



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

Αξιολόγηση Μεθόδων Μείωσης των Επιπτώσεων της Ατμόσφαιρας στην
Αποκατάσταση της Φάσης Συμβολογραμμάτων Συνθετικών Απεικονίσεων
Ραντάρ

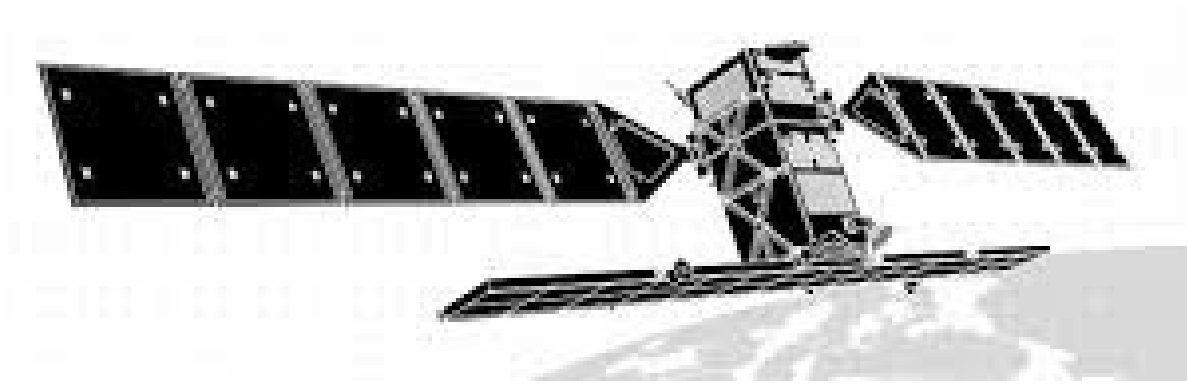
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της
Πελαγίας Κουτσαντώνη

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Βασιλεία Καραθανάση Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Αξιολόγηση Μεθόδων Μείωσης των Επιπτώσεων της Ατμόσφαιρας στην
Αποκατάσταση της Φάσης Συμβολογραμμάτων Συνθετικών Απεικονίσεων
Ραντάρ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Πελαγίας Κουτσαντώνη

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 8 Μαρτίου του 2022.

.....
Β. Καραθανάση

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Καραντζαλος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Β. Γκίκας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

.....

Πελαγία Α. Κουτσαντώνη

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Πελαγία Α. Κουτσαντώνη, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει ως θέμα την αξιολόγηση μεθόδων μείωσης των επιπτώσεων της ατμόσφαιρας στην αποκατάσταση της φάσης συμβολογραμμάτων συνθετικών απεικονίσεων ραντάρ.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κυρία Βασιλεία Καραθανάση, για την επιστημονική της καθοδήγηση, το αμείωτο ενδιαφέρον της και τη συνεχή της υποστήριξη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κλεάνθη Καραμβάση για την βοήθεια που μου πρόσφερε και τον χρόνο που αφιέρωσε, καθώς επίσης και για τον επιστημονικό ενθουσιασμό που με μετέδωσε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συναισθηματική και υλική συνδρομή όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης τους φίλους μου και τους δικούς μου ανθρώπους, την Μαρία, την Έρια, την Μυρσίνη, την Αθηνά, την Μαρία, που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος - Ευχαριστίες.....	1
Πίνακας Περιεχομένων.....	2
Πίνακας Σχημάτων.....	5
Λίστα Πινάκων.....	8
Πίνακας Εικόνων.....	10
Περίληψη.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
I.II. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ RADAR.....	4
I.II.1. Εισαγωγή.....	4
I.II.2. Μήκος Κύματος και Πόλωση.....	4
I.II.3. Γεωμετρία Λήψης.....	7
I.II.4. RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR).....	9
I.III. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR (InSAR).....	10
I.III.1. Εισαγωγή.....	10
I.III.2. Συμβολομετρική Φάση.....	10
I.III.3. Αποκατάσταση Φάσης.....	12
I.III.4. Συνάφεια Φάσης.....	13
I.III.5. Φάση Κλεισίματος.....	13
I.IV. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ.....	15
I.IV.1. Εισαγωγή.....	15
I.IV.2. Επίδραση της Ιονόσφαιρα.....	15
I.IV.3. Επίδραση της Τροπόσφαιρας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	17
2.1. ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	18
2.1.1. Διορθώσεις των Ατμοσφαιρικών Επιδράσεων βάσει Εξωτερικών δεδομένων.....	18
2.1.2. Διορθώσεις των Ατμοσφαιρικών Επιδράσεων κατευθείαν από την συμβλ. φάση.....	20
2.1.3. Σύγκριση Μεθόδων.....	21
2.2. ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ.....	24
3.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	25
3.1.1. Μορφολογία.....	25

3.1.2. Χρήσεις/Καλύψεις Γης.....	26
3.1.3. Κλίμα.....	27
3.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	31
3.2.1. Sentinel-1 Απεικονίσεις.....	31
3.2.2. ERA5 Δεδομένα.....	32
3.2.3. SRTM DEM.....	32
3.2.4. Corine Land Cover 2018.....	32
3.3. Λογισμικά.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	35
4.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	36
4.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΚΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	39
4.2.1. Μέθοδος Γραμμικής Συσχέτισης Φάσης - Υψομέτρου.....	39
4.2.2. Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα — ERA5.....	50
4.2.3. Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα — GACOS.....	54
4.2.4. Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα — PyAPS.....	55
4.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ.....	56
4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	59
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	60
5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	61
5.2.1. Αποτελέσματα Συμβολογραμμάτων ανά Υψόμετρο.....	68
5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ.....	75
5.3.1. Αποτελέσματα Φάσης Κλεισίματος ανά Χρήση/Κάλυψη Γης και Υψόμετρο.....	79
5.3.2. Αποτελέσματα Φάσης Κλεισίματος ανά Κλίση και Υψόμετρο.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	85
6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
6.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	89
I.I. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση.....	90
I.II. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση: Ορεινές Περιοχές.....	120
I.III. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση: Πεδινές Περιοχές.....	150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	180
II.I. Φάση Κλεισίματος: Original.....	181
II.II. Φάση Κλεισίματος: ERA5.....	185

II.III. Φάση Κλεισίματος: GACOS.....	189
II.IV. Φάση Κλεισίματος: Linear.....	193
II.V. Φάση Κλεισίματος: PyAPS.....	197
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	201

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Γεωμετρία SAR συμβολομετρίας σε ένα επίπεδο κάθετο στην τροχιά του δορυφόρου (S1 και S2).	11
Σχήμα 2: Γεωμετρία SAR συμβολομετρίας σε ένα επίπεδο κάθετο στην τροχιά του δορυφόρου (S1 και S2).	11
Σχήμα 3: Βροχόπτωση (mm) τις ημέρες πριν την λήψης της κάθε εικόνας .	30
Σχήμα 4: Διαδικασία Παραγωγής Συμβολογράμματος στο λογισμικό SNAP	36
Σχήμα 5: Εικόνα έντασης όπου φαίνονται τα ξεχωριστά bursts (Πηγή: Alaska Satellite Facility)	37
Σχήμα 6: Ο snaru χωρίζει την εικόνα σε πλακίδια (tiles), όπου το μέγεθος και επικάλυψη (overlap) τους ορίζεται από τον χρήστη.	38
Σχήμα 7: Πλήθος και Κατανομή Εικονοστοιχείων στην εικόνα της Μέσης τιμής συνάφειας, για τιμές συνάφειας μεγαλύτερες από 0.2, 0.25, 0.3, και 0.4 αντίστοιχα	39
Σχήμα 8: Φάση Κλεισίματος ανά Κατώφλι και ανά κατηγορία Υψόμετρου.	40
Σχήμα 9: (α) Διάγραμμα διασποράς του συμβολογράμματος (μπλε σημεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο υψόμετρου (κόκκινα ευθεία). (β) Κλίση της ευθείας ανά 100 μέτρα του συμβολογράμματος. (γ) Εντοπισμός σημείου διαχωρισμού (μπλε σημείο). (δ) Βέλτιστες ευθείες (μαύρη και κόκκινη ευθεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο (μπλε καμπύλη).	49
Σχήμα 10: Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων.(Βέης et al., 2011)	51
Σχήμα 11: Κυβική Παρεμβολή στην Διεύθυνση του Ύψους από πίεση (P) σε υψόμετρο (z)	52
Σχήμα 12: Διαδικασία εφαρμογής της ατμοσφαιρικής διόρθωσης μετά την αποκατάσταση της φάσης.	56
Σχήμα 13: Διαδικασία εφαρμογής της ατμοσφαιρικής διόρθωσης πριν την αποκατάσταση της φάσης	57
Σχήμα 14: Παράδειγμα κατασκευής όλων των πιθανών τριπλέτων για τέσσερις ημερομηνίες. Ξεκινώντας με 4 SAR απεικονίσεις A, B, Γ, Δ συνθέτονται 6 συμβολογράμματα AΔ, AB, AΓ, ΒΓ, ΒΔ, ΓΔ, που με την σειρά τους συνθέτουν 4 φάσης κλεισίματος AΒΔ, ΑΒΓ, ΑΓΔ, ΒΓΔ.	58
Σχήμα 15: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης.	62
Σχήμα 16: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης.	62
Σχήμα 17: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με την τυπική απόκλιση των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων	63
Σχήμα 18: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με τη μέση συνάφεια φάσης των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων	64

Σχήμα 19: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης.	65
Σχήμα 20: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης.	66
Σχήμα 21: Βέλτιστες ευθείες (μαύρη και κόκκινη ευθεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο (μπλε καμπύλη) για τα συμβολογράμματα 20160930-20161117, 20161012-20161105, 20161117-20161129.	66
Σχήμα 22: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με την τυπική απόκλιση των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων.	67
Σχήμα 23: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.	68
Σχήμα 24: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.	69
Σχήμα 25: Τυπική απόκλιση των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.	69
Σχήμα 26: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.	70
Σχήμα 27: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.	70
Σχήμα 28: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.	71
Σχήμα 29: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.	71
Σχήμα 30: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.	72
Σχήμα 31: Ποσοστό εικόνων στις οποίες η τυπική απόκλιση βελτιώνεται μετά την διόρθωση, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).	72
Σχήμα 32: Ποσοστό μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).	73
Σχήμα 33: Ποσοστό θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).	74
Σχήμα 34: Ποσοστό αρνητικής μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).	74

[Σχήμα 35: Μέση τιμή της φάσης κλεισίματος ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψόμετρου.....77](#)

[Σχήμα 36: Κατανομή των κυρίων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης ανά υψόμετρο.79](#)

[Σχήμα 37: Σύγκριση μείωσης της φάσης κλεισίματος ανάμεσα στις κατηγορίες κλίσεων και τις κατηγορίες υψομέτρων για την μέθοδο Linear. 84](#)

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: SAR RADAR κανάλια (Evans, 1995)	4
Πίνακας 2: Κατηγορίες Χρήσης/Κάλυψης Γης και τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης, σύμφωνα με το CLC 2018	25
Πίνακας 3: Βροχόπτωση (mm) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)	26
Πίνακας 4: Ελάχιστες Θερμοκρασίες (°C) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)	27
Πίνακας 5: Μέγιστες Θερμοκρασίες (°C) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)	27
Πίνακας 6: Ένταση και διεύθυνση ανέμου και βροχόπτωση για την στιγμή λήψης των εικόνων, όπως και η χαμηλότερη θερμοκρασία της ημέρας λήψης των εικόνων, όπως καταγράφηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)	28
Πίνακας 7: Sentinel-1 Εικόνες	30
Πίνακας 8: Συμβολομετρικά Ζεύγη	35
Πίνακας 9: Διαφορές μεθόδων ERA5 και PyAPS	54
Πίνακας 10: Πλήθος απεικονίσεων	57
Πίνακας 11: Μέση τιμή τυπικής απόκλισης (rad) και μέση μείωση τυπικής απόκλισης (%) πριν και μετά την διόρθωση στα συμβολογράμματα όπου η διόρθωση έγινε μετά την αποκατάσταση της φάσης	60
Πίνακας 12: Μέση τιμή τυπικής απόκλισης (rad) και μέση μείωση τυπικής απόκλισης (%) πριν και μετά την διόρθωση στα συμβολογράμματα όπου η διόρθωση έγινε πριν την αποκατάσταση της φάσης	63
Πίνακας 13: Μείωση της μέσης τιμής της φάσης κλεισίματος ανά κατηγορία υψομέτρου και μέθοδο διόρθωσης	77
Πίνακας 14: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Καλλιέργειες” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου	79
Πίνακας 15: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου	79
Πίνακας 16: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Δασικές Εκτάσεις” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου	79
Πίνακας 17: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου ..	80
Πίνακας 18: Ποσοστό εικονοστοιχείων ανά κατηγορία κλίσης και υψόμετρο	82

Πίνακας 19: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μικρή κλίση ανά κατηγορία υψομέτρου και μέθοδο διόρθωσης..... 82

Πίνακας 20: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μεσαία κλίση ανά κατηγορία υψομέτρου και μέθοδο διόρθωσης. 82

Πίνακας 21: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μεγάλη κλίση ανά κατηγορία υψομέτρου και μέθοδο διόρθωσης. 83

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Βάθος Διείσδυσης του σήματος ανάλογα με το μήκος κύματος του	5
Εικόνα 2: Τύποι σκέδασης της ακτινοβολίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σκεδαστή	6
Εικόνα 3: Ατμοσφαιρική Εξασθένιση στο ΗΜ φάσμα	7
Εικόνα 4: Γεωμετρία λήψης RADAR Πλευρικής Όψεως	8
Εικόνα 5: Γεωμετρία των RADAR συνθετικού ανοίγματος	9
Εικόνα 6: Συμβολομετρική φάση πριν (πάνω) και μετά (κάτω) την αποκατάσταση της	12
Εικόνα 7: Περιοχή Μελέτης	25
Εικόνα 8: Χρήσεις/Καλύψεις Γης της Περιοχής Μελέτης Σύμφωνα με το Corine Land Cover 2018	26
Εικόνα 9: Μετεωρολογικοί Σταθμοί εντός της Περιοχής Μελέτης	27
Εικόνα 10: Μέση τιμή Φάση Κλεισίματος	75
Εικόνα 11: Κλίση (α) και Κατηγορίες Κλίσεων (β) στην περιοχή μελέτης	82

Περίληψη

Η Συμβολομετρία SAR (InSAR) είναι μια σημαντική τεχνολογία για την παρατήρηση της επιφάνειας της Γης, ειδικά για τη χαρτογράφηση της τοπογραφίας και των παραμορφώσεων της. Ωστόσο, οι μετρήσεις InSAR συχνά επηρεάζονται σημαντικά από χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της ατμόσφαιρας που προκαλούν σημαντικές καθυστερήσεις στις παρατηρήσεις. Η διόρθωση από ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην τεχνολογία InSAR και για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές διόρθωσης. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται είτε σε βοηθητικά δεδομένα όπως τα Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα είτε στην ανάλυση της ίδιας της συμβολομετρικής φάσης.

Στην παρούσα μελέτη, αξιολογούμε τις επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων στην αποκατάσταση της φάσης και εξετάζουμε εάν η διόρθωση των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων πριν από την αποκατάσταση της φάσης μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των σφαλμάτων της αποκατάστασης. Για να ποσοτικοποιήσουμε αυτή τη μείωση χρησιμοποιούμε την παρατηρούμενη φάση μη κλεισίματος (αναφέρεται ως φάση κλεισίματος) τριπλετών που κατασκευάζονται με συνδυασμό οποιωνδήποτε τριών μεμονωμένων SAR απεικονίσεων. Η ατμοσφαιρική καθυστέρηση υπολογίζεται με τέσσερις μεθόδους: (i) χρησιμοποιώντας το αριθμητικό καιρικό μοντέλο ERA5, (ii) αξιοποιώντας τη γραμμική συσχέτιση φάσης - ύψους (Linear), (iii) χρησιμοποιώντας το λογισμικό PyAPS και (iv) χρησιμοποιώντας την Ηλεκτρονική Υπηρεσία Γενικευμένης Ατμοσφαιρικής Διόρθωσης (GACOS), και οι εκτιμώμενες ατμοσφαιρικές διορθώσεις αφαιρούνται από τα αποκατεστημένα και τα μη αποκατεστημένα συμβολογράμματα. Έπειτα, εξετάζεται αν αφαίρεση της ατμοσφαιρικής φάσης οδηγεί σε διόρθωση της συμβολομετρικής φάσης και διερευνάται ποια από τις μεθόδους ατμοσφαιρικής διόρθωσης μειώνει περισσότερο το σφάλμα λόγω ατμοσφαιρικής καθυστέρησης.

Αυτή η μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε 15 συμβολογράμματα Sentinel-1 πάνω από τον Όλυμπο, Ελλάδα. Διαπιστώνουμε ότι μόνο η μέθοδος γραμμικής συσχέτισης φάσης - ύψους παρέχει σημαντική μείωση του κλεισίματος φάσης, αποτρέποντας έτσι τα σφάλματα κατά την αποκατάσταση της φάσης. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι PyAPS και GACOS φαίνεται να διορθώνουν με μεγαλύτερη επιτυχία τα ατμοσφαιρικά σφάλματα όταν η διόρθωση εφαρμοστεί μετά την αποκατάσταση φάσης, αλλά η μέθοδος Linear υπερτερεί στην διόρθωση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης όταν η διόρθωση γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης.

Abstract

Interferometric SAR (InSAR) is a powerful technology for observing the Earth surface, especially for mapping the Earth's topography and deformations. InSAR measurements are however often significantly affected by spatial and temporal variations of the atmosphere that introduce significant delays in InSAR observations. Correcting for tropospheric delays is one of the largest challenges in InSAR technology and many techniques have been developed for this reason. These techniques rely either on auxiliary data such as numerical weather models (NWMs) or on the analysis of the interferometric phase itself.

In this study, initially we evaluate the effects of atmospheric delays in phase unwrapping and examine if the correction of atmospheric delays prior to phase unwrapping can lead to the reduction of unwrapping errors. To quantify this reduction we utilize the observed phase nonclosure (referred to as the closure phase) of triplet combinations of any three individual SAR scenes. We calculate the atmospheric delay with four methods: (i) employing the ERA5 Numerical Weather Model, (ii) exploiting the phase - height linear correlation, (iii) utilizing the PyAPS software, and (iv) using the Generic Atmospheric Correction Online Service (GACOS), and the estimated atmospheric corrections are removed on both unwrapped and wrapped interferograms. Then, we examine whether the removal of the atmospheric phase leads to correction of the interferometric phase and investigate which of the atmospheric correction methods further reduces the error due to atmospheric delay.

This methodology was tested on 15 Sentinel-1 interferograms over mountain Olympos, Greece. We find that only the phase - height linear correlation method provides significant reduction of the phase closure, thus preventing unwrapping errors. In addition, we observe that the PyAPS and GACOS methods appear to be more successful in correcting atmospheric errors when the correction is applied after phase unwrapping, but the Linear method outperforms the other methods in atmospheric delay correction when the correction is applied before the phase unwrapping.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συμβολομετρία RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR interferometry ή InSAR) είναι μία ισχυρή τεχνολογία που επιτρέπει την δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ ή DEM) και τη μέτρηση παραμορφώσεων στο έδαφος. Όμως, οι μετρήσεις των RADAR επηρεάζονται από την διάδοση του σήματος μέσα από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να παρατηρείται καθυστέρηση στο σήμα, η οποία προσθέτει σφάλματα στην μέτρηση της φάσης του σήματος και στον υπολογισμό της συμβολομετρικής φάσης.

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της καθυστέρησης του σήματος λόγω της ατμόσφαιρας με σκοπό τη διόρθωση της συμβολομετρικής φάσης από τις επιπτώσεις της ατμόσφαιρας. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται τέσσερις μέθοδοι υπολογισμού της ατμοσφαιρικής φάσης: (i) με χρήση καιρικών δεδομένων ERA5, (ii) μέσω της εφαρμογής GACOS που προσφέρει χάρτες ατμοσφαιρικής φάσης μετά από αίτημα του χρήστη, (iii) με υπολογισμό της ατμοσφαιρικής φάσης από το συμβολόγραμμα χρησιμοποιώντας την εμπειρική γραμμική σχέση φάσης - υψομέτρου, και (iv) μέσω του λογισμικού PyAPS που επίσης αξιοποιεί τα δεδομένα ERA5 για τον υπολογισμό της φάσης.

Στην συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης στη διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης. Η διαδικασία αποκατάστασης της φάσης είναι μία πολύπλοκη διαδικασία που βασίζεται στην επεξεργασία των αρχικών μη αποκατεστημένων (wrapped) τιμών της φάσης με σκοπό τον υπολογισμό των χαμένων κύκλων και τελικά τον υπολογισμό της αποκατεστημένης (unwrapped) φάσης. Εφόσον, οι wrapped τιμές της συμβολομετρικής φάσης περιέχουν τα σφάλματα που προσδίδει η διάδοση του σήματος μέσω της ατμόσφαιρας, γίνεται η υπόθεση ότι δημιουργούνται περαιτέρω σφάλματα στη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης.

Με βάση την υπόθεση αυτή, κύριος στόχος της εργασίας είναι να εξεταστεί εάν η αφαίρεση της συνιστώσας της ατμόσφαιρας από τη συμβολομετρική φάση, πριν την αποκατάσταση της φάσης, μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερα σφάλματα στην διαδικασία της αποκατάστασης που εκτελείται στην συνέχεια.

Το σφάλμα της αποκατάστασης της φάσης μπορεί να αποδοθεί ως μέρος της φάσης κλεισίματος ενός κλειστού βρόχου και μπορεί να υπολογιστεί για όλες τις πιθανές τριπλέτες που μπορούν να σχηματίσουν τα συμβολογράμματα. Η φάση κλεισίματος υπολογίζεται για πέντε περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση οι συμβολομετρικές φάσεις των τριπλετών δεν διορθώνονται για την ατμοσφαιρική καθυστέρηση και στις άλλες τέσσερις περιπτώσεις οι συμβολομετρικές φάσεις διορθώνονται για την ατμοσφαιρική καθυστέρηση με καθεμία από τις τέσσερις μεθόδους διόρθωσης αντίστοιχα. Επομένως, ένας δεύτερος στόχος της εργασίας είναι να διερευνηθεί ποια μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης μειώνει περισσότερο το σφάλμα κατά την αποκατάσταση της φάσης.

Τρίτος στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση των μεθόδων διόρθωσης της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης ως προς τη μείωση του θορύβου που οφείλεται στην ατμοσφαιρική καθυστέρηση. Για τον σκοπό αυτό εξετάζεται η μείωση της τυπικής απόκλισης της διορθωμένης συμβολομετρικής φάσης μεταξύ των τεσσάρων μεθόδων όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης.

Τέλος γίνεται διερευνάται εάν η μέθοδος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής υγρασίας η οποία κάνει χρήση καιρικών δεδομένων ERA5 έχει βελτιωμένα αποτελέσματα ως προς τη μέθοδο PyAPS που αξιοποιεί επίσης τα δεδομένα ERA5 για τον υπολογισμό της φάσης.

Για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν 6 Sentinel-1 SAR απεικονίσεις με μικρή χρονική απόκλιση μεταξύ τους (ανά δώδεκα μέρες) της ίδιας περιοχής, για την παραγωγή 15 συμβολογραμμάτων. Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε στην κεντρική Ελλάδα και συγκεκριμένα στο όρος Όλυμπος, όπου παρουσιάζονται έντονες υψομετρικές διαφορές.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι **βασικές αρχές** των συστημάτων **RADAR**, των RADAR συνθετικού ανοίγματος (**SAR**), και της SAR συμβολομετρίας (**InSAR**).

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται **ανασκόπηση της βιβλιογραφίας** για την επίδραση της τροπόσφαιρας και τις μεθόδους διόρθωσης της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης στα InSAR, καθώς επίσης και της σημασίας της φάσης κλεισίματος και τις εφαρμογές της.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται η **περιοχή μελέτης** και τα χαρακτηριστικά της, τα δεδομένα και τα λογισμικά που αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Το κεφάλαιο 4 καλύπτει τη **μεθοδολογία** που ακολουθήθηκε και παρουσιάζει αναλυτικά τα βήματα υλοποίησης.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα **αποτελέσματα** της ανάλυσης και γίνεται **αξιολόγηση** των αποτελεσμάτων.

Τέλος, το κεφάλαιο 6 περιέχει τα **συμπεράσματα** που εξήχθησαν από τη μελέτη και γίνονται **προτάσεις** για μελλοντικές πτυχές που αξίζει να διερευνηθούν.

I.II. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ RADAR

I.II.1. Εισαγωγή

Το RADAR (**R**adio **D**etection and **R**anging, δηλαδή Ραδιο-Ανίχνευση και Αποστασιομέτρηση) είναι ένα μικροκυματικό ενεργητικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, εντοπισμό, απεικόνιση και παρακολούθηση αντικειμένων.

Στην τηλεπισκόπηση τα RADAR απεικόνισης χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές σε πολλά πεδία, όπως οι Πόλοι, η Μετεωρολογία και Κλιματολογία, οι Ωκεανοί, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, καθώς προσφέρουν:

- 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 RADAR ανήκουν στην κατηγορία των ενεργητικών δεκτών δηλαδή έχουν δική τους πηγή ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τους παθητικούς δέκτες που χρησιμοποιούν τον ήλιο ως πηγή. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκπομπή και λήψη παλμών.

Βραχείς (διάρκειας *microsecond*), μεγάλης ενέργειας παλμοί μικροκυματικής ακτινοβολίας εκπέμπονται από το RADAR. Ο παλμός ταξιδεύει από το RADAR στην επιφάνεια του εδάφους με την ταχύτητα του φωτός (*c*), μέχρι που χτυπάει το έδαφος έχοντας διανύσει πλευρική απόσταση (*range, R*). Κάποια από την εισερχόμενη ενέργεια σκεδάζεται πίσω στον δέκτη και καταγράφεται από την κεραία (*antenna*) του RADAR μετατοπισμένη χρονικά κατά $\tau = \frac{2R}{c}$ (Καραθανάση, 2012).

Τα τυπικά RADAR μετράνε το χρόνο που χρειάστηκε ο παλμός ταξιδέψει προς και από τον στόχο για τον υπολογισμό της σχετικής απόστασης μεταξύ RADAR και στόχου. Στην περίπτωση των RADAR απεικόνισης, ο δέκτης καταγράφει επιπλέον πληροφορίες για την σκεδαζόμενη ενέργεια (σήμα επιστροφής), δηλαδή την ισχύ, τη φάση, και τη διεύθυνση λήψης. Αυτές οι πληροφορίες αξιοποιούνται στην εξαγωγή πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά του σκεδαστή όπως η οπισθοσκέδαση, η υγρασία, η ομαλότητα κλπ.

Μετά την επεξεργασία του σήματος επιστροφής, προκύπτει μια μιγαδική απεικόνιση RADAR, της οποίας κάθε εικονοστοιχείο έχει δύο τιμές: την *I* και την *Q*. Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να παραχθεί η απεικόνιση φάσης και η απεικόνιση ισχύος της οποίας το κάθε εικονοστοιχείο έχει τιμή $\sqrt{I^2 + Q^2}$ (Καραθανάση, 2012).

1.11.2. Μήκος Κύματος και Πόλωση

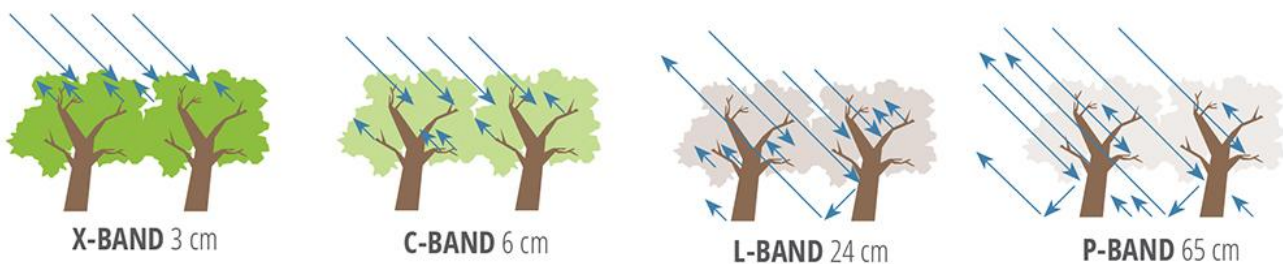
Τα RADAR λειτουργούν στη μικροκυματική περιοχή του Ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) φάσματος (από $\lambda = 3\text{mm} - 1\text{m}$). Τα κυρία κανάλια, δηλαδή υποδιαίρεσεις του φάσματος, που συναντώνται σε μικροκυματικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1):

Πίνακας 1: SAR RADAR κανάλια (Evans, 1995)

SAR RADAR Band	Frequency Range (GHz)	Corresponding Wavelength Range(cm)
P	0.230 -1	130 - 30
L	1-2	30 - 15
S	2-4	15 - 7.5
C	4-8	7.5 - 3.75
X	8-12.5	3.75 - 2.40
Ku	12.5-18	2.40 - 1.67
K	18 -26.5	1.67 - 1.13
Ka	26.5- 40	1.13 - 0.75

Τα δορυφορικά συστήματα RADAR λειτουργούν κυρίως στα κανάλια X, C και L, αν και επερχόμενα συστήματα θα λειτουργούν στα κανάλια S (NISAR¹ της NASA) και P (BIOMASS² της ESA).

Το μήκος κύματος του RADAR έχει μεγάλη σημασία καθώς συνδέεται με την ικανότητα του σήματος να διεισδύει τους στόχους στους οποίους προσπίπτει. Όσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος τόσο πιο βαθιά διαπερνά το σήμα του RADAR. Για παράδειγμα, στην βλάστηση (δέντρα) η ακτινοβολία του καναλιού X σκεδάζεται από τα φύλλα στην κορυφή και επάνω μέρος του φυλλώματος, στο κανάλια C διαπερνά βαθύτερα και σκεδάζεται μέσα στο φύλλωμα και σε μικρά κλαδιά, ενώ στο κανάλι L και P το σήμα διαπερνάει ακόμα βαθύτερα σε κλαδιά, κορμούς και έδαφος (Herndon et al., 2020).



Εικόνα 1: Βάθος Διείσδυσης του σήματος ανάλογα με το μήκος κύματος του (Πηγή: <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>)

¹ <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/quick-facts/>

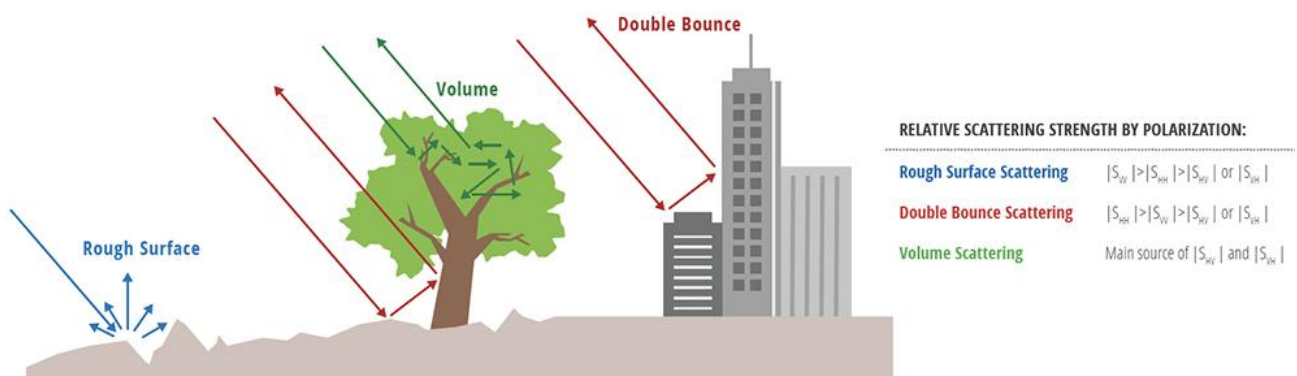
² https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Biomass

Το βάθος διείσδυσης σχετίζεται, επίσης, με την διηλεκτρική σταθερά του στόχου και την πόλωση του κύματος. Η πόλωση ενός ΗΜ κύματος δείχνει τη διεύθυνση της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου. Η πόλωση μπορεί επίσης να παρέχει πληροφορία για τη δομή και τη διεύθυνση των στοιχειωδών σκεδαστών οι οποίοι συνθέτουν την επιφάνεια του στόχου (Καραθανάση, 2012).

Το πλεονέκτημα των δεκτών RADAR είναι ότι η πόλωση του σήματος μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά την μετάδοση όσο και στην λήψη. Τα πολωμετρικά RADAR απεικόνισης μετράνε την ανακλαστικότητα του ΗΜ κύματος από ένα μέσο σε ΗΗ, VV, HV, και VH πολώσεις. Η πόλωση HV δηλώνει οριζόντια (H) μετάδοση και κατακόρυφη (V) λήψη, αντίστοιχα ορίζονται και οι άλλες τρεις πολώσεις (Herndon et al., 2020).

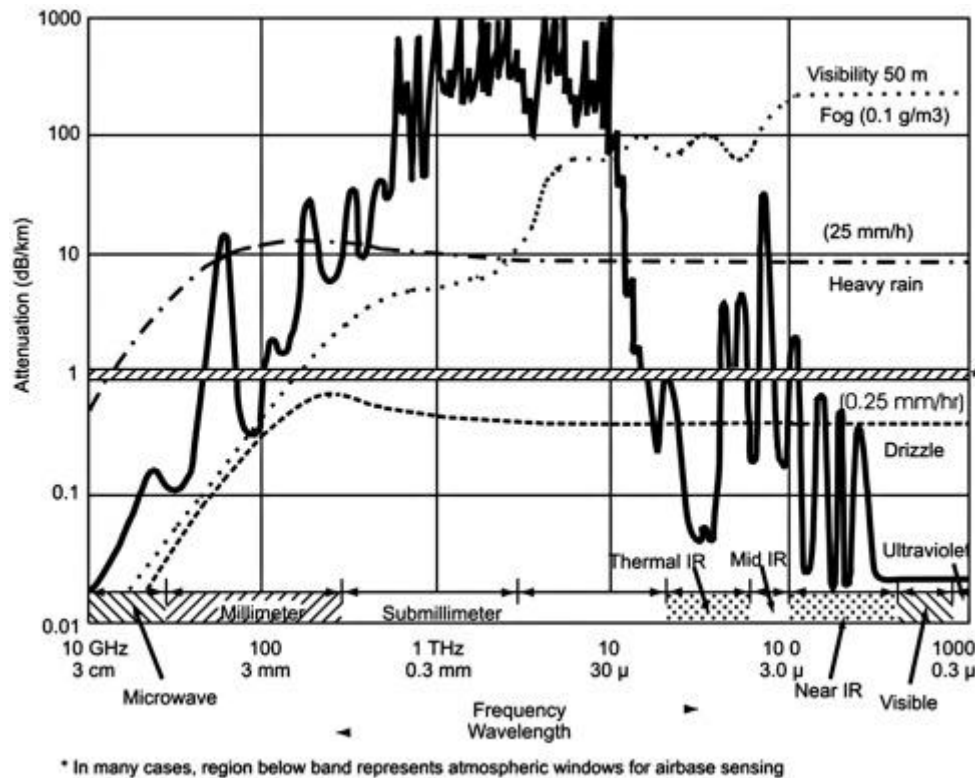
Εξετάζοντας την ισχύ του σήματος σε κάθε κανάλι πόλωσης μπορεί να εξαχθούν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της εικόνας, με βάση τους τρεις τύπους σκέδασης που παρατηρούνται: (i) **σκέδαση τραχείας επιφάνειάς** (rough surface scattering), **σκέδαση όγκου** (volume scattering), και **σκέδαση διπλής αναπήδησης** (double bounce scattering)

Η **σκέδαση τραχείας επιφάνειάς** παρατηρείται σε επιφάνειες όπως το έδαφος και το νερό και είναι πιο ευαίσθητη σε σήμα VV πόλωσης. Η **σκέδαση όγκου** προκαλείται π.χ. από το φύλλωμα και τα κλαδιά στην σκεπή των δασών και είναι πιο ευαίσθητη σε σήμα VH και HV πόλωσης. Τέλος, η **σκέδαση διπλής αναπήδηση** προκαλείται από κτίρια, κορμούς δέντρων ή πλημμυρισμένη βλάστηση και είναι πιο ευαίσθητη σε σήμα ΗΗ πόλωσης. (Εικόνα 2)



Εικόνα 2: Τύποι σκέδασης της ακτινοβολίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σκεδαστή (Πηγή: <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>)

Η ιδιότητα των RADAR να είναι “παντός καιρού” και ανεξάρτητα της συννεφοκάλυψης (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) (Καραθανάση, 2012).



Εικόνα 3: Ατμοσφαιρική Εξασθένιση στο ΗΜ φάσμα (Πηγή: Fingas και Brown, 2017)

1.11.3. Γεωμετρία Λήψης

Τα RADAR είναι συστήματα πλευρικής όψης (Side-Looking) (Εικόνα 4). Λειτουργούν εκπέμποντας μια αλληλουχία από μικροκυματικούς παλμούς (παλμοσειρά), η οποία ανακλάται στο έδαφος (αποτύπωμα κεραίας) και η ηχώ της επιστρέφει στην κεραία σε διαφορετικούς χρόνους, ξεκινώντας από την ηχώ που δίνει πληροφορία για στόχους οι οποίοι βρίσκονται στην εγγύτερη πλευρική απόσταση (near range) και τέλος επιστρέφει η ηχώ που δίνει πληροφορία για στόχους οι οποίοι βρίσκονται στην απώτερη πλευρική απόσταση (far range). Η πληροφορία που καταγράφεται από κάθε παλμοσειρά αντιστοιχεί στα εικονοστοιχεία κατά μήκος της εγκάρσιας (across track) διεύθυνσης της απεικόνισης (Rocca et al, 2000).

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται καθώς η κεραία εκπέμπει συνεχόμενα παλμοσειρές όσο ταξιδεύει ο δορυφόρος (ή αεροσκάφος) και έτσι καταγράφεται η κατά μήκος της γραμμής πτήσης (along track) ή αζιμουθιακή (azimuth) διεύθυνση της απεικόνισης. Η απόσταση μεταξύ εγγύτερου και απώτερου στόχου ορίζει το πλάτος της λήψης (swath).

Η πλευρική απόσταση εδάφους (ground range) είναι η απόσταση επί του εδάφους οποιουδήποτε στόχου από το σημείο ναδίρ του RADAR.

Λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας των RADAR, οι απεικονίσεις έχουν διαφορετική διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση της κάθετη στη γραμμή πτήσης και διαφορετική στη διεύθυνση των αζιμουθίων:

- Η **διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση την κάθετη στη γραμμή πτήσης** (range resolution) σχετίζεται με το μήκος του παλμού (L) και ισούται με:

$$\Delta y = \frac{L}{2\cos\alpha} \quad (1)$$

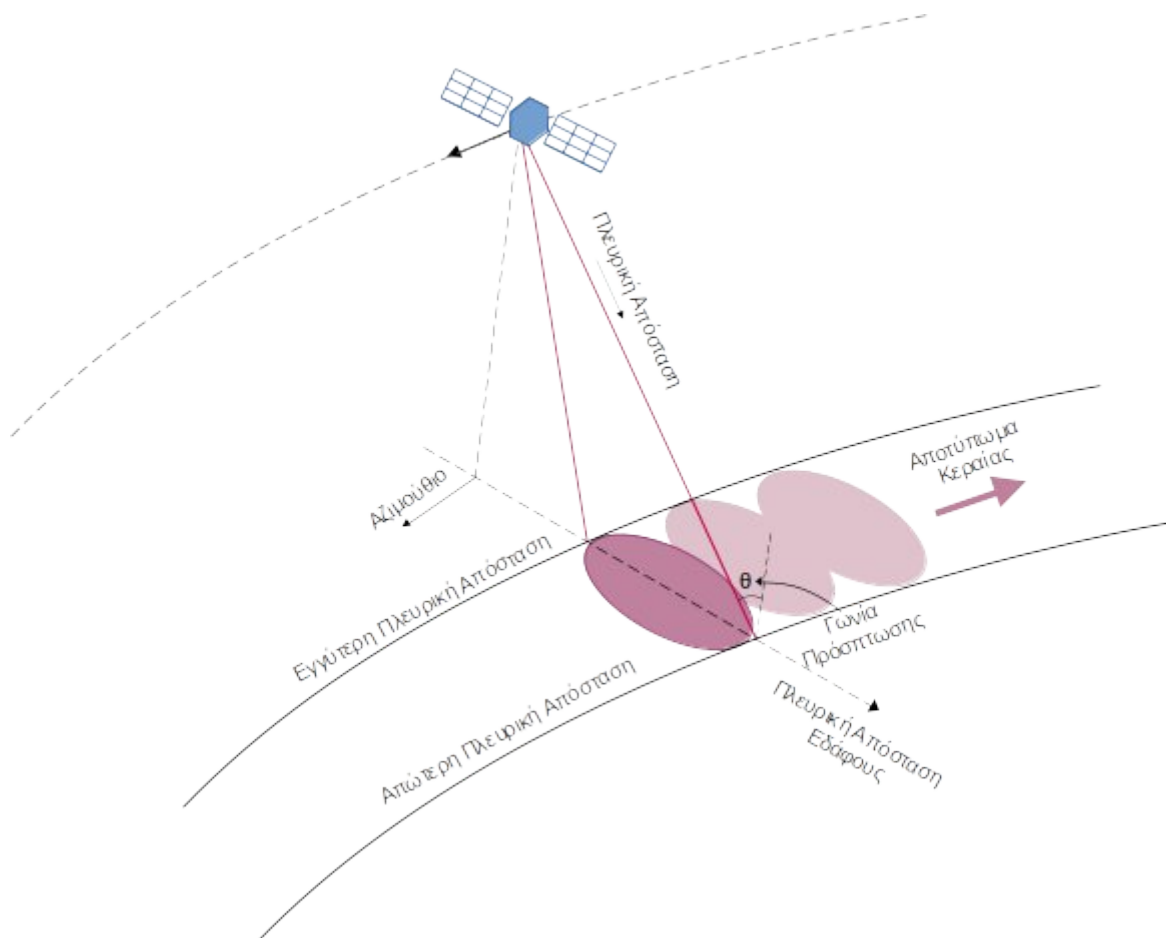
Όπου α η συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης.

Χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος για να βελτιωθεί η διαχωριστική ικανότητα στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Συγκεκριμένα, εκπέμπεται ένας παλμός μεγάλου μήκους με διαμορφωμένη συχνότητα και λαμβάνεται παλμός πολύ μικρότερου μήκους κύματος.

- Η **διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων** (azimuth resolution) εξαρτάται από το πραγματικό μήκος της κεραίας (D) και για απόσταση δέκτη - στόχου R είναι:

$$\Delta\chi = \frac{R\lambda}{D} \quad (2)$$

Όπου λ το μήκος κύματος του δέκτη.



Εικόνα 4: Γεωμετρία λήψης RADAR Πλευρικής Όψεως

I.II.4. RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

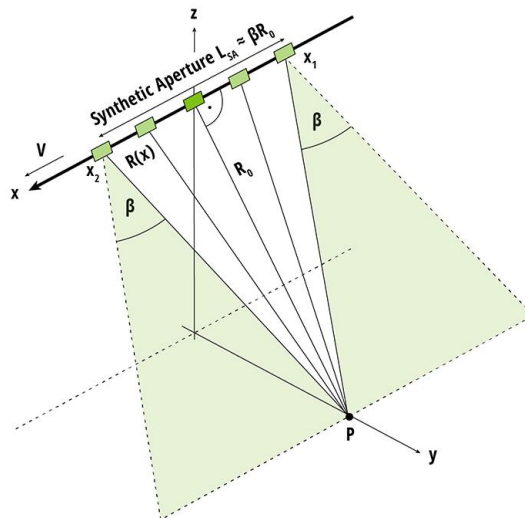
Η χωρική ανάλυση ($\Delta\chi$) των δεδομένων RADAR σχετίζεται άμεσα με τον λόγο του μήκους κύματος του δέκτη (λ) προς το μήκος της κεραίας του δέκτη (D).

$$\Delta\chi = \frac{R\lambda}{D} \quad (3)$$

Άρα, για συγκεκριμένο μήκος κύματος και πλευρικής απόστασης (R), όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική ανάλυση.

Τα RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) συνδυάζουν μια σειρά λήψεων από μια μικρή κεραία ώστε να προσομοιάσουν την λήψη μιας μεγάλης συνθετικής κεραίας.

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, Καραθανάση, 2012).



Εικόνα 5: Γεωμετρία των RADAR συνθετικού ανοίγματος (Πηγή: <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>)

I.III. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR (InSAR)

I.III.1. Εισαγωγή

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 δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DEM) και την παρακολούθηση μεταβολών στην γήινη επιφάνεια (Massonnet & Rabaute, 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**) (Καραθανάση, 2012).

Κυρίως υπάρχουν τρία είδη συμβολομετρίας:

- **Επαναληπτική συμβολομετρία (Repeat-pass InSAR)**

Λήψη δύο SAR απεικονίσεων που έχουν χρονική και χωρική απόκλιση μεταξύ τους. Η διαφοροποίηση της θέσης του δορυφόρου είναι κατά πλάτος (across-track).

- **Διαφορική συμβολομετρία (Differential InSAR ή DInSAR)**

Χρησιμοποιούνται περισσότερες από δύο SAR απεικονίσεις ή εναλλακτικά δύο SAR απεικονίσεις και ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ ή DEM).

- **Κατά μήκος συμβολομετρία (Along-Track InSAR)**

Δυο κεραίες τοποθετούνται κατά μήκος της πορείας πτήσης.

I.III.2. Συμβολομετρική Φάση

Το σήμα που καταγράφεται από τον δέκτη στα συστήματα SAR περιέχει την πληροφορία του πλάτους και της φάσης. Η φάση κάθε εικονοστοιχείου 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 μέρους ψ_{scatt} .

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

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2 = \psi_1(r) + \psi_{scatt,1} - \psi_2(r + \Delta r) - \psi_{scatt,2} = \varphi(\Delta r) \quad (4)$$

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

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (5)$$

Όπου λ το μήκος κύματος.

Επειδή η βάση λήψης (B) μεταξύ των δεκτών είναι σημαντικά μικρότερη από την απόσταση δέκτη - στόχου, η διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων, δηλαδή η παραλλαγή της συμβολομετρικής φάσης, είναι:

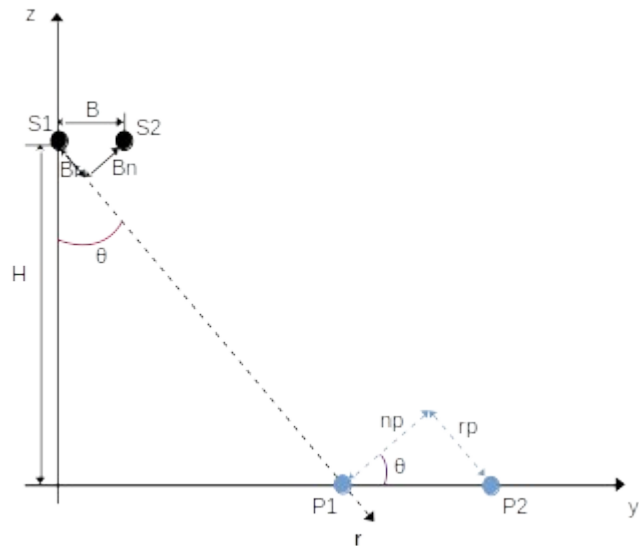
$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r) = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r} \quad (6)$$

Φαίνεται, λοιπόν, ότι αν είναι γνωστά η συνιστώσα της σχετικής μετατόπισης των τροχιών στη διεύθυνση κάθετη στην πλευρική απόσταση (κάθετη γραμμή βάσης) (B_n), η απόσταση δέκτη - στόχου (r), και το μήκος κύματος του SAR (λ), τότε η διαφορά φάσης ($\Delta\varphi$) εξαρτάται μόνο από τη συνιστώσα της απόστασης των στόχων στη διεύθυνση κάθετη στην πλευρική απόσταση (n_p). Ο παράγοντας n_p δηλώνει ότι η οριζοντιογραφική διαφορά δυο σημείων έχει ως αποτέλεσμα μια γραμμική συμβολομετρική φάση, που ονομάζεται **φάση επίπεδης γης** (flat earth), και σχετίζεται με τη διαφορά απόστασης των δυο σημείων και τη γωνία πρόσπτωσης (θ) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

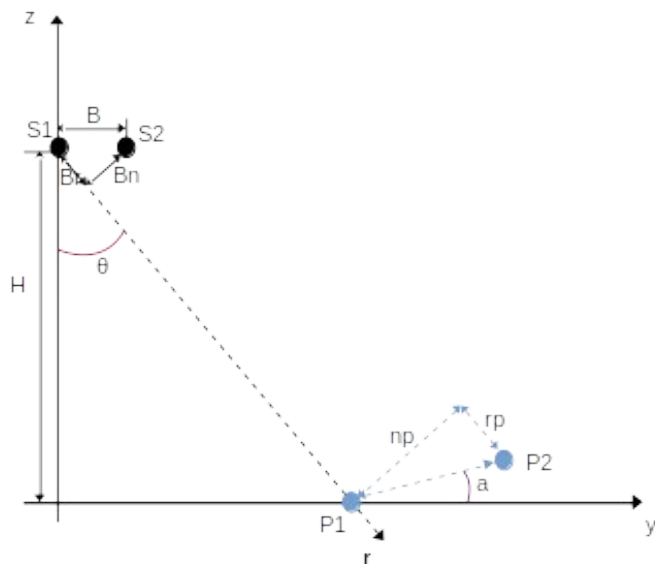
$$n_p = \frac{\Delta r}{\tan\theta} \quad (7)$$

Στην περίπτωση που δυο σημεία απέχουν και υψομετρικά και οριζοντιογραφικά (Σχήμα 2) προκύπτει η σχέση:

$$n_p = n_{flat} + n_{topo} = \frac{\Delta r}{\tan\alpha} + \frac{\Delta h}{\sin\alpha} \quad (8)$$



Σχήμα 1: Γεωμετρία SAR συμβολομετρίας σε ένα επίπεδο κάθετο στην τροχιά του δορυφόρου (S1 και S2)



Σχήμα 2: Γεωμετρία SAR συμβολομετρίας σε ένα επίπεδο κάθετο στην τροχιά του δορυφόρου (S1 και S2).

Άρα:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{topo} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \left(\frac{\Delta r}{\tan\alpha} + \frac{\Delta h}{\sin\alpha} \right) \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_{topo} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \frac{\Delta h}{\sin\alpha} \quad \text{και} \quad \Delta\varphi_{flat} = \frac{4\pi B_n}{\lambda r} \frac{\Delta r}{\tan\alpha} \quad (10), (11)$$

Επομένως, η εικόνα της συμβολομετρικής φάσης αναπαριστά έναν χάρτη σχετικών υψομετρικών διαφορών αν από την συμβολομετρική φάση αφαιρεθεί η φάση της επίπεδης γης.

Στην πράξη, η συμβολομετρική φάση περιέχει και άλλους όρους (συνιστώσες):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{defo} + \Delta\varphi_{atmo} + \Delta\varphi_{noise} \quad (12)$$

Όπου:

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

$\Delta\varphi_{topo}$: Όρος της τοπογραφίας, σχετίζεται με την υψομετρία της περιοχής.

$\Delta\varphi_{defo}$: Όρος που σχετίζεται με παραμορφώσεις του εδάφους.

$\Delta\varphi_{atmo}$: Όρος που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική καθυστέρηση.

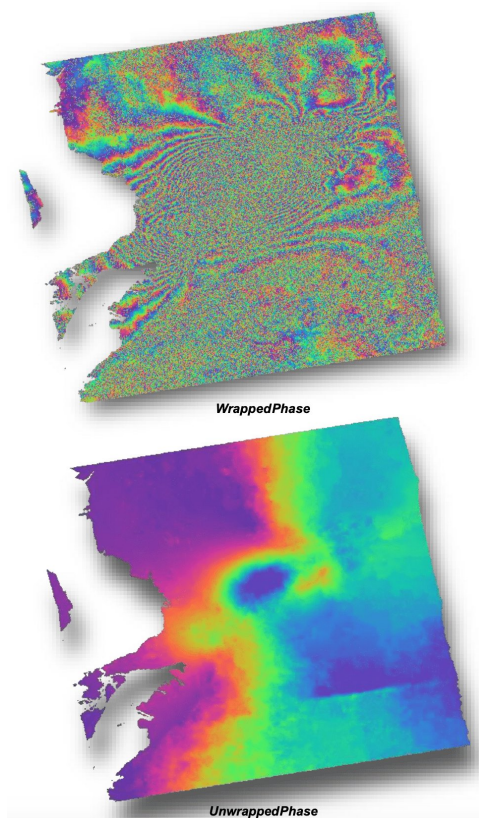
$\Delta\varphi_{noise}$: Όρος που σχετίζεται με τον θόρυβο του συστήματος.

1.11.3. Αποκατάσταση Φάσης

Η συμβολομετρική φάση που καταγράφεται τη στιγμή της λήψης για κάθε SAR απεικόνιση βρίσκεται στα όρια $[-\pi, \pi]$ και η πληροφορία για τον αριθμό των ακέραιων αριθμών κύκλων (2π) δεν μπορεί να αποκτηθεί άμεσα. Αντίστοιχα, η φάση του συμβολογράμματος δεν είναι γνωστή, αλλά μόνο το δεκαδικό μέρος της φάσης.

Η ιδιαιτερότητα αυτή της φάσης είναι πολύ ευδιάκριτη σε ένα διάγραμμα κροσσών συμβολής. Λόγω της ασυνέχειας στις τιμές της φάσης παρατηρούνται καμπύλες, οι οποίες ονομάζονται ισοφασικές καμπύλες και απέχουν μεταξύ τους π rad.

Η διαδικασία υπολογισμού των χαμένων κύκλων της φάσης ονομάζεται αποκατάσταση φάσης και αποτελεί μια από τις πιο περίπλοκες και δύσκολες επεξεργασίες στην συμβολομετρία.



Εικόνα 6: Συμβολομετρική φάση πριν (πάνω) και μετά (κάτω) την αποκατάσταση της.
(Πηγή: <https://asf.alaska.edu/>)

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που προσφέρουν λύση στο ιδιαίτερα πολύπλοκο μαθηματικό πρόβλημα της αποκατάστασης της φάσης, οι οποίες δεν θεωρείται σκόπιμο να αναλυθούν σε αυτήν την εργασία. Όμως, το κύριο χαρακτηριστικό που μοιράζονται αυτές οι τεχνικές είναι ότι κωδικοποιούν με μαθηματικές σχέσεις την παραδοχή ότι κατά μέσο όρο η επιφάνεια της γης είναι σχετικά ομαλή και απότομες αλλαγές στην κλίση είναι σπάνιες, οπότε η διαφορά φάσης μεταξύ δύο γειτονικών pixels δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από π .

I.III.4. Συνάφεια Φάσης

Η **συνάφεια φάσης (coherence)** είναι ένα μέτρο της ποιότητας της συμβολομετρικής φάσης, η οποία εξαρτάται από τη ποσότητα θορύβου στα δεδομένα.

Η συνάφεια (γ) δύο μιγαδικών SAR εικόνων u_1 και u_2 , δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2] E[|u_2|^2]}} \quad (13)$$

Όπου $E[.]$ ο **τελεστής αναμενόμενης τιμής** (expectation operator), ο οποίος στην πράξη έχει τη μορφή δειγματοληπτικού χωρικού μέσου όρου.

Η απόλυτη τιμή της συνάφειας είναι βασική πληροφορία για την εκμετάλλευση των συμβολογραμμάτων. Συνδέεται με τον λόγο σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio(SNR)), ο οποίος μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της συνάφειας:

$$SNR = \frac{|\gamma|}{1-|\gamma|} \quad \text{ή} \quad |\gamma| = \frac{SNR}{SNR+1} \quad (14), (15)$$

Φαίνεται, λοιπόν, ότι η συνάφεια είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος στην συμβολομετρική φάση, που πρέπει να διατηρείται όσο τον δυνατόν υψηλότερη κατά την διαδικασία παραγωγής της συμβολομετρικής φάσης (π.χ. σφάλματα στην συμποροσαρμογή των εικόνων μπορεί να οδηγήσουν σε μηδενική συνάφεια).

Οι κύριες πηγές θορύβου που οδηγούν σε χαμηλή συνάφεια είναι:

1. Θόρυβος του συστήματος του δέκτη
2. Χρονικές μεταβολές στις συνθήκες της επιφανειακής σκέδασης
3. Επιρροές κατά την διάδοση του σήματος
4. Σφάλματα κατά την επεξεργασία InSAR

I.III.5. Φάση Κλεισίματος

Η φάση κλεισίματος (**Phase Closure**) είναι ο γραμμικός συνδυασμός των τριών συμβολογραμμικών φάσεων ($\phi()$). Για μια τριπλέτα $\alpha\beta\gamma$ τριών SAR απεικονίσεων α , β και γ η φάση κλεισίματος της τριπλέτας ($\xi_{\alpha\beta\gamma}$) θα είναι (Michaelides et al., 2019):

$$\xi_{\alpha\beta\gamma} = \varphi_{\alpha\beta} + \varphi_{\beta\gamma} - \varphi_{\alpha\gamma} \quad (16)$$

Εκ κατασκευής, η φάση κλεισίματος για τρία unwrapped συμβολογράμματα θα έπρεπε να ισούται με το μηδέν (Jennison, 1958), καθώς, η φάση κλεισίματος δεν επηρεάζεται καθόλου από τις συνιστώσες της φάσης που σχετίζονται με την παραμόρφωση του εδάφους, την τοπογραφία, και την ατμοσφαιρική καθυστέρηση. Αυτό αποδεικνύεται παρακάτω για την φάση κλεισίματος της ατμοσφαιρικής φάσης και ισχύει αντίστοιχα και για την παραμόρφωση και τοπογραφία.

$$\xi_{\alpha\beta\gamma}^{atm} = \varphi_{\alpha\beta}^{atm} + \varphi_{\beta\gamma}^{atm} - \varphi_{\alpha\gamma}^{atm} = (\varphi_{\beta}^{atm} - \varphi_{\alpha}^{atm}) + (\varphi_{\gamma}^{atm} - \varphi_{\beta}^{atm}) - (\varphi_{\gamma}^{atm} - \varphi_{\alpha}^{atm}) = 0$$

Στην πράξη όμως η φάση κλεισίματος δεν είναι μηδενική. Οι κύριοι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι:

- Η αποσυσχέτιση που οφείλεται στις χρονικές μεταβολές των ηλεκτρικών και σκεδαστικών ιδιοτήτων της επιφάνειας.
- Σφάλματα που εισάγονται κατά την διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης.
- Θόρυβος του συστήματος.
- Η επεξεργασία multilooking η οποία μειώνει την αρχική χωρική ανάλυση της εικόνας και ομαλοποιεί τα δεδομένα με αποτέλεσμα να χάνεται πληροφορία από την εικόνα.

I.IV. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

I.IV.1. Εισαγωγή

Όταν το σήμα διαδίδεται μέσω της ανομοιογενούς ατμόσφαιρας της Γης, η οποία έχει λίγο μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το κενό, η ταχύτητα διάδοσης τους σήματος μειώνεται ελάχιστα. Με αποτέλεσμα, να παρουσιάζονται χωρικά μεταβαλλόμενες καθυστερήσεις που αλλοιώνουν τις παρατηρήσεις.

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, τα οποία είναι γνωστά ως **ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα** (atmospheric artifacts) (Rocca et al., 2000).

Οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις συναντώνται σε δύο στρώματα της ατμόσφαιρας, την Ιονόσφαιρα και τη Τροπόσφαιρα, των οποίων οι επιδράσεις τους μελετώνται ξεχωριστά.

I.IV.2. Επίδραση της Ιονόσφαιρα

Η ιονόσφαιρα εκτείνεται στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, περίπου από 50 έως 100 χλμ.. 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 ιοντισμού 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 παραλλαγές 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 είναι (Gray et al., 2000):

$$\Delta\varphi_{\text{iono}} = 1.69 \cdot 10^{-6} \frac{N}{f} \quad (17)$$

Όπου $N \left[\mu^{-2} \right]$ ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά τμ. και $f \text{ [Hz]}$ η συχνότητα του SAR. 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. 10¹⁶ m⁻²) οδηγεί σε μεταβολή της ιονοσφαιρικής φάσης 2,0 κύκλων φάσεως στο κανάλι L, περίπου σε 0,5 κύκλων φάσεως στο κανάλι C και περίπου σε 0,3 κύκλους φάσεως 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).

1.1V.3. Επίδραση της Τροπόσφαιρας

Η Τροπόσφαιρα είναι το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας από της επιφάνειας της Γης, πάχους έως και 18 χιλιομέτρων στον Ισημερινό, 10 - 13 χλμ. στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και 8 χλμ. 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.

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση αποτελείται από δύο μέρη: τη **συνιστώσα της ξηρής ατμόσφαιρας** (dry atmosphere component) και τη **συνιστώσα της υγρής τροπόσφαιρας** (wet atmosphere component). Η καθυστέρηση λόγω της συνιστώσας της ξηρής ατμόσφαιρας σχετίζεται κυρίως με τη πίεση του αέρα και την θερμοκρασία. Έχει ομαλή και αργή μεταβολή στο χρόνο και για αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια. 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 (Καραθανάση, 2012).

Η διαφορά της τροποσφαιρική φάσης δίνεται από την σχέση (Berrada Baby et al., 1988):

$$\Delta\varphi_{tropo}(z) = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R_d}{g_m} (P(z) - P(z_{ref})) + \int_z^{z_{ref}} \left(\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \right\} \quad (18)$$

Όπου, $\Delta\varphi_{tropo}(z)$ η φάση της τροπόσφαιρας (ψεύδο-φάση σε μέτρα) για υψόμετρο z , τα $R_d = 287.05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ και $R_v = 461.495 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ είναι αντίστοιχα οι ειδικές σταθερές αερίου ξηρού αέρα και υδρατμών, και τα $k_1 = 0.776 \text{ K.Pa}^{-1}$, $k_2 = 0.716 \text{ K.Pa}^{-1}$ και $k_3 = 3.75 \cdot 10^3 \text{ K}^2.\text{Pa}^{-1}$ είναι σταθερές (Smith και Weintraub, 1953).

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 βάσης (Zebker et al., 1997).

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1. ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις περιγράφονται κυρίως από τις χωρικές και χρονικές μεταβολές στην πίεση, θερμοκρασία, και σχετική υγρασία στο χαμηλό μέρος της τροπόσφαιρας, που οδηγούν σε ένα χωρικά μεταβαλλόμενο τροποσφαιρικό σήμα μέσα στην συμβολομετρική φάση. Επειδή, η επίδραση της ατμόσφαιρας περιορίζει σημαντικά την ακρίβεια των SAR συμβολογραμμάτων, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών για την μείωση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης σε SAR συμβολογράμματα. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες διόρθωσης:

- Διορθώσεις των ατμοσφαιρικών επιδράσεων βάσει εξωτερικών δεδομένων
- Διορθώσεις των ατμοσφαιρικών επιδράσεων κατευθείαν από την συμβολομετρική φάση

2.1.1. Διορθώσεις των Ατμοσφαιρικών Επιδράσεων βάσει Εξωτερικών Δεδομένων

Η διόρθωση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης μπορεί γίνει με την χρήση **Αριθμητικών Καιρικών Μοντέλων** όπως το ERA-Interim (ERA-I)³, το ERA5, το WRF, το HRES κα. Τα μοντέλα αυτά μπορεί 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 (βλ. εξίσωση 18).

Οι Jolivet et al. (2011) χρησιμοποίησαν το καιρικό μοντέλο ERA-I για το υπολογισμό χαρτών τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Για την επικαιροποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν unwarped συμβολογράμματα. Επίσης, αποδείχθηκε ότι η εφαρμογή της διόρθωσης πριν την αποκατάσταση της φάσης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των σφαλμάτων της διαδικασίας της αποκατάσταση σε περιοχές με ανώμαλη τοπογραφία.

Οι Hu και Mallorquí (2019) χρησιμοποίησαν δεδομένα ERA5 για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης στην διεύθυνση της γραμμής όψης (Line-of-Sight (LOS)) του δορυφόρου και των στόχων, αντί να υπολογίζεται η κατακόρυφη καθυστέρηση της ατμόσφαιρας (Zenith Total Delay (ZTD)). Για την αξιολόγηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν Sentinel-1 δεδομένα σε τρεις περιοχές μελέτης: Νήσος Τενερίφη και Αλμερία, Ισπανία, και νήσος Κρήτη, Ελλάδα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος ξεπέρασε σε επιδόσεις την ZTD μέθοδο σε όλες τις περιοχές μελέτης, με μέση μείωση της τυπικής απόκλισης 50% στη νήσο Τενερίφη, 38% στην νήσο Κρήτη, και 29% στην Αλμερία, ενώ οι αντίστοιχες τιμές είναι 37%, 22%, και 14% για την ZTD.

Παρατηρήσεις από δορυφορικούς πολυφασματικούς δέκτες όπως ο MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) του δορυφόρου Envisat και ο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) των

³ Το ERA-I είναι ο πρόγονος του ERA5. Το ERA5 αντικατέστησε ο ERA-I που σταμάτησε την παραγωγή δεδομένων στις 31 Αυγούστου 2019.

δορυφόρων Terra και Aqua προσφέρουν προϊόντα κατακρημνίσιμων υδρατμών (Precipitable Water Vapor (PWV)). Σε αυτά τα συστήματα οι κατακόρυφα ολοκληρωμένοι υδρατμοί που περιέχονται στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται παρόμοια με τα Αριθμητικά Μοντέλα για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης.

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.

Επιπλέον, **μετρήσεις από GPS** μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση των δεδομένων, η οποία θα οδηγεί στην αφαίρεση μέρους (αν όχι ολόκληρης) της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης. (Williams et al., 1998)

Οι Yu et al. (2006) χρησιμοποίησαν τακτικές 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 συνιστώσεων του σήματος 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 (i) του RMS μεταξύ συμβολομετρικής φάσης και μετρήσεων GPS 45–79% και 59–71%, αντίστοιχα για κάθε περιοχή μελέτης και (ii) της τυπικής απόκλισης 38–61% και 65–79%, αντίστοιχα.

Τέλος, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων:

Οι Yu et al. (2018) ανέπτυξαν ένα μοντέλο γενικευμένης ατμοσφαιρικής διόρθωσης InSAR. Ενσωματώσαν 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 Li et al. (2005) ενσωμάτωσαν δεδομένα από GPS και παρατηρήσεις από τον MODIS για τον υπολογισμό χωρικών πεδίων υδρατμών. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε ERS-2 δεδομένα από το Λος Άντζελες, ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα από την περιοχή του δικτύου Southern California Integrated GPS Network (SCIGN) δείχνανε πως όχι μόνο ήταν εφικτό να διαχωρίσουν τα γεωφυσικά σήματα από τα σήματα της ατμόσφαιρας, αλλά και οι επιδράσεις των υδρατμών μειώθηκαν σημαντικά.

Οι Roukounakis et al. (2021) εξέτασαν αν ο συνδυασμός του καιρικού μοντέλου υψηλής ανάλυσης WRF με την συνιστώσα της κατακόρυφης καθυστέρησης από μετρήσεις GPS μπορεί να οδηγεί στην παραγωγή λεπτομερών χαρτών ατμοσφαιρικής καθυστέρησης υψηλής ανάλυσης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε 16 Sentinel-1A συμβολογράμματα τα οποία διορθώθηκαν με την χρήση των χαρτών ατμοσφαιρικής καθυστέρησης που παράχθηκαν. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διόρθωση οδήγησε σε βελτίωση της φάσης, με μέση μείωση του RMS και της τυπικής απόκλισης της wrapped φάσης 6.0% και 19.3%, αντίστοιχα.

Οι διορθώσεις που υπολογίζονται με τις παραπάνω μεθόδους, συχνά, περιορίζονται από την χωρική και χρονική ανάλυση και την ακρίβεια των εξωτερικών δεδομένων. Οι σταθμοί GPS είναι συνήθως ελάχιστοι και αραιά κατανομημένοι σε διάφορες περιοχές στη Γη. Τα φασματόμετρα μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες μόνο σε συνθήκες χωρίς συννεφοκάλυψη και με το φως του ήλιου. Παρατηρήσεις από καιρικά μοντέλα και φασματόμετρα που δεν αποκτώνται ταυτόχρονα με τα SAR δεδομένα χρειάζεται να υπολογιστούν με την χρήση παρεμβολής, η οποία επίσης μπορεί να προσθέσει σφάλματα (Bekaert et al., 2015).

2.1.2. Διορθώσεις των Ατμοσφαιρικών Επιδράσεων κατευθείαν από την συμβολομετρική φάση

Η συμβολομετρική φάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής φάσης με την ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των συμβολομετρικών φάσεων ή/και της τοπογραφίας. Οι μέθοδοι αυτοί πλεονεκτούν καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για την χρήση εξωτερικών δεδομένων, όμως τα αποτελέσματα που εξαρτώνται από την συσχέτιση μεταξύ των παραμορφώσεων και μεταξύ των ατμοσφαιρικών φάσεων στα διαφορετικά συμβολογράμματα, αρά μικρή συσχέτιση οδηγεί σε αδυναμία διόρθωσης των σφαλμάτων (Ding et al., 2008).

Η μέθοδος του **στοιβάγματος (stacking)** περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μέσου όρου από N -ανεξάρτητα συμβολογράμματα για τη μείωση του χρονικά αποσυσχετισμένου θορύβου κατά $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Η μέθοδος κάποτε θεωρούνταν η μοναδική λύση για το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης (Zebker et al., 1996).

Η συνιστώσα της ατμοσφαιρικής φάσης ενός συμβολογράμματος ($\Delta\varphi_{tropo}$) μπορεί να υπολογιστεί αν υποθέσουμε ότι η **σχέση συμβολομετρικής φάσης ($\Delta\varphi$) και τοπογραφίας (h) είναι γραμμική** και υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση: $\Delta\varphi_{tropo} = K_{\Delta\varphi}h + \Delta\varphi_0$ (Wicks et al., 2002).

Οι Chaabane et al. (2007) πρότειναν τη διόρθωση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα κατευθείαν από διαφορετικά συμβολογράμματα. Σε αυτήν την προσέγγιση, οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις παγκόσμιας κλίμακας διορθώθηκαν με τη χρήση της σχέσης συμβολομετρικής φάσης και υψόμετρου, ενώ οι ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις τοπικής κλίμακας διορθώθηκαν με τη συσχέτιση μεταξύ συμβολογραμμάτων που μοιράζονταν κοινές λήψεις. Αποτελέσματα από 81 διαφορετικά συμβολογράμματα της περιοχής του κόλπου της Κορίνθου στην Ελλάδα έδειξαν ότι με την εφαρμογή της διόρθωσης παρατηρήθηκε μείωση της αβεβαιότητας στους χάρτες παραμόρφωσης (από ± 26 mm σε ± 12 mm) και μείωση της τιμής του RMS μεταξύ των συμβολογραμμάτων και μετρήσεων από GPS (από ± 30 mm σε ± 19 mm).

Οι Bekaert et al. (2015a) πρότειναν και εξέτασαν μια νέα μέθοδο power law διόρθωσης, η οποία λαμβάνει υπόψη της τη χωρική μεταβολή των ατμοσφαιρικών ιδιοτήτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε συμβολογράμματα που περιέχουν τοπογραφικά συσχετισμένη παραμόρφωση. Το μοντέλο έχει σταθερό σημείο αναφοράς στην κορυφή της τροπόσφαιρας και περιγράφει με μια power law σχέση, τον τρόπο με τον οποίο η καθυστέρηση της φάσης μεταβάλλεται με το υψόμετρο. Η τεχνική εξετάστηκε στο Μεξικό, όπου παρουσιάζονται διασεισμικές και αργής ολίσθησης παραμορφώσεις σε μεγάλο μήκος κύματος (~ 150 km). Μετά την διόρθωση, παρατηρήθηκε: (i) μείωση στα σήματα που συσχετίζονται με την τοπογραφία και

(ii) βελτίωση στην συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων του GNSS και των εκτιμήσεων του InSAR για τις διασεισμικές και αργής ολίσθησης παραμορφώσεις.

2.1.3. Σύγκριση Μεθόδων

Οι Kinoshita et al. (2012) εξέτασαν σε τι βαθμό τα αριθμητικά καιρικά μοντέλα μπορούν να μειώσουν την ατμοσφαιρική καθυστέρηση του σήματος, χρησιμοποιώντας 54 συμβολογράμματα από το Χοκάντο, Ιαπωνία. Εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι διόρθωσης: (i) συσχέτιση φάσης-υψομέτρου, (ii) χρήση του καιρικού μοντέλου μέσης κλίμακας meso-scale analysis model (MSM), και (iii) συνδυασμός του καιρικού μοντέλου μέσης κλίμακας meso-scale analysis model (MSM) και του υψηλής ευκρίνειας καιρικού μοντέλου WRF (Weather Research and Forecasting model). Συμπέραναν ότι εάν η φάση που συσχετίζεται με την τοπογραφία είναι σημαντική, η απόδοση των μεθόδων φάσης-υψομέτρου και MSM είναι παρόμοια. Όμως, όταν η φάση που συσχετίζεται με την τοπογραφία δεν είναι σημαντική, καμία από τις μεθόδους δεν μειώνει ικανοποιητικά την τροποσφαιρική φάση.

Οι Bekaert et al. (2015b) εκτέλεσαν μια στατιστική σύγκριση μεταξύ διαφόρων μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης (αριθμητικά καιρικά μοντέλα (ERA-I και WRF), MODIS και MERRA, γραμμική και power law συσχέτιση φάσης-υψομέτρου) σε unwarped συμβολογράμματα στις περιοχές του Μεξικού, Ιταλίας και Ελ Ιέρρο. Επιβεβαίωσαν ότι κάθε μέθοδος έχει τους δικούς της περιορισμούς και κατέληξαν ότι καμία μέθοδος δεν μειώνει την τροποσφαιρική καθυστέρηση με συνέπεια σε όλες τις περιοχές και χρονικές περιόδους.

Οι Darvishi et al. (2020) χρησιμοποίησαν Sentinel-1A/B απεικονίσεις στην περιοχή της Κορβάρρα των Άλπεων για την αξιολόγηση της διόρθωσης της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης για τέσσερις μεθόδους καιρικών μοντέλων (ERA-Interim, ERA5, MERRA2, και WRF) και δύο μεθόδους συσχέτισης φάσης υψομέτρου (γραμμική συσχέτιση και power law). Δεδομένα GPS και προϊόντα GACOS χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Κατέληξαν ότι η μέθοδος ERA5 ξεπέρασε σε επιδόσεις τα υπόλοιπα καιρικά μοντέλα με μείωση 77.7% της τυπικής απόκλισης σε σχέση με την συμβολομετρική φάση, με συντελεστή συσχέτισης 0.86 μεταξύ της συμβολομετρικής φάσης και της εκτιμώμενης τροποσφαιρικής φάσης και σημαντικά μικρότερο σφάλμα στην εκτίμηση της ταχύτητας κατολίσθησης.

2.2. ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την αξιοποίηση της μη μηδενικής φάσης κλεισίματος. Η φάση κλεισίματος αποδίδεται κυρίως στον θόρυβο της συμβολομετρικής φάσης που προκαλείται από την αποσυσχέτιση του σήματος μεταξύ των απεικονίσεων στην επαναληπτική συμβολομετρία, λόγω των αλλαγών στις ιδιότητες των σκεδαστών ανάμεσα στις λήψεις. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στην διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης που μπορεί να προκαλέσουν σφάλματα της τάξης των εκατοστών στα τελικά αποτελέσματα της χρονοσειράς (Benoit et al., 2020).

Η κύρια εφαρμογή που συναντάται είναι η διόρθωση εναπομεινάντων σφαλμάτων από την διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης (Wang et al., 2012), (Yunjun et al., 2019), (Xu & Sandwell, 2019), (Benoit et al., 2020), (Liu & Pan, 2020).

Οι Benoit et al. (2020) ανέπτυξαν τον αλγόριθμο CorPhU που αξιοποιεί την φάση κλεισίματος για την διόρθωση σφαλμάτων της διαδικασίας της αποκατάστασης της φάσης. Αξιολόγησαν την ικανότητα του αλγορίθμου σε δύο περιοχές μελέτης: (i) στο Λίβανο με Envisat απεικονίσεις, που περιέχουν unwrapping σφάλματα λόγω των μεγάλων χωρικών (500 m) και χρονικών (6 χρόνια) βάσεων των συμβολογραμμάτων και αποσυσχέτισης λόγω της βλάστησης, και (ii) στην Τουρκία με Sentinel-1 απεικονίσεις, που περιέχουν unwrapping σφάλματα λόγω των χρονικών μεταβολών στις ιδιότητες σκέδασης του εδάφους. Ο αλγόριθμος επέτρεψε την διόρθωση σχεδόν όλων των ανιχνεύσιμων σφαλμάτων unwrapping στις δύο περιοχές μελέτης.

Οι Yunjun et al. (2019) πρότειναν μια νέα ροή εργασιών (και το λογισμικό MintPy) για την επεξεργασία InSAR χρονοσειρών. Η ροή εργασιών περιέχει: (i) την διόρθωση της ατμοσφαιρικής φάσης με την χρήση παγκόσμιων καιρικών μοντέλων ή τη σχέση φάσης - υψομέτρου, (ii) την επεξεργασία για την μείωση του θορύβου και την αφαίρεση θορυβωδών SAR λήψεων και (iii) τρεις μεθόδους για την διόρθωση ή τον αποκλεισμό σφαλμάτων του unwrapping, από τις οποίες μια μέθοδος αξιοποιεί τις ιδιότητες της φάσης κλεισίματος. Η ροή εργασιών εφαρμόστηκε στα ηφαίστεια του Γκαλαπάγκος χρησιμοποιώντας Sentinel-1 και ALOS-1 δεδομένα και αξιολόγησαν τα αποτελέσματα με ανεξάρτητες μετρήσεις από GPS.

Επιπλέον εφαρμογές της φάσης κλεισίματος, πέρα της διόρθωσης των σφαλμάτων της αποκατάστασης, έχουν εξεταστεί, όπως για παράδειγμα:

Οι Michaelides et al. (2019) πρότειναν έναν αλγόριθμο για την αξιοποίηση της φάσης κλεισίματος τριπλετών ώστε να υπολογιστεί η συνιστώσα της συμβολομετρικής φάσης που οφείλεται στην αποσυσχέτιση του σήματος. Εφάρμοσαν τον αλγόριθμο σε ένα σετ από ALOS SAR απεικονίσεις που καλύπτουν μια περιοχή του Central Valley στην Καλιφόρνια και απόδειξαν ότι η αποσυσχέτιση της φάσης που υπολόγισαν ήταν παρόμοια με την θεωρητική τιμή της και ότι τα αποτελέσματα της αποκατάστασης της φάσης βελτιώθηκαν μετά την αφαίρεση της συνιστώσας της αποσυσχέτισης από την συμβολομετρική φάση.

Οι Eshqi Molan & Lu (2020) εξέτασαν αν η συνάφεια φάσης και η φάση κλεισίματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της υγρασίας του εδάφους και κατέληξαν ότι η συνάφεια φάσης και η φάση κλεισίματος δεν είναι κατάλληλα μέσα για τον υπολογισμό, καθώς η υγρασία της βλάστησης και η

επιφανειακή υγρασία της ατμόσφαιρας επηρεάζουν περισσότερο την συνάφεια και την αποσυσχέτιση, από την υγρασία του εδάφους.

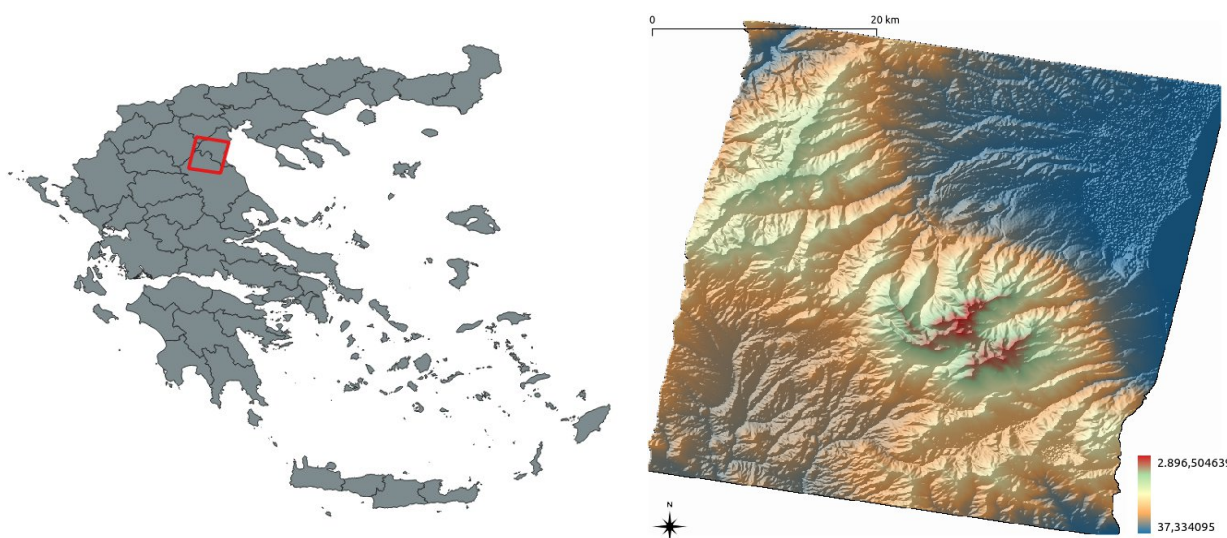
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Περιοχή Μελέτης, Δεδομένα, και Λογισμικά

3.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα μεταξύ των νομών Λαρίσης και Πιερίας ($40^{\circ} 23' 38''$ - $39^{\circ} 51' 26''$ N και $22^{\circ} 1' 25''$ - $22^{\circ} 37' 33''$ E). Η συνολική επιφάνεια που καλύπτει ανέρχεται στα 2,149,272 τ.χλμ.

Εντός της περιοχής μελέτης συναντάται το όρος Όλυμπος, το υψηλότερο βουνό της Ελλάδας. Η περιοχή επιλέχθηκε λόγω των μεγάλων υψομετρικών διαφορών που την χαρακτηρίζουν, καθώς η τροποσφαιρική φάση έχει σημαντικές αποκλίσεις πάνω από ορεινές περιοχές (Jolivet et al., 2011).



Εικόνα 7: Περιοχή Μελέτης

3.1.1. Μορφολογία

Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης καλύπτεται από ορεινούς όγκους με έντονη γεωμορφολογία, με εξαίρεση το Βόρειο-Ανατολικό τμήμα της περιοχής, το οποίο καλύπτεται από πεδινές και παραθαλάσσιες εκτάσεις. Οι παραθαλάσσιες εκτάσεις βρέχονται από το Αιγαίο Πέλαγος, πιο συγκεκριμένα την θάλασσα του Θερμαϊκού Κόλπου.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλες υψομετρικές διαφορές (ελάχιστο υψόμετρο στα 37 μ. και μέγιστο υψόμετρο στα 2,896 μ.). Συγκεκριμένα, στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα της περιοχής παρατηρούνται χαμηλά υψόμετρα (κάτω από 500 μ.), στο Νότιο-Δυτικό παρατηρούνται μέσα υψόμετρα (από 500 μ. έως 1000 μ.), ενώ τα υψηλότερα υψόμετρα (πάνω από 1000 μ.) παρατηρούνται στο Κεντρικό και Βόρειο-Δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

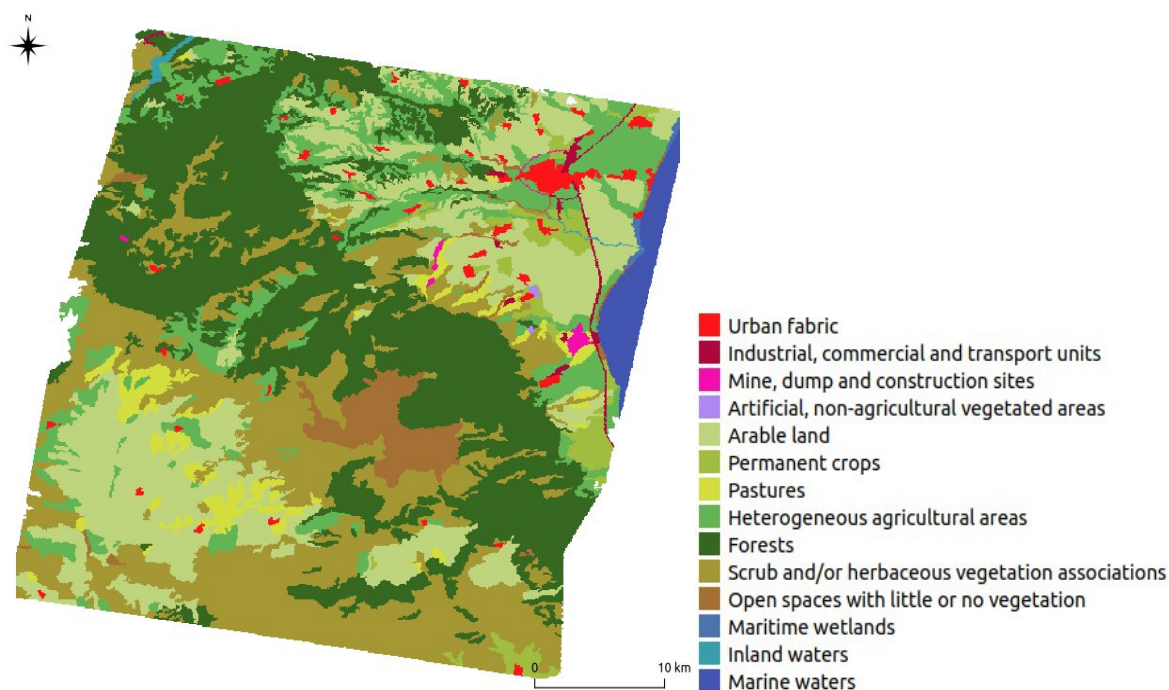
3.1.2. Χρήσεις/Καλύψεις Γης

Η περιοχή μελέτης καλύπτεται κυρίως από δασικές εκτάσεις και καλλιέργειες. Επιπλέον, παρατηρούνται οικισμοί κυρίως στα πεδινά τμήματα και στους πρόποδες του βουνού, με χαρακτηριστικότερη την πόλη της Κατερίνης (55 997 κάτοικοι, 50 μ.), η οποία βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την θάλασσα.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την χωρική βάση δεδομένων CORINE Land Cover (CLC) 2018 στην περιοχή υπάρχουν 13 κύριες κατηγορίες καλύψεων/χρήσης γης, οι οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Κατηγορίες Χρήσης/Κάλυψης Γης και τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης, σύμφωνα με το CLC 2018

Κατηγορία Χρήσης/Κάλυψης Γης	Ποσοστό Κάλυψης
Αστικός Ιστός	1.39%
Βιομηχανικές, εμπορικές, και μεταφορικές εγκαταστάσεις	0.52%
Ορυχεία, χωματερές και εργοτάξια	0.23%
Τεχνητές, μη αγροτικές εκτάσεις με βλάστηση	0.04%
Καλλιεργήσιμη Γη	20.18%
Μόνιμες Καλλιέργειες	2.53%
Βοσκοτόπια	2.98%
Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις	11.95%
Δασικές Εκτάσεις	31.78%
Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης	24.92%
Ανοικτοί Χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	3.14%
Θαλάσσιοι Υγρότοποι	0.13%
Υδατα σε χερσαία εδάφη	0.21%



Εικόνα 8: Χρήσεις/Καλύψεις Γης της Περιοχής Μελέτης Σύμφωνα με το Corine Land Cover 2018

Τέσσερις είναι οι κύριες καλύψεις/χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης: (i) **καλλιεργήσιμη γη** (20.18%) που συναντάται κατά κύριο λόγο σε χαμηλά και μεσαία υψόμετρα, (ii) **ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις** (11.95%) που συναντιούνται κυρίως σε μεσαία υψόμετρα, (iii) **δασικές εκτάσεις** (31.78%) που συναντιούνται κατά κύριο λόγο σε μεσαία και υψηλά υψόμετρα, και (iv) **θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης**(24.92%) που συναντιούνται κυρίως σε μεσαία και υψηλά υψόμετρα.

3.1.3. Κλίμα

Το κλίμα της περιοχής είναι Μεσογειακό: ήπιοι και υγροί χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Λόγω των υψομετρικών διαφορών, παρουσιάζεται μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων, στα πλαίσια του Μεσογειακού.

Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται δύο μετεωρολογικοί σταθμοί του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (www.meteo.gr): (i) ο Μετεωρολογικός σταθμός Ολύμπου (θέση Αγ. Δημήτριος) (881 m), ο οποίος βρίσκεται ανατολικά του ορεινού όγκου, και (ii) ο Μετεωρολογικός σταθμός Δίου Πιερίας (50μ.), ο οποίος βρίσκεται δυτικά του ορεινού όγκου. Ο σταθμός Ολύμπου ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα από τον μήνα Μάρτιο του 2016 και ο σταθμός Δίου Πιερίας ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα από τον μήνα Απρίλιο του 2007 (Lagouvardos et al, 2017).



Εικόνα 9: Μετεωρολογικοί Σταθμοί εντός της Περιοχής Μελέτης

Οι παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3, Πίνακας 4, Πίνακας 5) παρουσιάζουν τις μέσες τιμές της μηνιαίας βροχόπτωσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας για τους σταθμούς Ολύμπου και Δίου Πιερίας που υπολογίστηκαν από δεδομένα των ετών 2016 με 2019 και 2007 με 2019, αντίστοιχα. Οι τιμές προσφέρουν μια εικόνα για το κλίμα της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3: Βροχόπτωση (mm) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)

Σταθμός	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Σύνολο
Όλυμπος	70.5	65.5	80.7	32.8	112.7	80.6	57.8	60.3	28.9	26.1	87.8	50.7	720.1
Δίον Πιερίας	37.6	78.7	73	23.4	50.4	32.9	34.3	27.8	54.3	69.2	104.1	77.5	663.1

Πίνακας 4: Ελάχιστες Θερμοκρασίες (°C) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)

Σταθμός	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Ολύμπος	-13.7	-6	-3.9	-0.7	3.6	8.0	9.4	9.1	2.9	0.0	1.0	-8.8
Δίον Πιερίας	-6.0	-2.0	-0.4	4.6	9.4	13.9	16.2	16.5	11.0	5.6	1.8	-3.4

Πίνακας 5: Μέγιστες Θερμοκρασίες (°C) (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)

Σταθμός	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Ολύμπος	12.1	14.8	20.7	25.2	26.5	32.2	33.3	31.4	29.4	24.2	19.3	15.6
Δίον Πιερίας	17.4	20.0	22.4	26.6	31.8	37.2	37.8	37.9	33.6	27.6	23.1	19.1

Παρατηρείται ότι:

- Η μέση τιμή της ετήσιας βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη στις καταγραφές του σταθμού του Ολύμπου, αλλά για τους μήνες Οκτώβριος και Νοέμβριος (μήνες που έγιναν οι λήψεις των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν) ο Σταθμός Δίον Πιερίας φαίνεται να έχει μεγαλύτερη βροχόπτωση.
- Οι ελάχιστες θερμοκρασίες στον Σταθμό του Ολύμπου είναι χαμηλότερες από αυτές του σταθμού στο Δίον Πιερίας. Ο μέσος όρος των διαφορών είναι -5.5 °C
- Οι μέγιστες θερμοκρασίες στον Σταθμό του Ολύμπου είναι χαμηλότερες από αυτές του σταθμού στο Δίον Πιερίας. Ο μέσος όρος των διαφορών είναι -4.1 °C

Τα δεδομένα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών των δύο σταθμών, γεγονός που φανερώνει διαφορές μεταξύ του κλίματος των ορεινών και πεδινών περιοχών εντός της περιοχής μελέτης. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται κυρίως στην υψομετρική διαφορά αλλά επίσης και στην επίδραση των μεγάλων ορεινών όγκων, στην επίδραση των θαλάσσιων όγκων που βρέχουν το Βόρειο-Ανατολικό τμήμα της περιοχής, καθώς και την έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (αστικός ιστός και καλλιέργειες) που παίρνει μέρος στα χαμηλότερα υψόμετρα.

Επιπλέον δεδομένα μεγαλύτερης χρονικής ανάλυσης (ανά 10 λεπτά) συλλέχθηκαν για τον άνεμο και την βροχόπτωση, με σκοπό να μελετηθούν οι μεταβλητές αυτές την ακριβή ώρα που πραγματοποιήθηκαν οι λήψεις των εικόνων. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 6) παρουσιάζει τα δεδομένα βροχόπτωσης και ανέμου (ταχύτητα και διεύθυνση) που κατέγραψαν οι σταθμοί την στιγμή της λήψης των εικόνων, καθώς και την ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε την ημέρα λήψης.

Έντονα καιρικά φαινόμενα τη στιγμή λήψης των εικόνων (όπως άνεμος, βροχόπτωση και παγετός) έχουν την ικανότητα να αλλάξουν τις οπισθοσκοπεδαστικές ιδιότητες των επιφανειών και να προσδώσουν μεταβολές στην τελική εικόνα της φάσης. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να μελετηθεί η διαφορά των καιρικών φαινομένων μεταξύ των εικόνων του συμβολομετρικού ζεύγους και η επίδραση αυτής στην φάση του συμβολογράμματος (**χρονική αποσυσχέτιση**) και της φάσης της τροπόσφαιρας.

Κεφάλαιο 3: Περιοχή Μελέτης, Δεδομένα, και Λογισμικά

Πίνακας 6: Ένταση και διεύθυνση ανέμου και βροχόπτωση για την στιγμή λήψης των εικόνων, όπως και η χαμηλότερη θερμοκρασία της ημέρας λήψης των εικόνων, όπως καταγράφηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - www.meteo.gr)

Ημερομηνία	Δίον Πιερίας				Όλυμπος			
	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Διεύθυνση Ανέμου	Χαμηλότερη Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (mm)	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Διεύθυνση Ανέμου	Χαμηλότερη Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (mm)
30/9/2016	4.8	W	11.2	0.0	3.2	SSW	4.7	0.2
12/10/2016	4.8	W	12.5	0.0	11.3	SW	7.3	0.0
24/10/2016	1.6	SSW	13.1	0.0	0	---	10.1	0.0
5/11/2016	6.4	WNW	9.3	0.0	1.6	SW	7.7	0.0
17/11/2016	4.8	WNW	0.6	0.0	1.6	SW	-2.5	0.0
29/11/2016	4.8	NNE	6.7	0.0	14.5	NE	-2.8	0.0

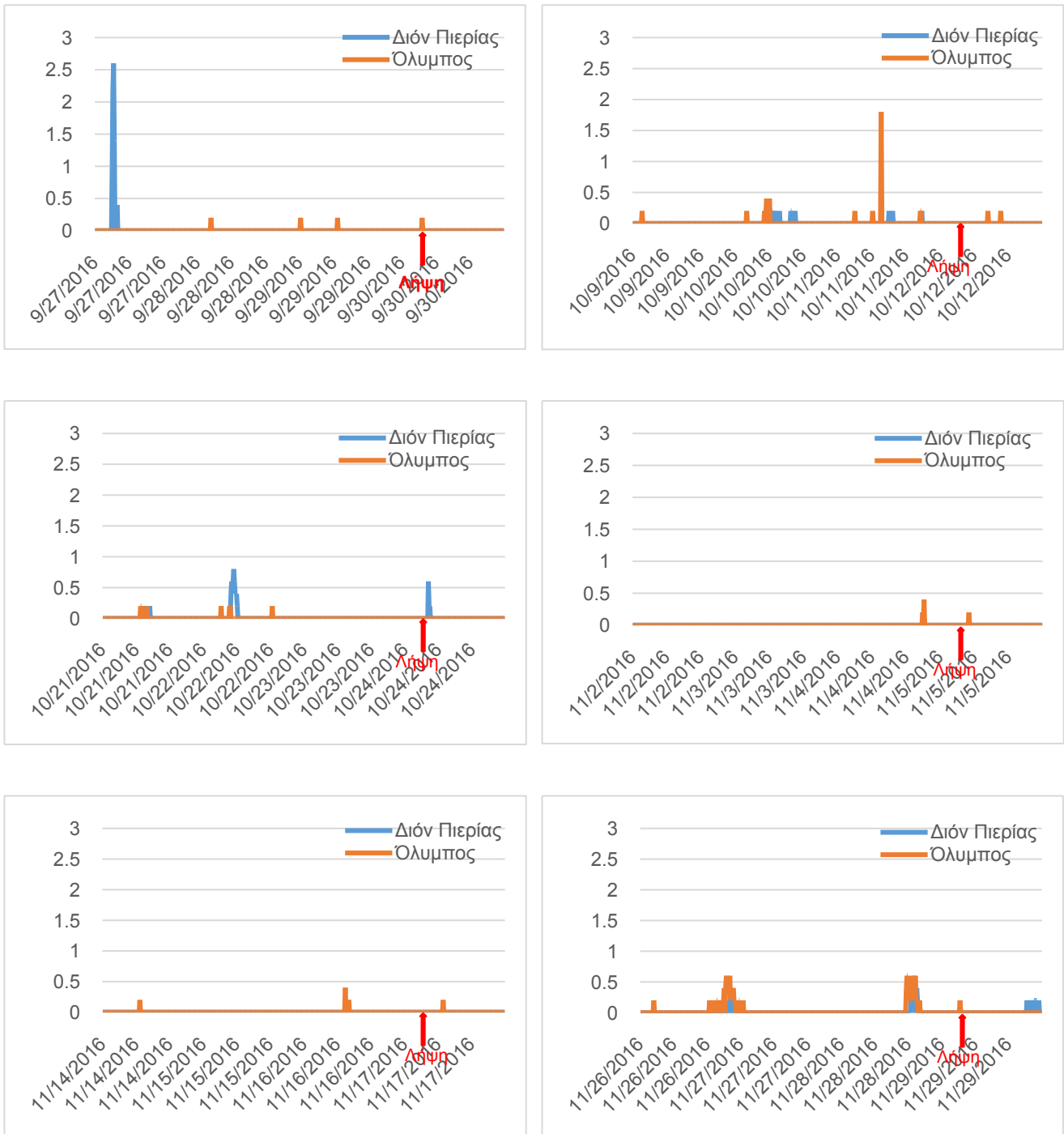
Έντονα καιρικά φαινόμενα παρατηρούνται στον Σταθμό Όλυμπος (ορεινές περιοχές):

- Στις 30/09/2016 την στιγμή λήψης, σημειώνεται μικρή βροχόπτωση της τάξης των 0.2 mm για το δεκάλεπτο 04:30-04:40.
- Στις 12/10/2016 την στιγμή της λήψης, λαμβάνουν χώρα έντονα φαινόμενα ανέμων, της τάξης των 11.3 km/h με διεύθυνση Νότιο-Δυτική.
- Στις 17/11/2016, παρουσιάζονται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-2.5°C) που υποδηλώνουν την δημιουργία παγετού (πάχνης).
- Στις 29/11/2016, παρουσιάζονται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-2.8°C) που υποδηλώνουν τη δημιουργία παγετού (πάχνης) και την στιγμή της λήψης, λαμβάνουν χώρα έντονα φαινόμενα ανέμων, της τάξης των 14.5 km/h με διεύθυνση Βόρειο-Ανατολική.

Επιπλέον, η ανάλυση της βροχόπτωσης πρότερα της λήψης κάθε εικόνας, μπορεί δώσει περαιτέρω πληροφορίες για τη μεταβολή στις ιδιότητες των σκεδαστών του εδάφους (η βροχή αυξάνει την υγρασία του εδάφους), με αποτέλεσμα να παρατηρείται χρονική αποσυσχέτιση στα δεδομένα.

Τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 1) φανερώνουν σημαντική ανομοιογένεια στην ένταση και την συχνότητα της βροχής που καταγράφουν οι δύο σταθμοί της περιοχής. Τα σημαντικότερα γεγονότα βροχόπτωσης φαίνεται τα λαμβάνουν χώρα προηγουμένως της 12/10/2016 και της 29/11/2016.

Σχήμα 3: Βροχόπτωση (mm) τις ημέρες πριν την λήψης της κάθε εικόνας .



3.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.2.1. Sentinel-1 Απεικονίσεις

Για την παραγωγή των συμβολογραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν Sentinel 1 Level-1 Single Look Complex (SLC) προϊόντα.

Ο Sentinel-1 λειτουργεί στο κανάλι C (~5.5465763 cm) το οποίο είναι κατάλληλο για εφαρμογές χαρτογράφησης, ανίχνευσης μεταβολών, παρακολούθησης περιοχών με λίγη ή μέτρια βλάστηση, κ.α.

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 σε κάθε διάσταση χρησιμοποιώντας το πλήρες διαθέσιμο εύρος ζώνης σήματος. Οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες χρησιμοποιώντας δεδομένα τροχιάς και στάσης από τον δορυφόρο (Vincent et al.,2020).

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αποκτήθηκαν σε λειτουργία Interferometric Wide (IW) Swath. Η λειτουργία IW είναι η κύρια μέθοδος λήψης δεδομένων επί της ξηράς και τα δεδομένα αποκτούνται με πλάτος λήψης 250 χλμ. και χωρική ανάλυση 5 μ. επί 20 μ. (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). Κάθε εικόνα υπο-λωρίδας αποτελείται από μια σειρά ριπών (bursts), όπου κάθε ριπή έχει υποστεί επεξεργασία ως ξεχωριστή εικόνα SLC (Vincent et al.,2020).

Χρησιμοποιήθηκαν 6 απεικονίσεις της ίδιας τροχιάς (απόλυτη τροχιά: 80).

Πίνακας 7: Sentinel-1 Εικόνες

A/A Εικόνας	Όνομα αρχείου	Ημερομηνία Λήψης	Ώρα Λήψης
Εικόνα 1	S1A_IW_SLC__1SDV_20160930T043907_20160930T043935_013277_015262_CA2F.zip	20160930	04:39
Εικόνα 2	S1A_IW_SLC__1SDV_20161012T043907_20161012T043935_013452_0157EA_BB58.zip	20161012	04:39
Εικόνα 3	S1A_IW_SLC__1SDV_20161024T043907_20161024T043935_013627_015D61_9A70.zip	20161024	04:39
Εικόνα 4	S1A_IW_SLC__1SDV_20161105T043907_20161105T043934_013802_0162DB_2D90.zip	20161105	04:39
Εικόνα 5	S1A_IW_SLC__1SDV_20161117T043906_20161117T043934_013977_016847_3FB7.zip	20161117	04:39
Εικόνα 6	S1A_IW_SLC__1SDV_20161129T043906_20161129T043934_014152_016DAC_8572.zip	20161129	04:39

3.2.2. ERA5 Δεδομένα

Το ERA5 είναι η πέμπτη γενιά ατμοσφαιρικής αναδρομικής ανάλυσης (reanalysis) του παγκόσμιου κλίματος. Αναλύει, δηλαδή τεράστιες ποσότητες ιστορικών παρατηρήσεων για την παραγωγή εκτιμήσεων του παγκόσμιου κλίματος, χρησιμοποιώντας προχωρημένα συστήματα μοντελοποίησης και αφομοίωσης δεδομένων (Hersbach et al.,2020).

Τα κλιματικά δεδομένα του ERA5 παράγονται από την υπηρεσία Copernicus για την κλιματική αλλαγή (C3S) στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (ECMWF)⁴, το οποίο είναι υπεύθυνο για την C3S για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Το ERA5 προσφέρει ωριαίες εκτιμήσεις ενός μεγάλου αριθμού ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων κλιματικών μεταβλητών. Τα δεδομένα έχουν παγκόσμια κάλυψη με χωρική ανάλυση 30 χλμ. επί 30 χλμ. και αναλύουν την ατμόσφαιρα σε 137 κάθετα επίπεδα - από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και 80 χλμ. σε ύψος. Τα δεδομένα καλύπτουν τη χρονική περίοδο από τον Ιανουάριο του 1950 μέχρι και σήμερα (Hersbach et al.,2020).

Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής φάσης.

3.2.3. SRTM DEM

Στον υπολογισμό της τροποσφαιρικής φάσης, όπως επίσης και στην παραγωγή των συμβολογραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (ΨΜΕ) SRTM 1 Arc Second.

Η αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) πέταξε τον Φεβρουάριο του 2000 με σκοπό την απόκτηση δεδομένων για την παραγωγή ενός υψηλής ανάλυσης ΨΜΕ με σχεδόν παγκόσμια κάλυψη. Το μοντέλο SRTM 1 Arc Second κυκλοφόρησε το 2015 και προσφέρει δεδομένα μεταξύ των περιοχών με 60° Β γεωγραφικό πλάτος και 56° Ν γεωγραφικό πλάτος (περίπου 80% παγκόσμια κάλυψη), με χωρική ανάλυση 1" επί 1" (περίπου 30 μ. επί 30 μ.) και απόλυτη κατακόρυφη ακρίβεια (κατά το υψόμετρο) 16 μ. (Farr et al., 2007).

3.2.4. Corine Land Cover 2018

Ο χάρτης κάλυψης/χρήσης γης CORINE Land Cover (CLC)⁵ ξεκίνησε το 1985 και έχει ενημερωθεί εκ τότε το 2000, 2006, 2012, και 2018. Πραγματοποιείται από διάφορες εθνικές ομάδες, κάτω από την διαχείριση και τον έλεγχο ποιότητας του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΕΑ)⁶.

⁴ <https://www.ecmwf.int/>

⁵ <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

⁶ <https://www.eea.europa.eu/>

Ο χάρτης αποτελείται από 44 κατηγορίες χρήσεων γης και χρησιμοποιεί, για τα γραμμικά στοιχεία που χαρτογραφούνται, ως ελάχιστη μονάδα χαρτογράφησης (MMU) τα 25 εκτάρια και ελάχιστη μονάδα πλάτους τα 100 μ. Η θεματική ακρίβεια ξεπερνάει το 85%, ενώ η γεωμετρική ακρίβεια είναι μεγαλύτερη των 100 μ..

Για την παραγωγή του χάρτη χρησιμοποιούνται ορθο-διορθωμένες δορυφορικές εικόνες (στην έκδοση 2018 χρησιμοποιούνται Sentinel-2 και Landsat-8 για την κάλυψη των κενών) υψηλής χωρικής ανάλυσης, που προσφέρουν την γεωμετρική και θεματική βάση για την χαρτογράφηση, και επίγεια δεδομένα (τοπογραφικοί χάρτες, ορθοφωτογραφίες, επίγεια γεωδαιτικά δεδομένα), που λειτουργούν ως σημαντικές επικουρικές πληροφορίες. Η κύρια μέθοδος ταξινόμησης είναι η φωτοερμηνεία, με κάποιες εξαιρέσεις όπου ημι-αυτόματες τεχνικές χρησιμοποιούνται (Büttner & Kosztra, 2017).

3.3. Λογισμικά

Για την παραγωγή των συμβολογραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAP⁷ (SeNtinel Applications Platform), σε συνεργασία με το SNAPhu⁸ (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) για την αποκατάσταση της φάσης.

Για την επεξεργασία των συμβολογραμμάτων, την σύνθεση της Τροποσφαιρικής φάσης, δημιουργία διαγραμμάτων και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων, κτλ. χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python 3⁹ με την συνδρομή εξειδικευμένων βιβλιοθηκών (numpy, scipy, gdal, matplotlib, netcdf4, κ.α.)

Τέλος, το λογισμικό QGIS¹⁰ χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των διανυσματικών χωρικών δεδομένων και την παραγωγή χαρτών.

⁷ <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>

⁸ <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>

⁹ <https://www.python.org/>

¹⁰ <https://www.qgis.org/en/site/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μεθοδολογία

4.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 101.3, για την παραγωγή συμβολογραμμάτων αξιοποιούνται οι εικόνες της φάσης από δύο SAR απεικονίσεις (**συμβολομετρικό ζεύγος**). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 6 Sentinel-1 απεικονίσεις της ίδιας τροχιάς και παράχθηκαν συμβολογράμματα για όλα τα πιθανά συμβολομετρικά ζεύγη, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2/Πίνακας 8: Συμβολομετρικά Ζεύγη Πίνακας 8):

Πίνακας 8: Συμβολομετρικά Ζεύγη

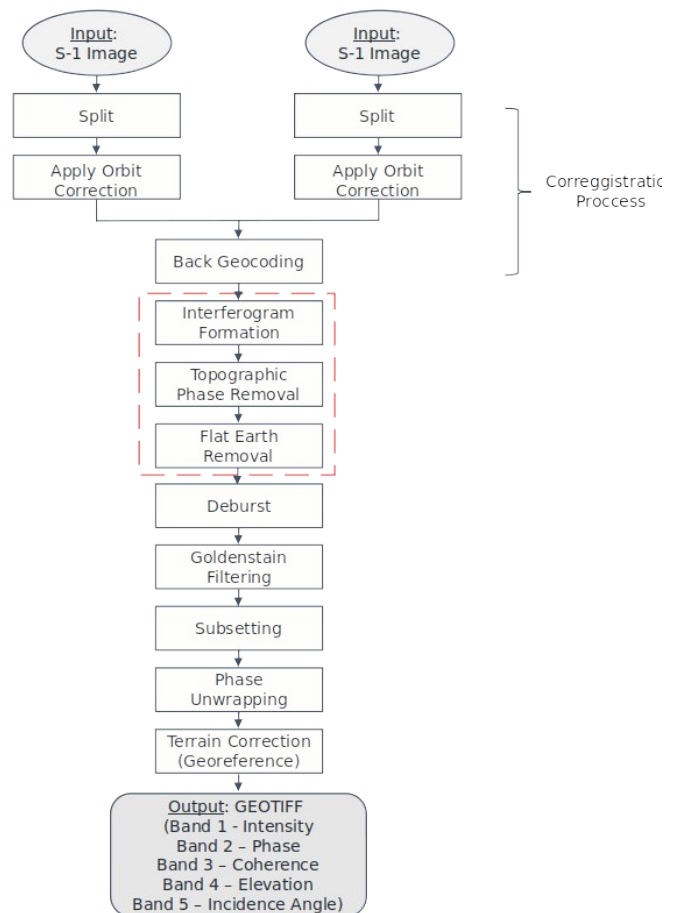
slave master	20160930	20161012	20161024	20161105	20161117	20161129
20160930		✓	✓	✓	✓	✓
20161012			✓	✓	✓	✓
20161024				✓	✓	✓
20161105					✓	✓
20161117						✓
20161129						

Η διαδικασία, που υλοποιήθηκε στο λογισμικό SNAP (βλ. 3.3), απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα:

- **Συμπροσαρμογή απεικονίσεων (coregistration)**

Πριν την εκτέλεση του αλγόριθμου της συμπροσαρμογής γίνονται: (i) η **Διαίρεση των Απεικονίσεων (TOPS-Split)**, δηλαδή επιλέγονται από την αρχική εικόνα τα bursts και το κανάλι πόλωσης (VV) που απαιτούνται για την ανάλυση, και (ii) η **εφαρμογή του αρχείου τροχιάς** που περιέχει τις πληροφορίες για τη θέση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης.

Για την συμπροσαρμογή των δύο εικόνων η μία επιλέγεται ως master και η άλλη ως slave. Τα εικονοστοιχεία της slave εικόνας μετακινούνται κατάλληλα για να ευθυγραμμιστούν με αυτά της master, με ακρίβεια μικρότερη του εικονοστοιχείου (τουλάχιστον 1/8 του εικονοστοιχείου). Η συμπροσαρμογή διασφαλίζει ότι κάθε μοναδιαία επιφάνεια εδάφους απεικονίζεται στο ίδιο pixel τόσο στην master όσο και στην slave εικόνα.



Σχήμα 4: Διαδικασία Παραγωγής Συμβολογράμματος στο

- **Παραγωγή διαγράμματος κροσσών συμβολής (interferogram formation)**

Το διάγραμμα κροσσών συμβολής δημιουργείται με τον πολλαπλασιασμό της μιας μιγαδικής απεικόνισης με την συζυγή μιγαδική της άλλης. Με τον τρόπο αυτό, το κάθε εικονοστοιχείο του διαγράμματος των κροσσών συμβολής αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των δυο απεικονίσεων. Οι γραμμές (κροσσοί) που παρουσιάζονται στο διάγραμμα κροσσών συμβολής, είναι ισοφασικές καμπύλες: κάθε καμπύλη περιέχει μια τιμή συμβολομετρικής φάσης η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[-\pi, \pi]$.

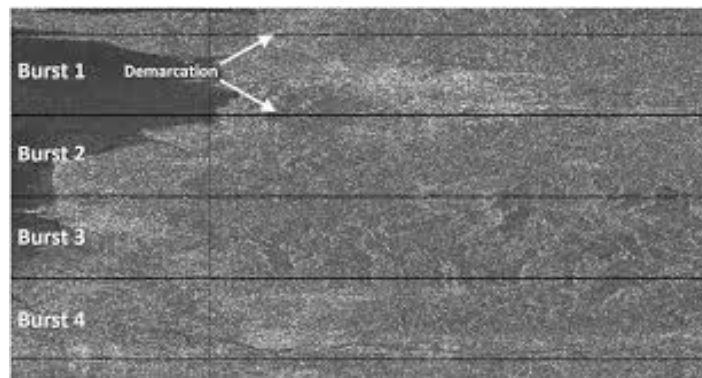
Ταυτόχρονα, στο ίδιο βήμα, γίνεται αφαίρεση:

α) της φάσης της τοπογραφίας, που περιέχεται στην φάση του συμβολογράμματος και σχετίζεται με την τοπογραφία (υψόμετρα) και πραγματοποιείται με τη χρήση του SRTM DEM.

β) της φάσης της επίπεδης γης, δηλαδή η φάση που περιέχεται στο συμβολομετρικό σήμα λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας αναφοράς. Η φάση της επίπεδης γης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες τροχιάς του δορυφόρου και των μεταδεδομένων της εικόνας.

- **Deburst**

Η εικόνα επεξεργάζεται για να ενωθούν μεταξύ τους όλα τα bursts.



Σχήμα 5: Εικόνα έντασης όπου φαίνονται τα ξεχωριστά bursts (Πηγή: Alaska Satellite Facility)

- **Φιλτράρισμα διαγράμματος κροσσών συμβολής (Filtering)**

Για την αφαίρεση του θορύβου της εικόνας της συμβολομετρικής φάσης και τη βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών εφαρμόζεται το φίλτρο **Goldstein**.

- **Κόψιμο της εικόνας**

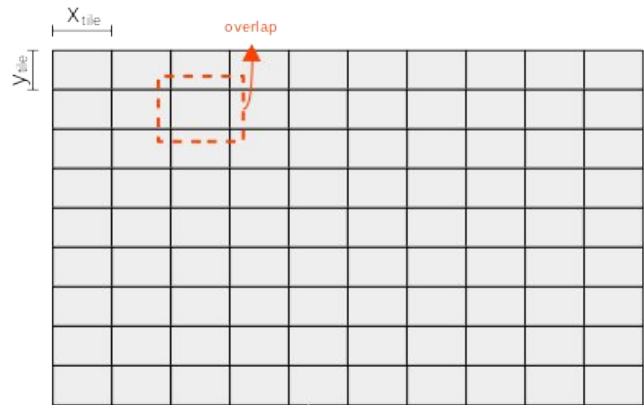
Η εικόνα κόβεται στα όρια της περιοχής μελέτης.

- **Αποκατάσταση Φάσης (Phase Unwrapping)**

Σκοπός της διαδικασίας της αποκατάστασης φάσης (phase unwrapping) είναι η ανάκτηση της πληροφορίας του αριθμού των ακέραιων κύκλων έτσι ώστε η τιμή φάσης να μην είναι πια περιορισμένη στο όριο $[-\pi, \pi)$ και να μπορεί να έχει τις πραγματικές της τιμές κάτω από το $-\pi$ και πέρα από το π .

Η διαδικασία εκτελείται από το πρόγραμμα snaphu (Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping).

Ο snaphu είναι ένας αλγόριθμος ροής δικτύου στατιστικού κόστους για την αποκατάσταση φάσης. Λαμβάνοντας υπόψη ένα συμβολόγραμμα εισόδου και άλλες παρατηρήσεις, ο snaphu προσπαθεί να υπολογίσει τις αντίστοιχες λύσεις της “ατύλιχτης” φάσης, οι οποίες έχουν τη μέγιστη a posteriori πιθανότητα να συμβούν. Ο αλγόριθμος χωρίζει ένα μεγάλο συμβολόγραμμα σε μικρότερα πλακίδια (tiles) τα οποία λύνονται (“ξετυλίγονται”) ξεχωριστά και μετά ξαναχωρίζονται σε ξεχωριστές, αξιόπιστες περιοχές ακανόνιστου σχήματος. Στη συνέχεια, οι περιοχές ενώνονται σε ένα ολόκληρο συμβολόγραμμα, όπου η διαφορά στη φάση μεταξύ των περιοχών υπολογίζεται με την επίλυση ενός δευτερεύοντος πρόβληματος βελτιστοποίησης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της a posteriori πιθανότητας της τελικής λύσης (Chen & Zebker, 2001; Chen & Zebker, 2002).



Σχήμα 6: Ο snaphu χωρίζει την εικόνα σε πλακίδια (tiles), όπου το μέγεθος και επικάλυψη (overlap) τους ορίζεται από τον χρήστη.

- **Γεωμετρική Διόρθωση - Γεωαναφορά (Terrain Correction)**

Η εικόνα διορθώνεται από τις γεωμετρικές παραμορφώσεις που οδηγούν σε σφάλματα στην γεωαναφορά. Τα εικονοστοιχεία μετακινούνται στη μεταξύ τους σωστή χωρική σχέση με την βοήθεια του DEM (SRTM DEM) και προβάλλονται στο γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων WGS 84.

Ταυτόχρονα, λαμβάνει μέρος και το Multilooking, κατά το οποίο εφαρμόζεται ένας χωρικός μέσος όρος σε γειτονικά εικονοστοιχεία με αποτέλεσμα η εικόνα να αποκτήσει σωστές αναλογίες.

4.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΚΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η παραγωγή της τροποσφαιρικής φάσης πραγματοποιήθηκε με τέσσερις μεθόδους:

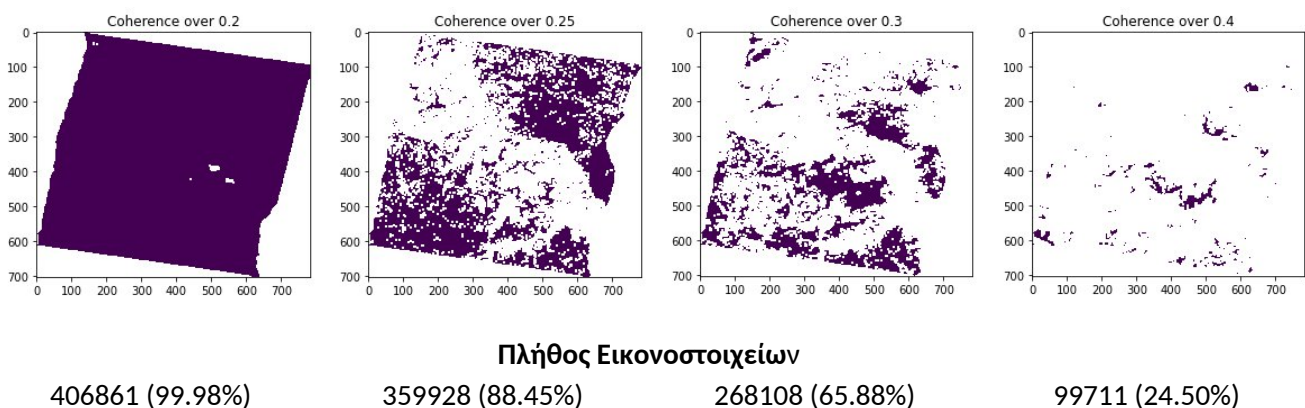
- Κατευθείαν από την συμβολομετρική φάση, με τη γραμμική συσχέτιση Φάσης - Υψομέτρου (**Linear**)
- Με την χρήση του Αριθμητικού Καιρικού Μοντέλου ERA5 (**ERA5**)
- Με την χρήση της διαδικτυακής υπηρεσίας GACOS, το οποίο χρησιμοποιεί δεδομένα του Αριθμητικού Καιρικού Μοντέλου HRES-ECMWF και μετρήσεις GPS για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής φάσης (**GACOS**)
- Με την χρήση του λογισμικού PyAPS, το οποίο βασίζεται σε δεδομένα ERA5 για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής φάσης (**PyAPS**)

4.2.1. Μέθοδος Γραμμικής Συσχέτισης Φάσης - Υψομέτρου

4.2.1.1. Ανάλυση και Προεπεξεργασία Δεδομένων

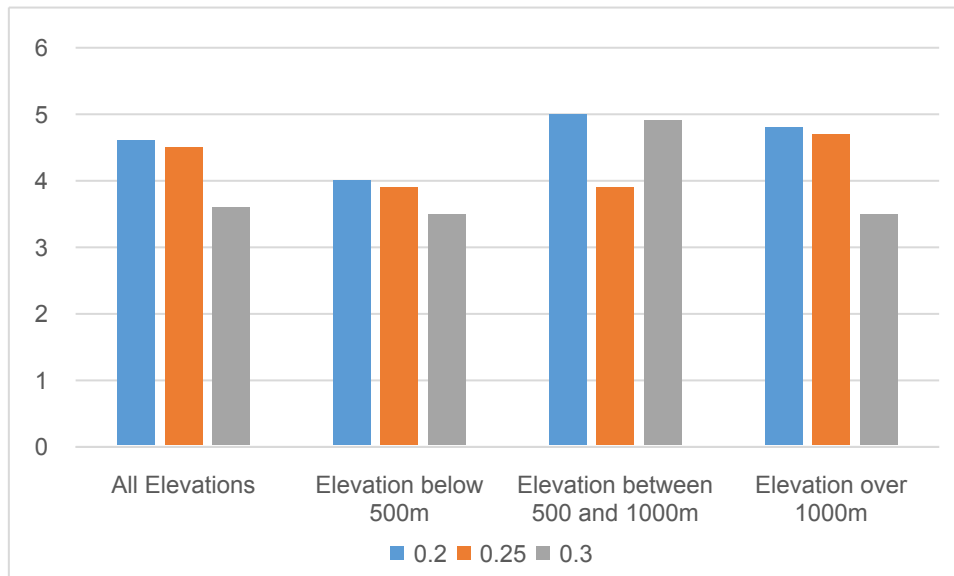
Πριν τον υπολογισμό της Ατμοσφαιρικής Φάσης και για την ορθή εφαρμογή της μεθόδου, έγινε ανάλυση των δεδομένων των 15 συμβολογραμμάτων για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων.

Σε πρώτη φάση, αφαιρέθηκαν τα εικονοστοιχεία των απεικονίσεων με χαμηλή συνάφεια φάσης (**coherence**), τα οποία προσδίδουν αβεβαιότητες στην ανάλυση. Ως εκ τούτου, για τα 16 συμβολογράμματα και για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίστηκε η μέση τιμή συνάφειας. Στη συνέχεια επιλέχθηκε μία τιμή (κατώφλι) στην απεικόνιση της μέσης τιμής συνάφειας. Για την επιλογή του κατωφλίου που χρησιμοποιήθηκε, ελέγχθηκε το πλήθος και η κατανομή των εικονοστοιχείων στην απεικόνιση της μέσης τιμής συνάφειας, καθώς θα έπρεπε να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός εικονοστοιχείων κατανεμημένα σε όλη την εικόνα για κάθε κατώφλι. Τα κατώφλια που ελέγχθηκαν ήταν 0.2, 0.25, 0.3, και 0.4.



Σχήμα 7: Πλήθος και Κατανομή Εικονοστοιχείων στην εικόνα της Μέσης τιμής συνάφειας, για τιμές συνάφειας μεγαλύτερες από 0.2, 0.25, 0.3, και 0.4 αντίστοιχα

Για τα κατώφλια 0.2, 0.25, και 0.3 παρατηρήθηκε ικανοποιητικό πλήθος και κατανομή εικονοστοιχείων στο εύρος των απεικονίσεων. Για τα 3 αυτά κατώφλια υπολογίστηκαν οι Φάσεις Κλεισίματος συνολικά και ανά κατηγορία υψομέτρου (<500, 500-1000, >1000) και επιλέχθηκε το κατώφλι 0.3, το οποίο παρήγαγε τα καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 5).



Σχήμα 8: Φάση Κλεισίματος ανά Κατώφλι και ανά κατηγορία Υψομέτρου.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν καμπύλες Φάσης-Υψομέτρου για κάθε συμβολόγραμμα. Για την κατασκευή των καμπύλων, σε κάθε σημείο (εικονοστοιχείο) της εικόνας δόθηκε ένα ζεύγος συντεταγμένων (x,y), όπου x το υψόμετρο του σημείου (από το SRTM DEM) και y η φάση του. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση τιμή φάσης όλων των σημείων με το ίδιο υψόμετρο, με βήμα το 1 μέτρο.

Οι καμπύλες (Σχήμα 9α) φαίνεται να πλησιάζουν με μεγάλη επιτυχία την ευθεία με κάποιες αποκλίσεις. Για να μελετηθούν περαιτέρω τα χαρακτηριστικά της καμπύλης υπολογίστηκαν, ανά 100 μ. υψομέτρου, οι κλίσεις των ενδιάμεσων ευθειών και τα σχετικά διαγράμματα κλίσης-υψομέτρου παρουσιάζονται στο διάγραμμα (β) του Σχήματος 9.

Σε πολλά από τα διαγράμματα φαίνεται να υπάρχει μια σημαντική αλλαγή στην κλίση της καμπύλης πριν και μετά τα 500 μ. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στις διαφοροποιήσεις της ατμόσφαιρας στα πεδινά και ορεινά τμήματα (λόγω υψομέτρου, υγρασίας, ανθρώπινης δραστηριότητας, κλπ.). Παρόμοια συμπεράσματα που φανερώνουν την ανομοιογένεια του κλίματος εντός της περιοχής μελέτης αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 3.1.3), όπου οι μετρήσεις των δύο μετεωρολογικών σταθμών φαίνεται να αποκλίνουν σημαντικά. Επίσης, η έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. καύσιμο χόρτων), στις αστικές και αγροτικές εκτάσεις που χαρακτηρίζουν την πεδινή περιοχή, μπορεί να επηρεάζει την ατμόσφαιρα της περιοχής και να εισάγει σφάλματα (**αποσυσχέτισης**) στις μετρήσεις.

4.2.1.2. Κατασκευή Βέλτιστης Ευθείας

Σε πολλά από τα διαγράμματα, όπως σημειώνεται και παραπάνω, παρατηρούνται διαφορές στην κλίση της καμπύλης μεταξύ των πεδινών και ορεινών υψομέτρων. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η τροπόσφαιρα δεν μπορεί πάντα να περιγραφεί από μόνο μία ευθεία σε μία περιοχή μελέτης, καθώς το κλίμα διαφοροποιείται μεταξύ ορεινών και πεδινών περιοχών. Επομένως, θεωρήθηκε ορθότερο να περιγραφεί η τροπόσφαιρα από δύο ευθείες.

Για την εύρεση του υψόμετρου στο οποίο γίνεται ο διαχωρισμός των ευθειών, και με σκοπό την αυτοματοποίηση της μεθόδου, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος αυτόματου εντοπισμού του υψόμετρου αυτού. Ο αλγόριθμος, αρχικά, υπολογίζει τις μέσες τιμές φάσης ανά 100 μ. και ορίζει σημεία (x, y), όπου x η μέση τιμή φάσης ανά 100 μ και y το υψόμετρο (100 μ., 200 μ., 300 μ., ...). Στη συνέχεια, εντοπίζει το σημείο (**σημείο διαχωρισμού**) στο οποίο ελαχιστοποιείται το άθροισμα των συντελεστών Pearson των δύο ευθειών που ορίζονται από το πρώτο σημείο, το σημείο διαχωρισμού και το τελευταίο σημείο.

Τέλος, για κάθε συμβολόγραμμα, υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων 2 ευθείες (μία πριν και μία μετά το σημείο διαχωρισμού) από τα σημεία των αρχικών καμπυλών (καμπύλες με βήμα 1 μέτρο).

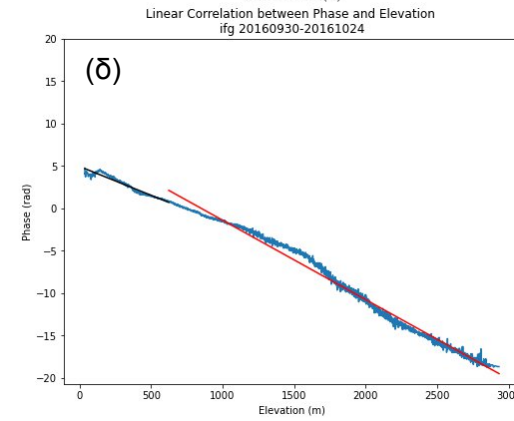
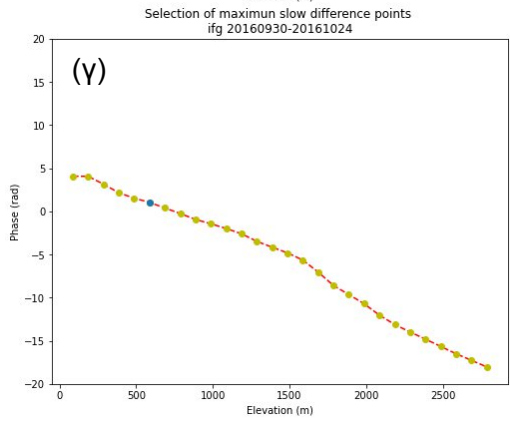
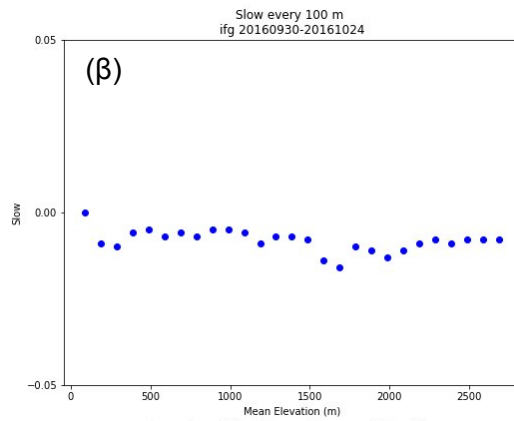
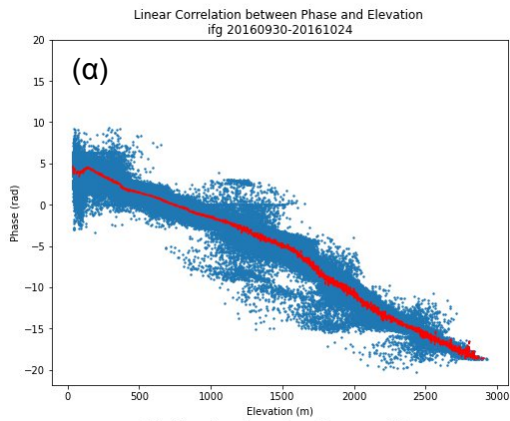
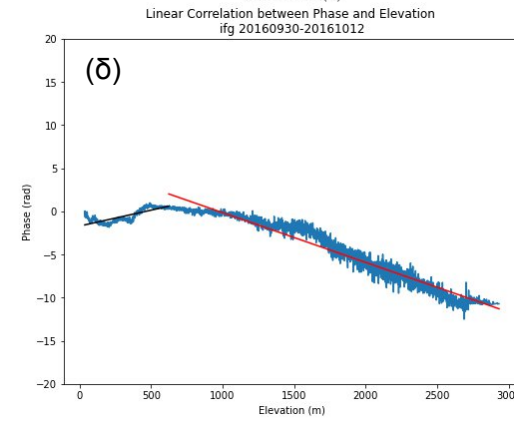
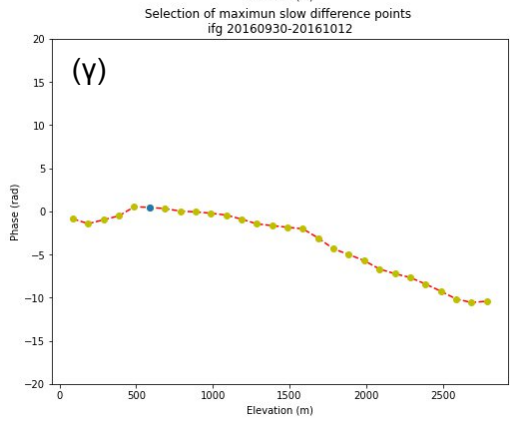
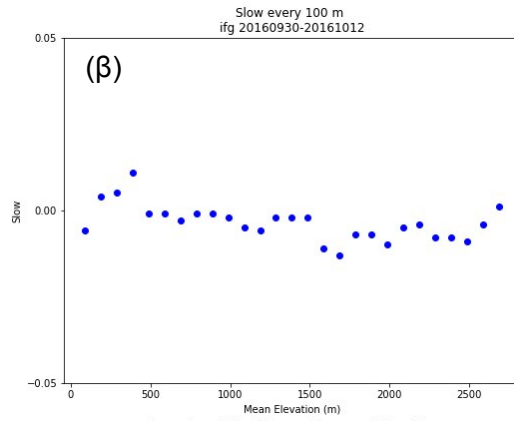
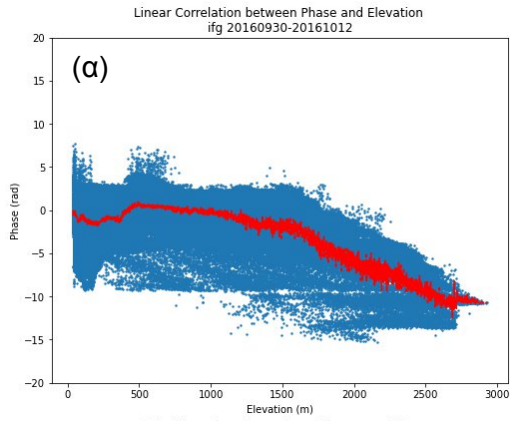
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του εντοπισμού του σημείου διαχωρισμού (Σχήμα 9γ) και οι βέλτιστες ευθείες (Σχήμα 9δ) που υπολογίστηκαν για κάθε συμβολόγραμμα.

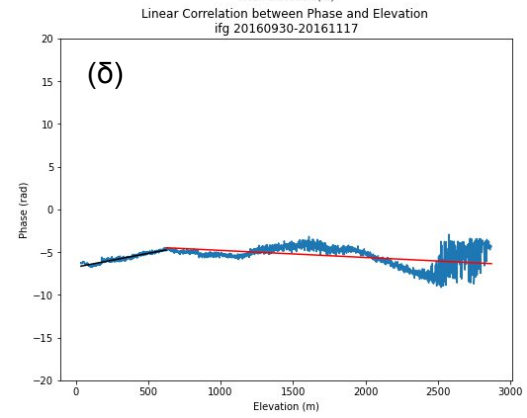
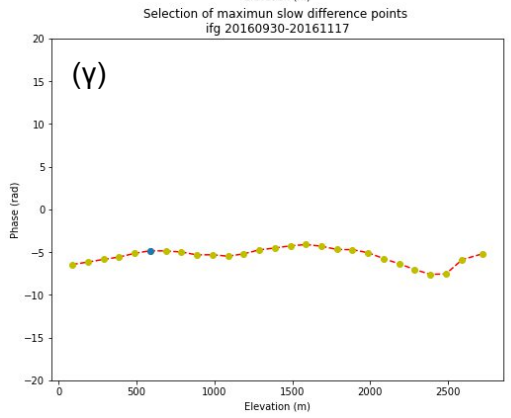
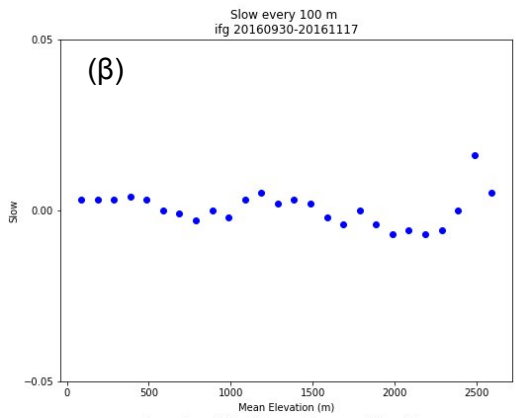
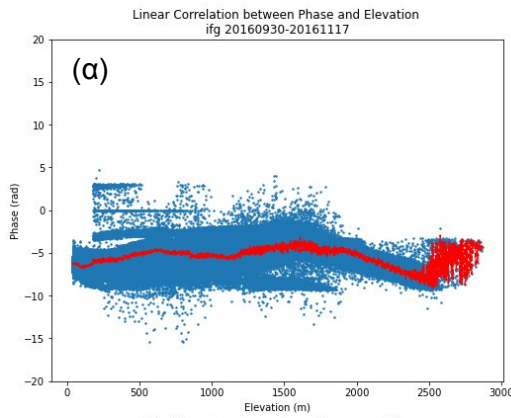
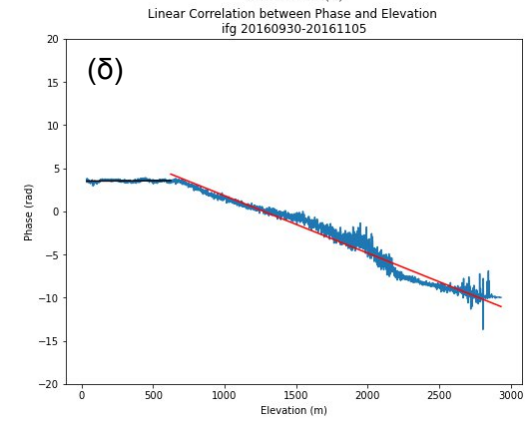
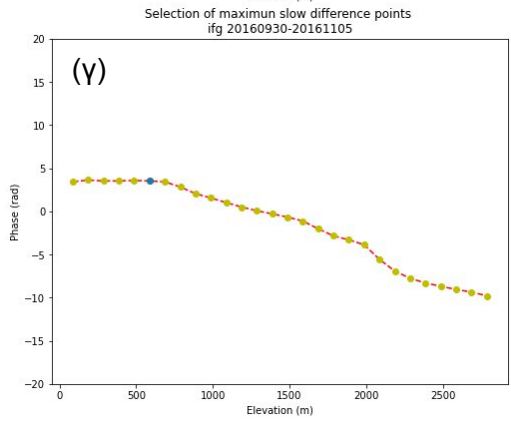
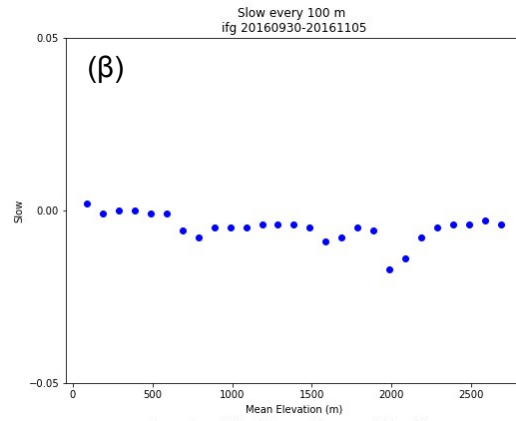
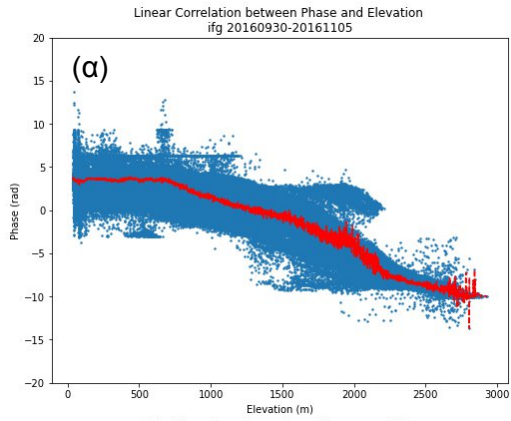
4.2.1.3. Υπολογισμός Τροποσφαιρικής Φάσης

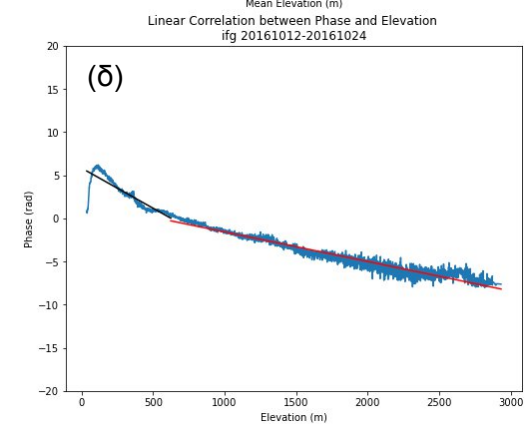
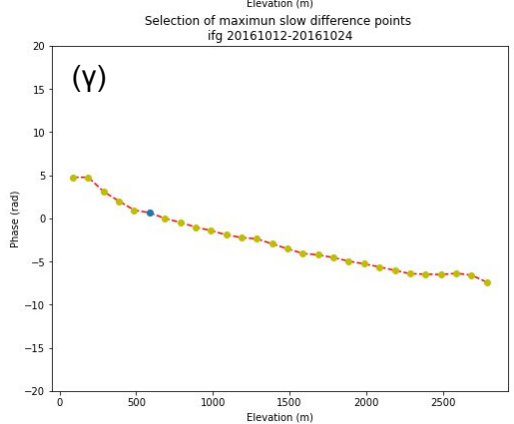
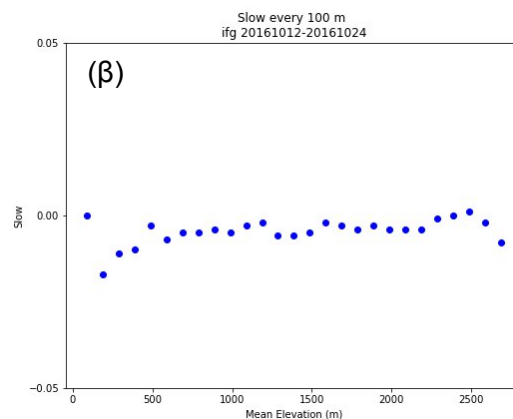
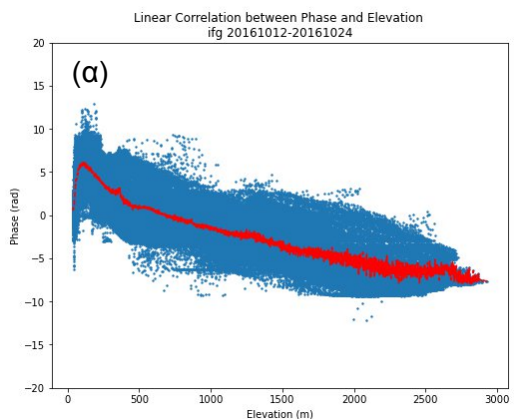
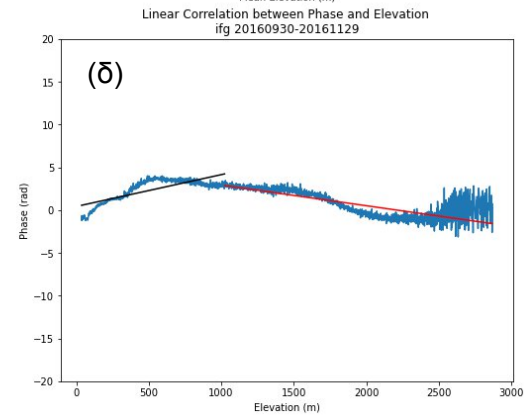
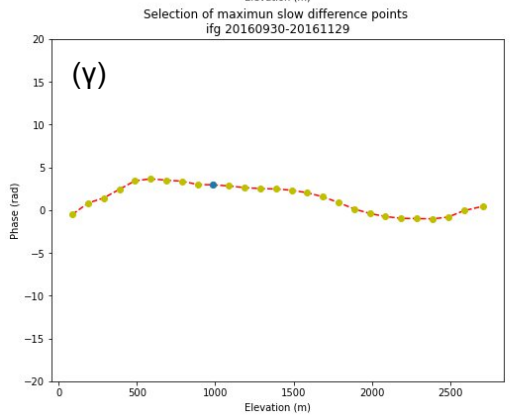
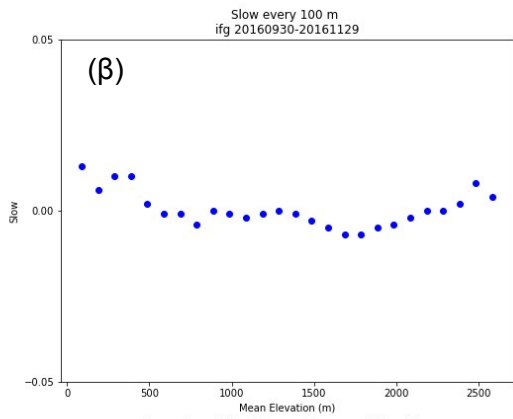
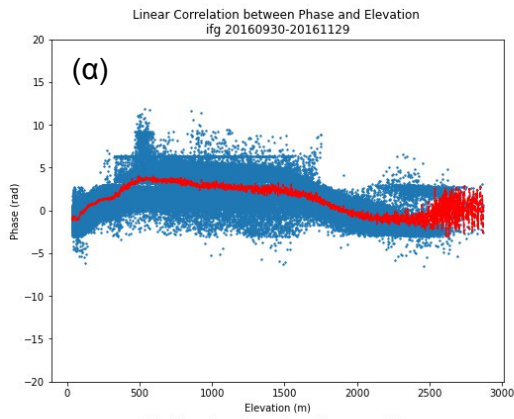
Η Τροποσφαιρική Φάση υπολογίζεται με τη χρήση του SRTM DEM ξεχωριστά για τα εικονοστοιχεία με υψόμετρο μικρότερα του υψόμετρου του σημείου διαχωρισμού και ξεχωριστά για τα εικονοστοιχεία με υψόμετρο μεγαλύτερο του υψόμετρου του σημείου διαχωρισμού, όπως φαίνεται παρακάτω:

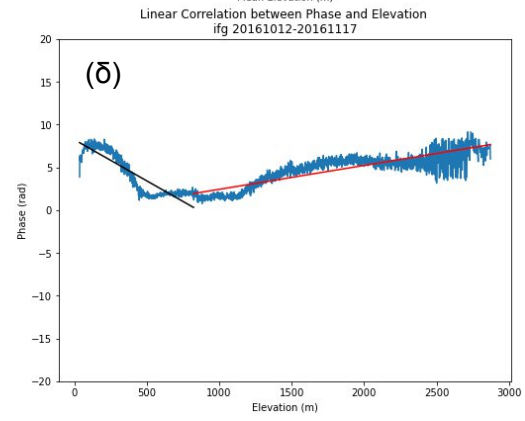
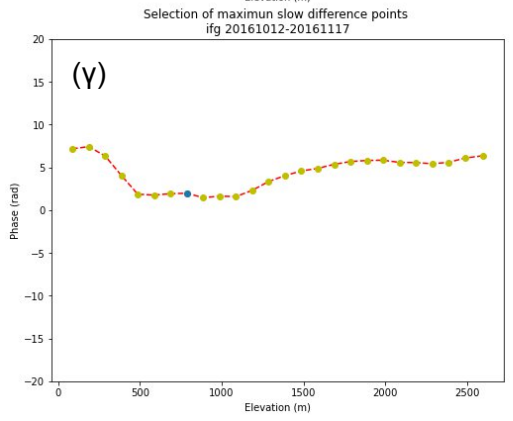
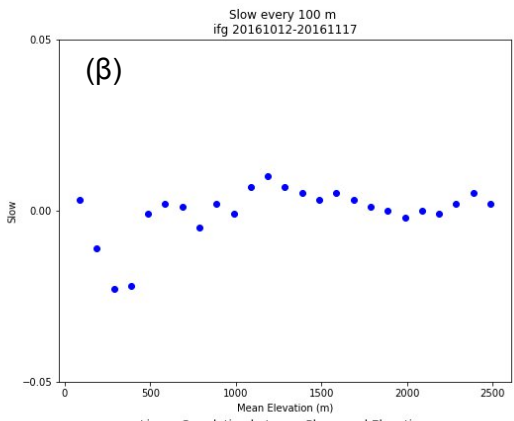
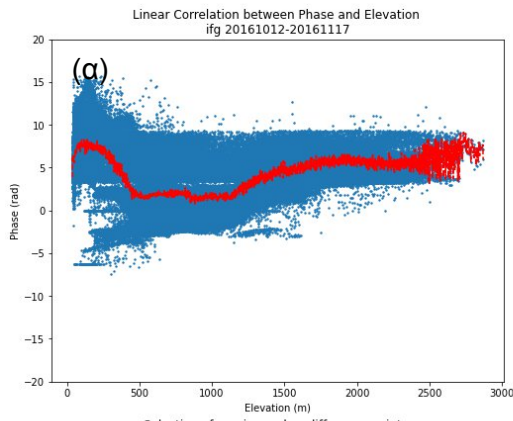
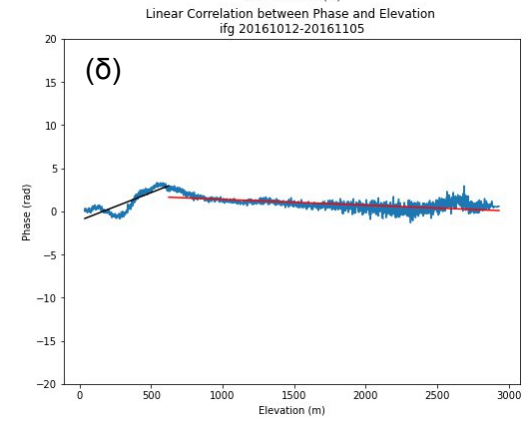
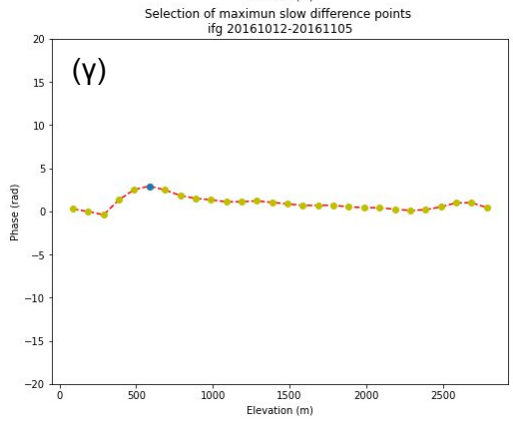
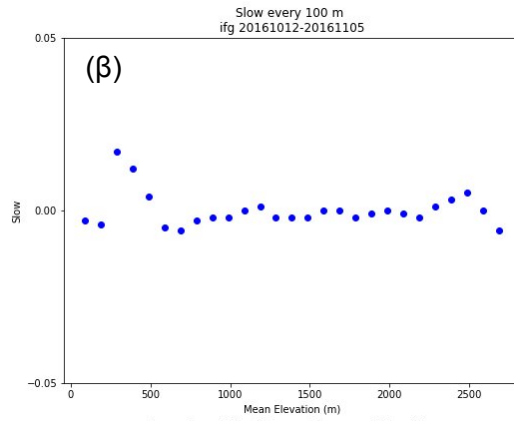
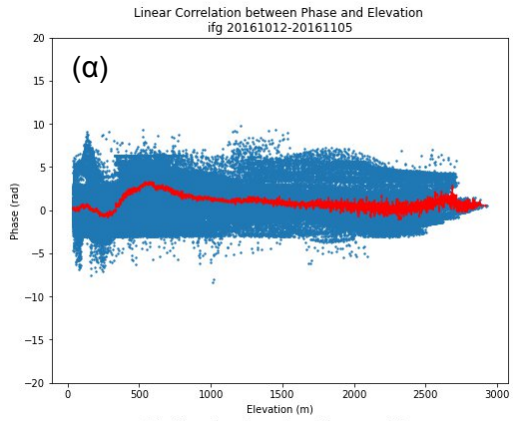
$$\Delta\varphi_{\text{τροπο}}(i,j) = \begin{cases} \alpha_1 h(i,j) + \beta_1, & h(i,j) \leq \delta \\ \alpha_2 h(i,j) + \beta_2, & h(i,j) > \delta \end{cases} \quad (19)$$

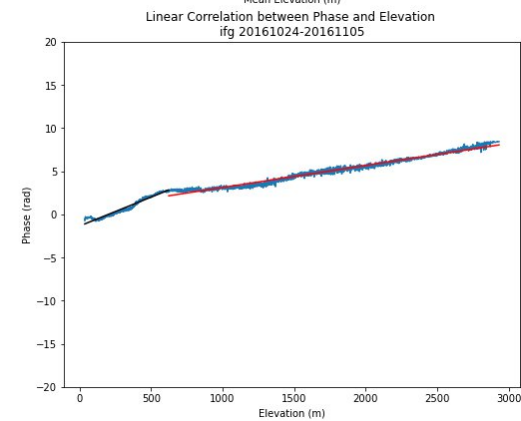
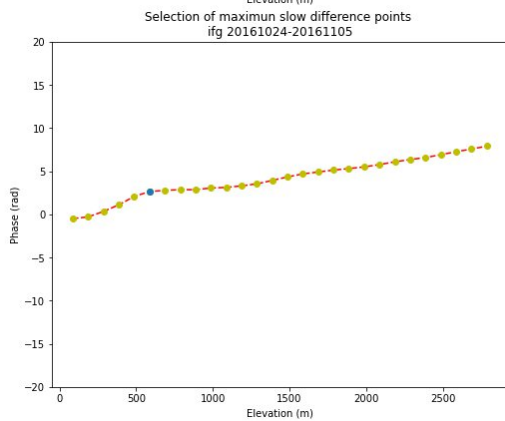
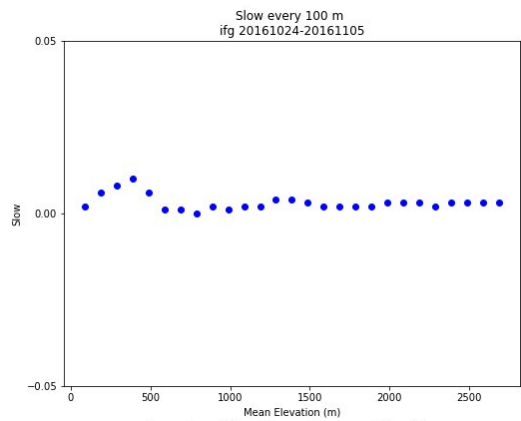
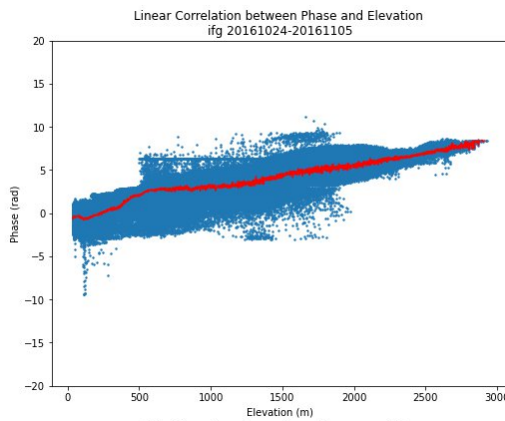
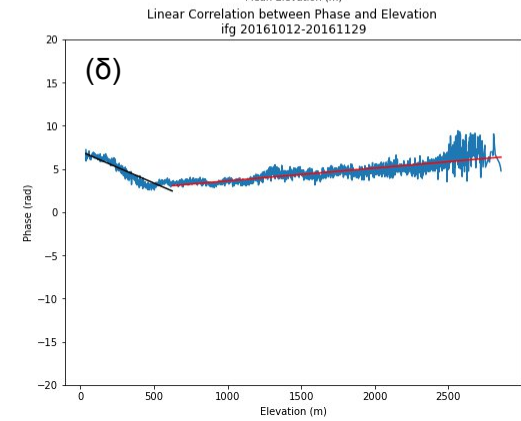
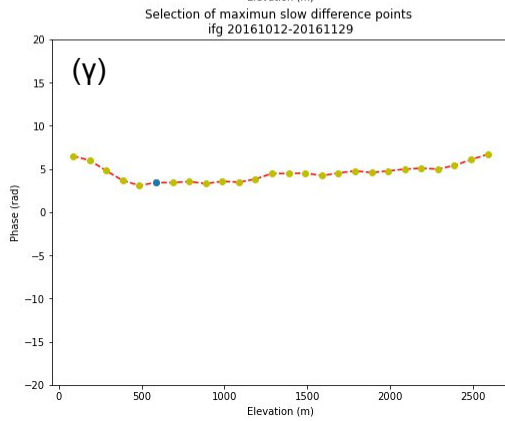
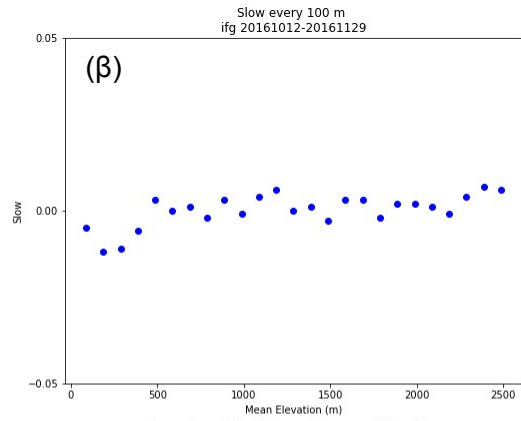
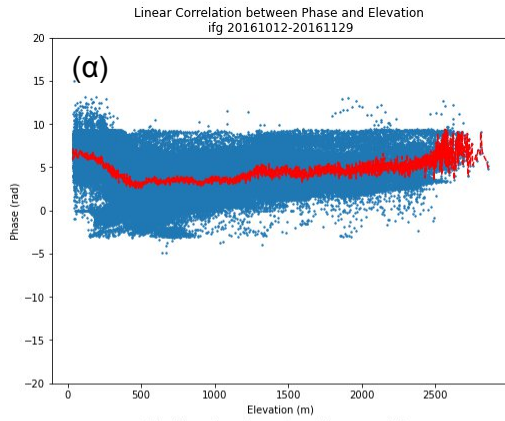
Όπου $\Delta\varphi_{\text{τροπο}}(i,j)$ η Τροποσφαιρική Φάση στο σημείο (i,j), $h(i,j)$ το υψόμετρο του σημείου, δ το υψόμετρο του σημείου διαχωρισμού, α_1, β_1 οι συντελεστές της πρώτης ευθείας, α_2, β_2 οι συντελεστές της δεύτερης ευθείας.

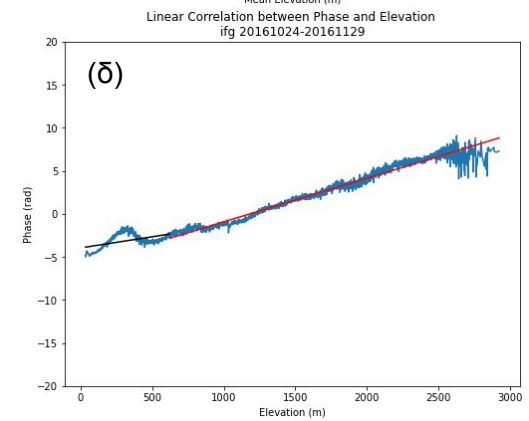
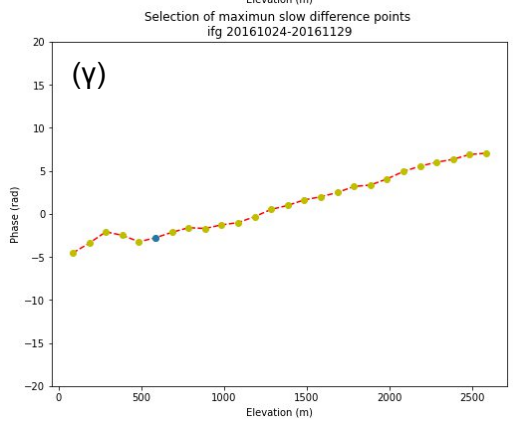
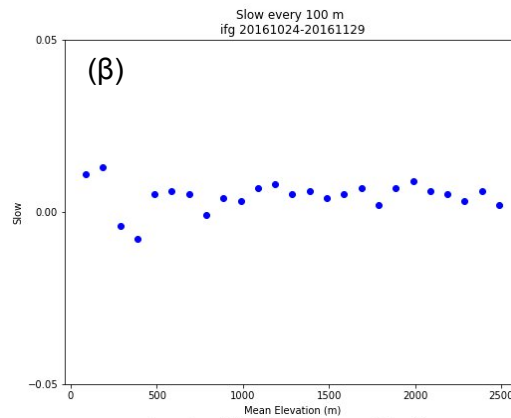
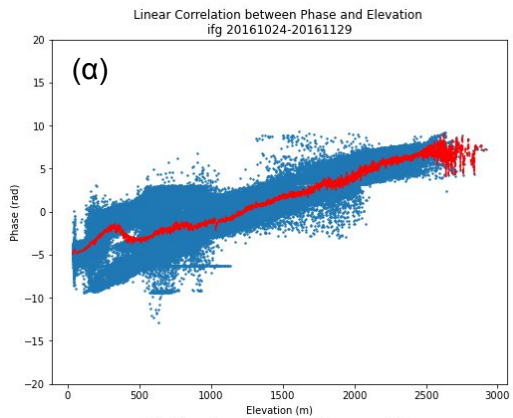
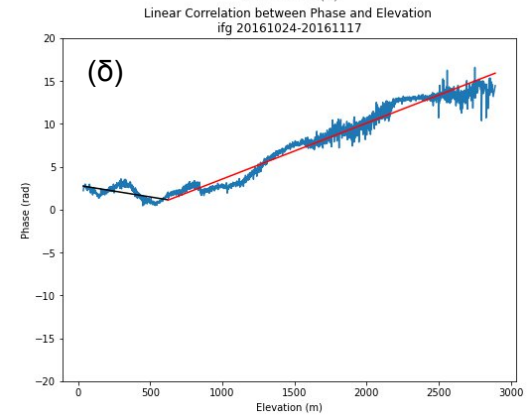
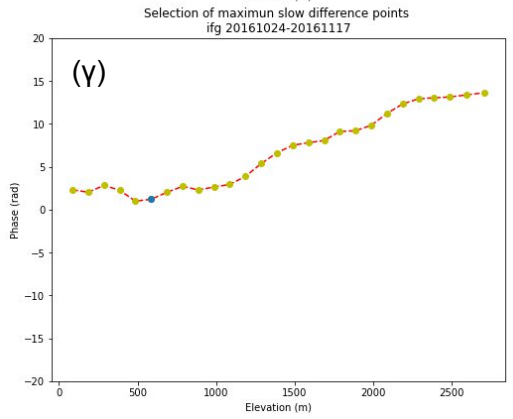
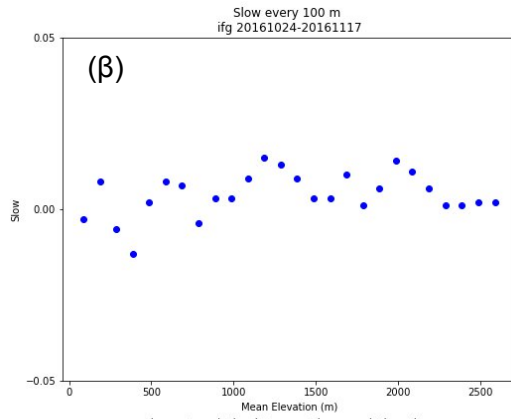
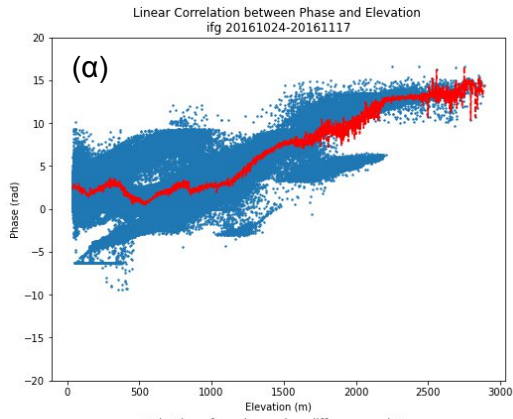


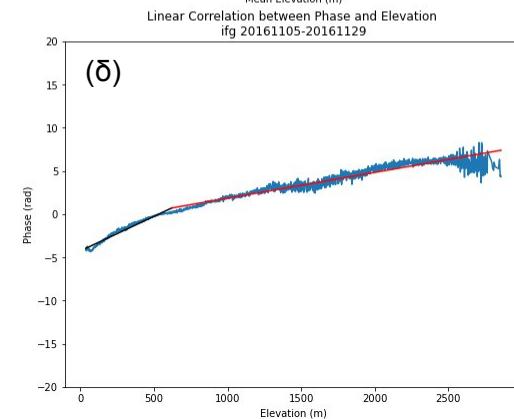
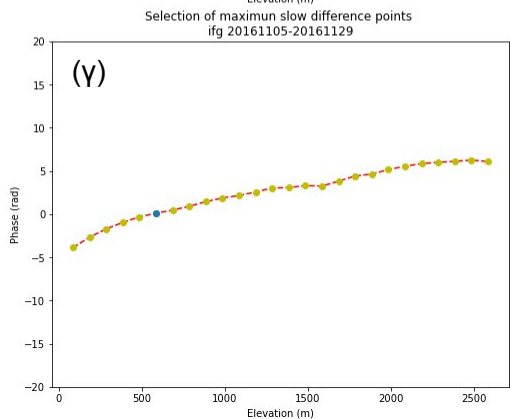
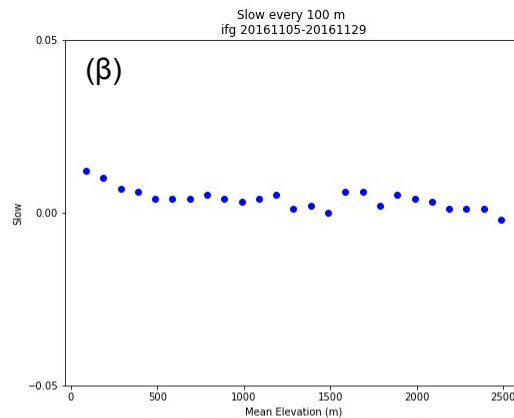
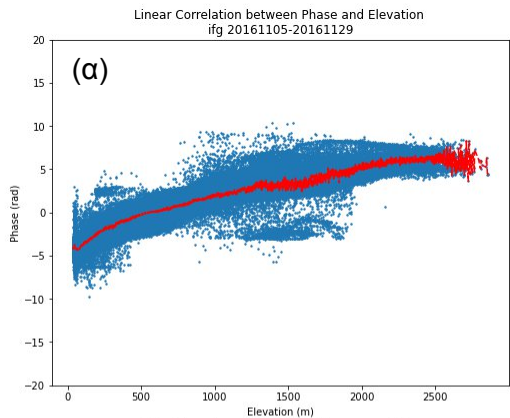
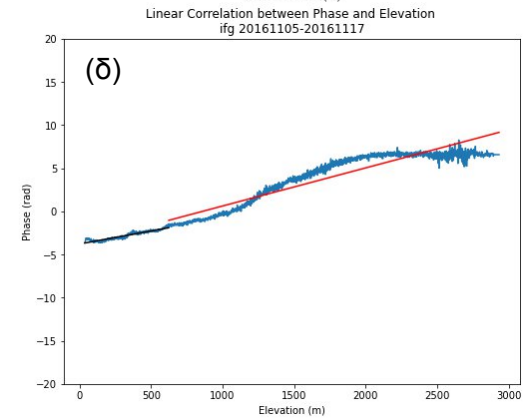
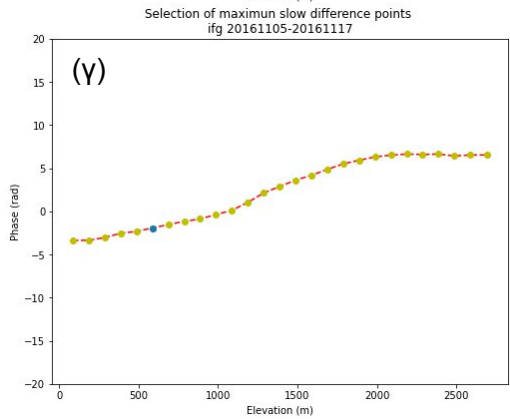
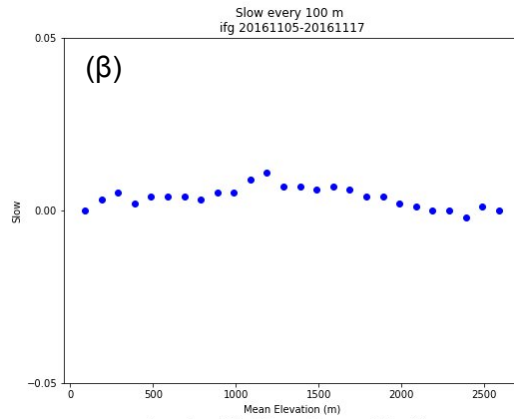
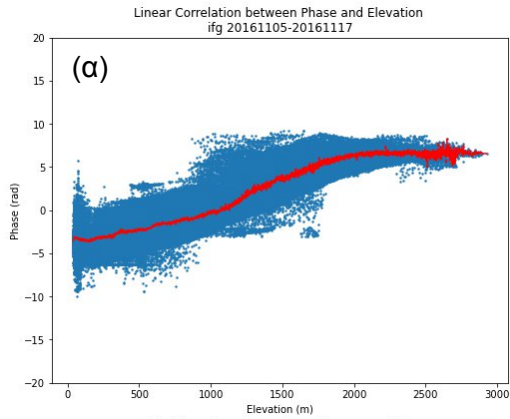


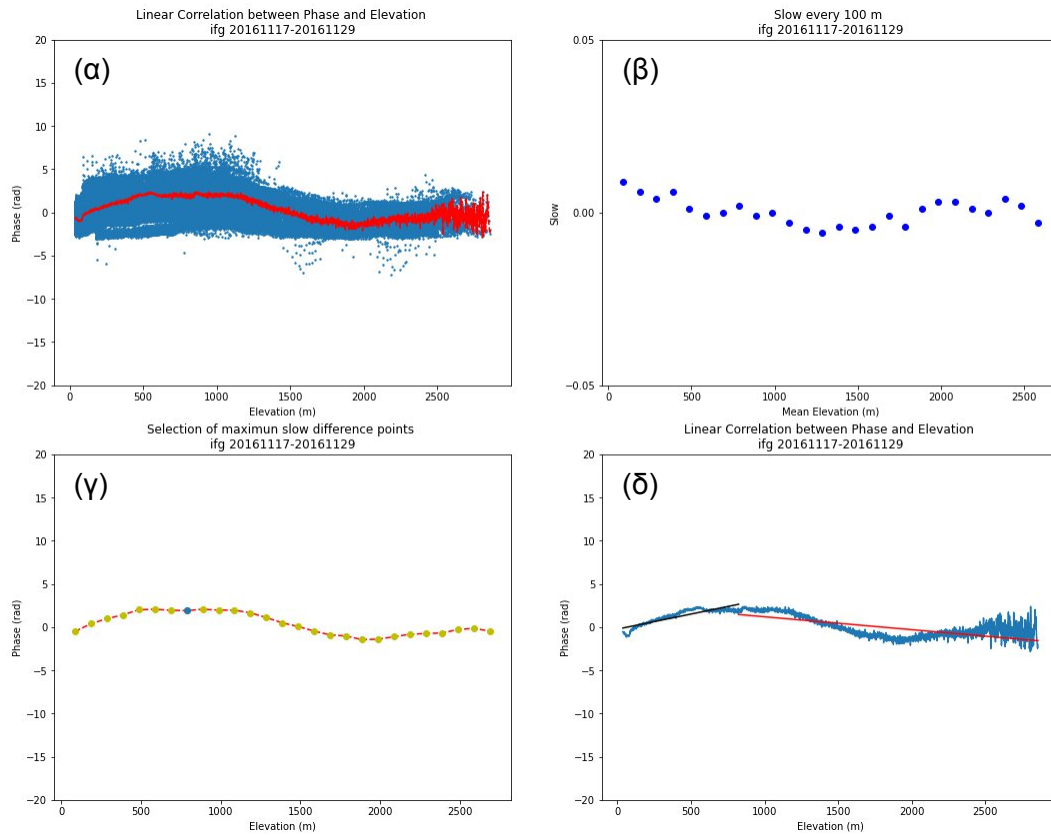












Σχήμα 9: (α) Διάγραμμα διασποράς του συμβολογράμματος (μπλε σημεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο υψομέτρου (κόκκινα ευθεία). (β) Κλίση της ευθείας ανά 100 μέτρα του συμβολογράμματος. (γ) Εντοπισμός σημείου διαχωρισμού (μπλε σημείο). (δ) Βέλτιστες ευθείες (μαύρη και κόκκινη ευθεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο (μπλε καμπύλη).

4.2.2. Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα – ERA5

4.2.2.1. Λήψη Καιρικών Δεδομένων

Για κάθε ημερομηνία του συμβολομετρικού ζεύγους γίνεται λήψη των καιρικών δεδομένων ERA5 που απαιτούνται για την παραγωγή της τροποσφαιρικής φάσης. Η λήψη των δεδομένων ERA5 γίνεται μέσω του API της C3S. Για τη λήψη των δεδομένων εισάγονται οι πληροφορίες της ημερομηνίας, ώρας, και των ορίων της περιοχής.

Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι το γεωδυναμικό, η σχετική υγρασία, και η θερμοκρασία. Τα δεδομένα έχουν χωρική ανάλυση 0,25' και αναλύουν την ατμόσφαιρα σε 37 κάθετα στην κατακόρυφο επίπεδα πίεσης, από το επίπεδο του εδάφους μέχρι 80 χλμ. σε ύψος.

Το ERA5 παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις των ποσοτήτων, οπότε γίνεται λήψη των ποσοτήτων για τις 2 πλησιέστερες χρονικές στιγμές και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των ποσοτήτων για την ακριβή στιγμή λήψης της εικόνας του δορυφόρου με γραμμική παρεμβολή των τιμών του καιρικού μοντέλου στην διάσταση του χρόνου.

4.2.2.2. Υπολογισμός Υδρατμών

Αρχικά, υπολογίζεται η πίεση κεκορεσμένων υδρατμών πάνω από νερό (svp_w) (Buck, 1881) και πάνω από πάγο (svp_i) (Alduchow and Eskridge, 1996):

$$svp_w = 611.21 * e^{\left(17.502 * \frac{(T-273.16)}{(240.97+T-273.16)}\right)} \quad (20)$$

$$svp_i = 611.21 * e^{\left(22.587 * \frac{(T-273.16)}{(273.86+T-273.16)}\right)} \quad (21)$$

Στη συνέχεια, η πίεση κεκορεσμένων υδρατμών υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Buck, 1881):

$$svp = \begin{cases} svp_w, T \geq 273.16 \\ svp_i + (svp_w - svp_i) * \left(\frac{T-250.16}{273.16-250.16}\right)^2, 250.16 < T < 273.16 \\ svp_i, T \leq 250.16 \end{cases} \quad (22)$$

Τελικά, οι υδρατμοί υπολογίζονται από την σχέση:

$$e = \frac{r}{100 svp} \quad (23)$$

Όπου e οι υδρατμοί και r η σχετική υγρασία.

4.2.2.3. Μετατροπή των τιμών του Γεωδυναμικού σε Γεωμετρικό Υψόμετρο

Γεωδυναμικό ή Γεωδυναμικός Αριθμός (C) ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού της επιφάνειας δυναμικού (W) από το δυναμικό του γεωειδούς (W_0) και μετράται με το έργο που χρειάζεται για να ανέβει η μονάδα μάζας από το γεωειδές, σε οποιοδήποτε σημείο μιας άλλης χωροσταθμικής επιφάνειας (Βέης et al., 2011).

$$C = W - W_0 \quad (24)$$

Το δυναμικό υψόμετρο μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας το γεωδυναμικό με μια συμβατική σταθερή τιμή της βαρυτικής επιτάχυνση της Γης, g . Από παραδοχή λαμβάνεται η τιμή της κανονικής βαρύτητας στο πλάτος $\varphi=45^\circ$, δηλαδή η γ_{45} . Η τιμή αυτή για το ελλειψοειδές WGS84 είναι $\gamma_{45} = 9.80665 \text{ kgal}$ (Βέης et al., 2011).

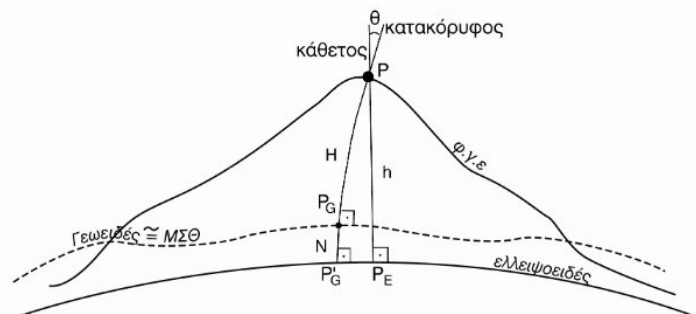
$$H_D = \frac{C}{\gamma_{45}} \quad (25)$$

Τα δυναμικά υψόμετρα έχουν διαστάσεις μήκους αλλά χωρίς γεωμετρική ερμηνεία και πλησιάζουν ως μέγεθος τα ορθομετρικά (Βέης et al., 2011).

Τα ορθομετρικά υψόμετρα θεωρούνται ως τα φυσικά υψόμετρα και έχουν ως επιφάνεια αναφοράς το γεωειδές, το οποίο συνήθως αντικαθίσταται στην πράξη από την Μ.Σ.Θ. Οι αποκλίσεις μεταξύ δυναμικού και ορθομετρικού υψομέτρου είναι μικρές, της τάξης μερικών cm, π.χ. στις Άλπεις βρέθηκε να είναι της τάξης των 15 cm ανά 1000 m του υψομέτρου (Βέης et al., 2011).

Για τις ανάγκες αυτής της έρευνας, η μετατροπή δυναμικού σε ορθομετρικό δεν έγινε λόγω της μικρής κλίμακας της περιοχής μελέτης. Απαιτείται όμως η αναγωγή τους σε γεωμετρικό υψόμετρο (Hu & Mallorquí, 2019). Τα γεωμετρικά υψόμετρα (h) μετρώνται από το ελλειψοειδές αναφοράς, και υπολογίζονται αθροίζοντας το ορθομετρικό υψόμετρο (H_O) με το υψόμετρο του γεωειδούς (N), το οποίο λαμβάνεται από το γεωδυναμικό μοντέλο Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) (Pavlis et al., 2012).

$$h = H_O + N \quad (26)$$

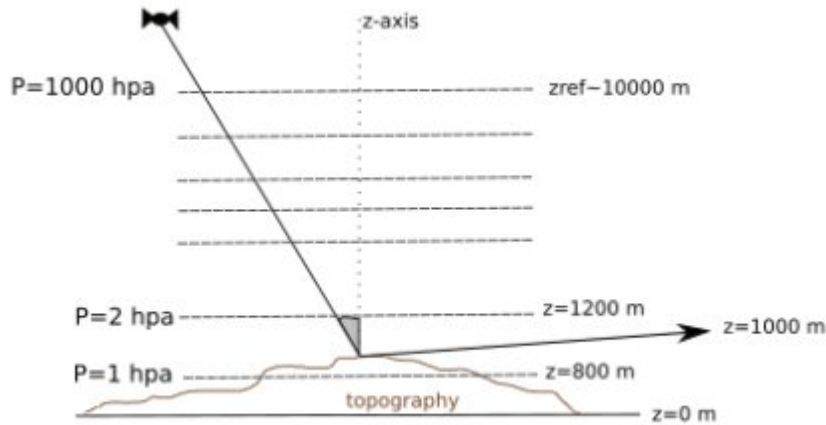


Σχήμα 10: Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων. (Βέης et al., 2011)

4.2.2.4. Κυβική Παρεμβολή στην Διεύθυνση του Ύψους

Τα δεδομένα της θερμοκρασίας (T), των υδρατμών (e) που έχουν ληφθεί και του γεωμετρικού υψομέτρου (h) που έχει υπολογιστεί από το γεωδυναμικό, έχουν τρεις διαστάσεις για κάθε σημείο, όπου ο άξονας x είναι το γεωδαιτικό μήκος, ο άξονας y το γεωδαιτικό πλάτος, και ο άξονας z η ατμοσφαιρική πίεση (P). Υπενθυμίζουμε ότι για 37 κάθετα στην κατακόρυφο επίπεδα της ατμοσφαιρικής πίεσης έχουμε τα δεδομένα θερμοκρασίας (T), των υδρατμών (e) και γεωδυναμικού.

Άρα είναι εφικτή η αντιστοίχιση των τιμών της πίεσης με τις τιμές του γεωμετρικού υψόμετρου και με Κυβική Παρεμβολή στην Διεύθυνση του Ύψους (άξονας z) πραγματοποιείται πύκνωση των σημείων κατακόρυφα από υψόμετρο 0 έως και 30,000 μ., με βήμα τα 100 μ..



Σχήμα 11: Κυβική Παρεμβολή στην Διεύθυνση του Ύψους από πίεση (P) σε υψόμετρο (z)

Για τη βελτιστοποίηση της ενσωμάτωσης της διάθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης της όρασης του δορυφόρου (LOS), δεν είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλα τα υψόμετρα, αλλά μόνο εκείνα που επηρεάζουν τις σχετικές καθυστερήσεις φάσης. Το μέγιστο υψόμετρο πάνω από το οποίο οι σχετικές καθυστερήσεις της φάσης είναι αμελητέες, ονομάζεται υψόμετρο αναφοράς (z_{ref}) και στην περίπτωση αυτής της έρευνας ορίστηκε τα 30,000 μ. (Hu & Mallorquí, 2019).

4.2.2.5. Υπολογισμός της Τροποσφαιρικής Φάσης

Ο υπολογισμός της ατμοσφαιρικής φάσης υπολογίζεται από την σχέση (Berrada Baby et al., 1988):

$$\delta L_{LOS}^S(z) = \frac{10^{-6}}{\cos(\theta)} \left\{ \frac{k_1 R_d}{g_m} (P(z) - P(z_{ref})) + \int_z^{z_{ref}} \left(\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \right\} \quad (27)$$

Όπου, $\delta L_{LOS}^S(z)$ η φάση της τροπόσφαιρας (ψεύδο-φάση σε μέτρα) για υψόμετρο z , τα $R_d = 287.05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ και $R_v = 461.495 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ είναι αντίστοιχα οι ειδικές σταθερές αερίου ξηρού αέρα και υδρατμών, και τα $k_1 = 0.776 \text{ K.Pa}^{-1}$, $k_2 = 0.716 \text{ K.Pa}^{-1}$ και $k_3 = 3.75 \cdot 10^3 \text{ K}^2.\text{Pa}^{-1}$ είναι σταθερές (Smith & Weintraub, 1953).

Το πρώτο μέλος της εξίσωσης $\frac{k_1 R_d}{g_m} (P(z) - P(z_{ref}))$ αναφέρεται στο υδροστατικό συστατικό της τροπόσφαιρας, ενώ το δεύτερο μέρος $\int_z^{z_{ref}} \left(\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz$ αναφέρεται στο υγρό συστατικό της.

Τέλος, ο συντελεστής $\frac{1}{\cos \theta}$, όπου θ η γωνία πρόσπτωσης, αναγάγει τα δεδομένα από την κατακόρυφη διεύθυνση στην διεύθυνση όρασης του δορυφόρου.

4.2.2.6. Κυβική Παρεμβολή στην Διεύθυνση του Ύψους

Εκτελείται κυβική παρεμβολή στην διεύθυνση του ύψους, ώστε να υπολογιστούν οι τιμές της τροποσφαιρικής φάσης από το ελάχιστο ύψος του DEM μέχρι και μέγιστο ύψος με βήμα 1 μ.

4.2.2.7. 2Δ Γραμμική Παρεμβολή στην Οριζόντια Διεύθυνση

Εκτελείται δισδιάστατη παρεμβολή *Spline* στην οριζόντια διεύθυνση, ώστε να γίνει μετάβαση από το χωρική ανάλυση των δεδομένων ERA5 (~30 χλμ.) στην χωρική ανάλυση του DEM και του συμβολογράμματος (~85 μ.).

Η παρεμβολή εκτελείται για κάθε επίπεδο (κάθε 1 μέτρο) του άξονα z της μεταβλητής και στη συνέχεια από κάθε επίπεδο επιλέγονται τα εικονοστοιχεία με το αντίστοιχο υψόμετρο του DEM, για να συνθέσουν μία δισδιάστατη απεικόνιση, όπου κάθε εικονοστοιχείο της περιέχει την τιμή της φάσης της τροπόσφαιρας στο υψόμετρο της περιοχής που αντιστοιχεί το εικονοστοιχείο.

4.2.2.8. Τροποσφαιρική Φάση Συμβολογράμματος

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε SAR απεικόνιση. Για τον υπολογισμό της Τροποσφαιρικής Φάσης του συμβολογράμματος πρέπει να υπολογιστεί η διαφορά της φάσης μεταξύ των δύο ημερομηνιών.

$$\Delta \varphi_{insar}^{LOS} = \varphi_{slave}^{LOS} - \varphi_{master}^{LOS} \quad (28)$$

Όπου $\Delta \varphi_{insar}^{LOS}$ η Τροποσφαιρική Διαφορά Φάσης του συμβολογράμματος στην διεύθυνση όρασης του δορυφόρου και φ_{master}^{LOS} , φ_{slave}^{LOS} οι Τροποσφαιρικές Φάσεις για τις ημερομηνίες της master και της slave SAR εικόνας, αντίστοιχα, στην διεύθυνση όρασης του δορυφόρου.

Τέλος, γίνεται μετατροπή της ψεύδο-φάσης σε φάση (rad) πολλαπλασιάζοντας με τον συντελεστή $\frac{-4\pi}{\lambda}$, όπου λ το μήκος κύματος του σήματος.

4.2.3. Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα – GACOS

4.2.3.1. Λήψη Χαρτών

Η λήψη των δεδομένων γίνεται μετά από αίτημα στην ιστοσελίδα <http://www.gacos.net/>, μαζί με το οποίο δίνονται πληροφορίες για την περιοχή, την ημέρα, και την ώρα που θα αναφέρονται οι χάρτες. Τελικά, η λήψη των δεδομένων, δηλαδή των χαρτών της Τροποσφαιρικής Καθυστέρησης ολοκληρώνεται μέσω συνδέσμου που στέλνεται στον χρήστη μέσω email.

4.2.3.2. Χωρική Παρεμβολή

Τα δεδομένα που φτάνουν στον χρήστη επεξεργάστηκαν ώστε να αναχθούν στην χωρική ανάλυση της εικόνας του συμβολογράμματος. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκε 2D γραμμική παρεμβολή στις οριζόντιες διαστάσεις.

4.2.3.3. Υπολογισμός Τροποσφαιρικής Φάσης Συμβολογράμματος

Η εφαρμογή GACOS παράγει χάρτες Τροποσφαιρικής Καθυστέρησης για κάθε ημερομηνία ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό της Τροποσφαιρικής Φάσης του συμβολογράμματος πρέπει να υπολογιστεί η διαφορά της φάσης μεταξύ των δύο ημερομηνιών.

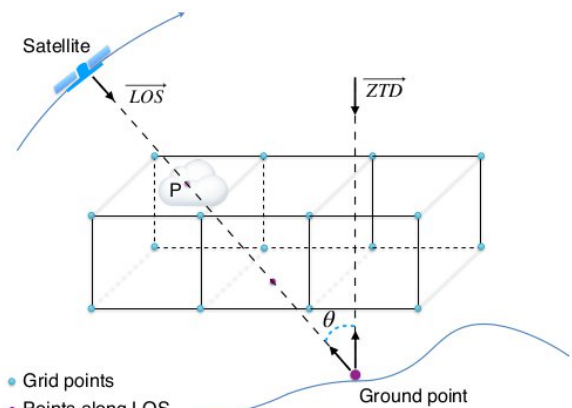
$$\Delta\varphi_{insar}^{zenith} = \varphi_{slave}^{zenith} - \varphi_{master}^{zenith} \quad (29)$$

Όπου $\Delta\varphi_{insar}^{zenith}$ η Τροποσφαιρική Διαφορά Φάσης του συμβολογράμματος στην κατακόρυφο και $\varphi_{master}^{zenith}$, φ_{slave}^{zenith} οι Τροποσφαιρικές Φάσεις για τις ημερομηνίες της master και της slave SAR εικόνας, αντίστοιχα, στην κατακόρυφο.

4.2.3.4. Αναγωγή της Τροποσφαιρικής Φάσης

Γίνεται μετατροπή της ψεύδο-φάσης σε φάση (rad). Η ψεύδο-φάσης πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή $\frac{-4\pi}{\lambda}$, όπου λ το μήκος κύματος του σήματος.

Για την αναγωγή από την κατακόρυφη διεύθυνση στη διεύθυνση της γραμμής όψης του δορυφόρου, η φάση πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή $\frac{1}{\cos\theta}$, όπου θ η γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 1010: Τροποσφαιρική φάση στην κατακόρυφη διεύθυνση και στην διεύθυνση της γραμμής όρασης του δορυφόρου (Πηγή: Hu & Mallorquí, 2019)

4.2.4.Αριθμητικά Καιρικά Μοντέλα – PyAPS

Ο υπολογισμός της τροποσφαιρικής φάσης σε αυτήν τη μέθοδο γίνεται μέσω του πακέτου PyAPS. Τα δεδομένα εισόδου του αλγόριθμου είναι (i) το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης, (ii) οι ημερομηνίες και ώρες της λήψης των εικόνων, (iii) η εικόνα της γωνίας πρόσπτωσης, και (iv) το μήκος κύματος.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την παραγωγή της φάσης είναι παρόμοια με αυτή που αναλύεται στην μέθοδο ERA5 (βλ. Κεφάλαιο 4.2.2), με κάποιες διαφορές στην υλοποίηση της μεθοδολογίας. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 9) παρουσιάζει τις σημαντικότερες διαφορές που εντοπίζονται:

Πίνακας 9: Διαφορές μεθόδων ERA5 και PyAPS

ERA5	PyAPS
Το μοντέλο ERA5 παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις των ποσοτήτων, οπότε γίνεται λήψη των ποσοτήτων για τις 2 πλησιέστερες χρονικές στιγμές και στην συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των ποσοτήτων για την ακριβή στιγμή λήψης της εικόνας του δορυφόρου, με γραμμική Παρεμβολή των τιμών του καιρικού μοντέλου στη διάσταση του χρόνου	Το μοντέλο ERA5 παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις των ποσοτήτων, οπότε γίνεται επιλογή της πλησιέστερης τιμής σχετικά με την ώρα λήψης των εικόνων.
Για λόγους συμβατότητας με το DEM που χρησιμοποιείται (SRTM), ο Γεωδυναμικός Αριθμός (C) που παρέχεται από το ERA5 μετατρέπεται σε Δυναμικό Υψόμετρο και στη συνέχεια σε Γεωμετρικό Υψόμετρο με την βοήθεια του Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) το οποίο περιέχει τιμές για το υψόμετρο του γεωειδούς N.	Ο Γεωδυναμικός Αριθμός (C) που παρέχεται από το ERA5 μετατρέπεται σε Δυναμικό Υψόμετρο.
Το υψόμετρο αναφοράς (zref), δηλαδή το υψόμετρο άνω του οποίου η τροποσφαιρική καθυστέρηση θεωρείται σχεδόν αμετάβλητη με τον χρόνο, ορίζεται στα 30 χλμ.	Το υψόμετρο αναφοράς (zref), δηλαδή το υψόμετρο άνω του οποίου η τροποσφαιρική καθυστέρηση θεωρείται σχεδόν αμετάβλητη με τον χρόνο, ορίζεται στα 50 χλμ. Σημειώνεται ότι στην αρχική έκδοση του PyAPS η τιμή είχε οριστεί στα 30 χλμ.

4.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

Για τη διόρθωση των συμβολομετρικών φάσεων από την καθυστέρηση που προσδίδει η τροπόσφαιρα, αφαιρέθηκε η φάση της τροπόσφαιρας, που υπολογίστηκε, από το αρχικό συμβολόγραμμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

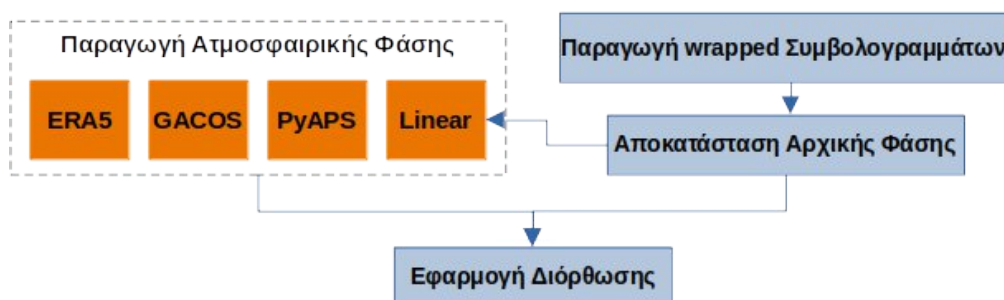
$$\Delta\varphi_{insar_corr}(i,j) = \Delta\varphi_{insar}(i,j) - \Delta\varphi_{tropo}(i,j) \quad (30)$$

Όπου, $\Delta\varphi_{insar_corr}(i,j)$ η διορθωμένη φάση, $\Delta\varphi_{insar}(i,j)$ η αρχική συμβολομετρική φάση, και $\Delta\varphi_{tropo}(i,j)$ η φάση της τροπόσφαιρας, στο σημείο (i,j) .

Η διόρθωση εφαρμόστηκε σε καθένα από τα συμβολογράμματα με δύο μεθόδους: (i) μετά την αποκατάσταση της οπότε η αρχική συμβολομετρική φάση ($\Delta\varphi_{insar}(i,j)$) που φαίνεται στην εξίσωση (30) είναι η αποκαταστημένη φάση και (ii) πριν την αποκατάσταση της φάσης, όπου η αρχική συμβολομετρική φάση ($\Delta\varphi_{insar}(i,j)$) είναι η μη αποκαταστημένη φάση.

Καθώς, η τροποσφαιρική φάση υπολογίστηκε με τέσσερις μεθόδους (ERA5, GACOS, Linear, PyAPS), για κάθε συμβολόγραμμα υπολογίστηκαν τέσσερις διορθωμένες φάσεις ($\Delta\varphi_{insar_corr_after}^{ERA5}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_after}^{GACOS}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_after}^{Linear}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_after}^{PyAPS}$) για όταν η διόρθωση εφαρμοστεί μετά την αποκατάσταση της φάσης και τέσσερις για όταν εφαρμοστεί πριν την αποκατάστασης της ($\Delta\varphi_{insar_corr_bef}^{ERA5}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_bef}^{GACOS}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_bef}^{Linear}$, $\Delta\varphi_{insar_corr_bef}^{PyAPS}$).

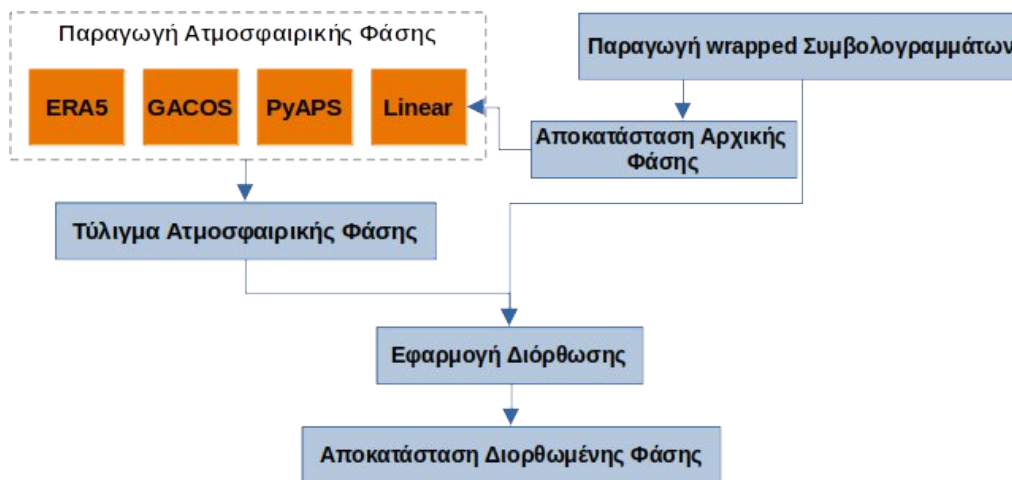
Όταν η διόρθωση εφαρμοστεί μετά την αποκατάσταση της φάσης, η φάση των συμβολογράμματος και της τροπόσφαιρας είναι αποκαταστημένες και έχουν διορθωθεί γεωμετρικά και γεωαναφερθεί, με αποτέλεσμα η εφαρμογή της διόρθωσης να υλοποιείται όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση (εξίσωση 30), χωρίς ενδιάμεσα βήματα.



Σχήμα 12: Διαδικασία εφαρμογής της ατμοσφαιρικής διόρθωσης μετά την αποκατάσταση της φάσης

Όταν η διόρθωση εφαρμοστεί πριν την αποκατάσταση της φάσης, η διαδικασία απαιτεί την υλοποίηση κάποιων επιπλέον βημάτων:

- Στα αρχικά συμβολογράμματα, πριν την αποκατάσταση της φάσης, (wrapped συμβολογράμματα) εφαρμόζεται γεωμετρική διόρθωση και γεωαναφορά.
- Η φάση της τροπόσφαιρας περιέχει την πληροφορία για τους ακέραιους κύκλους, άρα η φάση πρέπει να τυλιχθεί στα όρια $[-\pi, \pi)$.
- Στην συνέχεια, είναι δυνατόν να γίνει η εφαρμογή της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση (εξίσωση 30).
- Γίνεται αποκατάσταση της διορθωμένης μη αποκαταστημένης φάσης.



Σχήμα 13: Διαδικασία εφαρμογής της ατμοσφαιρικής διόρθωσης πριν την αποκατάσταση της φάσης

4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ

Αρχικά, εντοπίζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί τριπλετών μεταξύ των 6 SAR απεικονίσεων. Η διαδικασία υλοποιείται αυτόματα με την χρήση της βιβλιοθήκης `itertools`¹¹ της Python, η οποία προσφέρει εξισώσεις που δημιουργούν επαναλήπτες για αποτελεσματική χρήση βρόχων.

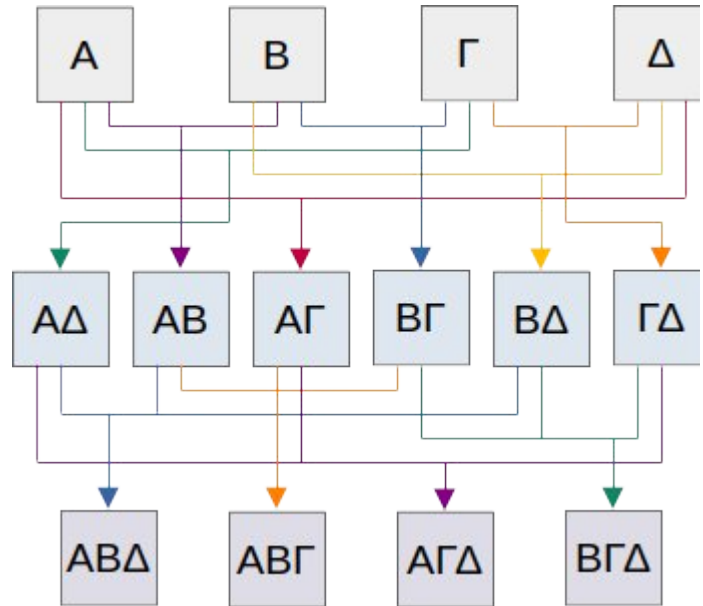
Εξ ορισμού, η φάση κλεισίματος μίας τριπλέτας υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντίστοιχων συμβολομετρικών φάσεων (βλ.Κεφάλαιο 1.3.5):

$$\Delta\varphi_{\tau\rho\pi\lambda} = \Delta\varphi_{AB} + \Delta\varphi_{B\Gamma} + \Delta\varphi_{\Gamma A} \quad (31)$$

Όπου $\Delta\varphi_{AB}$ η αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση των εικόνων A και B.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα διορθωμένα συμβολογράμματα.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 10) παρουσιάζει το πλήθος των απεικονίσεων που κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 14: Παράδειγμα κατασκευής όλων των πιθανών τριπλέτων για τέσσερις ημερομηνίες. Ξεκινώντας με 4 SAR απεικονίσεις A, B, Γ, Δ συνθέτονται 6 συμβολογράμματα AΔ, AB, AΓ, BΓ, BΔ, ΓΔ, που με την σειρά τους συνθέτουν 4 φάσης κλεισίματος ABΔ, ABΓ, AΓΔ, BΓΔ.

Πίνακας 10: Πλήθος απεικονίσεων

	Μη Διορθωμένα	Μέθοδος Διόρθωσης				Σύνολο
		ERA5	GACOS	Linear	PyAPS	
SAR Εικόνες	6	n/a	n/a	n/a	n/a	6
Συμβολογράμματα	15	15	15	15	15	75
Φάση Κλεισίματος	20	20	20	20	20	100

Τέλος, ο υπολογισμός της μέσης τιμής κάθε απεικόνισης της Φάσης Κλεισίματος ($\mu_{\Delta\varphi_{\tau\rho\pi\lambda}}$) υπολογίζεται:

$$\mu_{\Delta\varphi_{\tau\rho\pi\lambda}} = \frac{\sum |\Delta\varphi_{\tau\rho\pi\lambda}(i,j)|}{n} \quad (32)$$

Όπου, $\Delta\varphi_{\tau\rho\pi\lambda}(i,j)$ η τιμή της φάσης κλεισίματος για το εικονοστοιχείο (i,j) και n ο αριθμός των εικονοστοιχείων.

¹¹ <https://docs.python.org/3/library/itertools.html#module-itertools>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Αποτελέσματα και αξιολόγηση των μεθόδων διόρθωσης της τροποσφαιρικής καθυστέρησης στα συμβολογράμματα βάσει της τυπικής απόκλισης τους.

Η ατμοσφαιρική φάση είναι η κύρια συνιστώσα της συμβολομετρικής φάσης (εφόσον η φάση της τοπογραφίας και της επίπεδης γης έχουν αφαιρεθεί και θεωρούμε ότι δεν υπάρχει εδαφική παραμόρφωση μεταξύ των λήψεων), άρα η τυπική απόκλιση του συμβολογράμματος χαρακτηρίζει την ατμοσφαιρική φάση. Η μείωση της τυπικής απόκλισης υποδηλώνει τη μείωση του θορύβου μετά τη διόρθωση (Χiao et al., 2021).

- Αποτελέσματα και αξιολόγηση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής διόρθωσης στη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης βάσει της φάσης κλεισίματος.

Η φάση κλεισίματος μιας τριπλέτας εξαρτάται από τα σφάλματα της διαδικασίας της αποκατάστασης φάσης και από άλλους παράγοντες που δεν μεταβάλλονται με την αφαίρεση της ατμοσφαιρικής φάσης. Άρα, η μείωση της φάσης κλεισίματος δηλώνει την μείωση σφαλμάτων στην διαδικασία την αποκατάστασης.

5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Για τα συμβολογράμματα που η διόρθωση έγινε μετά την αποκατάσταση της φάσης παρατηρούμε μείωση της τυπικής απόκλισης στις περισσότερες περιπτώσεις. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 11) παρουσιάζει το μέσο όρο της τυπικής απόκλισης όλων των αρχικών και διορθωμένων συμβολογραμμάτων και τη μείωση της τυπικής απόκλισης.

Η μείωση της τυπικής απόκλισης δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\sigma_o - \sigma_c}{\sigma_o}$$

όπου, σ_o η τυπική απόκλιση του μη διορθωμένου συμβολογράμματος και σ_c η τυπική απόκλιση του διορθωμένου συμβολογράμματος.

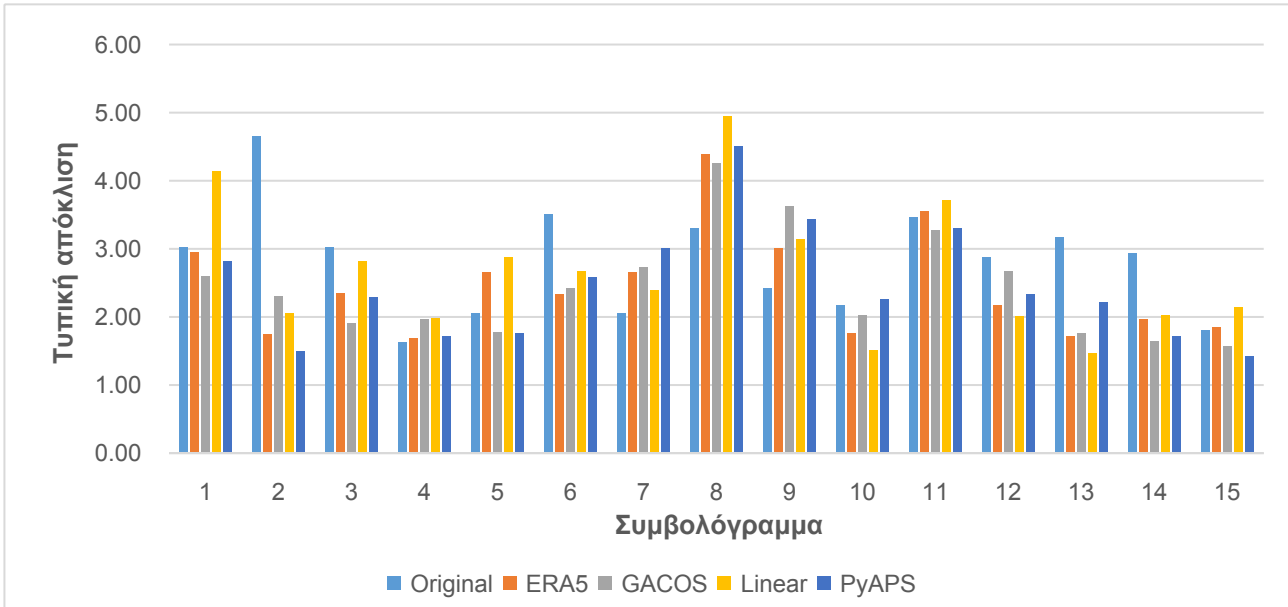
Πίνακας 11: Μέση τιμή τυπικής απόκλισης (rad) και μέση μείωση τυπικής απόκλισης (%) πριν και μετά την διόρθωση στα συμβολογράμματα όπου η διόρθωση έγινε μετά την αποκατάσταση της φάσης.

	Original	ERA5	GACOS	Linear	PyAPS
Τυπική Απόκλιση (σ)	2.805	2.451	2.430	2.658	2.456
Μείωση Τυπικής Απόκλισης		7.93%	9.03%	0.71%	8.10%

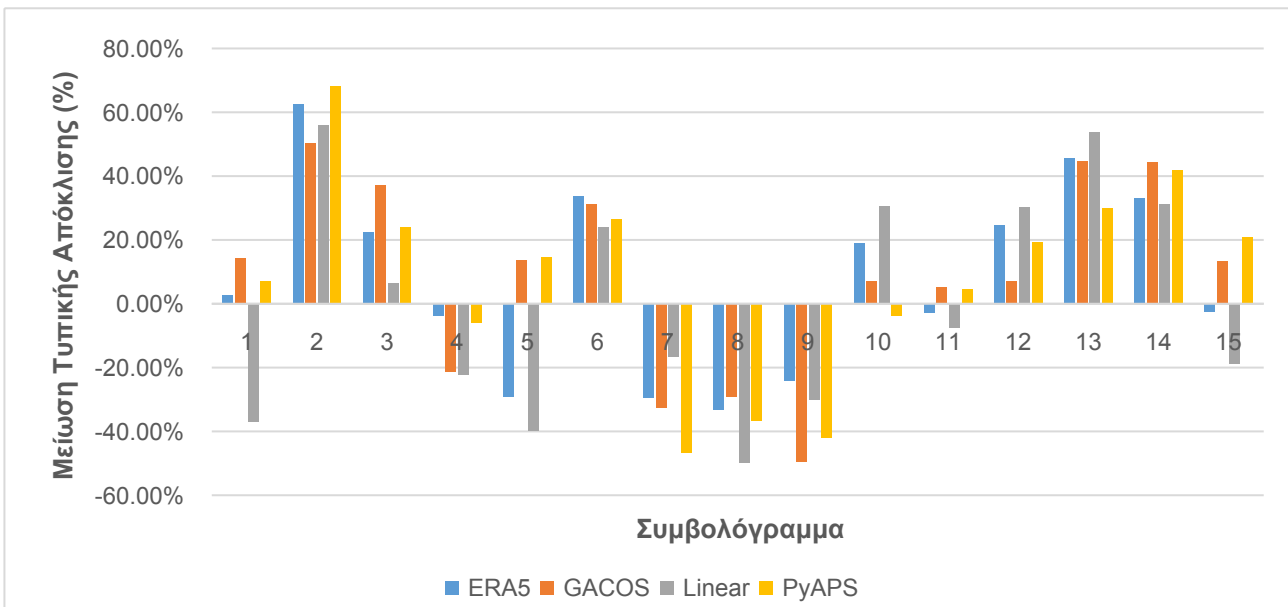
Οι μέσοι όροι που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των συμβολογραμμάτων, είτε παρουσιάζουν θετική είτε αρνητική μείωση τις τυπικής απόκλισης. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η μέθοδος GACOS δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και ακολουθούν οι ERA5 και PyAPS με μικρή διαφορά. Όμως, αν εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τα αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής:

- Στη μέθοδο **ERA5** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **53%** (8/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **30.47%** και **-17.82%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **3 από τα 15** συμβολογράμματα.
- Στη μέθοδο **GACOS** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **73%** (11/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **24.37%** και **-33.15%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **5 από τα 15** συμβολογράμματα.
- Στη μέθοδο **Linear** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **47%** (7/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **33.18%** και **-27.69%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **4 από τα 15** συμβολογράμματα.
- Στη μέθοδο **PyAPS** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **73%** (11/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **25.65%** και **-27.01%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **3 από τα 15** συμβολογράμματα.

Οι μέθοδοι GACOS και PyAPS έχουν το καλύτερο ποσοστό θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης, όμως στις μεθόδους ERA5 και Linear φαίνεται να μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης της τυπικής απόκλισης στα συμβολογράμματα που έχουν θετική μείωση.



Σχήμα 15: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης.



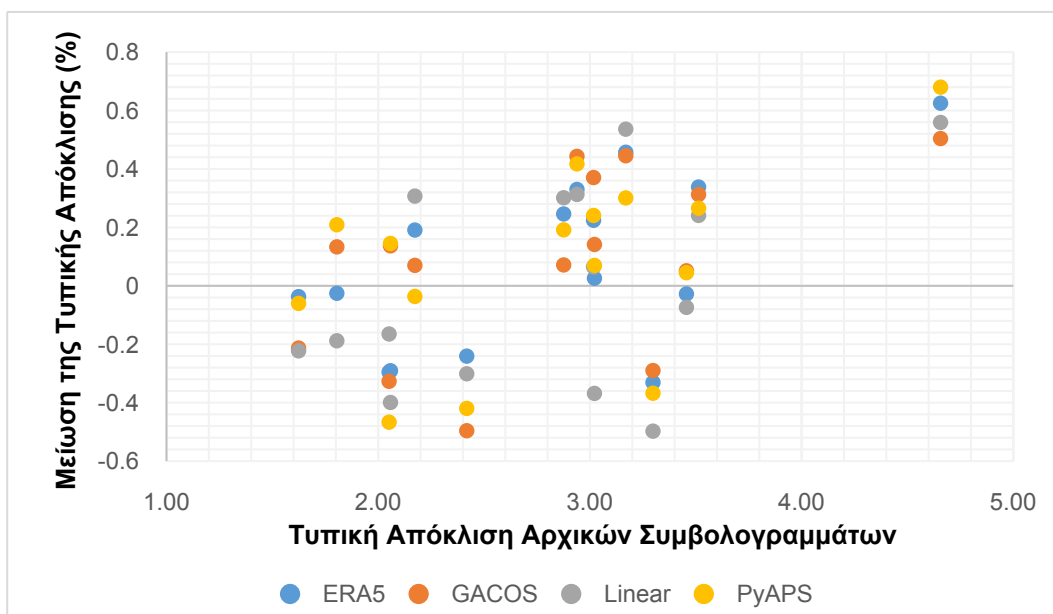
Σχήμα 16: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης.

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι μόνο στο 40% των συμβολογραμμάτων η τυπική απόκλιση βελτιώνεται σε όλες τις μεθόδους, στο 27% η τυπική απόκλιση δεν μειώνεται σε καμία μέθοδο, ενώ στο 33% η τυπική απόκλιση μειώνεται σε κάποιες μεθόδους και σε κάποιες όχι.

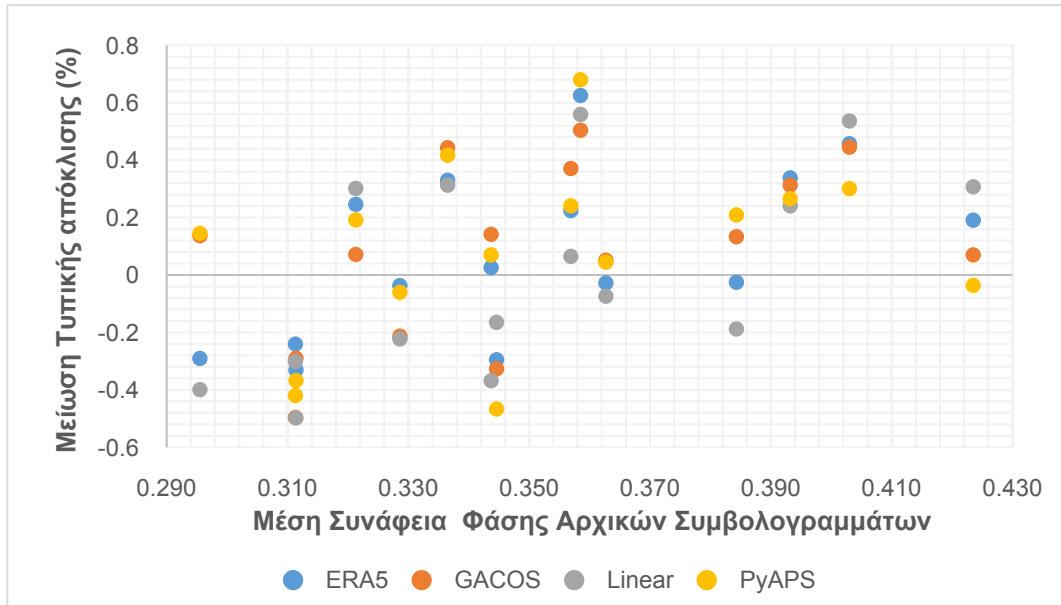
Για τα συμβολογράμματα (Συμβολογράμματα 4, 7, 8, 9) που φαίνεται να μην βελτιώνονται μετά την διόρθωση, εξετάστηκαν οι καιρικές συνθήκες που παρουσιάζονται στις ημερομηνίες λήψης των SAR εικόνων για να ελεγχθεί ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τα αποτελέσματα της διόρθωσης. Όμως, δεν βρέθηκε κάποια ξεκάθαρη συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς το πρόβλημα είναι πολυπαραγοντικό και δεν είναι δυνατόν να απομονωθούν όλοι οι παράγοντες για να μελετηθεί η επίδραση κάθε παράγοντα στην διόρθωση της φάσης.

Για να αναλυθεί περαιτέρω το αποτέλεσμα, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μείωση της τυπικής απόκλισης σε συνάρτηση με την τυπική απόκλιση των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων (Σχήμα 17) και με τη μέση συνάφεια φάσης των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων (Σχήμα 18). Παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ των αρνητικών τιμών μείωσης της τυπικής απόκλισης με:

- i. Τις χαμηλές τιμές της τυπικής απόκλισης των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων (τιμές μικρότερες του 3.5 rad). Η χαμηλή τιμή της τυπικής απόκλισης σε ένα μη διορθωμένο συμβολογράμμα μπορεί να φανερώνει την απουσία της τροποσφαιρικής καθυστέρησης.
- ii. Τις χαμηλές τιμές της συνάφειας φάσης των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων (τιμές μικρότερες του 0.35). Η χαμηλή τιμή της συνάφειας φάσης σε ένα μη διορθωμένο συμβολογράμμα μπορεί να δηλώνει την ύπαρξη μεγάλης ποσότητας θορύβου που υποσκιάζει την ατμοσφαιρική φάση.



Σχήμα 17: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με την τυπική απόκλιση των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων



Σχήμα 18: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με τη μέση συνάφεια φάσης των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων

Παρόμοια εξετάζουμε και τα αποτελέσματα για τα συμβολογράμματα που η διόρθωση έγινε πριν την αποκατάσταση της φάσης. Παρατηρούμε ότι για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης είναι αυξημένος αλλά με πολύ μικρή διαφορά, ενώ για την μέθοδο Linear δείχνει σημαντική βελτίωση.

Πίνακας 12: Μέση τιμή τυπικής απόκλισης (rad) και μέση μείωση τυπικής απόκλισης (%) πριν και μετά την διόρθωση στα συμβολογράμματα όπου η διόρθωση έγινε πριν την αποκατάσταση της φάσης.

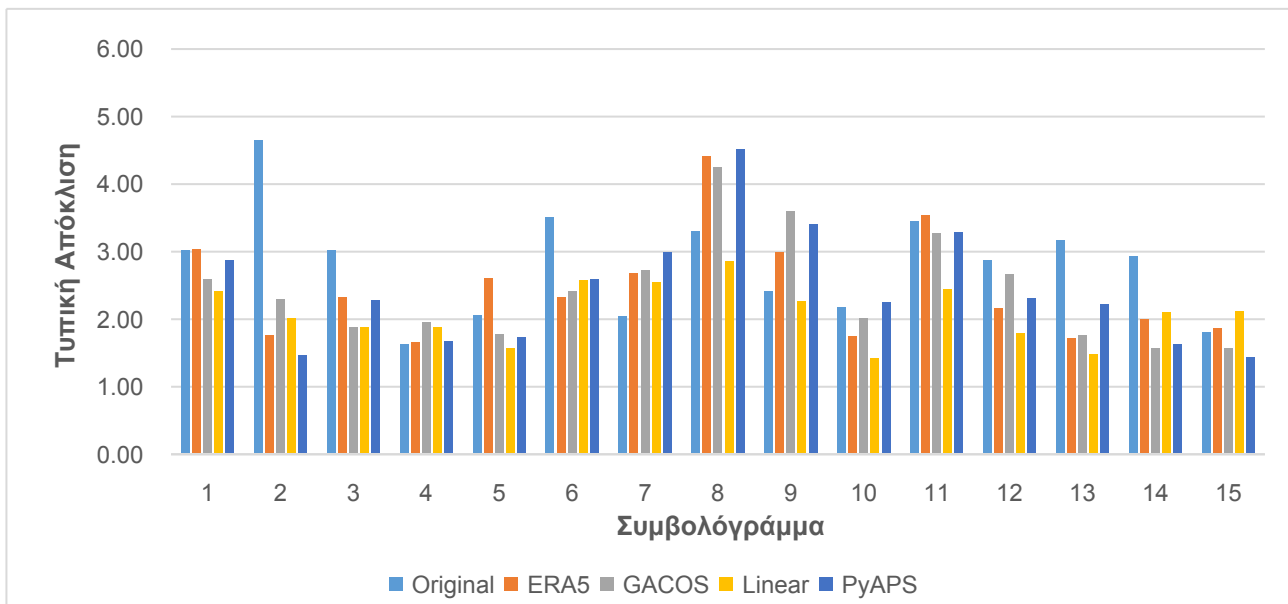
	Original	ERA5	GACOS	Linear	PyAPS
Τυπική Απόκλιση (σ)	2.805	2.457	2.423	2.091	2.448
Μείωση Τυπικής Απόκλισης		7.77%	9.37%	20.68%	8.44%

Η μέθοδος Linear όχι μόνο παρουσιάζει βελτίωση αλλά δίνει και τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση τις άλλες μεθόδους με μεγάλη διαφορά. Συγκεκριμένα:

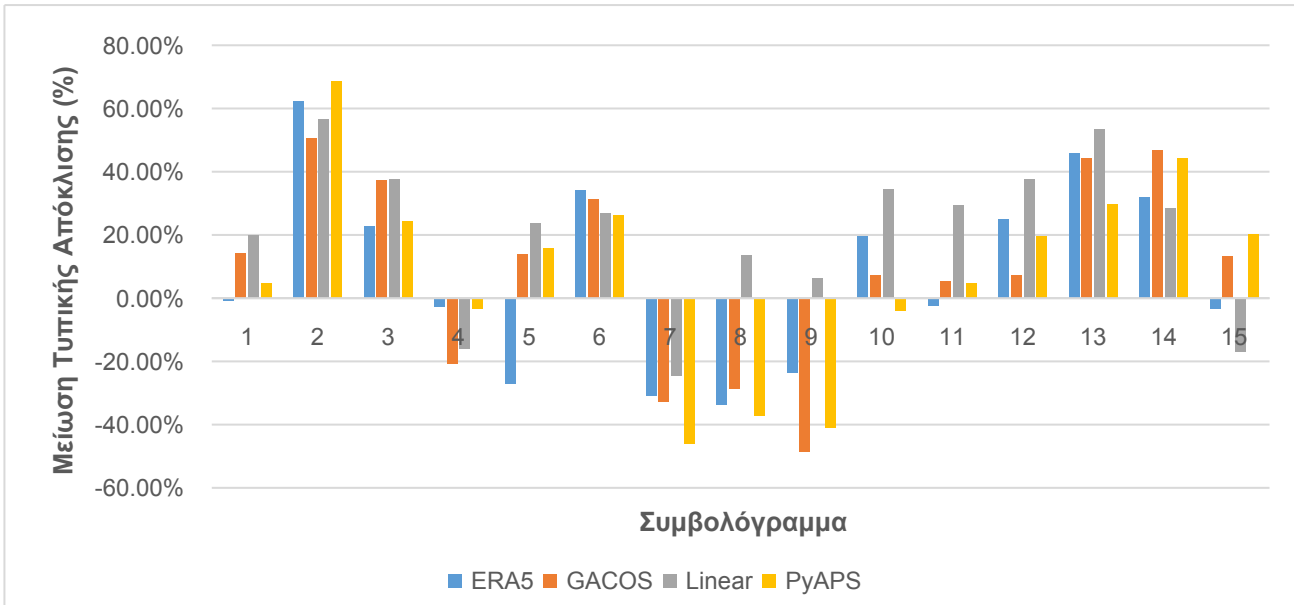
- Στη μέθοδο **ERA5** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **47%** (7/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **34.43%** και **-15.55%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **2 από τα 15** συμβολογράμματα.
- Στη μέθοδο **GACOS** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **73%** (11/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **24.66%** και **-32.69%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **1 από τα 15** συμβολογράμματα.

- Στη μέθοδο **Linear** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **80%** (12/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **30.65%** και **-19.21%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **10 από τα 15** συμβολογράμματα.
- Στη μέθοδο **PyAPS** η τυπική απόκλιση μειώνεται στο **73%** (11/15) των περιπτώσεων. Ο μέσος όρος μείωσης της τυπικής απόκλισης για τα συμβολογράμματα στα οποία μειώνεται η τυπική απόκλιση είναι **25.82%** και **-26.32%** για τα συμβολογράμματα στα οποία δεν μειώνεται. Έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους σε **2 από τα 15** συμβολογράμματα.

Συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος Linear παρουσιάζει το καλύτερο ποσοστό επιτυχημένης διόρθωσης σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, με πολύ μεγάλη βελτίωση αν η διόρθωση της ατμοσφαιρικής φάσης γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης. Καλύτερο ποσοστό θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης συνεχίζουν να παρουσιάζουν οι μέθοδοι ERA5 και Linear.



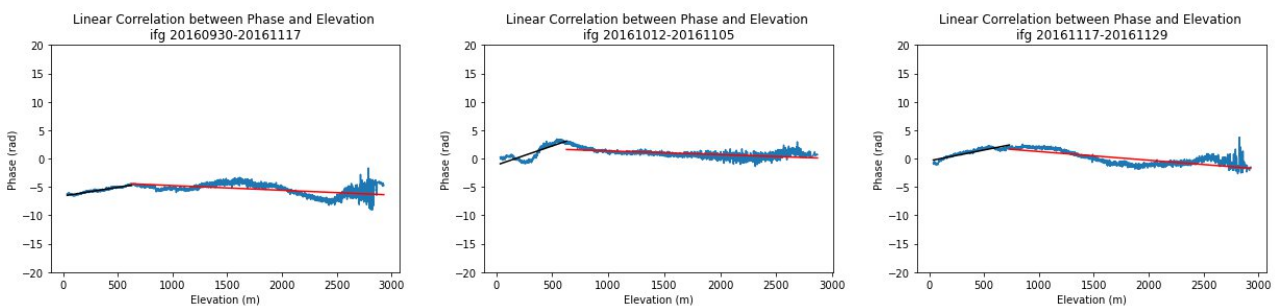
Σχήμα 19: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης.



Σχήμα 20: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης.

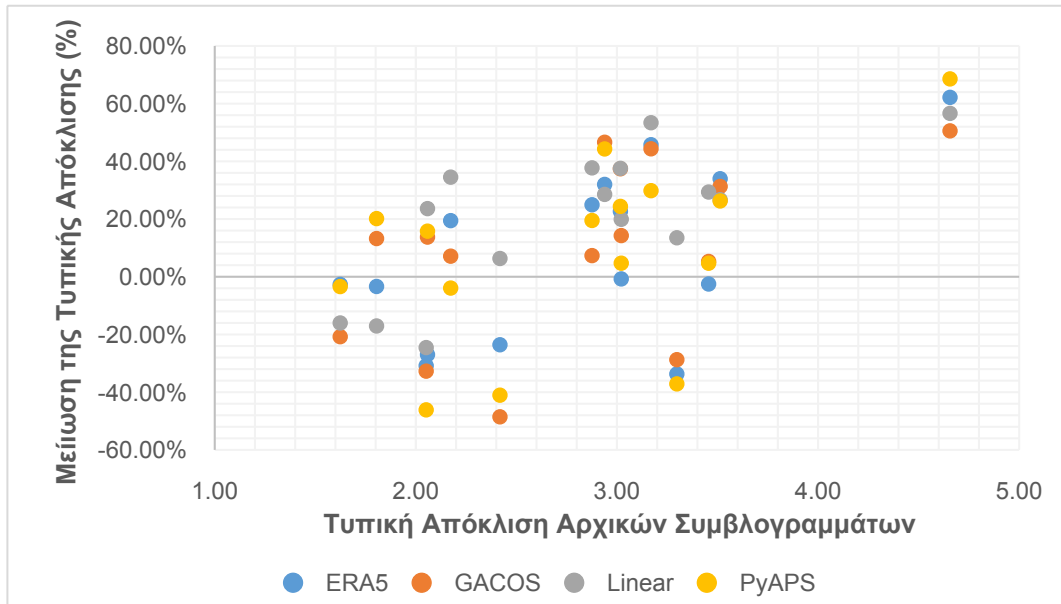
Επίσης, παρατηρείται, ότι μόνο στο 40% των συμβολογραμμάτων η τυπική απόκλιση μειώνεται με όλες τις μεθόδους, στο 13% η τυπική απόκλιση δεν μειώνεται με καμία μέθοδο, ενώ στο 47% η τυπική απόκλιση μειώνεται σε κάποιες μεθόδους και σε κάποιες όχι. Άρα, έχουμε βελτίωση στην πιθανότητα να διορθωθεί με θετική μείωση της τυπικής απόκλισης αν η διόρθωση γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης.

Φαίνεται, λοιπόν, ότι η μέθοδος Linear δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους εάν η διόρθωση γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης, για τα περισσότερα συμβολογράμματα πλην τριών συμβολογραμμάτων. Στα συμβολογράμματα αυτά - συμβολογράμματα 20160930-20161117, 20161012-20161105, 20161117-20161129 - εξετάζουμε τα διαγράμματα φάσης-υψομέτρου (βλ. Κεφάλαιο 4.2.1) και παρατηρούμε ότι είναι τα μοναδικά συμβολογράμματα όπου η καμπύλη φάσης-υψομέτρου έχει περίπου μηδενική κλίση (Σχήμα 21).



Σχήμα 21: Βέλτιστες ευθείες (μαύρη και κόκκινη ευθεία) και καμπύλη των σημείων του μέσου όρου φάσης ανά 1 μέτρο (μπλε καμπύλη) για τα συμβολογράμματα 20160930-20161117, 20161012-20161105, 20161117-20161129.

Άρα, η φάση των συμβολογραμμάτων 20160930-20161117, 20161012-20161105, 20161117-20161129 δεν σχετίζεται με την ατμόσφαιρα, εφόσον η φάση δεν μεταβάλλεται με το υψόμετρο αλλά παραμένει σταθερή. Επίσης, φαίνεται ότι τα τρία αυτά συμβολογράμματα πριν την διόρθωση έχουν τις χαμηλότερες τιμές τυπικής απόκλισης από όλα τα δεδομένα (Σχήμα 22), γεγονός που επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι πολύ μικρή σε αυτές τις περιπτώσεις.



Σχήμα 22: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης σε συνάρτηση με την τυπική απόκλιση των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων

5.2.1. Αποτελέσματα Συμβολογραμμάτων ανά Υψόμετρο

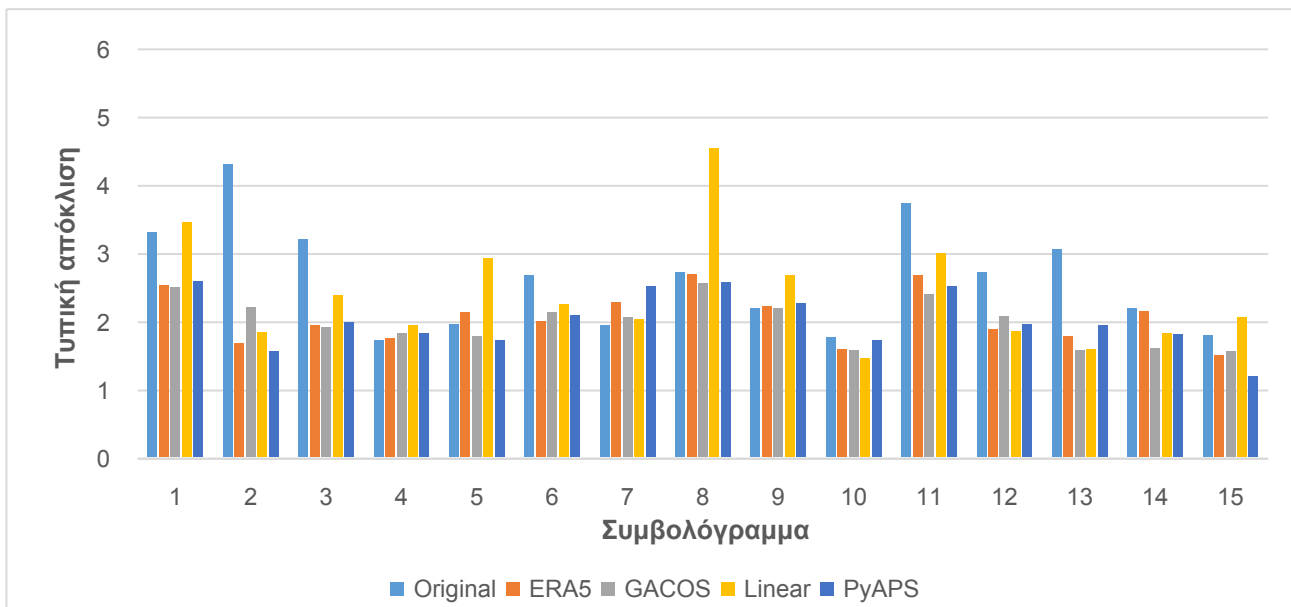
Η ατμόσφαιρα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο. Συγκεκριμένα, η σχέση της ατμοσφαιρικής φάσης και του υψομέτρου θα έπρεπε να είναι γραμμική. Όμως, όταν αναλύθηκε η σχέση αυτή με τις καμπύλες φάσης-υψομέτρου των συμβολογραμμάτων, παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά της ατμοσφαιρικής φάσης σε πολλές περιπτώσεις διαφοροποιείται μετά από ένα υψόμετρο, το οποίο είναι περίπου στα 500 μ.

Είναι λοιπόν θεμιτό να διερευνηθεί η συμπεριφορά της διόρθωσης της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης σε δύο περιοχές:

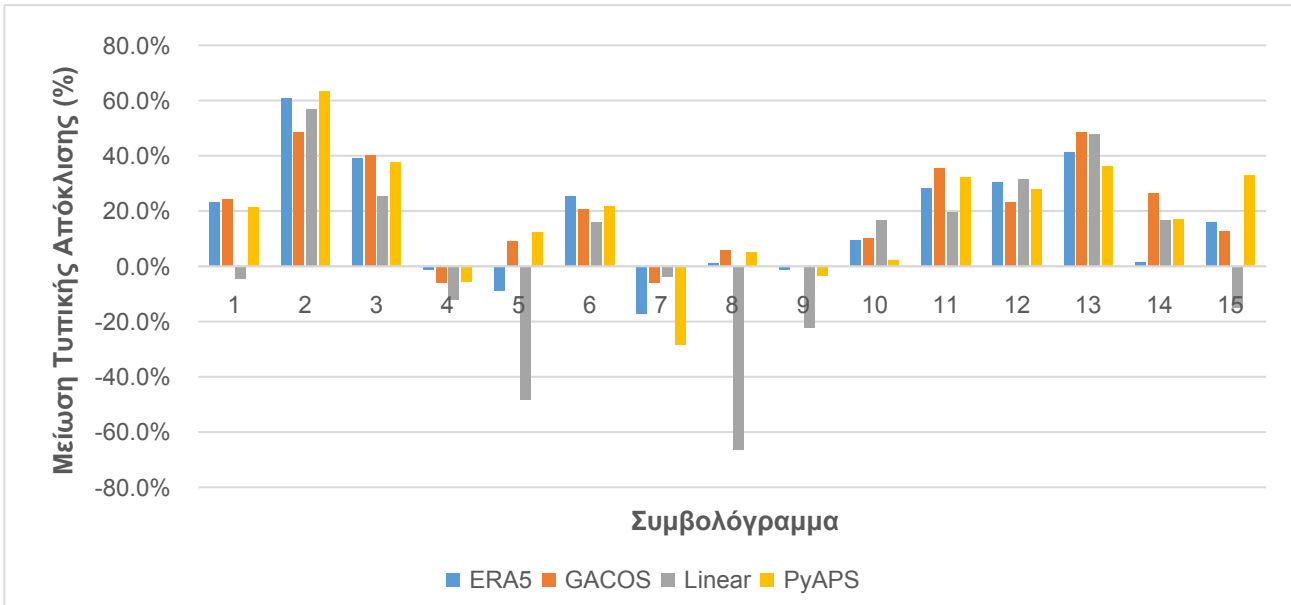
- ορεινές περιοχές, δηλαδή τα εικονοστοιχεία με υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.
- πεδινές περιοχές, δηλαδή τα εικονοστοιχεία με υψόμετρο μικρότερο των 500

Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι ξεκάθαρο αν η διαφοροποίηση αυτή που συναντάται στη καμπύλη φάσης-υψομέτρου οφείλεται στα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, ή στη θέση της περιοχής (π.χ. υγρασία που έρχεται από τους θαλάσσιους όγκους) ή από την ανθρώπινη δραστηριότητα (αγροτικές και αστικές) που είναι πιο έντονη στις πεδινές περιοχές.

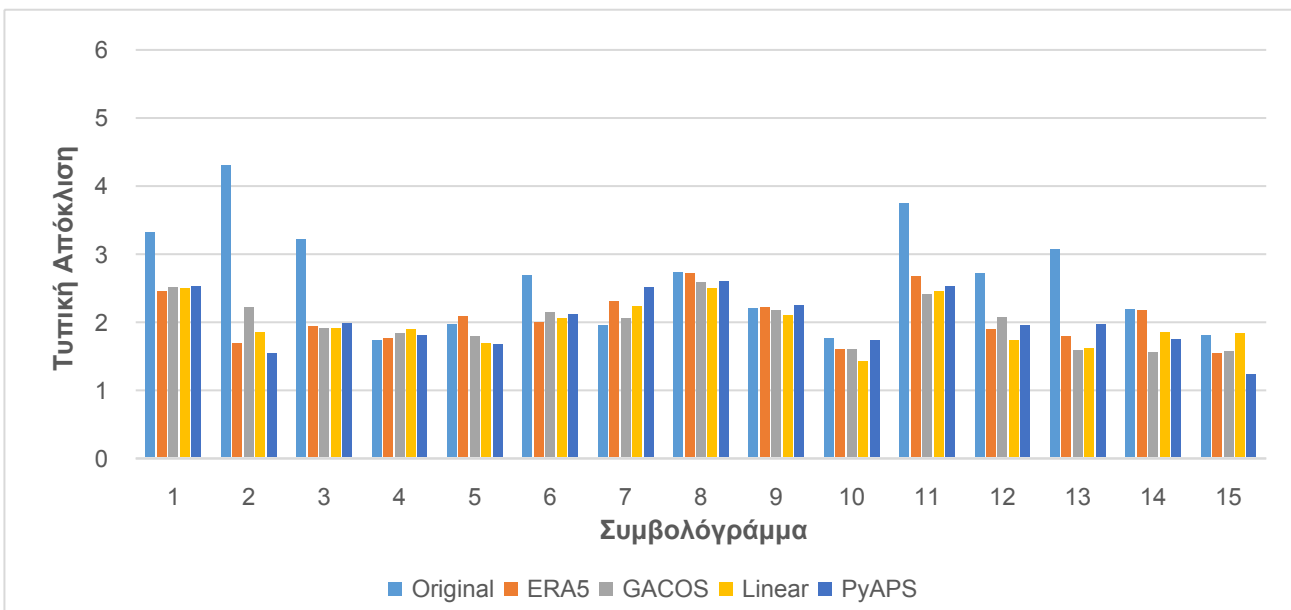
Αρχικά, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση και το ποσοστό μείωσης της τυπικής απόκλισης για όλες τις μεθόδους πριν και μετά την αποκατάσταση της φάσης για τις **ορεινές περιοχές** (Σχήμα 23, Σχήμα 24, Σχήμα 25, Σχήμα 26).



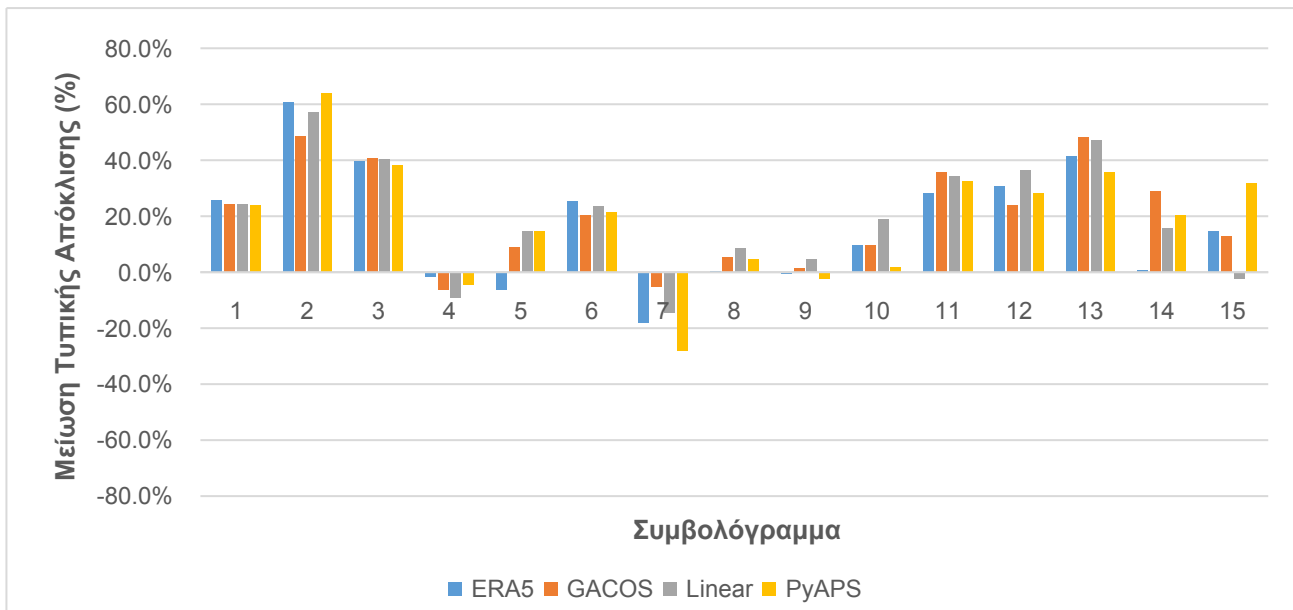
Σχήμα 23: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.



Σχήμα 24: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.

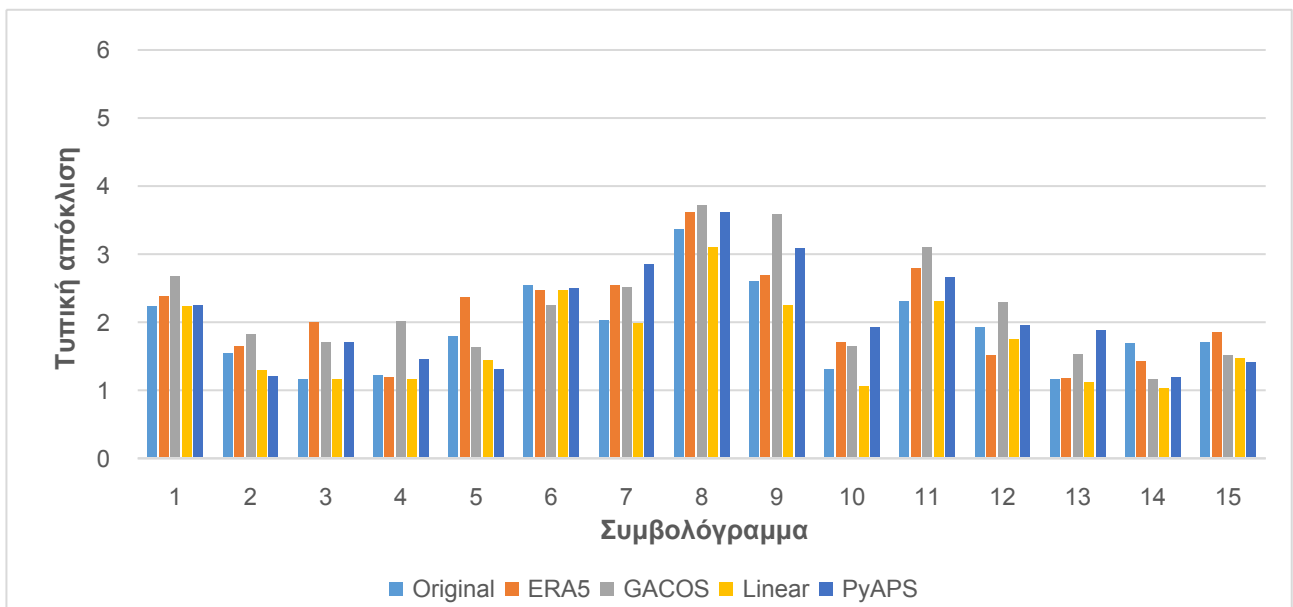


Σχήμα 25: Τυπική απόκλιση των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.

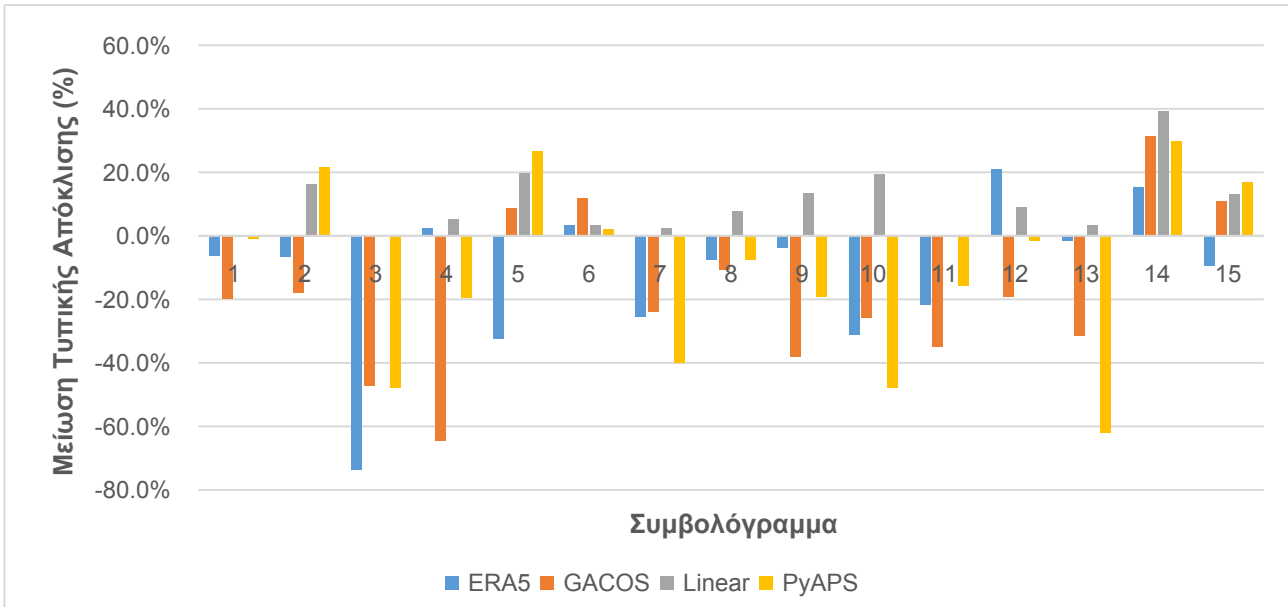


Σχήμα 26: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μεγαλύτερο των 500 μ.

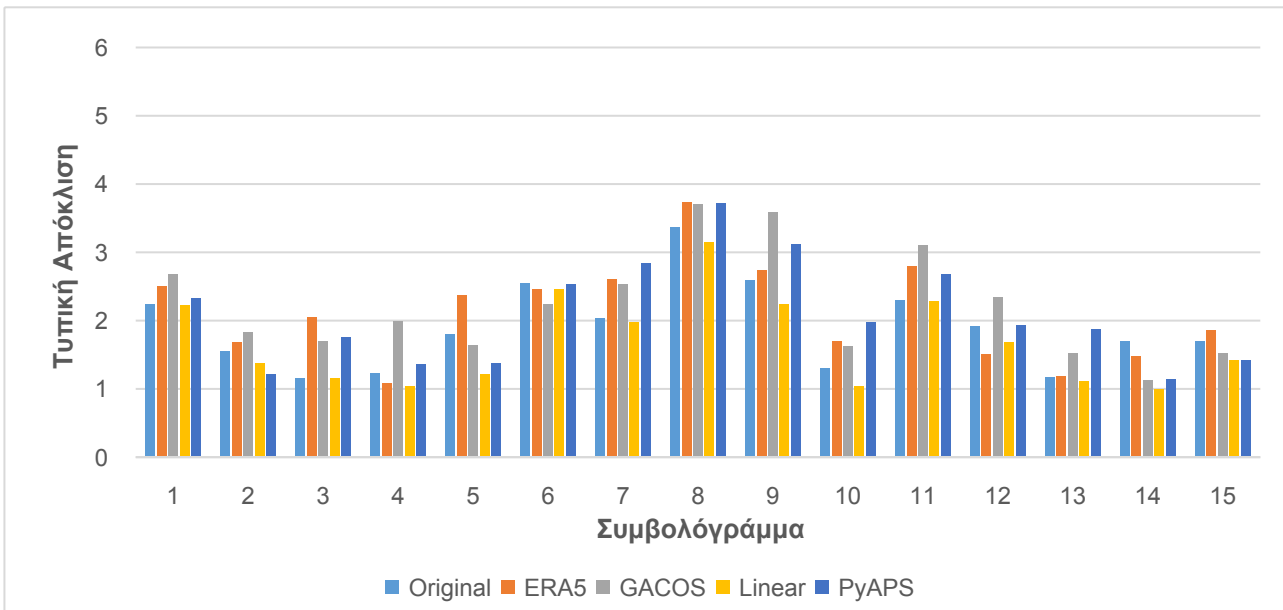
Στην συνέχεια, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση και το ποσοστό μείωσης της τυπικής απόκλισης για όλες τις μεθόδους πριν και μετά την αποκατάσταση της φάσης για τις **πεδινές περιοχές** (Σχήμα 27, Σχήμα 28, Σχήμα 29, Σχήμα 30).



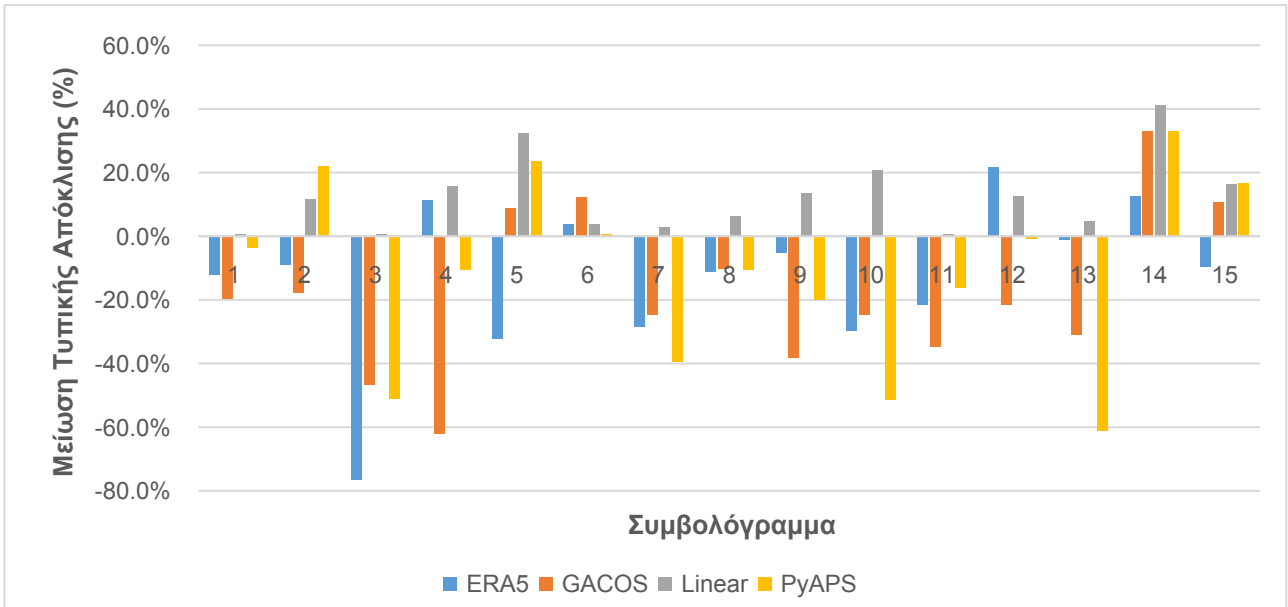
Σχήμα 27: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.



Σχήμα 28: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.

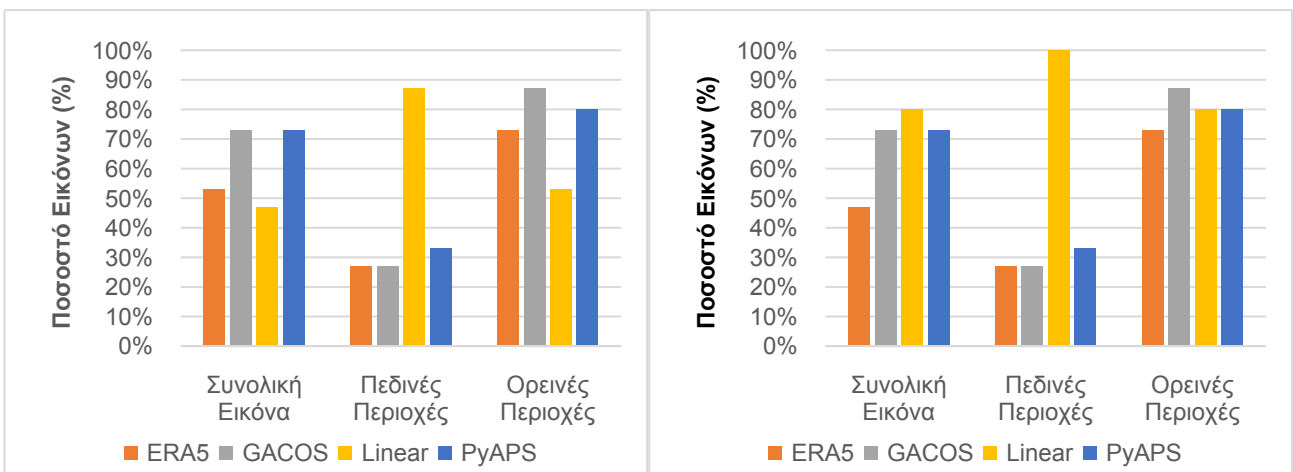


Σχήμα 29: Τυπική απόκλιση συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.



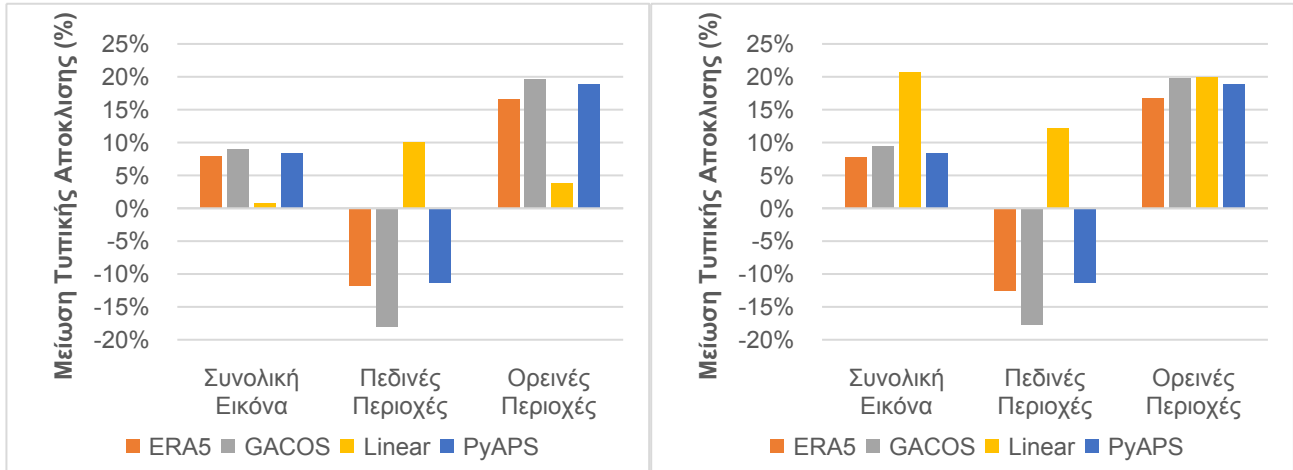
Σχήμα 30: Μείωση τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση φάσης για υψόμετρο μικρότερο των 500 μ.

Το ποσοστό των εικόνων στις οποίες η τυπική απόκλιση βελτιώνεται φαίνεται να είναι σημαντικά υψηλότερο στις ορεινές περιοχές σε σχέση με τις πεδινές για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS, ενώ για την μέθοδο Linear είναι υψηλότερο στις πεδινές περιοχές. Επίσης, όπως είχε παρατηρηθεί προηγουμένως, όταν η εφαρμογή της διόρθωση γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης σε σχέση με τα όταν γίνεται μετά τα αποτελέσματα για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS παραμένουν σταθερά αλλά για την μέθοδο Linear παρατηρείται βελτίωση. (Σχήμα 31)



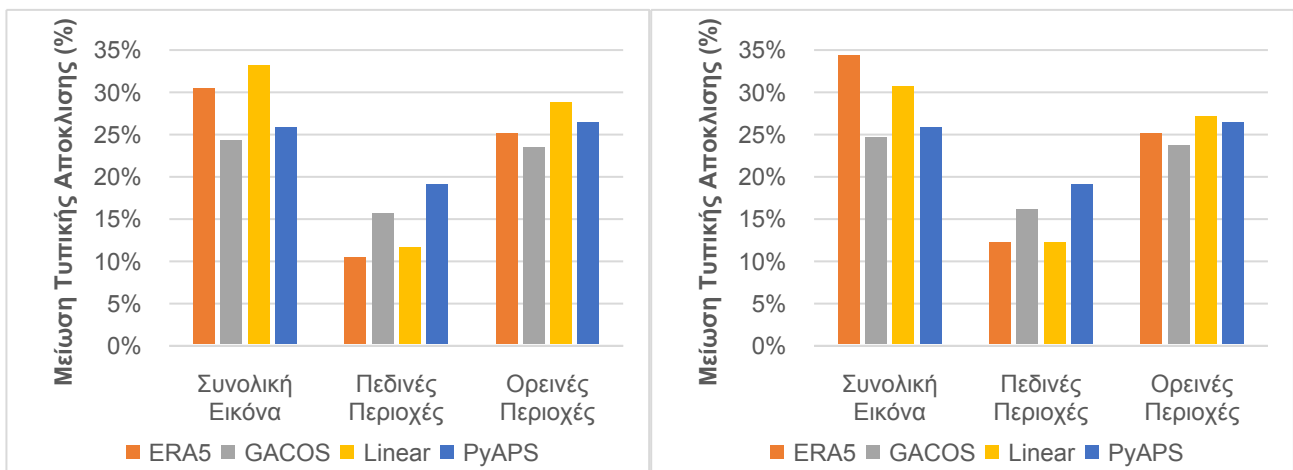
Σχήμα 31: Ποσοστό εικόνων στις οποίες η τυπική απόκλιση βελτιώνεται μετά την διόρθωση, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).

Φαίνεται, λοιπόν, ότι η μέση τιμή της μείωσης της τυπικής απόκλισης είναι αρνητική για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS στις πεδινές περιοχές και θετική στις ορεινές, ενώ για την Linear μέθοδο είναι θετική και στις δύο περιοχές. Όταν η εφαρμογή της διόρθωσης γίνει πριν την αποκατάσταση της φάσης παρατηρείται βελτίωση στα αποτελέσματα στην μέθοδο Linear η οποία είναι σχετικά μικρή στις πεδινές περιοχές και σημαντικά μεγαλύτερη στις ορεινές. (Σχήμα 32)



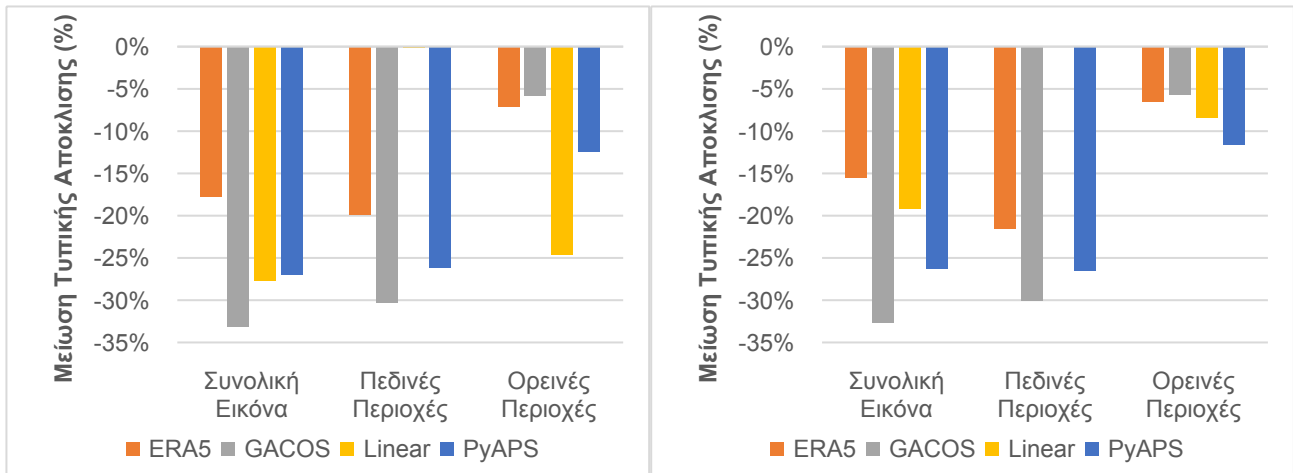
Σχήμα 32: Ποσοστό μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).

Πιο συγκεκριμένα, για τη θετική μείωση της τυπικής απόκλισης φαίνεται ότι για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS η τιμή είναι σημαντικά πιο χαμηλή στις πεδινές από τις ορεινές. Οπότε, οι μέθοδοι αυτοί όχι μόνο έχουν μικρότερη πιθανότητα να βελτιώσουν την εικόνα μιας πεδινής περιοχής, αλλά ακόμα και να την διορθώσουν, θα δώσουν μικρό ποσοστό βελτίωσης, σε σχέση με την εικόνα μιας ορεινής περιοχής. Στην μέθοδο Linear παρατηρείται, επίσης, μεγαλύτερη βελτίωση στις ορεινές περιοχές σε σχέση με τις πεδινές. Τα αποτελέσματα με τη μέθοδο Linear είναι παρόμοια για τις εικόνες που παρουσιάζει θετική μείωση της τυπικής απόκλισης όταν η διόρθωση γίνει πριν ή μετά την αποκατάσταση. (Σχήμα 33)



Σχήμα 33: Ποσοστό θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).

Σε αντίθεση, η τιμή της αρνητικής μείωσης της τυπικής απόκλισης (χειρότερο αποτέλεσμα) για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS είναι μεγαλύτερη στις πεδινές περιοχές σε σχέση με τις ορεινές, ενώ στην Linear είναι πάρα πολύ μικρή στις πεδινές περιοχές και μεγαλύτερη στις ορεινές (Σχήμα 34).

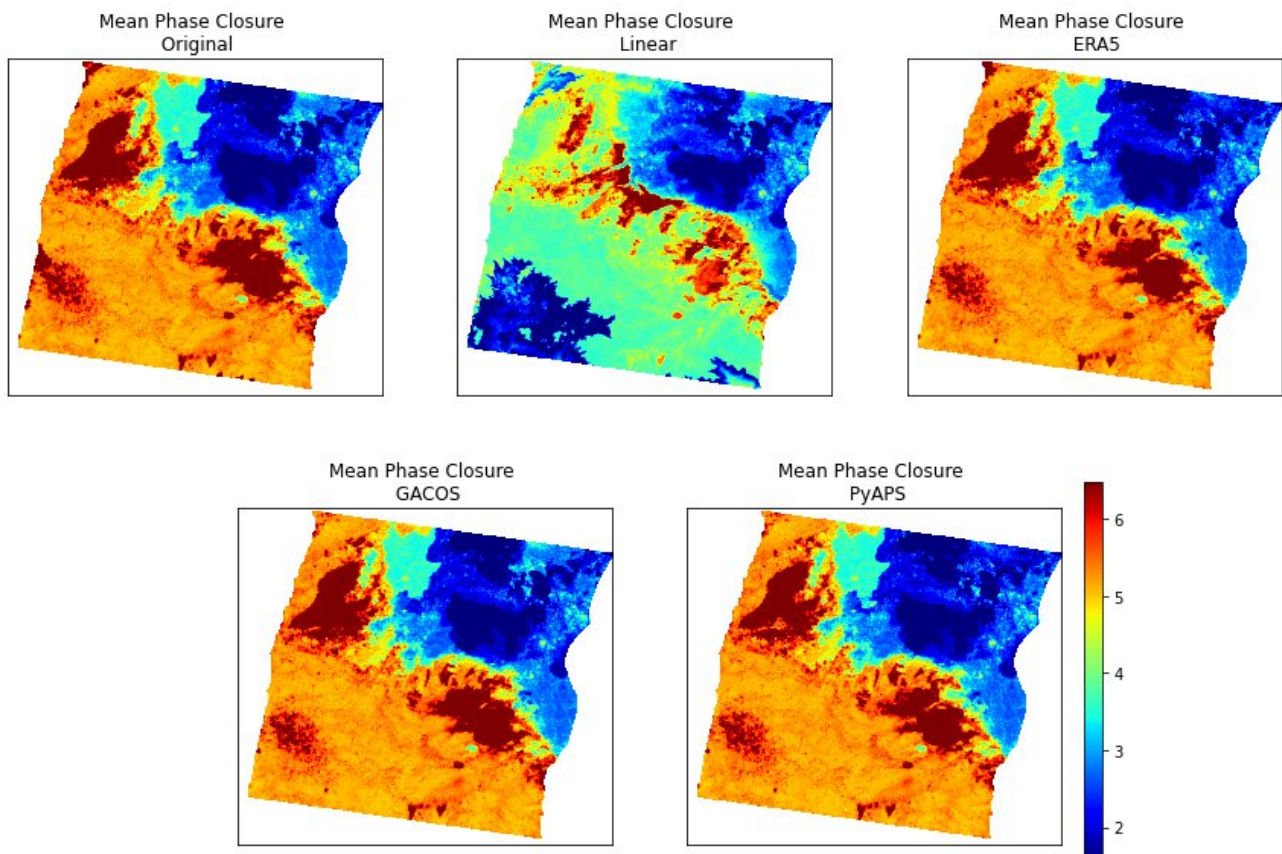


Σχήμα 34: Ποσοστό αρνητικής μείωσης της τυπικής απόκλισης, όταν η διόρθωση εφαρμόζεται μετά την αποκατάσταση της φάσης (αριστερά) και όταν εφαρμόζεται πριν (δεξιά).

5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΑΣΗΣ ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ

Για τον αξιολόγηση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής διόρθωσης στην αποκατάσταση της φάσης υπολογίζεται η φάση κλεισίματος για όλες τις πιθανές τριπλέτες των διορθωμένων συμβολογραμμάτων, όπου η διόρθωση υλοποιείται πριν την αποκατάσταση της φάσης.

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 10) παρουσιάζει την μέση τιμή φάσης κλεισίματος για κάθε μέθοδο. Κάθε ρικελ της κάθε εικόνας υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των τιμών των αντίστοιχων ρικελ από τις 20 εικόνες της φάσης κλεισίματος που κατασκευάζονται για κάθε μέθοδο. Όλες οι εικόνες της φάσης κλεισίματος παρατίθενται στο παράρτημα III.

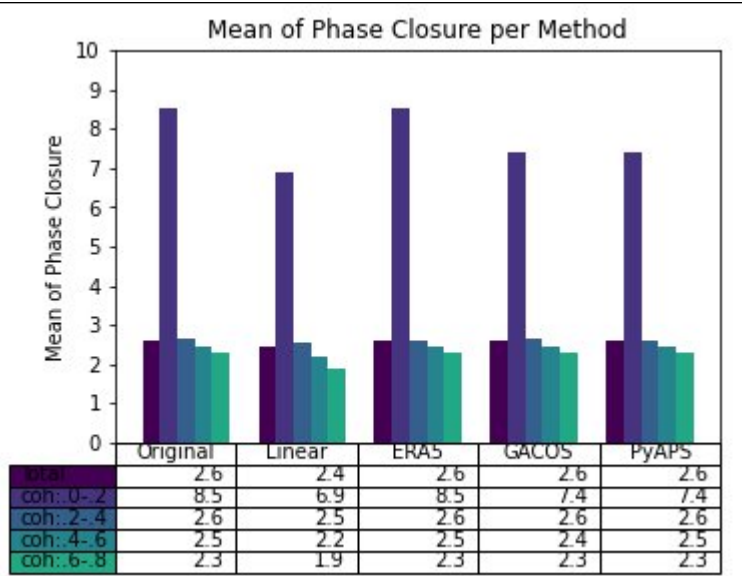
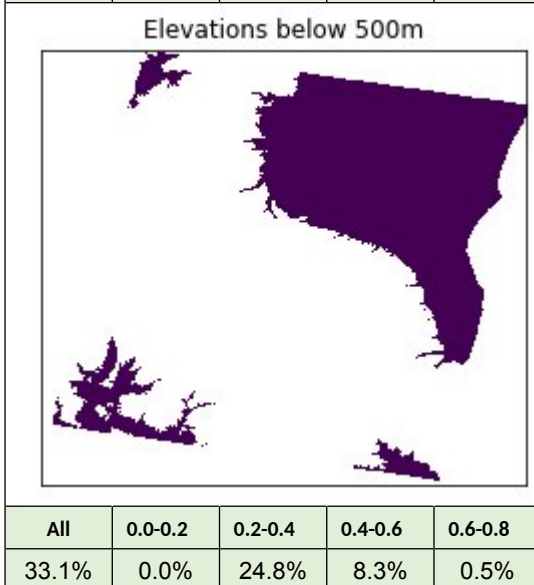
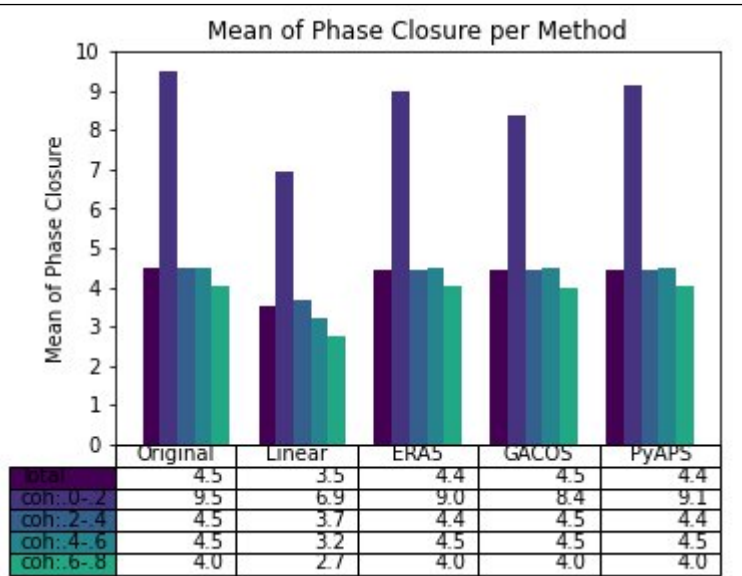
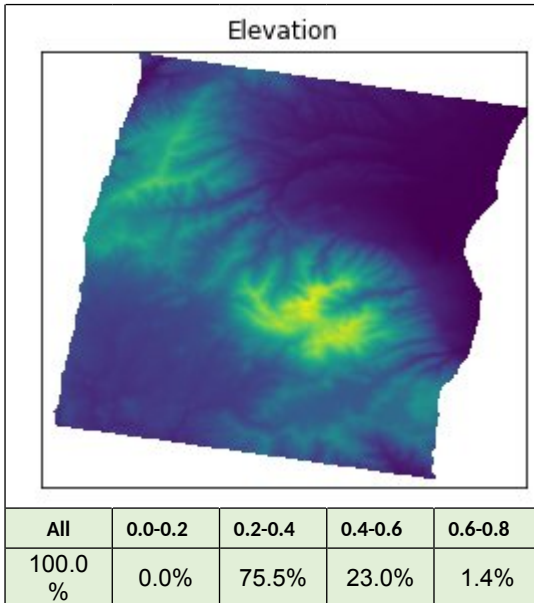


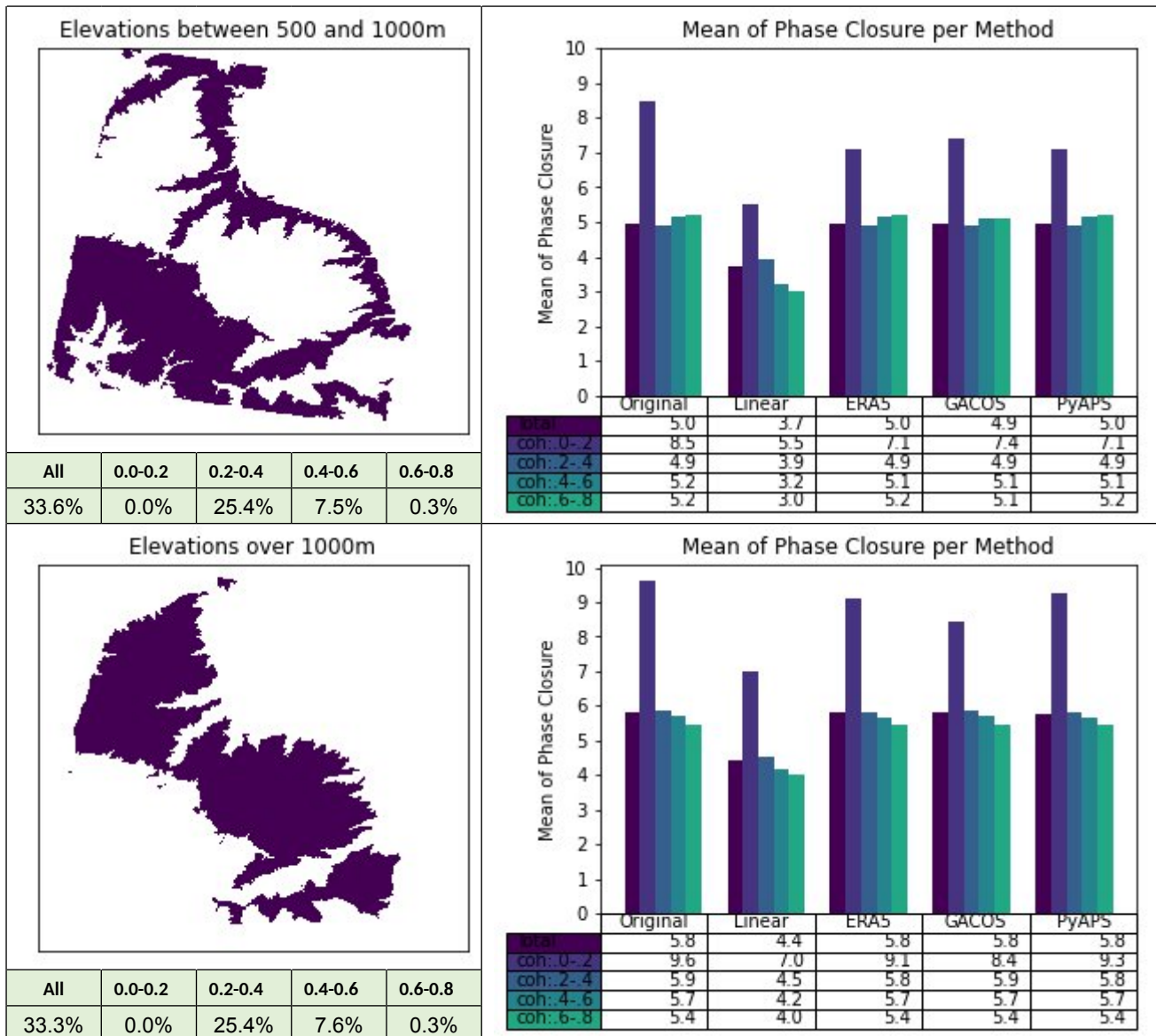
Εικόνα 10: Μέση τιμή Φάση Κλεισίματος

Παρατηρείται ότι η τιμή της φάσης για την μέθοδο Linear δείχνει σημαντική μείωση, όμως στις υπόλοιπες μεθόδους φαίνεται να μην υπάρχουν μεταβολές από την αρχική απεικόνιση. Επίσης, φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση της φάσης κλεισίματος και του υψομέτρου.

Ως εκ τούτου, η χωρική μέση τιμή όλων των εικόνων μέσης τιμής της φάσης κλεισίματος υπολογίστηκε για τα μη διορθωμένα και τα διορθωμένα (τέσσερις μέθοδοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης) συμβολογράμματα σε τέσσερα επίπεδα υψομέτρου:

- Για όλα τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης.
- Για υψόμετρα κάτω από 500 μ. (χαμηλά υψόμετρα)
- Για υψόμετρα από 500 μέχρι 1000 μ. (μεσαία υψόμετρα)
- Για υψόμετρα πάνω από 1000 μ. (υψηλά υψόμετρα)





Σχήμα 35: Μέση τιμή της φάσης κλεισίματος ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου

Παρατηρείται ότι:

- Η φάση κλεισίματος μειώνεται στην μέθοδο Linear ενώ στις υπόλοιπες παραμένει σταθερή ή έχει μικρή (αμελητέα) μείωση.
- Η φάση κλεισίματος αυξάνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο.
- Η φάση κλεισίματος μειώνεται όσο μεγαλώνει η συνάφεια φάσης. Γεγονός αναμενόμενο, καθώς, λόγω της φύσης της φάσης κλεισίματος η τιμή της εξαρτάται από την αποσυσχέτιση της φάσης και από τα σφάλματα της διαδικασίας αποκατάστασης, τα οποία είναι μεγαλύτερα όταν η συνάφεια είναι υψηλότερη. Επίσης, για τιμές συνάφειας μικρότερες 0.2 η φάση κλεισίματος είναι σημαντικά υψηλότερη και θα μπορούσε να αφαιρεθεί, όμως τα ρικελ με τιμή συνάφειας μικρότερη του 0.2 είναι ελάχιστα άρα δεν έχουν μεγάλο βάρος στη μέση τιμή.

Το ποσοστό μείωσης της φάσης υπολογίζεται όπως και στην περίπτωση της τυπικής απόκλισης:

$$\frac{\varphi_o - \varphi_c}{\varphi_o}$$

Όπου, φ_o η φάση κλεισίματος των μη διορθωμένων συμβολογραμμάτων και φ_c η φάση κλεισίματος των διορθωμένων συμβολογραμμάτων. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 13) παρουσιάζει τη μείωση της μέσης τιμής της φάσης κλεισίματος ανά κατηγορία υψόμετρου και μέθοδο διόρθωσης:

Πίνακας 13: Μείωση της μέσης τιμής της φάσης κλεισίματος ανά κατηγορία υψόμετρου και μέθοδο διόρθωσης.

Κατηγορία Υψόμετρου (μ.)	Original		Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
	Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	
Όλα τα υψόμετρα	4.5	3.5	22.2%	4.4	2.2%	4.5	0.0%	4.4	2.2%	
Κάτω από 500 μ.	2.6	2.4	7.7%	2.6	0.0%	2.6	0.0%	2.6	0.0%	
Από 500 έως 1000 μ.	5	3.7	26.0%	5	0.0%	4.9	2.0%	5	0.0%	
Πάνω από 1000 μ.	5.8	4.4	24.1%	5.8	0.0%	5.8	0.0%	5.8	0.0%	

Επιβεβαιώνεται, λοιπόν ότι η μέση τιμή φάσης κλεισίματος με την μέθοδος Linear παρουσιάζει σημαντική μείωση, ενώ στις υπόλοιπες μεθόδους έχουμε αμελητέες διαφορές.

Ταυτόχρονα, φαίνεται ότι η μείωση δεν είναι ομοιόμορφη σε σχέση με το υψόμετρο, αλλά σε χαμηλά υψόμετρα η μείωση είναι σημαντικά μικρότερη (7.7%) από τα μεσαία (26.0%) και υψηλά (24.1%) υψόμετρα όπου οι τιμές της μείωσης πλησιάζουν μεταξύ τους με τα μεσαία υψόμετρα να τα πάνε λίγο καλύτερα.

Αυτή η διαφορά στο ποσοστό μείωσης μπορεί να οφείλεται σε χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, καθώς είναι μεγαλύτερη επίδραση της ατμόσφαιρας όσο ανεβαίνουμε σε υψόμετρο και κατά συνέπεια μικρότερη η διόρθωση που μπορεί να επιτευχθεί και μικρότερη η μείωση των σφαλμάτων στη διαδικασία της αποκατάστασης. Επίσης, άλλες παράμετροι που μπορεί να επηρεάζουν τη φάση κλεισίματος και σχετίζονται με το υψόμετρο είναι τα εξής:

η υγρασία του εδάφους που αυξάνεται με τη βροχόπτωση, η οποία είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερα υψόμετρα

Το φύλλωμα των δέντρων σε δασικές εκτάσεις οι οποίες συναντώνται κυρίως σε υψηλά υψόμετρα.

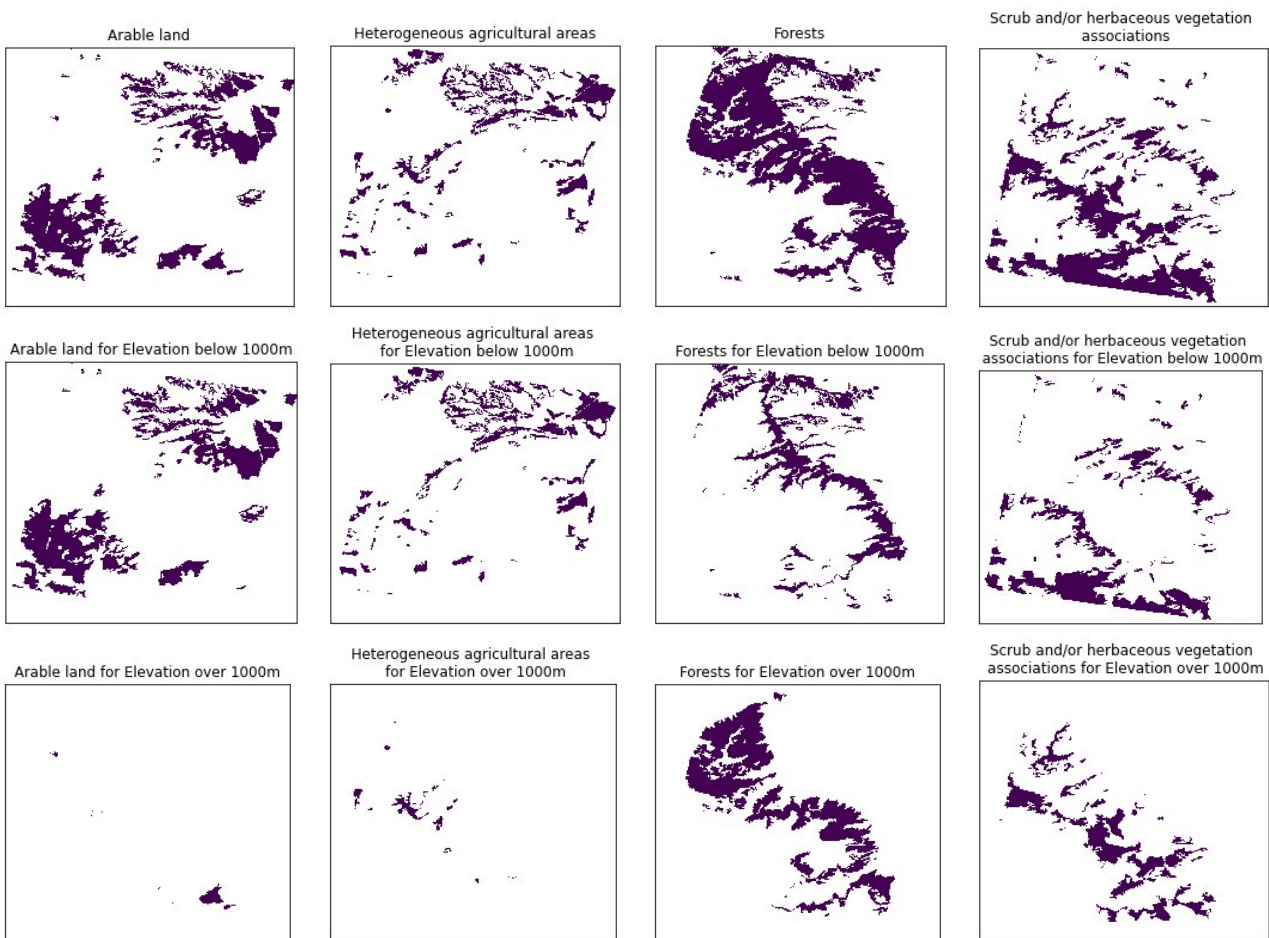
Όμως, και άλλα φαινόμενα, που σχετίζονται με την αλλαγή υψόμετρου, όπως η κλίση, ο παγετός και οι χρήσεις γης, μπορεί να επηρεάζουν τη φάση κλεισίματος.

Στα επόμενα υποκεφάλαια αναλύονται τα αποτελέσματα της φάσης κλεισίματος ανά χρήση γης και κλίση.

5.3.1. Αποτελέσματα Φάσης Κλεισίματος ανά Χρήση/Κάλυψη Γης και Υψόμετρο

Η χρήση/κάλυψη γης μπορεί να επηρεάσει τη φάση του συμβολογράμματος. Επομένως, είναι χρήσιμο να εξεταστεί η μείωση της φάσης κλεισίματος για τις κύριες κατηγορίες χρήσης/κάλυψης γης που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης (Καλλιέργειες, Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις, Δασικές Εκτάσεις, Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστηση).

Καθώς, η φάση κλεισίματος μεταβάλλεται με το υψόμετρο εξετάζεται και η μείωση της φάσης κλεισίματος σε κάθε κατηγορία χρήσης γης και κατηγορία υψομέτρου (χαμηλά υψόμετρα, μεσαία υψόμετρα, υψηλά υψόμετρα).



Σχήμα 36: Κατανομή των κυρίων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης ανά υψόμετρο.

Περιοχές που καλύπτονται από **Καλλιέργειες** εμφανίζονται σε χαμηλά και μεσαία υψόμετρα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14) παρουσιάζονται οι τιμές της φάσης κλεισίματος και το ποσοστό μείωσης της.

Πίνακας 14: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Καλλιέργειες” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψόμετρου.

Κατηγορία Υψόμετρου	Ποσοστό	Original		Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
		Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	
Όλα τα υψόμετρα	20.76%	3.91	2.63	32.8%	3.87	0.9%	3.90	0.3%	3.88	0.8%	
Κάτω από 500 μ.	11.30%	2.67	2.35	12.2%	2.64	1.4%	2.68	-0.2%	2.64	1.2%	
Από 500 έως 1000 μ.	8.86%	5.40	2.91	46.1%	5.36	0.6%	5.36	0.7%	5.36	0.6%	
Πάνω από 1000 μ.	0.60%	5.22	3.73	28.5%	5.22	0.0%	5.22	0.0%	5.22	0.0%	

Στις Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις εμφανίζονται κυρίως σε χαμηλά υψόμετρα και δευτερευόντως σε μεσαία υψόμετρα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 15) παρουσιάζονται οι τιμές της φάσης κλεισίματος και το ποσοστό μείωσης της.

Πίνακας 15: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψόμετρου.

Κατηγορία Υψόμετρου	Ποσοστό	Original		Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
		Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	
Όλα τα υψόμετρα	11.83%	3.36	3.00	10.7%	3.35	0.3%	3.35	0.2%	3.35	0.2%	
Κάτω από 500 μ.	7.41%	2.37	2.51	-5.8%	2.37	0.1%	2.39	-0.8%	2.37	0.0%	
Από 500 έως 1000 μ.	3.39%	4.94	3.80	23.2%	4.91	0.6%	4.89	1.1%	4.92	0.5%	
Πάνω από 1000 μ.	1.03%	5.25	3.89	25.9%	5.24	0.1%	5.23	0.4%	5.26	-0.1%	

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 16) παρουσιάζονται οι τιμές της φάσης κλεισίματος και το ποσοστό μείωσης της για τις περιοχές με Δασικές Εκτάσεις, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό τους βρίσκεται σε υψηλά υψόμετρα και σημαντικά λιγότερο σε χαμηλά και μεσαία υψόμετρα.

Πίνακας 16: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Δασικές Εκτάσεις” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψόμετρου.

Κατηγορία Υψόμετρου	Ποσοστό	Original		Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
		Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	
Όλα τα υψόμετρα	32.36%	5.03	4.47	11.3%	5.01	0.5%	5.03	0.0%	5.01	0.5%	
Κάτω από 500 μ.	4.27%	2.61	2.80	-7.0%	2.60	0.6%	2.56	2.0%	2.59	0.8%	
Από 500 έως 1000 μ.	9.38%	4.46	4.90	-9.7%	4.45	0.3%	4.46	0.1%	4.44	0.5%	
Πάνω από 1000 μ.	18.71%	5.87	4.63	21.1%	5.84	0.6%	5.88	-0.2%	5.84	0.5%	

Στις **Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης** που καλύπτουν κυρίως μεσαία και υψηλά υψόμετρα και δευτερευόντως χαμηλά υψόμετρα υπολογίστηκαν οι τιμές της φάσης κλεισίματος και το ποσοστό μείωσης της και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17).

Πίνακας 17: Μέση τιμή φάσης κλεισίματος (rad) και το ποσοστό μείωσης της (%) για την κατηγορία “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” ανά μέθοδο διόρθωσης και κατηγορία υψομέτρου.

Κατηγορία Υψομέτρου	Ποσοστό	Original		Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
		Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	
Όλα τα υψόμετρα	23.51%	4.97	3.56	28.4%	4.97	0.0%	4.95	0.4%	4.97	0.0%	
Κάτω από 500 μ.	4.04%	3.18	2.42	23.9%	3.18	-0.1%	3.12	1.9%	3.18	0.0%	
Από 500 έως 1000 μ.	9.52%	5.04	3.43	32.1%	5.04	0.1%	5.01	0.6%	5.05	-0.1%	
Πάνω από 1000 μ.	9.95%	5.64	4.15	26.3%	5.64	0.0%	5.64	0.0%	5.63	0.2%	

Οι μέθοδοι **ERA5**, **GACOS**, και **PyAPS**, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζουν **πολύ μικρή (σχεδόν αμελητέα) βελτίωση**, με τις μεθόδους ERA5 και PyAPS να υπερτερούν της GACOS σε όλες τις κατηγορίες εκτός της κατηγορίας “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης”. Πιο συγκεκριμένα:

- Η ERA5 και PyAPS παρουσιάζουν μεγαλύτερη βελτίωση στην κατηγορία “Καλλιέργειες” κυρίως σε χαμηλά υψόμετρα και λιγότερα στα μεσαία, στην κατηγορία “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” φαίνεται να υπάρχει μια μικρή βελτίωση στα μεσαία υψόμετρα, στην κατηγορία “Δασικές εκτάσεις” φαίνεται να υπάρχει μια μικρή βελτίωση στα χαμηλά και υψηλά υψόμετρα, ενώ στην κατηγορία “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” δεν παρατηρείται βελτίωση.
- Η GACOS φαίνεται να βελτιώνει περισσότερο την κατηγορία “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” στα χαμηλά υψόμετρα (που εμφανίζεται πολύ λιγότερο) και λιγότερο στα μεσαία, στην κατηγορία “Καλλιέργειες” φαίνεται να βελτιώνει κάπως στα μεσαία υψόμετρα, στην κατηγορία “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” χειροτερεύει την φάση στα χαμηλά υψόμετρα και την βελτιώνει στα μεσαία, ενώ στην κατηγορία “Δασικές εκτάσεις” υπάρχει βελτίωση στα χαμηλά υψόμετρα.

Για την μέθοδο **Linear**, παρατηρείται, ότι οι η φάση κλεισίματος **μεταβάλλεται σημαντικά** ανάλογα με τη χρήση γης. Οι κατηγορίες “Καλλιέργειες” και “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” έχουν τα καλύτερα ποσοστά μείωσης της φάσης κλεισίματος, 32.8% και 28.4% αντίστοιχα. Ενώ οι κατηγορίες “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” και “Δασικές εκτάσεις” αποδίδουν χαμηλότερα με ποσοστά 10.7% και 11.3% αντίστοιχα. Επίσης, φαίνεται ότι το ποσοστό μείωσης κάθε κατηγορίας διαφέρει σημαντικά στα διάφορα υψόμετρα:

- Στις **Καλλιέργειες**, η φάση βελτιώνεται αλλά όχι δραματικά στα χαμηλά υψόμετρα (12.2%), ενώ στα μεσαία η βελτίωση είναι πολύ σημαντική (46.1%).
- Στις **Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις**, η φάση μειώνεται αρκετά (23.2%) στα μεσαία υψόμετρα αλλά στα χαμηλά αυξάνεται λίγο (-5.8%).
- Στις **Δασικές Εκτάσεις**, η φάση βελτιώνεται αρκετά (21.1%) στα υψηλά υψόμετρα και χειροτερεύει στα χαμηλά και μεσαία (-7.0%, -9.7%)

- Στις **Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης**, η φάση μειώνεται αρκετά σε χαμηλά και υψηλά υψόμετρα (23.9%, 26.3%) και περισσότερο στα μεσαία υψόμετρα (32.1%)

Συμπεραίνεται ότι στη μέθοδο Linear το ποσοστό μείωσης κάθε κατηγορίας διαφέρει σημαντικά στα διάφορα υψόμετρα, αλλά ταυτόχρονα δεν συμπεριφέρεται όπως θα αναμενόταν, βάσει των αποτελεσμάτων της συνολικής εικόνας (μικρό ποσοστό σε χαμηλά υψόμετρα, μεγάλο ποσοστό σε μεσαία και υψηλά υψόμετρα).

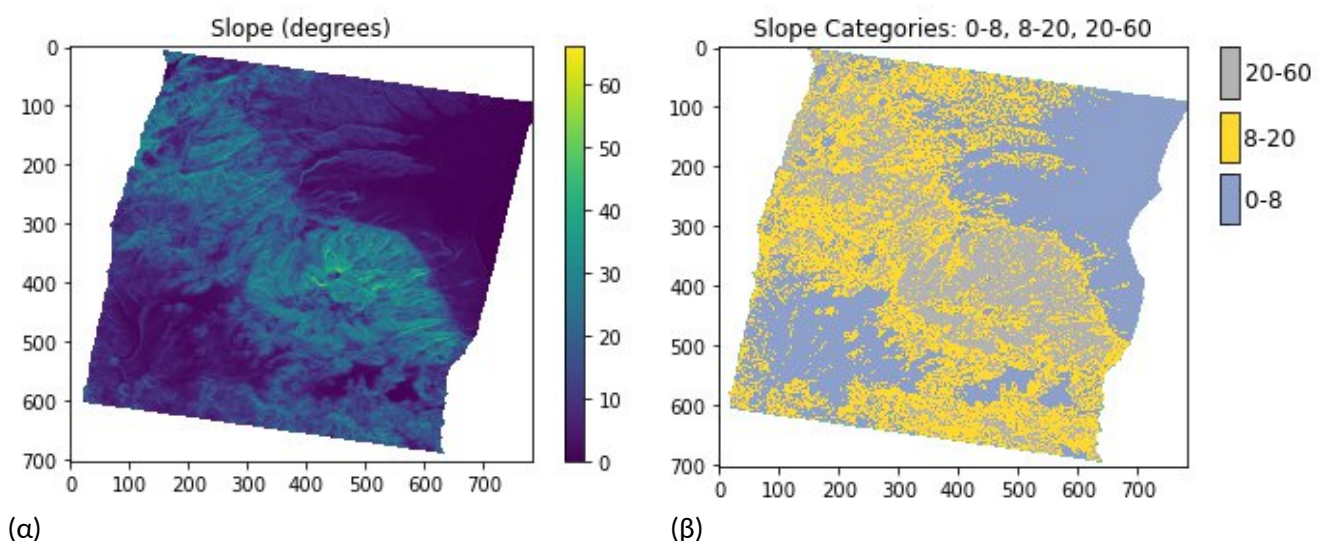
Άρα, η μείωση στη φάση κλεισίματος δείχνει να συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της χρήσης/κάλυψης γης και του υψομέτρου.

5.3.2. Αποτελέσματα Φάσης Κλεισίματος ανά Κλίση και Υψόμετρο

Έντονες κλίσεις μπορεί να οδηγήσουν στην εισαγωγή σφαλμάτων στην συμβολομετρική φάση κατά την διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης. Καθώς, τα σφάλματα που προσδίδει η καθυστέρηση της τροπόσφαιρας προστίθενται στην συμβολομετρική φάση, η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης θα μπορούσε δυνητικά να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερα σφάλματα σε περιοχές με μεγάλη κλίση όταν συνδυάζονται και τα σφάλματα της τροπόσφαιρας.

Στην περιοχή μελέτης παρατηρούνται κλίσεις από 0 μέχρι 60 μοίρες. Χαμηλές τιμές κλίσης συναντώνται σε χαμηλά υψόμετρα και οι υψηλές τιμές συναντώνται σε υψηλά υψόμετρα. (Εικόνα 11α) Για την καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς της φάσης κλεισίματος σχετικά με την κλίση, η κλίση κατηγοριοποιείται σε τρεις κλάσεις (Εικόνα 11β):

- Μικρή κλίση, που κυμαίνεται από 0 μέχρι 8 μοίρες.
- Μεσαία κλίση, που κυμαίνεται από 8 μέχρι 20 μοίρες.
- Μεγάλη κλίση, που κυμαίνεται από 20 μέχρι 60 μοίρες.



Εικόνα 11: Κλίση (α) και Κατηγορίες Κλίσεων (β) στην περιοχή μελέτης

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 18) παρουσιάζει το ποσοστό κάλυψης κάθε κατηγορίας κλίσης στις κατηγορίες υψόμετρου.

Πίνακας 18: Ποσοστό εικονοστοιχείων ανά κατηγορία κλίσης και υψόμετρο.

Κλίση	Ποσοστό Pixel ανά Υψόμετρο			
	<500	500-1000	>1000	Σύνολο
<8	27%	13%	3%	43%
8-20	7%	13%	15%	35%
20-60	1%	6%	15%	22%

Οι τιμές μέσης φάσης κλεισίματος ανά κατηγορία κλίσης, κατηγορία υψόμετρου, και μέθοδο διόρθωσης υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 19, Πίνακας 20, Πίνακας 21):

Πίνακας 19: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μικρή κλίση ανά κατηγορία υψόμετρου και μέθοδο διόρθωσης.

Κατηγορία Υψόμετρου (μ.)	Original	Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
	Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)
Όλα τα υψόμετρα	3.60	2.71	24.5%	3.58	0.6%	3.59	0.2%	3.58	0.5%
Κάτω από 500 μ.	2.42	2.35	2.9%	2.40	0.9%	2.42	-0.1%	2.40	0.8%
Από 500 έως 1000 μ.	5.27	3.05	42.1%	5.25	0.4%	5.24	0.6%	5.25	0.4%
Πάνω από 1000 μ.	5.58	4.14	25.8%	5.57	0.2%	5.59	-0.2%	5.58	0.1%

Πίνακας 20: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μεσαία κλίση ανά κατηγορία υψόμετρου και μέθοδο διόρθωσης.

Κατηγορία Υψόμετρου (μ.)	Original	Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
	Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)
Όλα τα υψόμετρα	4.82	3.85	20.2%	4.82	0.1%	4.81	0.2%	4.82	0.0%
Κάτω από 500 μ.	2.93	2.65	9.5%	2.95	-0.7%	2.91	0.8%	2.95	-0.8%
Από 500 έως 1000 μ.	4.83	3.93	18.6%	4.82	0.2%	4.80	0.6%	4.82	0.2%
Πάνω από 1000 μ.	5.70	4.34	24.0%	5.70	0.2%	5.72	-0.2%	5.70	0.1%

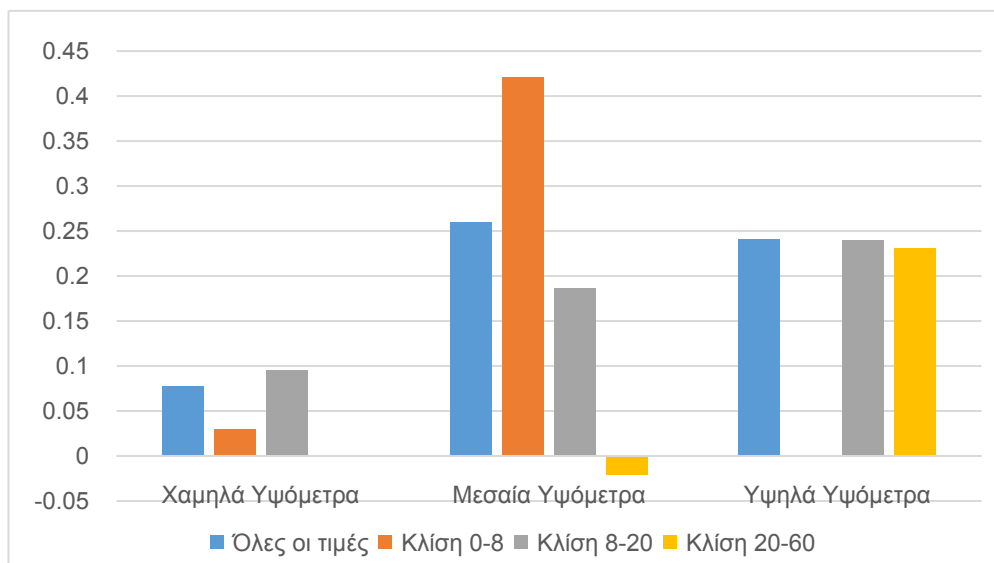
Πίνακας 21: Τιμές μέσης φάσης κλεισίματος και ποσοστό μείωσης της μέσης φάσης κλεισίματος για τα εικονοστοιχεία με μεγάλη κλίση ανά κατηγορία υψόμετρου και μέθοδο διόρθωσης.

Κατηγορία Υψόμετρου (μ.)	Original	Linear		ERA5		GACOS		PyAPS	
	Φάση (rad)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)	Φάση (rad)	Μείωση (%)
Όλα τα υψόμετρα	5.51	4.56	17.3%	5.47	0.8%	5.50	0.2%	5.46	1.0%
Κάτω από 500 μ.	4.29	3.17	26.2%	4.22	1.7%	4.10	4.4%	4.17	2.8%
Από 500 έως 1000 μ.	4.62	4.72	-2.1%	4.60	0.3%	4.61	0.1%	4.60	0.4%
Πάνω από 1000 μ.	5.98	4.60	23.1%	5.92	0.9%	5.98	0.0%	5.91	1.1%

Τα αποτελέσματα για τις μεθόδους ERA5, GACOS, και PyAPS δείχνουν, όπως ήταν αναμενόμενο, μια ελάχιστη βελτίωση. Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι ERA5 και PyAPS αποδίδουν λίγο καλύτερα σε μικρές και μεγάλες κλίσεις, αλλά οι μεταβολές δεν είναι σημαντικές και θεωρούνται αμελητέες.

Σε αντίθεση, η μέθοδος Linear παρουσιάζει σημαντικά μεγάλα ποσοστά μείωση της φάσης κλεισίματος. Η μεγαλύτερη βελτίωση στη μείωση της φάσης παρουσιάζεται στην κατηγορία των μικρών κλίσεων σε μεσαία υψόμετρα (42.1%), ενώ σημαντικές βελτιώσεις παρατηρούνται και στις υψηλές κλίσεις στα υψηλά υψόμετρα (23.1%), και στις μεσαίες κλίσεις στα μεσαία και υψηλά υψόμετρα (18.6%, 24.0%).

Η μείωση της φάσης φαίνεται να μεταβάλλεται λίγο σε σχέση με την κατηγορία κλίσης από 24.5% σε μικρές κλίσεις, σε 20.2% στις μεσαίες, και 17.3% στις μεγάλες κλίσεις. Όμως, όταν εξεταστούν οι κλίσεις σε σχέση με τις κατηγορίες υψομέτρων φαίνεται ότι υπάρχουν μικρές διαφορές στις κατηγορίες χαμηλών και υψηλών υψομέτρων, αλλά παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις κατηγορίες κλίσεων στα μεσαία υψόμετρα (Σχήμα 37). Φαίνεται, λοιπόν, μεγάλη μείωση σε κλίση 0-8, μέτρια μείωση σε κλίση 8-20, και αρνητική μείωση σε κλίση 20-60.



Σχήμα 37: Σύγκριση μείωσης της φάσης κλεισίματος ανάμεσα στις κατηγορίες κλίσεων και τις κατηγορίες υψομέτρων για την μέθοδο Linear.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην μελέτη εξετάστηκαν 15 συμβολογράμματα στην περιοχή του Ολύμπου, Ελλάδα, τα οποία διορθώθηκαν από την τροποσφαιρική καθυστέρηση με δύο μεθόδους, πριν και μετά την αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης, με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης της τροποσφαιρικής φάσης στην διαδικασία αποκατάστασης της φάσης. Η τροποσφαιρική φάση υπολογίστηκε με τέσσερις μεθόδους με σκοπό την μεταξύ τους σύγκριση ως προς την ποιότητα της διόρθωσης που προσφέρουν και την επίδραση τους στην διαδικασία αποκατάστασης της φάσης.

Για την αξιολόγηση των **αποτελεσμάτων της ατμοσφαιρικής διόρθωσης στην συμβολομετρική φάση** υπολογίστηκε η τιμή της τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων. Για συμβολογράμματα που διορθώθηκαν μετά την αποκατάσταση της φάσης, οι μέθοδοι GACOS και PyAPS δίνουν το καλύτερο: (i) ποσοστό μέσης μείωσης της τυπικής απόκλισης και (ii) ποσοστό εικόνων που βελτιώνεται η τυπική απόκλιση, όμως οι μέθοδοι ERA5 και Linear φαίνεται να δίνουν λίγο καλύτερα αποτελέσματα στο ποσοστό μέσης θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων. Για συμβολογράμματα που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση της φάσης, οι μέθοδοι ERA5, GACOS και PyAPS δίνουν όμοια αποτελέσματα με τα αποτελέσματα αν η διόρθωση είχε γίνει μετά την αποκατάσταση. Από την άλλη, τα αποτελέσματα της μεθόδου Linear για το ποσοστό εικόνων που βελτιώνεται η τυπική απόκλιση, το ποσοστό μέσης μείωσης της τυπικής απόκλισης, και το ποσοστό μέσης θετικής μείωσης της τυπικής απόκλισης φαίνεται να βελτιώνονται σημαντικά και να ξεπερνάει τις υπόλοιπες μεθόδους.

Τα αποτελέσματα των συμβολογραμμάτων εξετάστηκαν και ως προς το υψόμετρο της περιοχής που διορθώνουν και παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι ERA5, GACOS και PyAPS δεν είναι κατάλληλες για την διόρθωση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης σε χαμηλά υψόμετρα, ενώ η Linear φαίνεται να είναι κατάλληλη και για πεδινές και για ορεινές περιοχές.

Τέλος, η τιμή μείωσης της τυπικής απόκλισης εξετάστηκε περαιτέρω για την διερεύνηση των μεταβλητών που οδηγούν σε αρνητική ή μικρή μείωση της τυπικής απόκλισης. Συμπεραίνεται ότι η χαμηλή αρχική τιμή της τυπικής απόκλισης των συμβολογραμμάτων (μικρότερη από 3.5 rad) και η χαμηλή τιμή της μέσης συνάφειας φάσης (μικρότερη από 0.35) δείχνουν σχετίζονται με την αποτυχία διόρθωσης της συμβολομετρικής φάσης.

Για την αξιολόγηση των **αποτελεσμάτων της διόρθωσης στην μείωση των σφαλμάτων της διαδικασίας της αποκατάστασης της φάσης** υπολογίστηκε η φάση κλεισίματος για τις τριπλέτες των συμβολογραμμάτων που διορθώθηκαν πριν την αποκατάσταση της φάσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τις μεθόδους ERA5, GACOS και PyAPS δεν παρουσιάζεται βελτίωση ή παρουσιάζεται ελάχιστη/αμελητέα βελτίωση της μέσης τιμής της φάσης κλεισίματος, που σημαίνει ότι η αφαίρεση της ατμοσφαιρικής φάσης δεν οδήγησε στην μείωση των σφαλμάτων κατά την αποκατάσταση της φάσης. Ενώ, για την μέθοδο Linear παρατηρείται βελτίωση, δηλαδή μείωση, της φάσης κλεισίματος και συνεπώς των σφαλμάτων κατά την αποκατάσταση της φάσης.

Η τροποσφαιρική φάση που υπολογίζεται στις μεθόδους ERA5, GACOS και PyAPS υπολογίζεται με την βοήθεια καιρικών αριθμητικών μοντέλων που προσφέρουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, όποτε η φάση που υπολογίζεται έχει να κάνει μόνο με την τροπόσφαιρα. Ενώ, η τροποσφαιρική φάση που υπολογίζεται στην μέθοδο Linear, υπολογίζεται βάσει των τιμών της συμβολομετρικής φάσης με την προϋπόθεση ότι η τιμή της ατμοσφαιρικής φάσης είναι το κύριο σήμα που

περιέχεται στην συμβολομετρική φάση και επειδή κατά την διαδικασία του υπολογισμού γίνεται κάποιου τύπου ομαλοποίηση των τιμών της φάσης ο θόρυβος μειώνεται. Η διαφοροποίηση που συναντάται μεταξύ των αποτελεσμάτων των μεθόδων (ERA5, GACOS, PyAPS με Linear) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για την προκειμένη περιοχή μελέτης δεν είναι εφικτό να βελτιωθεί η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης με την αφαίρεση της τροποσφαιρικής φάσης. Σε αντίθεση όταν εφαρμόζεται η μέθοδος Linear, στην οποία αφαιρείται φάση που περιέχει και άλλα συστατικά πέραν της τροπόσφαιρας, παρουσιάζονται θετικά αποτελέσματα.

Για την περαιτέρω ανάλυση του φαινομένου εξετάστηκε η μείωση της μέσης φάσης κλεισίματος σε σχέση με άλλες μεταβλητές. Οι μέθοδοι ERA5, GACOS, και PyAPS δεν παρουσιάζουν καμία αξιολογημένη μεταβολή στην φάση κλεισίματος, όμως τα αποτελέσματα της μεθόδου Linear φαίνεται να επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες:

- Κατηγορία Υψομέτρου. Η μείωση της φάσης κλεισίματος είναι μεγαλύτερη σε μεσαία και υψηλά υψόμετρα, 26.0% και 24.1% αντίστοιχα, και μικρότερα σε χαμηλά υψόμετρα, 7.7%
- Χρήση/Κάλυψη γης. Οι κατηγορίες “Καλλιέργειες” και “Θαμνώδεις ή/και βοτανώδεις εκτάσεις βλάστησης” έχουν τα καλύτερα ποσοστά μείωσης της φάσης κλεισίματος, 32.8% και 28.4% αντίστοιχα. Ενώ οι κατηγορίες “Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις” και “Δασικές εκτάσεις” αποδίδουν χαμηλότερα με ποσοστά 10.7%.
- Κλίση. Η η φάση κλεισίματος στα χαμηλά και στα υψηλά υψόμετρα φαίνεται να μην διαφέρει σημαντικά σχετικά με την κατηγορία κλίσης. Όμως στα μεσαία υψόμετρα παρουσιάζει μεγάλη βελτίωση σε μικρές κλίσεις, μικρότερη βελτίωση στις μεσαίες κλίσεις και καθόλου βελτίωση τις μεγάλες κλίσεις.

6.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

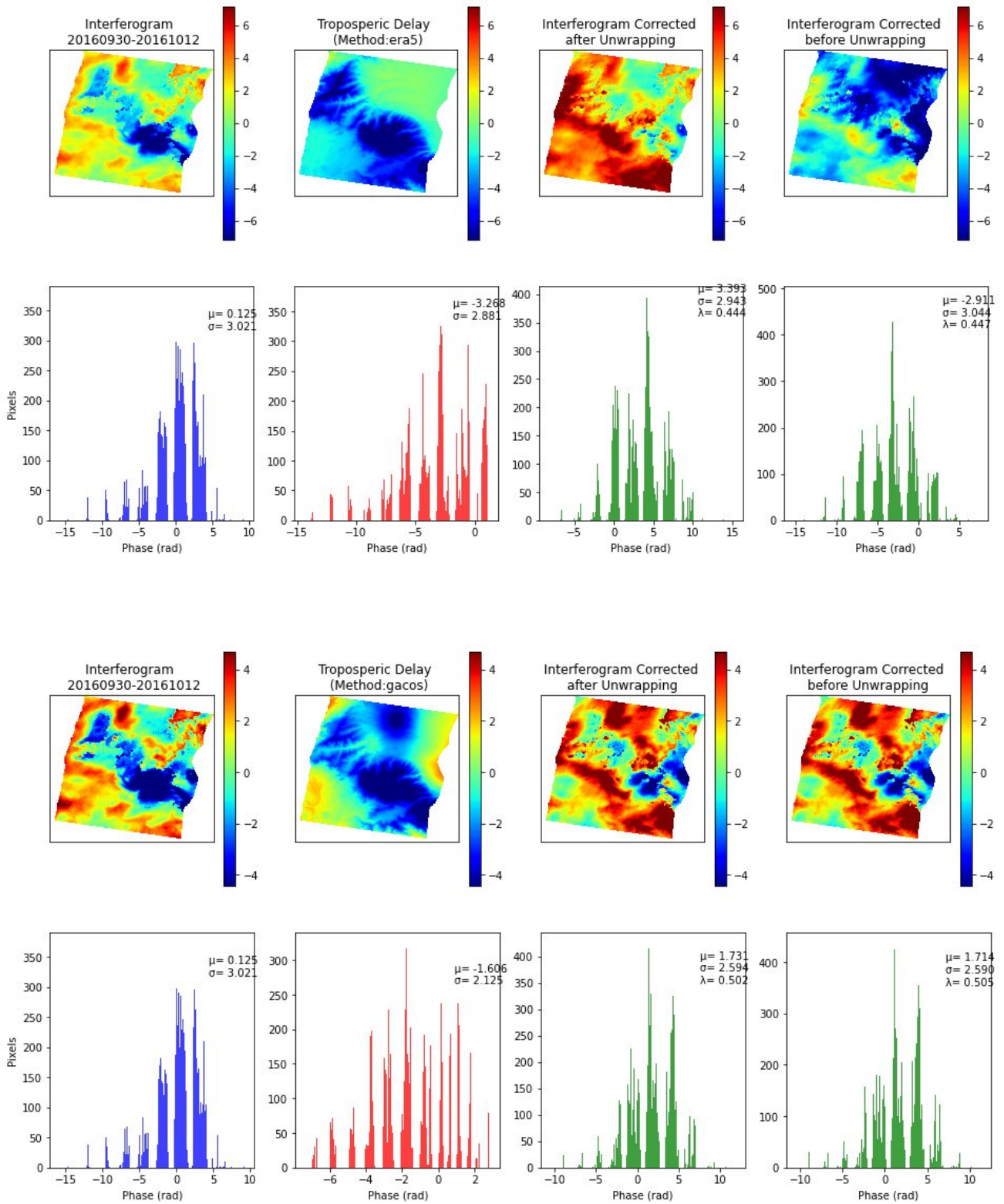
Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την ανάλυση δημιουργούν την ανάγκη περαιτέρω μελέτης για την αποσαφήνιση κάποιων αποτελεσμάτων και την διεύρυνση των ορίων της μελέτης με την εισαγωγή επιπλέον μεταβλητών και δεδομένων για την επιβεβαίωση ή όχι των συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα προτείνεται:

- Εφαρμογή των μεθόδων σε περιοχές με μεγαλύτερα υψόμετρα και πιο έντονες υψομετρικές διαφορές όπου η ατμοσφαιρική καθυστέρηση εισάγει μεγαλύτερα σφάλμα στην συμβολομετρική φάση και ως συνέπεια μπορεί να επηρεάζει την διαδικασία αποκατάσταση της φάσης σε μεγαλύτερο βαθμό.
- Περαιτέρω μελέτη των μεταβλητών που φαίνεται να επηρεάζουν την διόρθωση της τροποσφαιρικής φάσης (καιρικά φαινόμενα, χρήσεις γης, κλίση εδάφους, ανθρώπινη δραστηριότητα) σε σχέση με τον βαθμό της αποσυσχέτισης που δημιουργούν στα συμβολομετρικά ζεύγη με σκοπό να διασαφηνιστούν τα προτερήματα και μειονεκτήματα κάθε μεθόδου διόρθωσης της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.
- Εφαρμογή των μεθόδων σε άλλα κανάλια της μικροκυματικής ακτινοβολίας (π.χ. L band).

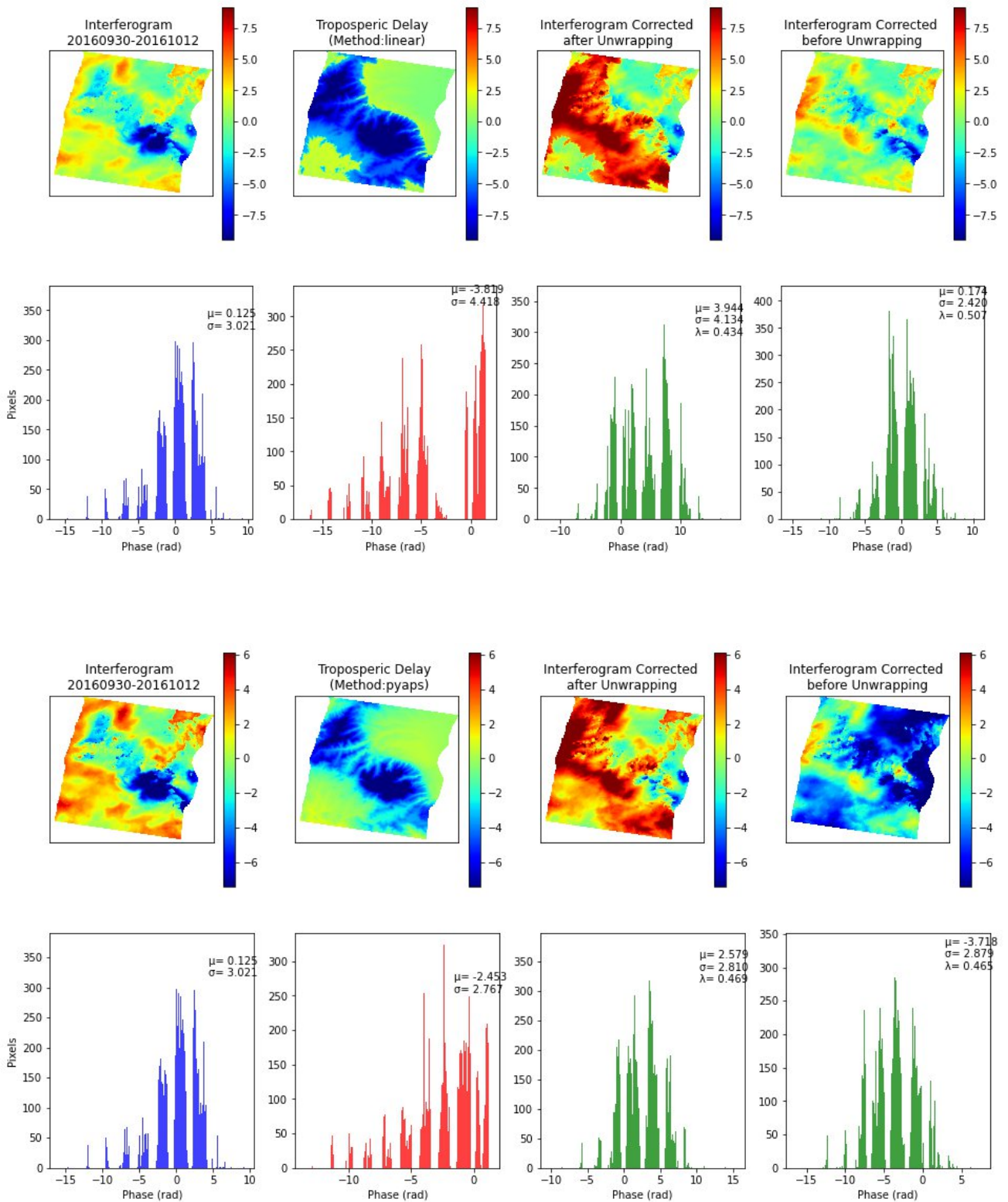
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Διορθωμένη Συμβολογραφμετρική Φάση

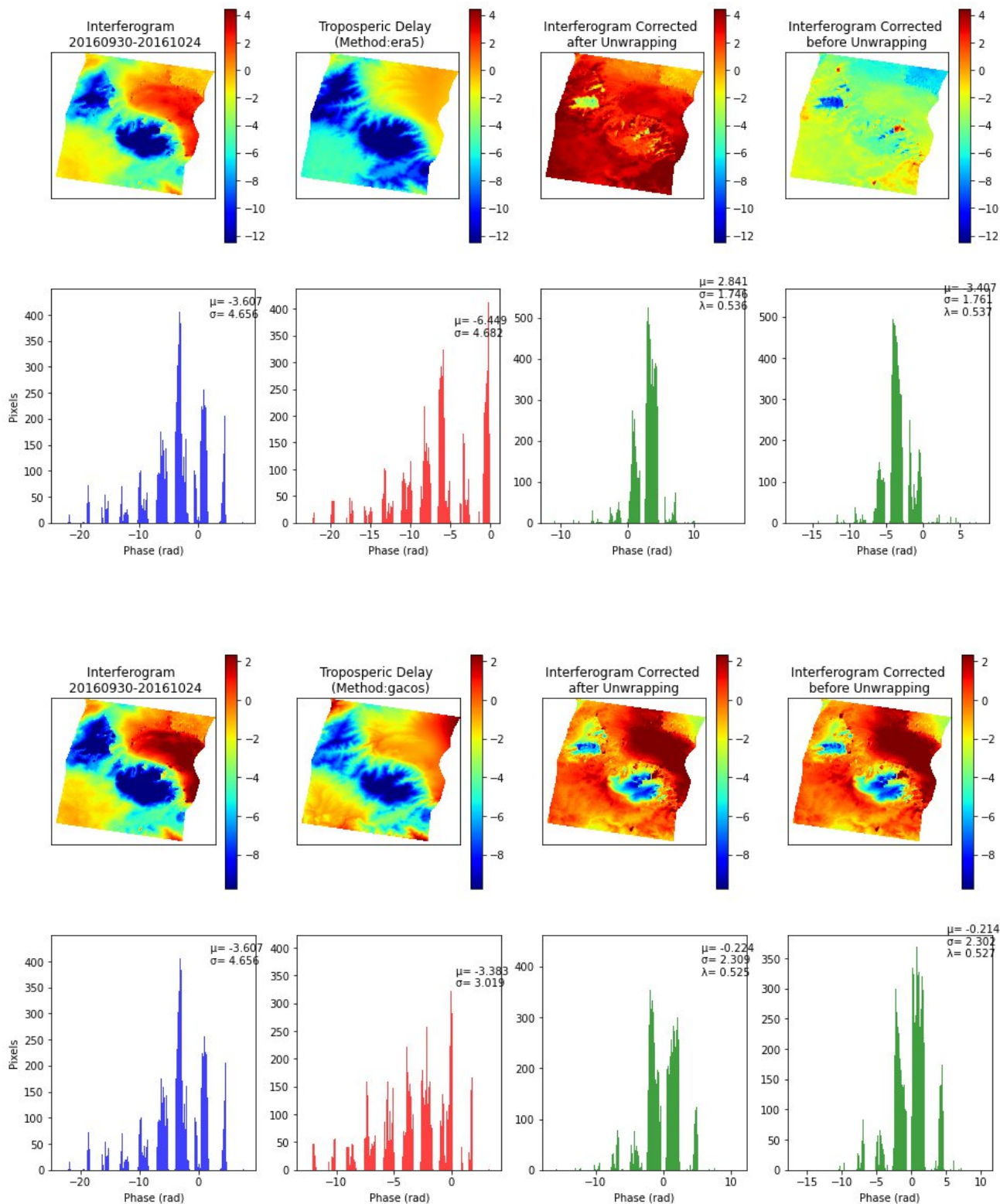
I.I. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση



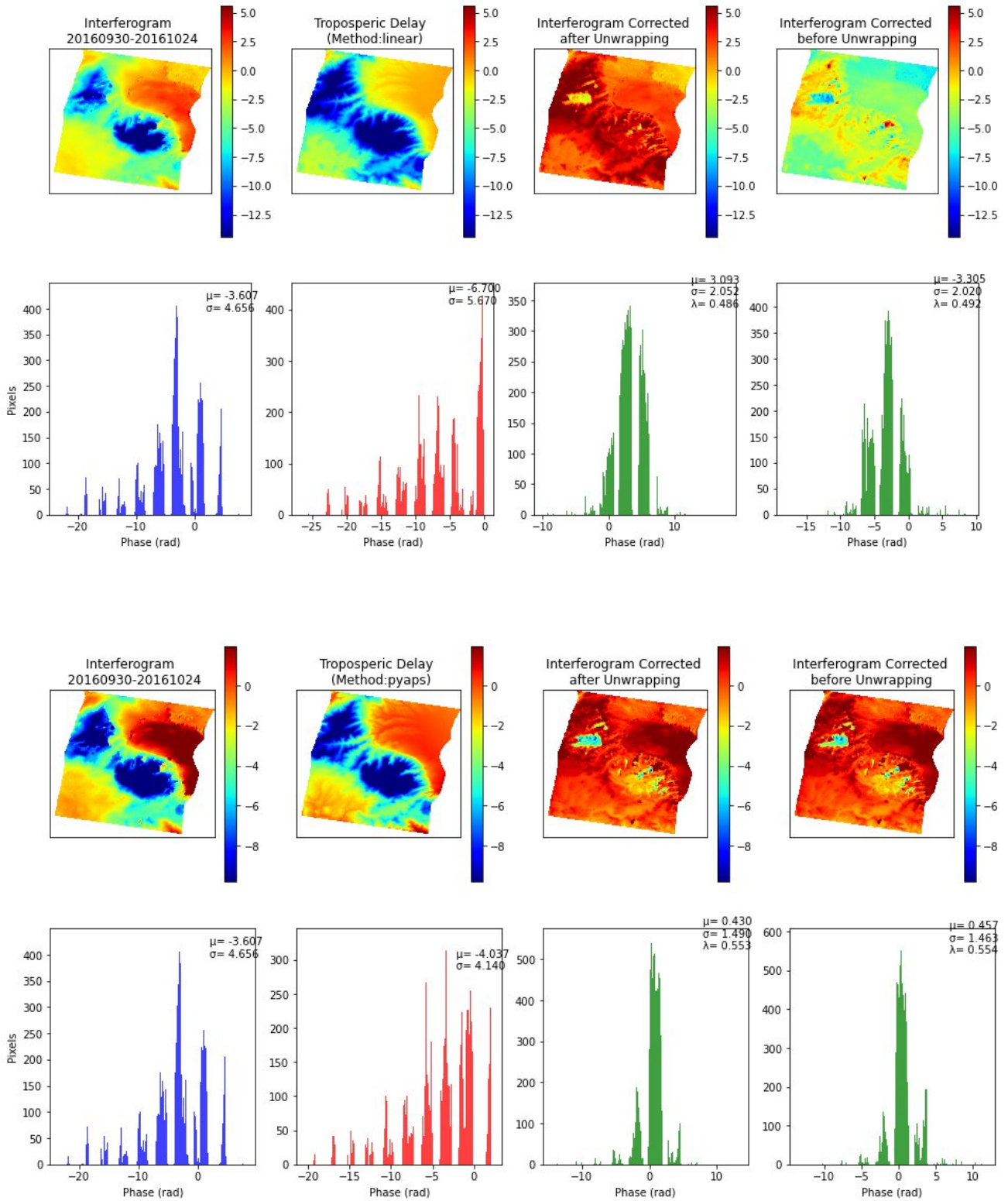
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



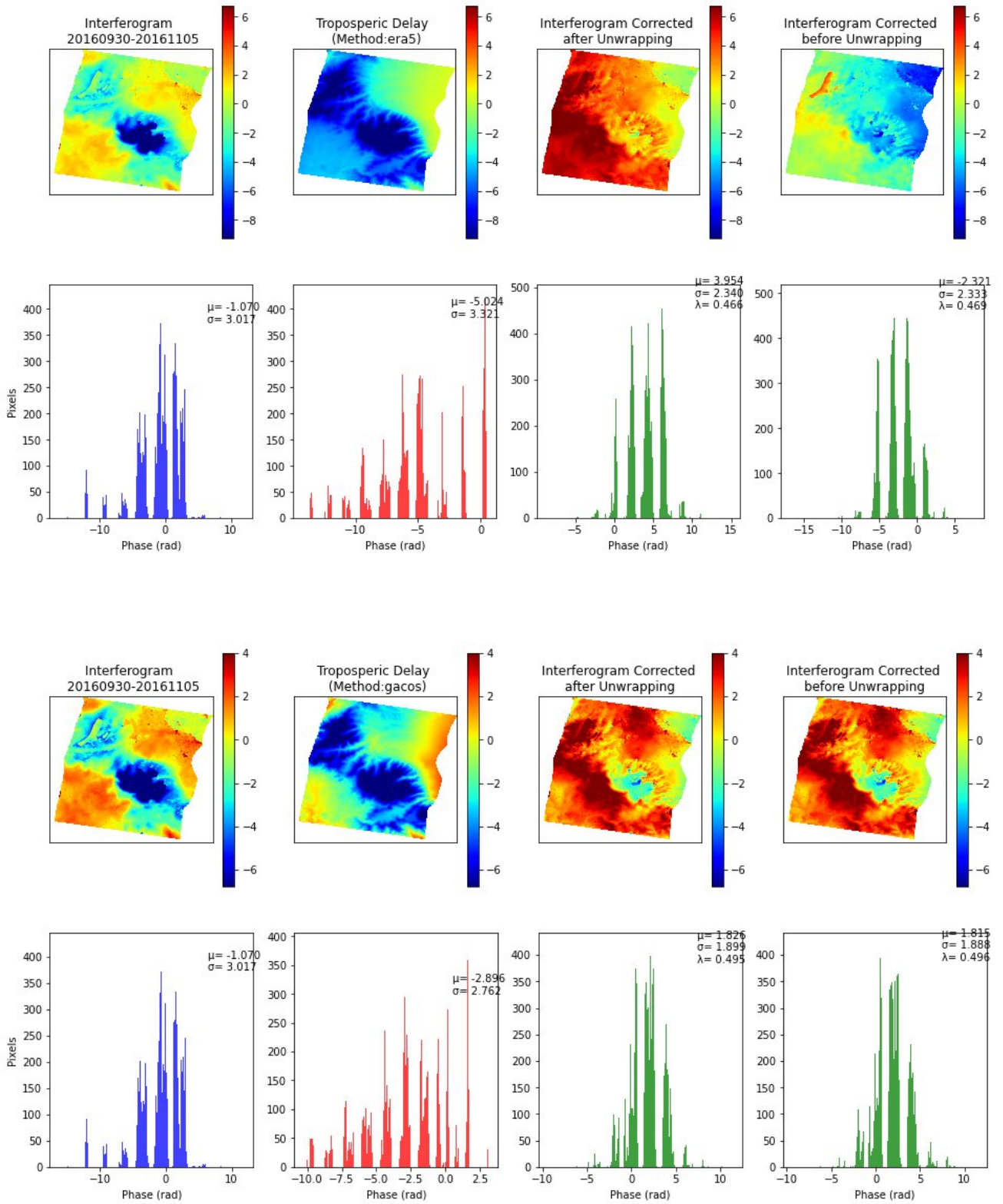
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



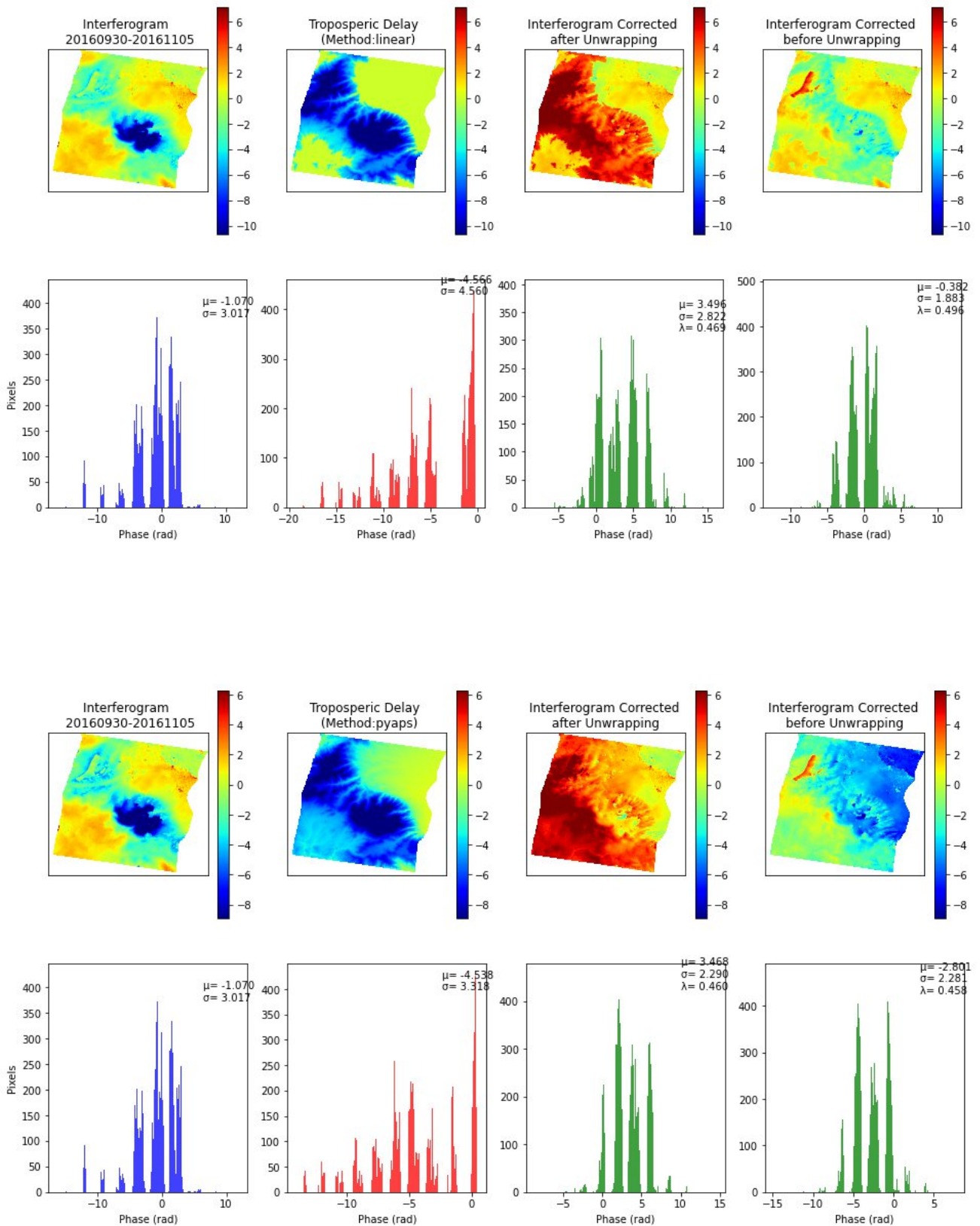
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



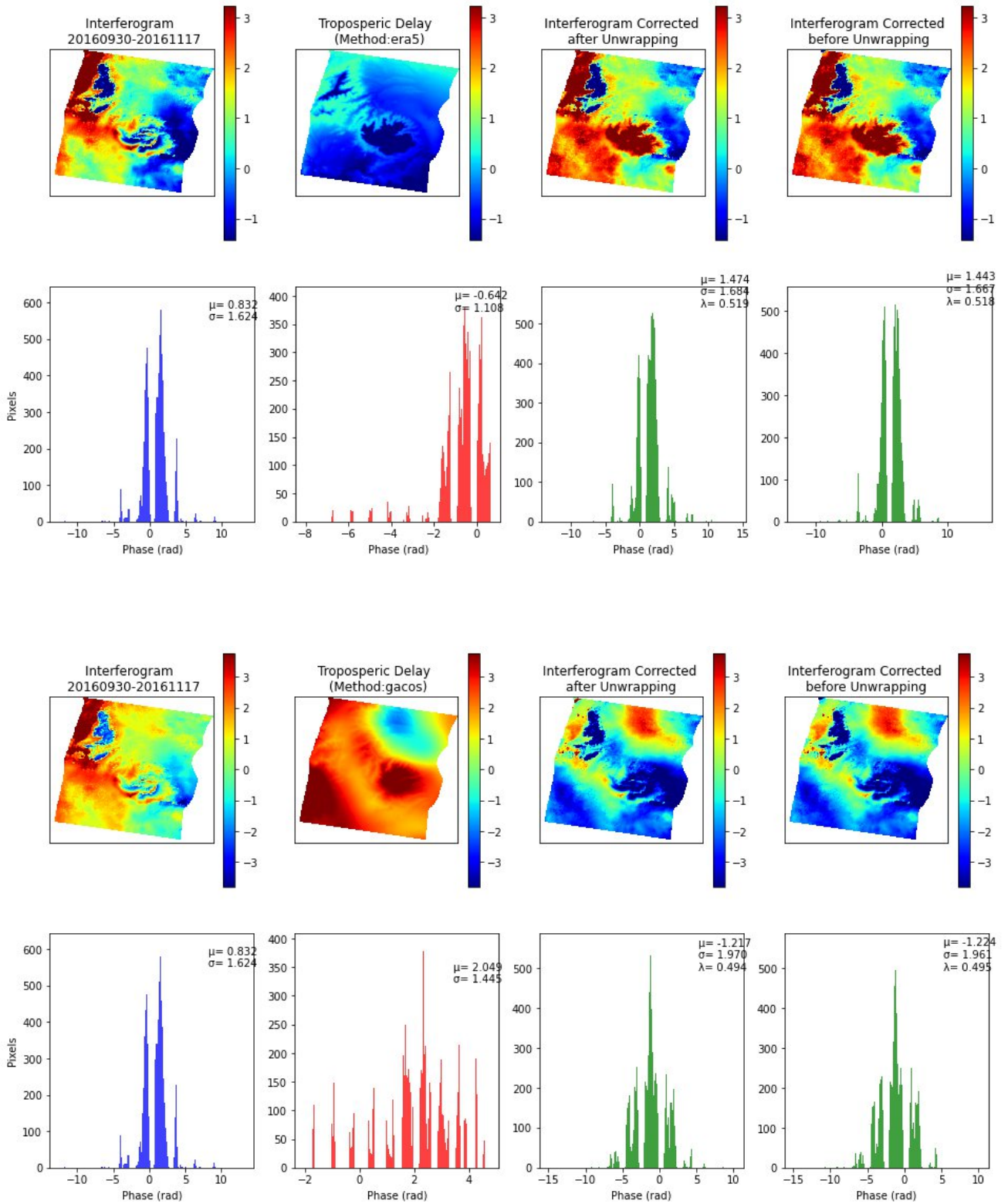
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



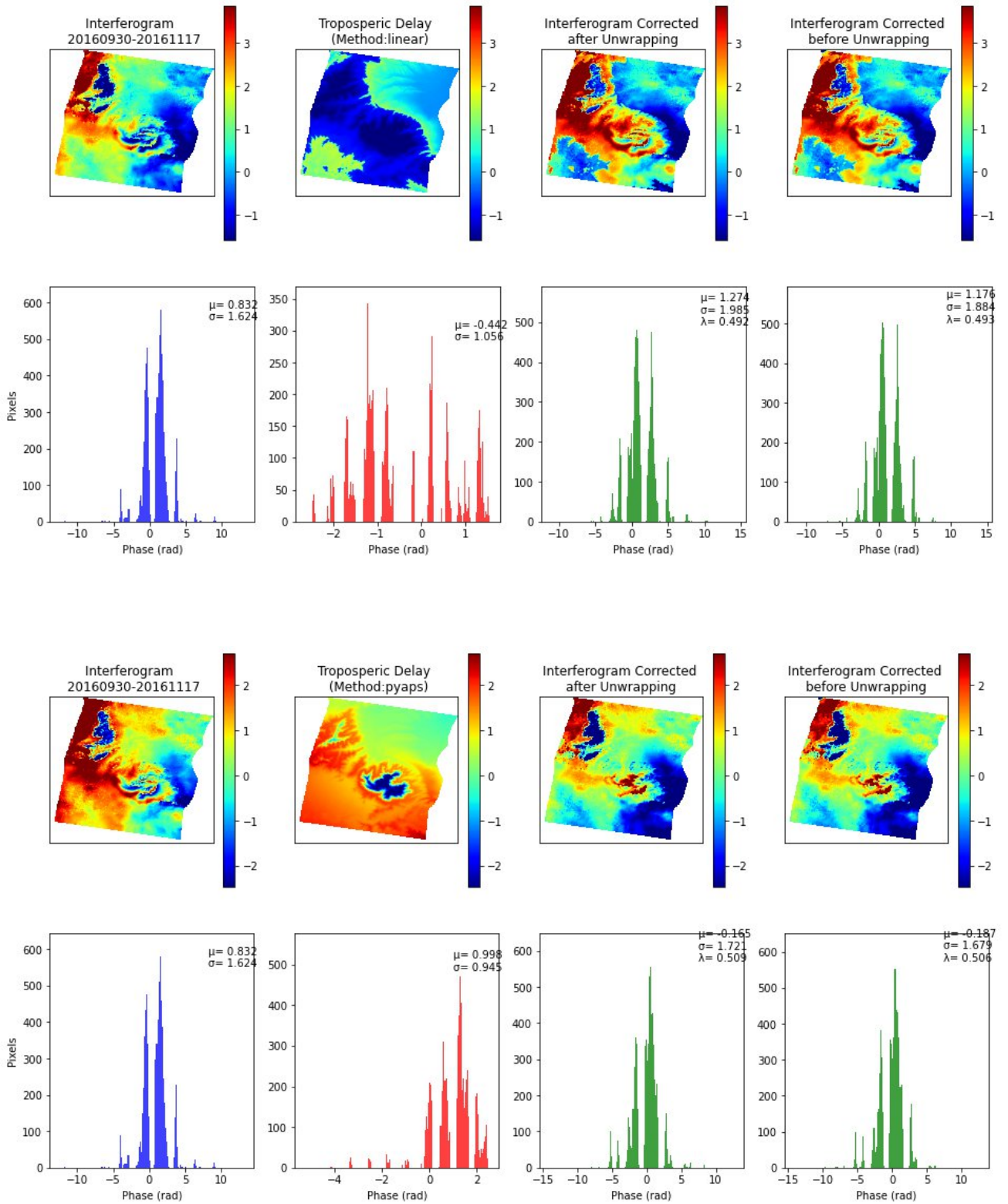
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



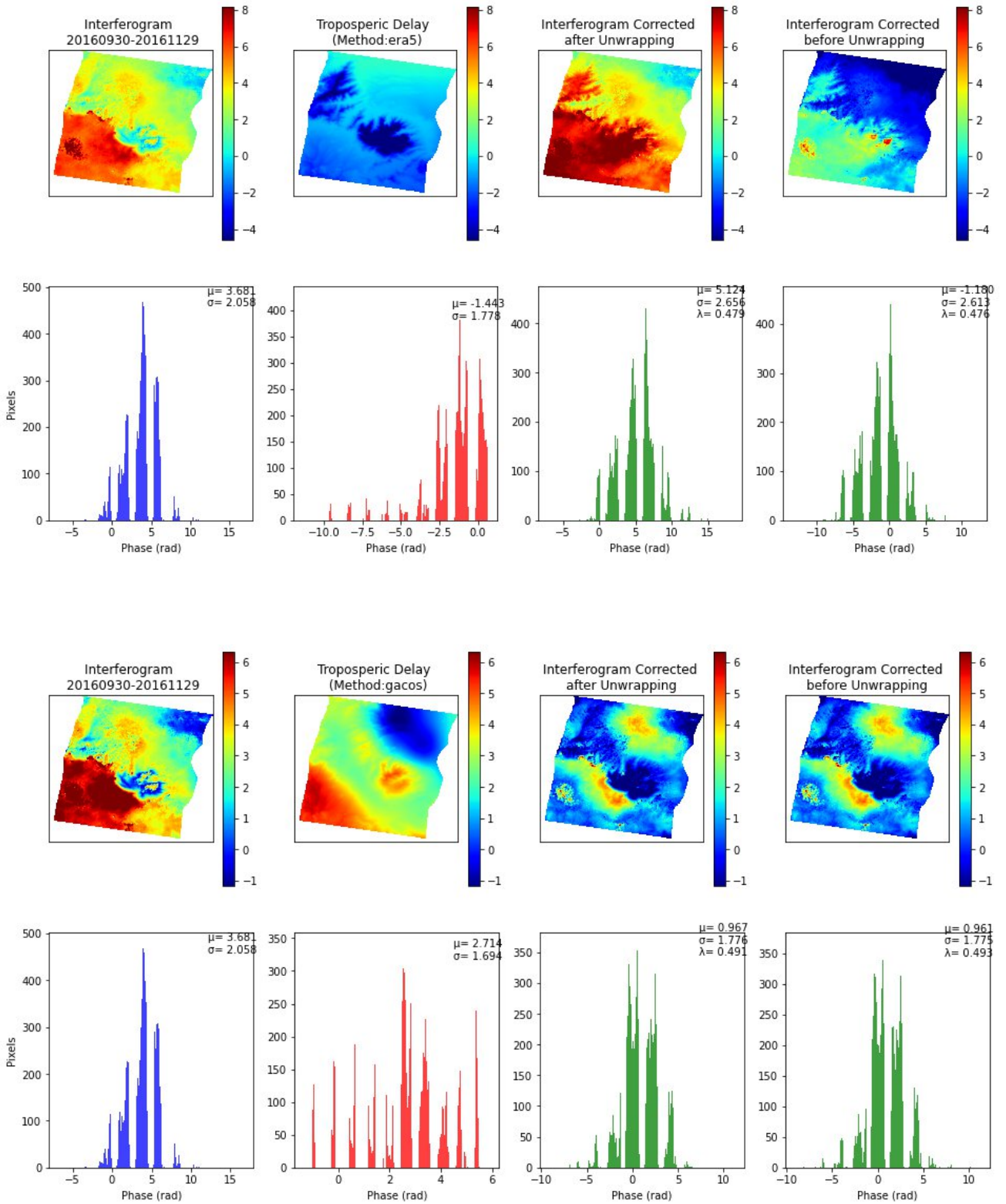
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



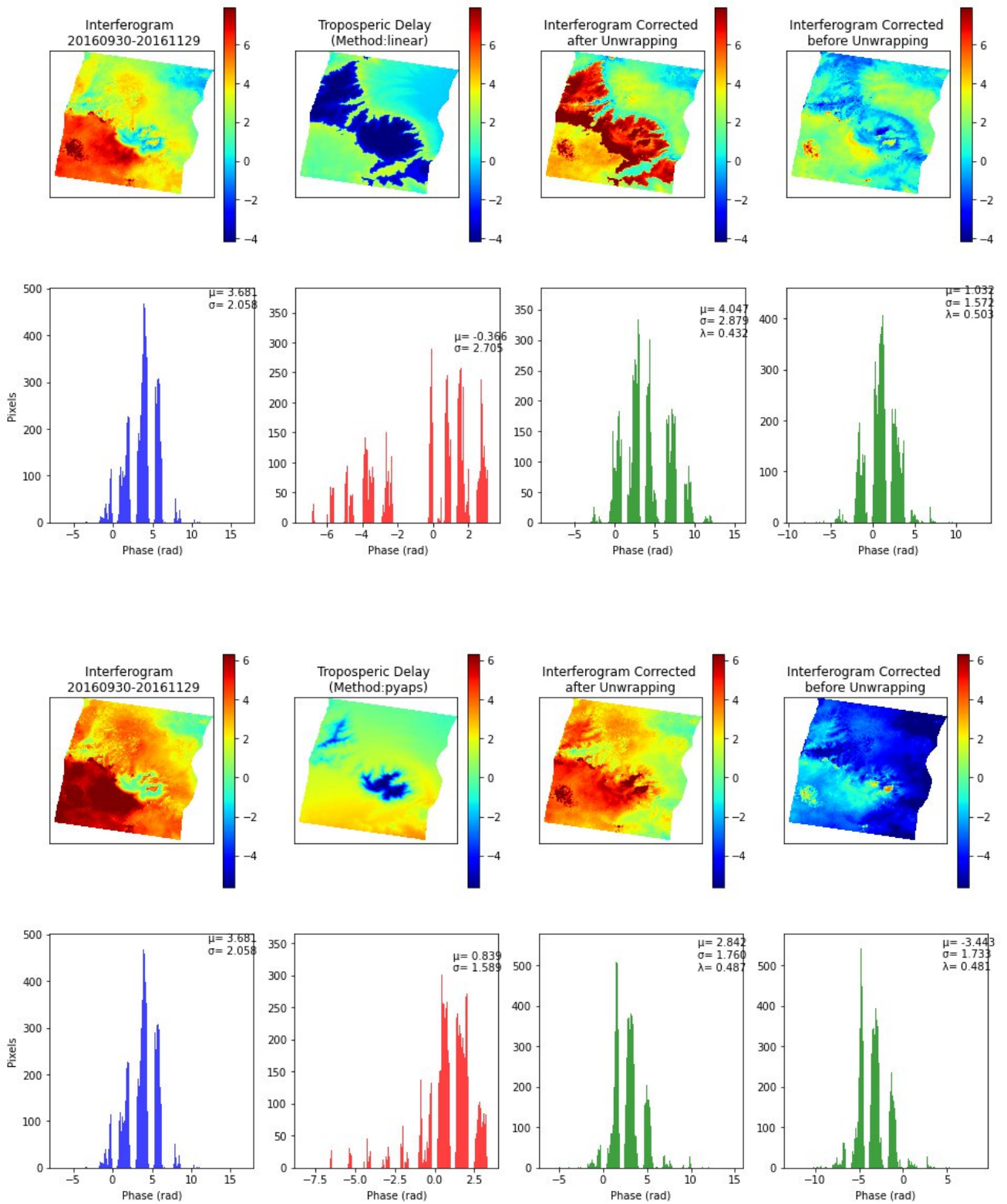
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



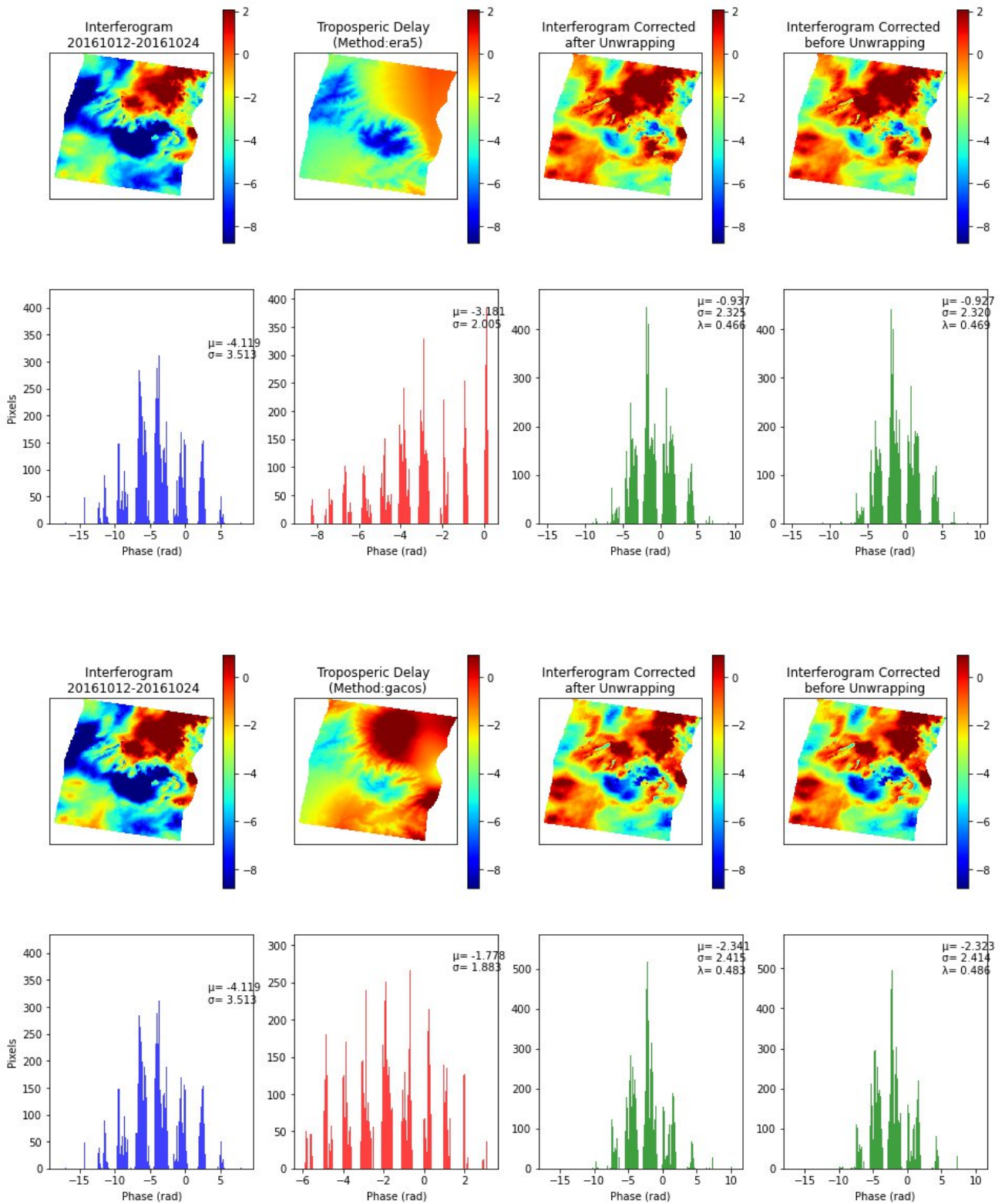
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



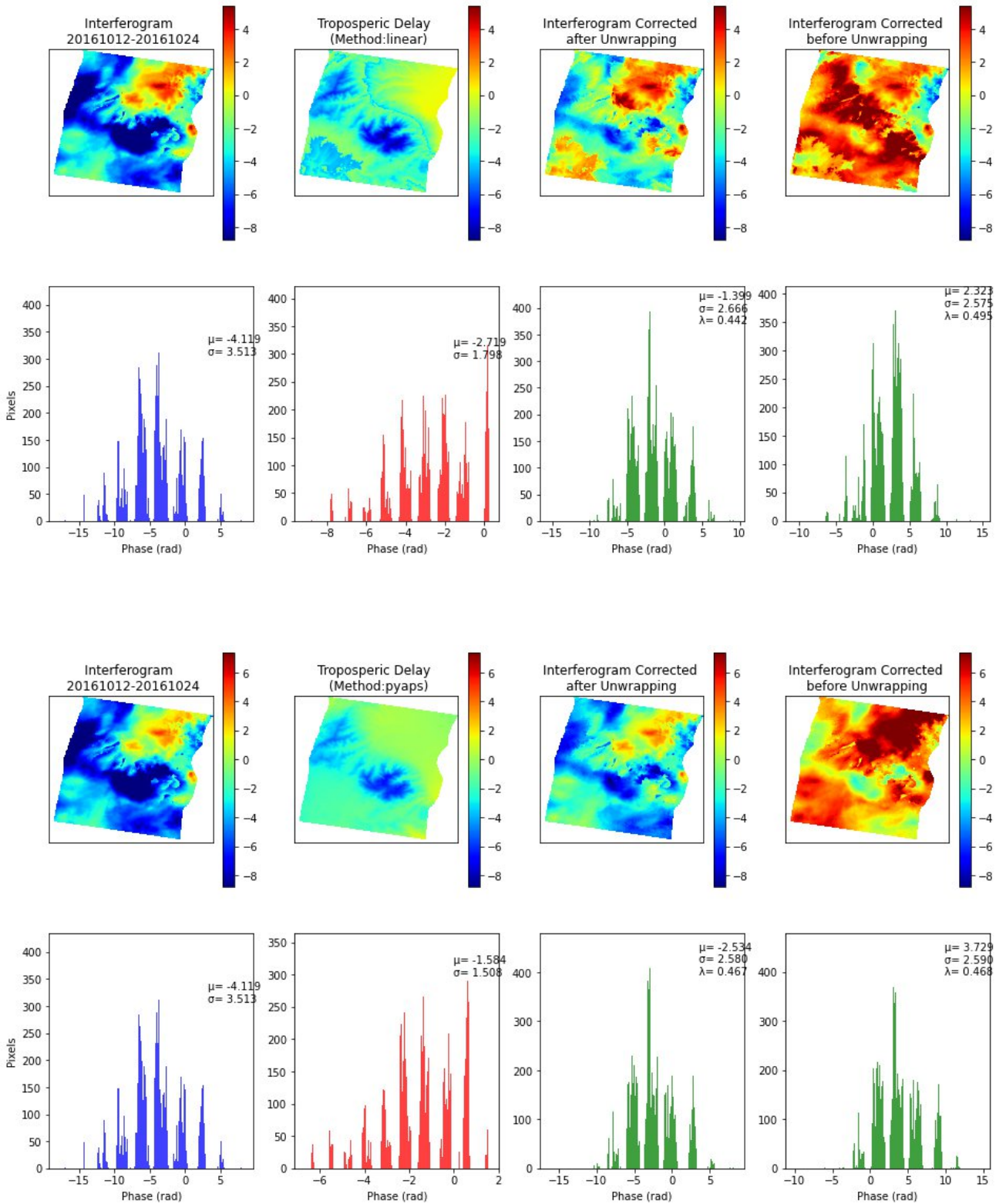
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



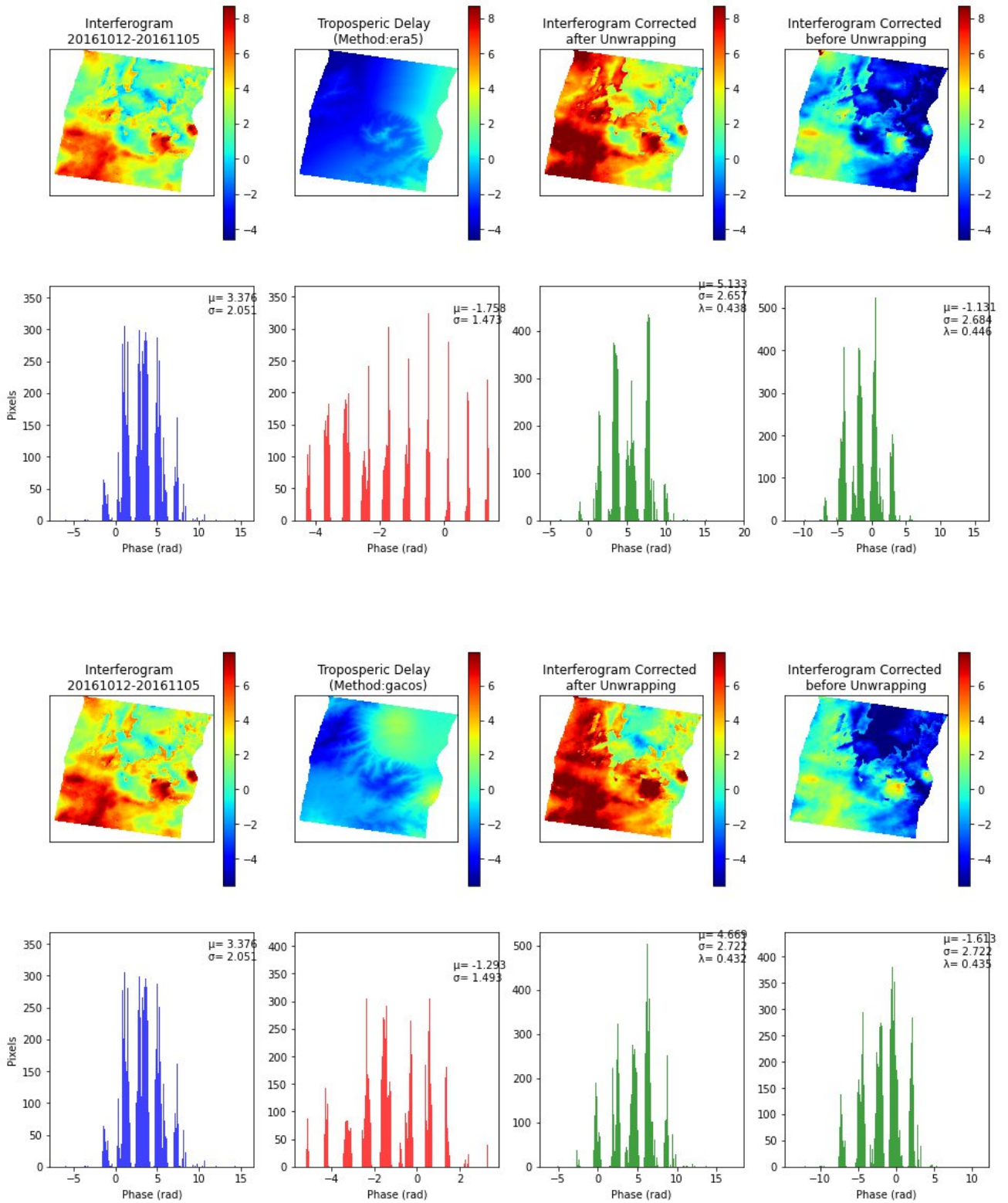
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



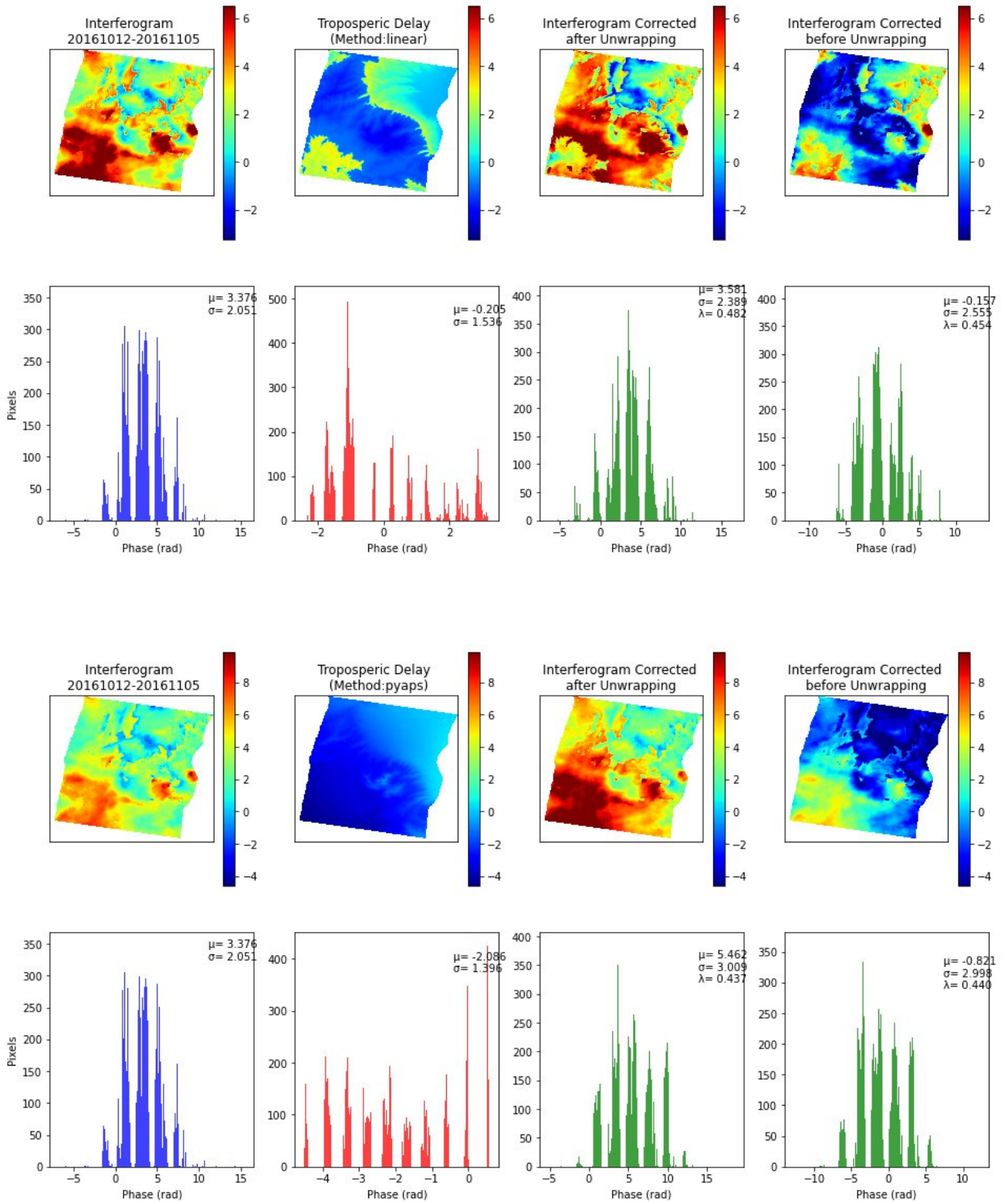
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



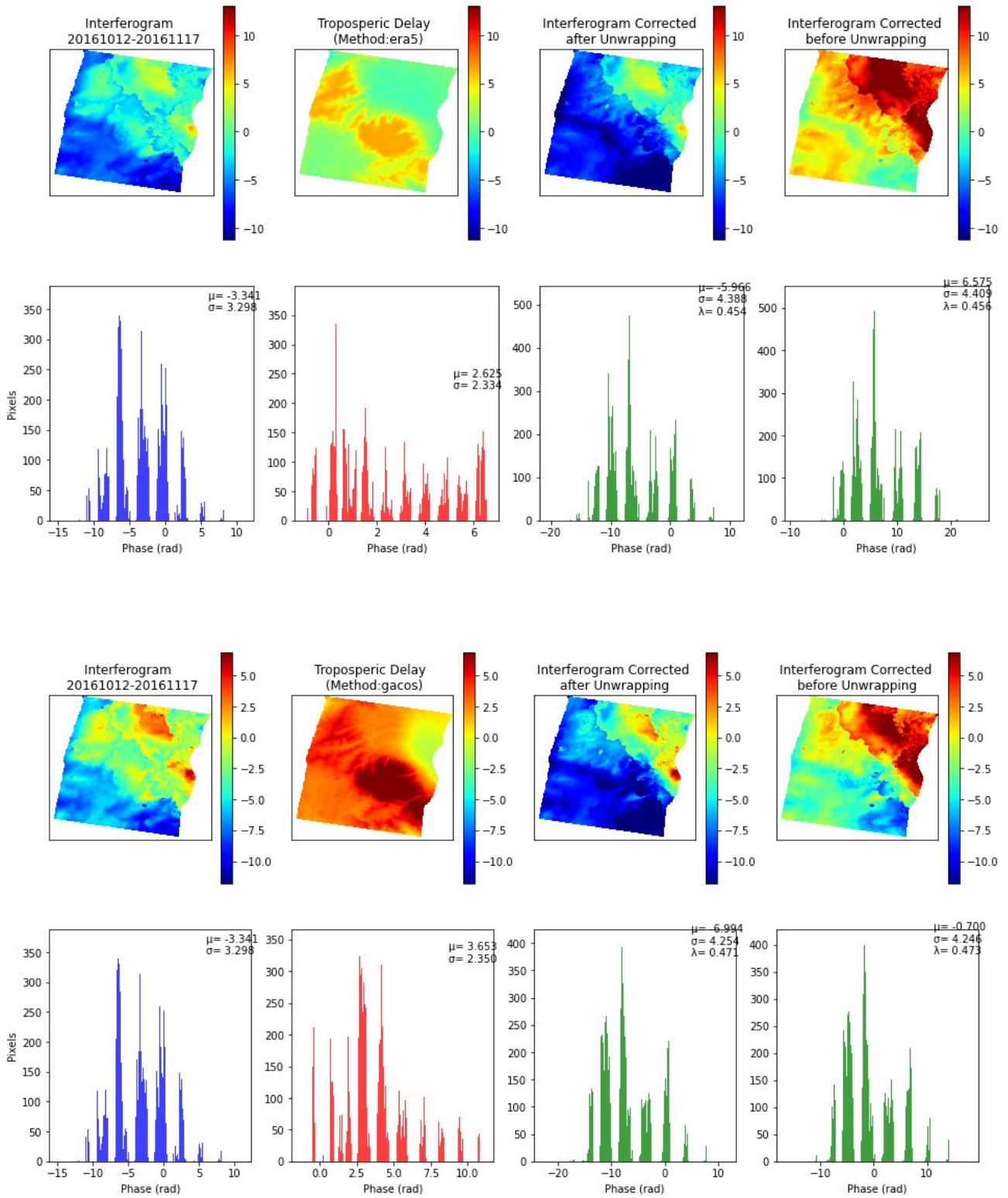
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



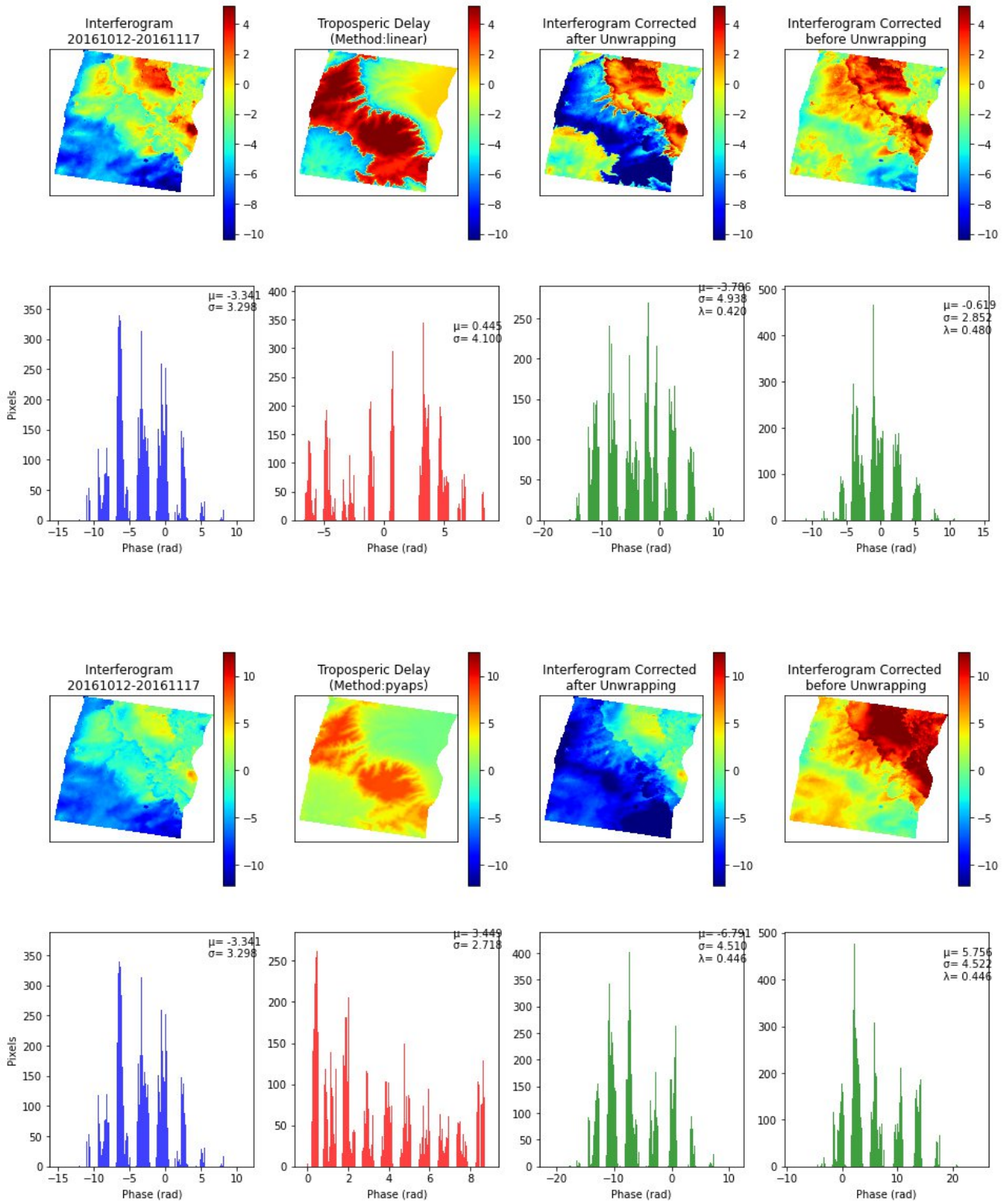
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



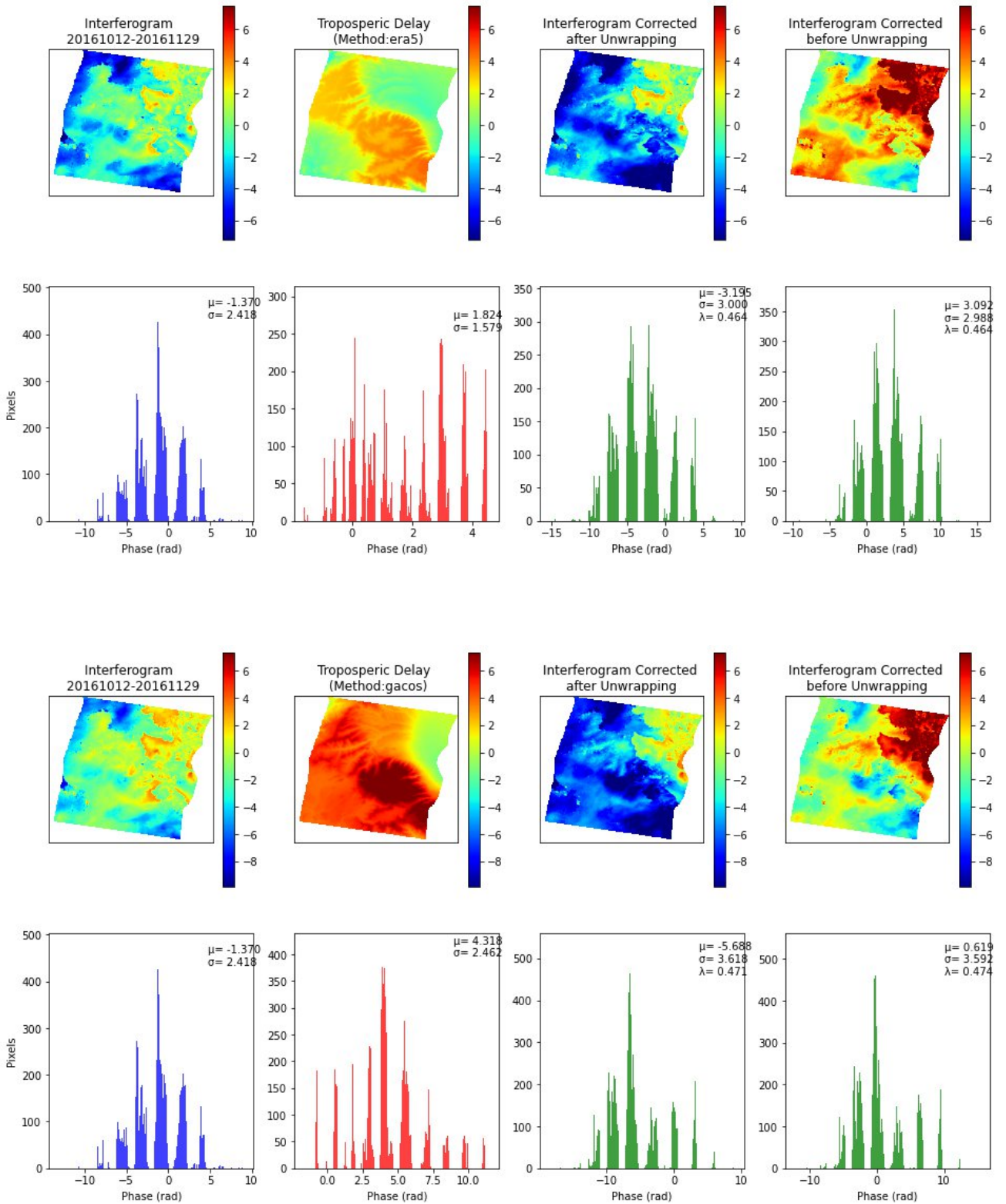
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



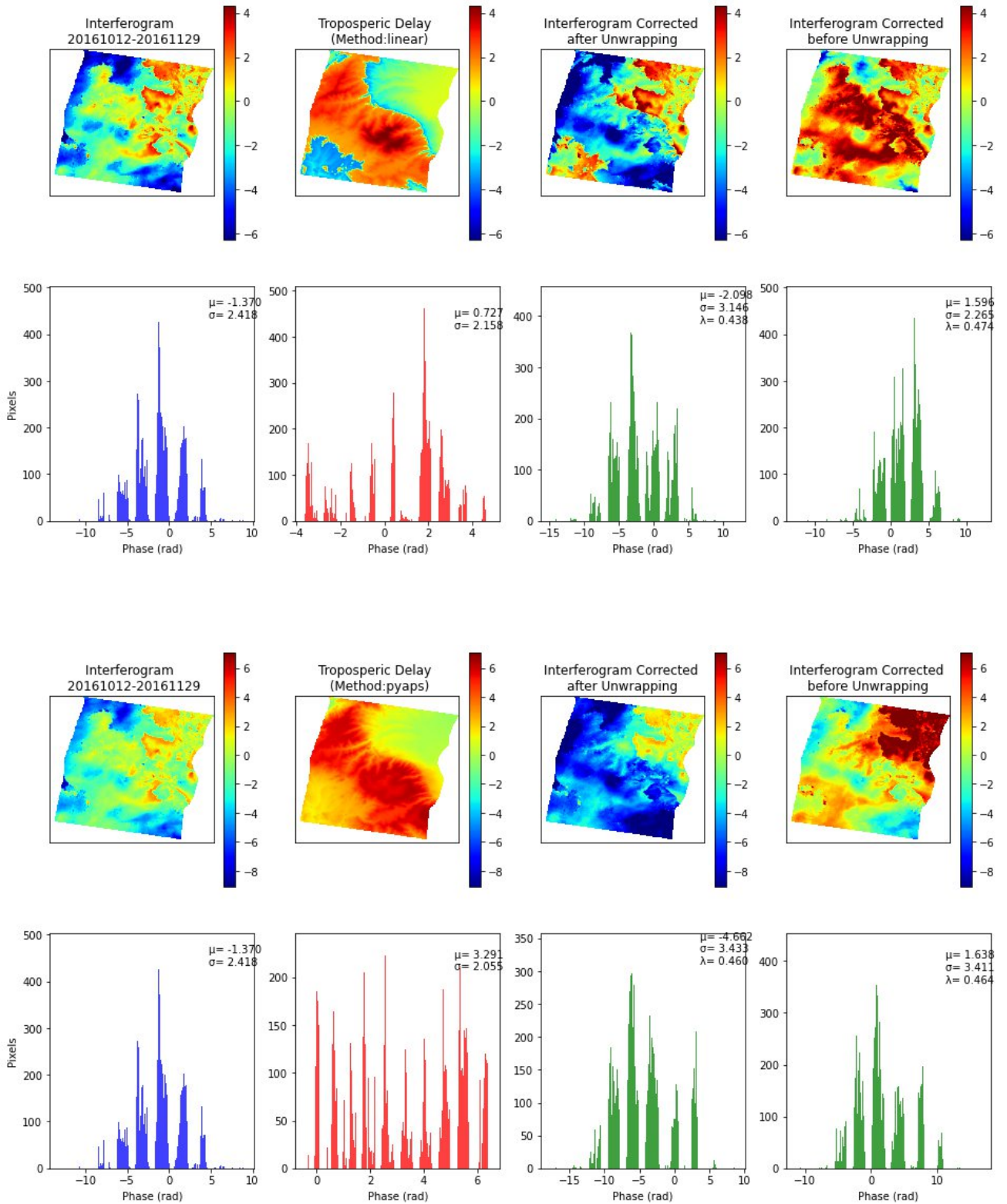
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



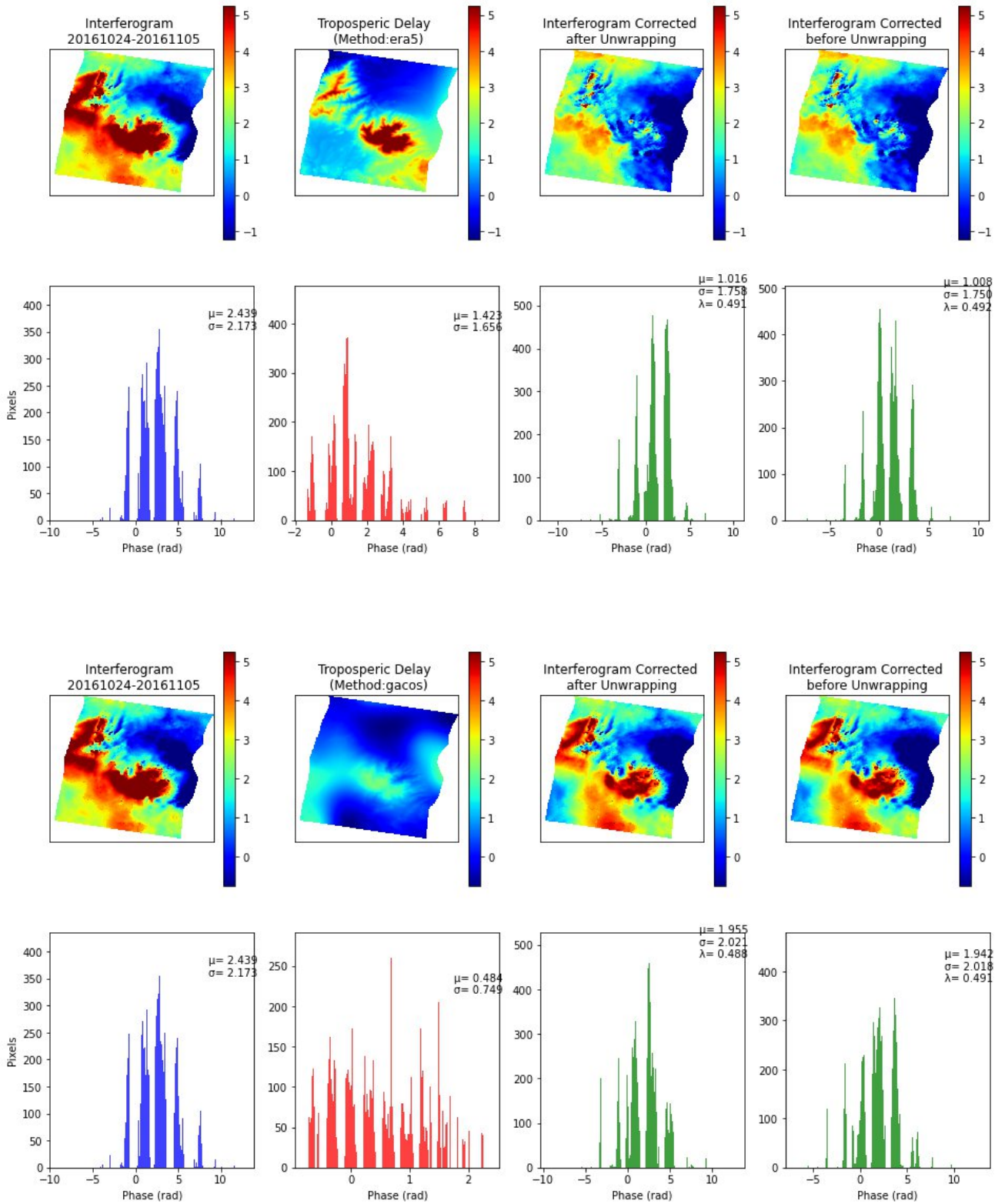
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



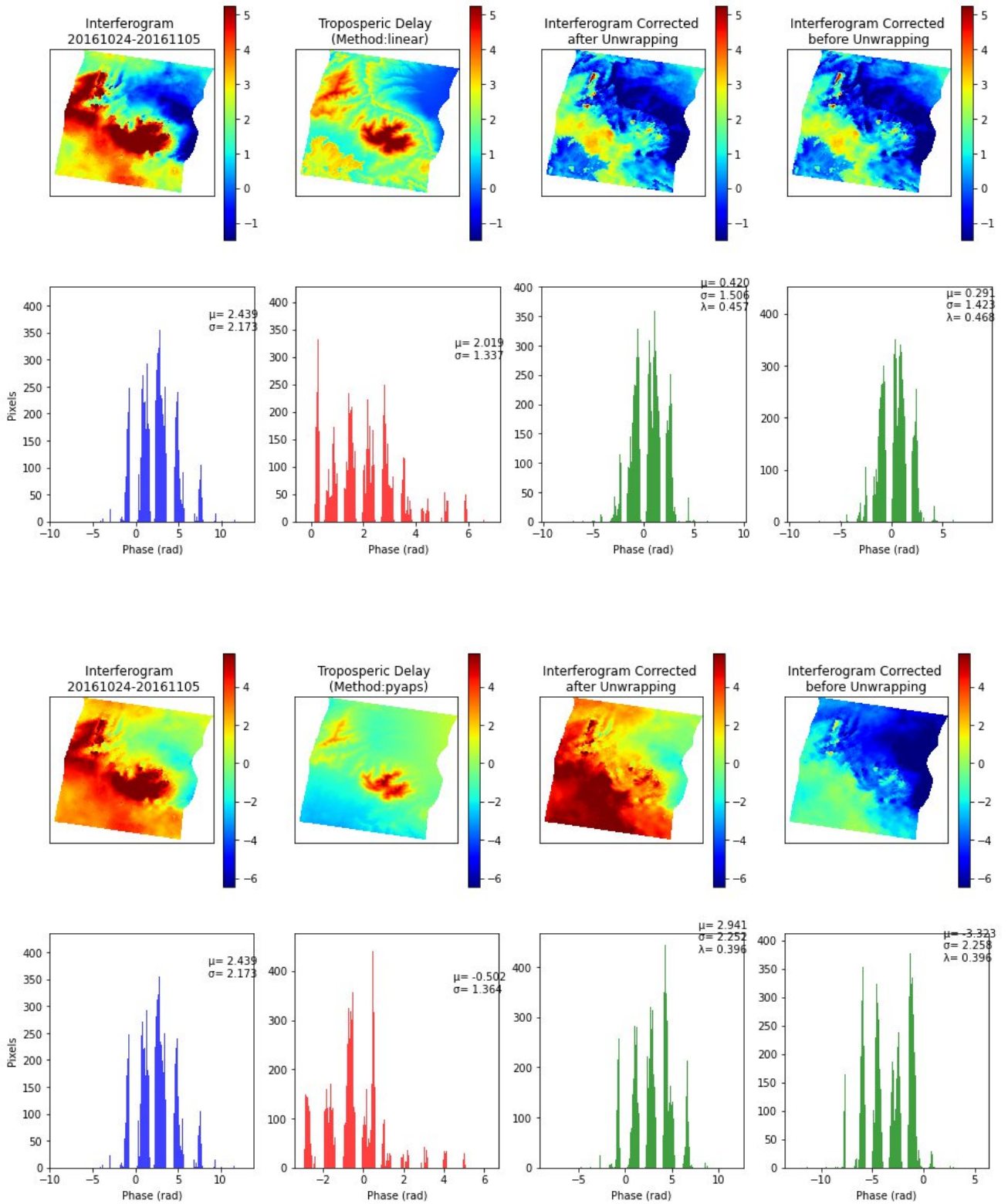
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



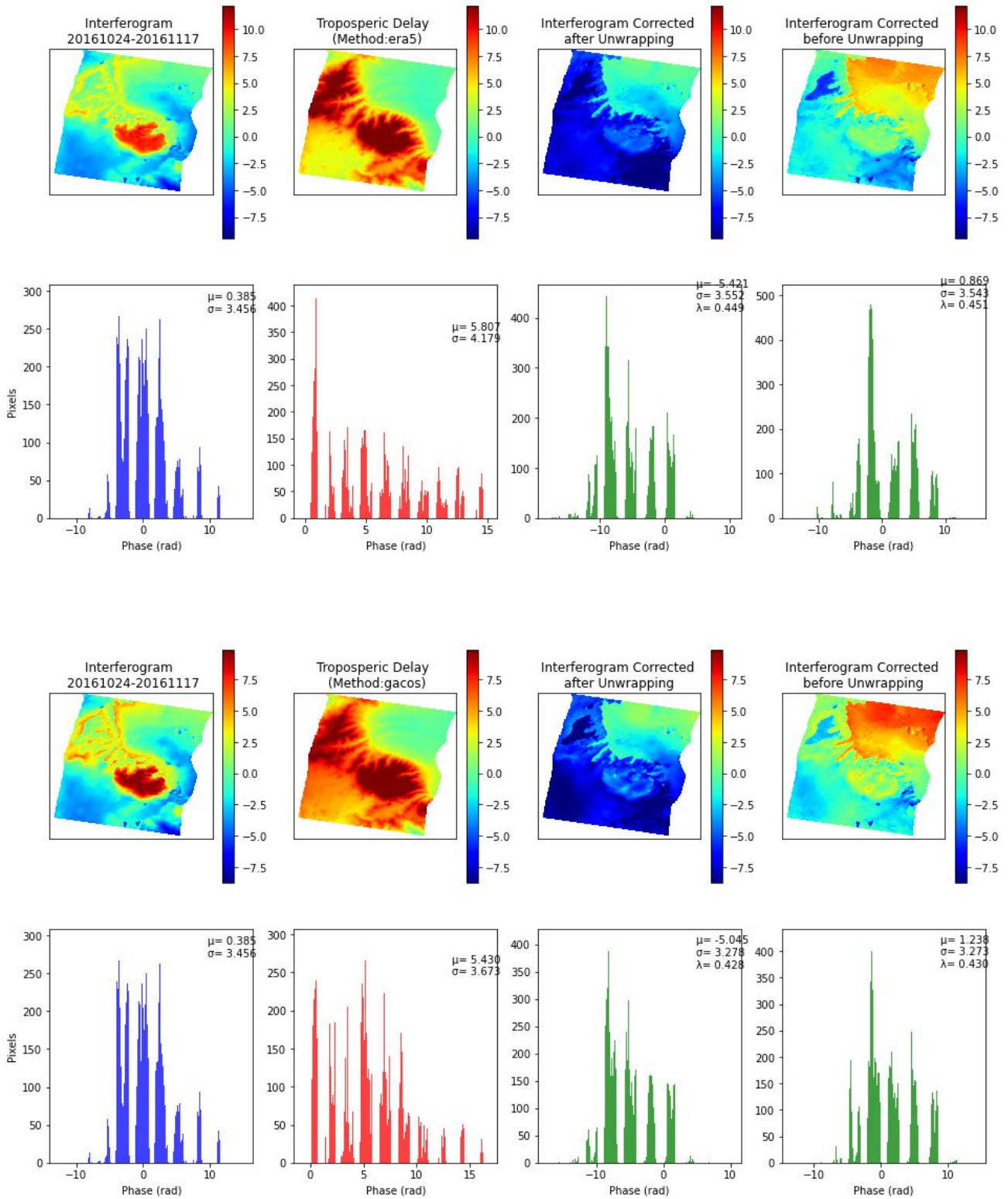
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



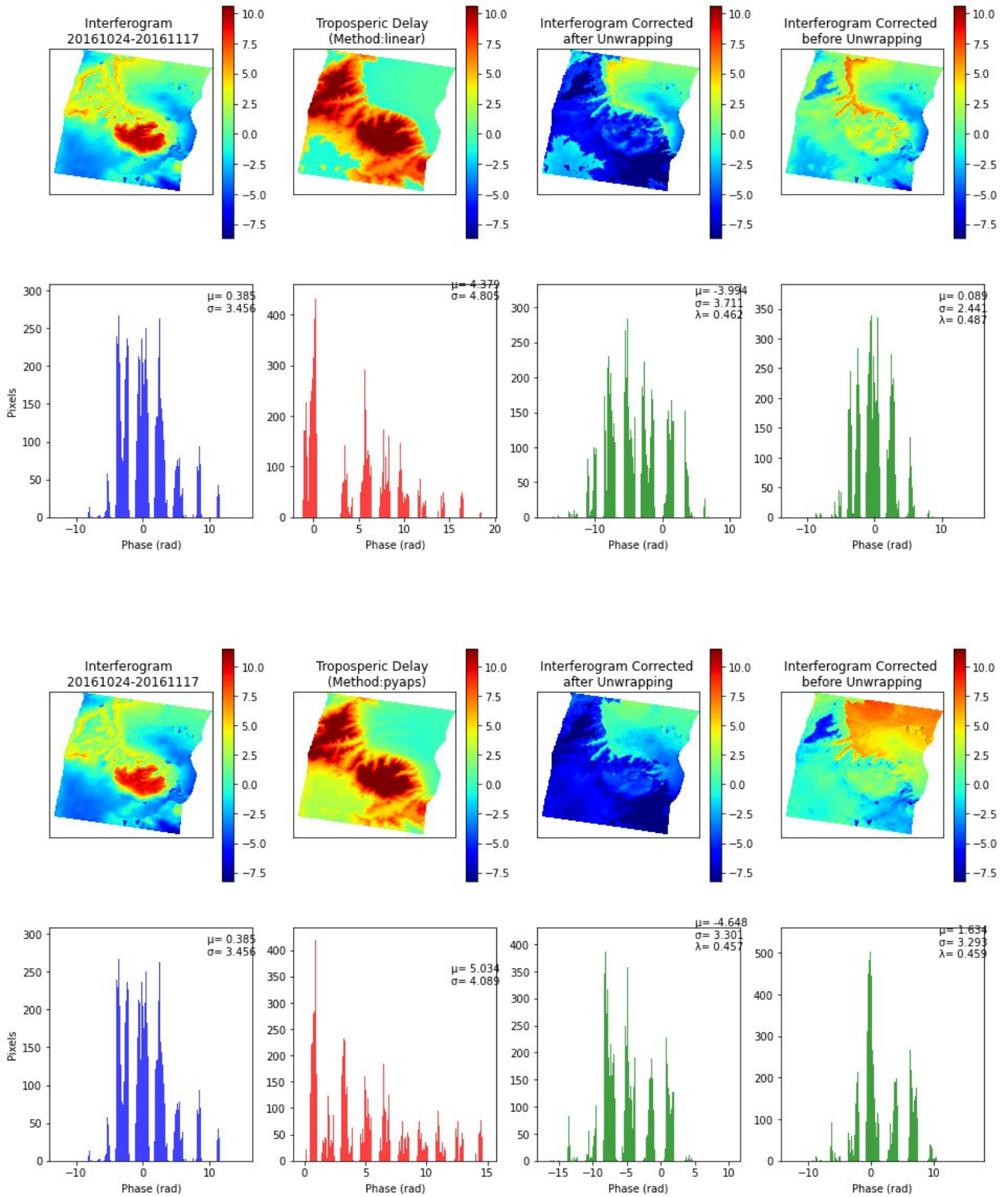
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



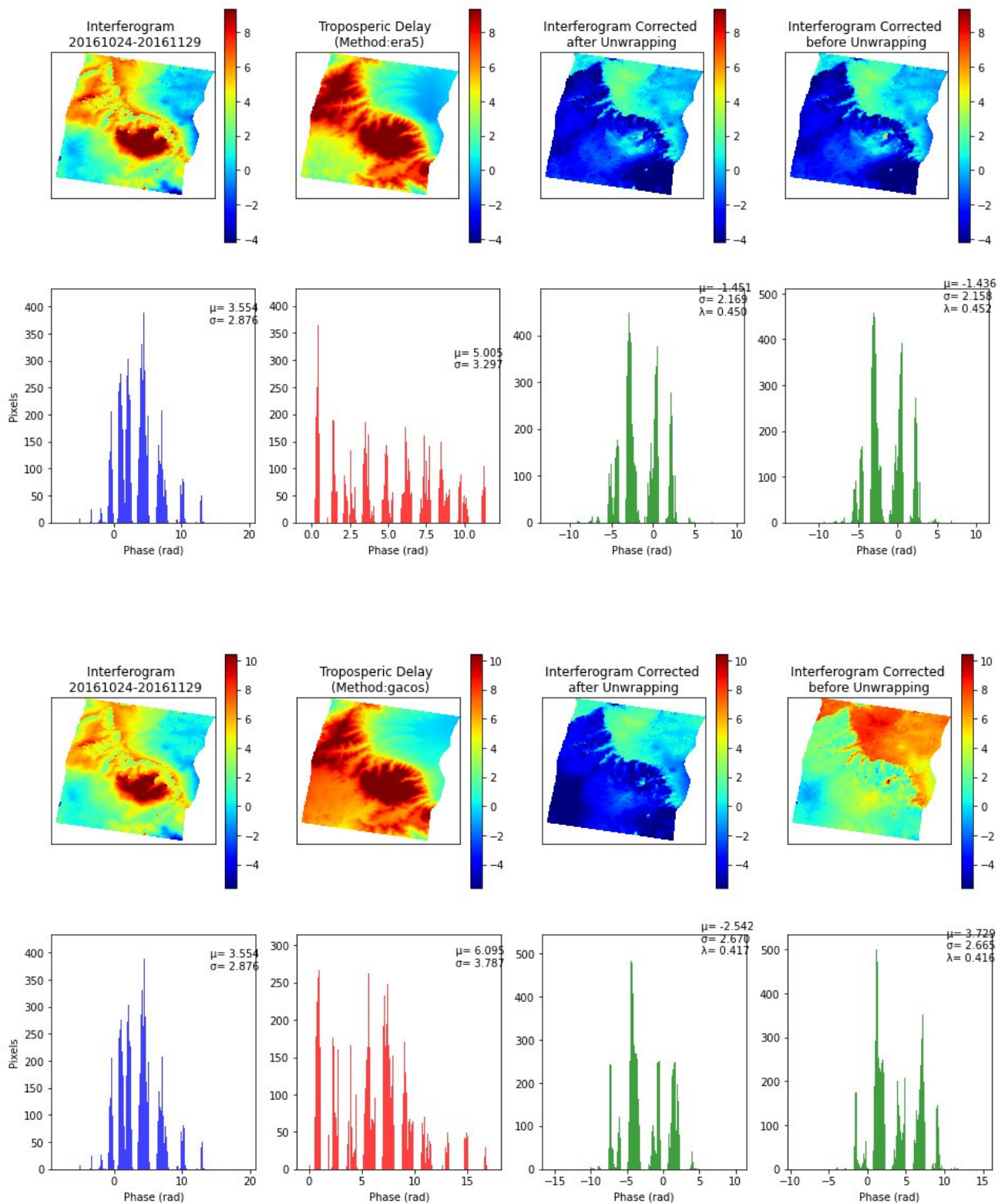
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



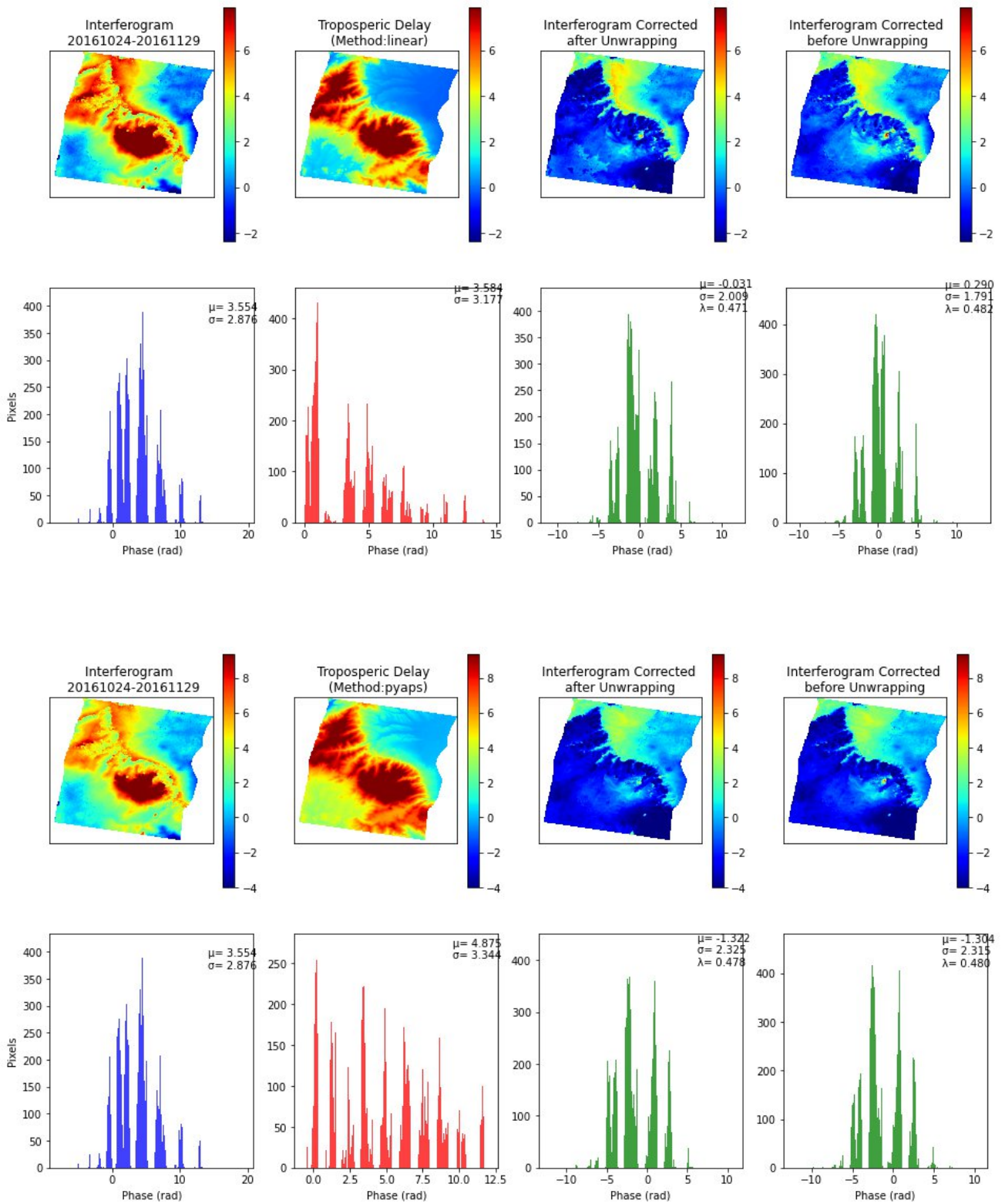
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



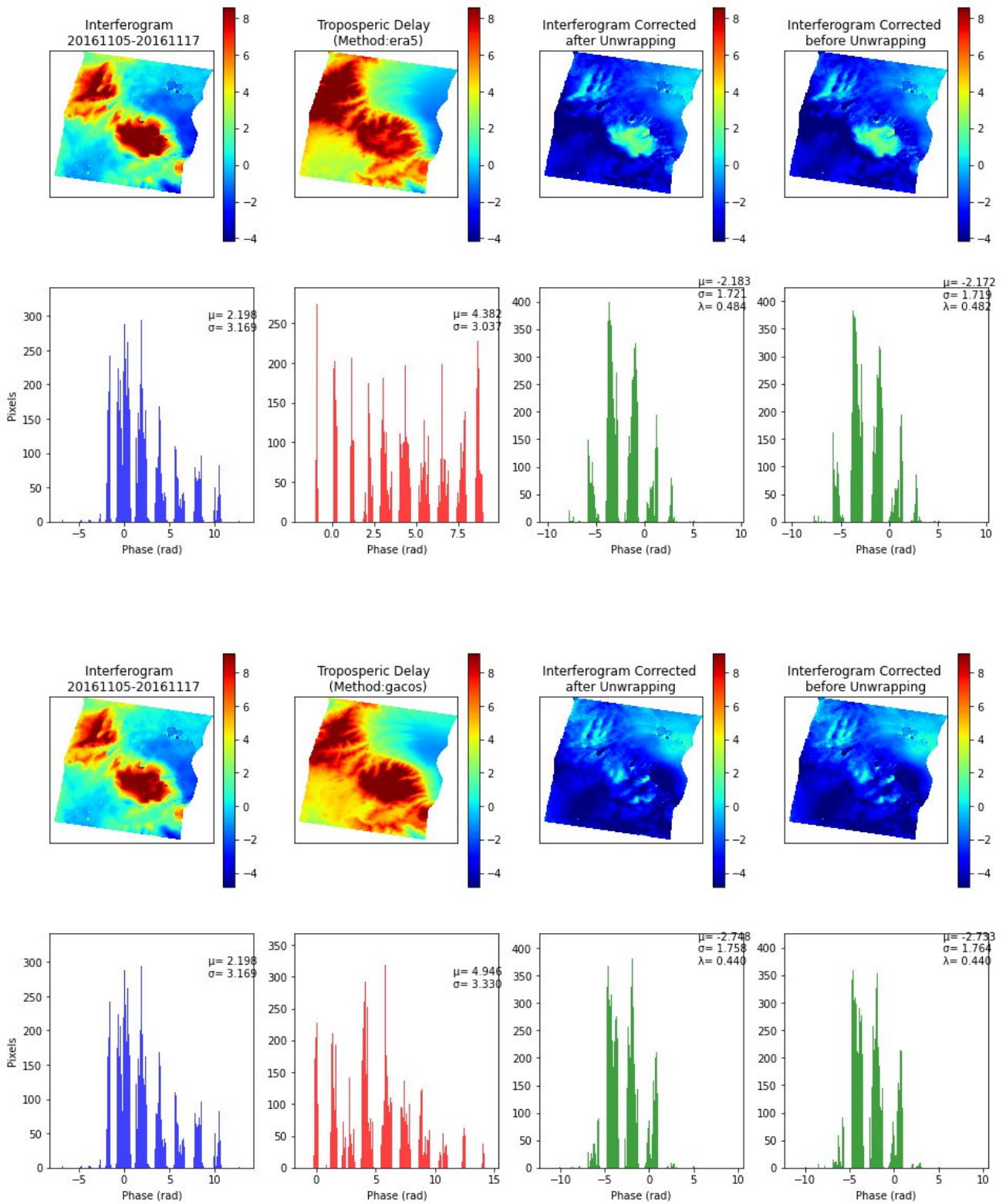
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



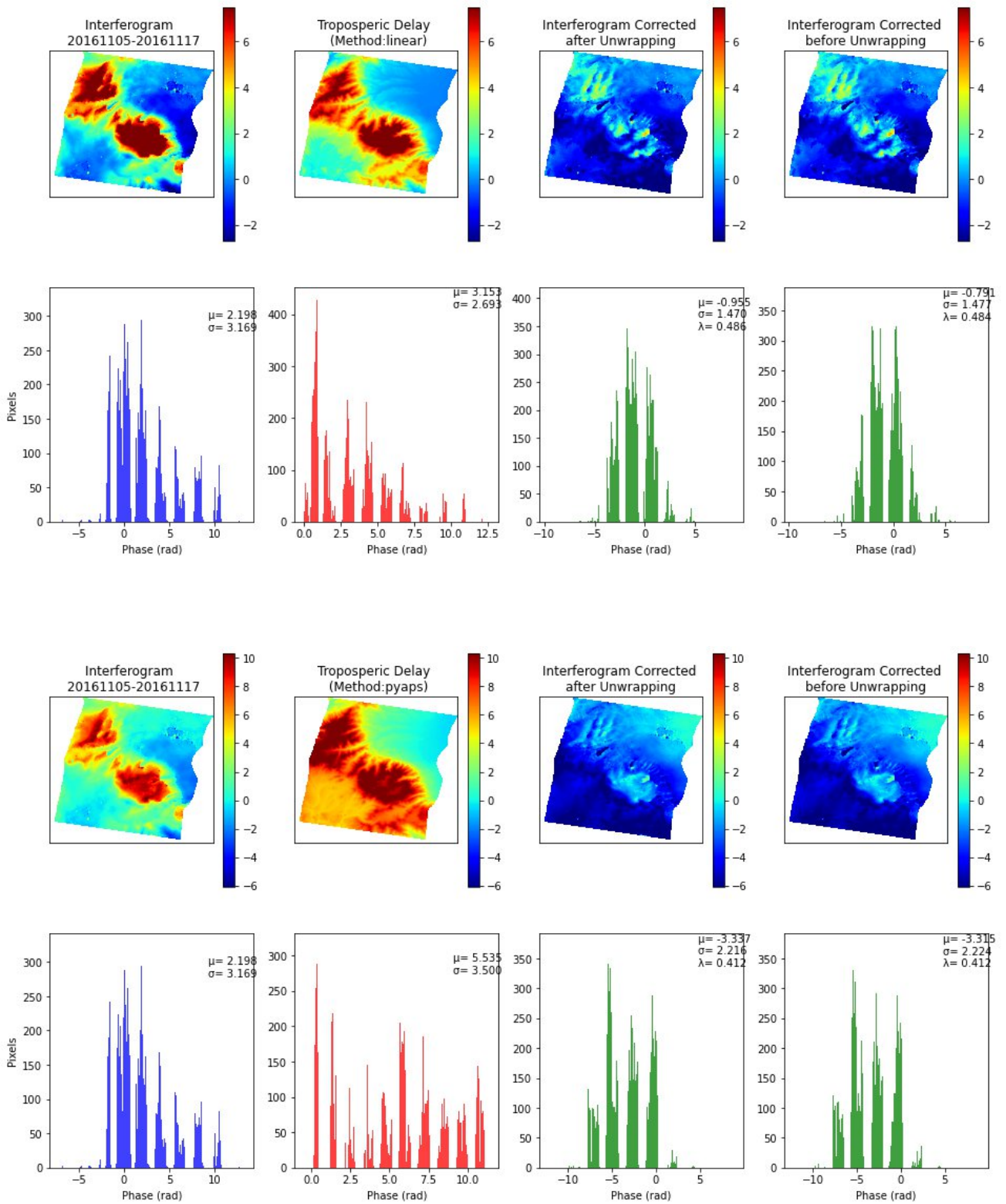
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



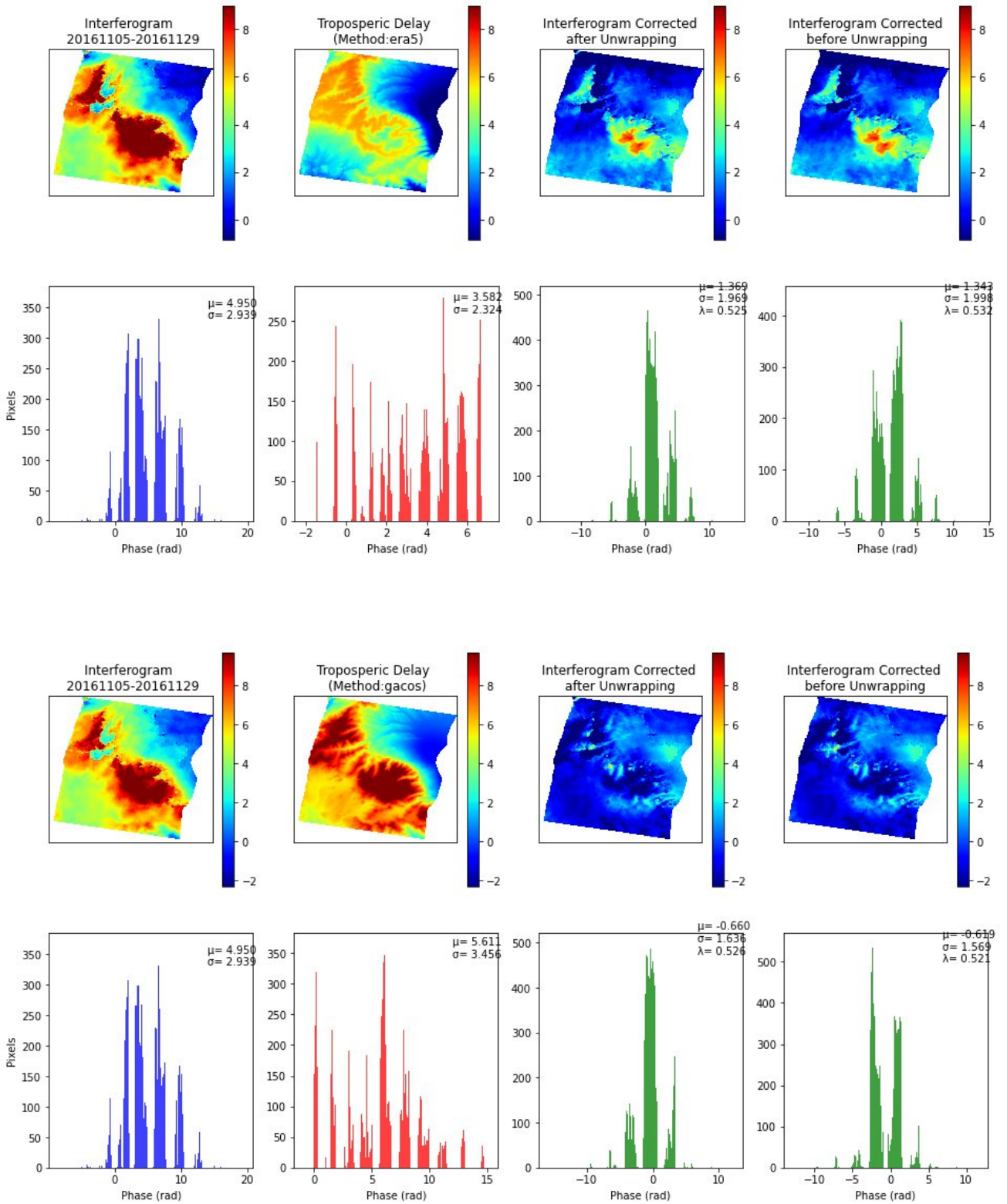
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



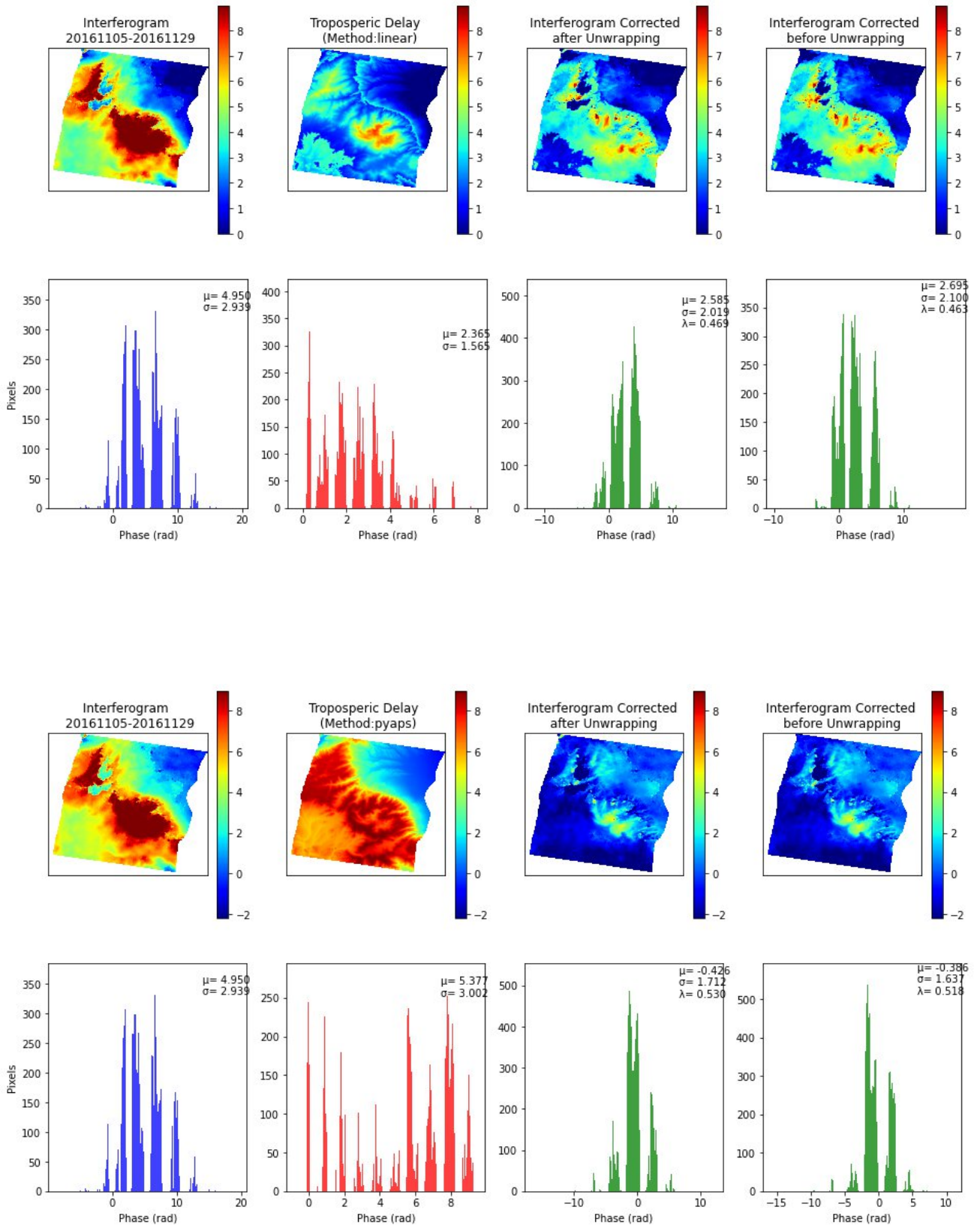
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



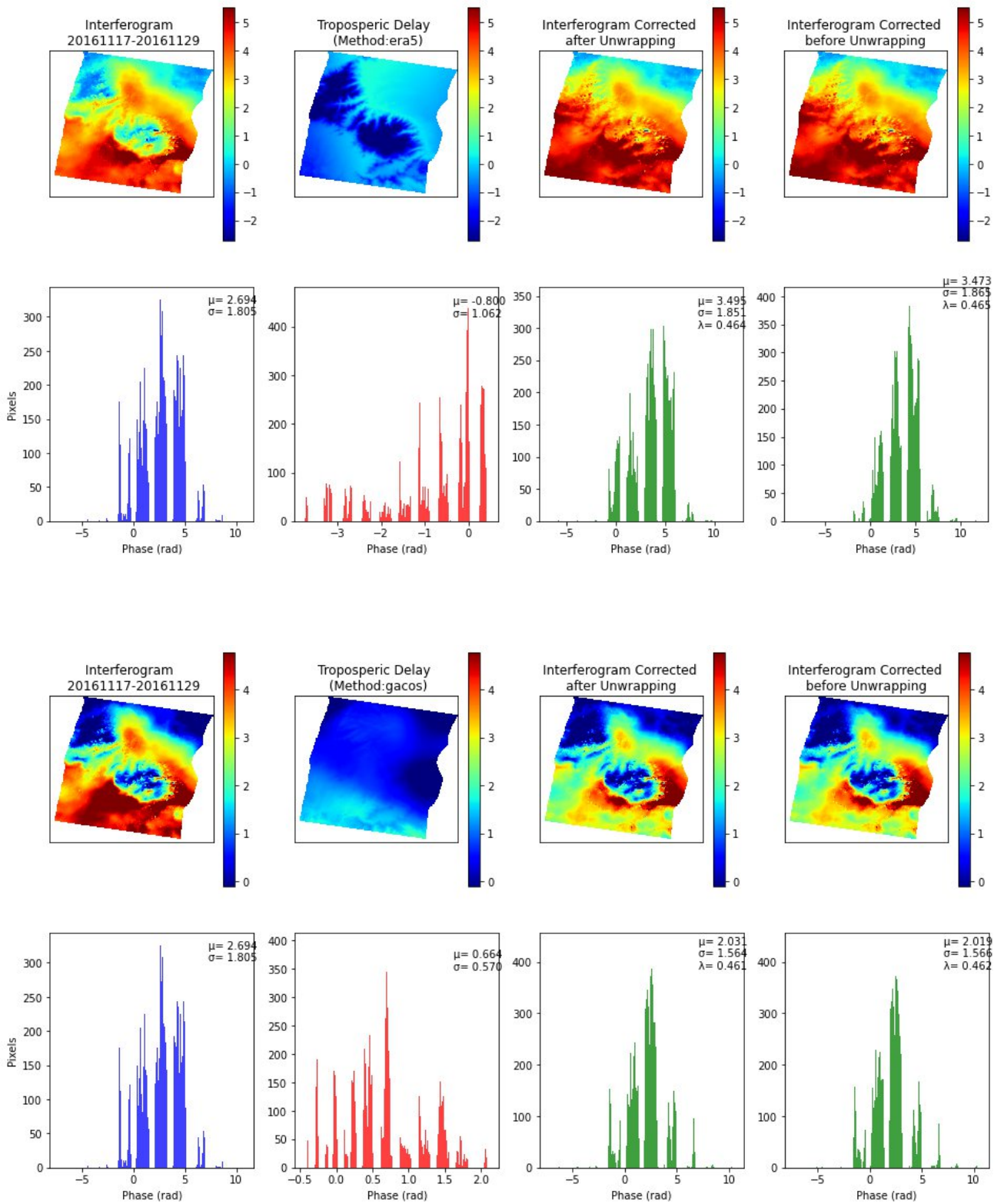
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



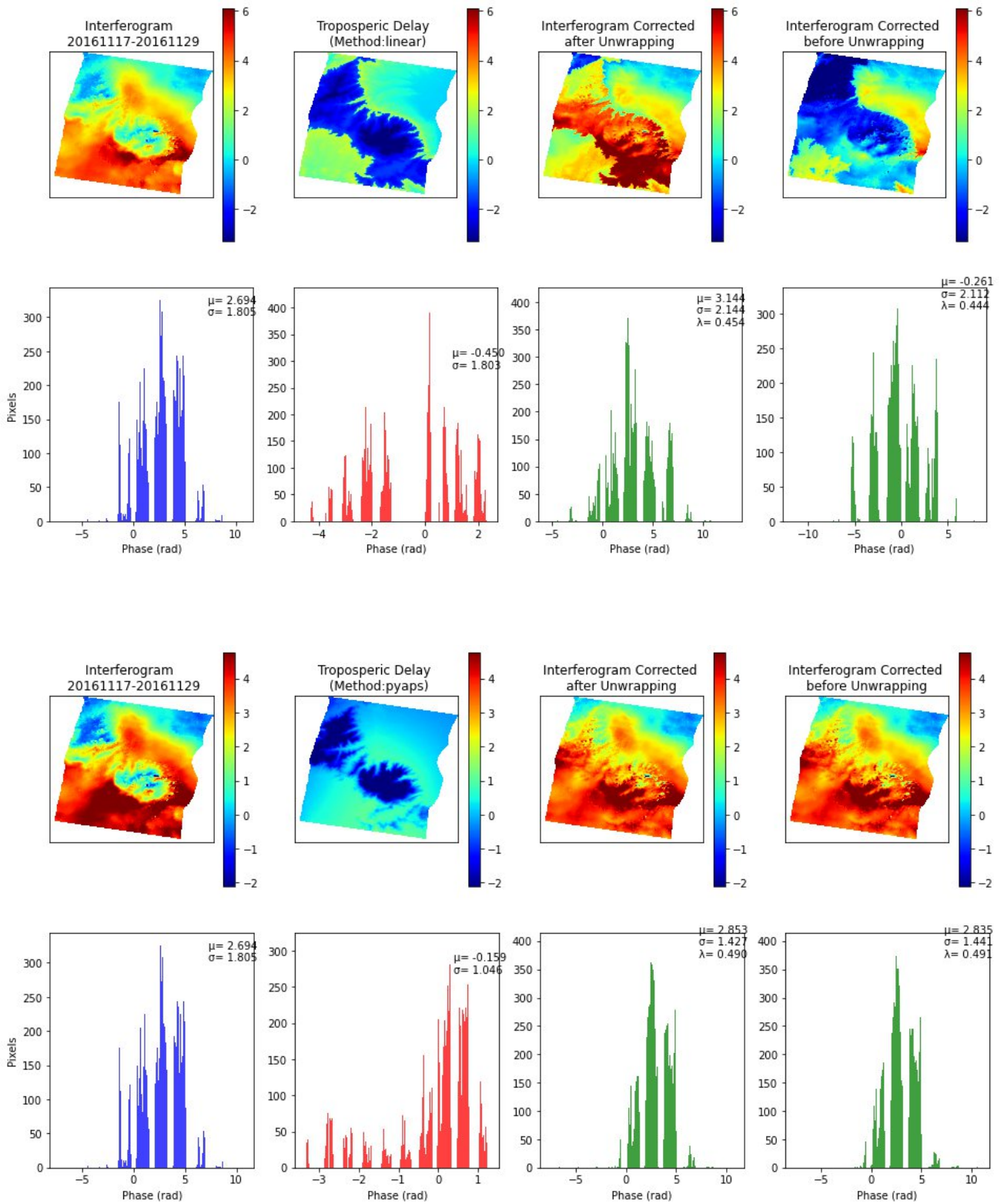
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



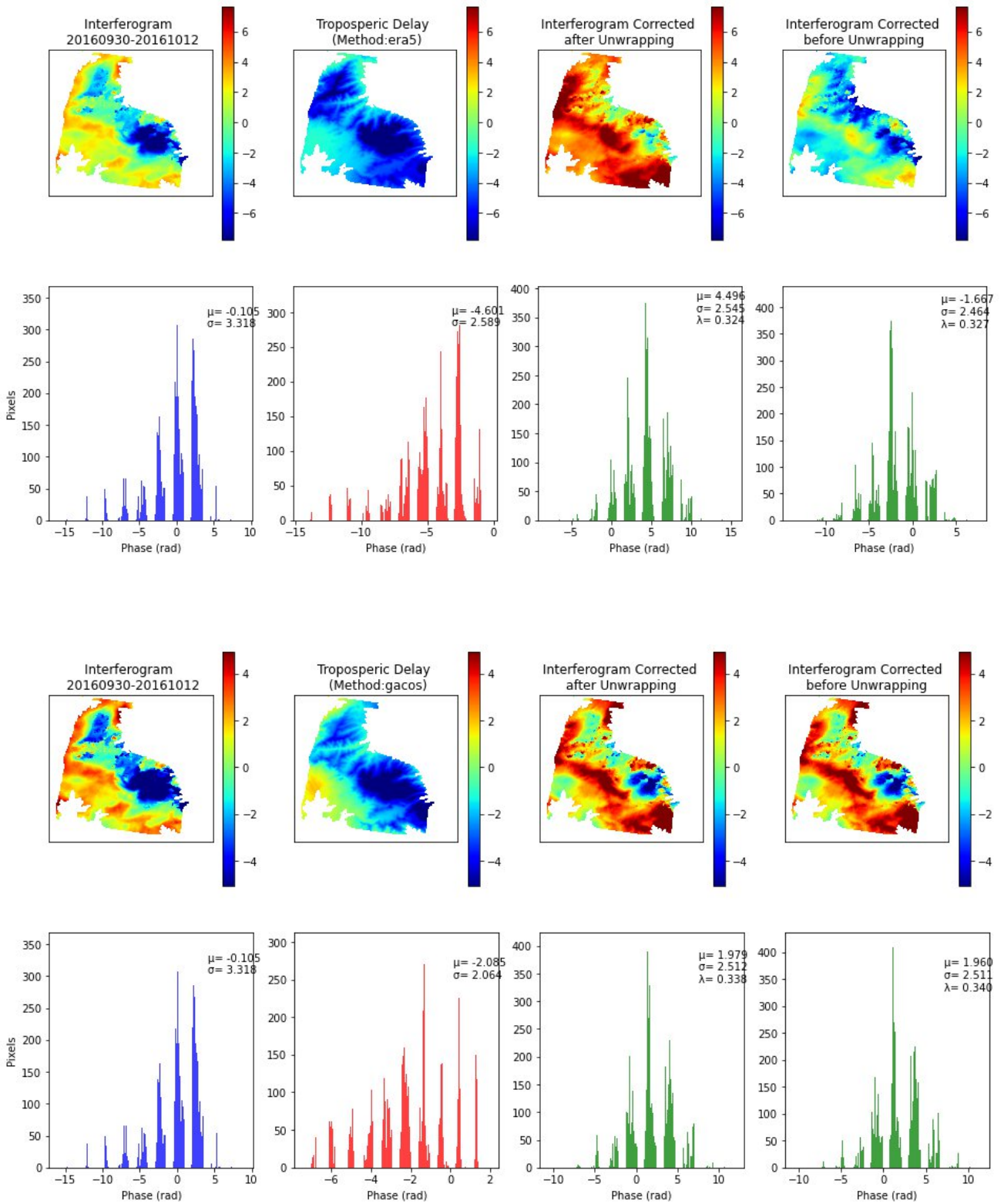
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



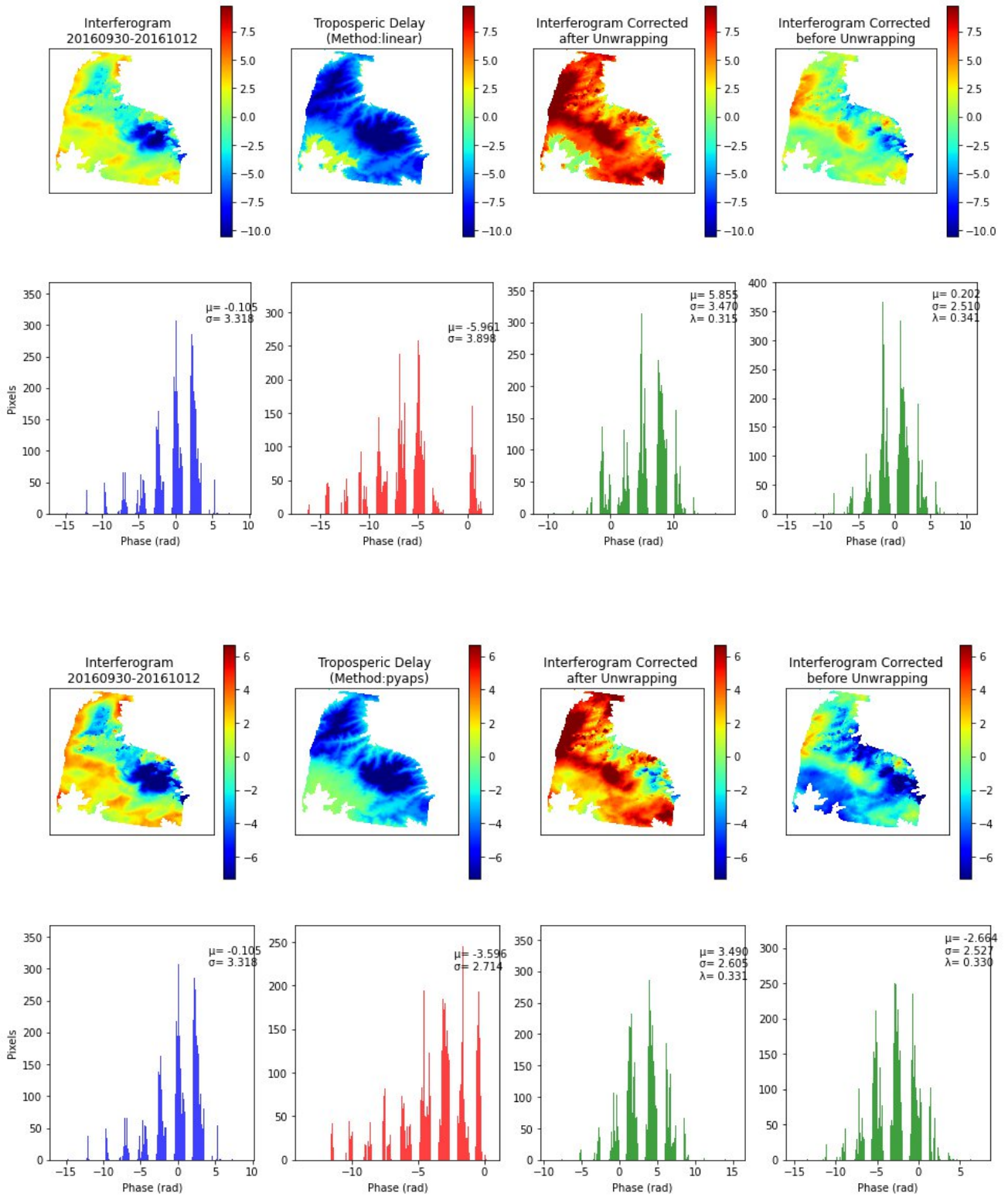
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



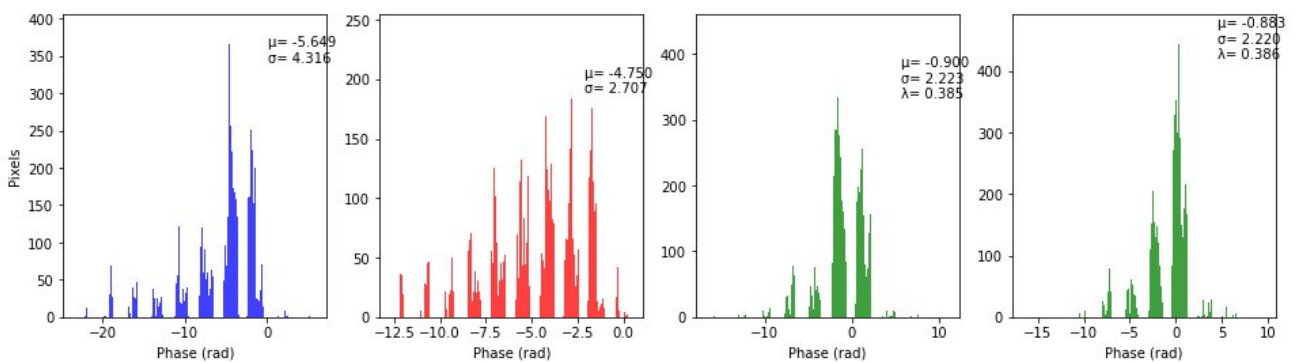
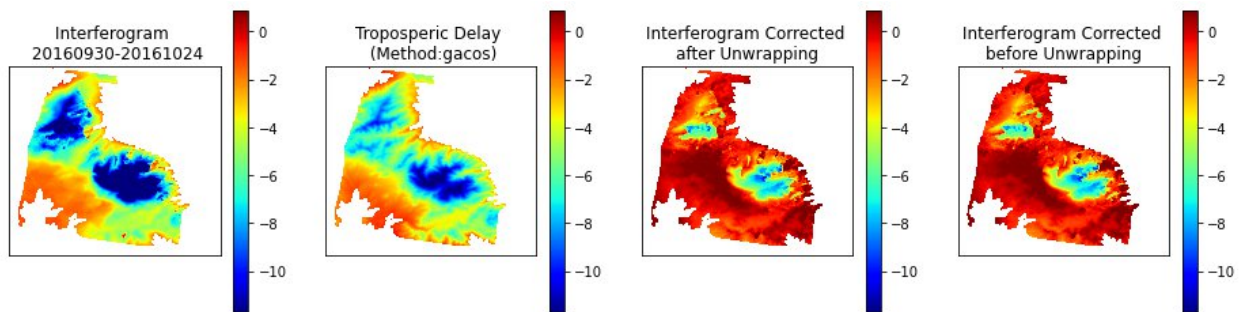
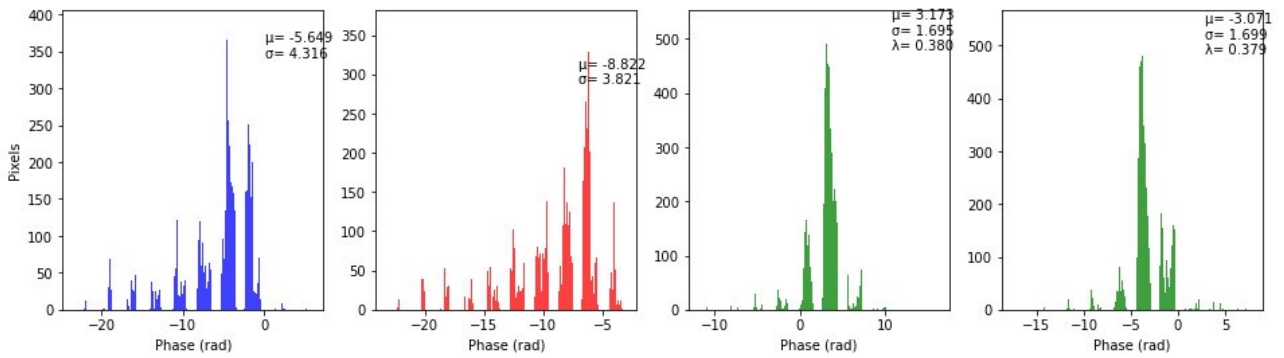
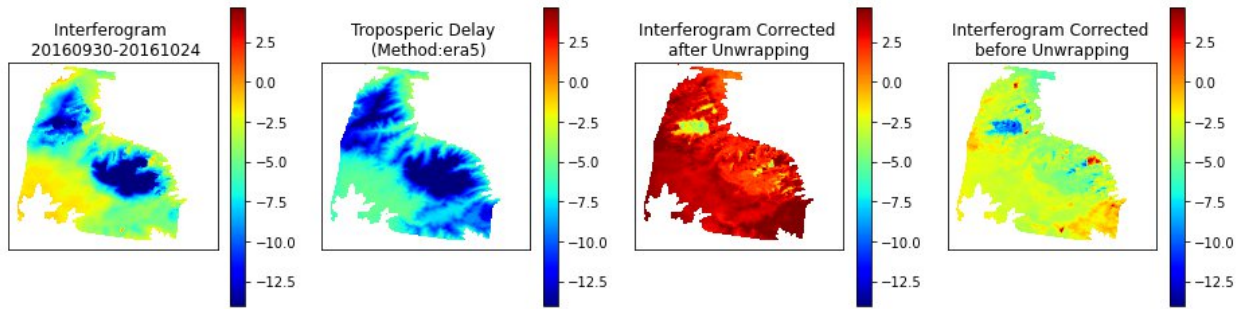
I.II. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση: Ορεινές Περιοχές



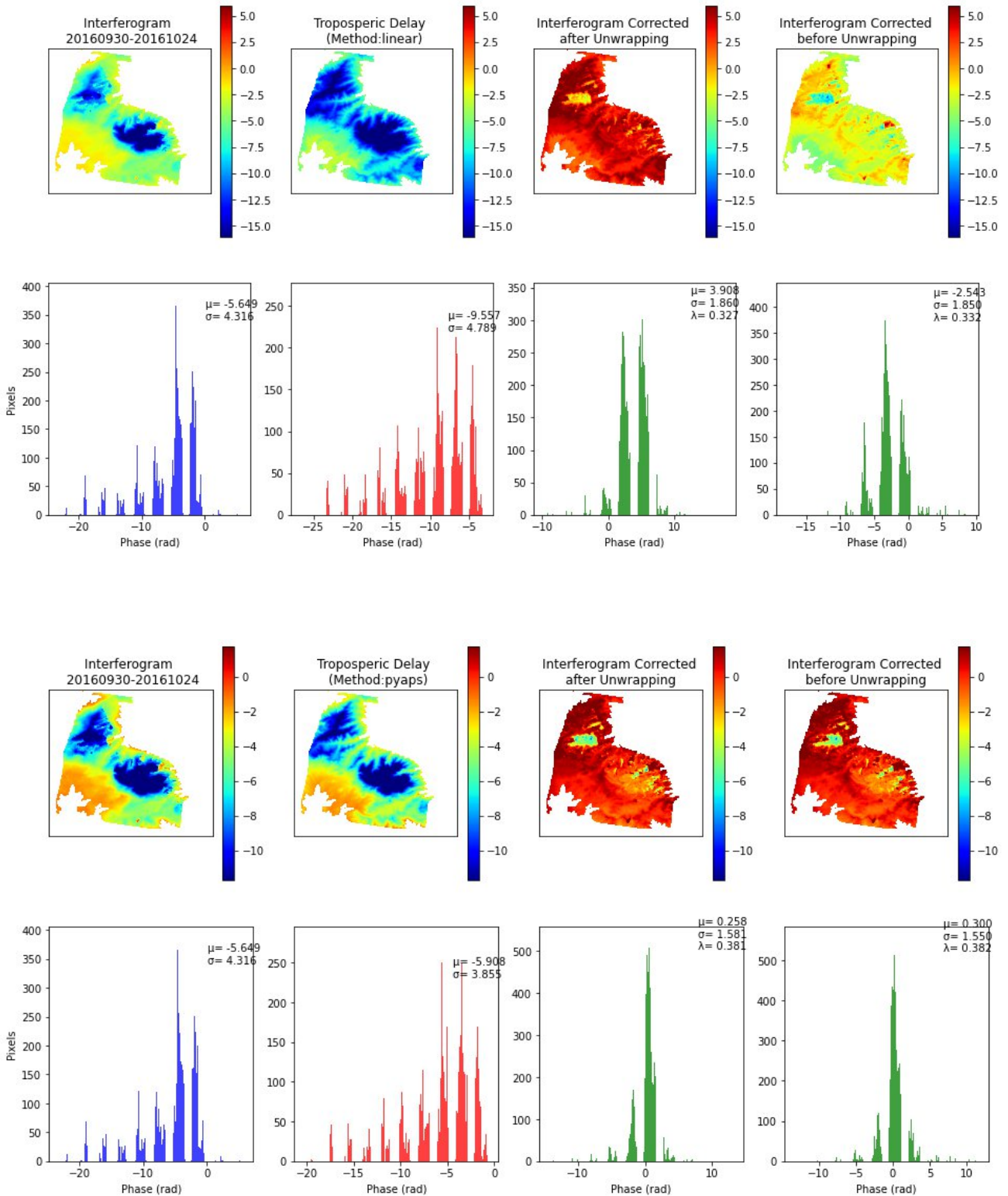
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



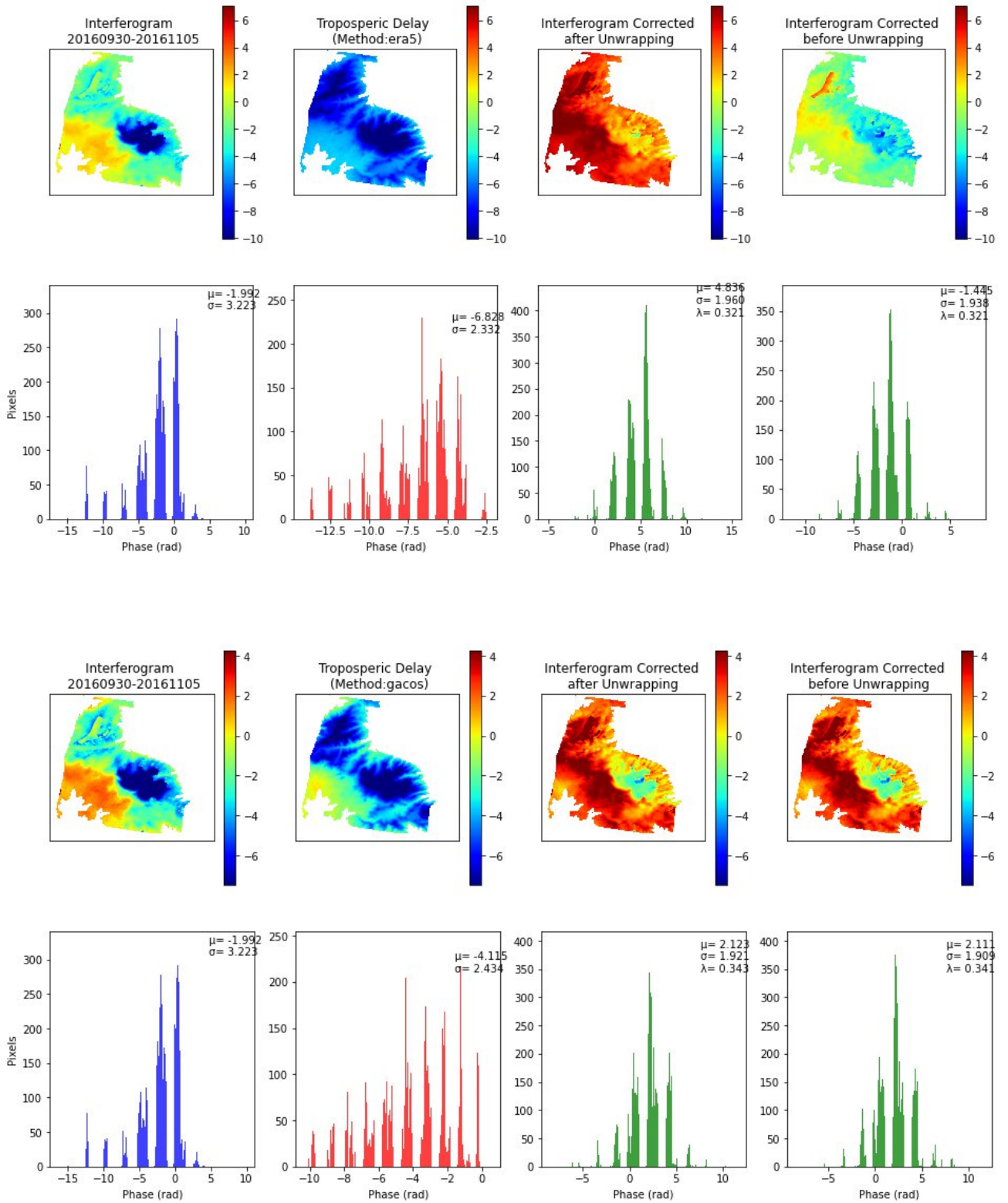
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



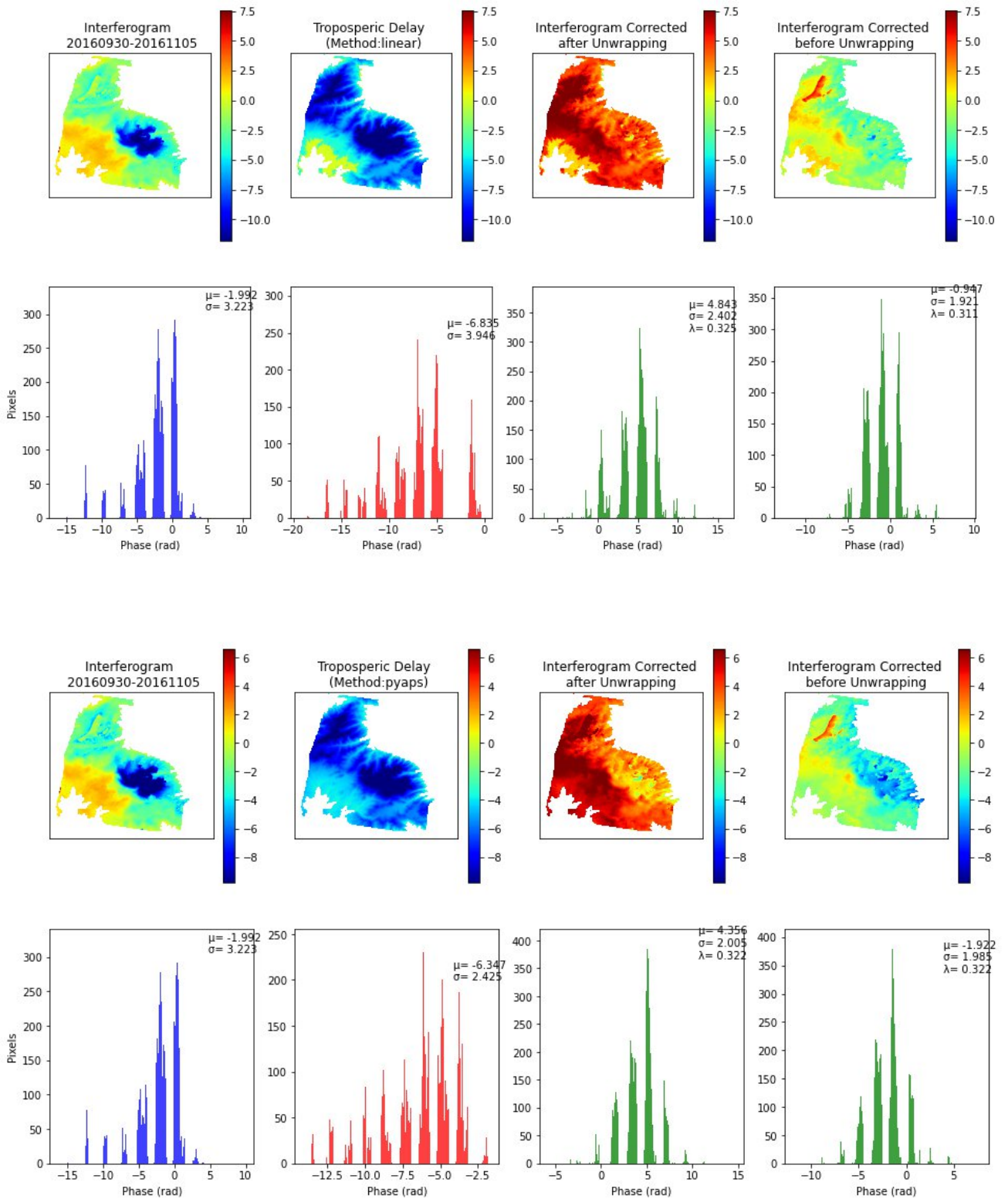
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



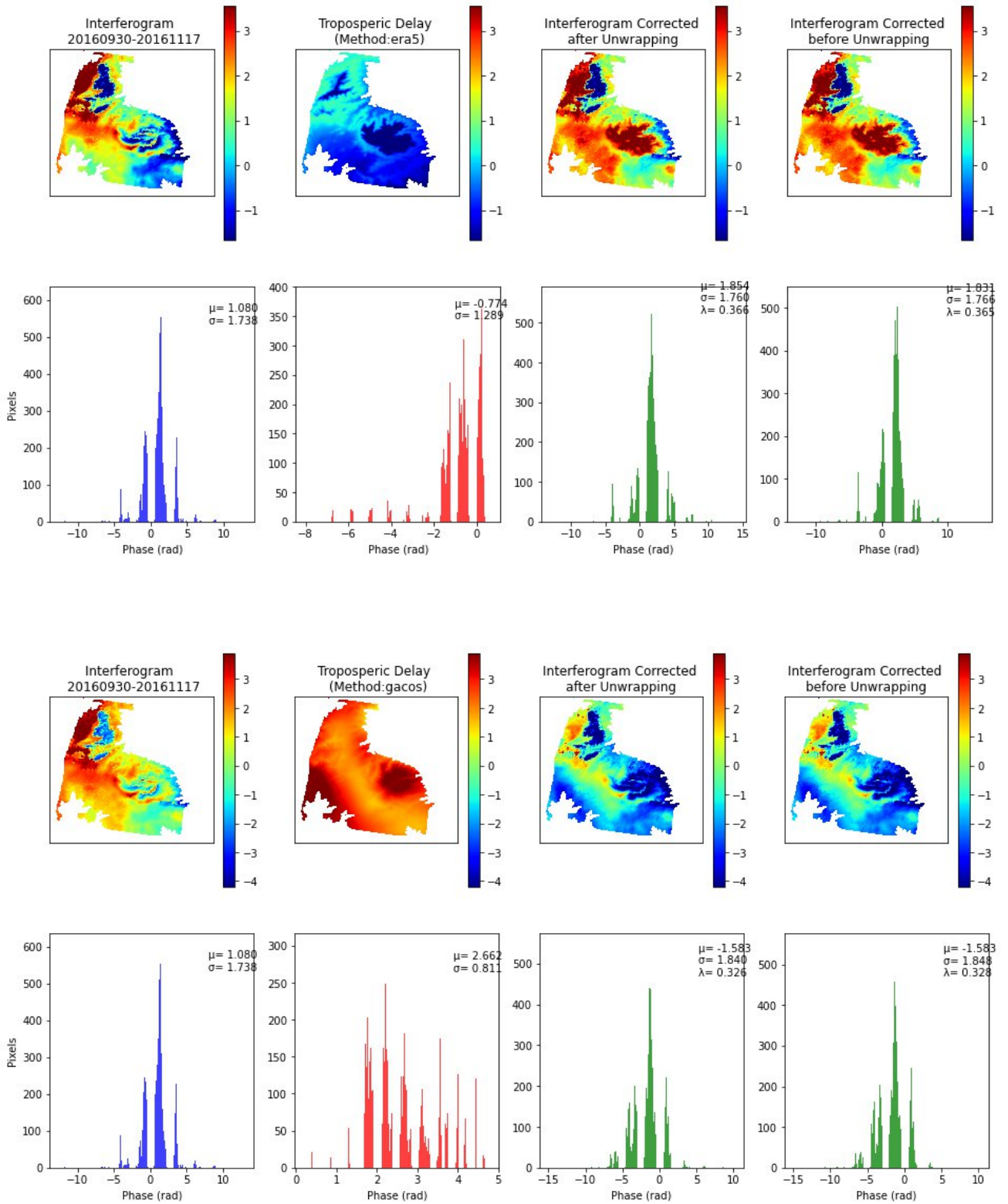
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



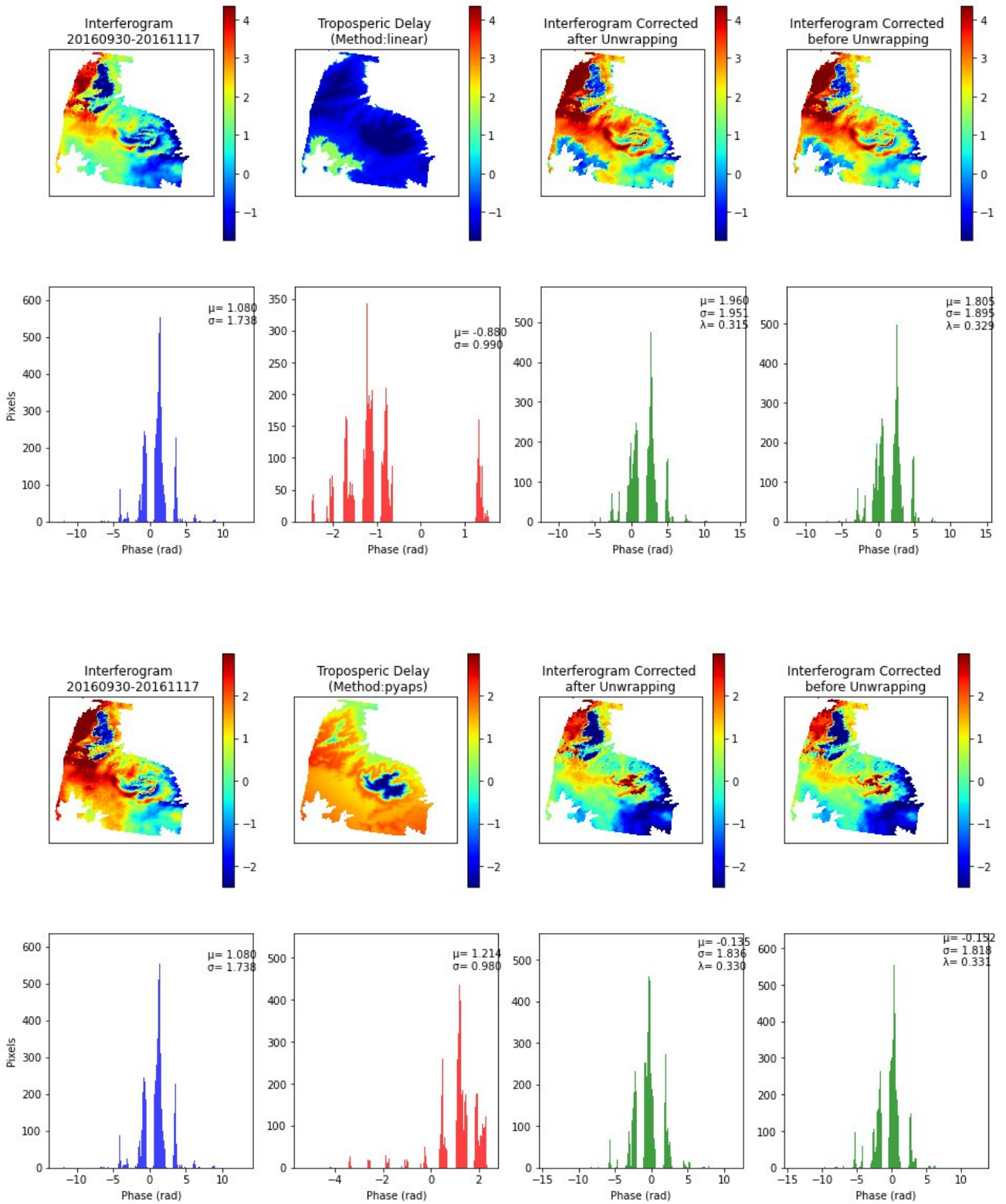
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



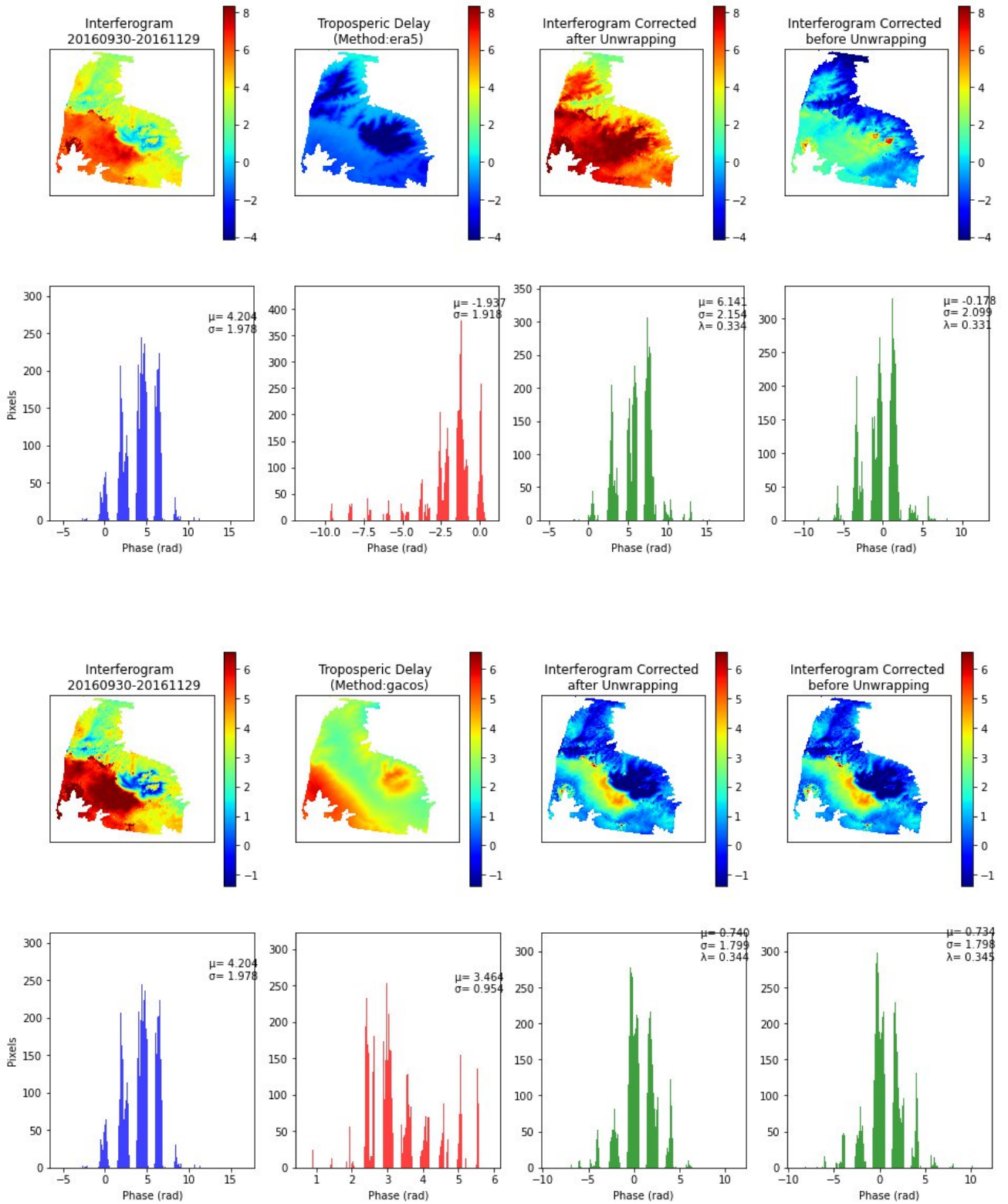
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



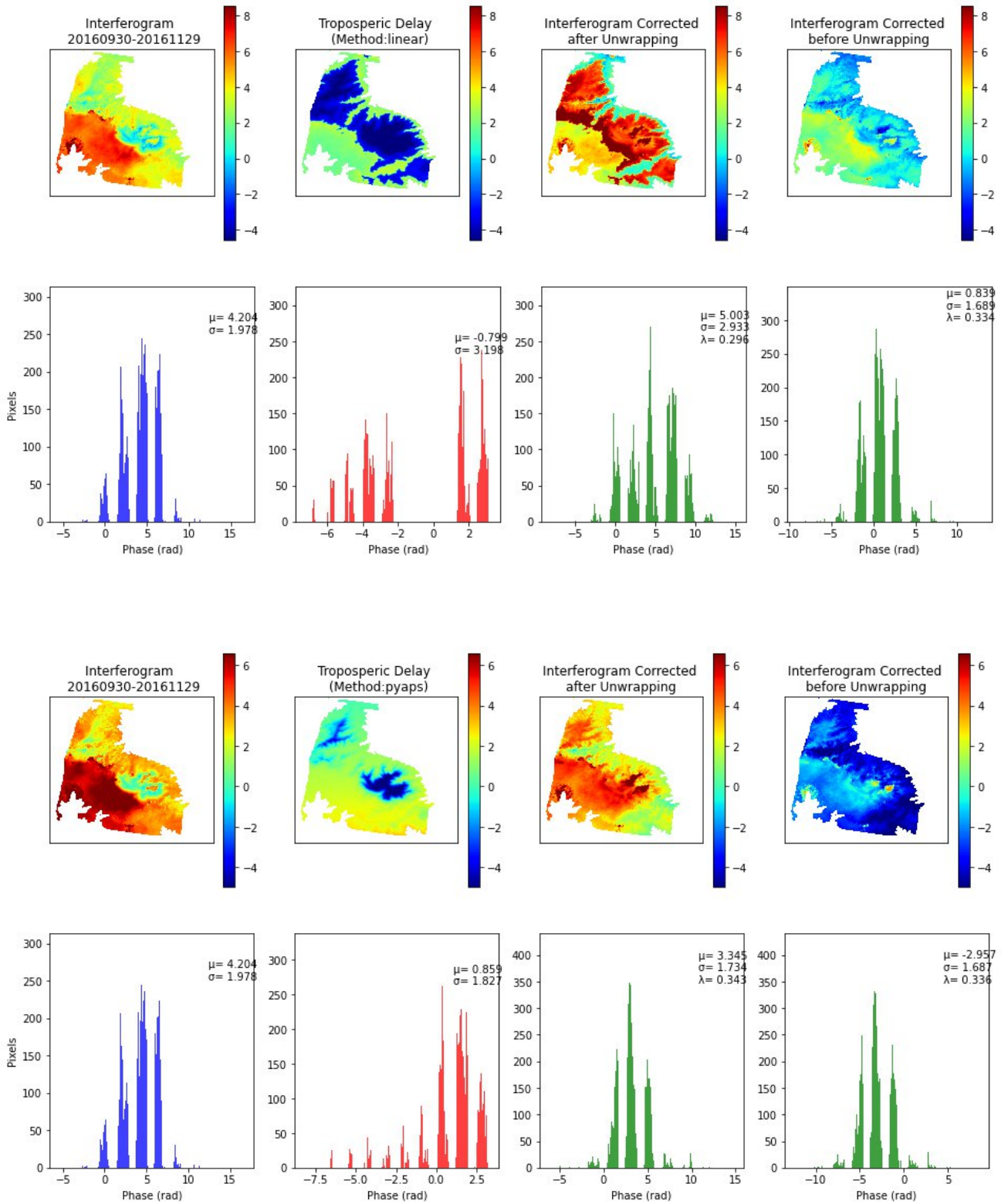
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



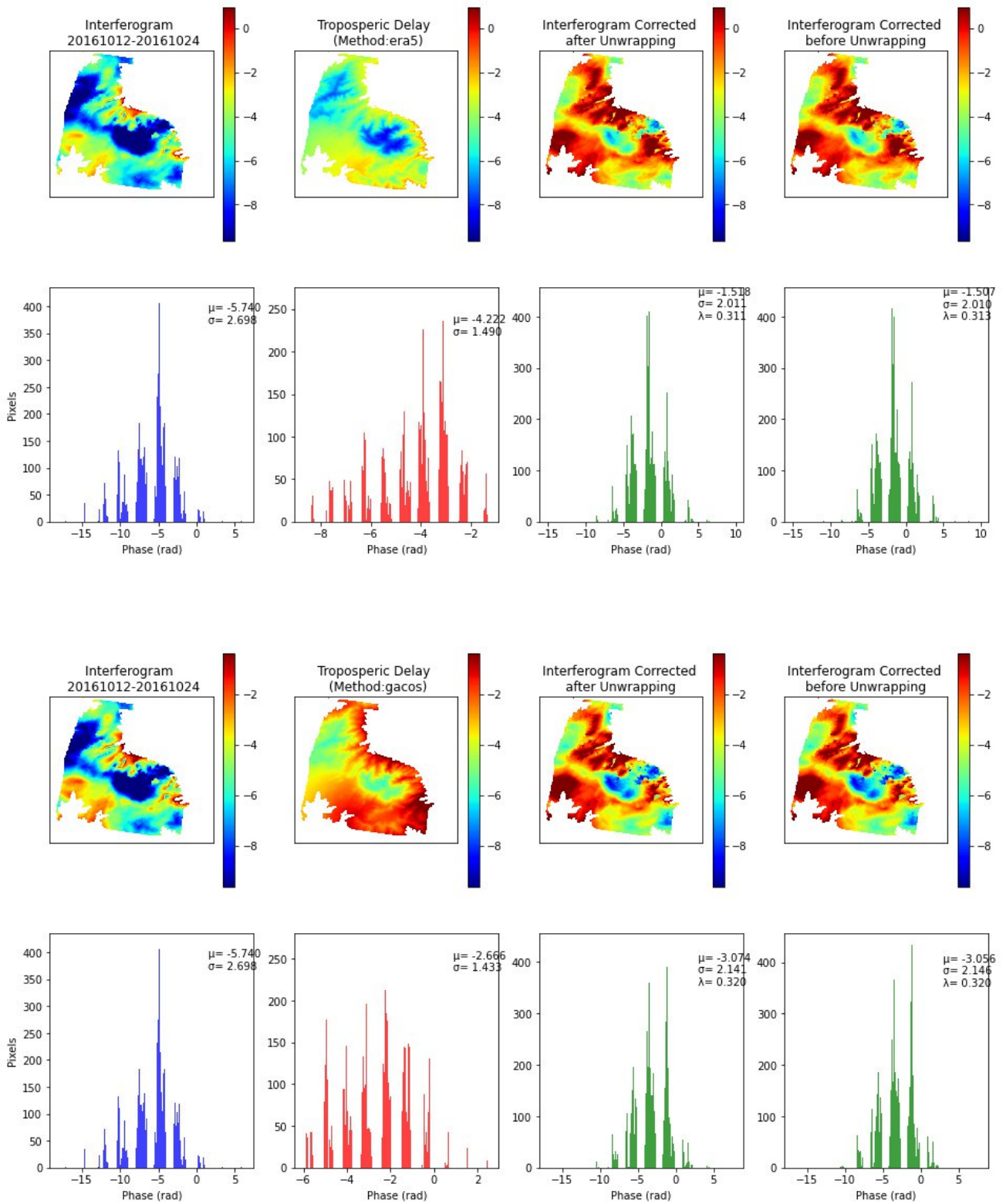
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



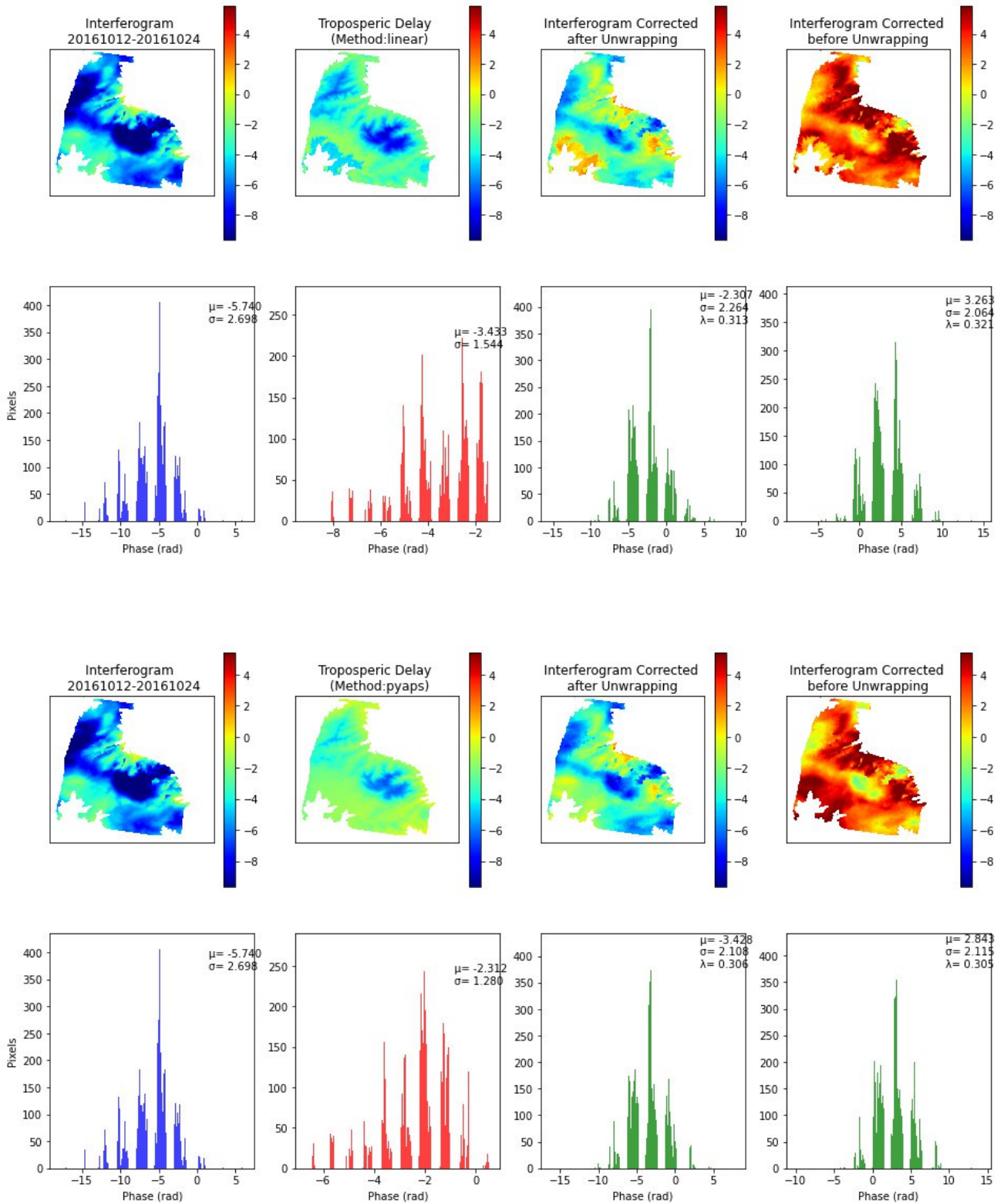
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



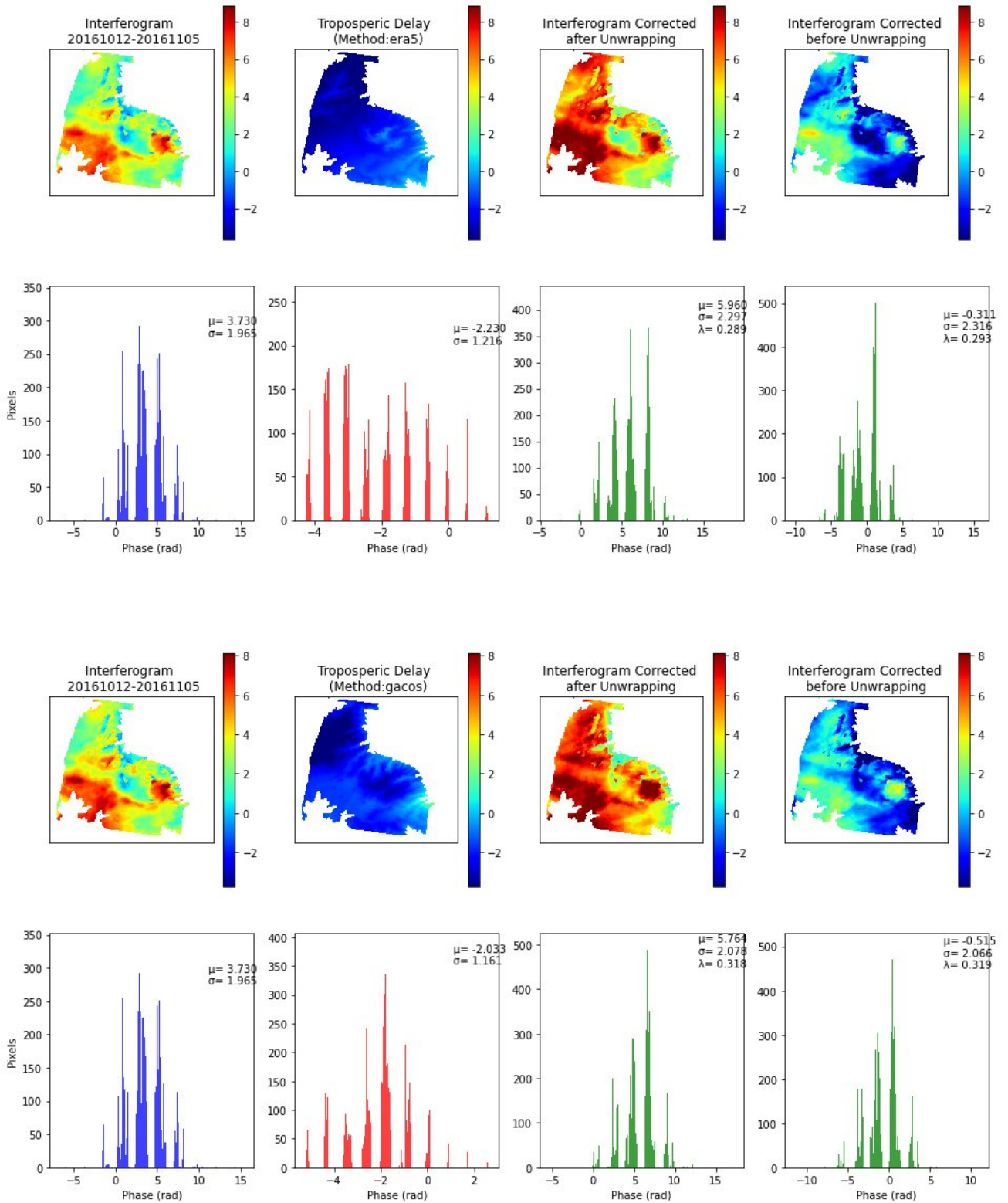
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



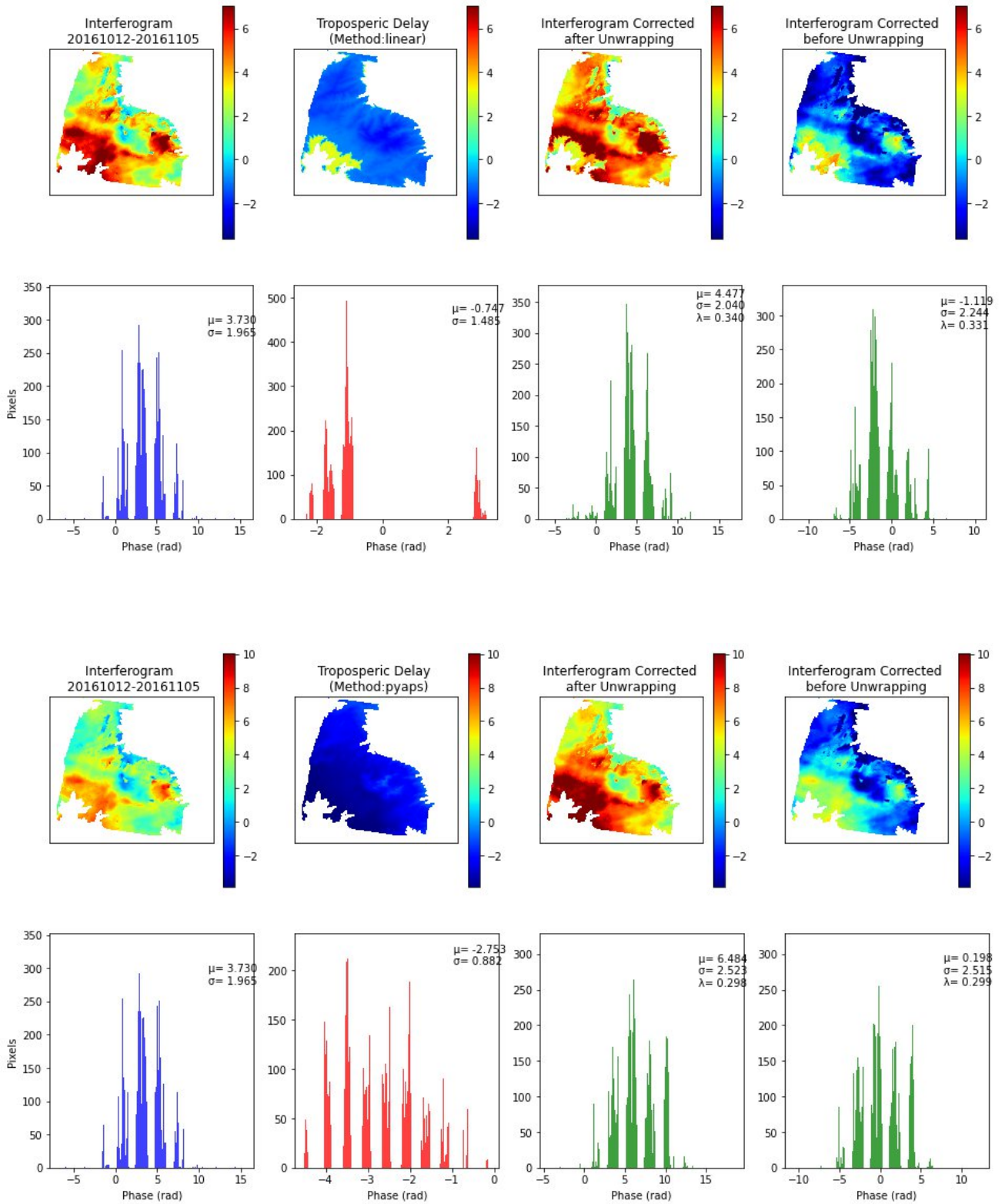
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



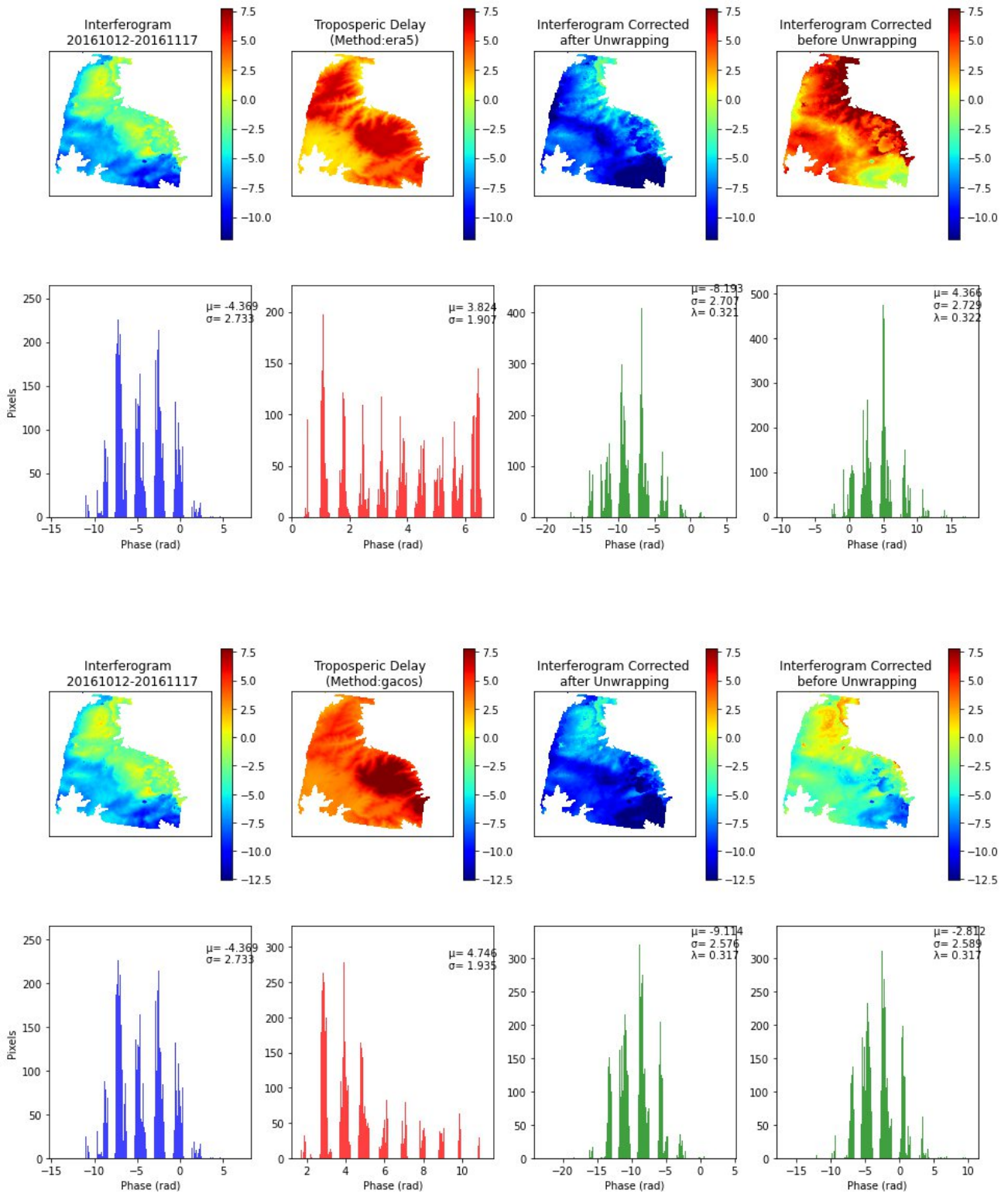
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



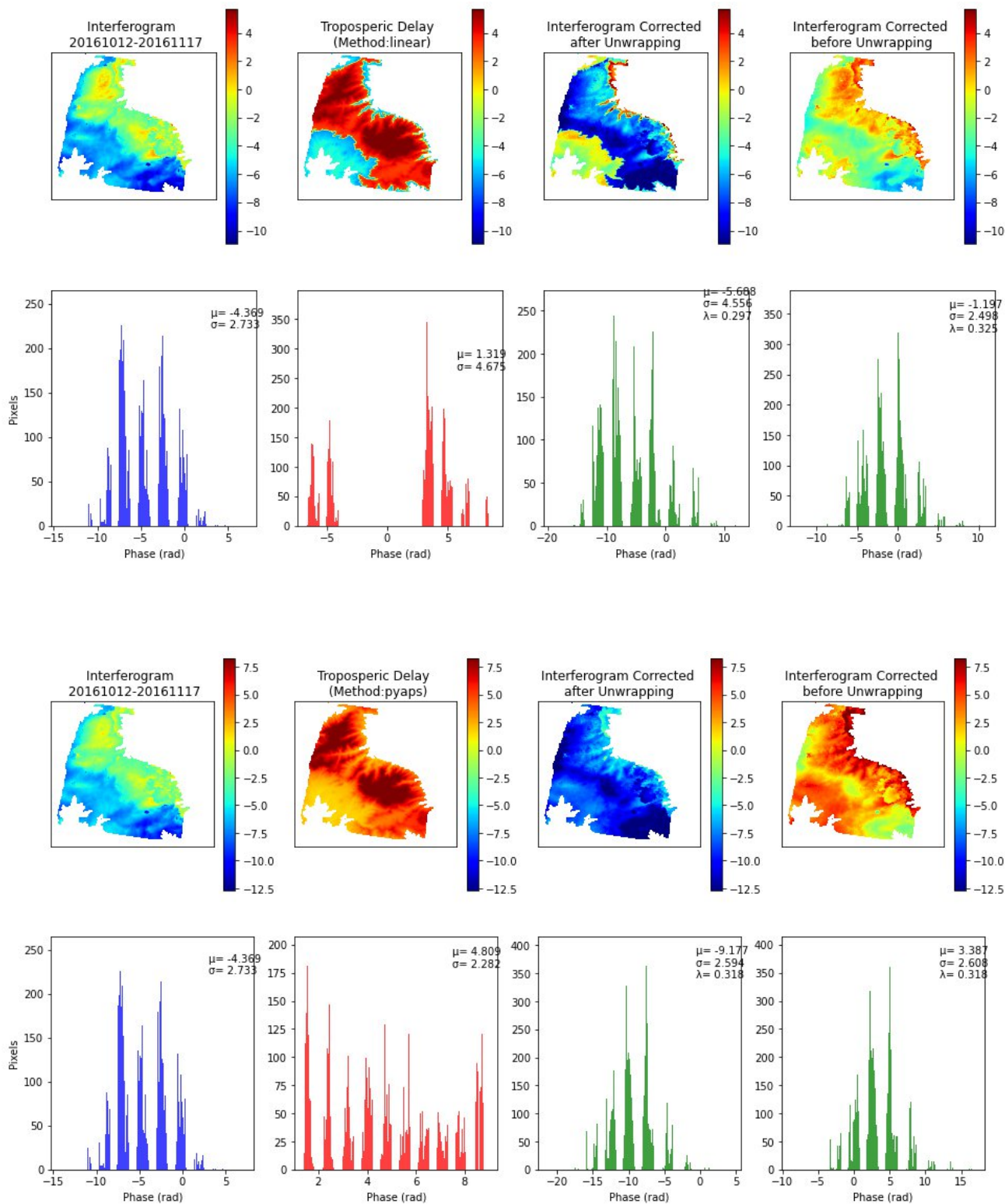
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



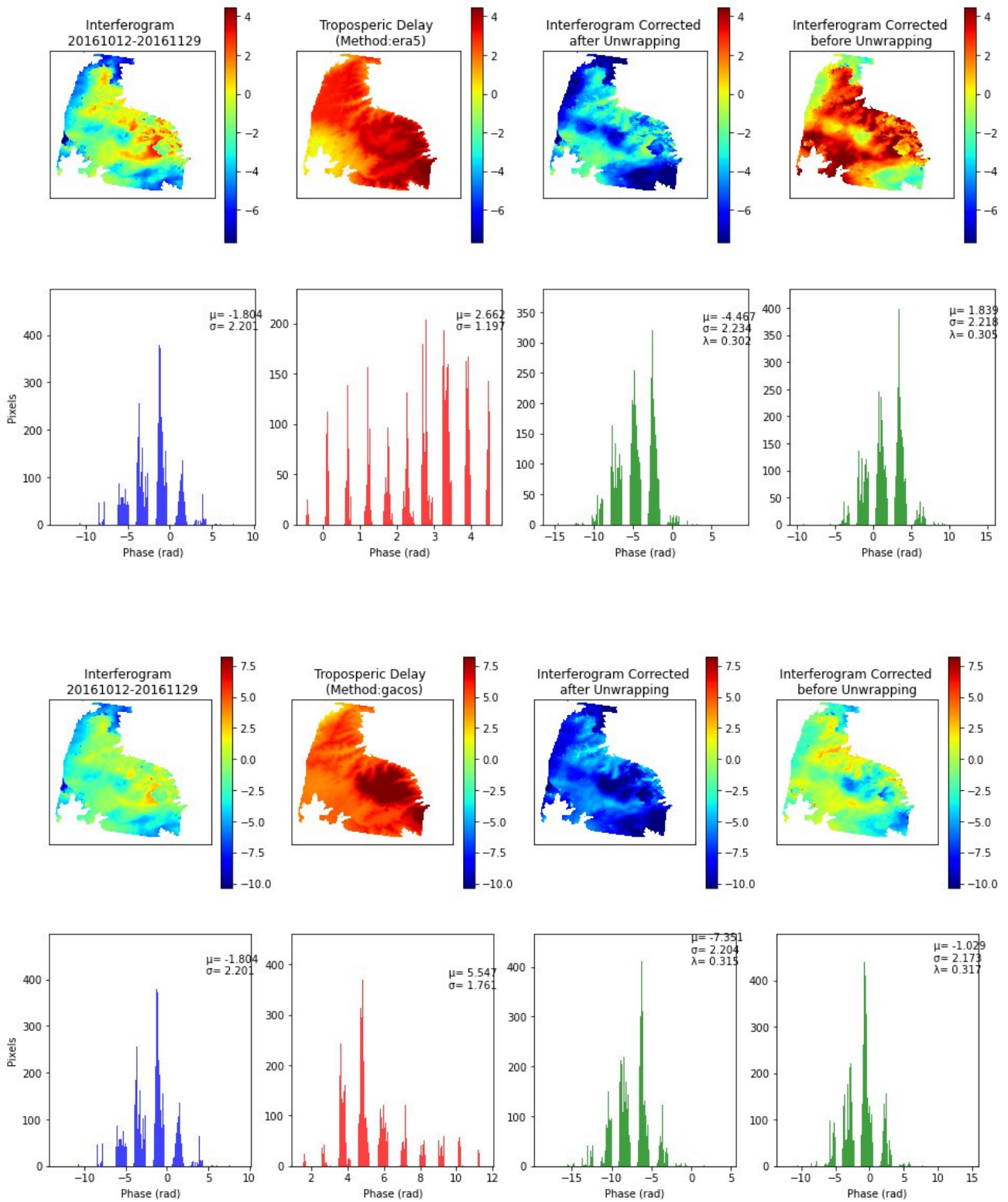
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



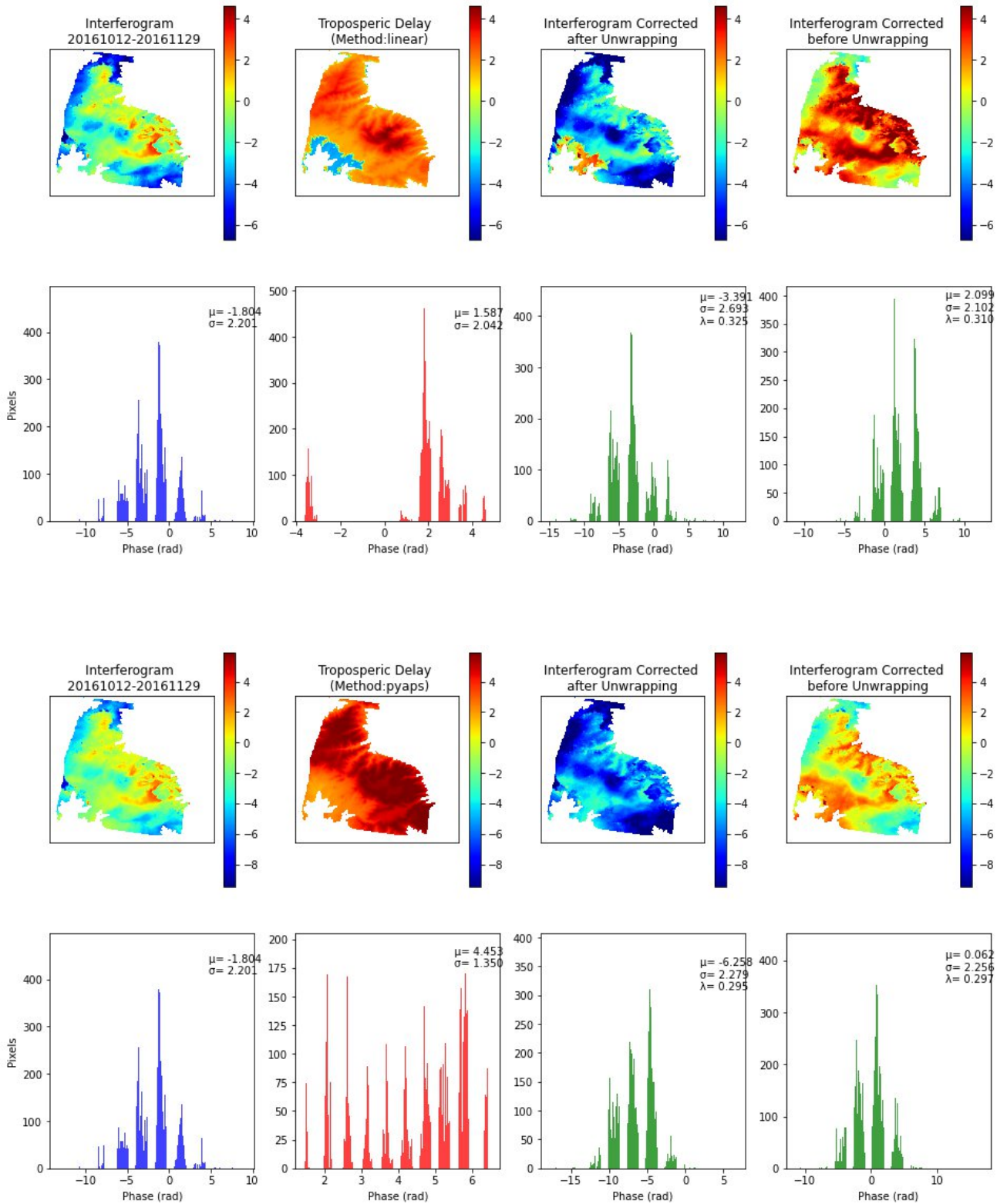
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



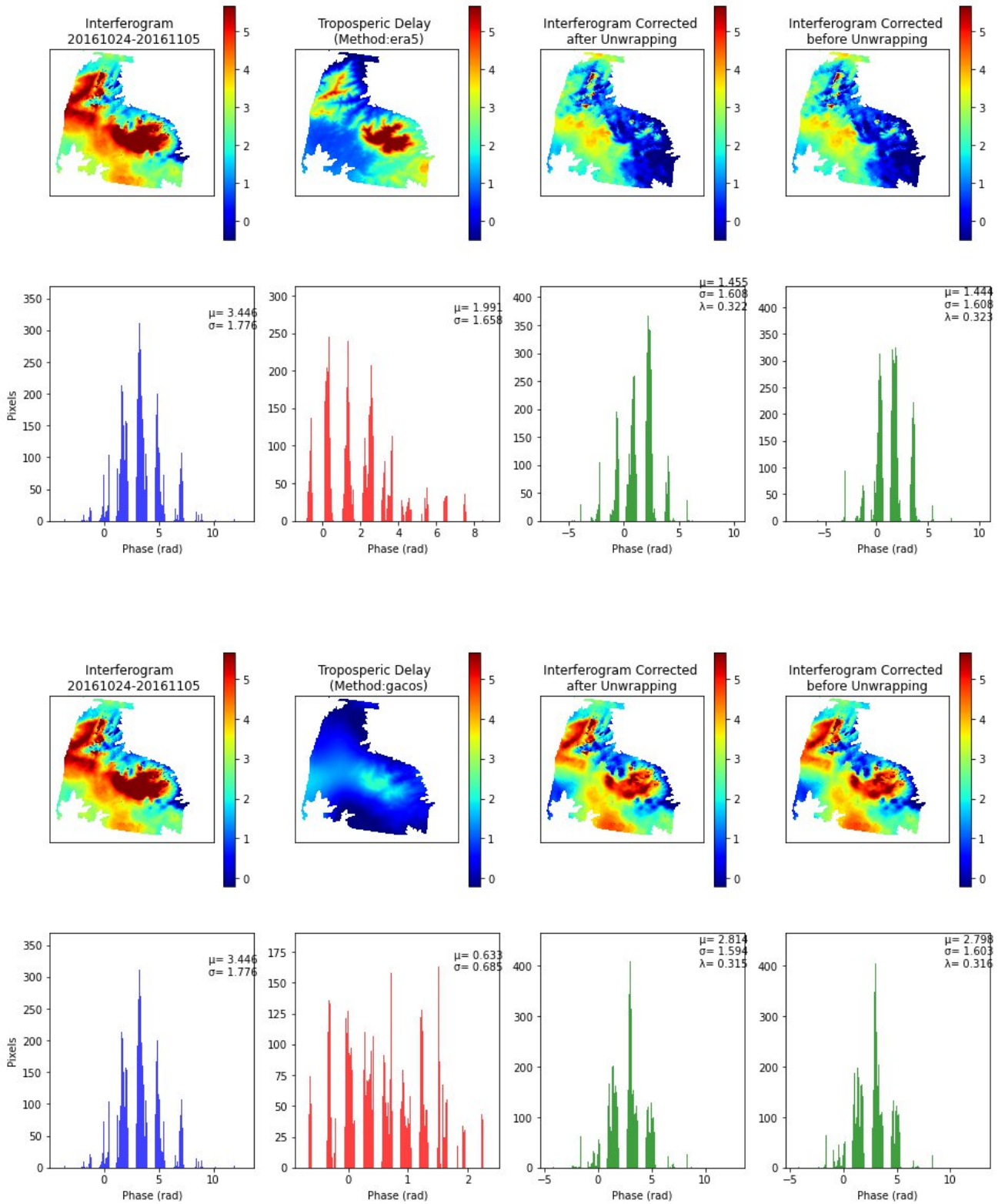
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



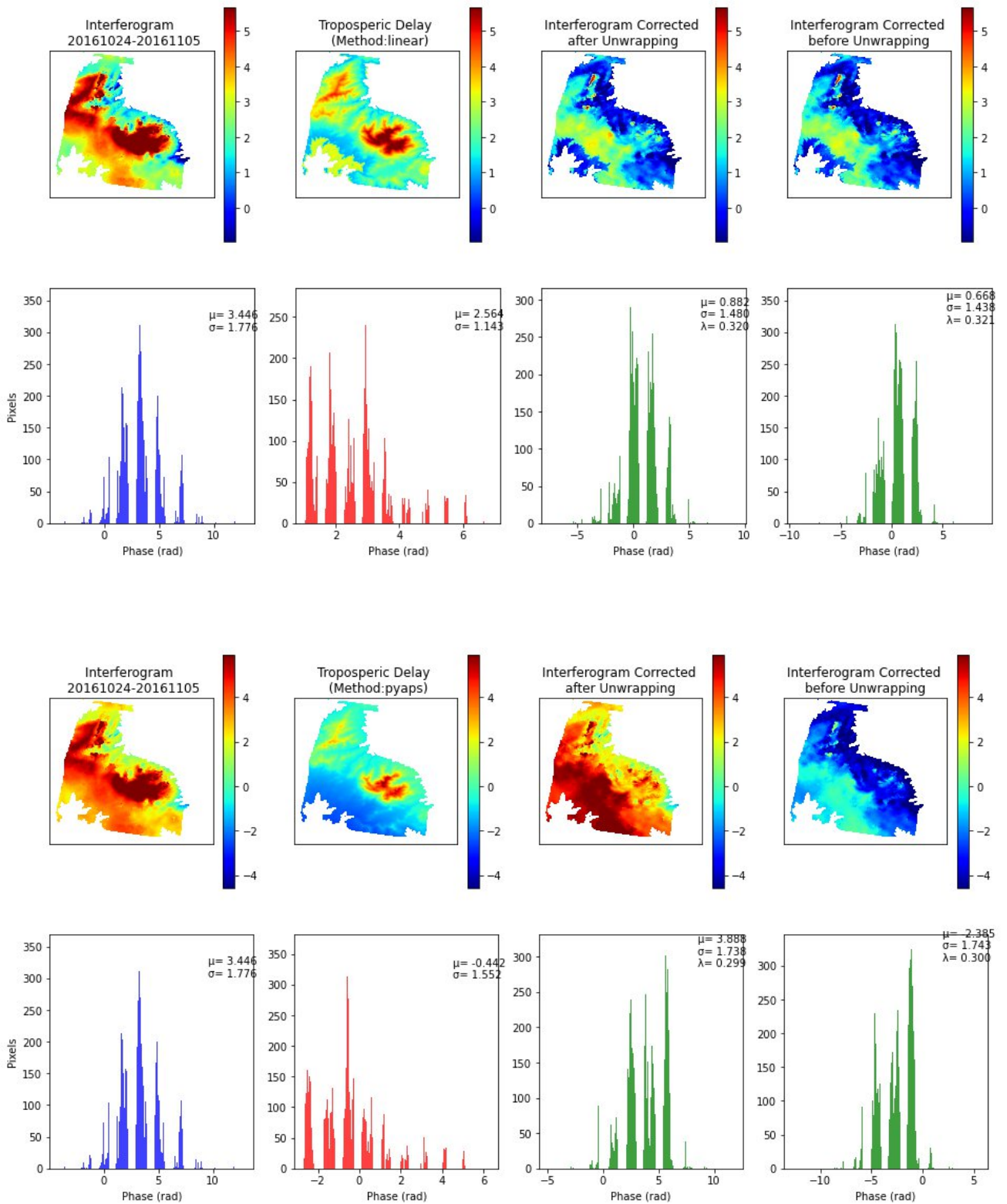
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



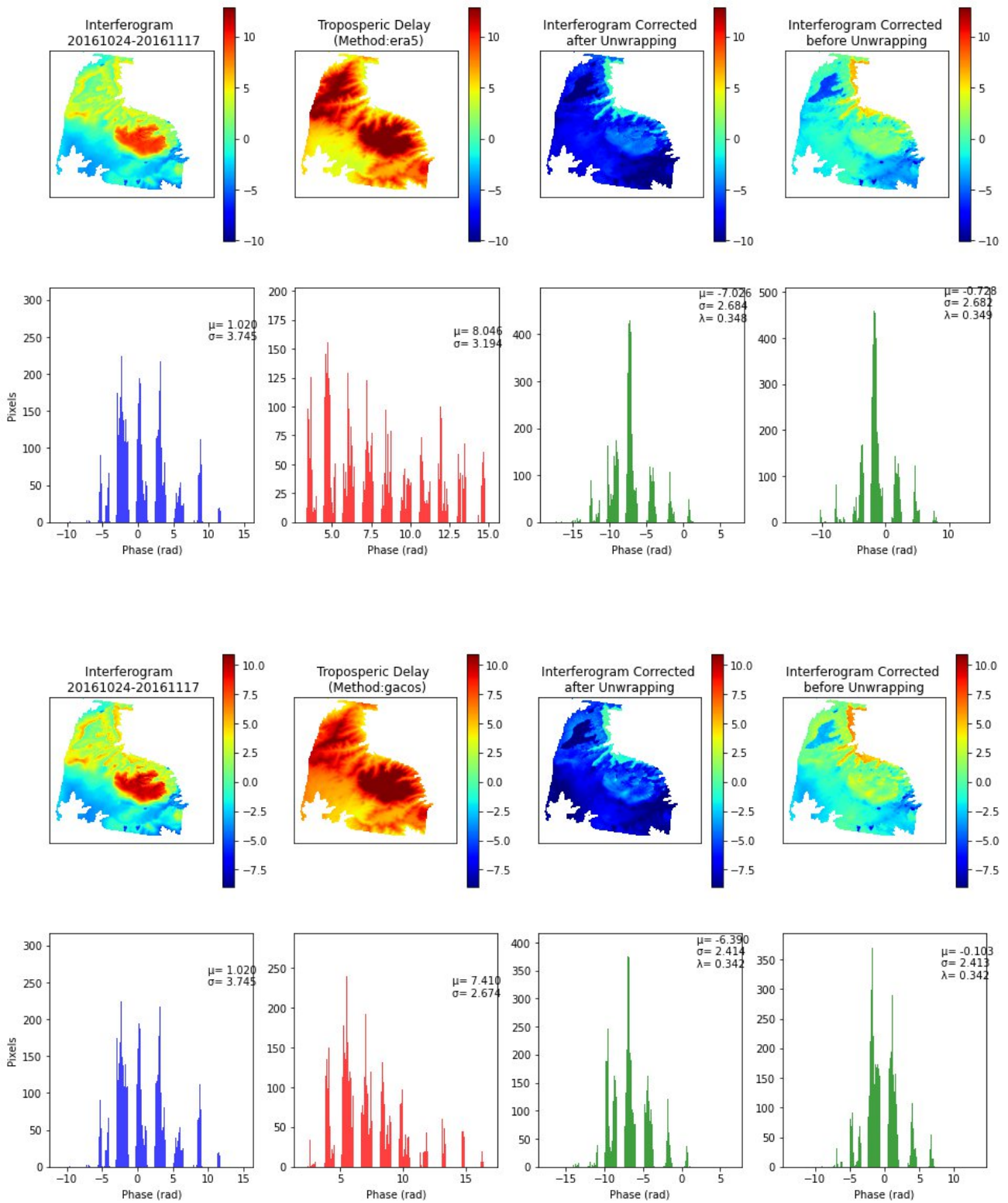
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



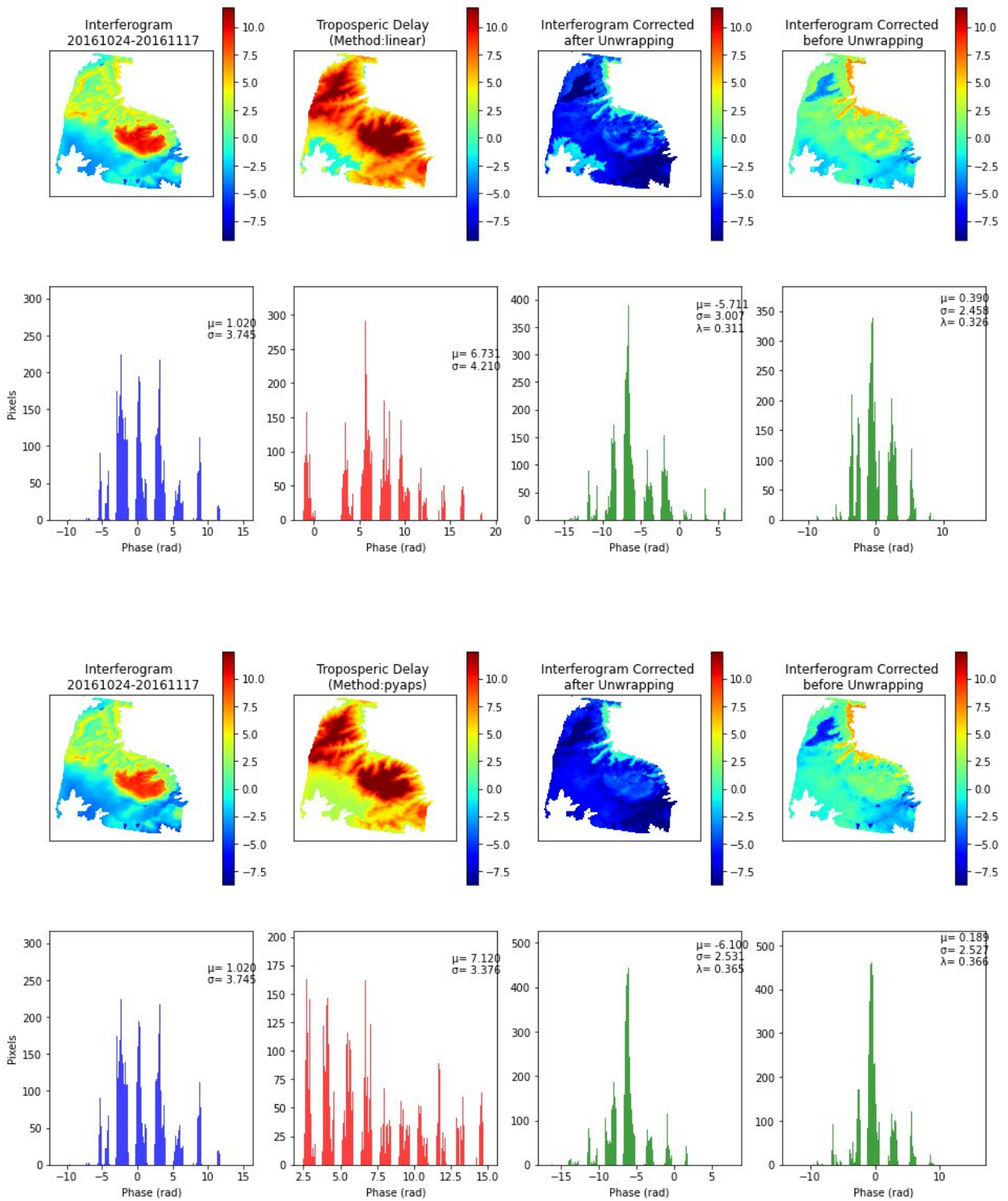
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



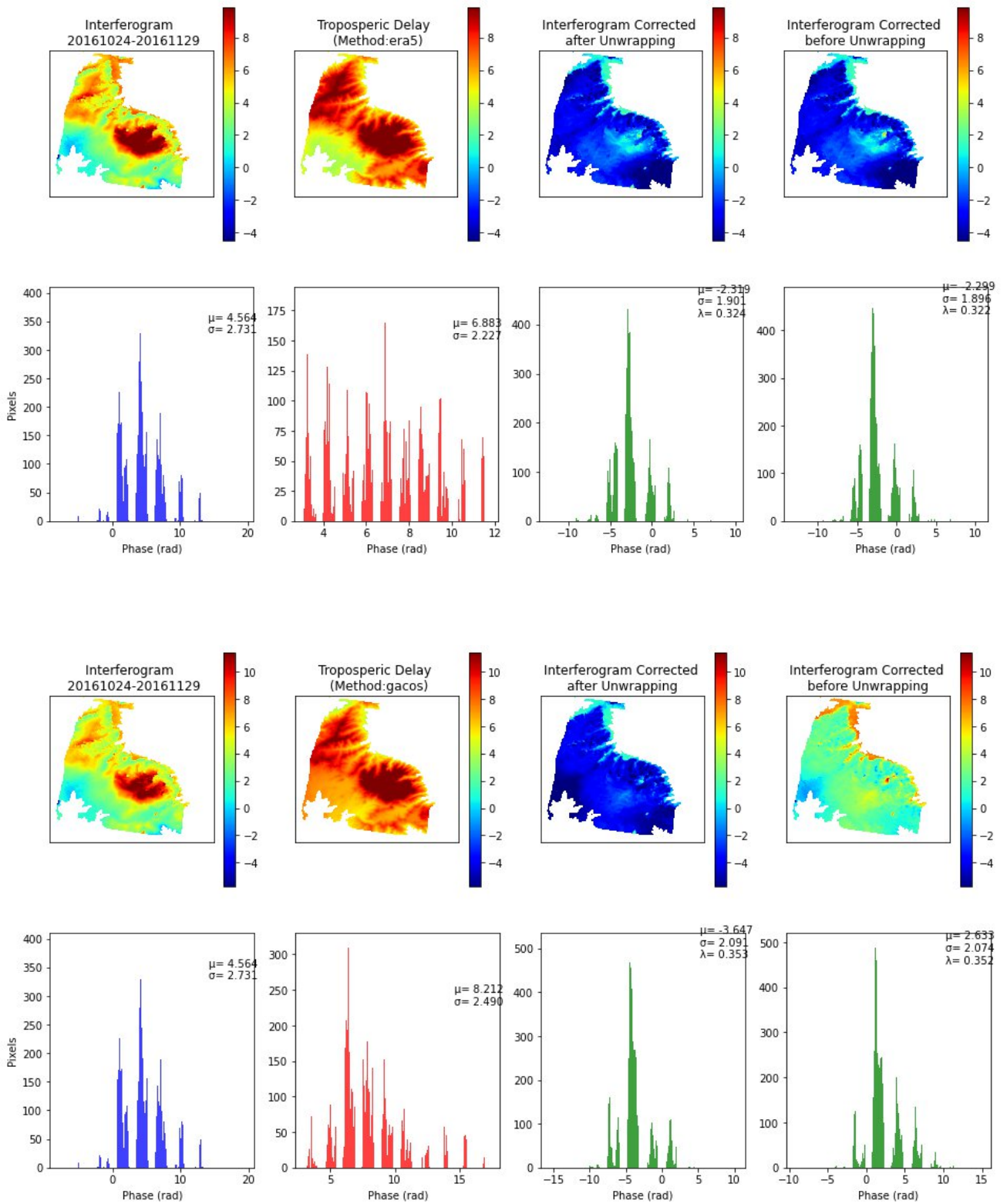
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



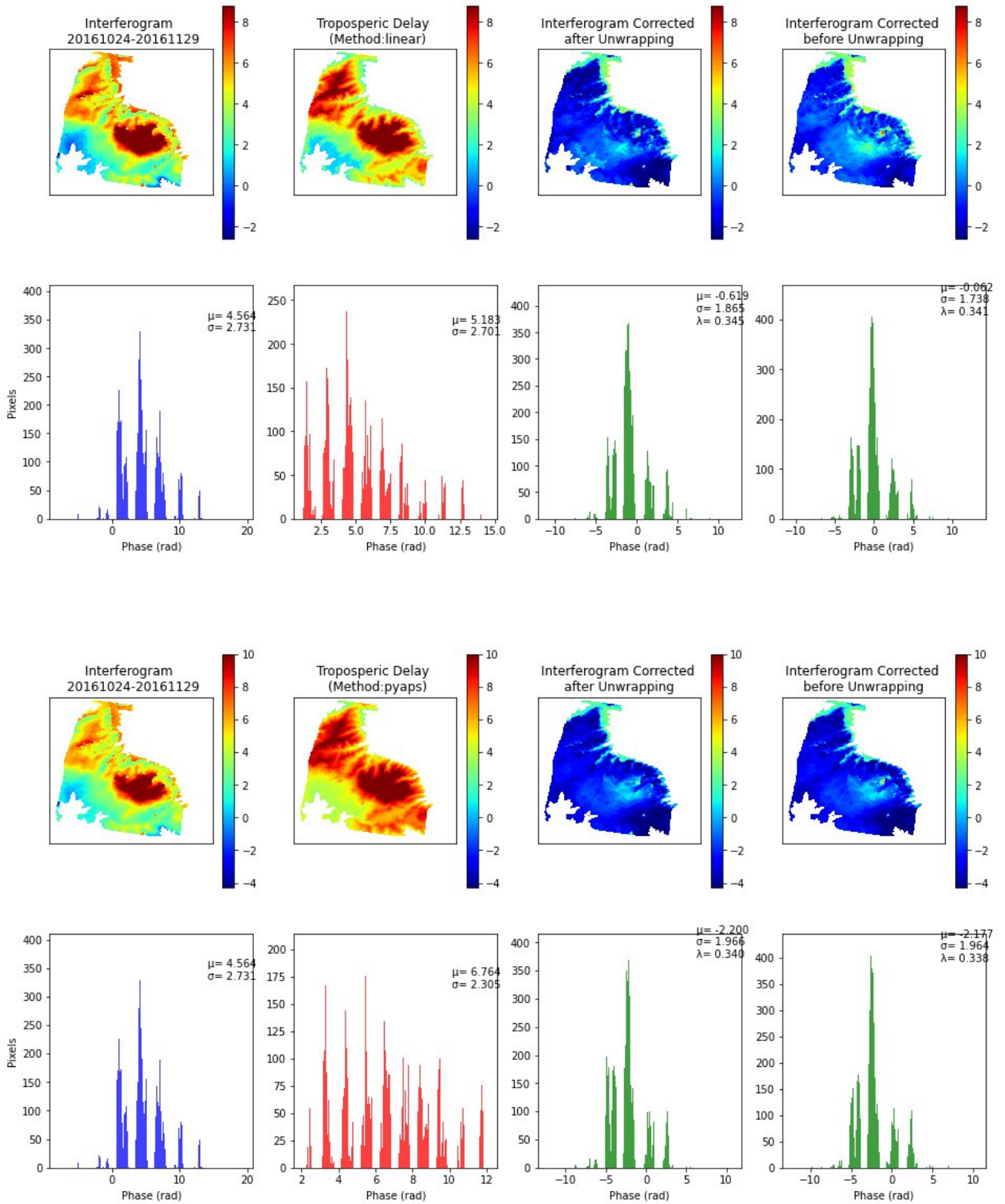
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



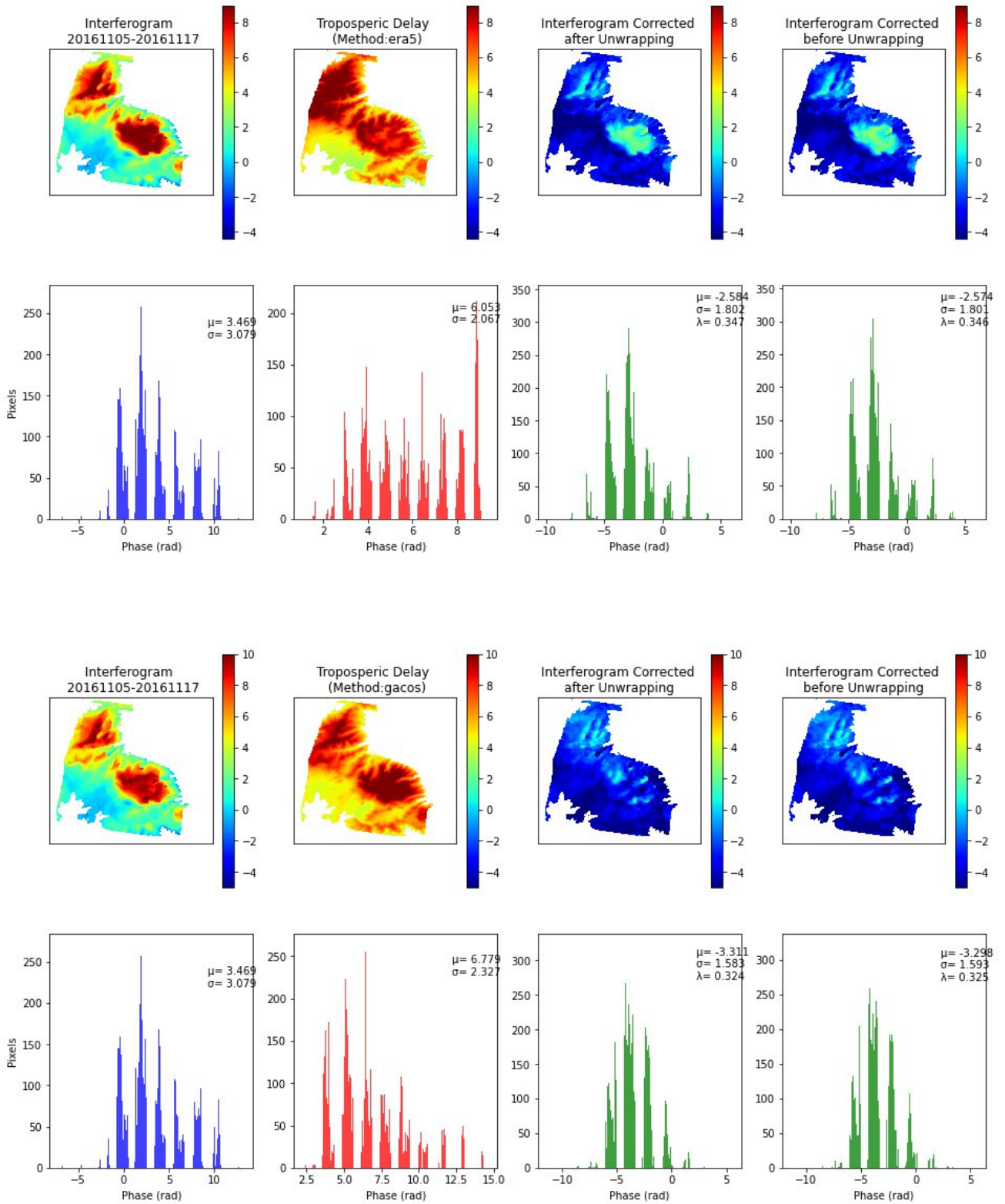
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



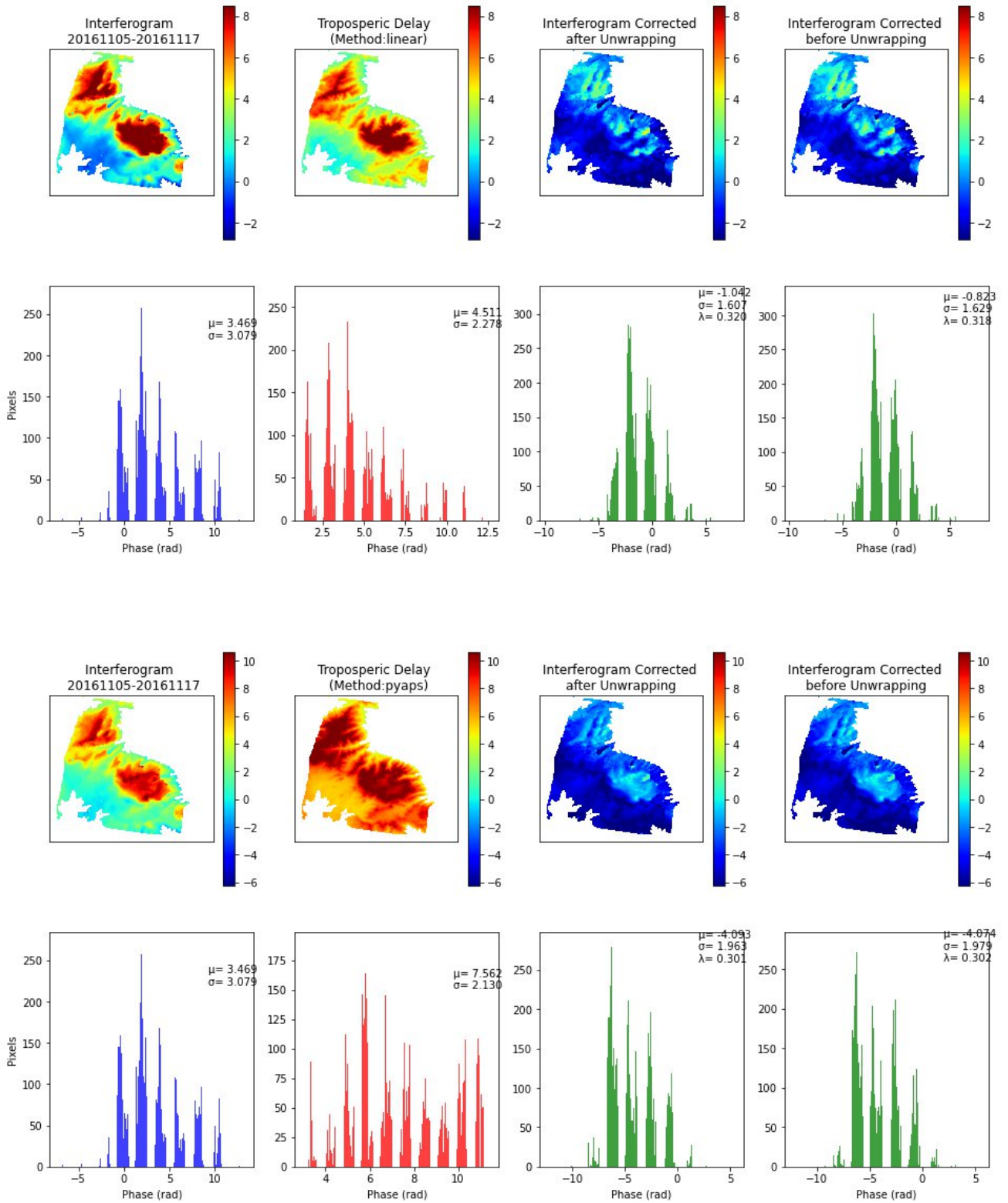
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



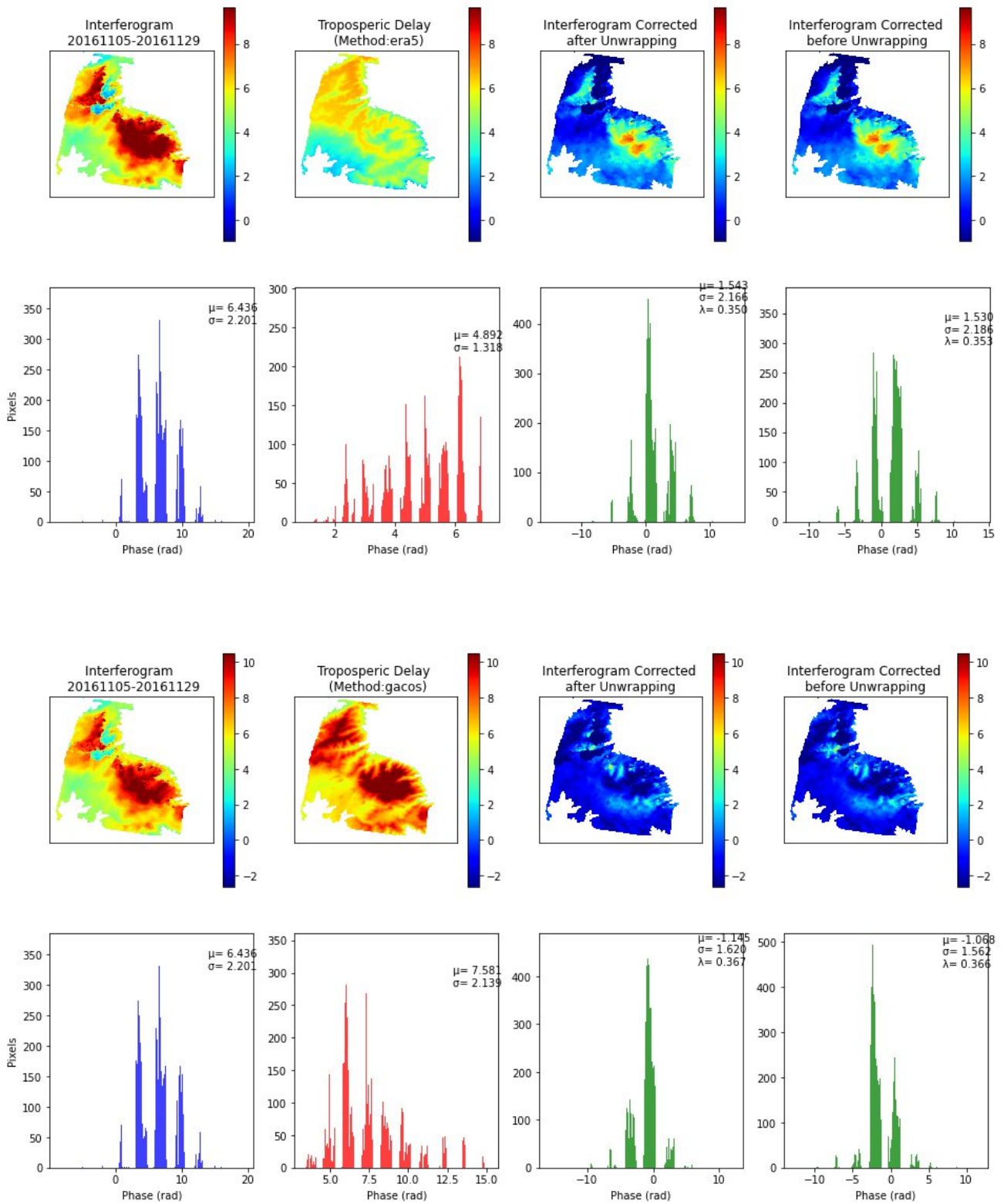
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



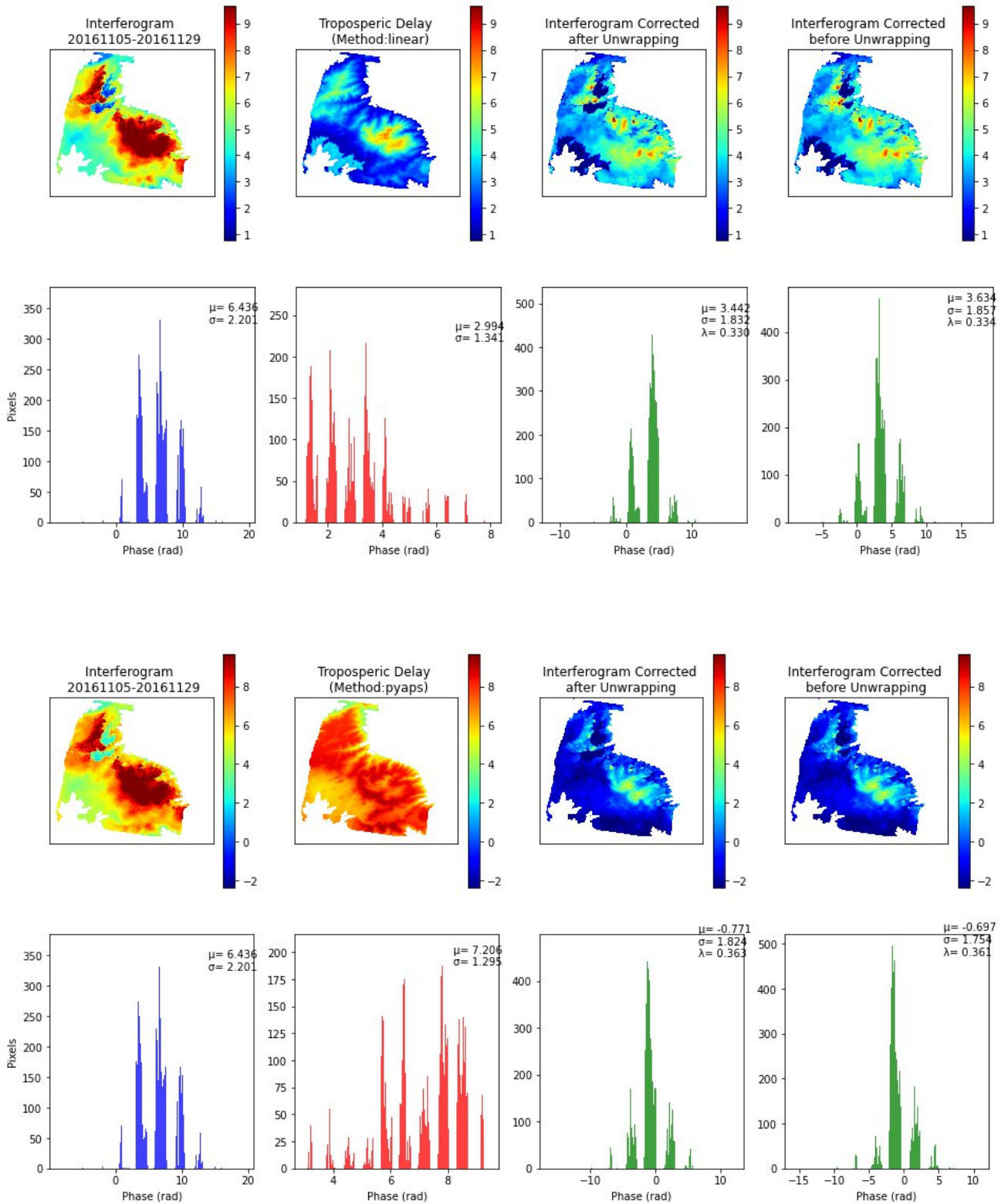
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



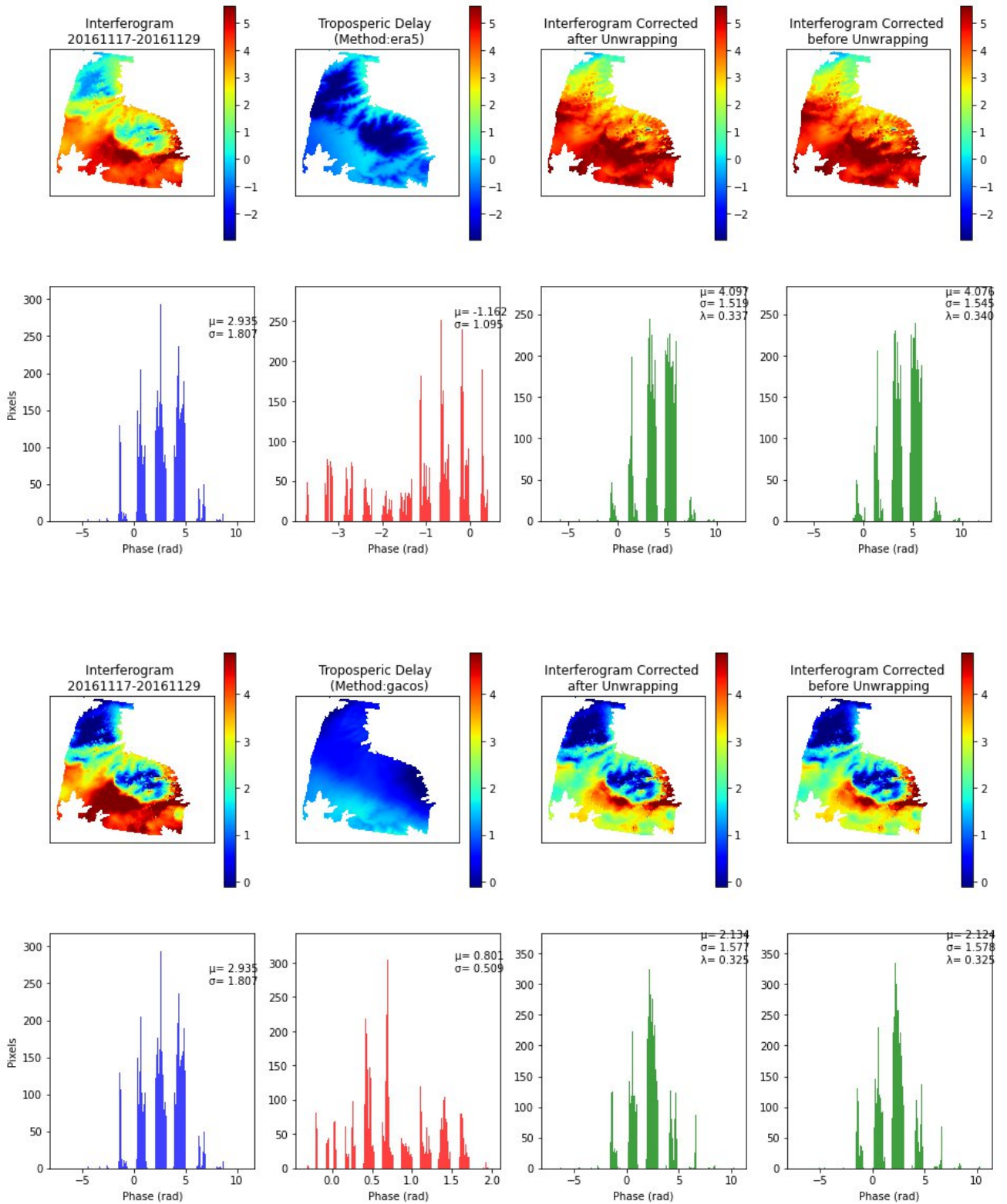
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



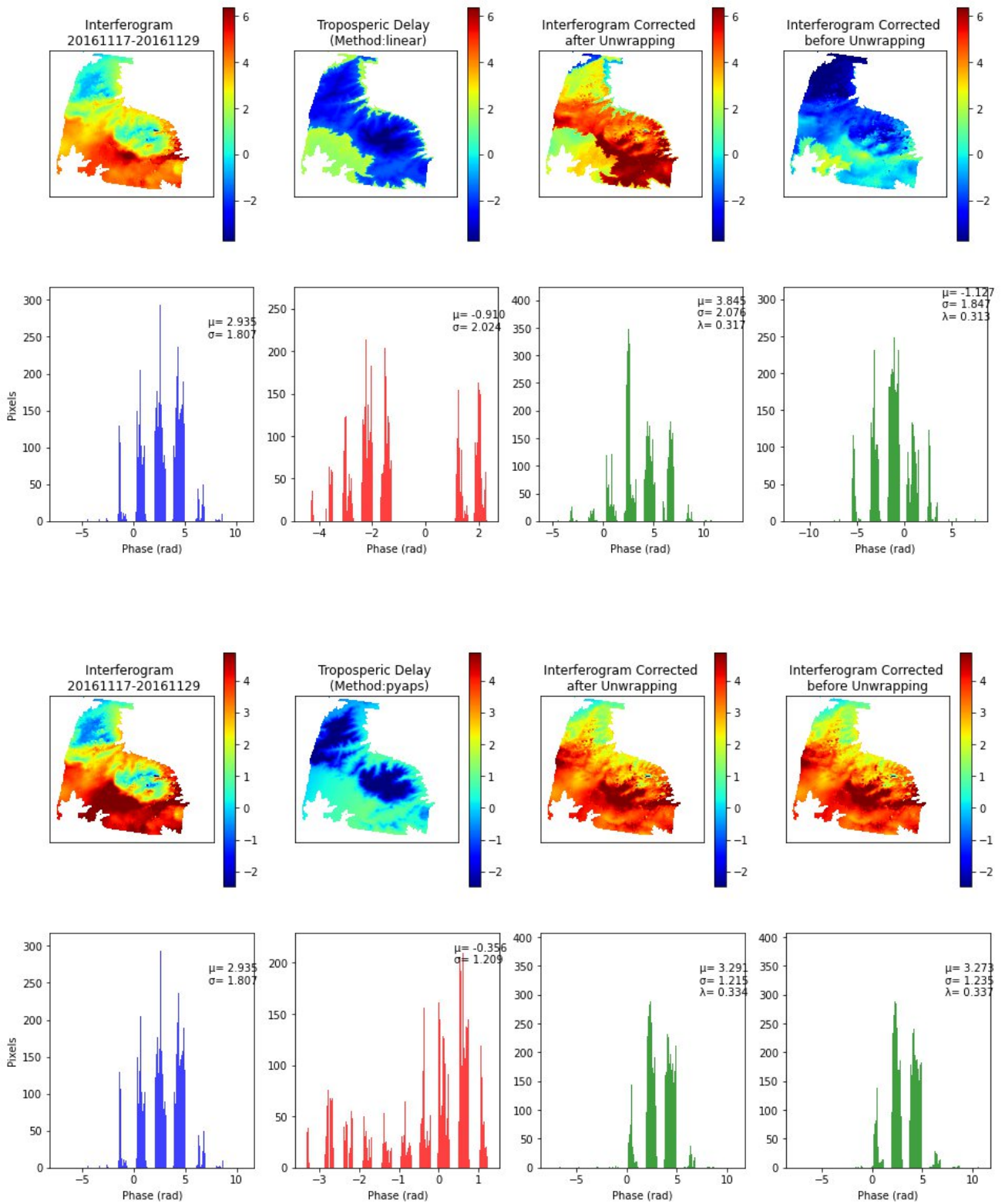
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



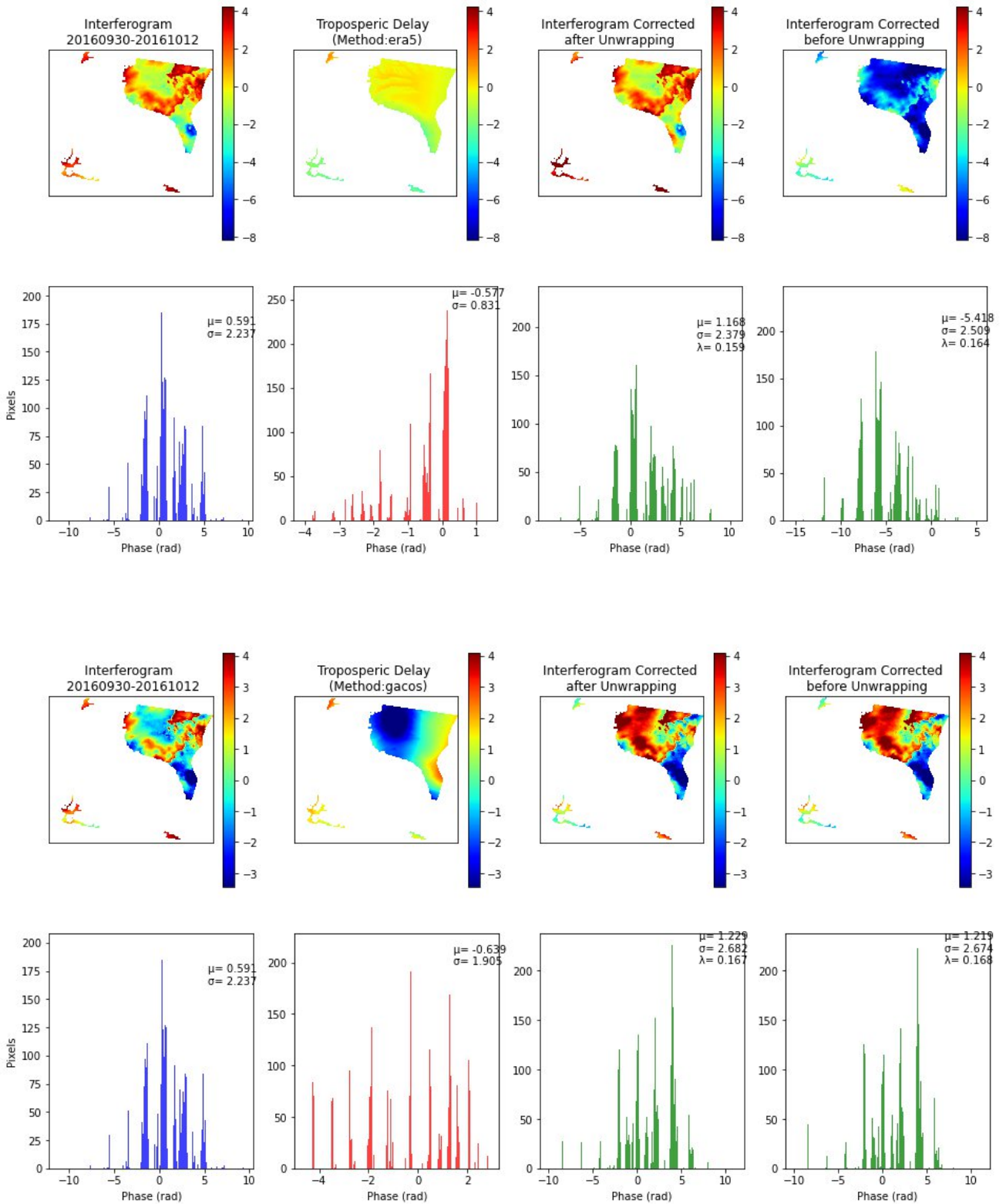
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



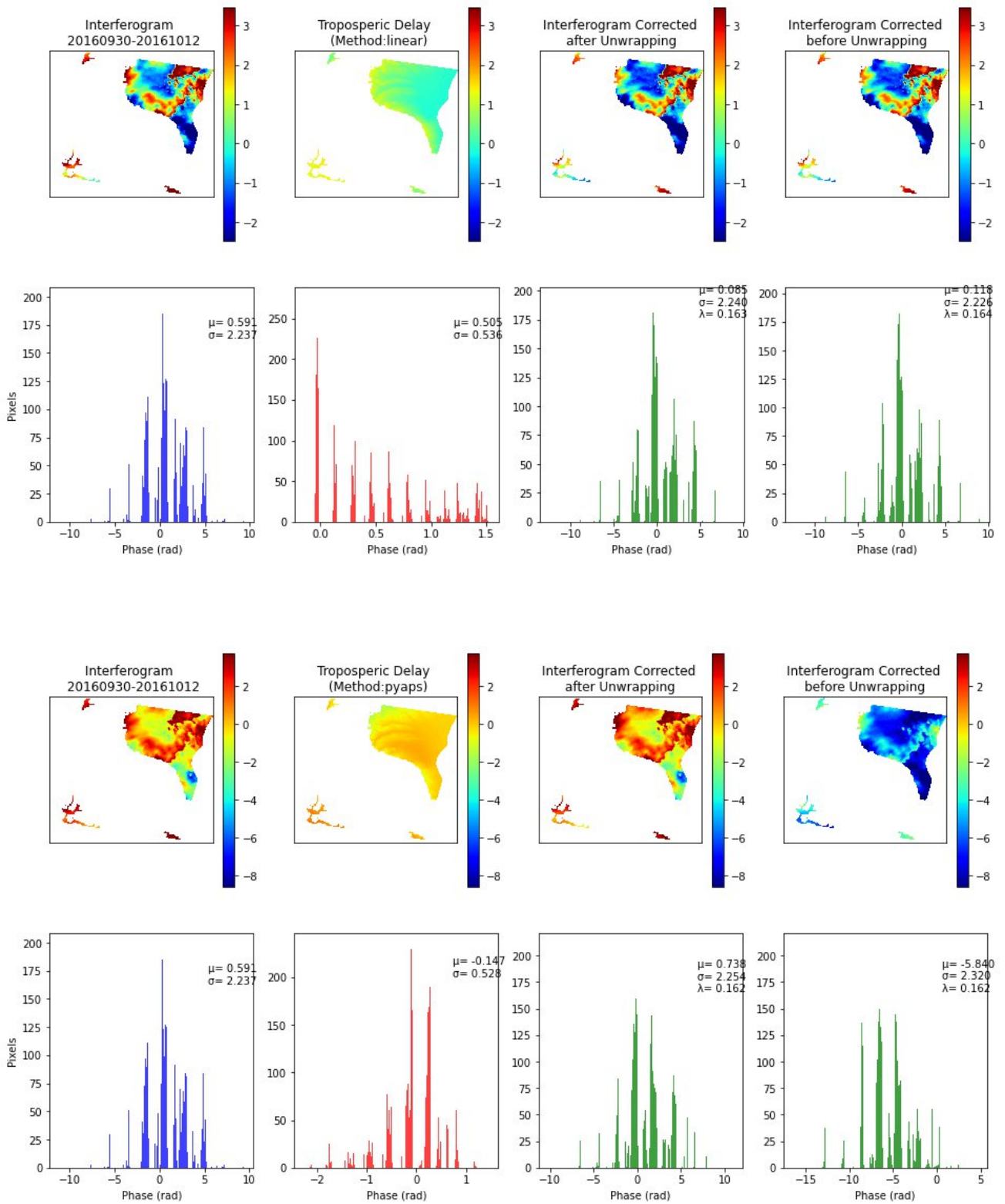
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



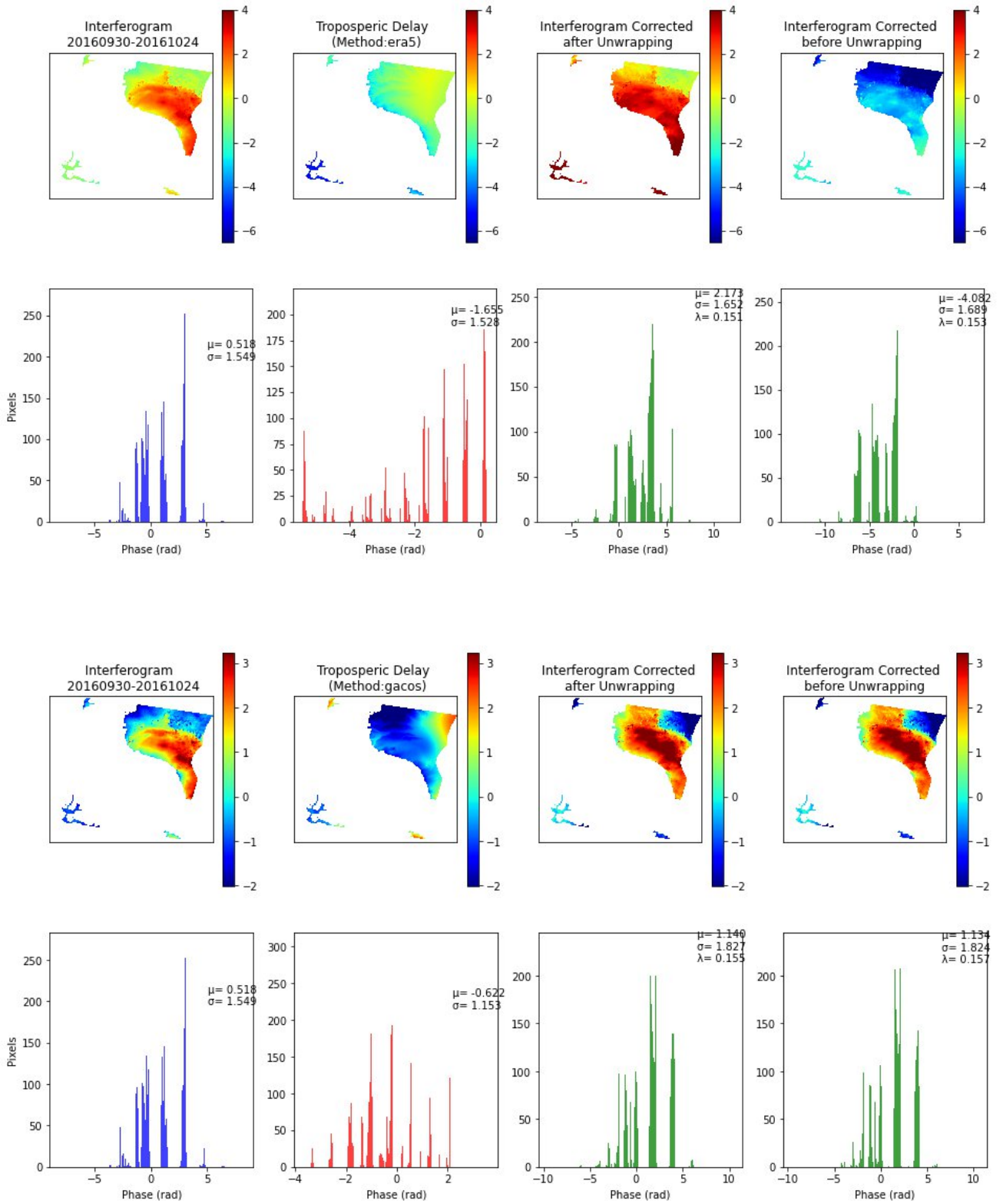
I.III. Διορθωμένη Συμβολομετρική Φάση: Πεδινές Περιοχές



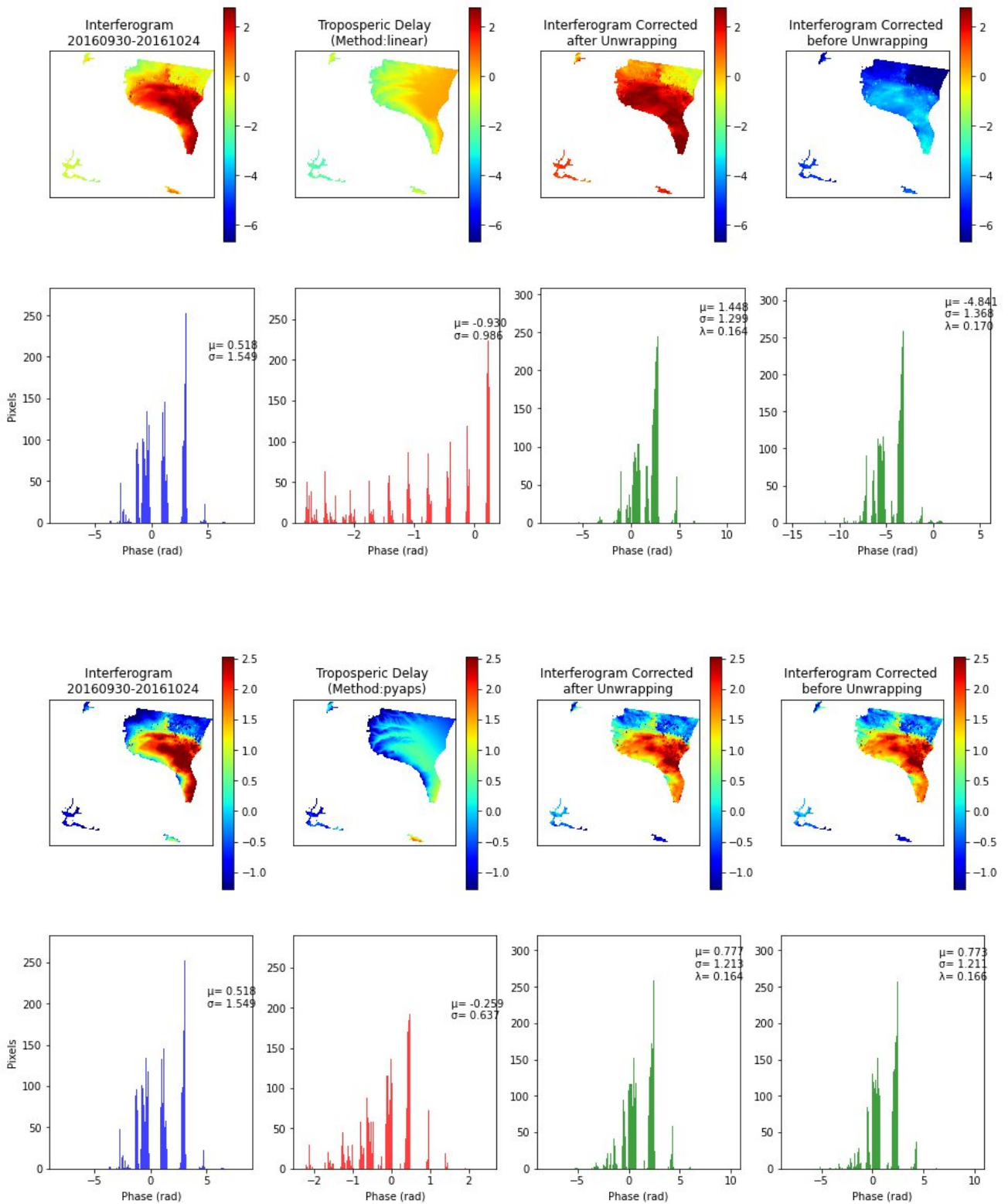
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



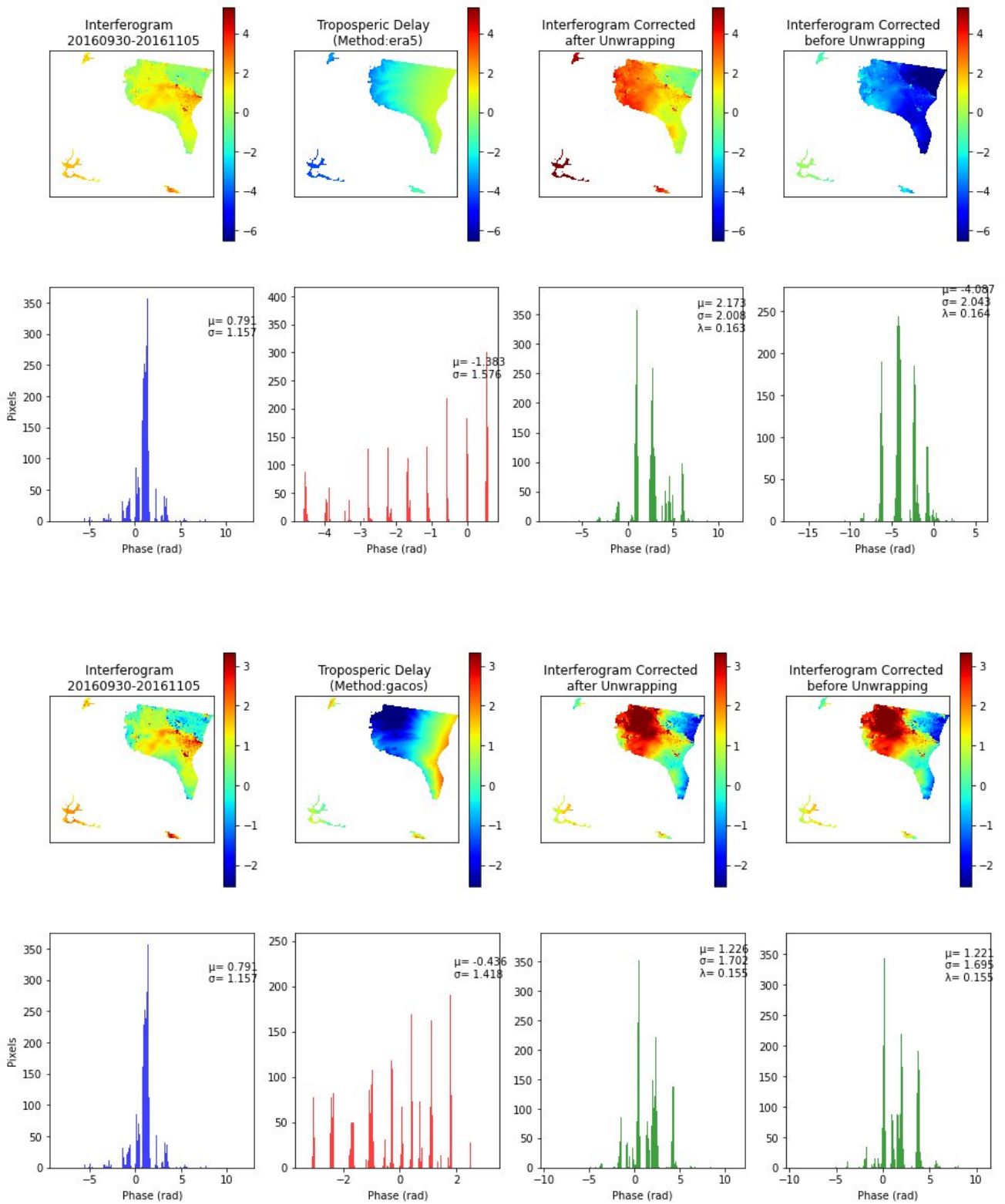
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



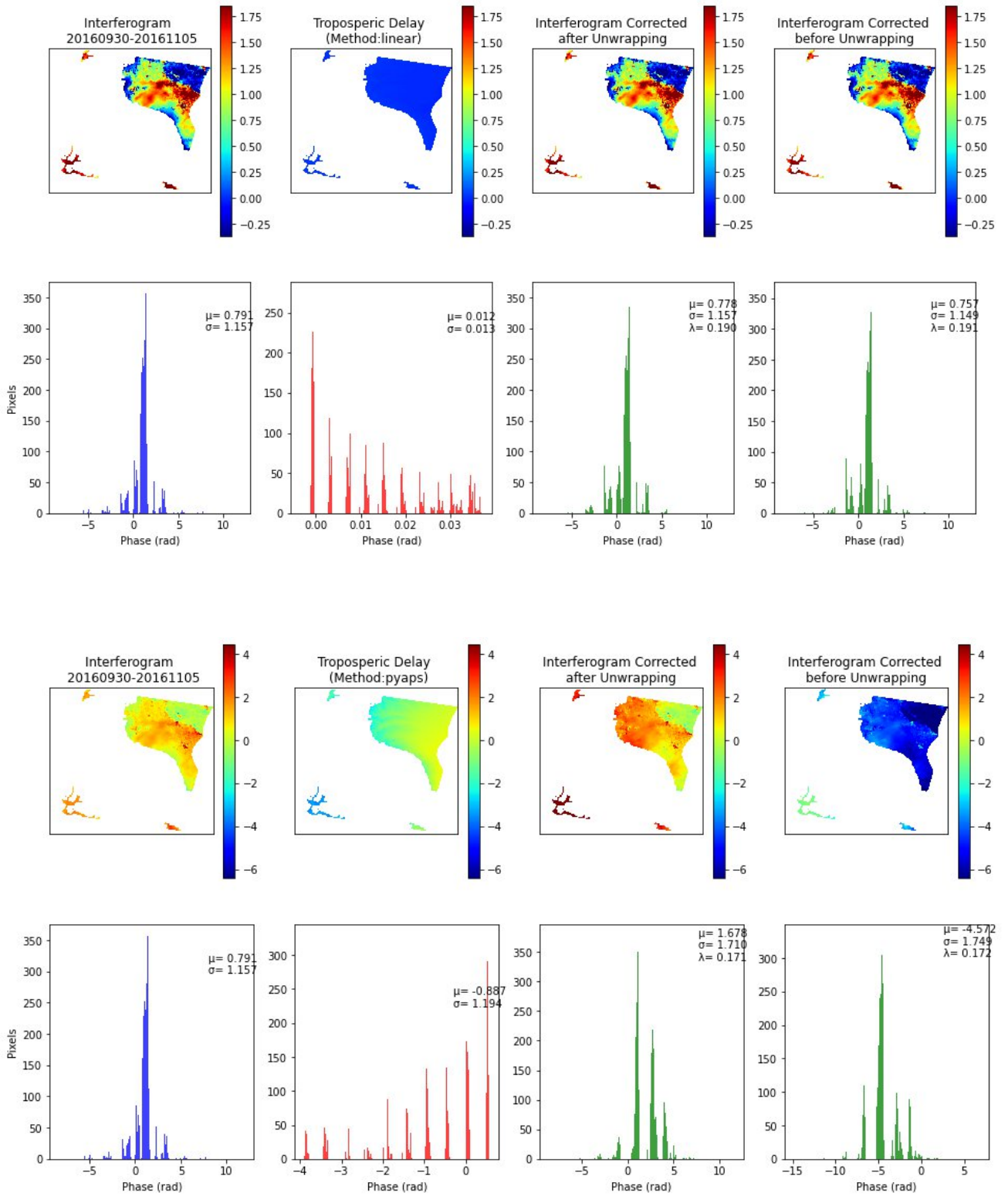
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



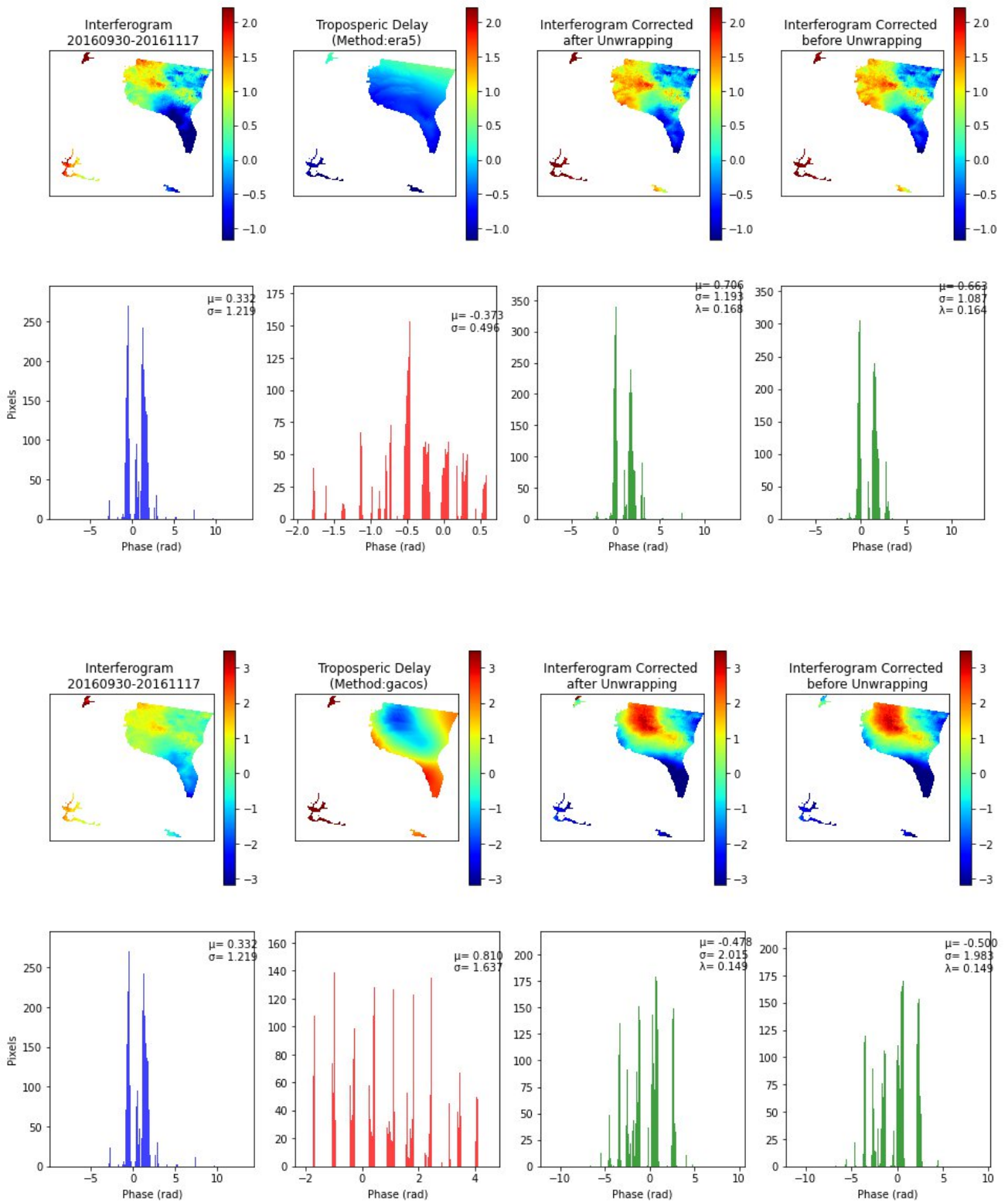
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



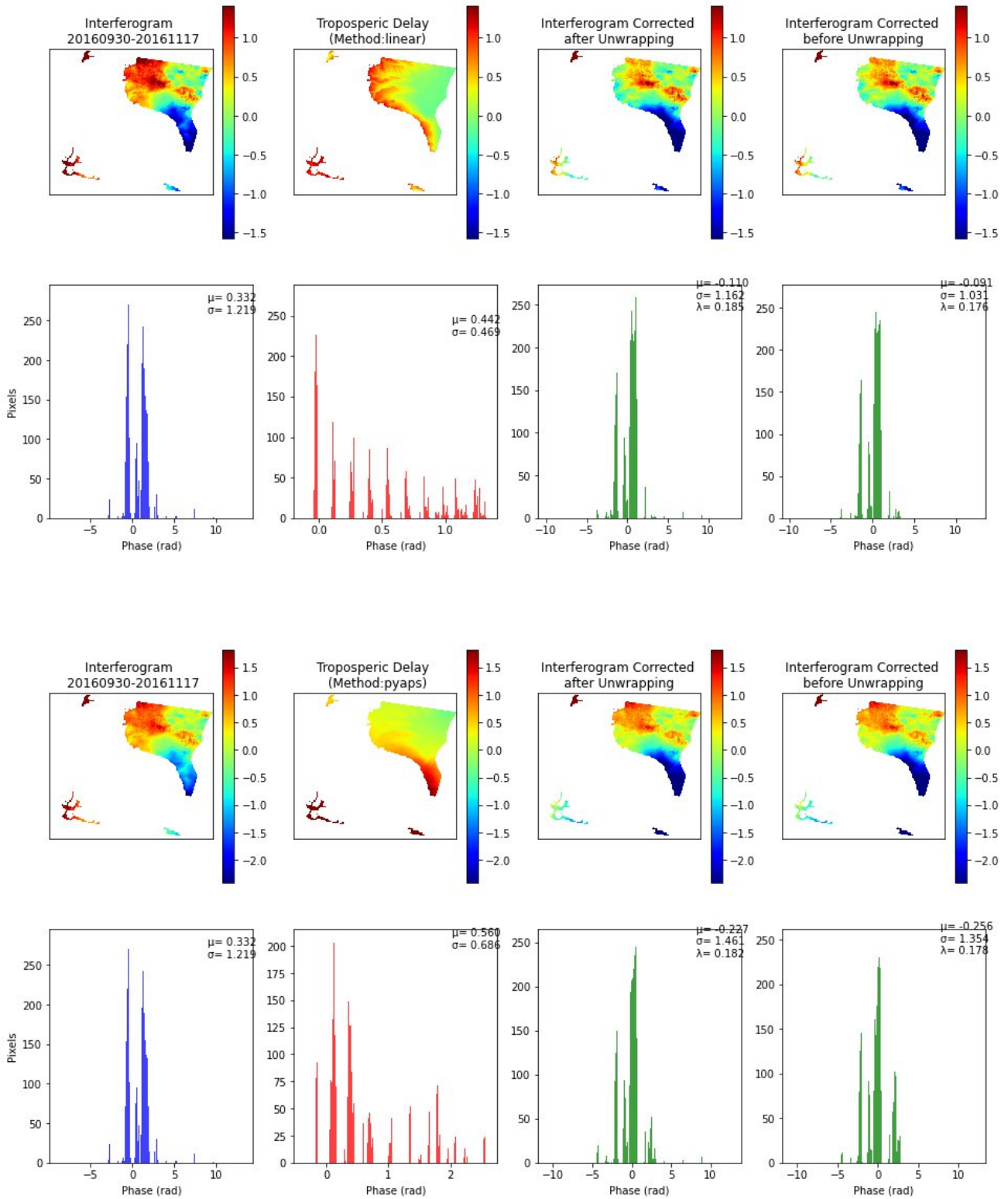
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



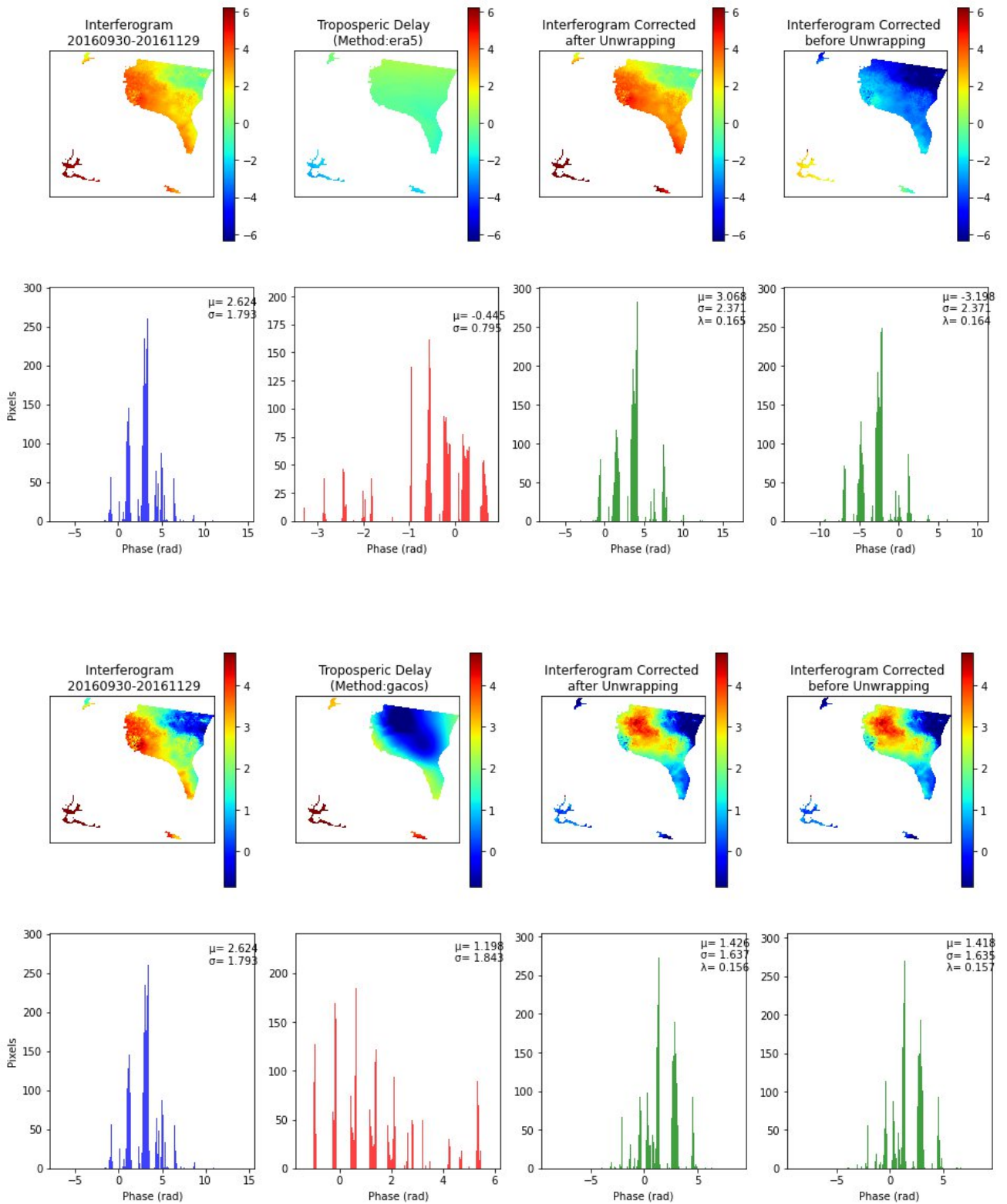
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



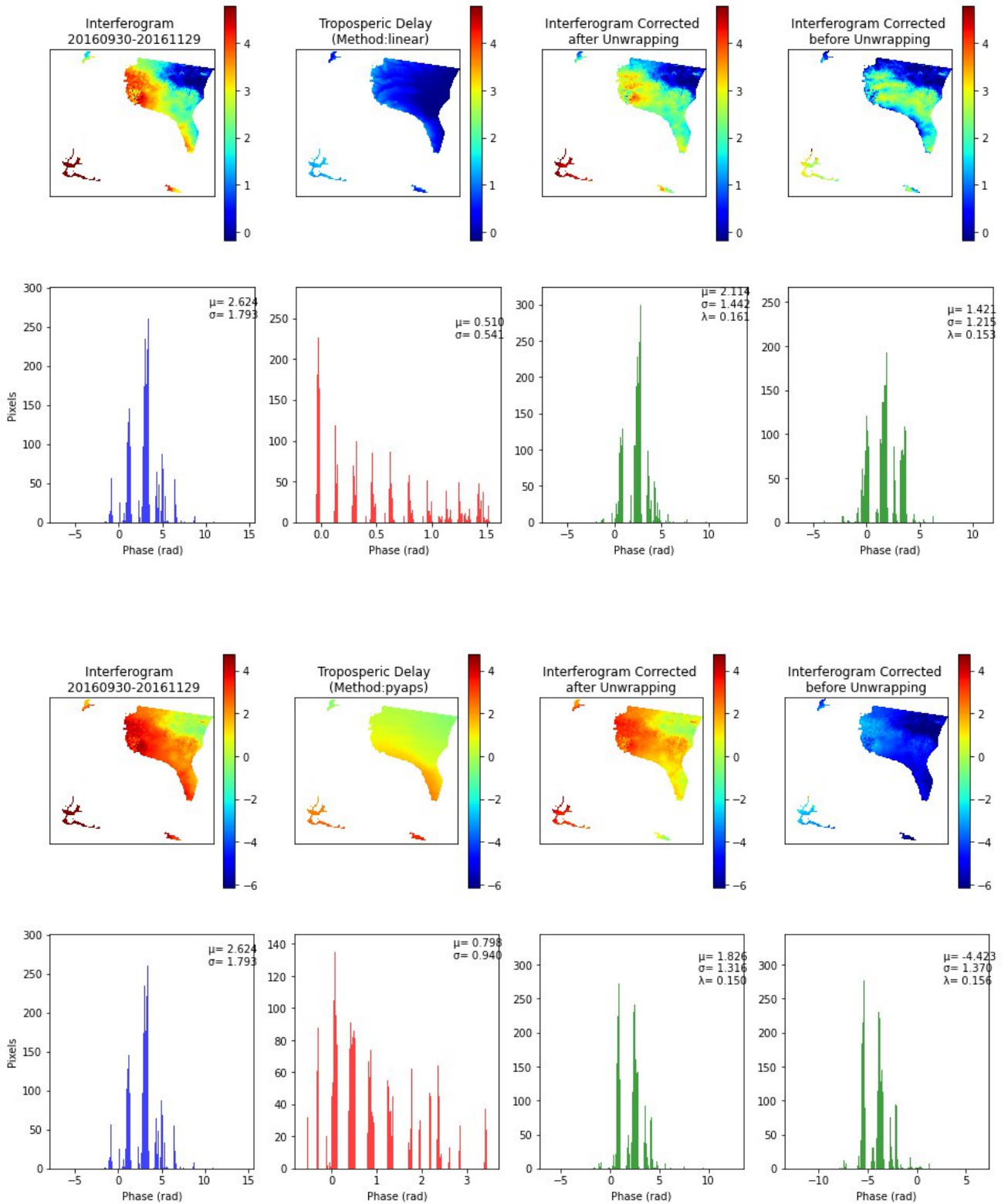
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



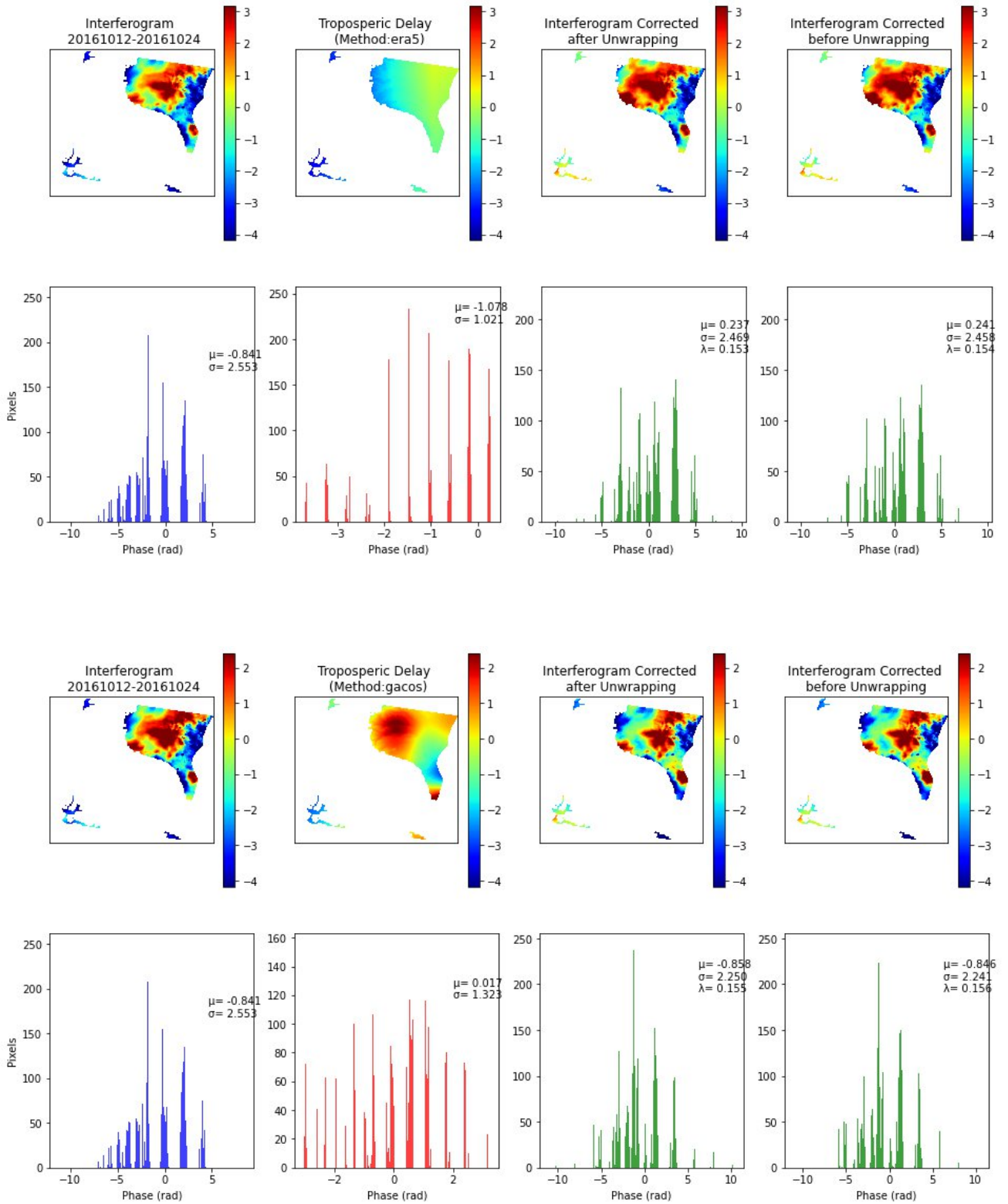
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



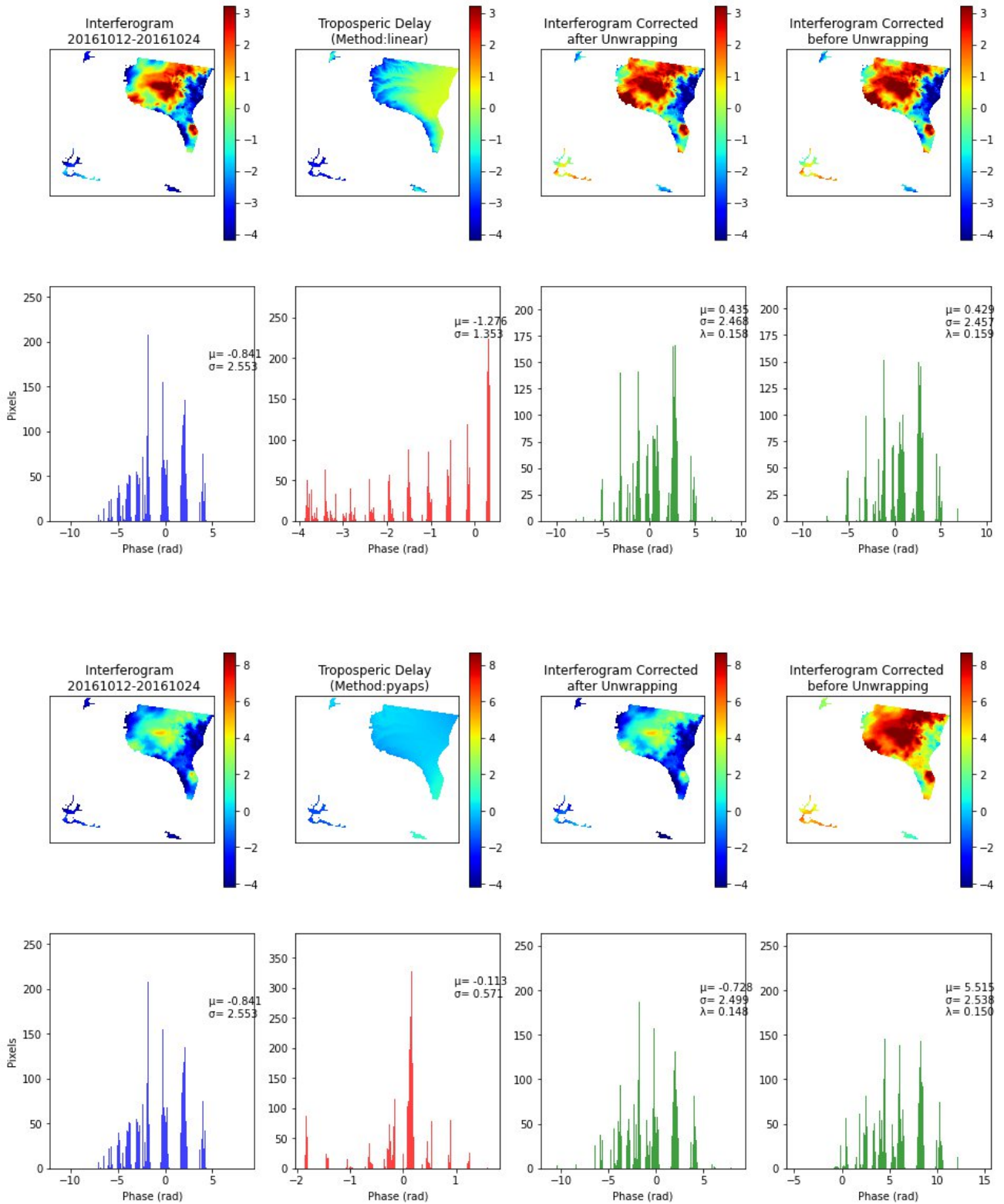
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



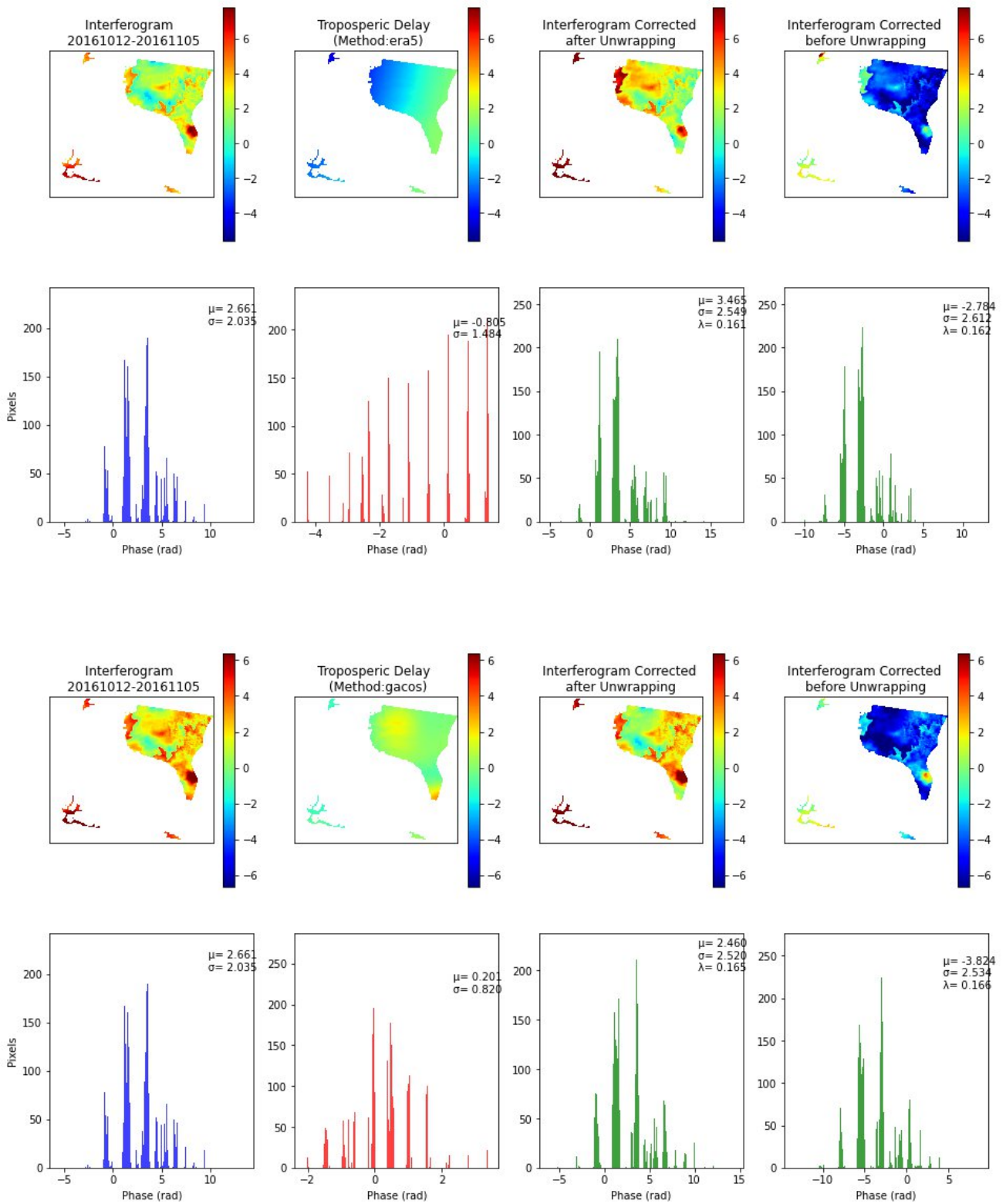
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



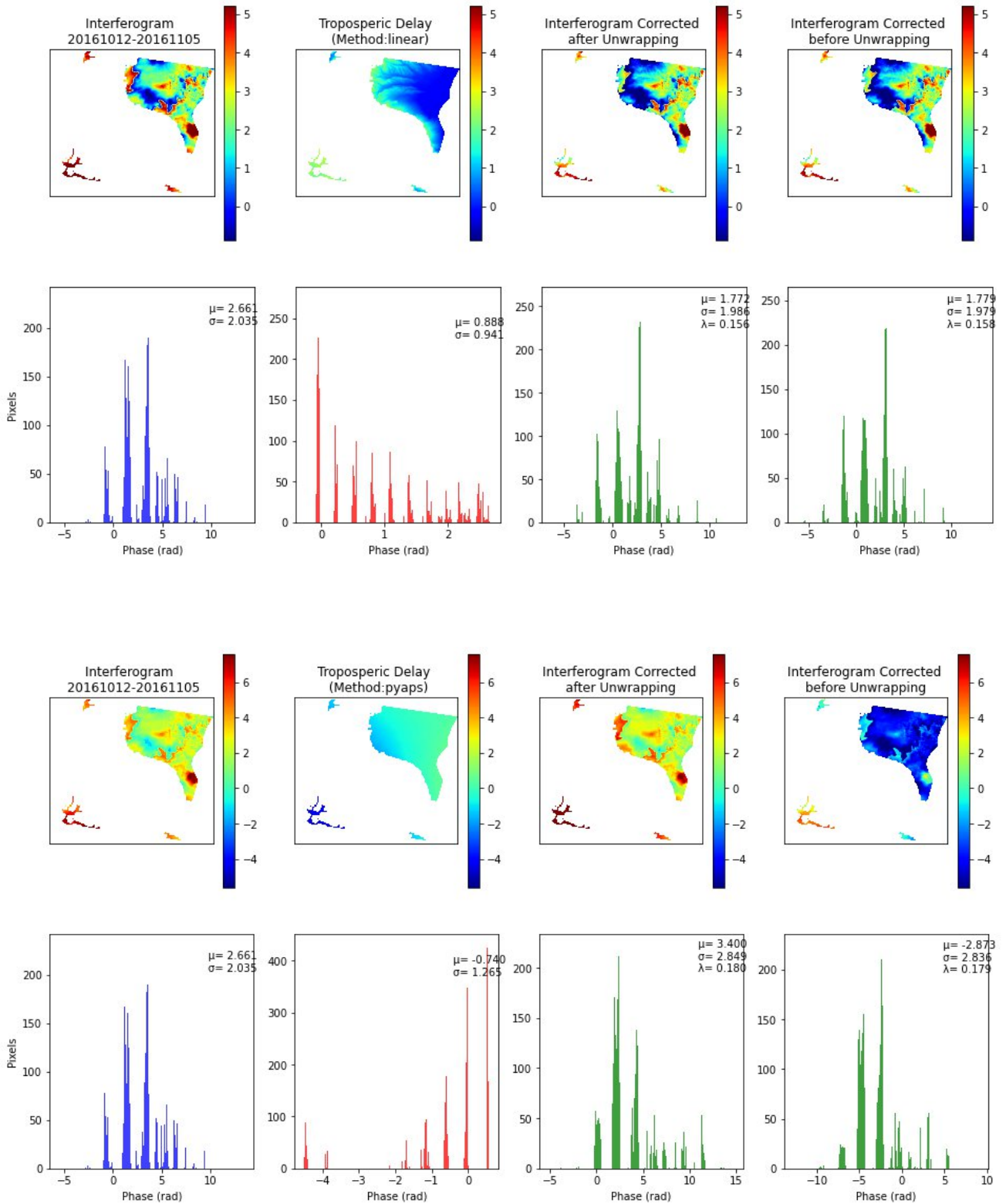
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



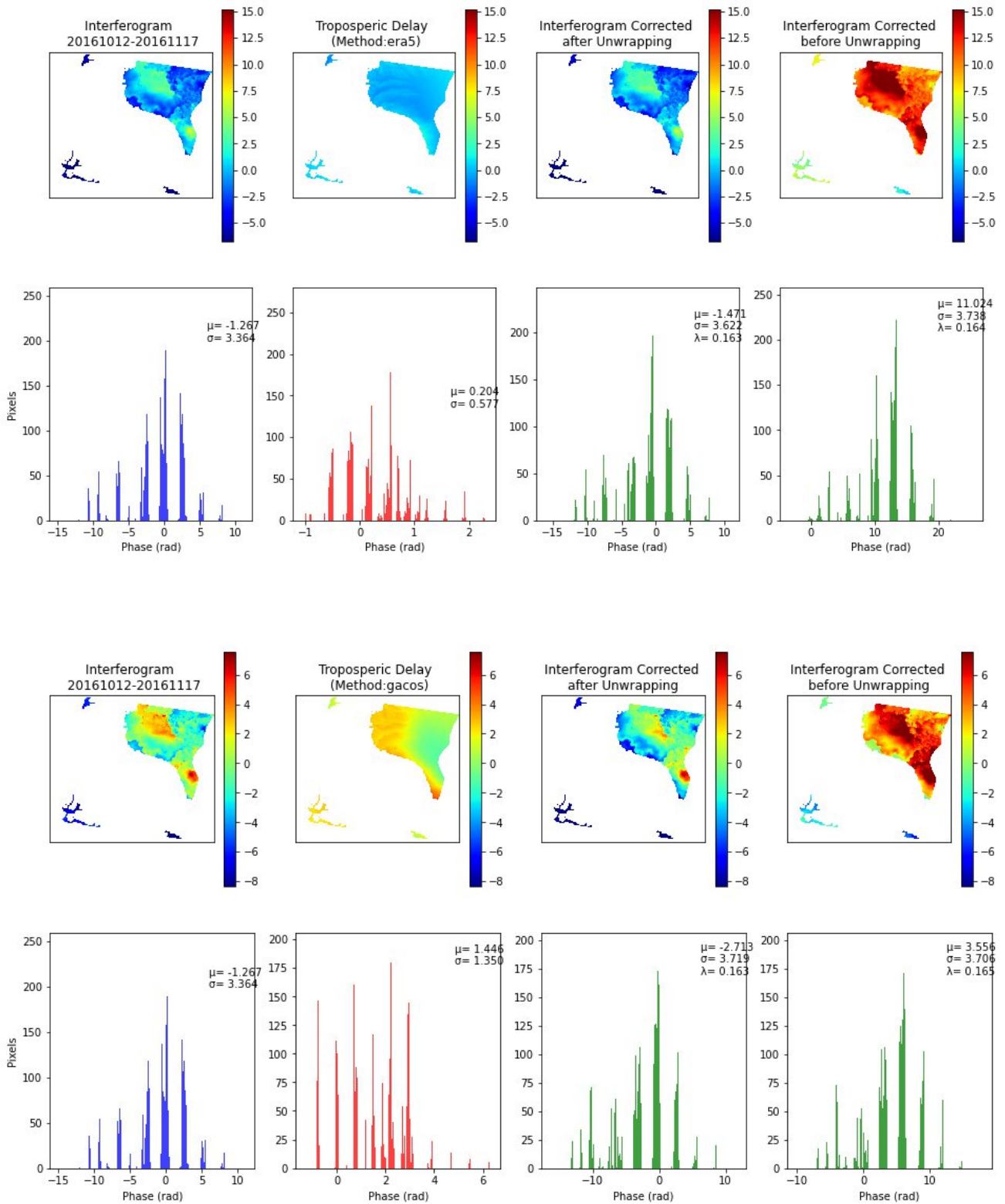
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



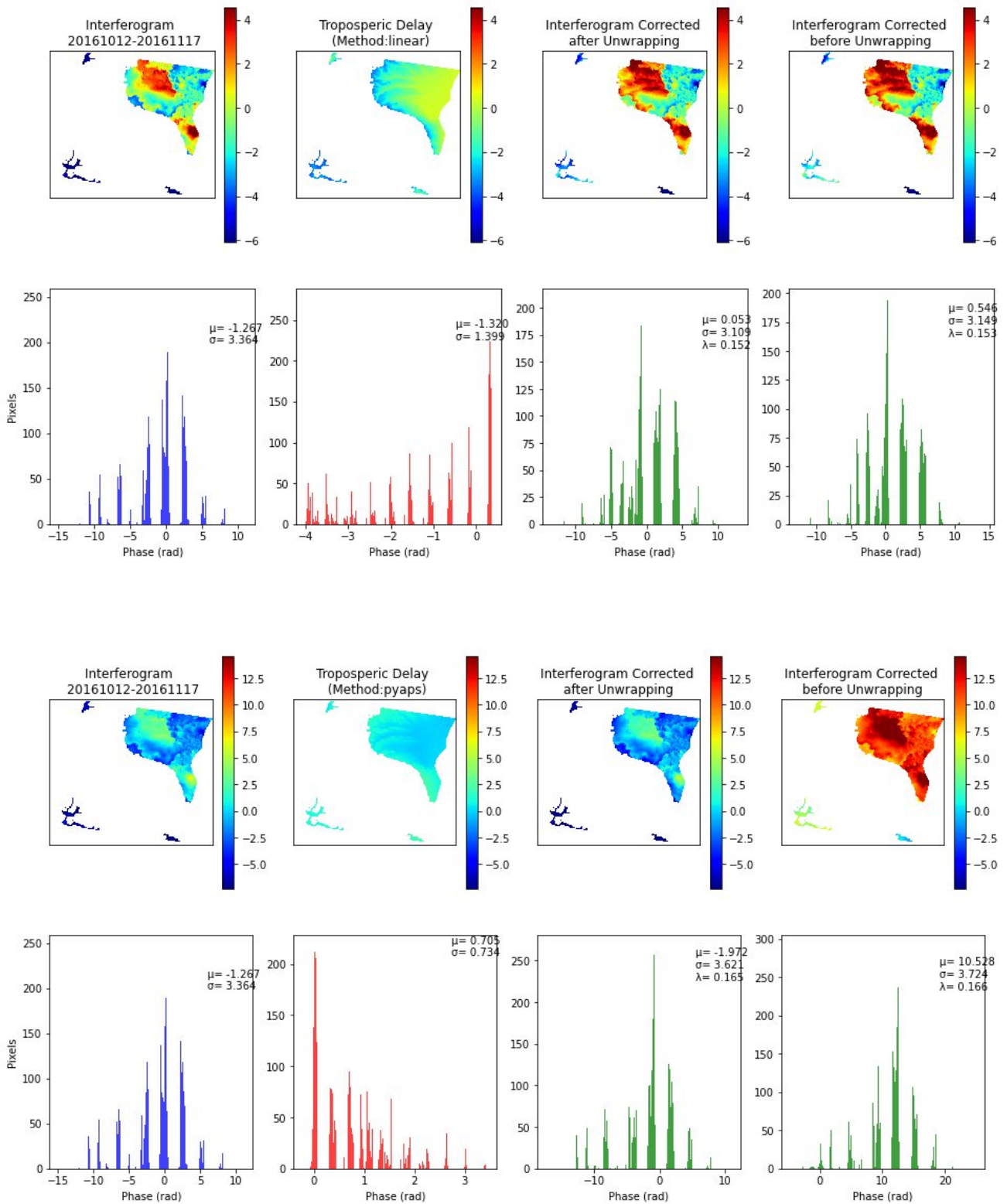
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



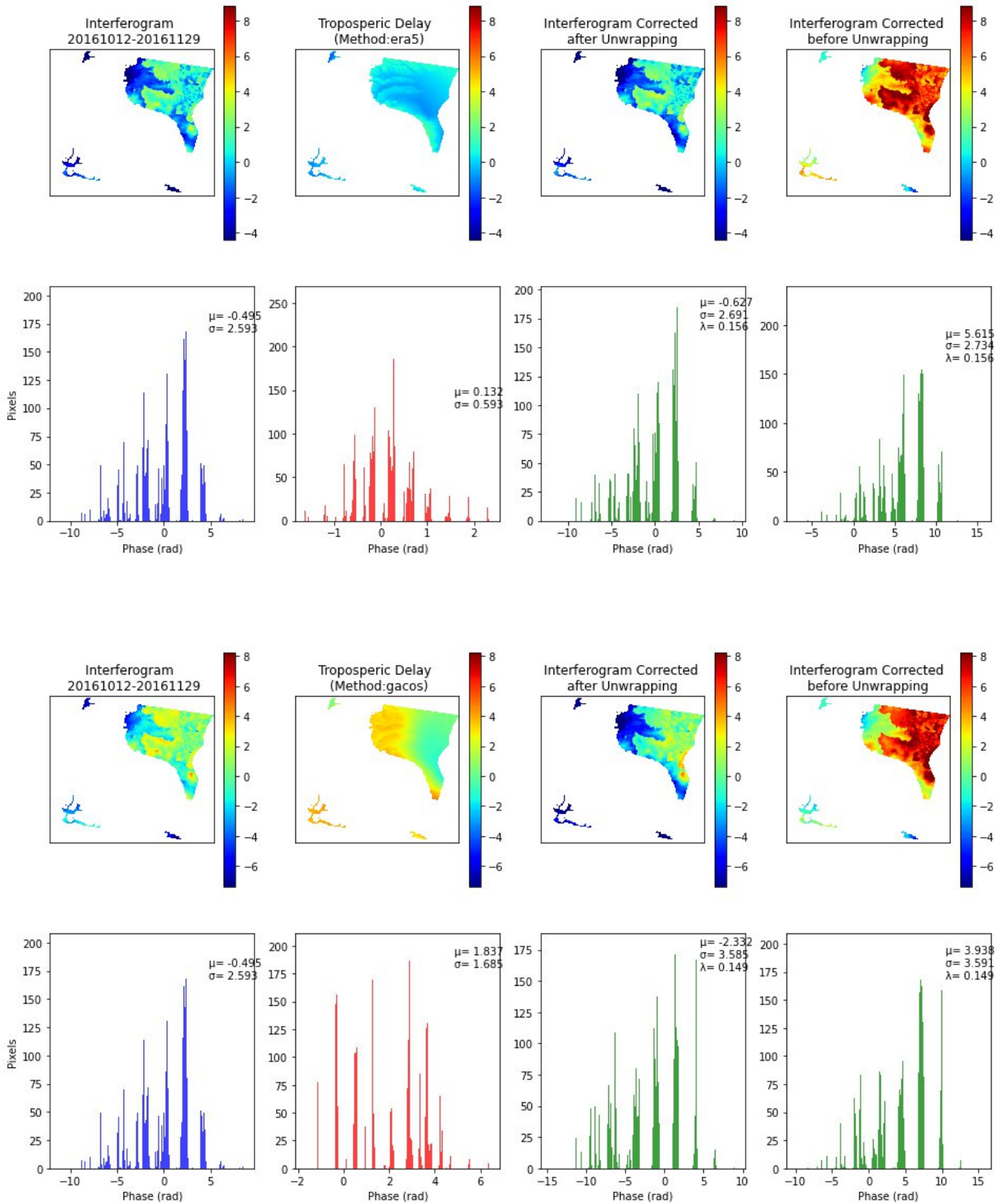
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



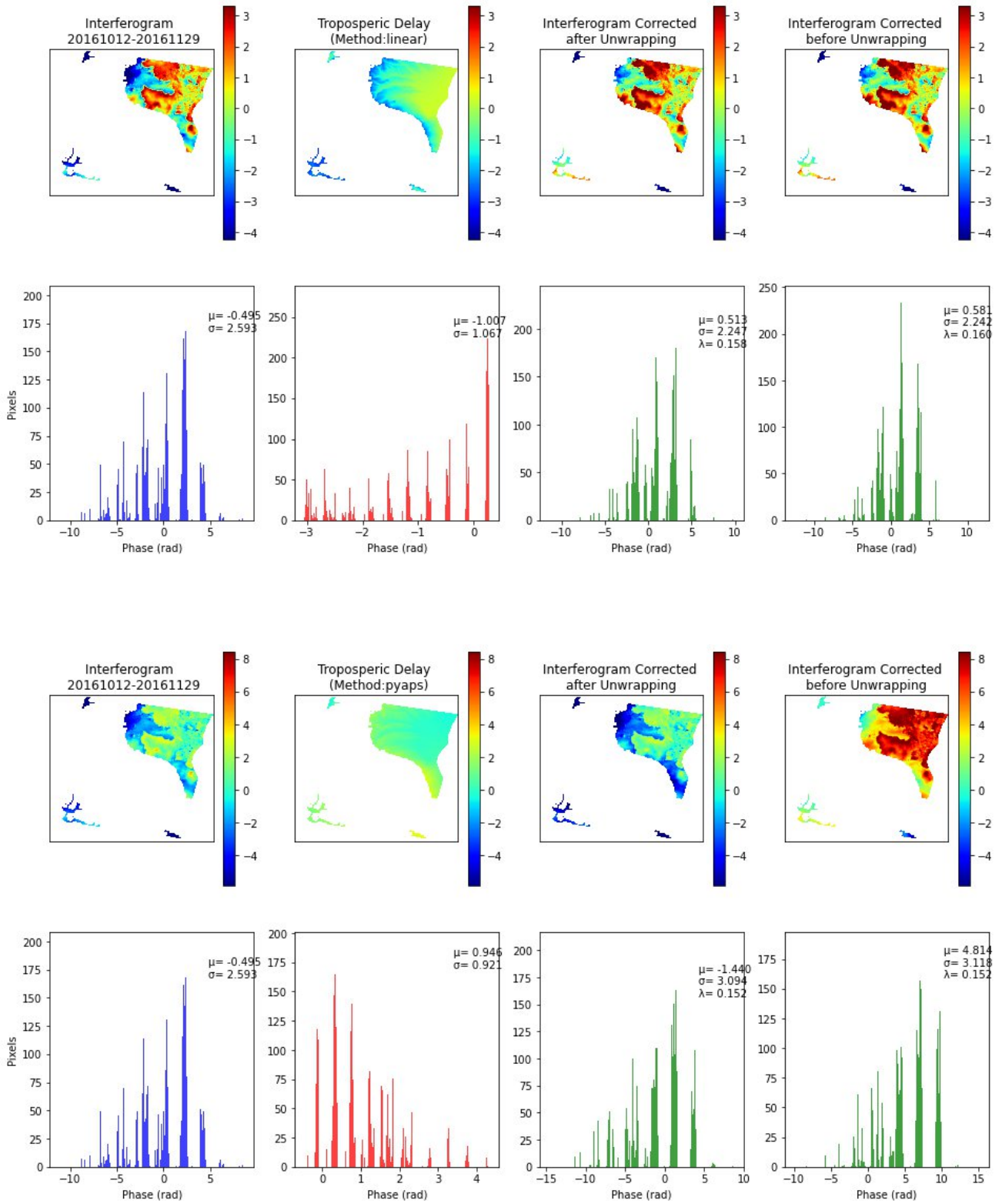
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



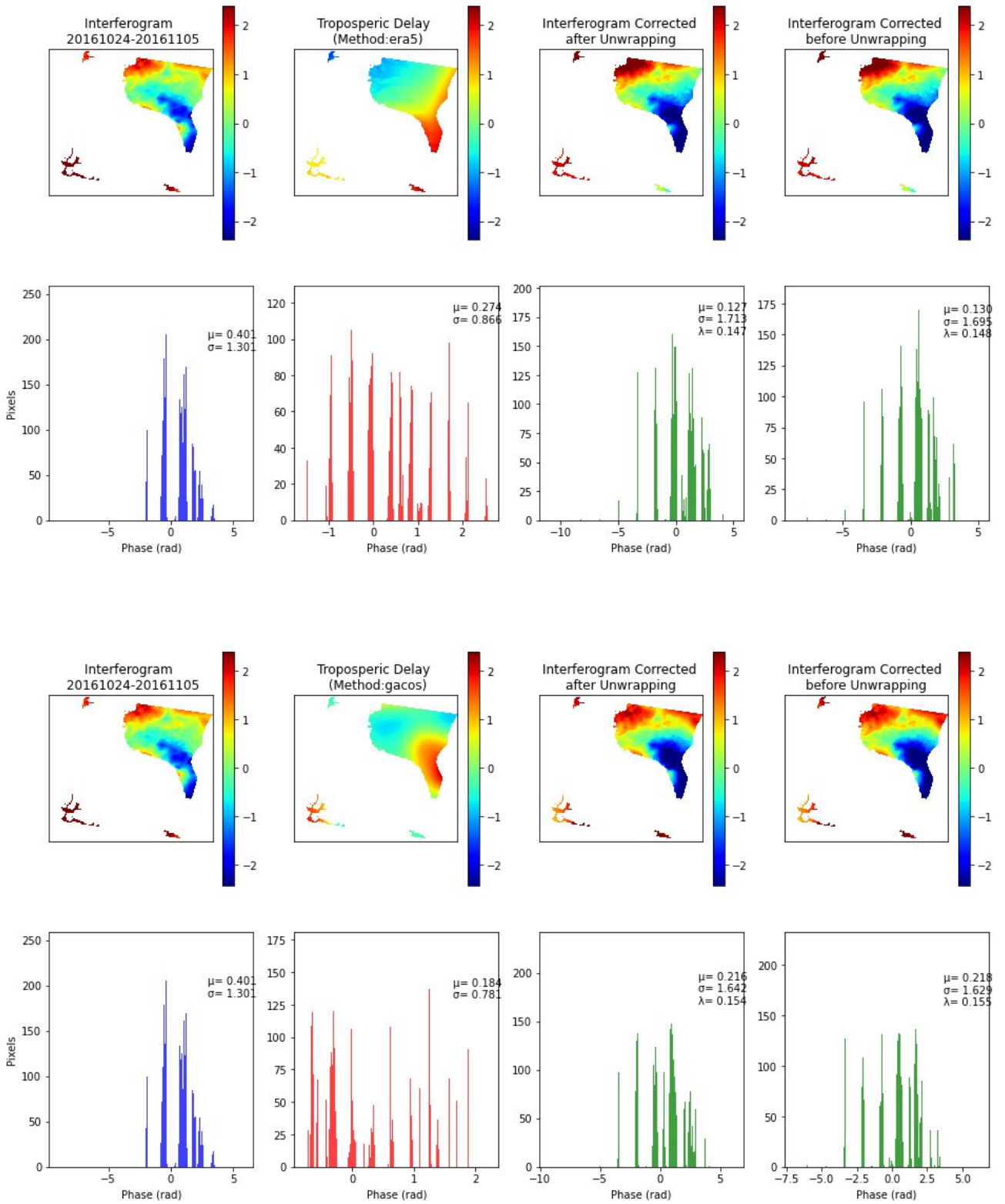
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



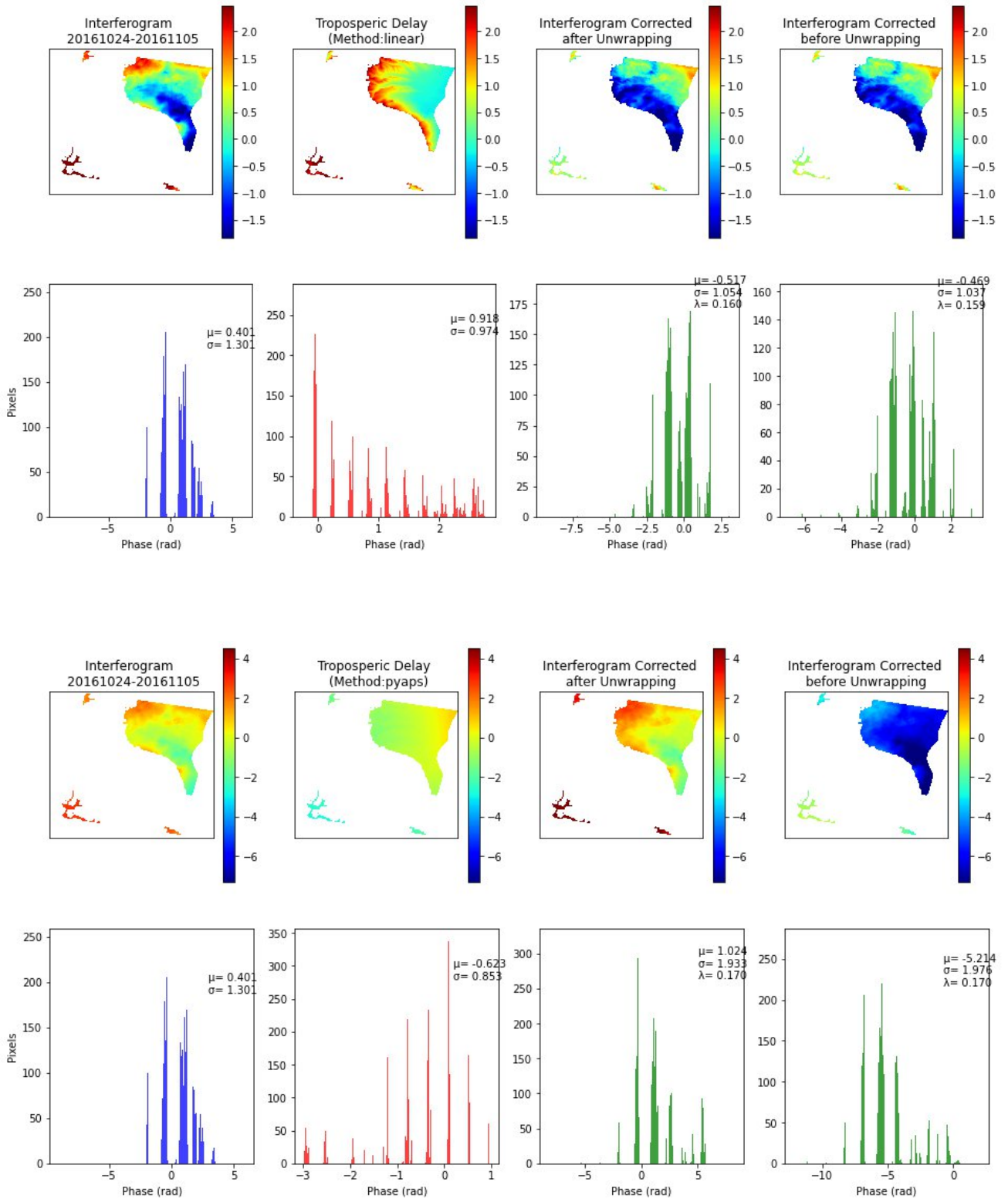
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



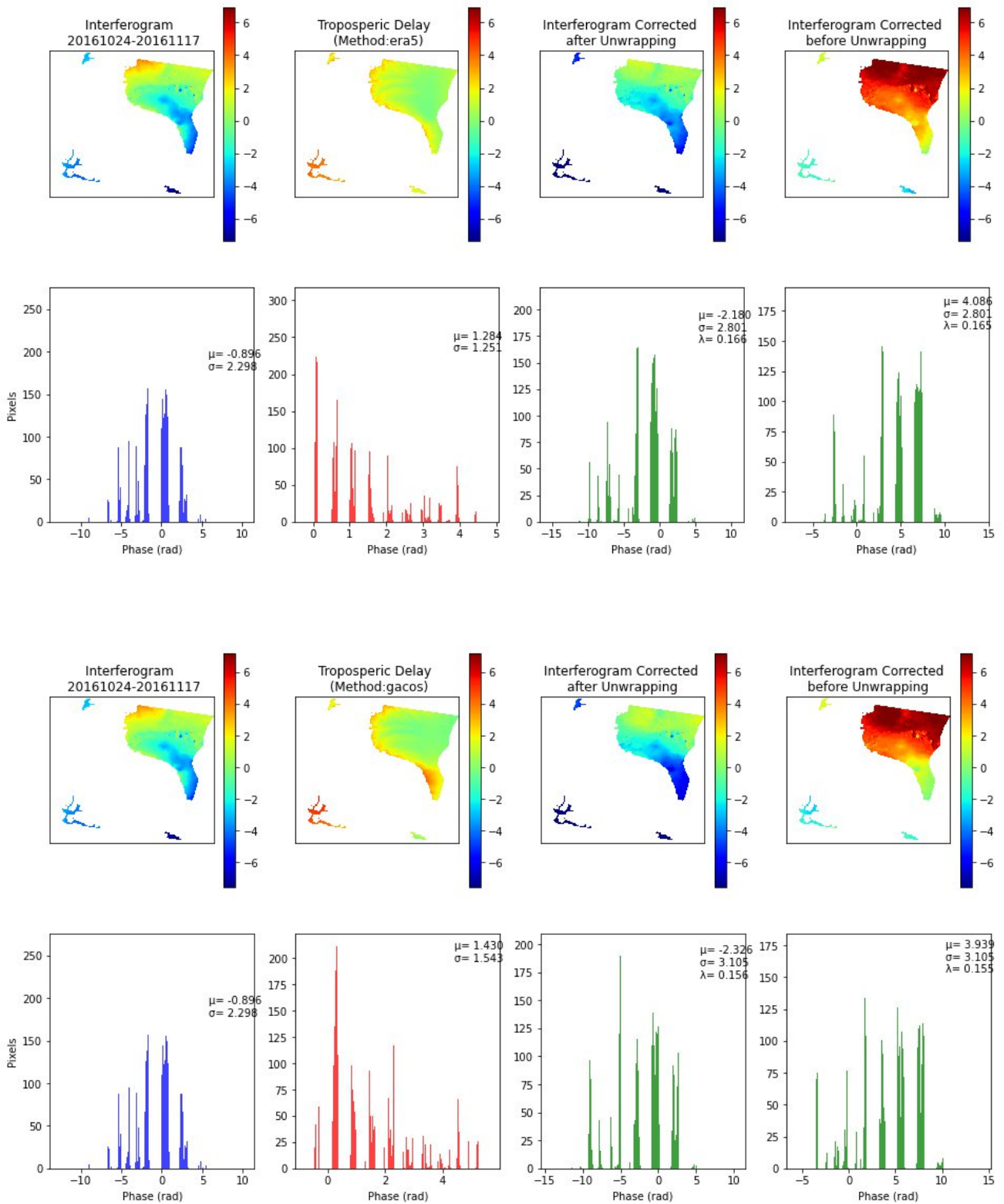
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



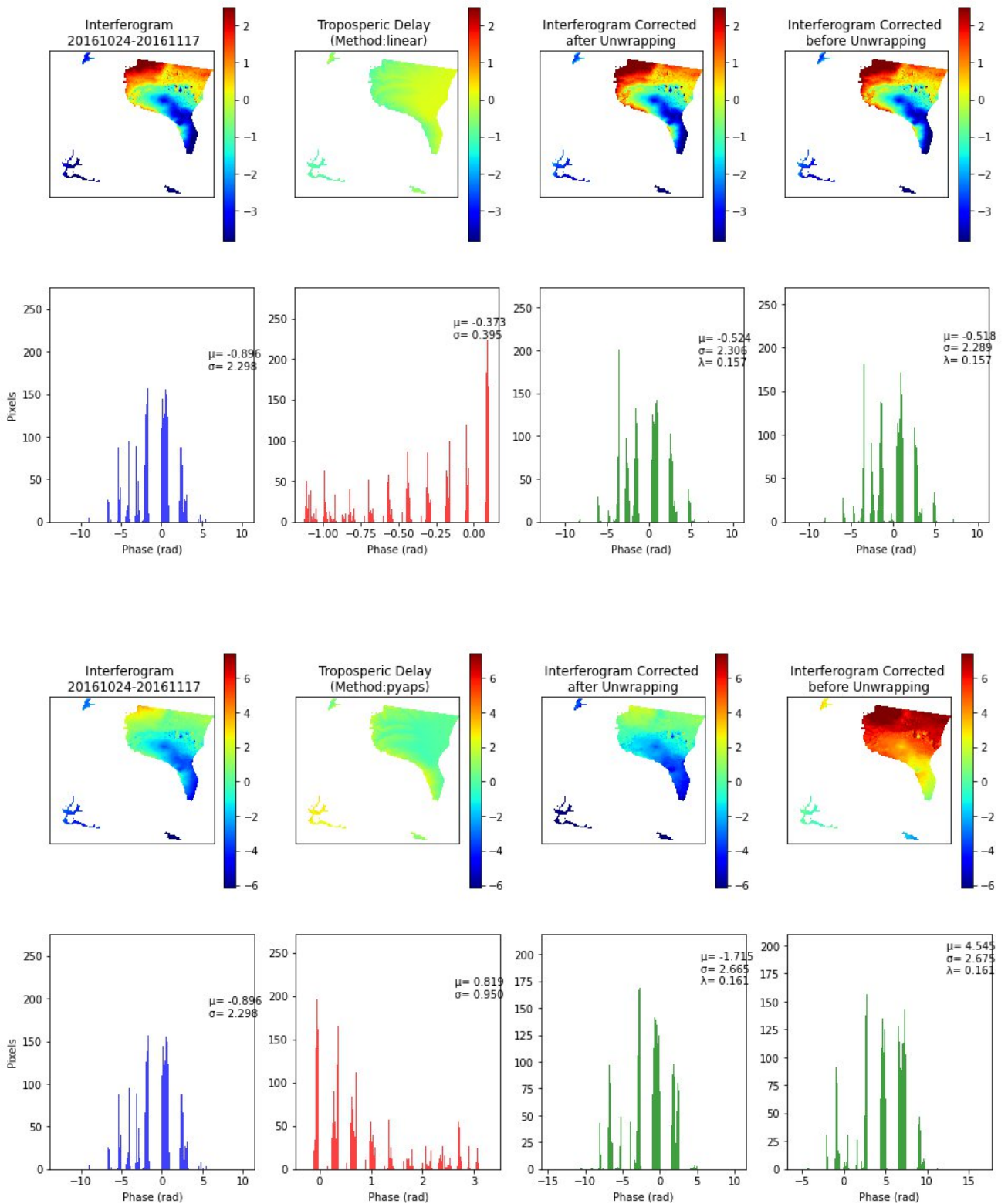
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



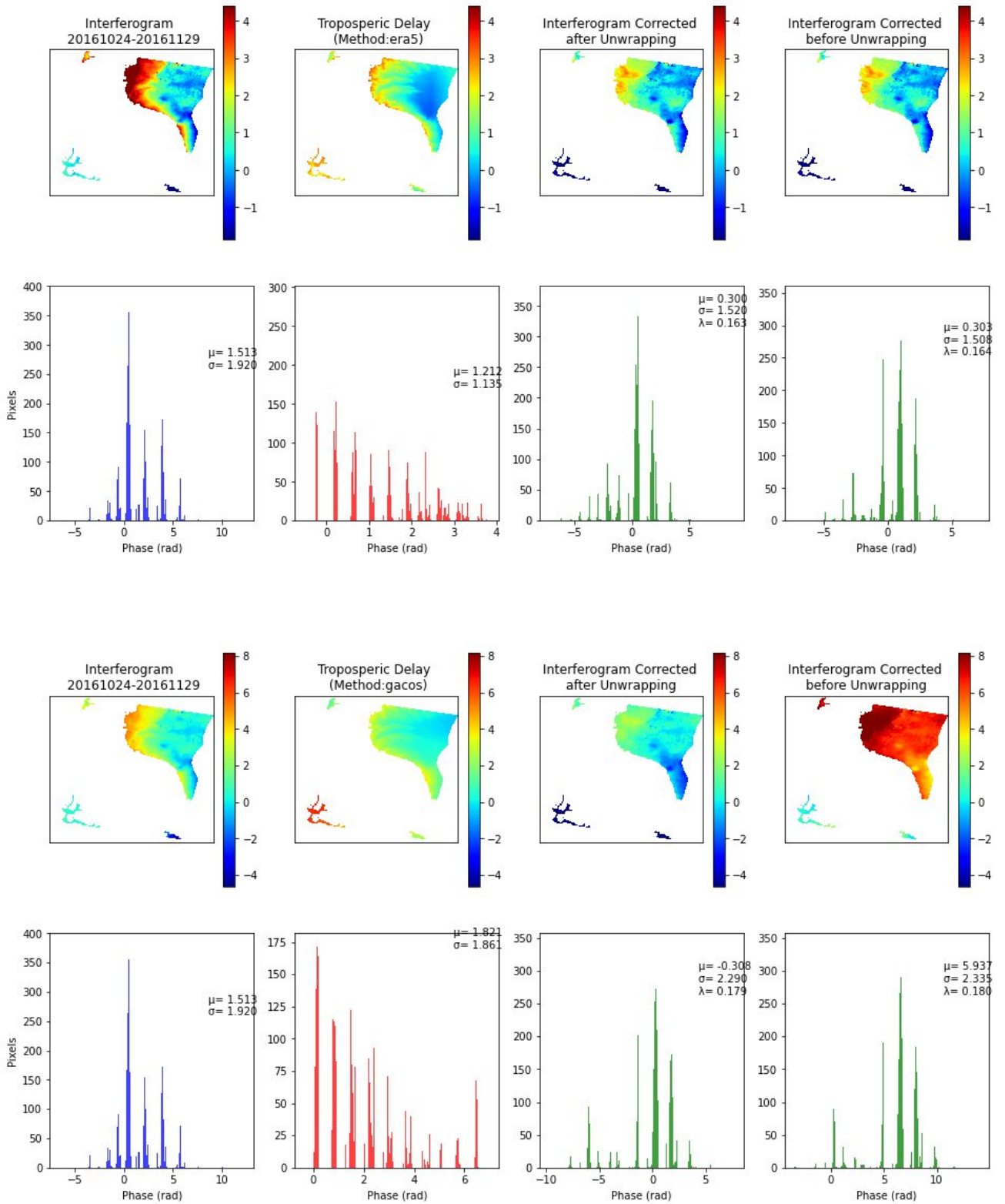
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



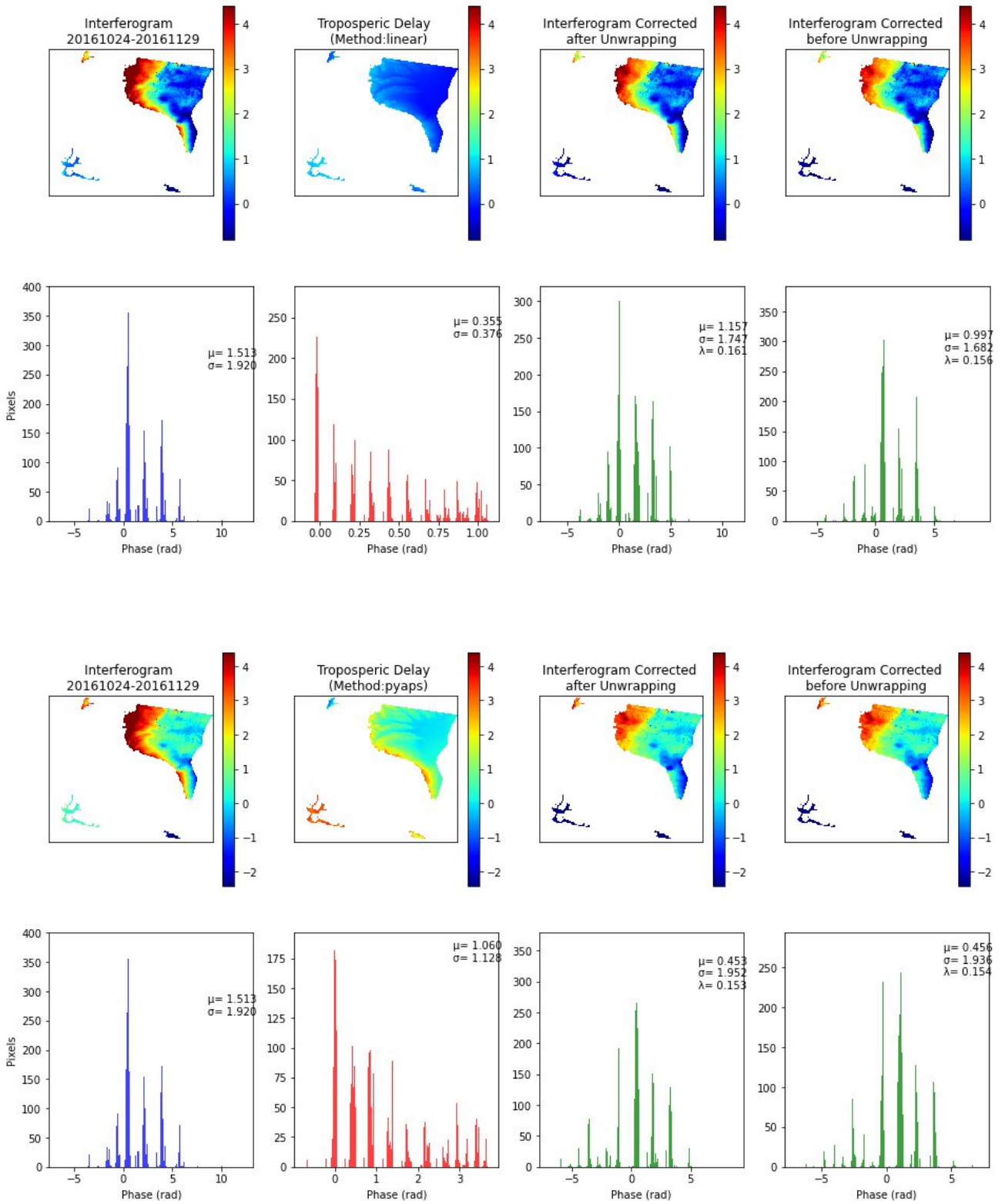
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



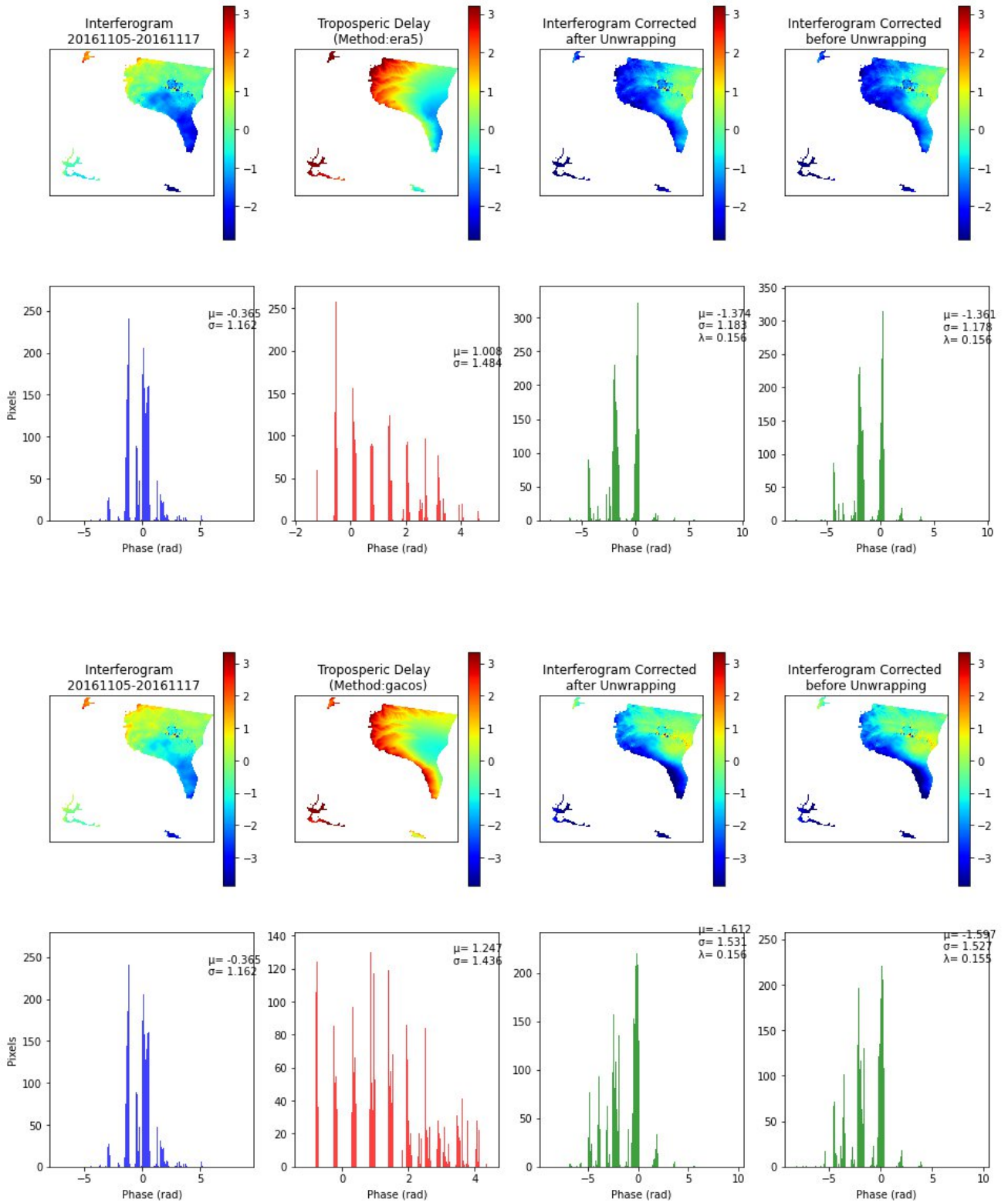
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



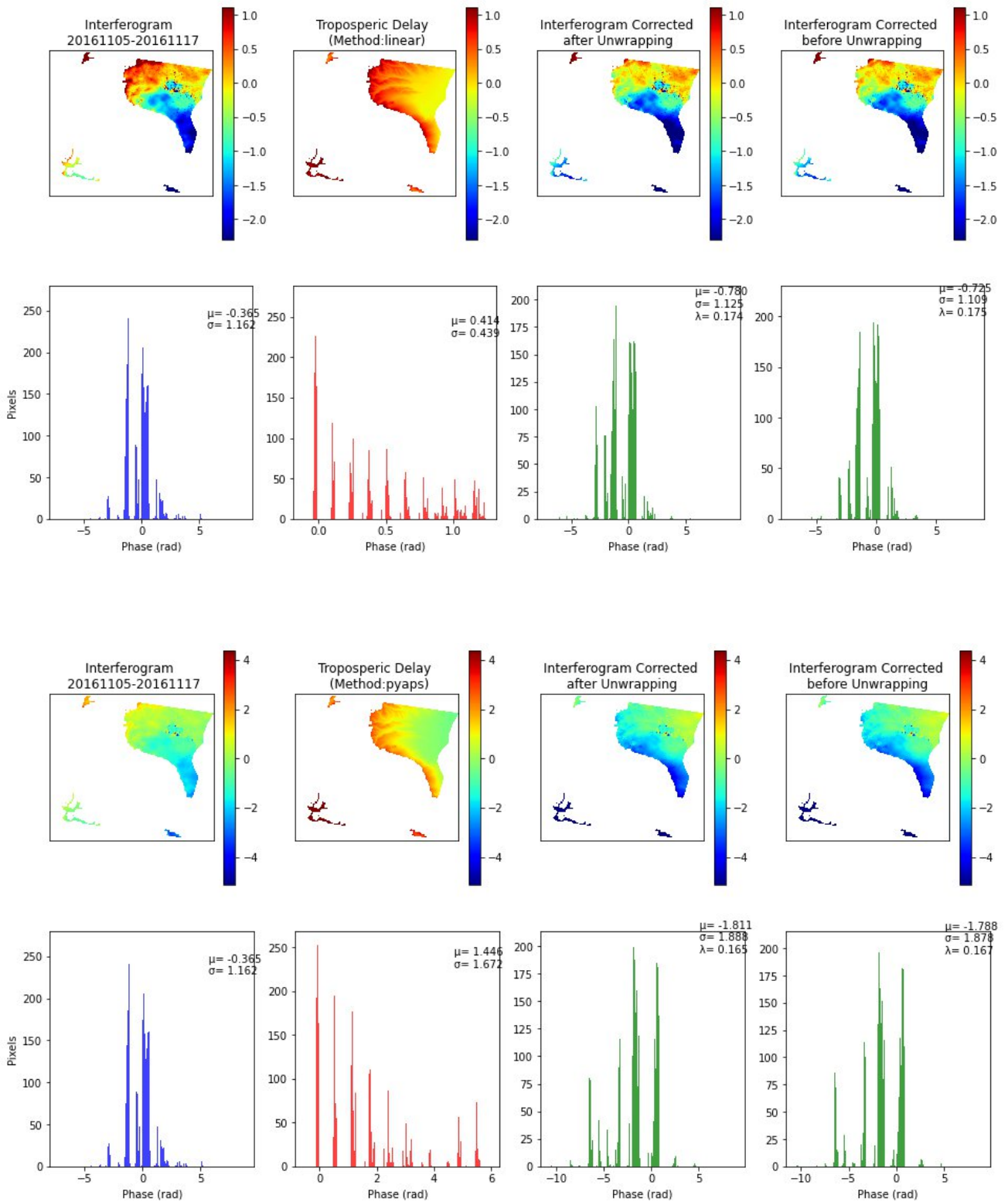
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



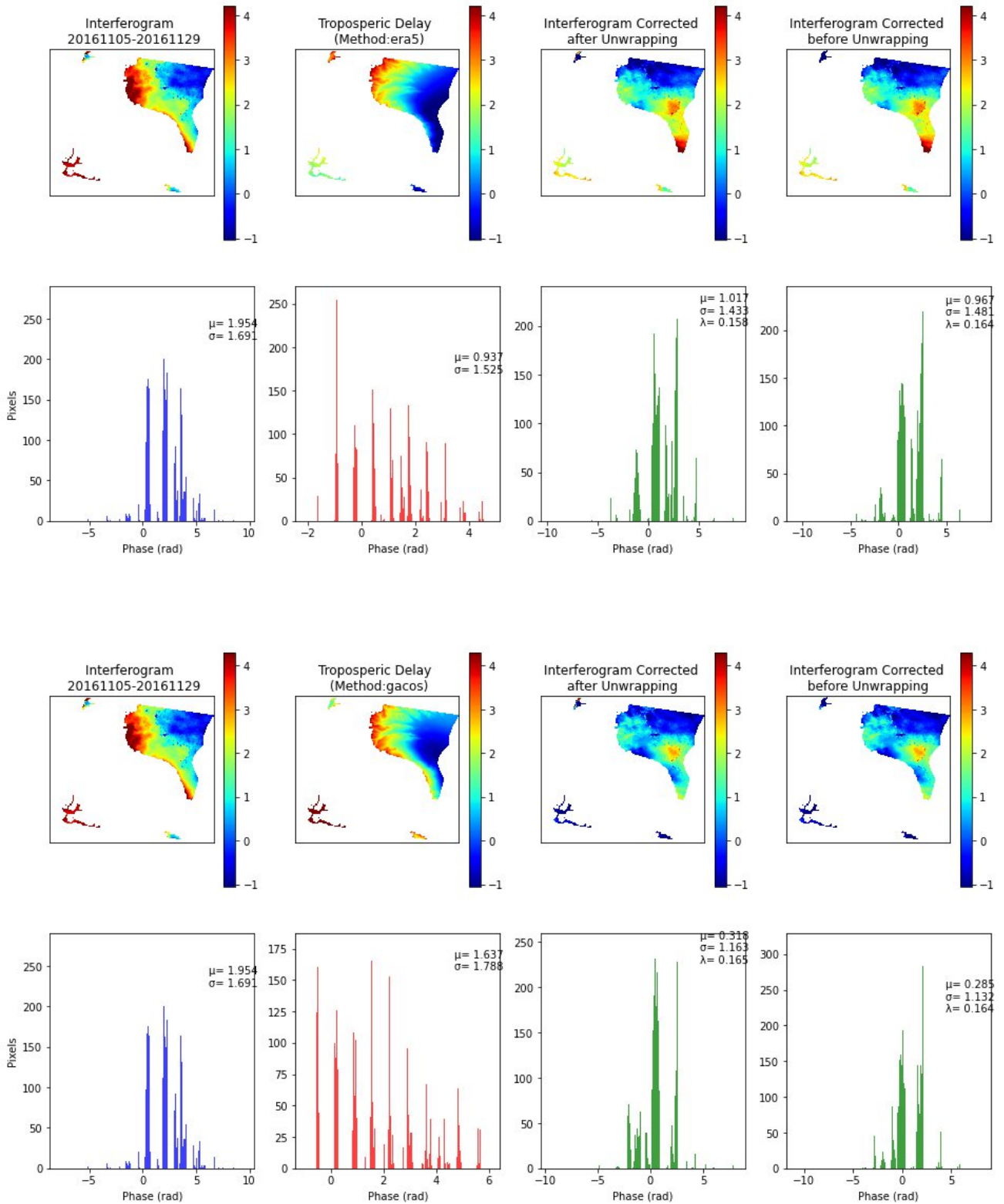
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



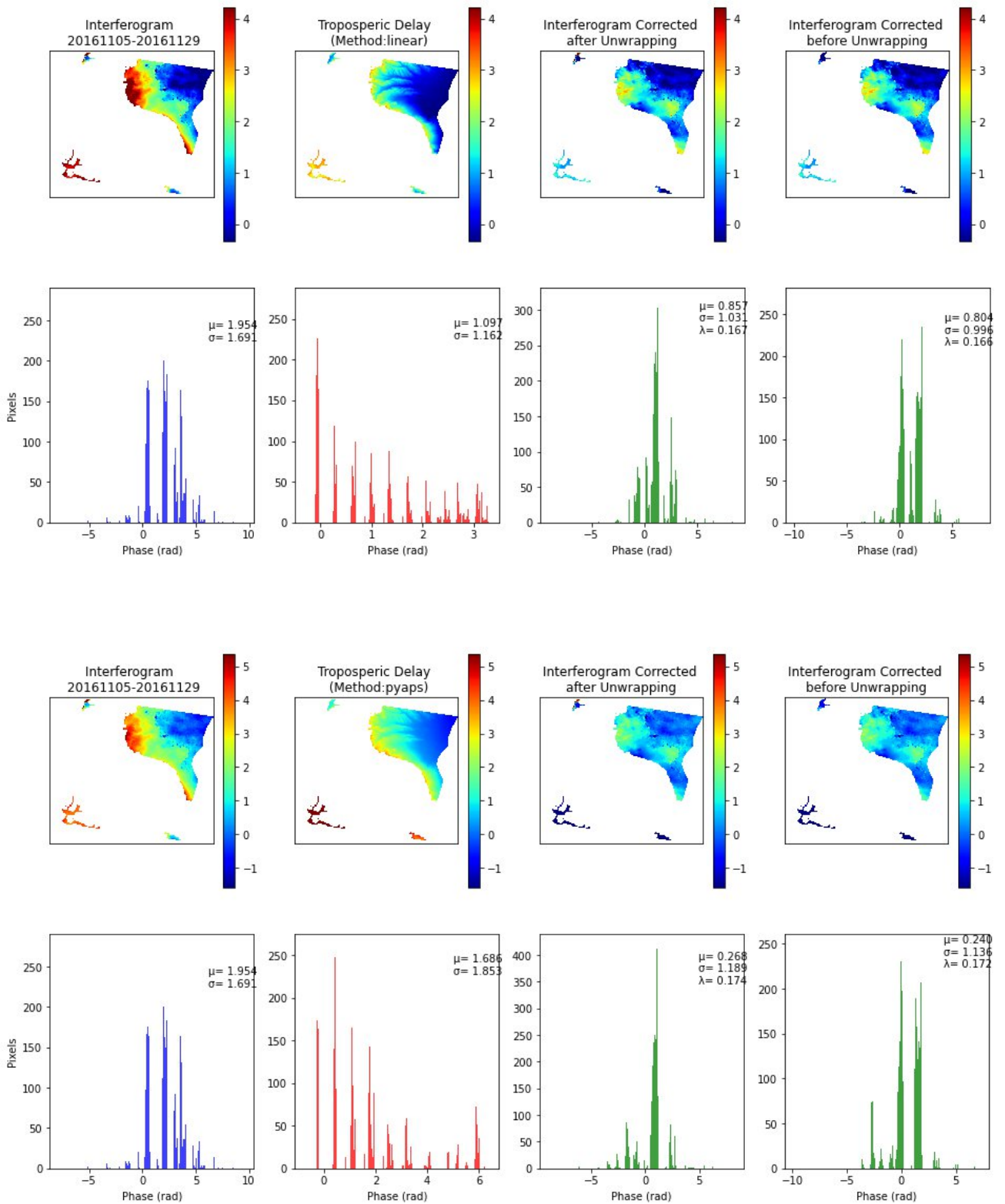
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



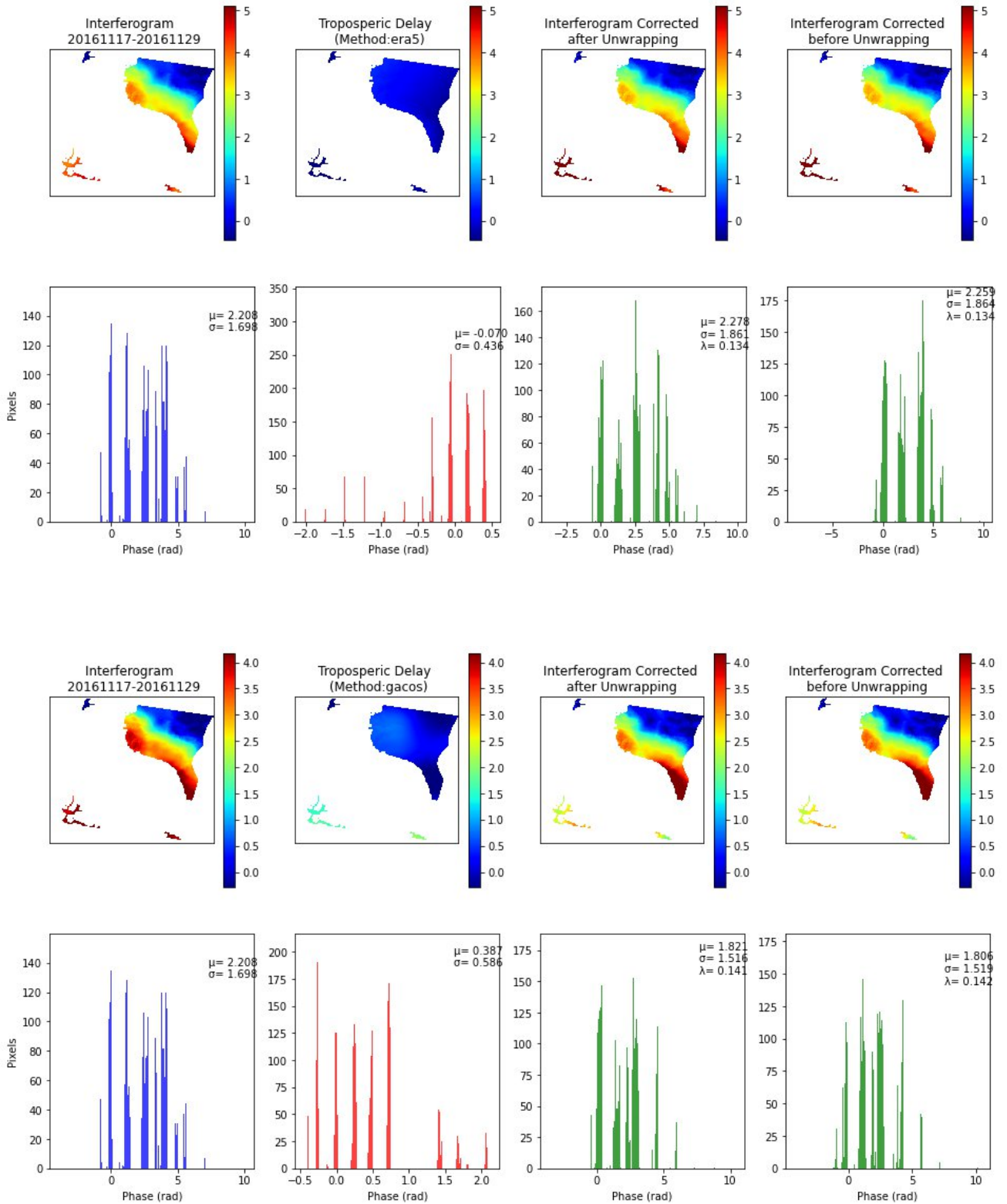
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



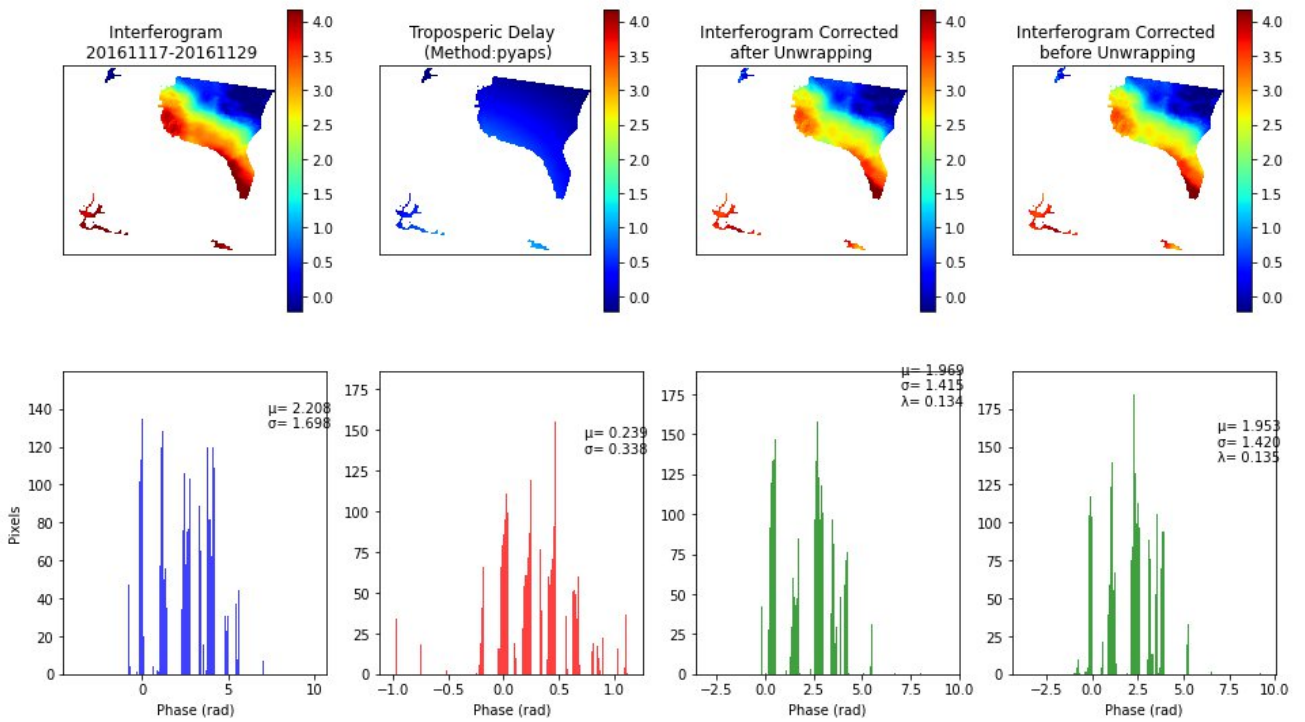
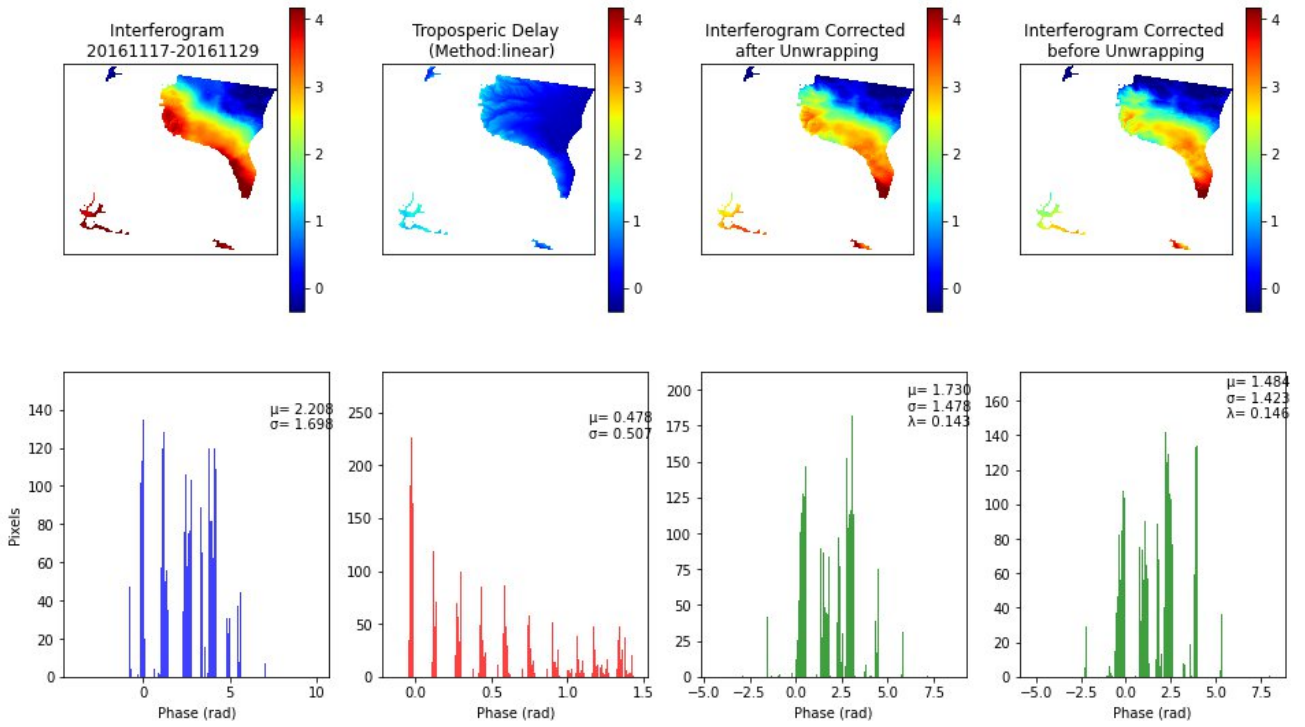
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



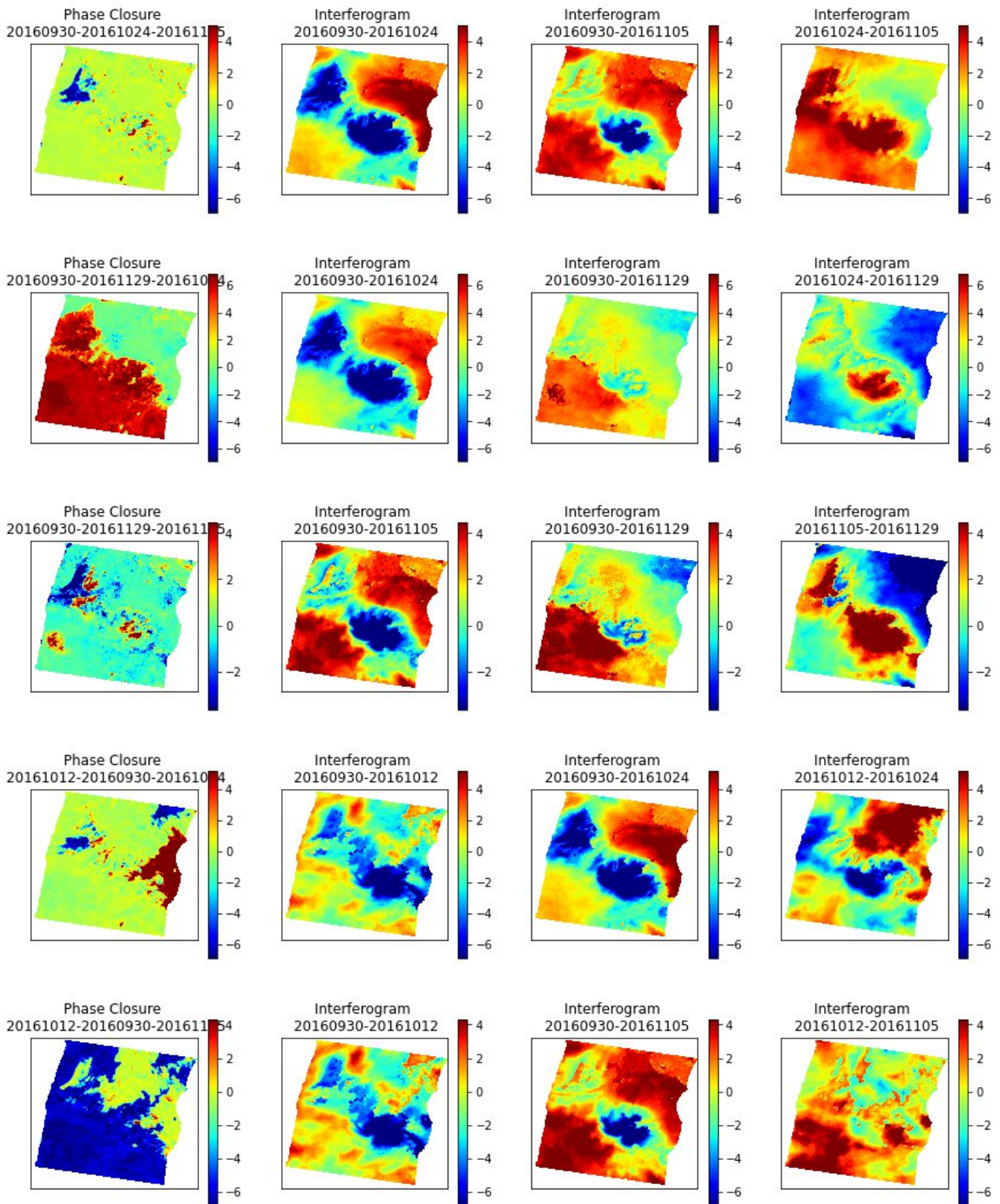
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



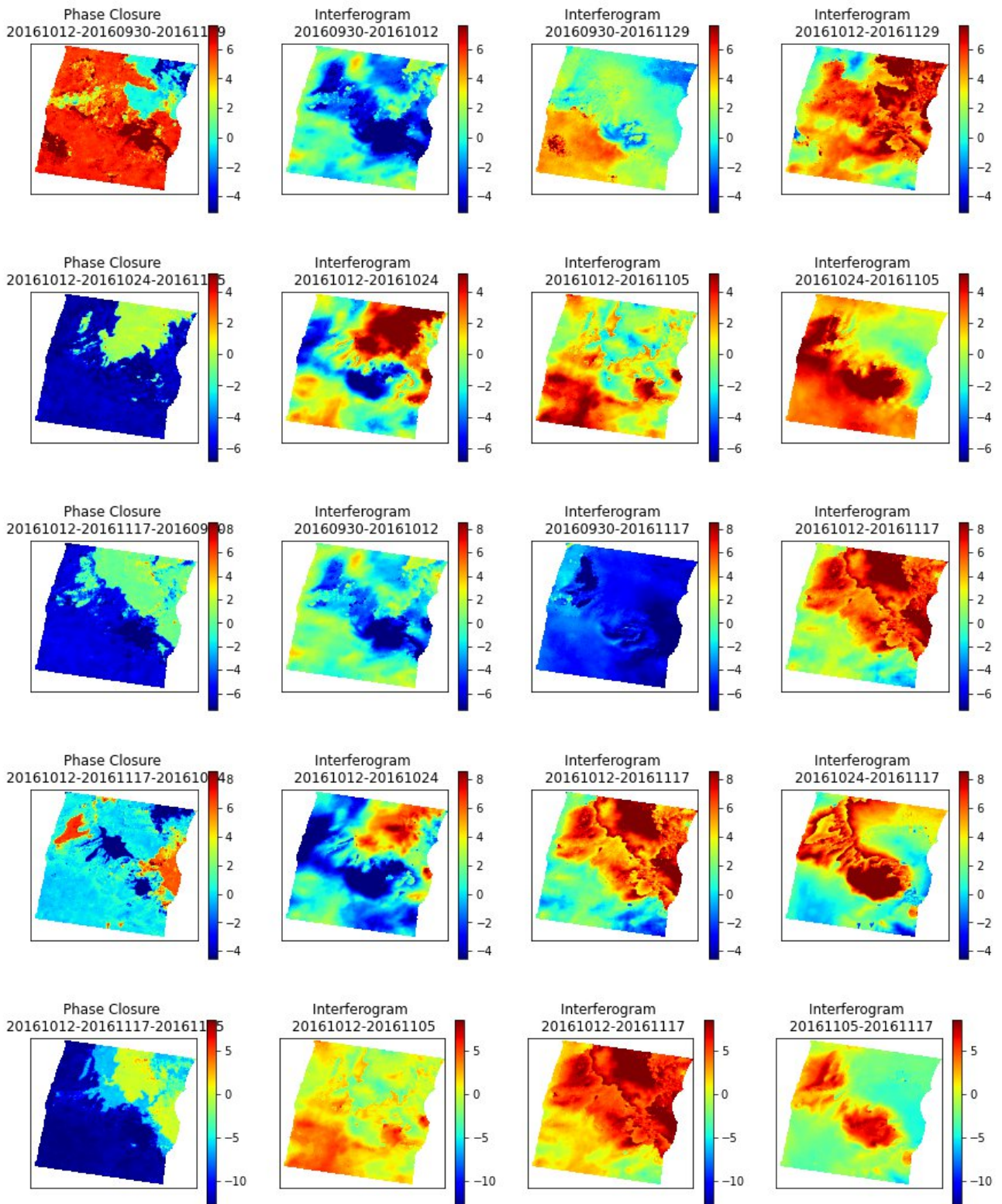
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Φάση Κλεισίματος

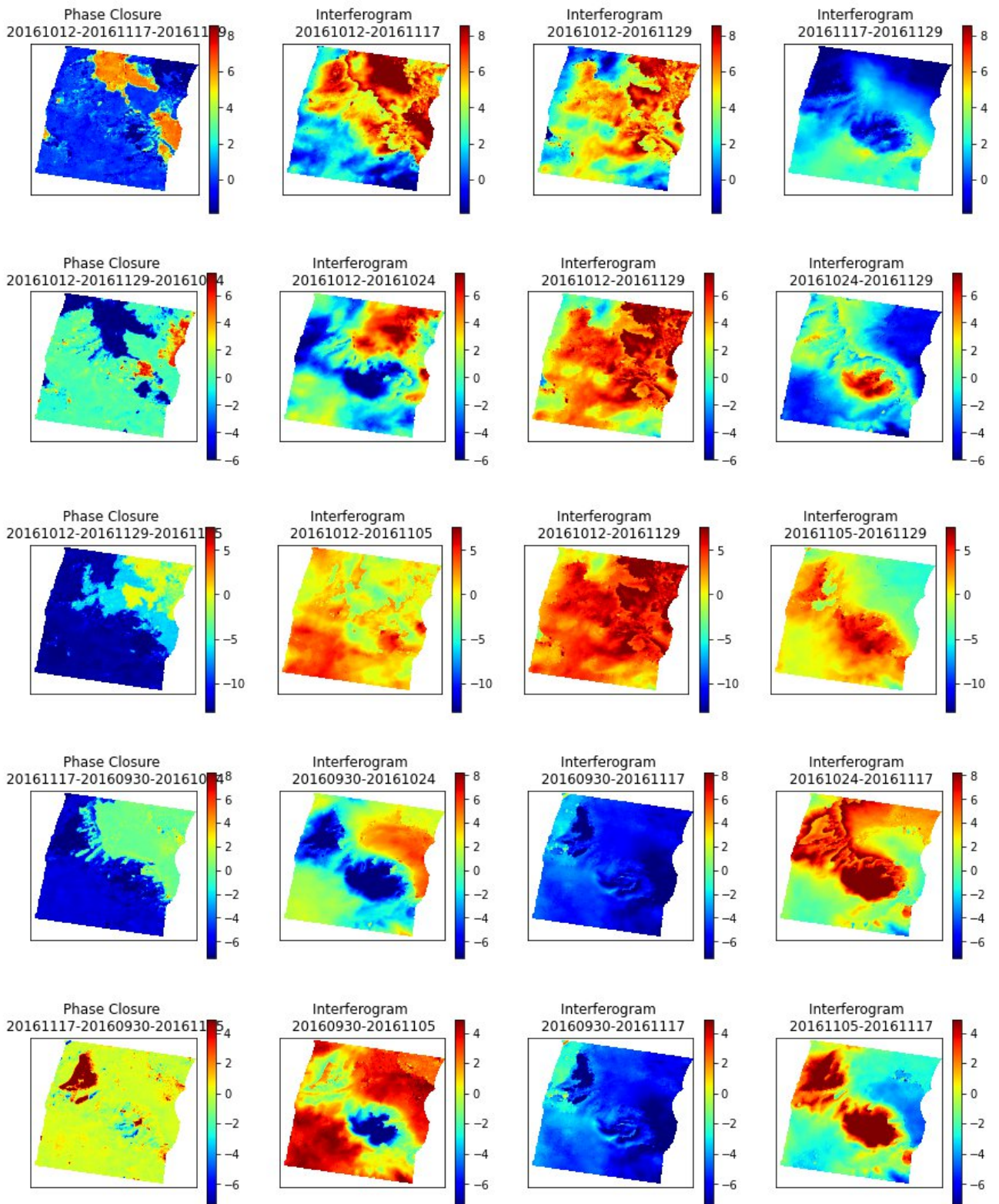
II.I. Φάση Κλεισίματος: Original



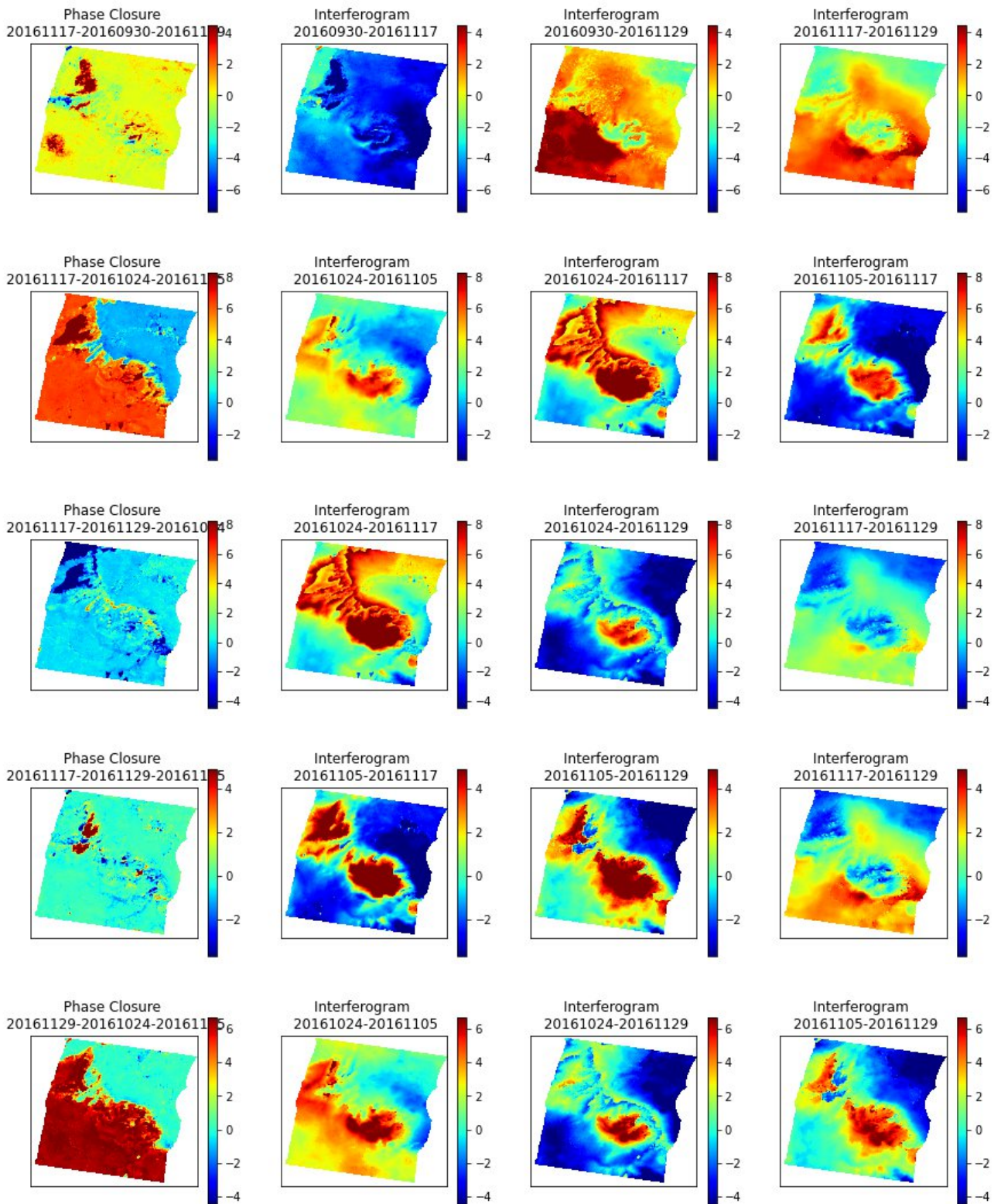
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



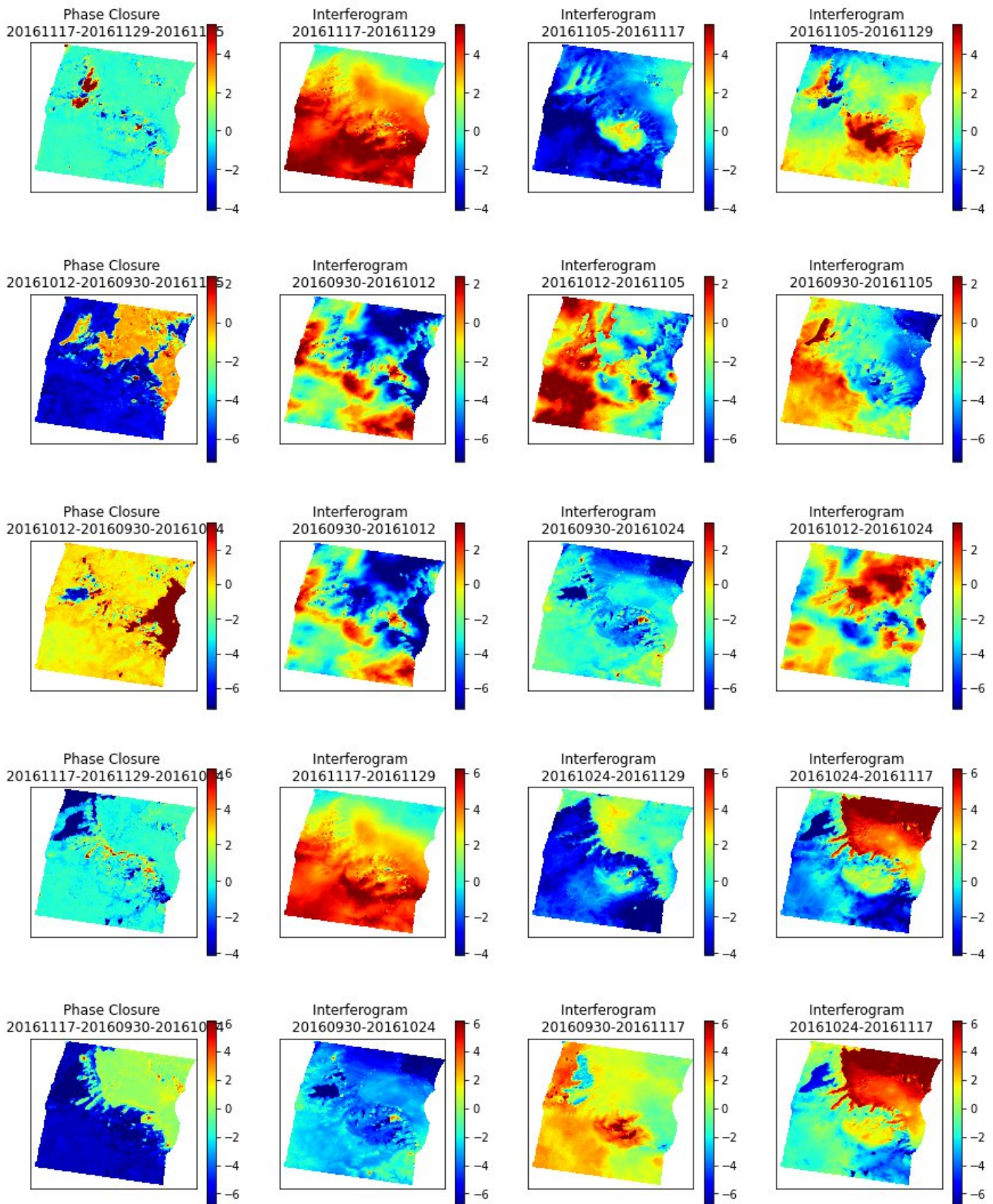
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



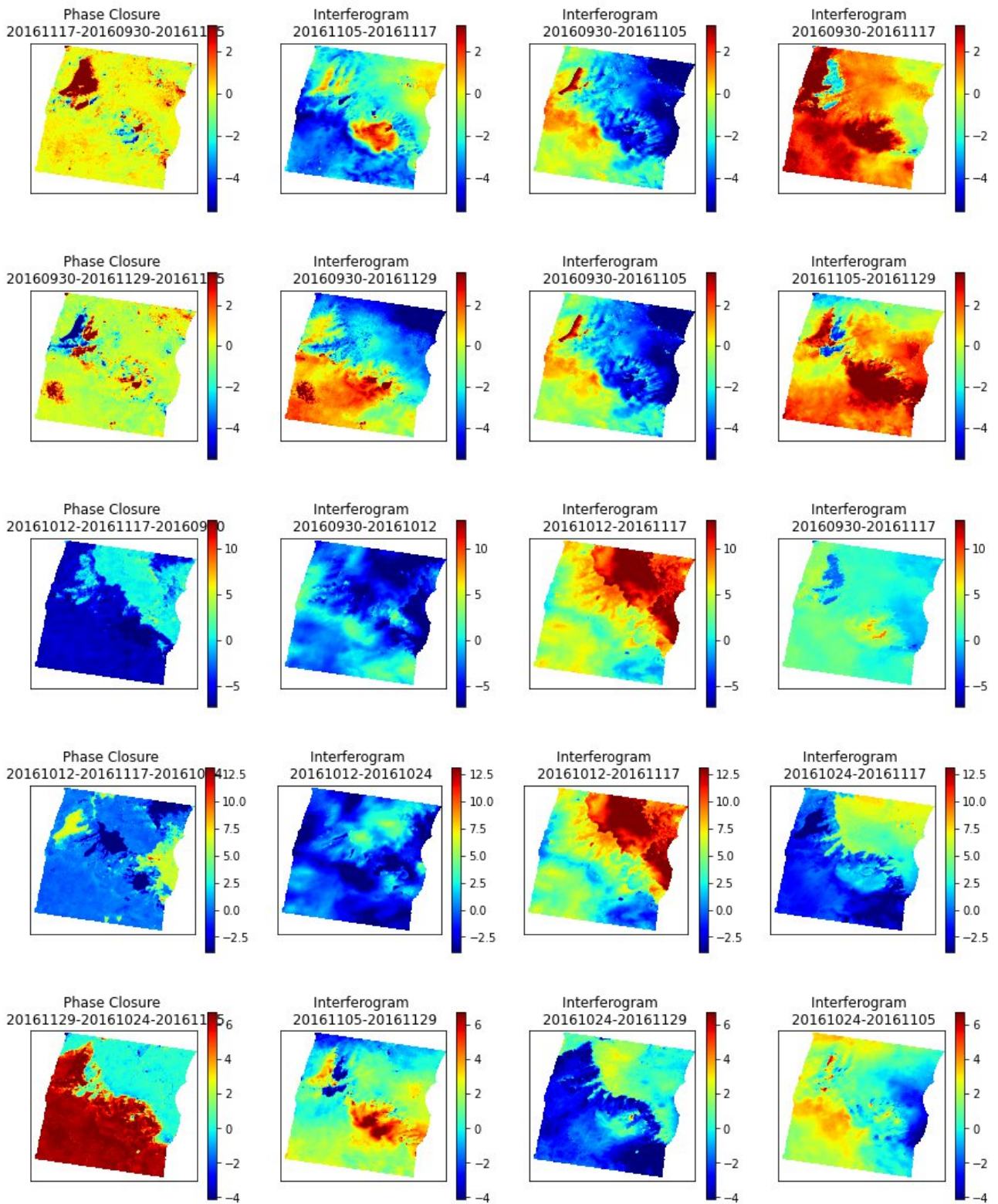
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις

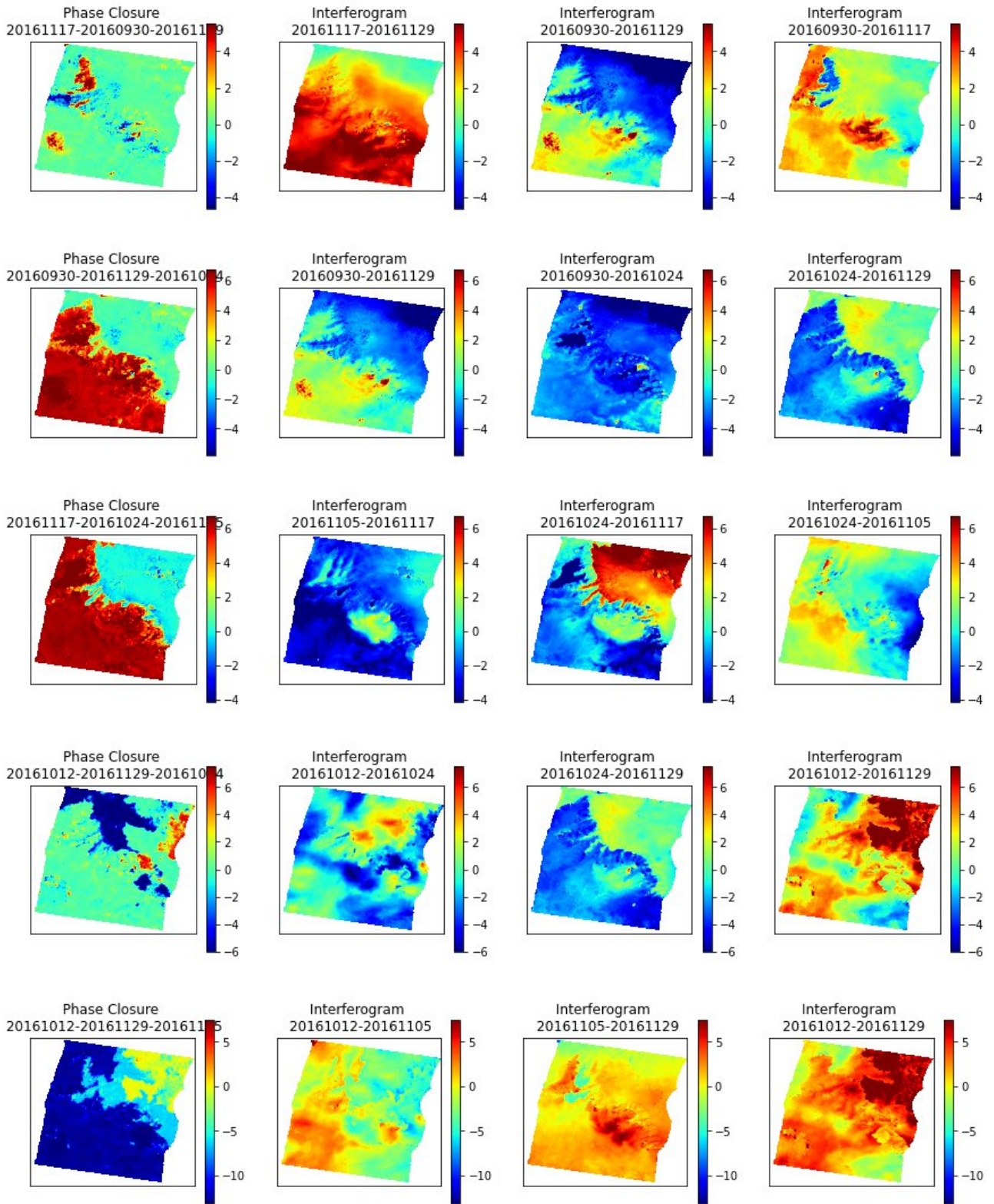


II.II. Φάση Κλεισίματος: ERA5

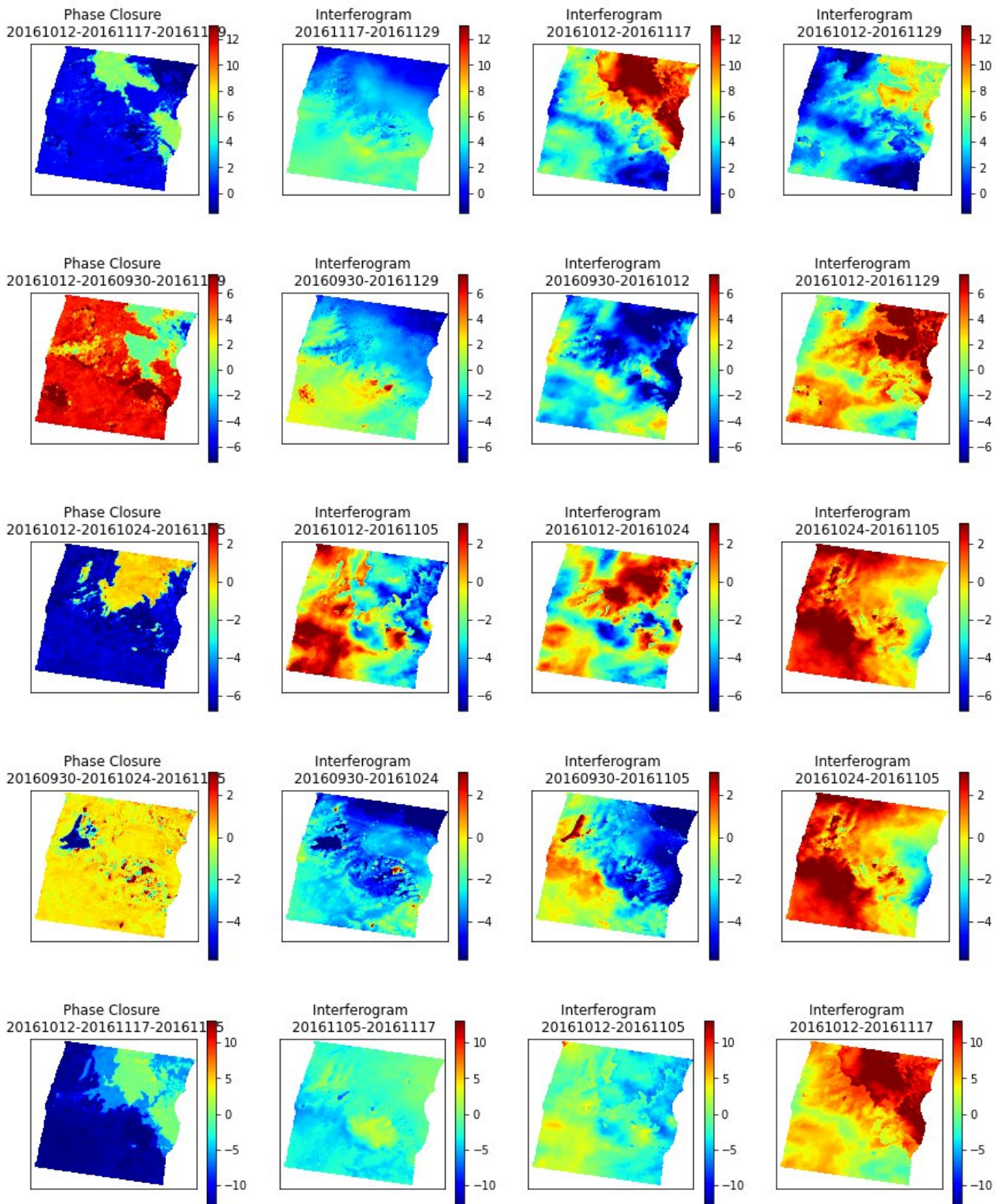


Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις

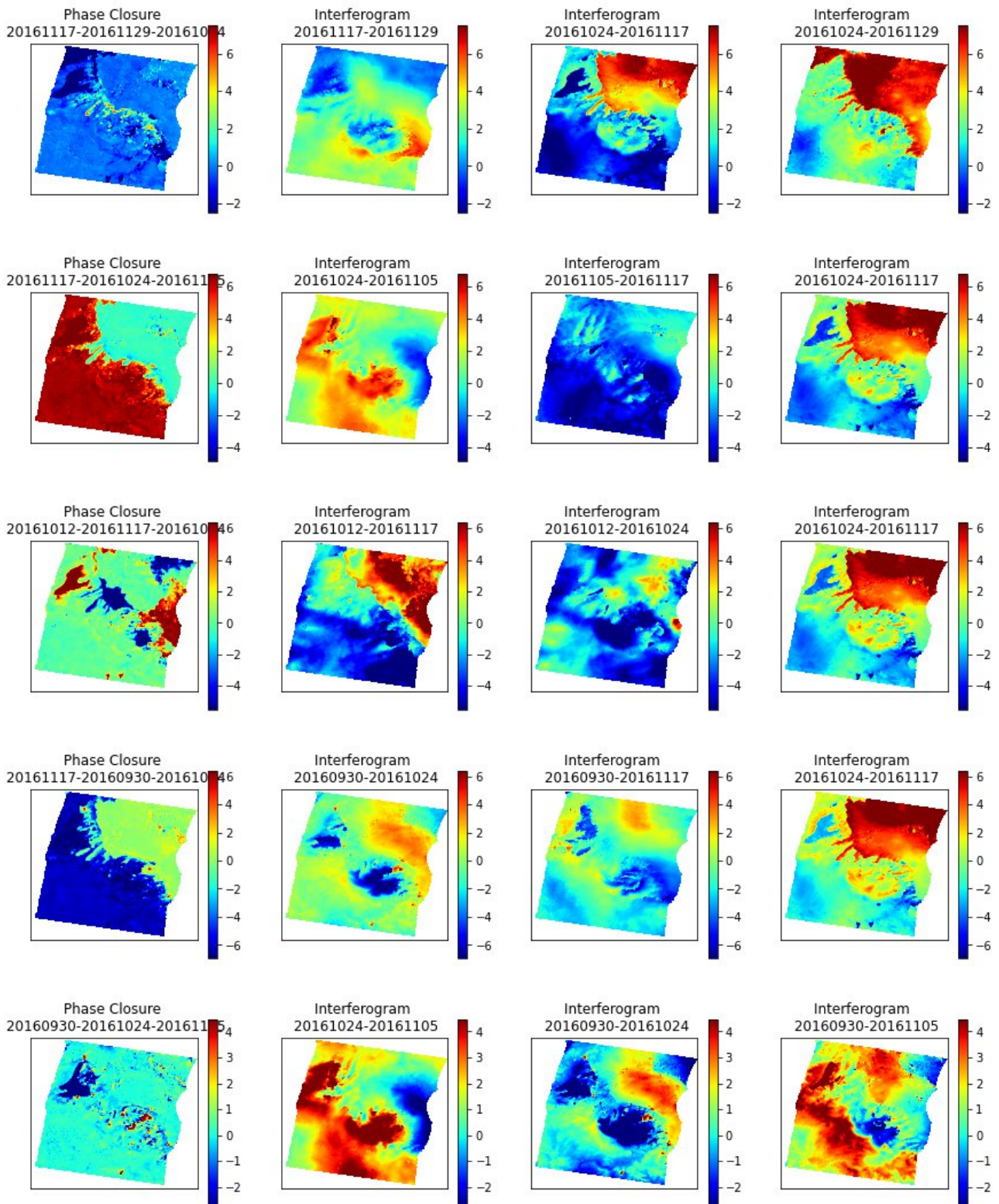




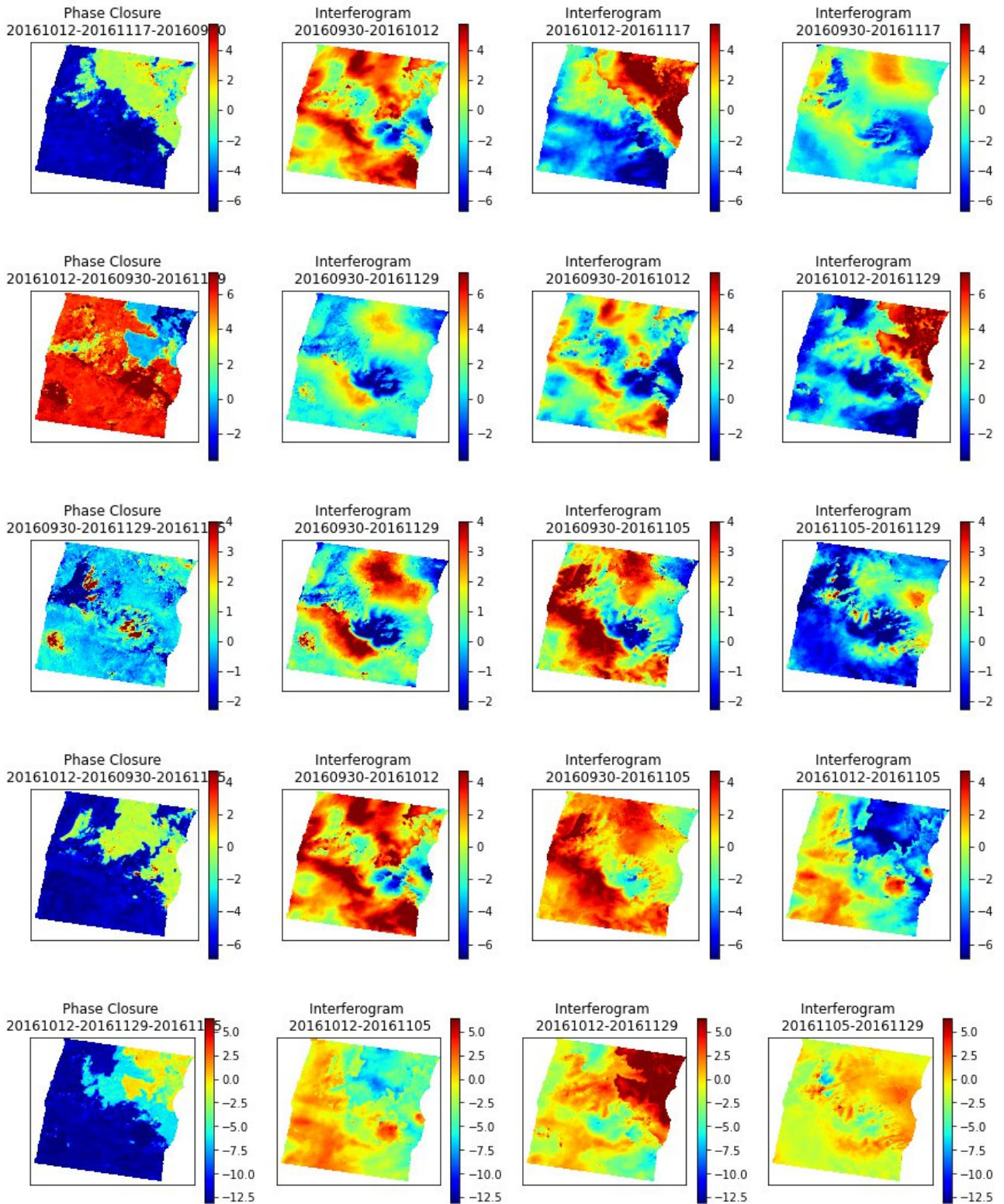
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις

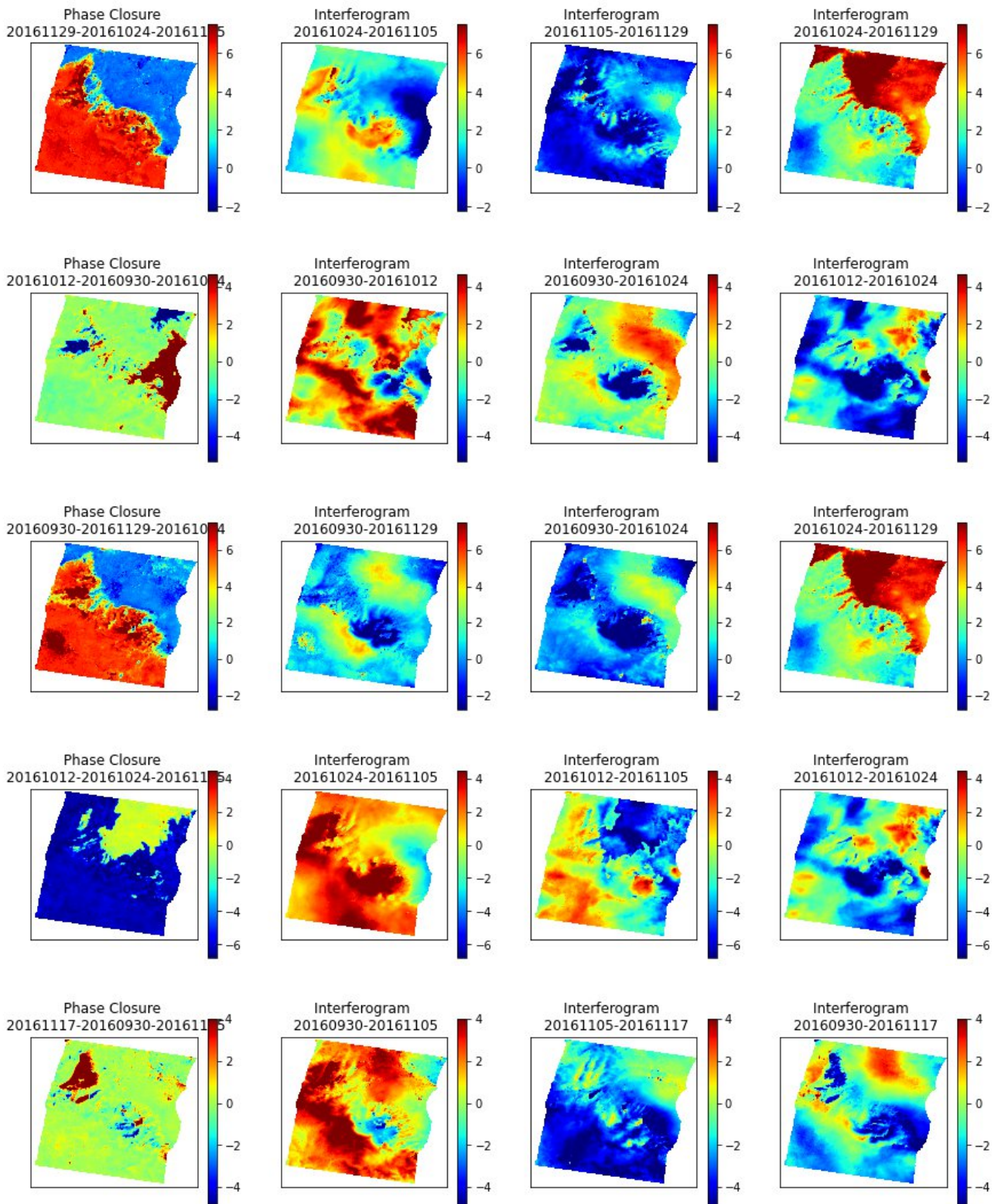


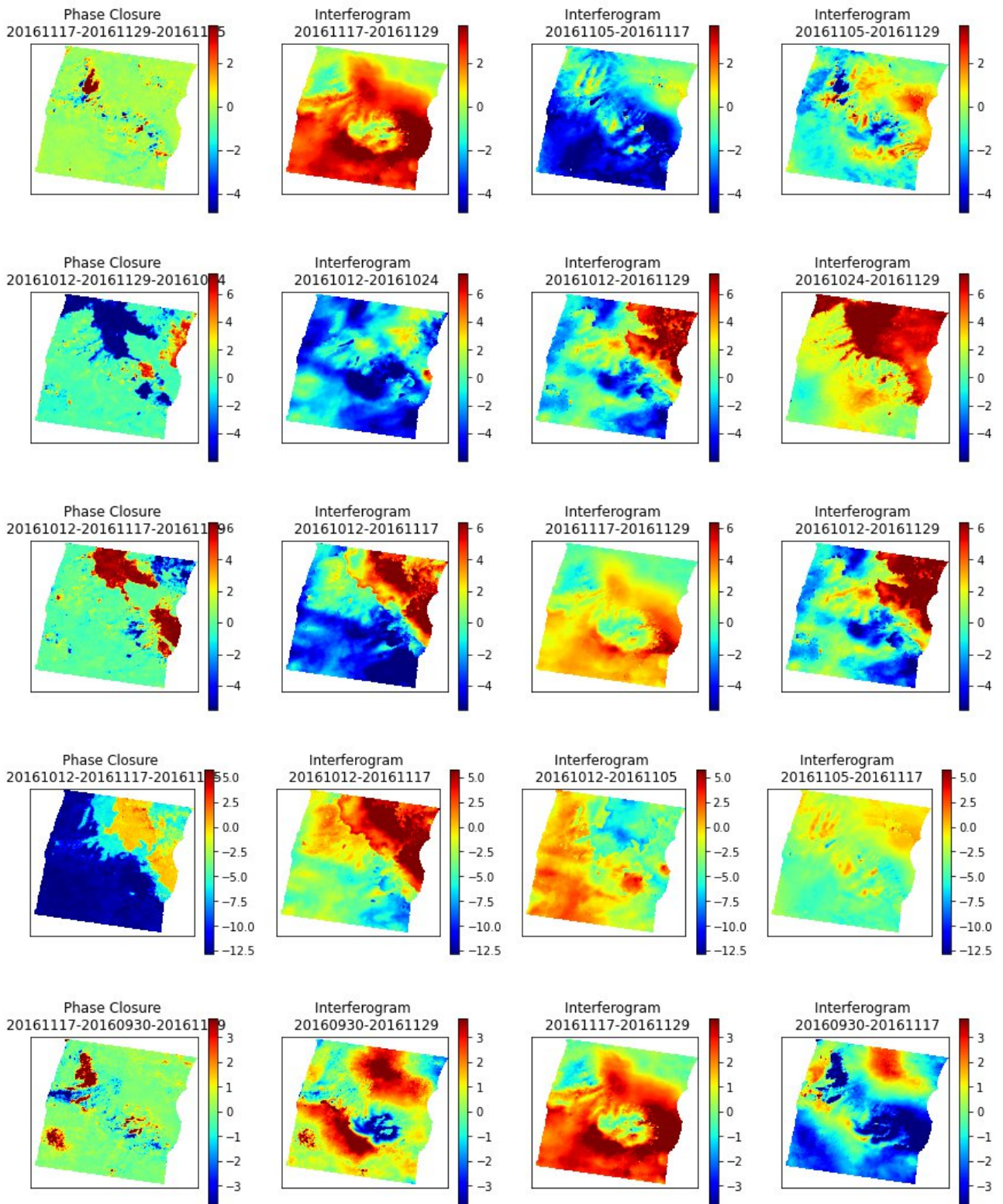
II.III. Φάση Κλεισίματος: GACOS



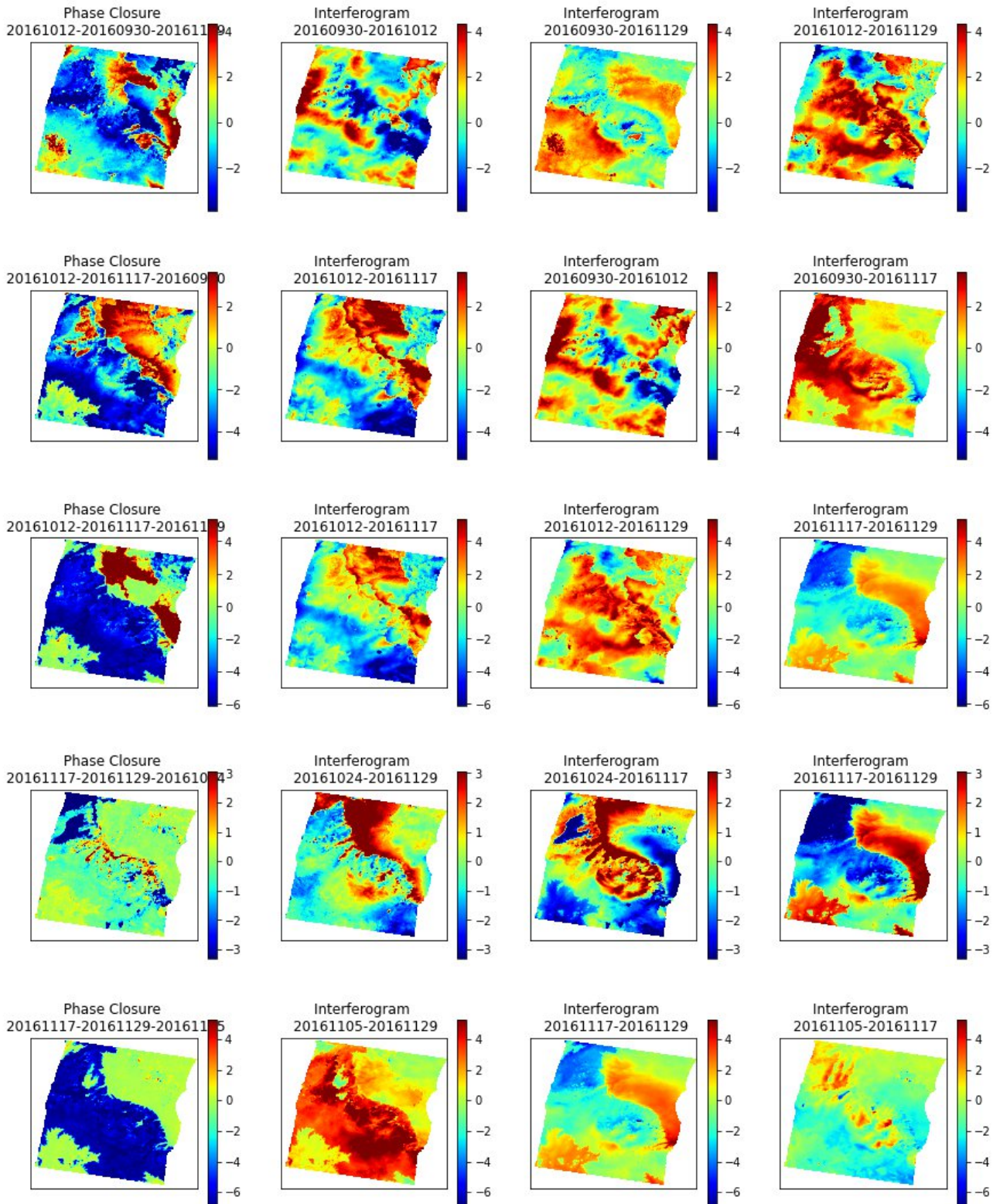
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



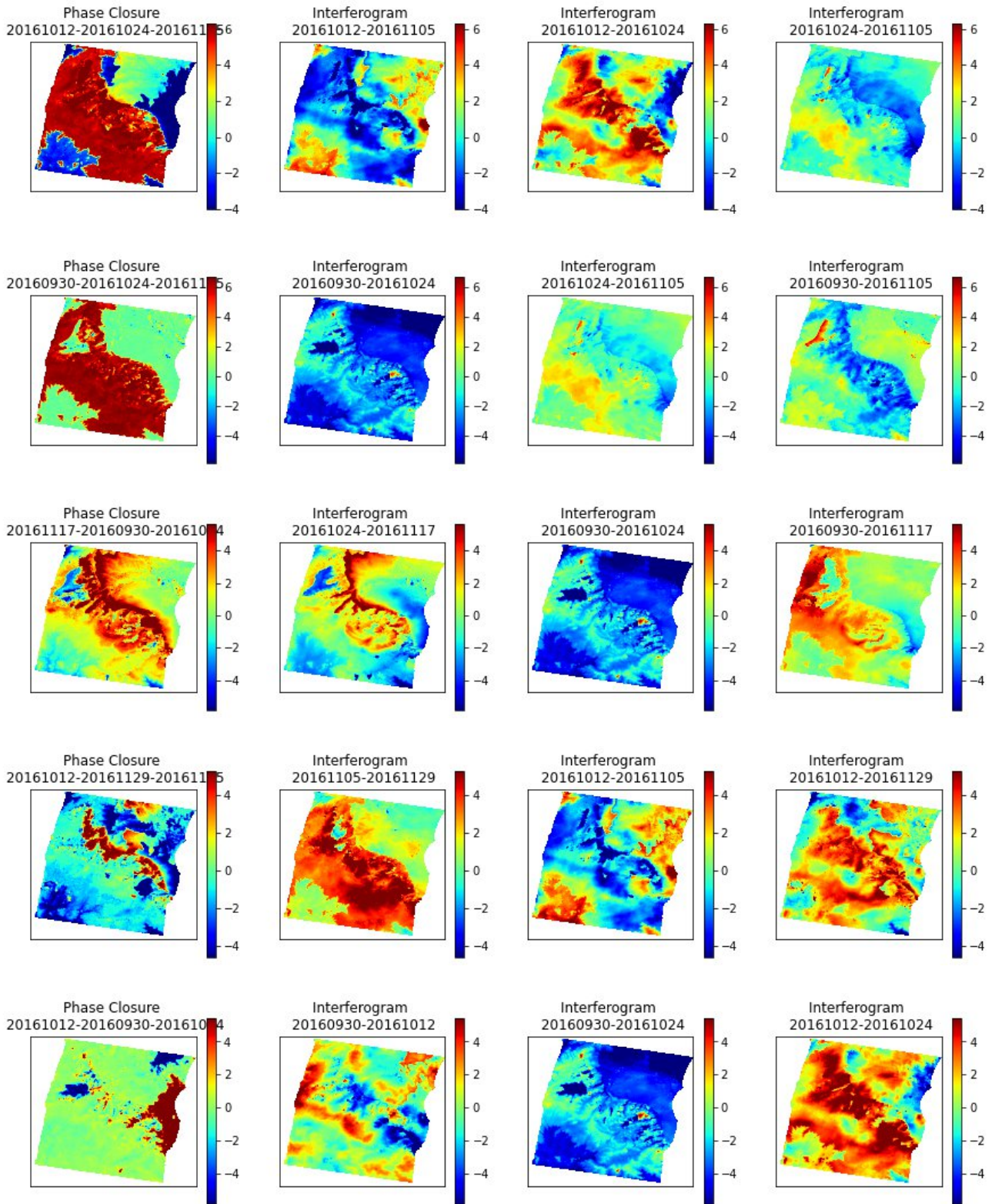


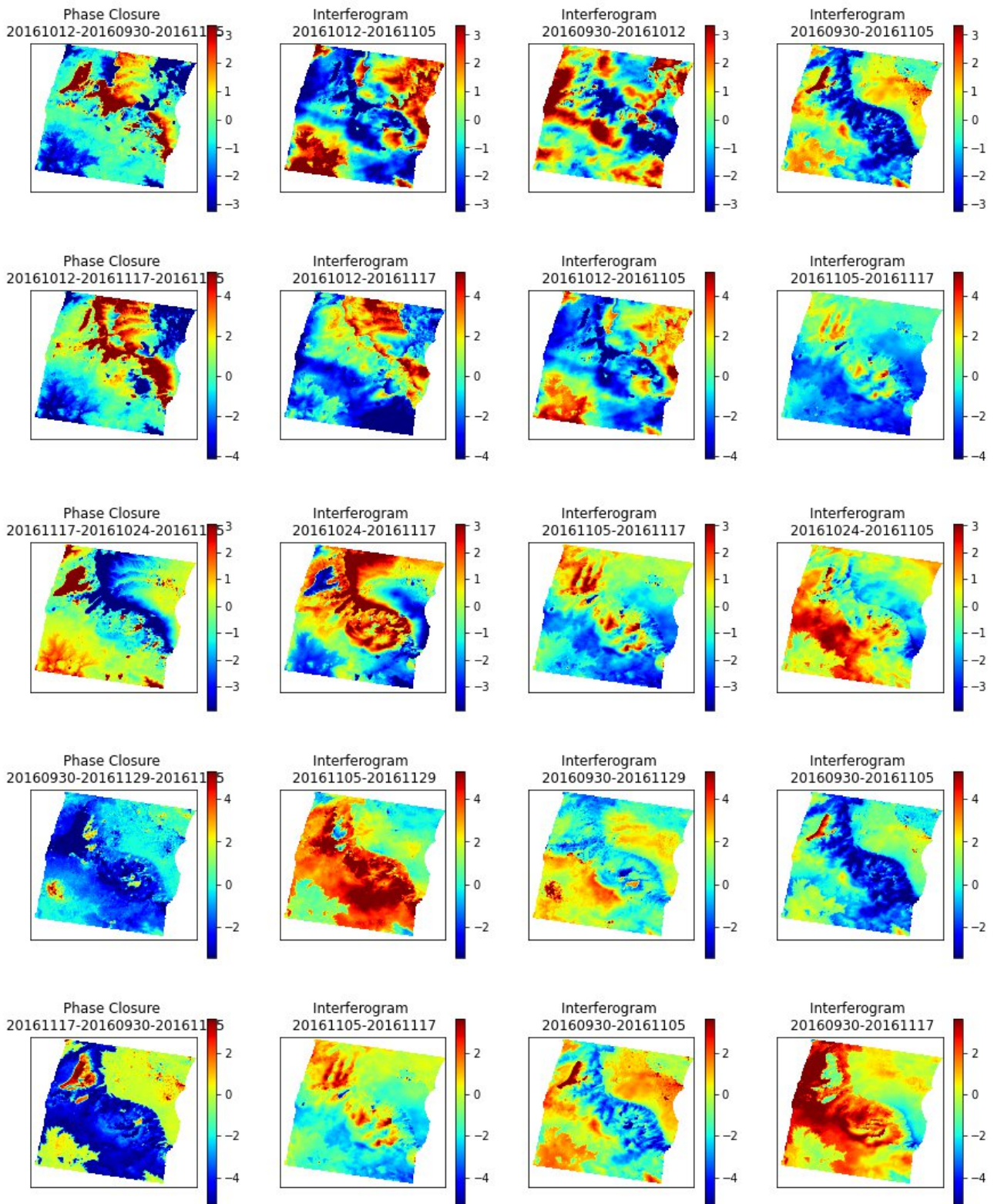


II.IV. Φάση Κλεισίματος: Linear

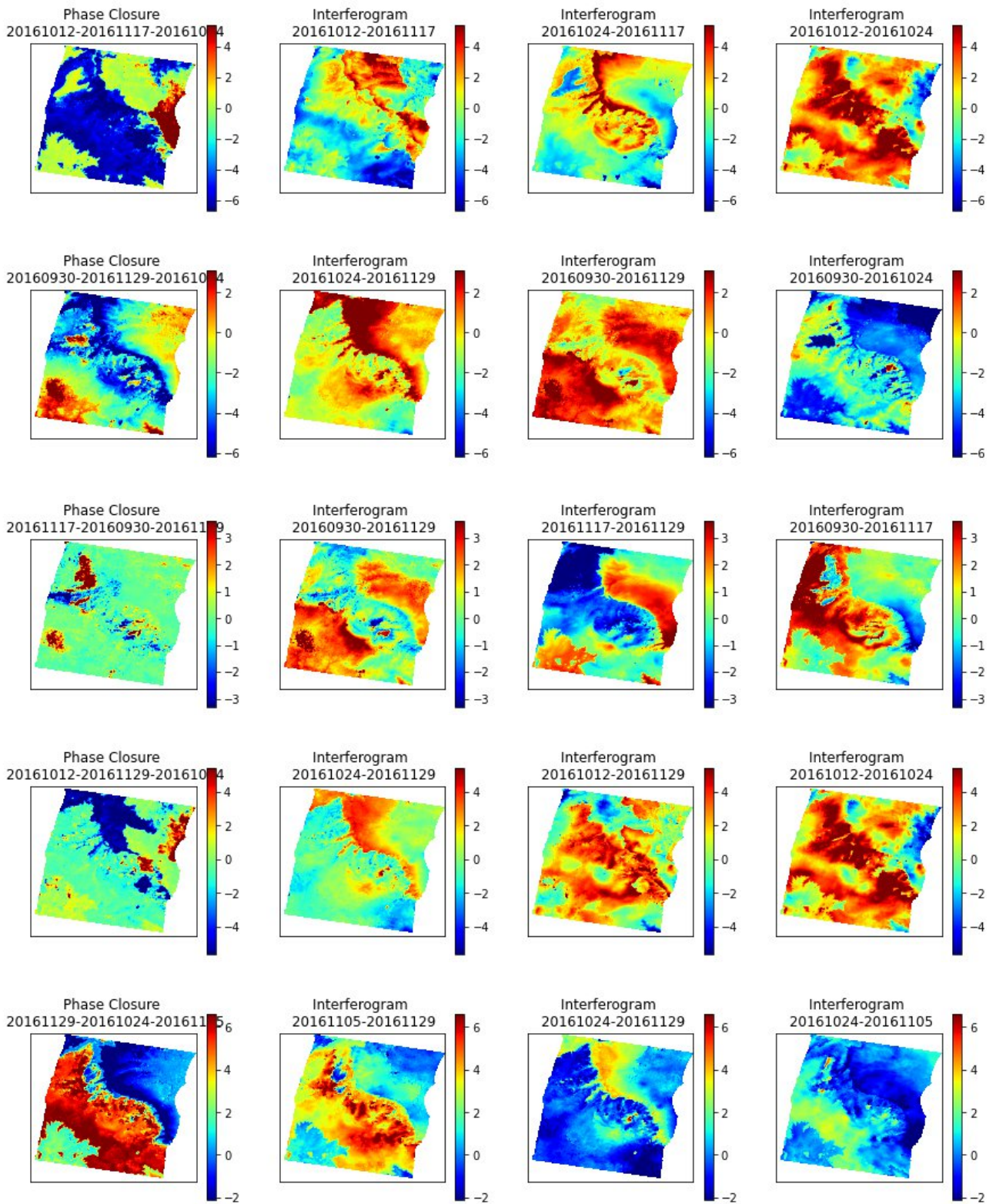


Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις

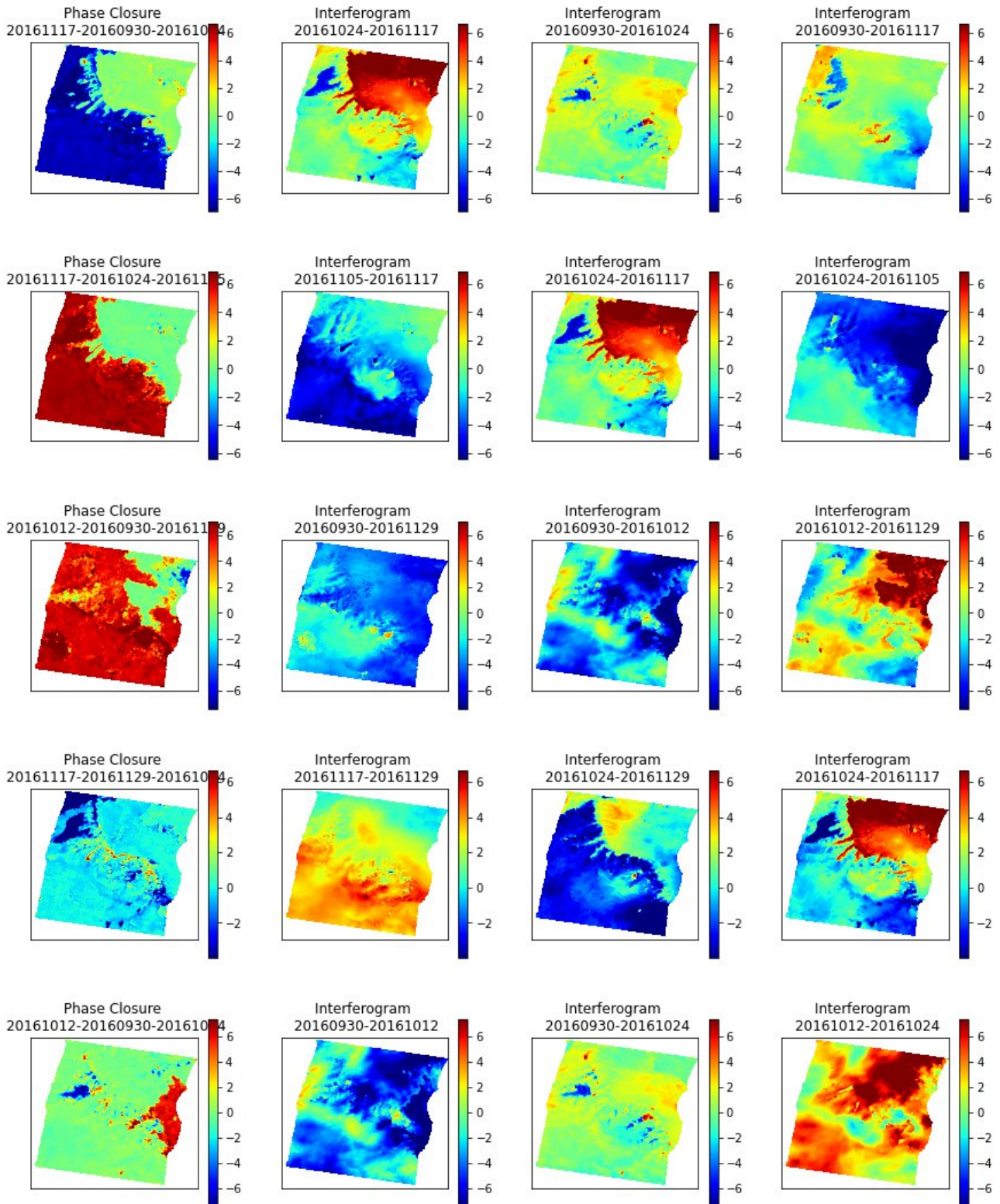




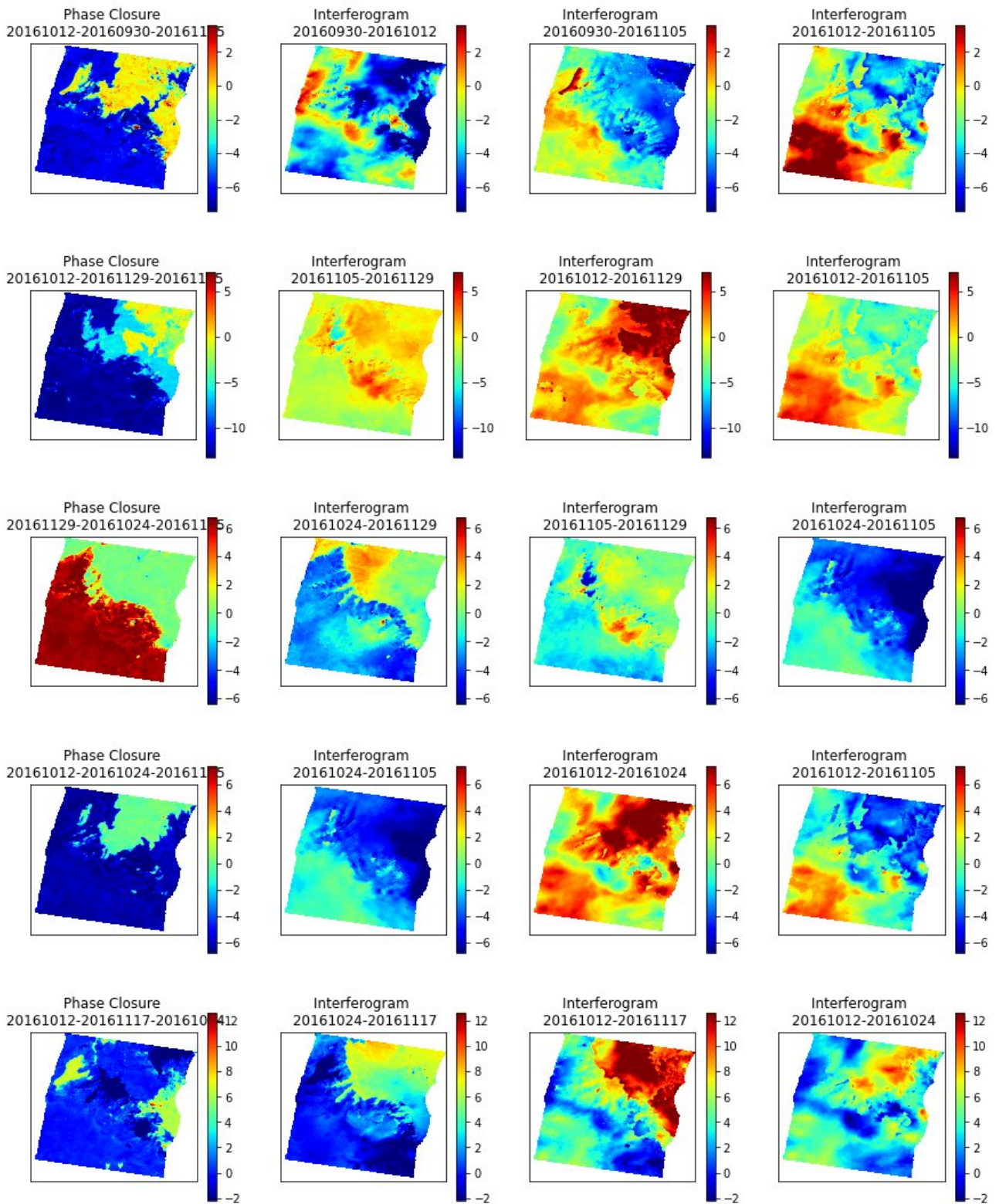
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



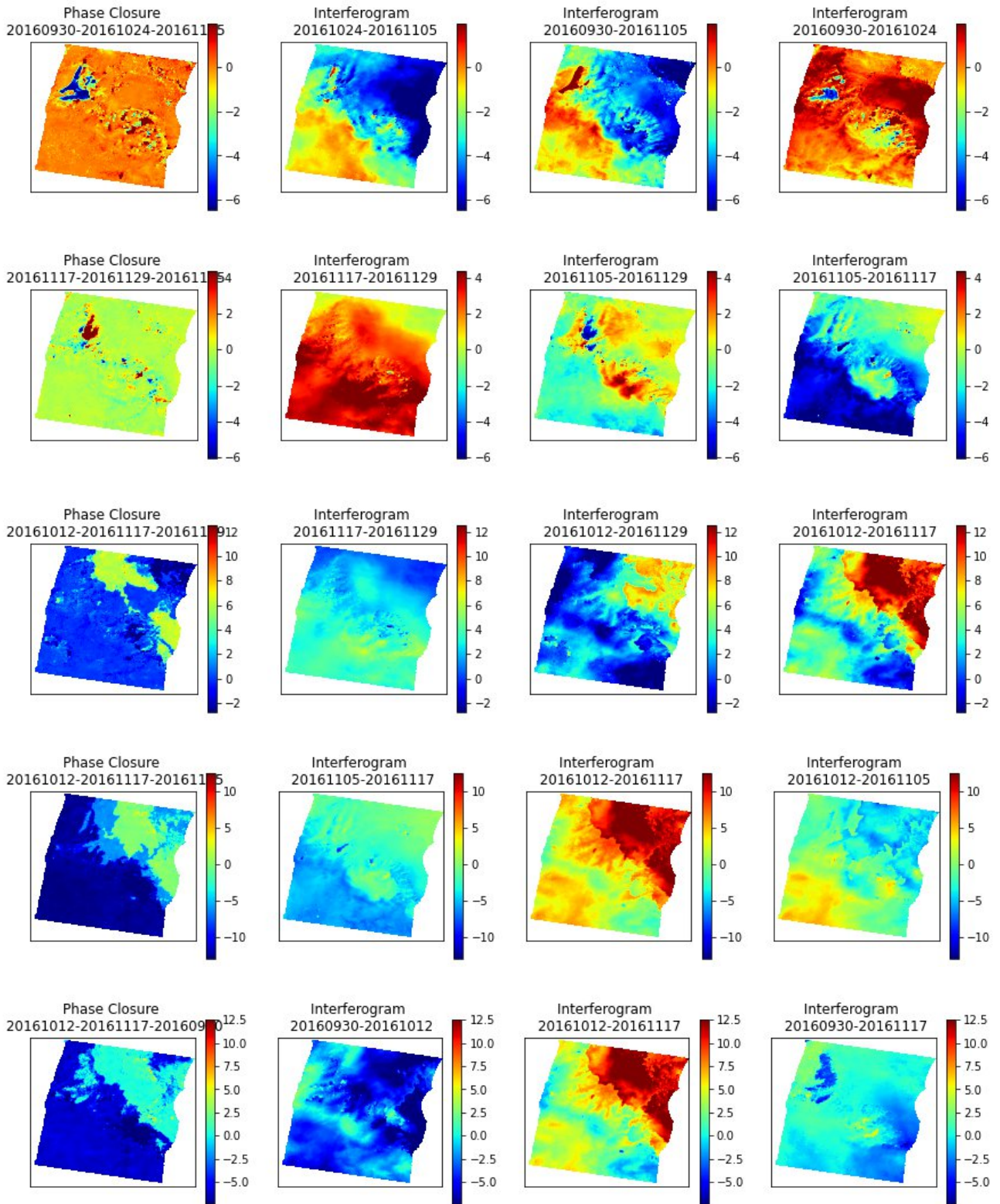
II.V. Φάση Κλεισίματος: PyAPS



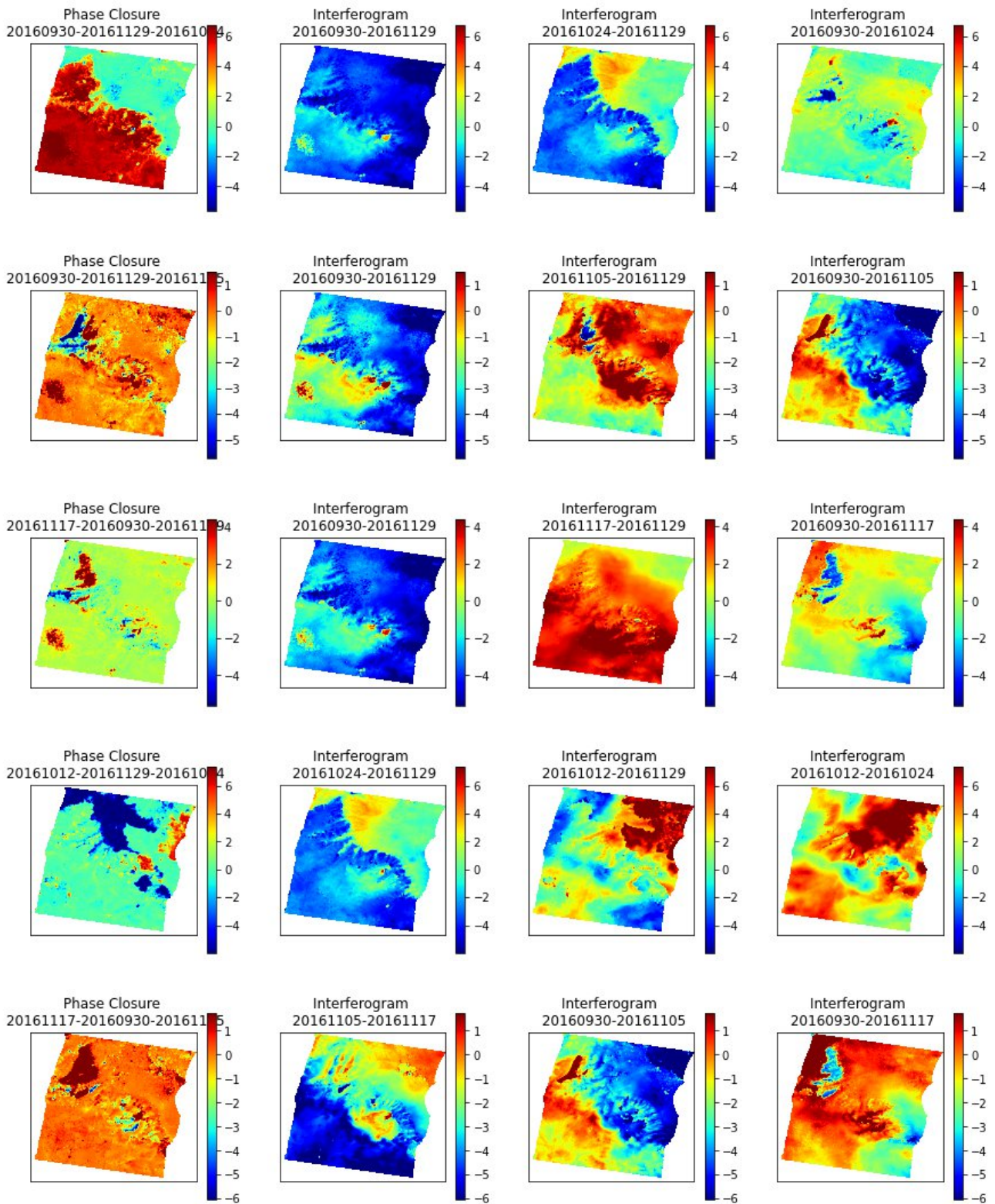
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 4, 601–609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0601:imfaos>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0601:imfaos>2.0.co;2)
- Βέης, Γ., Μπιλλήρης, Χ., Παπαζήση Κ. (2011). Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας. Γεωδαισία IV, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 2011. Σημειώσεις Μαθήματος.
- Bekaert, D. P. S., Hooper, A., & Wright, T. J. (2015a). A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2, 1345–1356. <https://doi.org/10.1002/2014jb011558>
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J. (2015b). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>
- Benoit, A., Pinel-Puysségur, B., Jolivet, R., & Lasserre, C. (2020). CorPhU: an algorithm based on phase closure for the correction of unwrapping errors in SAR interferometry. *Geophysical Journal International*, 3, 1959–1970. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa120>
- Berrada Baby, H., Golé, P., & Lavernat, J. (1988). A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements. *Radio Science*, 6, 1023–1038. <https://doi.org/10.1029/rs023i006p01023>
- Buck, A. L. (1981). New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor. *Journal of Applied Meteorology*, 12, 1527–1532. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:nefcvp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:nefcvp>2.0.co;2)
- Büttner, G., B. Kosztra. (2017). Document title: CLC2018 Technical Guidelines (Service Contract No 3436/R0-Copernicus/EEA.56665) https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc2018technicalguidelines_final.pdf
- Chaabane, F., Avallone, A., Tupin, F., Briole, P., & Maitre, H. (2007). A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 6, 1605–1615. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.894026>
- 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. <https://doi.org/10.1364/josaa.18.000338>
- 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. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.802453>

- Darvishi, M., Cuozzo, 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*, 1332–1346. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.2969726>
- Ding, X., Li, Z., Zhu, J., Feng, G., & Long, J. (2008). Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. *Sensors*, 9, 5426–5448. <https://doi.org/10.3390/s8095426>
- Eshqi Molan, Y., & Lu, Z. (2020). Can InSAR Coherence and Closure Phase Be Used to Estimate Soil Moisture Changes? *Remote Sensing*, 9, 1511. <https://doi.org/10.3390/rs12091511>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 2. <https://doi.org/10.1029/2005rg000183>
- Gray, A. L., Mattar, K. E., & Sofko, G. (2000). Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 10, 1451–1454. <https://doi.org/10.1029/2000gl000016>
- Herndon, K. H., Meyer, F. M., Flores, A. F., Cherrington, E. C., & Kucera, L. K. (2020, April 16). What is Synthetic Aperture Radar? | Earthdata. Earthdata NASA. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 730, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hu, Z., & Mallorquí, J. J. (2019). An Accurate Method to Correct Atmospheric Phase Delay for InSAR with the ERA5 Global Atmospheric Model. *Remote Sensing*, 17, 1969. <https://doi.org/10.3390/rs11171969>
- Καραθανάση Β. (2012). Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση. Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σημειώσεις Μαθήματος.
- Kinoshita, Y., Furuya, M., Hobiger, T., & Ichikawa, R. (2012). Are numerical weather model outputs helpful to reduce tropospheric delay signals in InSAR data? *Journal of Geodesy*, 3, 267–277. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0596-x>
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K., & Vougioukas, S. (2017). The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 1, 4–16. <https://doi.org/10.1002/gdj3.44>
- Li, Z., Muller, J. -P., Cross, P., Albert, P., Fischer, J., & Bennartz, R. (2006). Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2, 349–365. <https://doi.org/10.1080/01431160500307342>

- Li, Z., Muller, J.-P., Cross, P., & Fielding, E. J. (2005). Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *Journal of Geophysical Research*, B3. <https://doi.org/10.1029/2004jb003446>
- Liu, F., & Pan, B. (2020). A New 3-D Minimum Cost Flow Phase Unwrapping Algorithm Based on Closure Phase. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 3, 1857–1867. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2949926>
- Massonnet, D., & Rabaute, T. (1993). Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2, 455–464. <https://doi.org/10.1109/36.214922>
- Michaelides, R. J., Zebker, H. A., & Zheng, Y. (2019). An Algorithm for Estimating and Correcting Decorrelation Phase From InSAR Data Using Closure Phase Triplets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 12, 10390–10397. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2934362>
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, B4, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011jb008916>
- Rocca, F., Prati, C., Monti Guarnieri, A., & Ferretti, A. (2000). Sar Interferometry And Its Applications. *Surveys in Geophysics*, 2/3, 159–176. <https://doi.org/10.1023/a:1006710731155>
- Roukounakis, N., Elias, P., Briole, P., Katsanos, D., Kioutsoukis, I., Argiriou, A. A., & Retalis, A. (2021). Tropospheric Correction of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Interferograms Using a High-Resolution Weather Model Validated by GNSS Measurements. *Remote Sensing*, 12, 2258. <https://doi.org/10.3390/rs13122258>
- Smith, E., & Weintraub, S. (1953). The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. *Proceedings of the IRE*, 8, 1035–1037. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1953.274297>
- Vincent, P., M. Bourbigot, H. Johnsen, R. Piantanida. (2020). Document title: Sentinel-1 Product Specification (Document Number: S1-RS-MDA-52-7441) <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Specification>
- Wang, H., Wright, T. J., Yu, Y., Lin, H., Jiang, L., Li, C., & Qiu, G. (2012). InSAR reveals coastal subsidence in the Pearl River Delta, China. *Geophysical Journal International*, no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2012.05687.x>
- 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. <https://doi.org/10.1109/igarss.2006.956>
- Williams, S., Bock, Y., & Fang, P. (1998). Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, B11, 27051–27067. <https://doi.org/10.1029/98jb02794>
- 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, 102289.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102289>

Xu, X., & Sandwell, D. T. (2019). Toward Absolute Phase Change Recovery With InSAR: Correcting for Earth Tides and Phase Unwrapping Ambiguities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1, 726–733.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2940207>

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.
<https://doi.org/10.1029/2017jb015305>

Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 104331.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>

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. <https://doi.org/10.1029/96jb03804>