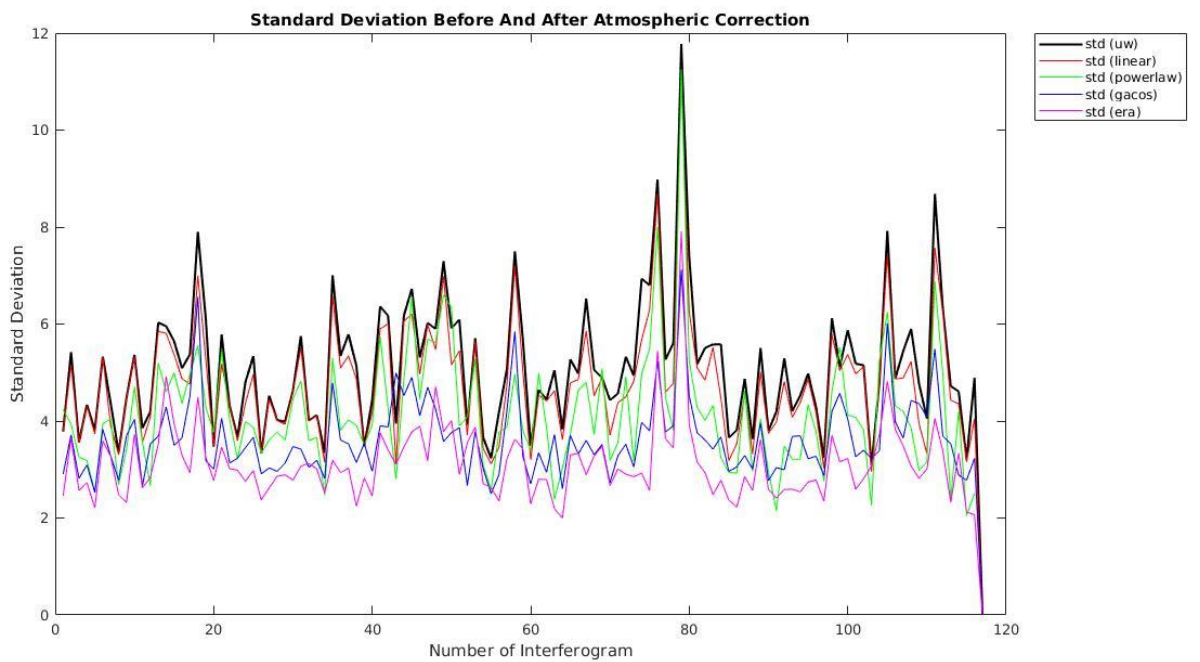




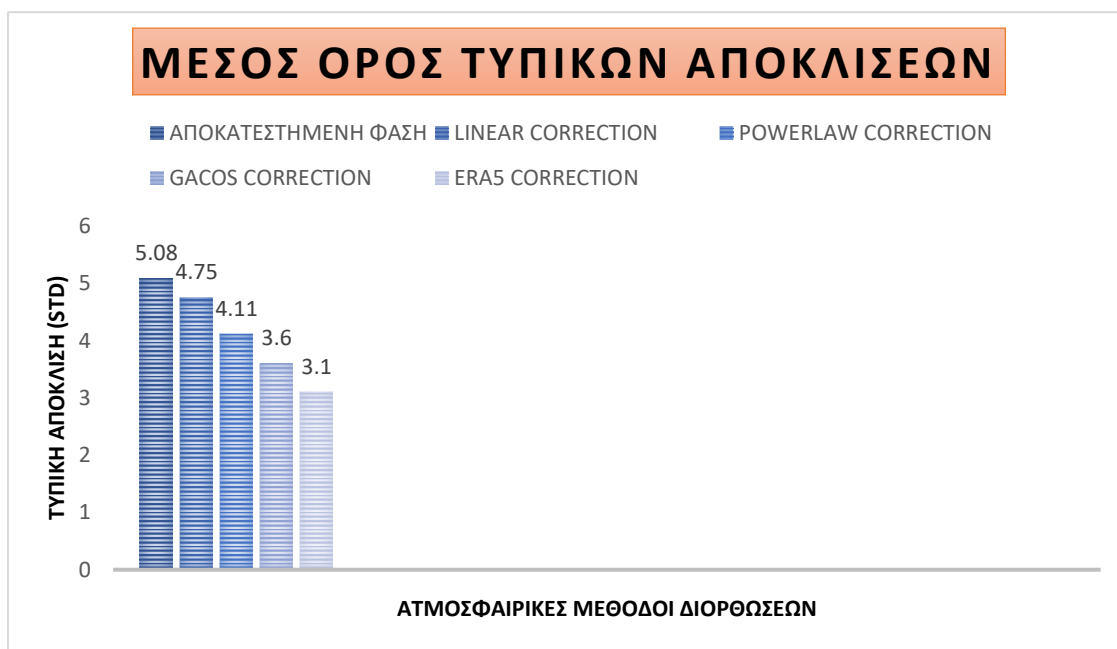
18/08/2018



Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας ατμοσφαιρικών διορθώσεων συμβολογραμμάτων αξιολόγησης 79 και 103 (Υψηλότερη-Χαμηλότερη διασπορά τιμών) πριν και μετά την εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης που χρησιμοποιήθηκαν .



Σχήμα 19: Συγκεντρωτικό σχήμα τυπικών αποκλίσεων μεθόδων αξιολόγησης πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.



Σχήμα 20: Μέσος όρος τυπικών αποκλίσεων ατμοσφαιρικών διορθώσεων.

	Linear Correction	Power-law Correction	GACOS Correction	ERA5 (ECMWF) Correction
Τυπική Απόκλιση	Μείωση Μέσης Τιμής Τυπικής Απόκλισης κατά 6.43 %	Μείωση Μέσης Τιμής Τυπικής Απόκλισης κατά 19.02 %	Μείωση Μέσης Τιμής Τυπικής Απόκλισης κατά 29.08 %	Μείωση Μέσης Τιμής Τυπικής Απόκλισης κατά 39.06%
Συμβολογράμματα Χαμηλής Τυπικής Απόκλισης	Σχεδόν Αμετάβλητα	Μικρή Διόρθωση	Μικρή Διόρθωση	Μερική Διόρθωση
Συμβολογράμματα Υψηλής Τυπικής Απόκλισης	Ελάχιστη Διόρθωση Τιμών	Μικρή Διόρθωση	Πολύ Καλή Απόδοση Με Σημαντική Μείωση Τιμών	Πολύ Καλή Απόδοση Με Σημαντική Μείωση Τιμών
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	Λειτουργική για μικρές εκτάσεις, αδυναμία διαχωρισμού της από την πραγματική παραμόρφωση	Υψηλοί υπολογιστικοί χρόνοι, αλλαγές παραμέτρων βάση της περιοχής μελέτης	Απαιτεί είσοδο δεδομένων και παραμέτρων του μοντέλου	Απαιτεί είσοδο δεδομένων και παραμέτρων του μοντέλου
Hydrostatic Delay	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Wet Delay	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Turbulence	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

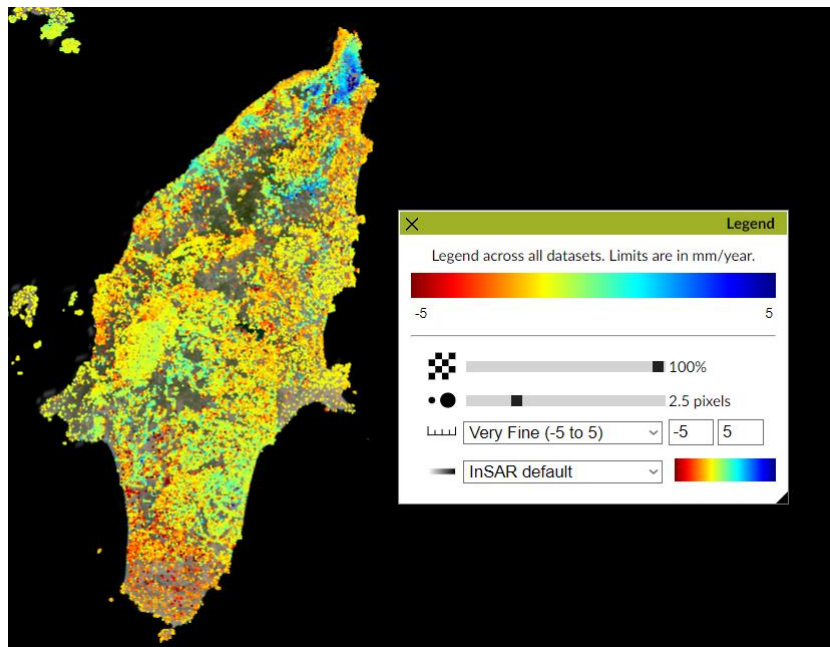
Πίνακας 8: Συμπερασματικός πίνακας ατμοσφαιρικών διορθώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

6.1. ΜΙΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

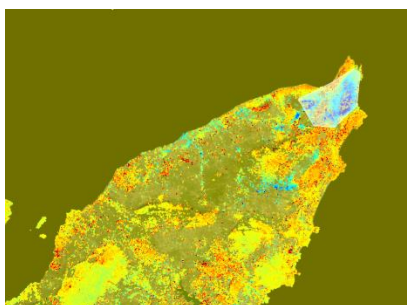
Σε αυτό το κεφάλαιο θα ερευνήσουμε την αστοχία των μεθόδων και τα σφάλματα που τυχόν επιφέρουν στις διορθώσεις των εικόνων. Τα αποτελέσματα των μεθόδων κατά γενική ομολογία ήταν ικανοποιητικά όμως σε βαθύτερη ανάλυση είναι διαφορετικά από εκείνα που ιδανικά και θεωρητικά θα περιμέναμε. Σε περιοχές που δεν έχουν υποστεί παραμόρφωση του εδάφους μετά την αφαίρεση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης οι τιμές της φάσης θα έπρεπε να είχαν τιμή κοντά στο 0. Αυτό όπως είναι φανερό ότι δεν παρατηρείται σε καμία μέθοδο. Διεξάγουμε επιπλέον έρευνα με την βοήθεια της πλατφόρμας EGMS(Earth Ground Motion Service) της Ευρωπαϊκής υπηρεσίας παρατήρησης της Γης Copernicus, αλλά και με το λογισμικό TRAIN το οποίο μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την ταχύτητα μετακίνησης των σταθερών σκεδαστών `ps_plot_vs`.



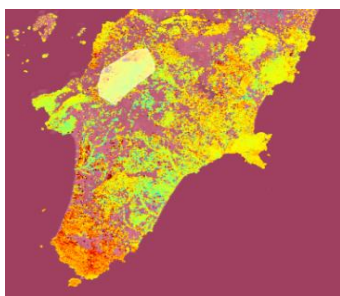
Εικόνα 115: Χάρτης μικρομετακινήσεων (mm/έτος) νησί της Ρόδου (EGMS)

Στον χάρτη παραμόρφωσης και μικρομετακινήσεων του εδάφους (Εικόνα 115) παρατηρούμε ότι υπάρχουν περιοχές με μικρομετακίνηση οι οποίες βρίσκονται κυρίως στο βόρειο και στο νότιο τμήμα από -5 έως 5 mm τον χρόνο. Παρ' όλα αυτά η μικρομετακίνηση αυτή δεν θεωρείται μεγάλη και κρίσιμη. Υλοποιήσαμε επιπλέον έρευνα σε 3 κρίσιμες περιοχές που στα συμβολογράμματα παρουσίαζαν μεγαλύτερη φάση. Δημιουργώντας πολύγωνα σε κάθε μία περιοχή, εξήγαμε χρονοσειρά μέσης μικρομετακίνησης σημείων που υπήρχαν στα πολύγωνα.

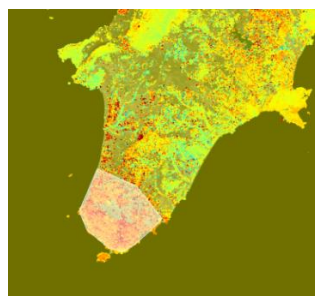
Τα σημεία είναι ενδεικτικά και δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζονται με τους σταθερούς σκεδαστές που χρησιμοποιήσαμε άνωθεν. Οι χρονολογίες συμπίπτουν για 2 χρονιές, το 2018 και το 2019, με τα συμβολογράμματα της έρευνας μας.



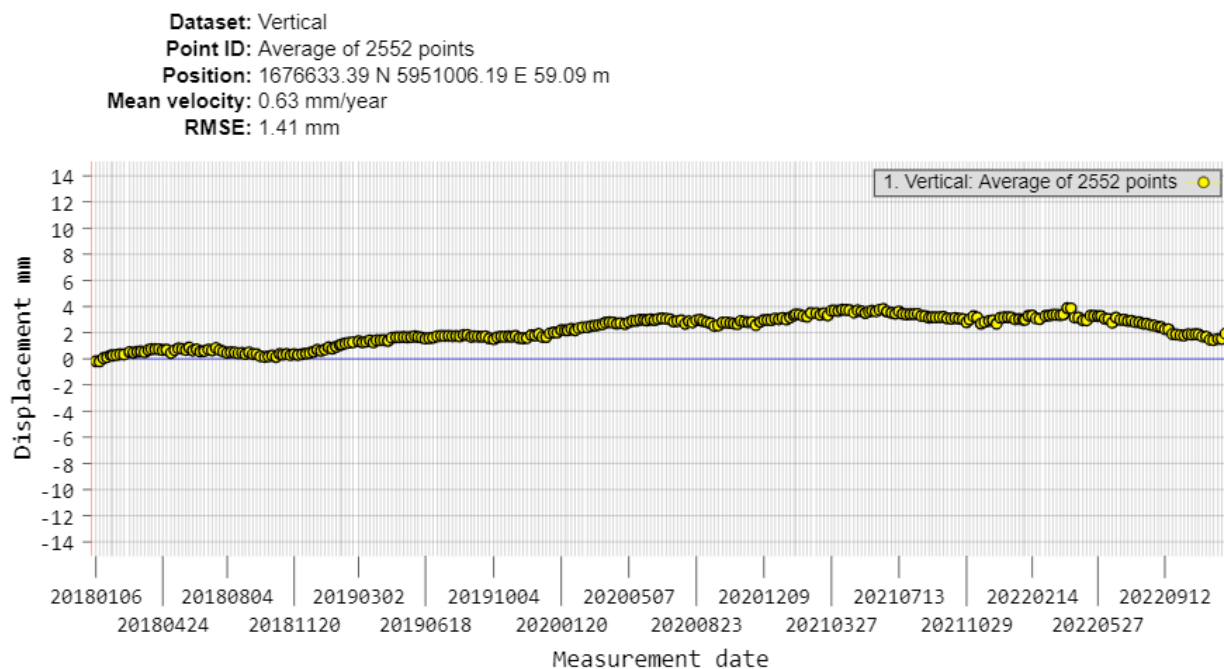
Εικόνα 116: Πολυγωνικά σημεία, Βόρειο τμήμα (Παλαιά και Νέα Πόλη Ρόδου)



Εικόνα 117: Πολυγωνικά σημεία, Κεντρικό - Δυτικό τμήμα (Βουνό του Ατάρυβου)

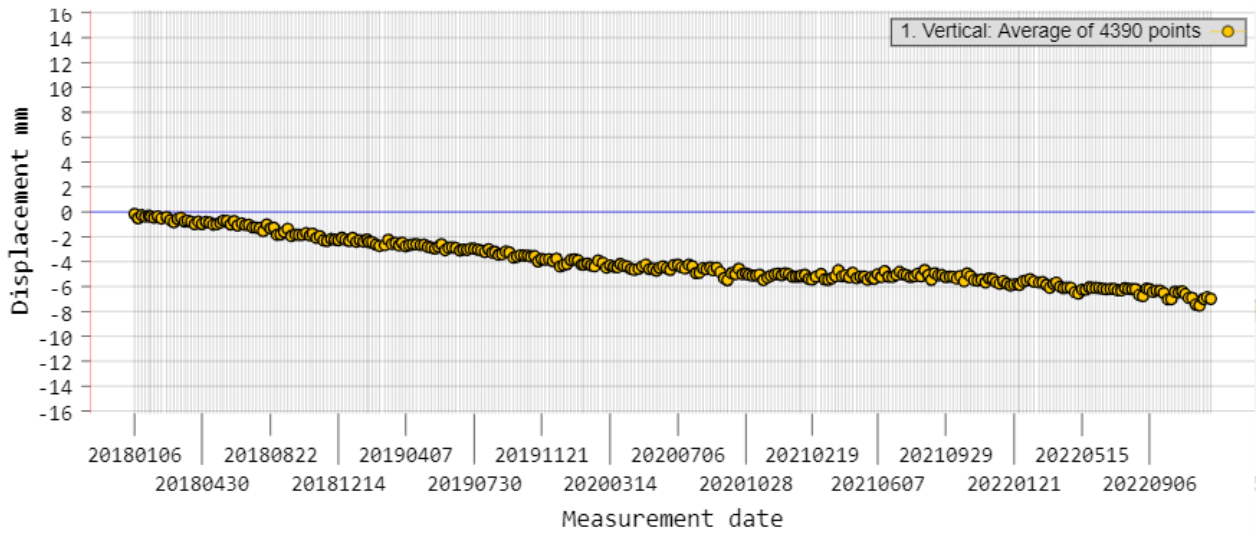


Εικόνα 118: Πολυγωνικά σημεία Νότιο τμήμα (Περιοχές Κατταβιά, Μαχαίρια)



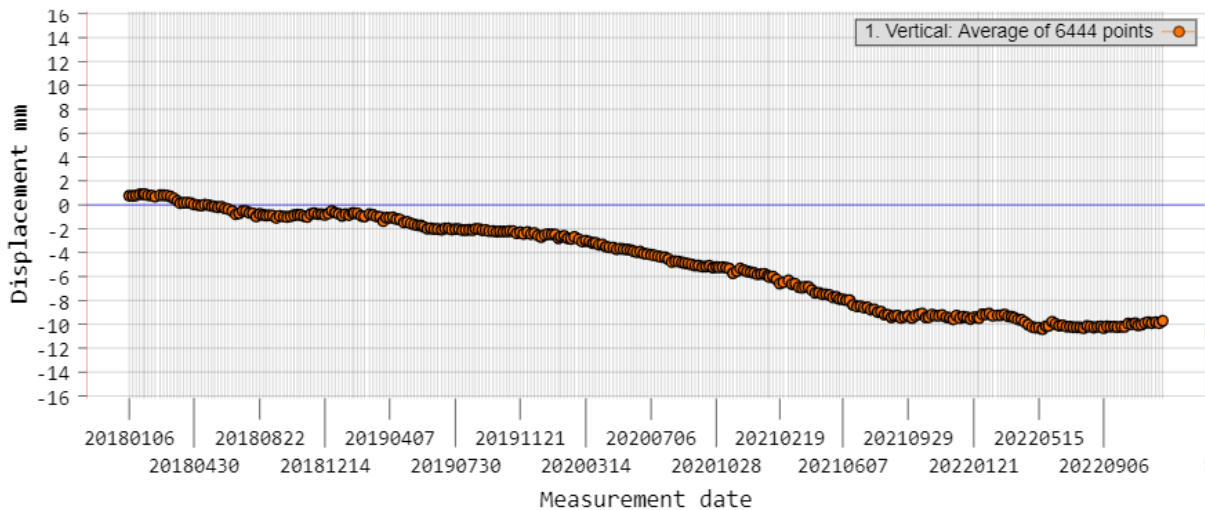
Σχήμα 21: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Βόρειο τμήμα), περιόδου 2018/01//06 - 2022/09/12 (ΠΗΓΗ EGMS)

Dataset: Vertical
Point ID: Average of 4390 points
Position: 1645966.72 N 5924811.55 E 745.63 m
Mean velocity: -1.24 mm/year
RMSE: 1.22 mm



Σχήμα 22: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Κέντρο-Δυτικό τμήμα), περιόδου 2018/01/06 - 2022/09/06 (ΠΗΓΗ EGMS)

Dataset: Vertical
Point ID: Average of 6444 points
Position: 1617115.98 N 5924483.33 E 98.83 m
Mean velocity: -2.57 mm/year
RMSE: 1.58 mm

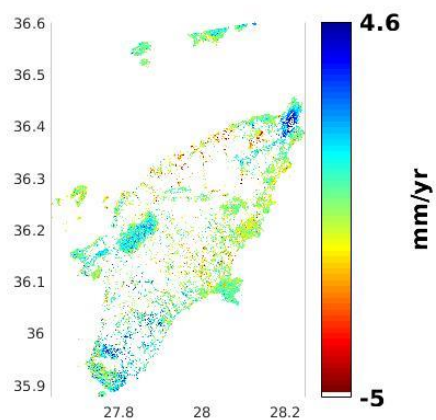


Σχήμα 23: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων πολυγωνικών σημείων (Νότιο τμήμα), περιόδου 2018/01/06 - 2022/09/06 (ΠΗΓΗ EGMS)

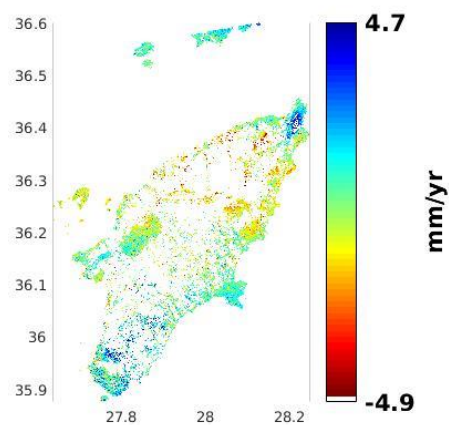
- Από την ανάλυση των χρονοσειρών προκύπτει ότι στο Βόρειο τμήμα του νησιού υπάρχει ανύψωση του εδάφους 0.63 mm ανά χρόνο ,στο βουνό του Ατάρυβου καθίζηση του εδάφους κατά 1.24 mm τον χρόνο (υπάρχουν και μικρομετακινήσεις σημείων κοντά στα 8 mm) και στο Νότιο τμήμα του νησιού είναι και οι μέγιστες τιμές με 2.57 mm τον χρόνο καθίζηση του εδάφους και με αρκετά σημεία να φτάνουν και τα 10 mm.
- Συμπερασματικά από την συγκεκριμένη διερεύνηση προκύπτει ότι αν όχι και τόσο έντονες, οι μικρομετακινήσεις είναι δεδομένες στην περιοχή μελέτης, ειδικά στο Νότιο τμήμα το οποίο συμμετέχει στα συμβολογράμματα με μεγαλύτερες (κατά απόλυτη τιμή) τιμές φάσεις και είναι ένας παράγοντας ο οποίος ενδεχομένως επηρεάζει την απόδοση των μεθόδων με βάση τον δείκτη της τυπικής απόκλισης, αφού εκεί όντως δεν θα έπρεπε να είναι μηδενική η φάση ύστερα από την διόρθωση της συνιστώσας της ατμόσφαιρας. Σε κάποια τμήματα υπάρχει ανύψωση του εδάφους όπως στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα του νησιού και σε κάποια καθίζηση όπως στο Νότιο τμήμα. *Οι δεδομένες μετρήσεις ίσως είναι και αυτές που δημιουργούν αυτό το μοτίβο αυξομείωσης της φάσης όπως παρατηρήσαμε στην αξιολόγηση των μεθόδων.*

Για να διασταυρώσουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την υπηρεσία EGMS εκτελέσαμε και την ίδια διαδικασία και με το λογισμικό του TRAIN καθώς παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης μετακίνησης (*velocity -mm/year*) σε επιλεγμένη περιοχή ενδιαφέροντος. Σε αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε μέθοδο διόρθωσης, σημείο ενδιαφέροντος (το οποίο είναι σταθερός σκεδαστής σήματος) καθώς και να εκτιμηθεί η ταχύτητα μετακίνησης στην χρονοσειρά των δεδομένων που έχουμε.

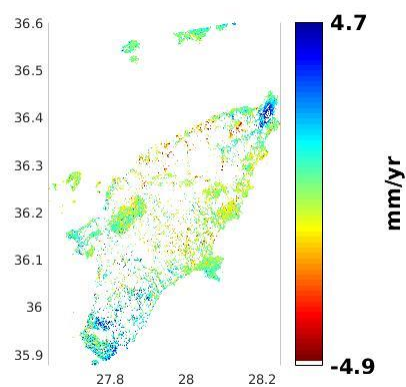
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το πρόγραμμα επιστρέφει δύο διαγράμματα όπου στο ένα φαίνονται οι συντεταγμένες άλλων σκεδαστών σε μία ακτίνα 100 m, ενώ στο δεύτερο η εκτίμηση γίνεται και για τα γειτονικά σημεία στην ίδια ακτίνα. Επιλέξαμε τις ίδιες περιοχές με αυτές της υπηρεσίας EGMS όπου έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ενδεικτικά με τις τιμές της φάσης που λαμβάνουμε από τα συμβολογράμματα .Παρατίθενται ενδεικτικά, σχήματα και διαγράμματα:



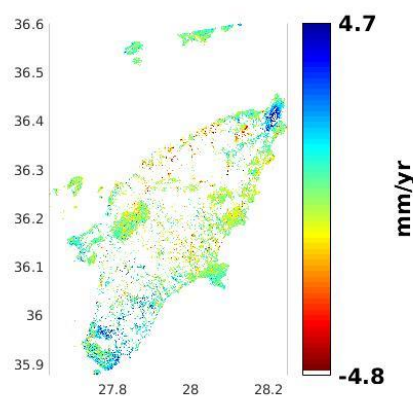
Εικόνα 119: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος ERA5)



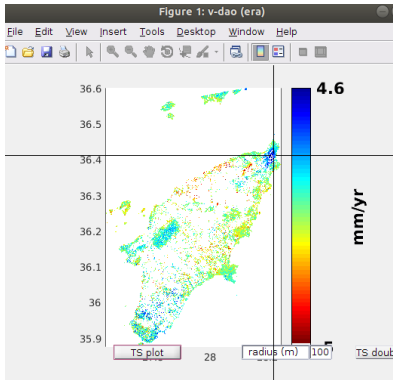
Εικόνα 120: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος GACOS)



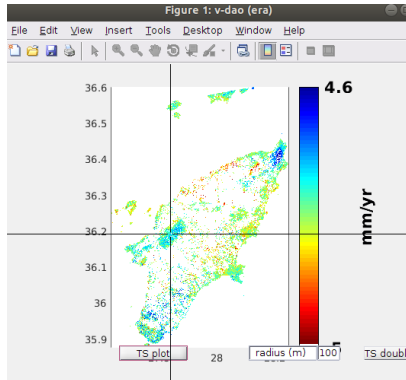
Εικόνα 121: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Μέθοδος Power-law)



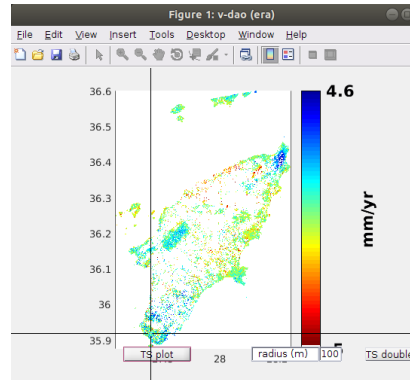
Εικόνα 122: Μέση ταχύτητα μετακίνησης σταθερών σκεδαστών περιόδου 2016-2019 (Γραμμική Μέθοδος)



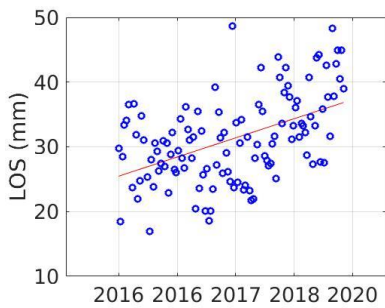
Εικόνα 123: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Βόρειο τμήμα (ακτίνα 100m)



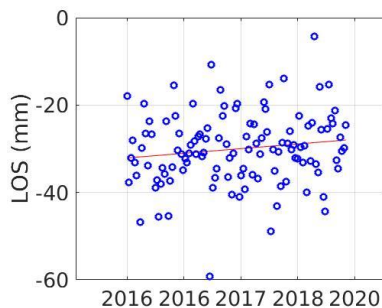
Εικόνα 124: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Βουνό Αττάρυβου (ακτίνα 100m)



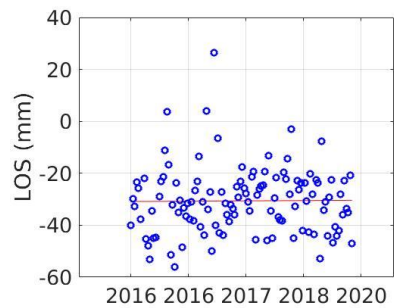
Εικόνα 125: Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος Νότιο τμήμα (ακτίνα 100m)



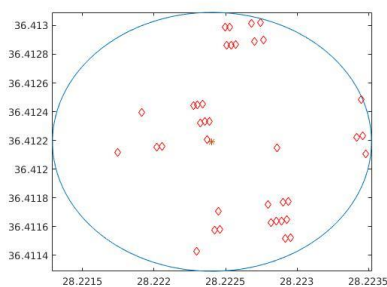
Σχήμα 24: Χρονοσειρά μικρομετακινήσεων επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Βόρειο τμήμα)



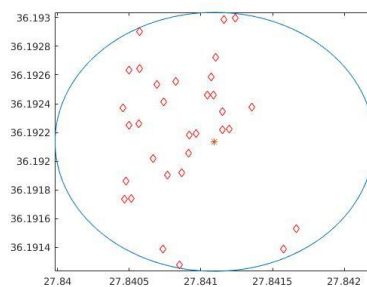
Σχήμα 25: Χρονοσειρά μικρομετακίνησης επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Βουνό Αττάρυβου)



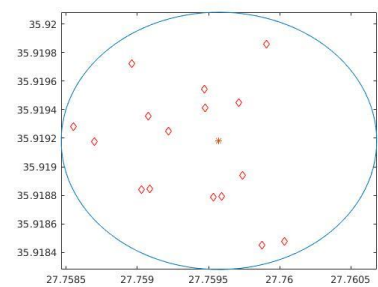
Σχήμα 26: Χρονοσειρά μικρομετακίνησης επιλεγμένων σημείων (LOS) σε mm/έτος (Νότιο τμήμα)



Σχήμα 27: Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Βόρειο τμήμα)



Σχήμα 28: Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Βουνό Αττάρυβου)



Σχήμα 29: Συντεταγμένες σταθερών σκεδαστών σε ακτίνα 100 μέτρων από την επιλογή (Νότιο τμήμα)

Από την σύγκριση των διαγραμμάτων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

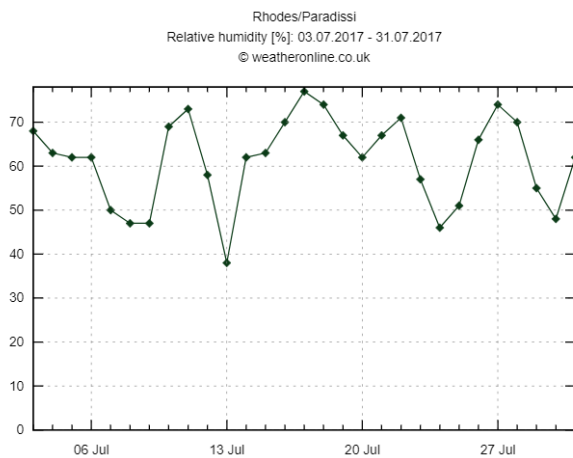
- Εκείνο που είναι εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα ταχύτητας μετακίνησης σταθερών σκεδαστών είναι ότι αρχικά οι μέθοδοι συμφωνούν με απειροελάχιστες διαφορές στις μέγιστες απόλυτες τιμές μετακίνησης οι οποίες κυμαίνονται από 4.7 έως 5.0 mm/χρόνο ενώ το διάγραμμα μετακίνησης σημειακά παραμένει σχεδόν το ίδιο για όλες τις εικόνες (εικόνες 120,121,122,123,124).
- Παρατηρώντας τα σχήματα (22,23,24) βλέπουμε μία μετακίνηση των σημείων στην βόρεια πλευρά επιλογής που κυμαίνεται από 2cm έως και 4cm για τους περισσότερους από τους σκεδαστές στη γραμμή ορατότητας του δορυφόρου (Line Of Sight) , στο βουνό του Αττάρυβου Κεντρικό – Δυτικό τμήμα, στα περισσότερα σημεία υπάρχει μετακίνηση από 2cm έως και \approx 4cm ενώ στο νότιο τμήμα παρατηρείται επίσης μετακίνηση από 2cm έως 6cm για τα περισσότερα σημεία.
- Η μεγαλύτερη μετακίνηση σταθερών σκεδαστών υπάρχει στο Βόρειο κομμάτι του νησιού όπου παρατηρούμε μια μέση ανύψωση περίπου 4.7 mm τον χρόνο καθώς και στο Νότιο τμήμα καθίζηση 5mm τον χρόνο κοντά στην περιοχή της Μαχαιριάς . Το βουνό του Αττάρυβου και η περιοχή της Λίνδου φαίνεται να μην επηρεάζονται αισθητά με το πρώτο βέβαια να μην έχει ομοιογένεια και να υπάρχει διαφοροποίηση μετακίνησης, αν και όχι έντονη ,μεμονωμένη.
- Τα διαγράμματα μετακίνησης του TRAIN συμφωνούν εν μέρη με αυτά της υπηρεσίας EGMS καθώς οι μέγιστες απόλυτες τιμές είναι παρόμοιες ενώ υπάρχει και συμφωνία παρατηρήσεων στις 3 από τις 4 κρίσιμες περιοχές όπου έχουμε παρατηρήσει και την μεγαλύτερη διαφορά φάσης στα συμβολογράμματα. **Η μόνη ασυμφωνία βρίσκεται στο Νότιο τμήμα του νησιού όπου το EGMS φανερώνει καθίζηση του εδάφους ενώ το TRAIN ανύψωση αν δούμε τις τιμές των συμβολογραμμάτων (εικόνες 120 – 124).**
- Συνοπτικά η ύπαρξη μικρομετακινήσεων απαντά εν μέρη στα δύο από τα τρία ερωτήματα που θέσαμε, ότι δηλαδή η φάση ακόμα και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση δεν μηδενίζεται και στο μοτίβο αυξομείωσης της φάσης από τον Βορρά στον Νότο. Για να προσεγγίσουμε και τον τρίτο ερώτημα την ύπαρξη δηλαδή μεγαλύτερων τιμών φάσης κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στο επόμενο κεφάλαιο συγκεντρώνουμε μετεωρολογικά δεδομένα προς διερεύνηση.

6.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

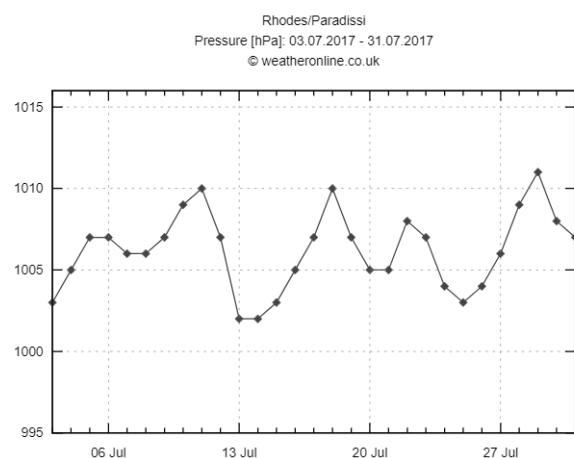
Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια τα μετεωρολογικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην τροπόσφαιρα επηρεάζουν τις δορυφορικές λήψεις και την φάση της εικόνας στους παραγόμενους χάρτες απεικόνισης. Η κατανόηση του πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τη φάση των δορυφορικών εικόνων είναι σημαντική για την ακριβή ερμηνεία των δεδομένων και την

αποτελεσματική αποκρυπτογράφηση των μετεωρολογικών πληροφοριών που παρέχουν οι δορυφορικές παρατηρήσεις. Αναφέραμε επίσης δύο συνιστώσες αυτήν της ξηρής και αυτήν της υγρής ατμόσφαιρας με τις παραμέτρους της πίεσης της υγρασίας και της θερμοκρασίας.

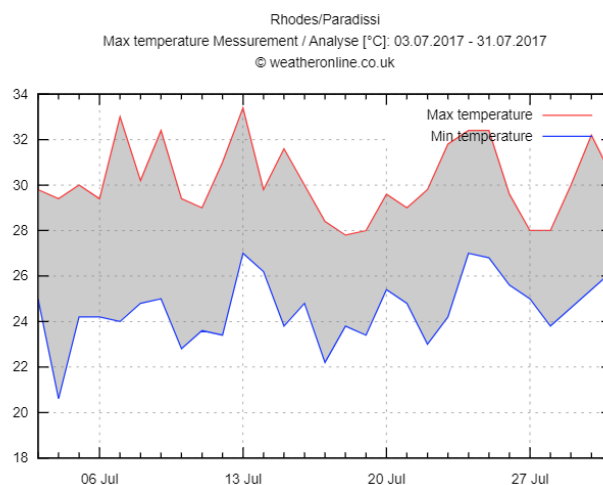
Για να διερευνήσουμε το τρίτο ερώτημα που θέσαμε ότι δηλαδή παρατηρείται μεγάλη διαφορά φάσης την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών επιλέξαμε εννέα συμβολογράμματα τα (46, 55, 58, 76, 79, 84, 97, 111, 115) δηλαδή τέσσερα με μεγάλες τυπικές αποκλίσεις τιμών (58, 76, 79, 111), δύο με ενδιάμεσες τιμές (46, 84) και τρία με τις χαμηλότερες αποκλίσεις (55, 97, 111). Αναζητήσαμε στις συγκεκριμένες ημερομηνίες λήψης των εικόνων και τις καιρικές συνθήκες την ημέρα που έγινε η δορυφορική λήψη, από την υπηρεσία weatheronline.co.uk. Οι ημερομηνίες έχουν επιλεγεί με κριτήρια την τυπική του απόκλιση ,το μήνα λήψης καθώς και την εποχή και παρουσιάζονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 που ακολουθεί.



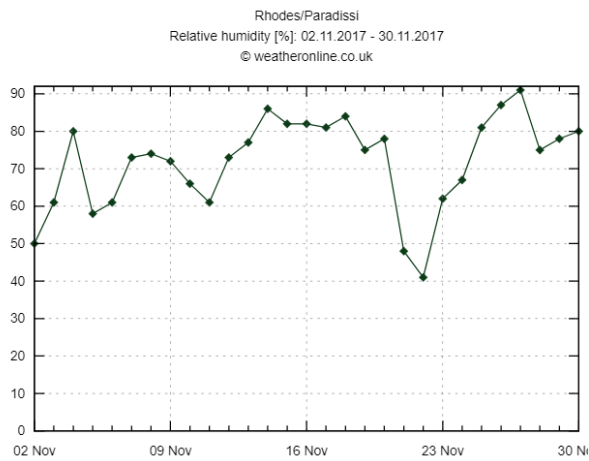
Σχήμα 30: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46)



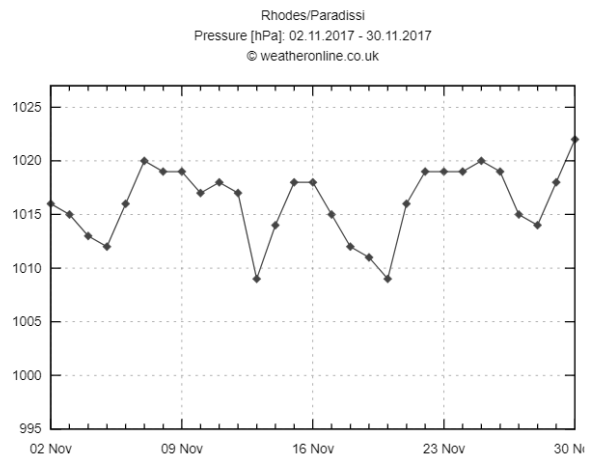
Σχήμα 31: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46)



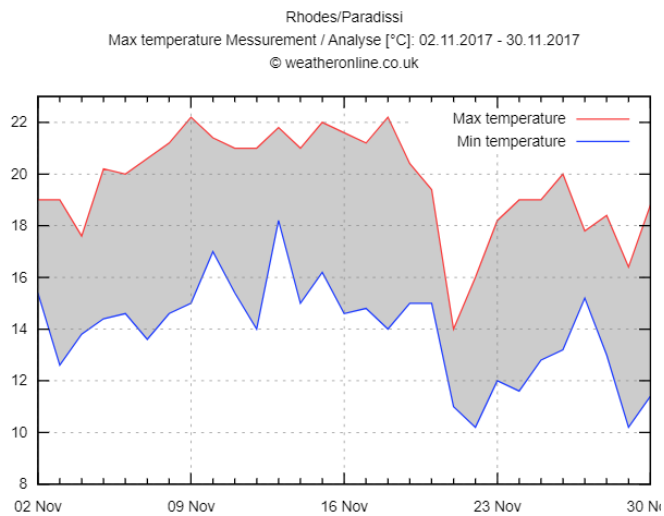
Σχήμα 32: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Ιούλιο (2017) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 46)



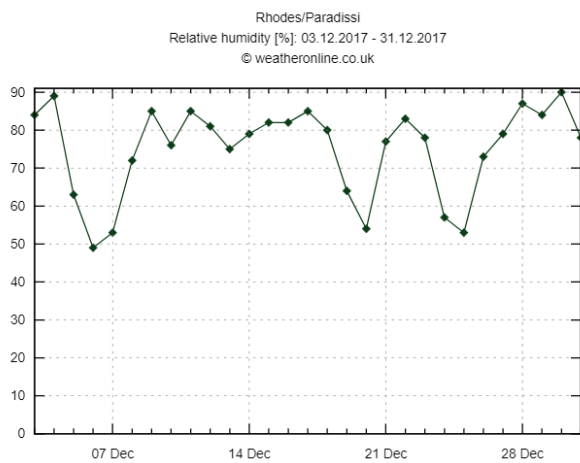
Σχήμα 33: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)



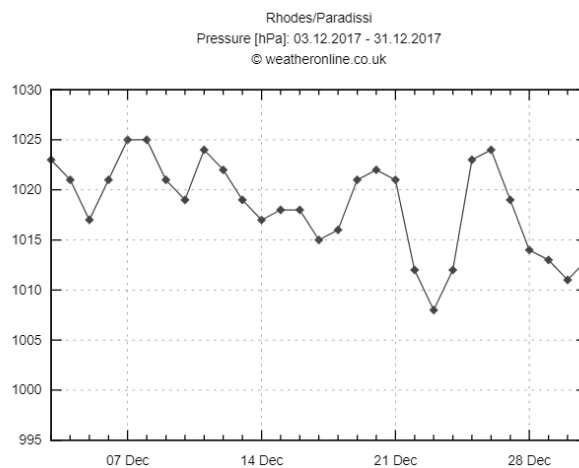
Σχήμα 34: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)



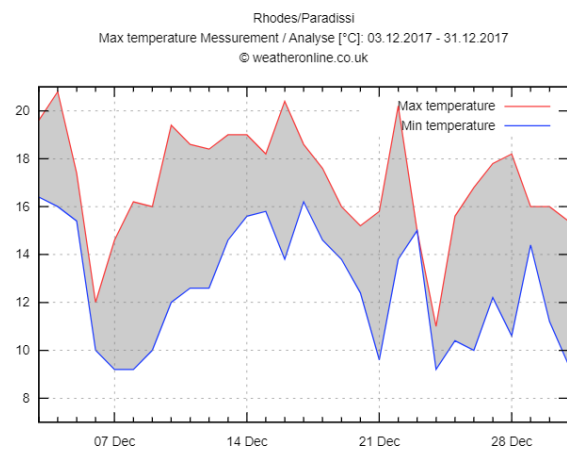
Σχήμα 35: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Νοέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)



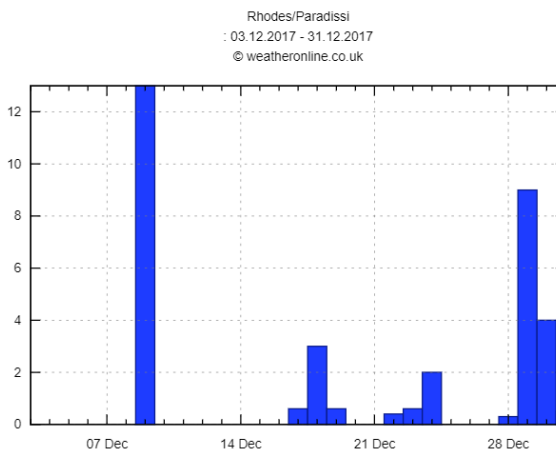
Σχήμα 36: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58)



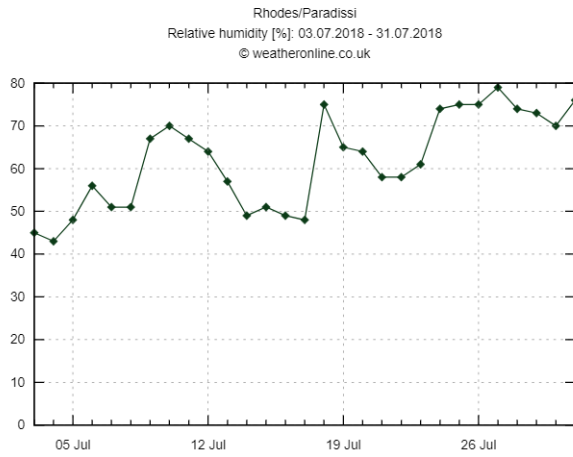
Σχήμα 37: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58)



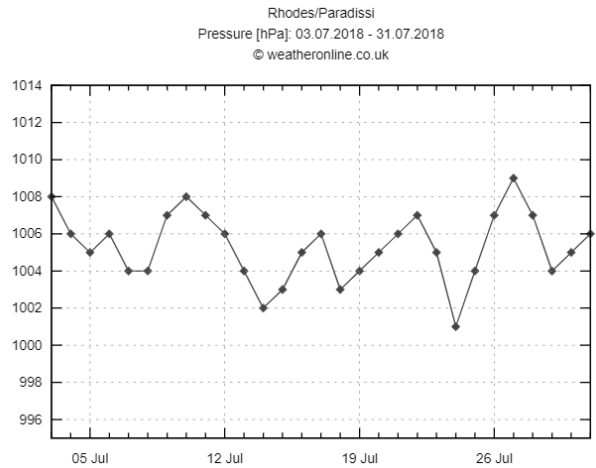
Σχήμα 38: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Δεκέμβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 55)



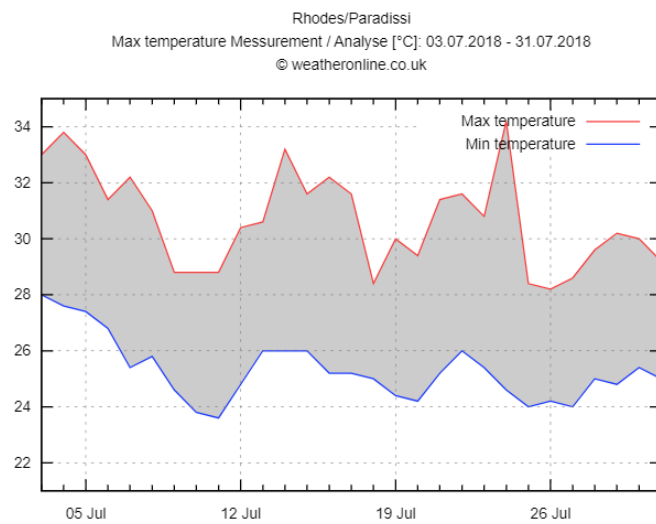
Σχήμα 39: Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα τον μήνα Δεκέμβριο (2017) για το νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 58)



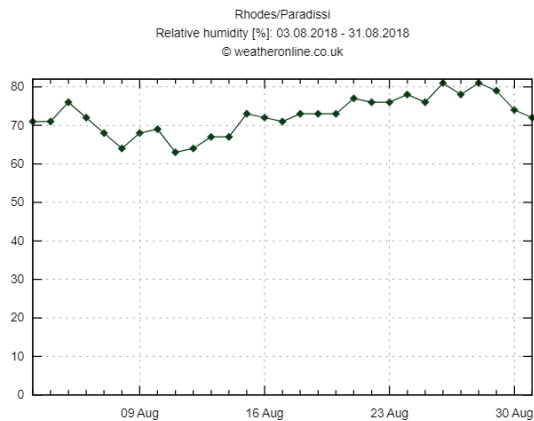
Σχήμα 40: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76)



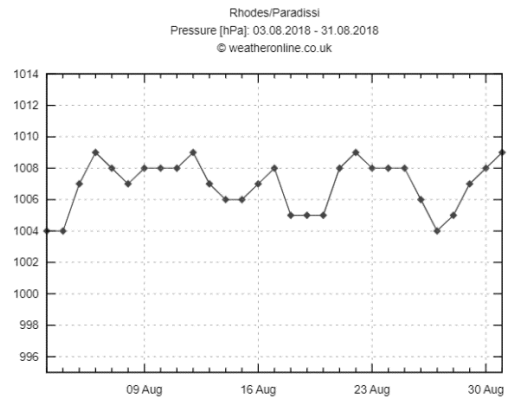
Σχήμα 41: Ατμοσφαιρική πίεση για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76)



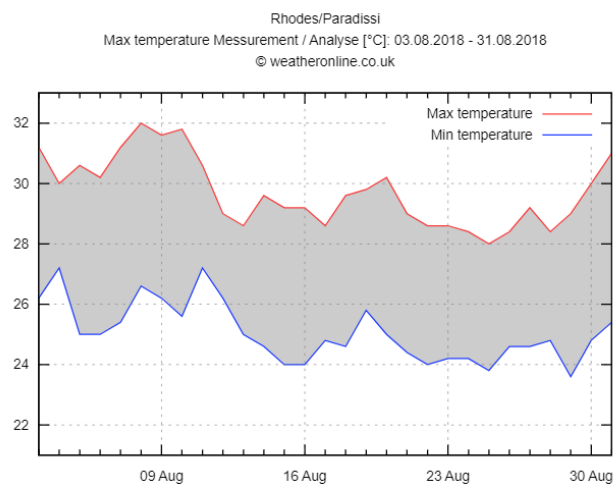
Σχήμα 42: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Ιούλιο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 76)



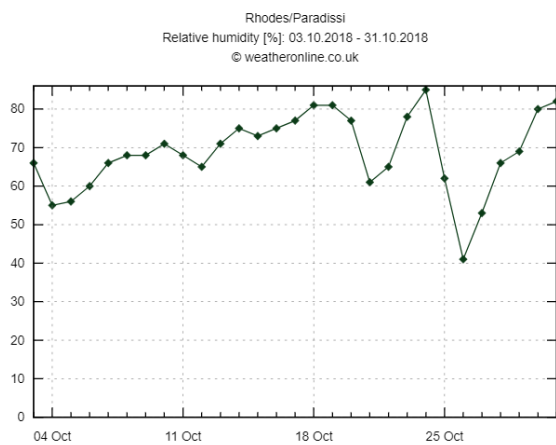
Σχήμα 43: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79)



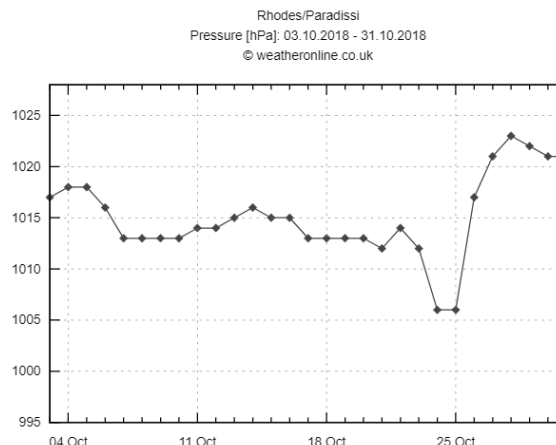
Σχήμα 44: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79)



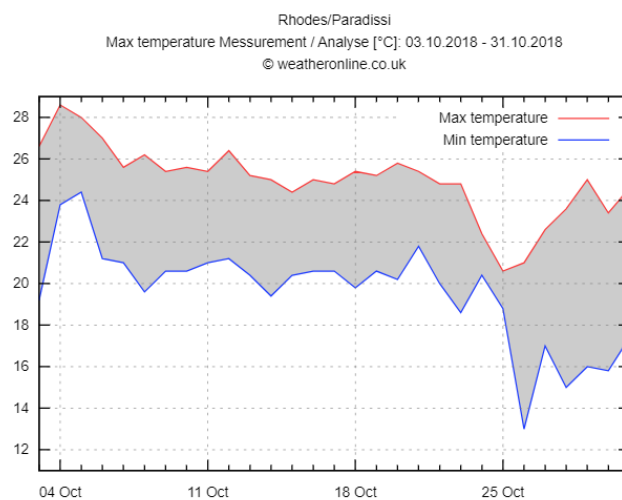
Σχήμα 45: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Αύγουστο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 79)



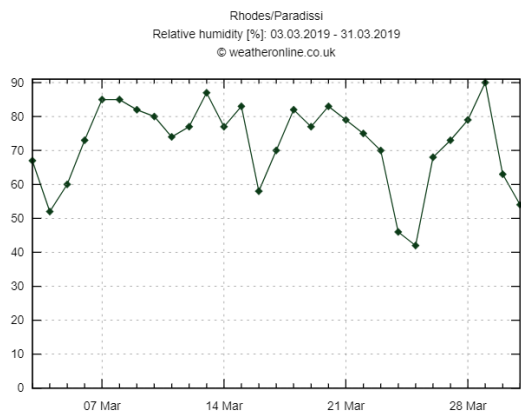
Σχήμα 46: Ποσοστά υγρασίας για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84)



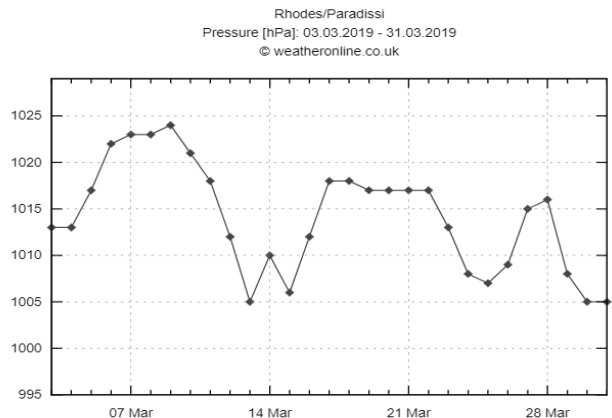
Σχήμα 47: Ποσοστά ατμοσφαιρικής πίεσης για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84)



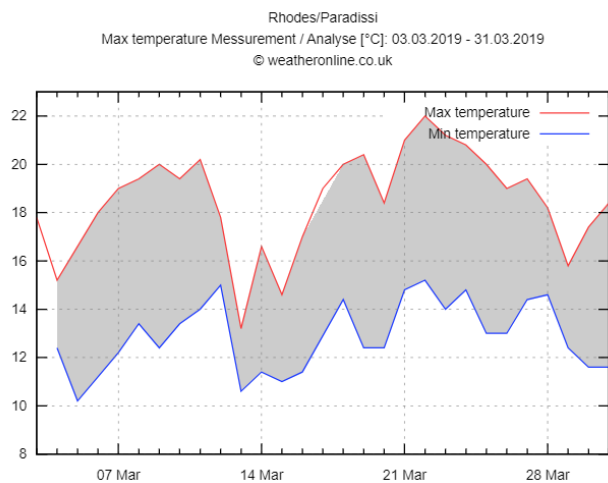
Σχήμα 48: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για τον μήνα Οκτώβριο (2018) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 84)



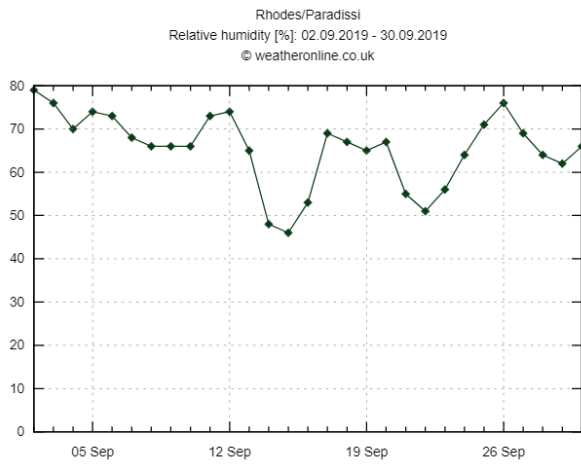
Σχήμα 49: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97)



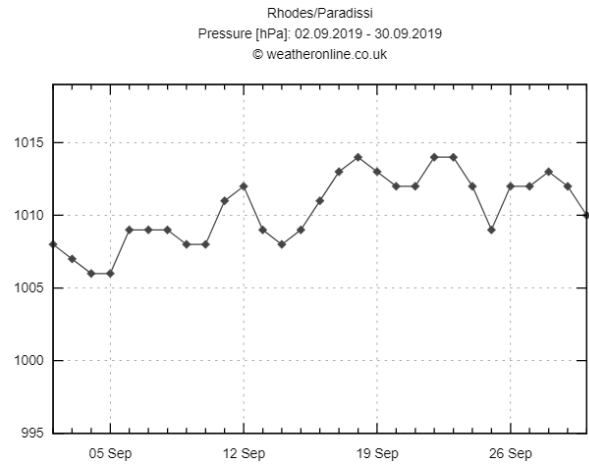
Σχήμα 50: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97)



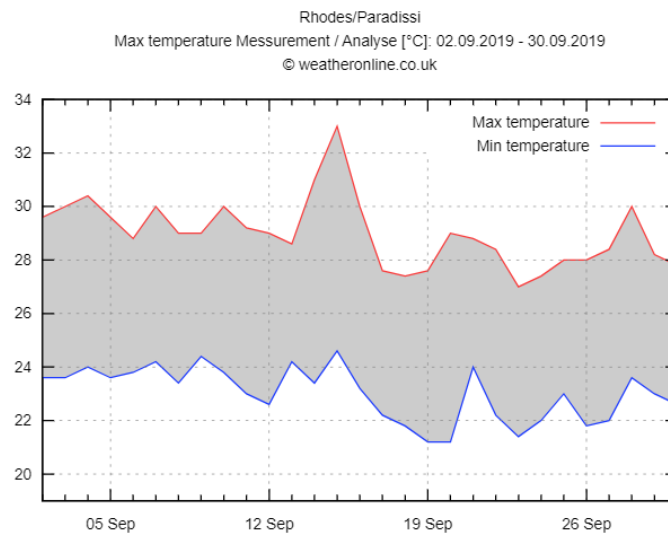
Σχήμα 51: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Μάρτιο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 97)



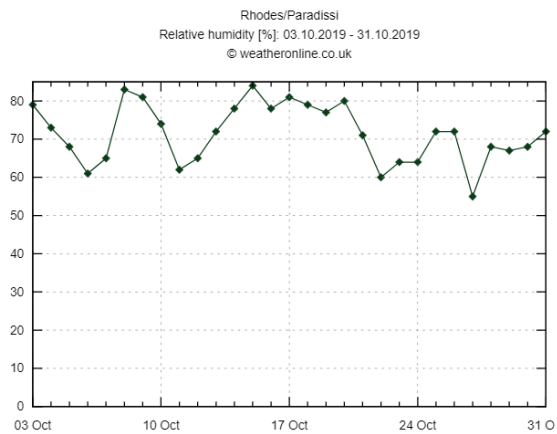
Σχήμα 52: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111)



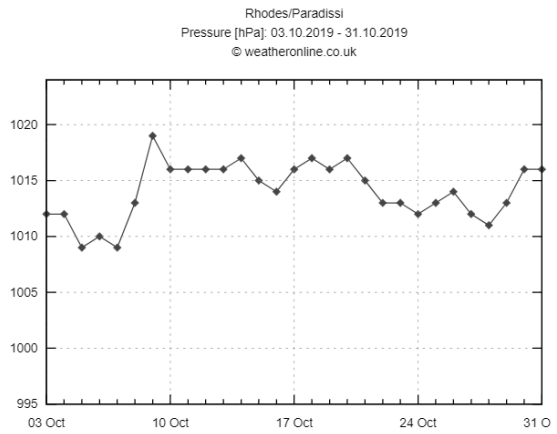
Σχήμα 53: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111)



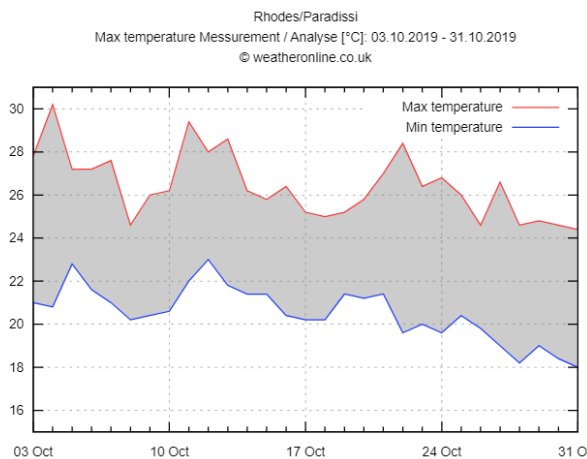
Σχήμα 54: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Σεπτέμβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 111)



Σχήμα 55: Ποσοστά υγρασίας για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115)



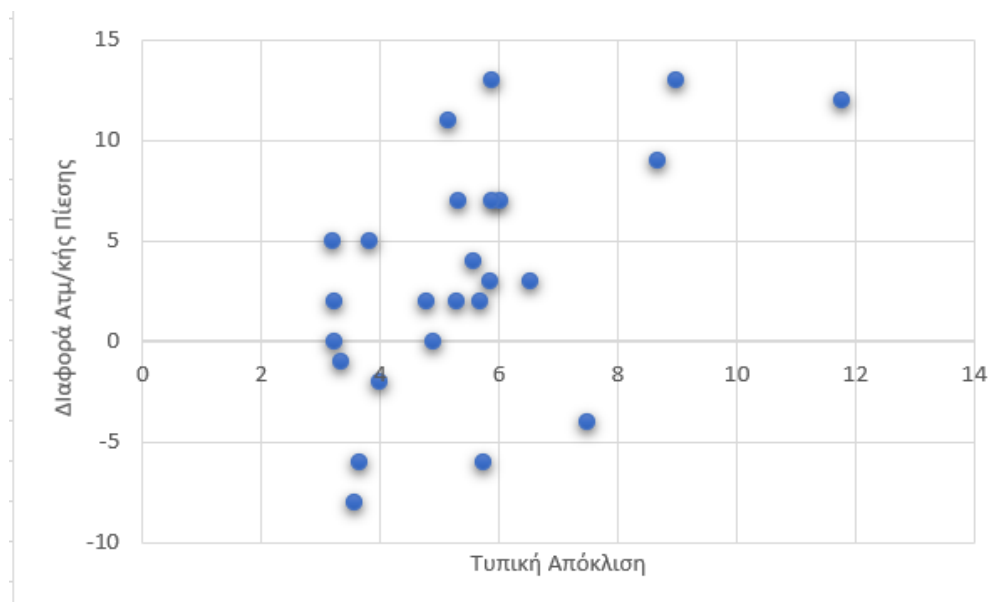
Σχήμα 56: Ατμοσφαιρική πίεση για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115)



Σχήμα 57: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το μήνα Οκτώβριο (2019) στο νησί της Ρόδου (αφορά το συμβολόγραμμα 115)

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΠΟΣΟΣΤΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ %	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ (hPa)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ (Km/h)*	ΚΑΤΕΥΘΥΝ ΣΗ ΑΝΕΜΟΥ*
17/11/2019 (Master)	0	79	1017	19-24	5.40	A
18/07/2017 (46)	5.31	75	1010	22-28	27.7	ΔΝΔ
03/11/2017 (55)	3.23	60	1015	13-19	14.8	ΔΝΔ→ΒΔ
09/12/2017 (58)	7.50	85	1021	10-16	9.4	NNA
13/07/2018 (76)	8.98	58	1004	26-32	37.1	ΝΔ
18/08/2018 (79)	11.78	74	1005	25-29	37.1	ΔΝΔ
17/10/2018 (84)	5.58	77	1013	21-25	18.4	ΔΝΔ
22/03/2019 (97)	3.24	75	1017	15-22	14.8	ΔΝΔ
06/09/2019 (111)	8.68	74	1008	24-29	27.7	ΔΝΔ
24/10/2019 (115)	3.20	64	1012	20-27	13.0	ΔΝΔ

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας ατμοσφαιρικών δεδομένων Master εικόνας (17/11/2019) και 9 άλλων εικόνων που δημιουργούν τα συμβολογράμματα 46, 55, 58, 76, 79, 84, 97, 111, 115 (Meteostat).



Σχήμα 58: : Γράφημα τυπικών αποκλίσεων και διαφοράς ατμοσφαιρικής πίεσης (Master - Slave) εικόνας για ένα σύνολο 25 συμβολογραμμάτων.

Τα αποτελέσματα του συγκεντρωτικού πίνακα των ατμοσφαιρικών μετρήσεων τις ημερομηνίες λήψεις των δορυφορικών εικόνων επιβεβαιώνουν την απόκλιση της φάσης των κρίσιμων συμβολογραμμάτων που επιλέξαμε. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η αποκατεστημένη φάση προκύπτει από την διαφορά φάσης της Master και της Slave εικόνας (**Κεφάλαιο 3.2.2**). Επίσης ατμοσφαιρική καθυστέρηση που προκύπτει είναι παράγοντας τριών δεικτών της υγρασίας της ατμόσφαιρας της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας (**Κεφάλαιο 1.5**). Συνακόλουθα τα αποτελέσματα που παρατηρούμε από τα στοιχεία που συγκεντρώσαμε για τις ατμοσφαιρικές συνιστώσες με σημείο αναφοράς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που υπήρχαν όταν έγινε και η λήψη της Master εικόνας είναι :

- Για την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 46 (Ιούλιος 2017) του οποίου η τυπική απόκλιση έχει μία ενδιάμεση τιμή, τα ποσοστά υγρασίας της ατμόσφαιρας είναι μειωμένα κατά 4% ,η ατμοσφαιρική πίεση μειωμένη κατά 7 hPa και η μέση θερμοκρασία αυξημένη κατά 3°C.
- Κατά την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 55 (Νοέμβριος 2017) με αρκετά χαμηλή τυπική απόκλιση τιμών, τα ποσοστά υγρασίας της ατμόσφαιρας παρουσιάζουν μείωση 19% , η ατμοσφαιρική πίεση είναι παρόμοια με μικρή διαφορά 2 hPa μειωμένη και η μέση θερμοκρασία διαφέρει κατά 6°C (μειωμένη).
- Για την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 58 (Δεκέμβριος 2017), με υψηλή τιμή τυπικής απόκλισης, η διαφορά στα ποσοστά υγρασίας είναι 6% αυξημένη , 4 hPa αυξημένη η ατμοσφαιρική πίεση και η μέση θερμοκρασία μειωμένη κατά 9°C. Όπως αναφέρεται επίσης και στο (Σχήμα 39) ο όγκος βροχόπτωσης εκείνη την μέρα προσδιορίζεται στα 13mm.
- Κατά την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 76 (Ιούλιος 2018), αυτό με τη δεύτερη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση υπάρχουν σημαντικές διαφορές με τα ποσοστά υγρασίας να είναι χαμηλότερα κατά 21%, την ατμοσφαιρική πίεση να είναι μειωμένη κατά 13 hPa και την μέση θερμοκρασία να είναι αυξημένη κατά 7°C.
- Για την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 79 (Αύγουστος 2018), το συμβολογράμμα με την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση , τα ποσοστά υγρασίας είναι μειωμένα κατά 5%, η ατμοσφαιρική πίεση μειωμένη κατά 12 hPa και η μέση θερμοκρασία αυξημένη κατά 5°C.
- Για την ημερομηνία λήψης το συμβολογράμματος 84 (Οκτώβριος 2018), με ενδιάμεση τιμή τυπικής απόκλισης, τα ποσοστά υγρασίας είναι μειωμένα κατά 2% , η ατμοσφαιρική πίεση 4 hPa μειωμένη και η μέση θερμοκρασία πανομοιότυπη.
- Κατά την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 97 (Μάρτιος 2019), συμβολογράμμα με αρκετά μικρή τυπική απόκλιση, η ατμοσφαιρική πίεση είναι ίδια με εκείνη της Master εικόνας η μέση θερμοκρασία είναι μειωμένη κατά 3°C ,ενώ μικρή διαφορά παρατηρείται στους δείκτες υγρασίας 5 % (μείωση).
- Για την ημερομηνία λήψης του συμβολογράμματος 111 (Σεπτέμβρης 2019), με υψηλή τυπική απόκλιση ,παρουσιάζονται μικρές διαφορές (5% μείωση) στα ποσοστά υγρασίας, 9 hPa στην ατμοσφαιρική πίεση και 4°C στην μέση θερμοκρασία.
- Τέλος για το συμβολογράμμα 115 (Οκτώβριος 2019), με μικρή τυπική απόκλιση, οι ατμοσφαιρικές συνιστώσες την ημερομηνία λήψης παρουσιάζουν σημαντική διαφορά 15% στα ποσοστά υγρασίας, 5 hPa στην ατμοσφαιρική πίεση και 2°C στην μέση θερμοκρασία.

Να σημειωθεί ότι δεν υπήρχαν βροχοπτώσεις η ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα για τις συγκεκριμένες ημερομηνίες εκτός από τις 09/12/2017.

Αρχικά το παράδοξο που παρατηρούμε είναι ότι στα συμβολογράμματα 55 (Νοέμβριος 2017) και 115 (Οκτώβριος 2019) των οποίων οι τυπικές αποκλίσεις είναι μικρές, υπάρχει μεγάλη διαφορά στα ποσοστά υγρασίας (19% και 15% αντίστοιχα) , ενώ η πίεση είναι παρόμοια για το συμβολόγραμμα 55, ενώ διαφέρει κατά 5 % για το συμβολόγραμμα 115. Η μέση θερμοκρασία διαφέρει κατά 5 και 2 βαθμούς αντίστοιχα . Αυτή η διαφορά της συνιστώσας της υγρασίας δεν μπορεί να δικαιολογηθεί με την χαμηλή τυπική απόκλιση των συμβολογραμμάτων όπως ξέρουμε. Αντίθετα το συμβολογράμματα 97 έχει τις τιμές των ατμοσφαιρικών συνθηκών πιο κοντά σε αυτές της Master εικόνας (διαφορά υγρασίας 4% πίεσης ίδια και μέση θερμοκρασία μειωμένη κατά 3°C).

Επιπρόσθετα στα συμβολογράμματα με μεγάλη τυπική απόκλιση πάλι παρατηρούμε ότι σε δύο συμβολογράμματα ,το 79 (Αύγουστος 2018) και το 111 (Σεπτέμβρης 2019) τα ποσοστά υγρασίας σε σχέση με την Master εικόνα είναι παρόμοια με μία διαφορά της τάξης του 5%. Σημαντική μείωση όμως φαίνεται να υπάρχει στην ατμοσφαιρική πίεση με 13 hPa και 9 hPa αντίστοιχα γεγονός που φαίνεται να επηρεάζει τα συμβολογράμματα, ενώ και η μέση θερμοκρασία είναι αυξημένη κατά 8°C για το συμβολόγραμμα 76 και 5°C για το συμβολόγραμμα 115.

Λογικά φαίνονται τα αποτελέσματα για το συμβολόγραμμα 76 (Ιούλιος 2018) καθώς παρατηρούμε σημαντικές διαφορές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες σε σχέση με την Master εικόνα εφόσον τα ποσοστά υγρασίας είναι μειωμένα κατά 21 % , η ατμοσφαιρική πίεση και εκείνη κατά 13 hPa ενώ η μέση θερμοκρασία είναι υψηλότερη κατά 7 °C. Οπότε φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές αλλαγές και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες σε σχέση με την εικόνα Master.

Λογικά επίσης φαίνονται και τα αποτελέσματα για το συμβολόγραμμα 58 (του μήνα Δεκεμβρίου 2017),συμβολόγραμμα με μεγάλη τυπική απόκλιση τιμών, εφόσον σημαντικές διαφορές παρουσιάζονται και στις τρεις συνιστώσες της ατμόσφαιρας (υγρασία αύξηση 6% ,πίεση αύξηση 4 hPa ,μέση θερμοκρασία αύξηση 8 °C) καθώς υπήρχαν και ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα εκείνη την μέρα.

Τέλος τα συμβολογράμματα με ενδιάμεσες τιμές τυπικής απόκλισης 46 (Αύγουστος 2017), 84 (Οκτώβριος 2019) παρουσιάζουν μικρές διαφορές στις συνιστώσες της ατμόσφαιρας που μπορούν να δικαιολογήσουν τις τιμές της φάσης τους.

- Μία εξήγηση που θα μπορούσαμε να δώσουμε για κάποια αντιφατικά συμπεράσματα είναι ότι επηρεάζουν τα αποτελέσματα οι καλλιέργειες πριν και μετά τον θερισμό, ο οποίος συμβαίνει κατά τους καλοκαιρινούς (σιτάρι, πατάτες κτλ.) αλλά και τους φθινοπωρινούς μήνες (καλαμπόκι, ελιές κτλ.) αλλά και η βλάστηση που ενδεχομένως να αλλάζει (ύπαρξη φυλλοβόλων δέντρων (πλατανιές, συκιές)). Οι εποχικές αυτές αλλαγές φαίνεται να αναδιαμορφώνουν τους παράγοντες που οπισθοσκεδάζουν (η σκέδαση μπορεί να γίνεται σε γυμνό έδαφος και οι σταθεροί σκεδαστές να επηρεάζονται σημαντικά) με αποτέλεσμα να αλλάζουν το σήμα που λαμβάνουμε και σε ύστερη ανάλυση τις τιμές της φάσης των συμβολογραμμάτων.

- Επιπλέον δεν συμπεραίνεται ότι οι μη αναμενόμενες τιμές στα συμβολογράμματα και στην τυπική απόκλιση τους, να σχετίζονται με την χρονική διαφορά μεταξύ Slave και Master εικόνας παρά με την εποχιακή διαφορά τους.
- Ενδεχομένως λοιπόν η ατμοσφαιρική πίεση να παίζει καθοριστικό παράγοντα παρόλο που βιβλιογραφικά και ερευνητικά η συνιστώσα της υγρασίας είναι η σημαντικότερη μεταβλητή της ατμοσφαιρικής επίδρασης στις εικόνες ,καθώς σε τρία από τα τέσσερα εξεταζόμενα συμβολογράμματα (Αύγουστος 2018, Ιούλιος 2018, Σεπτέμβριος 2019) παρατηρείται μεγάλη διαφορά σε αυτήν και όχι στην συνιστώσα των υδρατμών όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 58).

Συμπληρωματικά στα συμβολογράμματα 76,79,111 τα οποία έχουν μεγάλες τυπικές αποκλίσεις παρατηρούμε πολύ μεγάλη μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου αλλά και αντίθετη διεύθυνση από εκείνη της Master εικόνας. Αντίθετα στα συμβολογράμματα με χαμηλές τυπικές αποκλίσεις 55,97,115 ο άνεμος έχει τις μικρότερες ταχύτητες κίνησης. Πιθανώς λοιπόν οι σταθεροί σκεδαστές να έχουν επηρεαστεί (π.χ. άναρχη κίνηση φυλλωμάτων που συντελεί σε διαφορετική οπισθοσκέδαση) και να είναι και αυτός ένας καταλυτικός παράγοντας σε απροσδιόριστες τιμές της φάσης , ένα γεγονός που συνιστά αντικείμενο μελέτης σε ύστερες έρευνες.

- Ακόμα τα αποτελέσματα εξηγούν εν μέρει τη μεγάλη διαφορά φάσης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στα περισσότερα από τα κρίσιμα συμβολογράμματα εφόσον το καλοκαίρι η μέση θερμοκρασία στο νησί ανεβαίνει, η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται αισθητά τα ποσοστά υγρασίας είναι αρκετά ευμετάβλητα και δυνατοί άνεμοι πνέουν στο νησί .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε αρκετές μεθόδους για τη διόρθωση της φάσης σε εικόνες Synthetic Aperture Radar (SAR), με έμφαση στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έχουν ευρύτερη σημασία για την κατανόηση της αξιοπιστίας των δεδομένων SAR και τη βελτίωση των μεθόδων διόρθωσής τους.

Η Γραμμική μέθοδος (Linear Tropospheric Correction), αν και απλή και γρήγορη στην εκτέλεση, δεν επιφέρει σημαντική μείωση της τυπικής απόκλισης των διορθωμένων ατμοσφαιρικά εικόνων, και κρίνεται η λιγότερο κατάλληλη για τη διόρθωση της φάσης σε περιοχές με μικρή και με μεγάλη τυπική απόκλιση. Επίσης η μέθοδος αδυνατεί να ξεχωρίσει την παραμόρφωση στην περιοχή όπως και να συνυπολογίσει την χωρικά μεταβαλλόμενη ατμόσφαιρα (turbulence).

Η μέθοδος Power-law, αν και παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο Linear, προκειμένου να επιτύχει αυτή τη βελτίωση, απαιτεί εκτεταμένο υπολογιστικό χρόνο και πολλαπλές δοκιμές για την εύρεση των μεταβλητών που επιφέρουν την καλύτερη δυνατή διόρθωση. Παρόλο που η Power-law αποτελεί πολύ αποτελεσματική μέθοδο για τη διόρθωση της φάσης, οι αναγκαίοι υπολογιστικοί πόροι και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεσή της την καθιστούν περίπλοκη και απαιτητική.

Συμπερασματικά όμως κρίνοντας από συγκεκριμένα συμβολογράμματα που αναλύσαμε, εάν η περιοχή μελέτης είναι μικρή και η τοπογραφία έντονη οι δύο αυτές μέθοδοι ενδέχεται να παρουσιάζουν αποδεκτά αποτελέσματα.

Η μέθοδος GACOS, βασισμένη σε μοντέλα καιρού, εμφανίζει αξιόλογη απόδοση γενικά και μεγαλύτερη μείωση της τυπικής απόκλισης σε συμβολογράμματα μεγάλης απόκλισης. Ωστόσο, ενδέχεται να αντιμετωπίζει προκλήσεις σε συμβολογράμματα χαμηλής διασποράς τιμών όπως πρακτικά έχουμε διαπιστώσει και για όλες τις μεθόδους ανεξαιρέτως.

Η μέθοδος ERA5 εμφανίζεται ως η πιο αξιόπιστη, προσφέροντας συμπαγή αποτελέσματα και μεγάλη μείωση της τυπικής απόκλισης, ειδικά σε συμβολογράμματα μεγάλου εύρους της φάσης. Παρά την φύση των σφαλμάτων που παρατηρούνται σε όλες τις μεθόδους, η μέθοδος ERA5 εμφανίζεται ως η πιο αξιόπιστη και αποδοτική λύση για τη διόρθωση της φάσης σε εικόνες SAR.

Επιπλέον από την περαιτέρω έρευνα που εξήγαμε είναι προφανές ότι υπάρχουν μικρομετακινήσεις στο νησί ιδιαίτερα στο Βόρειο και το Νότιο τμήμα αυτού καθώς και ότι μεταβάλλεται αισθητά η σύσταση της ατμόσφαιρας μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών μηνών.

Ακόμα μετά και την διερεύνηση των μετεωρολογικών δεδομένων είναι πιθανό η ατμοσφαιρική πίεση να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ατμοσφαιρική καθυστέρηση καθώς και η διαφορά εποχής λήψεων μεταξύ Slave και Master εικόνας με την αλλαγή χρήσης της γης κάτι που υπάγεται στα εποχικά πρότυπα καιρού (*παράγραφος 1.5.2*) αλλά και η διαφορά στην ταχύτητα και την διεύθυνση του αέρα.

Ενδεχομένως είναι πιθανά συστημικά σφάλματα να υπάρχουν και κατά την υπολογιστική διαδικασία με το λογισμικό.

7.2. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΕΠΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Στο πλαίσιο μελλοντικών ερευνών, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να αξιολογηθούν περαιτέρω για τη βελτίωση των μεθόδων ατμοσφαιρικών διορθώσεων και την εκτίμηση των αποδόσεων του πέραν αυτού της τυπικής απόκλισης όπως έχουν αναφερθεί από τον (*D.Bekaert, 2015*). Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους είναι:

1. Συντελεστής συσχέτισης με τοπογραφία: Ο υπολογισμός του περιγράφει τα στατιστικά στοιχεία του συνόλου δεδομένων κατά την διόρθωση με την γραμμική μέθοδο, πολλές φορές δεν δίνει καλές ενδείξεις λόγω ύπαρξης θορύβου στα δεδομένα.
2. Τυπική απόκλιση με αφαίρεση τροχιακών σφαλμάτων (*Orbital Ramps*) πριν από την εκτίμηση (*Jolivet, 2014*). Αυτή η διόρθωση συνιστάται περισσότερο σε εικόνες με μικρό μήκος κύματος (*Short-Wavelength*). Η διόρθωση προϋποθέτει την εκτίμηση των χωρικά συσχετισμένων σφαλμάτων και την αφαίρεση τους από την 'τυλιγμένη' φάση (*Wrapped*

Phase). Χρειάζεται επανυπολογισμός βημάτων (6,6 και 7,7) του λογισμικού της StaMPS. Συνήθως η χωρική κλίμακα στην οποία υπολογίζεται αυτή η τυπική απόκλιση δεν είναι συνεπής μεταξύ των συμβολογραμμάτων.

3. Τοπική κλίση (*D.Bekaert, 2015*) : Η διόρθωση αυτή αφορά στη μέθοδο Power-law. Η χωρική κλίμακα αξιολόγησης της διόρθωσης εξαρτάται από το μέγεθος των ‘παραθύρων’ που χρησιμοποιούνται. Διαφοροποιώντας αυτό το μέγεθος (κάτι το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην διόρθωση της Power-law) μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση της διόρθωσης δημιουργώντας ένα γράφημα της τοπικής κλίσης και του μεγέθους των ‘παραθύρων’. Ο συντελεστής K μπορεί να υπολογιστεί τοπικά σε ένα κανάλι μη μεταβαλλόμενο από την παραμόρφωση. Παρόλα αυτά υπάρχει ο περιορισμός αν το μέγεθος του παραθύρου είναι αρκετά μεγάλο να μην υπάρξει συσχέτιση τοπογραφίας και φάσης.

Τέλος η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με χρήση του φάσματος ισχύος. Αυτή η μέθοδος διερευνά πόσο μια διόρθωση έχει αλλάξει την ισχύ στα δεδομένα για διαφορετικά μήκη κύματος. Γι’ αυτή τη μέθοδο απαιτείται να πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός Fourier και συγκεκριμένα ο Fast Fourier Transformation.

Ανακεφαλαιώνοντας το λογισμικό αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης και μπορεί να θεωρηθεί ένα αξιόπιστο μέσο για την συγκεκριμένη διόρθωση. Παρόλα αυτά όπως παρατηρήσαμε όπως έχουμε αναφέρει και πρωτότερα ότι έχει αρκετό καιρό να αναβαθμιστεί και χρειάστηκε να βρούμε λύσεις για να ξεπεράσουμε συγκεκριμένα προβλήματα στις μεθόδους που ακολουθήσαμε. Επιπρόσθετα η κοινότητα των ερευνητών και επιστημόνων γύρω από αυτό έχει παραμείνει ανενεργή αρκετό χρονικό διάστημα και η χρήση του σε νέες μελέτες είναι δυσεύρετη.

Πέραν αυτού προτείνουμε τη συνεχή έρευνα σε αυτό τον τομέα, με στόχο την ανάπτυξη πιο ακριβών και αξιόπιστων μεθόδων διόρθωσης της φάσης σε εικόνες SAR. Οι εξελίξεις αυτές θα συμβάλουν στην περαιτέρω βελτίωση της ανάλυσης και ερμηνείας των δεδομένων SAR, επιτρέποντας την ανάκτηση αξιόπιστων πληροφοριών για επιστημονικές και εφαρμοσμένες εφαρμογές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Hooper, Andrew John (2006). *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. Stanford University.

Bekaert, D. P. S., Hooper, A., & Wright, T. J. (2015). A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *120*(2), 1345-1356.

Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, *170*, 40-47.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, *31*(23).

Karathannasi, V. (2014). Σημειώσεις Μικροκυματικής Τηλεπισκόπησης., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δεληκαράογλου, Δ. (2005). Σημειώσεις Γεωδαιτικών Εφαρμογών Συμβολομετρίας SAR.. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καμπούτση, Μ. Σ. (2022). Εφαρμογή συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης σεισμών για το Νότιο Αιγαίο.

Darvishi, M., Cuzzo, G., Bruzzone, L., & Nilfouroushan, F. (2020). Performance evaluation of phase and weather-based models in atmospheric correction with Sentinel-1 data: Corvara landslide in the Alps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *13*, 1332-1346.

Zhu, B., Li, J., & Tang, W. (2017). Correcting InSAR topographically correlated tropospheric delays using a power law model based on ERA-Interim reanalysis. *Remote Sensing*, *9*(8), 765.

Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M. P., & Peltzer, G. (2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters*, *38*(17).

Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M. C., Arkan, M., & Oyen, A. (2010). StaMPS/MTI Manual, Delft: Institute of Earth Observation and Space Systems. *Delft University of Technology*, http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/StaMPS_Manual_v3, 2.

Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A*, *2*, 338.

Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *8*, 1709–1719.

Elliott, J. R., Biggs, J., Parsons, B., & Wright, T. J. (2008). InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters*, 35(12).

Ding, X., Li, Z., Zhu, J., Feng, G., & Long, J. (2008). Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. *Sensors*, 9, 5426–5448.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, B4, 7547–7563.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000, July). Analysis of permanent scatterers in SAR interferometry. In *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120)* (Vol. 2, pp. 761-763). IEEE.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.

Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).

Wegmuller, U., Werner, C., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2006). Ionospheric Electron Concentration Effects on SAR and INSAR. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing.

Hu, Z., & Mallorquí, J. J. (2019). An accurate method to correct atmospheric phase delay for InSAR with the ERA5 global atmospheric model. *Remote Sensing*, 11(17), 1969.

Xiao, R., Yu, C., Li, Z., & He, X. (2021). Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102289.

Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., & Crippa, P. (2018). Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10, 9202–9222.

Zhang, Z., Lou, Y., Zhang, W., Wang, H., Zhou, Y., & Bai, J. (2022). Assessment of ERA-Interim and ERA5 reanalysis data on atmospheric corrections for InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 111, 102822.

Xue, F., Lv, X., Dou, F., & Yun, Y. (2020). A review of time-series interferometric SAR techniques: A tutorial for surface deformation analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1), 22-42.

Jacob, A. W., Vicente-Guijalba, F., Lopez-Martinez, C., Lopez-Sanchez, J. M., Litzinger, M., Kristen, H., ... & Engdahl, M. E. (2020). Sentinel-1 InSAR coherence for land cover mapping: A comparison of multiple feature-based classifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 535-552.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *nature*, 364(6433), 138-142.

Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.

Rigo, A., Béjar-Pizarro, M., & Martínez-Díaz, J. (2013). Monitoring of Guadalentín valley (southern Spain) through a fast SAR Interferometry method. *Journal of Applied Geophysics*, 91, 39-48.

Stull, R. B. (1988). Turbulence closure techniques. In *An introduction to boundary layer meteorology* (pp. 197-250). Dordrecht: Springer Netherlands.

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.

Alexander, M. J., & Holton, J. R. (2004). On the spectrum of vertically propagating gravity waves generated by a transient heat source. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(4), 923-932.