



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Σύγκριση μεθόδων εξάλειψης των επιπτώσεων της ατμόσφαιρας
στα συμβολογράμματα Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ

Ιωάννης Μ. Ζούρος

Επιβλέπων:

Βασιλεία Καραθανάση, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019



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

Διπλωματική Εργασία

Σύγκριση μεθόδων εξάλειψης των επιπτώσεων της ατμόσφαιρας
στα συμβολογράμματα Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ

Ιωάννης Μ. Ζούρος

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

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Β. Καραθανάση Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.	Β. Γκίκας Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Κ. Καραντζαλος Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
------------------------------------	-------------------------------	---

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....

Ιωάννης Μ. Ζούρος
Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα.

Copyright © Ιωάννης Μ. Ζούρος, 2019
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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση αυτής της εργασίας στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., ολοκληρώνεται ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών. Θέμα της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η σύγκριση τριών μεθόδων για τη μείωση των επιπτώσεων της τροπόσφαιρας στα συμβολογράμματα SAR. Στόχος ήταν να κατασκευαστεί ένα εμπειρικό μοντέλο διόρθωσης και να συγκριθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο ERA5. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν οι διορθώσεις μέσω GPS μιας προηγούμενης εργασίας για την ίδια περιοχή μελέτης, του Υποψηφίου Διδάκτορα της σχολής, κ. Κλεάνθη Καραμβάση, με σκοπό να συγκριθούν με τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, τόσο αυτήν την εργασία όσο και ολόκληρο τον κύκλο των προπτυχιακών σπουδών, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα ορισμένους ανθρώπους, χωρίς τη βοήθεια των οποίων το έργο αυτό δε θα μπορούσε να συντελεστεί.

Κατ' αρχάς, θέλω να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κ. Βασιλεία Καραθανάση, η οποία επέβλεψε την εργασία μου. Με καθοδηγούσε σε κάθε στάδιο και κατηύθυνε τη συνολική πορεία, από την αρχή μέχρι το τέλος της εργασίας. Το ενδιαφέρον της για το θέμα και η επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε υπήρξαν παράγοντες καθοριστικοί. Φυσικά, θα ήταν μεγάλη αβλεψία να μην αναφερθώ και στην ηθική βοήθεια που είχα από εκείνη, με αποτέλεσμα να νιώσω ότι παρά τις δυσκολίες, με πολύ προσπάθεια, θα καταφέρω να αντεπεξέλθω στις απαιτήσεις. Καταλαβαίνει, λοιπόν, κανείς πως η συνεργασία μας ήταν άκρως αποτελεσματική και θα ευχόμουν να συνεργαστούμε ξανά στο μέλλον.

Θερμές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω επίσης, στον Υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής, τον κ. Κλεάνθη Καραμβάση, χωρίς τη βοήθεια του οποίου αυτή η εργασία δε θα είχε ολοκληρωθεί. Η τεράστια βοήθεια που μου προσέφερε σε τεχνικά θέματα ξεπερνά κατά πολύ τα καθιερωμένα πλαίσια. Εκτός αυτού, οι συμβουλές του και η διαρκής παρότρυνσή του για επιπλέον δουλειά καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό την πορεία του όλου εγχειρήματος. Η συνεχής και αδιάκοπη διαθεσιμότητά του και, γενικότερα, αυτού του είδους η ανιδιοτελής προσφορά εκλείπουν στις μέρες μας και πρέπει να αναγνωρίζονται. Κλεάνθη, σ' ευχαριστώ πολύ φίλε!

Βέβαια, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης για την πολύτιμη βοήθεια που απλόχερα προσφέρουν στους φοιτητές που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο τομέα. Ιδιαίτερη μνεία θέλω να κάνω στον κ. Κολοκούση, στον κ. Ιωσηφίδη, στον κ. Ανδρώνη και στην κ. Βασιλείου. Τους γνωρίσαμε μέσα από τα μαθήματα που προσφέρει η σχολή και τους αγαπήσαμε δεόντως.

Θέλω, ακόμη, να ευχαριστήσω από καρδιάς την Ανδρονίκη, έναν άνθρωπο θαυμάσιο, σπάνιο και ξεχωριστό, αλλά και άλλους συμφοιτητές, με τους οποίους έκανα φίλιες που δε θα ξεχάσω ποτέ.

Ευχαριστώ το Νονό μου και τη Νονά μου, που παρακολουθούν μεν την πορεία μου από την άλλη άκρη του Ατλαντικού, με κάνουν όμως να νιώθω πως είναι πολύ πολύ κοντά.

Τέλος, ευχαριστώ ολόψυχα ολόκληρη την οικογένειά μου, μα ειδικότερα, τον πατέρα μου, τη μητέρα μου και τον αδερφό μου. Στήριξαν όλες τις επιλογές μου και μού έδωσαν τα εφόδια ώστε να είμαι σήμερα εδώ. Ελπίζω κάποτε να δικαιώσω τους κόπους και τις θυσίες τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	8
Abstract	9
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	11
1.1 Βασικά στοιχεία θεωρίας	12
1.1.1 Συμβολομετρία: ορισμός, μορφές	12
1.1.2 Γεωμετρία λήψης των εικόνων	13
1.1.3 Διαφορική Συμβολομετρία	14
1.2 Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας	21
1.3 Η περιγραφή του ατμοσφαιρικού μοντέλου	23
Κεφάλαιο 2 - Προηγούμενες μελέτες	27
2.1 Η εργασία των [Doin et al., 2009]	28
2.2 Η εργασία των [Jolivet et al., 2014]	30
Κεφάλαιο 3 - Περιοχή μελέτης και προεπεξεργασίες	33
3.1 Περιοχή μελέτης, ΨΜΕ και συμβολογράμματα	34
3.2 Διόρθωση τροχιακών σφαλμάτων	37
Κεφάλαιο 4 - Η εμπειρική μέθοδος	49
4.1 Περιγραφή της μεθόδου	50
4.2 Εφαρμογή και αποτελέσματα	51
Κεφάλαιο 5 - Η διόρθωση με το ERA5	63
5.1 Επιλογή δεδομένων	64
5.2 Κώδικας και αποτελέσματα	66
Κεφάλαιο 6 - Η διόρθωση με το GPS	81
6.1 Η Περιγραφή του μοντέλου	82
6.2 Αποτελέσματα της διόρθωσης με GPS	83
Κεφάλαιο 7 - Σύγκριση, σχόλια, συμπεράσματα	87
Βιβλιογραφία	97
Παράρτημα	99
Α. Λίστα σχημάτων	99
Β. Λίστα εικόνων	99
Γ. Λίστα πινάκων	100

Περίληψη

Τίτλος:

Σύγκριση μεθόδων εξάλειψης των επιπτώσεων της ατμόσφαιρας στα συμβολογράμματα Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ

Περίληψη:

Η συμβολομετρία με Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (ΣΑΡ), συχνά συναντώμενη ως InSAR, είναι μια χρήσιμη τεχνική για την παραγωγή χαρτών εδάφους και χαρτών παραμόρφωσης, χάρη στη δυνατότητα χρήσης ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και ηλιακής ακτινοβολίας, χάρη στη μεγάλη χωρική κλίμακα απεικόνισης, στην εξαιρετική διακριτική ικανότητα και στην υψηλή ακρίβεια.

Βέβαια, η τεχνική InSAR έχει και περιορισμούς. Ένας από τους πιο σημαντικούς είναι οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας (κυρίως της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας) στην επαναληπτική συμβολομετρία. Είναι ευρέως γνωστό, πως η μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθυστερεί όταν αυτά διαπερνούν τα στρώματα της τροπόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις φάσης. Αντίθετα με την επίδραση της τροπόσφαιρας, η ιονόσφαιρα τείνει να επιταχύνει τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όμως, η ανάλυση της επίδρασης της ιονόσφαιρας στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ξεπερνά τις προσδοκίες της μελέτης αυτής.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν καταβληθεί μεγάλες προσπάθειες για την καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων των τροποσφαιρικών επιδράσεων και έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για τη μείωσή τους. Η εργασία αυτή εστιάζεται στη μείωση αυτών των επιδράσεων με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Αρχικά, επιχειρείται μια εμπειρική διόρθωση, με βάση τη σχέση μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και του υψομέτρου. Εκτός από αυτήν την προσέγγιση, οι τροποσφαιρικές επιδράσεις μειώνονται με τη χρήση του ERA5, του τελευταίου Παγκόσμιου Ατμοσφαιρικού Μοντέλου που έχει παράγει ο οργανισμός ECMWF. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας προηγούμενης μελέτης, του K. Καραμβάση, για την ίδια περιοχή, με μετρήσεις GPS.

Ολοκληρώνοντας, οι διάφορες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για τη μείωση των τροποσφαιρικών επιδράσεων σχολιάζονται και συγκρίνονται. Συμπερασματικά, καμία μέθοδος δε μειώνει πάντα και με συνέπεια την επίδραση της ατμόσφαιρας. Διαφορετικές περιοχές ή/και διαφορετικές ζώνες ώρας ίσως απαιτούν ξεχωριστή προσέγγιση. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα πρέπει να εστιάσουν στο συνδυασμό των διαφορετικών μεθόδων με το βέλτιστο τρόπο.

Abstract

Title:

Comparison of different methods for correcting the atmospheric effects in SAR interferograms

Abstract:

Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry, commonly referred to as InSAR, is a powerful technique for topographic and ground surface deformation mapping due to its all-weather and day-and-night imaging capability, wide spatial coverage, fine resolution, and high measurement accuracy.

InSAR technology, however, has also limitations. One of the most intractable is the effect of the atmosphere (mainly the troposphere and the ionosphere) on repeat-pass InSAR. It is well known that electromagnetic waves are delayed when they travel through the troposphere. The effect often introduces significant errors to phase measurements. Contrary to the effects of the troposphere, the ionosphere tends to accelerate the electromagnetic waves's transmission. However, analysing ionospheric effects on electromagnetic waves is far beyond the scope of this thesis.

Great efforts have been made in recent decades to better understand the properties of the tropospheric effects and to develop methods for their mitigation. This study emphasises in mitigating these effects with three different methods. At first, an empirical correction is attempted, based on the correlation between interferometric phase delay and elevation. Besides this approach, tropospheric effects are reduced with the use of ERA5, the latest Global Atmospheric Model that ECMWF has produced. Finally, there are results presented from a previous study, carried from K. Karamvasis, for the same area, using GPS outputs.

In the end, the various methods developed for mitigating the tropospheric effects are reviewed and compared. Concluding, none of the methods consistently reduces the tropospheric signals. Different regions and/or time zones may require a unique approach. Future developments should aim towards combining the different correction methods in an optimal manner.

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται ορισμένα θεωρητικά στοιχεία για τη συμβολομετρία και για τις διαφορικές εφαρμογές της. Συγκεκριμένα, εξηγούνται η γεωμετρία λήψης των απεικονίσεων SAR και οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας αλλά και των υπόλοιπων όρων στην αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση. Τέλος, παρουσιάζεται η λειτουργία του ατμοσφαιρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων.

1.1 Βασικά στοιχεία θεωρίας

1.1.1 Συμβολομετρία: ορισμός, μορφές

Η Συμβολομετρία (Interferometry - InSAR) είναι η διαδικασία, με την οποία είναι δυνατόν να εξαχθούν πολύτιμες τρισδιάστατες πληροφορίες για την επιφάνεια του εδάφους. Το πιο διαδεδομένο συμβολομετρικό προϊόν είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) μιας περιοχής, το οποίο υπολογίζεται με τη χρήση πολλαπλών (τουλάχιστον δύο) απεικονίσεων SAR και μέσω μιας διαδικασίας που απαιτεί την εκτέλεση συγκεκριμένων βημάτων επεξεργασίας των εικόνων.

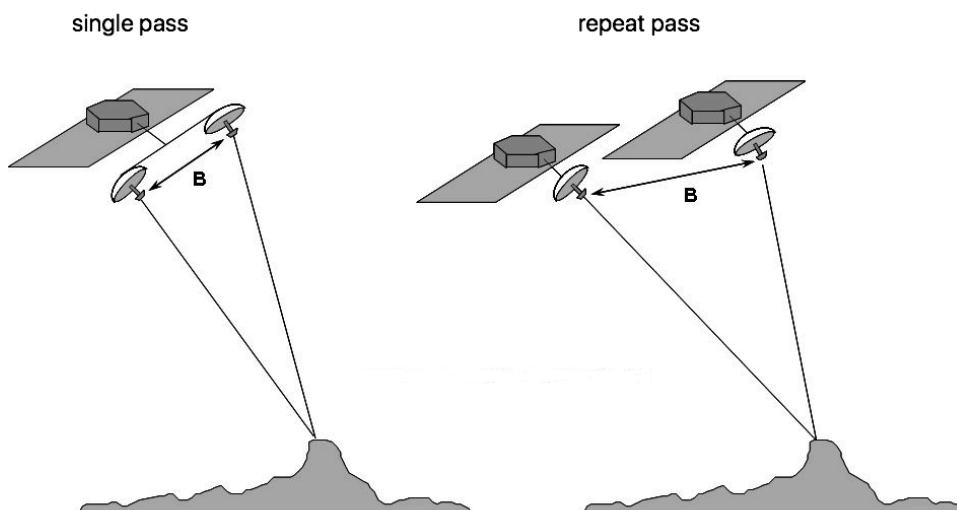
Εκτός, όμως, από την απεικόνιση του τοπογραφικού αναγλύφου, μέσω της συμβολομετρίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διαχρονικής παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας, όπως αυτή προκαλείται από σεισμούς, εκρήξεις ηφαιστειών, ανάταση του εδάφους λόγω τήξης των παγετώνων, καθίζηση του εδάφους λόγω απόλειψης ορυκτών πόρων και άλλων διεργασιών.

Η ακρίβεια ενός ΨΜΕ που έχει προκύψει με την τεχνική της συμβολομετρίας είναι της τάξης των 5m, ενώ για τη χαρτογράφηση της παραμόρφωσης του εδάφους η ακρίβεια μπορεί να γίνει μικρότερη ακόμη και από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε από το radar.

Η βασική ιδέα της συμβολομετρίας είναι η σύγκριση της φάσης δύο ή περισσότερων απεικονίσεων SAR που έχουν ληφθεί για την ίδια περιοχή είτε από σχετικά διαφορετικές θέσεις είτε από την ίδια θέση, αλλά σε διαφορετική χρονική στιγμή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, η συμβολομετρία μπορεί να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Συμβολομετρία μίας διέλευσης (single pass interferometry)
- Επαναληπτική συμβολομετρία (repeat pass interferometry)



Σχήμα 1.1: Μορφές συμβολομετρίας
Πηγή: Veronica Mitchell

Στη συμβολομετρία μίας διέλευσης οι δύο μετρήσεις προέρχονται από δύο radar που είναι εγκατεστημένα στην ίδια δορυφορική πλατφόρμα. Η μία κεραία εκπέμπει μικροκυματική ακτινοβολία και τα επιστρεφόμενο σήμα καταγράφεται ταυτόχρονα και από τις δύο κεραίες. Τα δύο radar μπορεί να είναι τοποθετημένα είτε κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου (along track), είτε κάθετα στη δορυφορική τροχιά (across track).

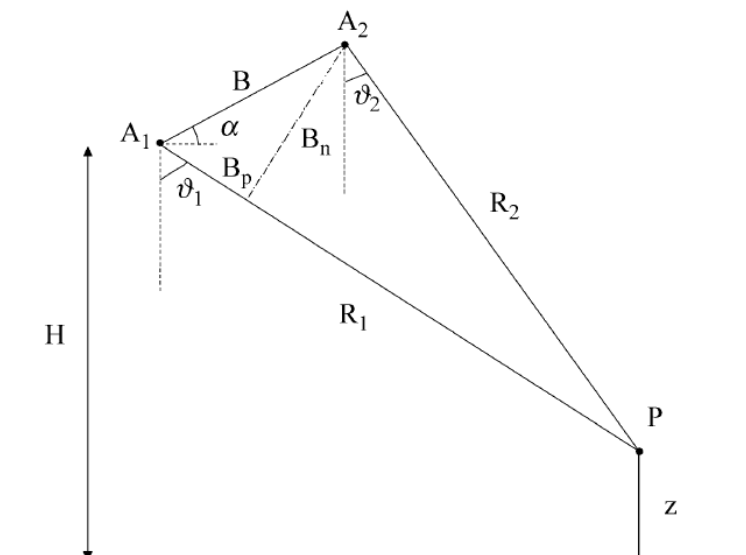
Αντίθετα, στην επαναληπτική συμβολομετρία το ίδιο radar λαμβάνει δύο μετρήσεις που προέρχονται από διαφορετικές, παράλληλες τροχιές λήψης του δορυφόρου. Αυτή είναι και η μορφή της συμβολομετρίας που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό διαχρονικών εδαφικών παραμορφώσεων.

1.1.2 Γεωμετρία λήψης των εικόνων

Η γεωμετρία λήψης μιας απεικόνισης SAR φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

Ο στόχος συμβολίζεται με P , οι κεραίες των δύο SAR βρίσκονται στις θέσεις A_1 και A_2 , οι αποστάσεις της κάθε κεραίας από το στόχο είναι R_1 και R_2 , η απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών ονομάζεται βάση και συμβολίζεται με B , ενώ με B_n και B_p συμβολίζονται η κάθετη και η παράλληλη συνιστώσα της βάσης αντίστοιχα.

Κάθε ρίξει αντιστοιχεί σε μια περιοχή στο έδαφος, η οποία περιέχει ένα μεγάλο αριθμό σκεδαστών. Το σήμα που επιστρέφει σε κάθε δέκτη είναι το άθροισμα όλων των επιστροφών από όλους τους σκεδαστές. Η ενέργεια του επιστρεφόμενου σήματος εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών, από τη χωρική κατανομή τους και από τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη θέση του αισθητήρα SAR. Συνεπώς, αν μια περιοχή παρατηρηθεί από δύο διαφορετικές θέσεις, τότε το επιστρεφόμενο σήμα θα είναι διαφορετικό σε κάθε περίπτωση, λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας λήψης.



Σχήμα 1.2: Γεωμετρία λήψης
Πηγή: Καραμβάσης, 2014

Η σημασία της φάσης πηγάζει από το γεγονός ότι σχετίζεται με την απόσταση δέκτη-στόχου. Η φάση για κάθε στόχο αποτελείται από δύο όρους. Ο πρώτος οφείλεται στην απόσταση δέκτη-στόχου και ο δεύτερος οφείλεται στην καθυστέρηση της μετάδοσης του σήματος λόγω της οπισθοσκέδασης του στόχου. Δίνεται, λοιπόν, από τον ακόλουθο τύπο:

$$\varphi = 2 \frac{2\pi}{\lambda} R + \varphi_{scattering}$$

όπου $2\pi/\lambda$ είναι η χωρική συχνότητα (κυματαριθμός k) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ο παράγοντας R είναι πολλαπλασιασμένος με τον αριθμό 2 λόγω της διπλής διαδρομής του σήματος μέσα από την ατμόσφαιρα.

Όμως, η φάση μιας μεμονωμένης SAR απεικόνισης, δε συνιστά χρήσιμο μέγεθος. Αυτό συμβαίνει διότι έχει τυχαία κατανομή, αφού εξαρτάται από την οπισθοσκέδαση όλων των σκεδαστών της περιοχής.

Ας θεωρήσουμε τη φάση ενός σημείου P από δύο διαφορετικές απεικονίσεις SAR:

$$\varphi_1 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} R_1 + \varphi_{scattering}$$

$$\varphi_2 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{scattering}$$

Υπό την προϋπόθεση ότι η συνάφεια (coherence) μεταξύ των δύο εικόνων που θα αποτελέσουν το συμβολομετρικό ζευγάρι είναι μεγάλη, δηλαδή εφόσον η ανακλαστικότητα της περιοχής δεν έχει αλλάξει δραματικά μεταξύ των δύο στιγμών λήψεων (π.χ. δε μεταβλήθηκε η κατάσταση της βλάστησης), υποτίθεται πως ο παράγοντας της φάσης που οφείλεται στην οπισθοσκέδαση του εδάφους έχει την ίδια τιμή και στις δύο απεικονίσεις.

Συνεπώς, η φάση του συμβολογράμματος, που προκύπτει από την αφαίρεση των φάσεων των δύο απεικονίσεων, είναι συνδεδεμένη μόνο με τη διαφορά αποστάσεων δέκτη-στόχων:

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{scattering} \right) - \left(\frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \varphi_{scattering} \right) \Rightarrow$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{scattering} - \frac{4\pi}{\lambda} R_1 - \varphi_{scattering} \Rightarrow$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R_2 - \frac{4\pi}{\lambda} R_1 \Rightarrow$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \Rightarrow$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$$

1.1.3 Διαφορική Συμβολομετρία

Η Διαφορική Συμβολομετρία (Differential Interferometry - DInSAR) είναι η τεχνική, η οποία εφαρμόζεται για τον εντοπισμό μικρομετακινήσεων της γήινης επιφάνειας, με τη χρήση

απεικονίσεων SAR. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, ενώ υπό ορισμένες αυστηρές συνθήκες δύναται να υπολογιστούν αποτελέσματα με ακρίβεια χιλιοστού. Η μέθοδος στηρίζεται στο χρονικό διαχωρισμό της λήψης των απεικονίσεων, ο οποίος ποικίλει από μερικές μέρες, μήνες μέχρι και μερικά χρόνια, ανάλογα πάντα με το είδος της εφαρμογής.

Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με υδρολογικές, ηφαιστειακές και τεκτονικές διεργασίες. Συνιστά πλέον, μια συνηθισμένη τεχνική για τη μέτρηση σημάτων που αναφέρονται σε παραμορφώσεις μεγάλου εύρους, όπως είναι αυτές που έχουν προκύψει από τεκτονικά επεισόδια και πεδία μετακινήσεων μεταξύ δύο σεισμικών γεγονότων. Βέβαια, ο εντοπισμός παραμορφώσεων μικρότερου εύρους και παραμορφώσεων που αναφέρονται σε μεγαλύτερη έκταση, οι οποίες, για παράδειγμα, έχουν προκύψει λόγω συσσωρευμένης έντασης μεταξύ δύο σεισμικών γεγονότων ή λόγω μετασεισμικής δραστηριότητας, παραμένει δύσκολος λόγω συμβολομετρικής αποσυσχέτισης, λόγω σφαλμάτων στις δορυφορικές τροχιές, και λόγω καθυστέρησης της μετάδοσης του σήματος μέσα από την ατμόσφαιρα [Jolivet et al., 2014].

Τα φαινόμενα που επιδρούν στην αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση, είναι αυτά που περιέχονται στην επόμενη εξίσωση:

$$\varphi = \varphi_{geom} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{orbit} + \varphi_{noise}$$

Στην παρούσα εργασία, στόχος είναι ο υπολογισμός της ατμοσφαιρικής επίδρασης φ_{atm} στη φάση. Εκτός αυτού, τα συμβολογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν διορθώθηκαν από τα τροχιακά σφάλματα φ_{orbit} (βλ. εδάφιο 3.2), ενώ ο θόρυβος φ_{noise} λόγω συμβολομετρικής αποσυσχέτισης (δηλαδή λόγω έλλειψης συνάφειας) θεωρήθηκε αμελητέος για τα σημεία για τα οποία υπάρχουν τιμές στα συμβολογράμματα.

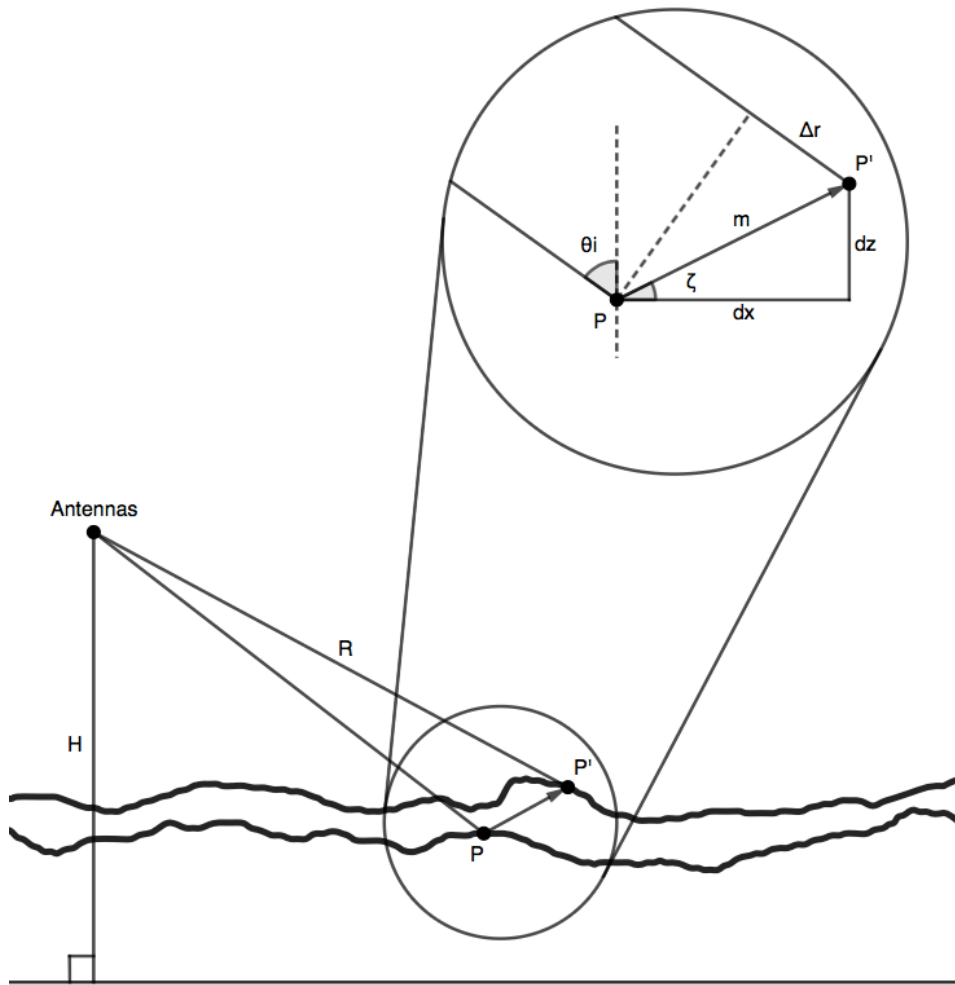
Βέβαια, προς το σκοπό της κατανόησης του ευρύτερου φαινομένου θα γίνει αμέσως μια αναφορά στους δύο πρώτους όρους της προηγούμενης σχέσης.

Αρχικά, για τη διευκόλυνση της ανάλυσης, η μελέτη της διαφοροποίησης της γήινης επιφάνειας θα γίνει με δύο απεικονίσεις που έχουν ληφθεί από το ίδιο σημείο (Σχήμα 1.3).

Έστω ότι η επιφάνεια της γης έχει μετακινηθεί κατά διάνυσμα m στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων. Η απόκτηση, δηλαδή, των απεικονίσεων έχει γίνει από το ίδιο ακριβώς σημείο με τέτοια χρονική υστέρηση ώστε η γήινη επιφάνεια μελέτης να έχει μετακινηθεί κατά διάνυσμα m . Η μετακίνηση της επιφάνειας της γης θα προκαλέσει διαφορά φάσης ίση με:

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

όπου Δr έχει συμβολιστεί, στο Σχήμα 1.3, η προβολή του διανύσματος m στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων.



Σχήμα 1.3: Γεωμετρία διαφορικής συμβολομετρίας

Σύμφωνα με τον ορισμό του ημιτόνου ισχύει: $\sin(\theta_i - \zeta) = \frac{\Delta r}{m} \Rightarrow \Delta r = m \sin(\theta_i - \zeta)$

Συνεπώς: $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} m \sin(\theta_i - \zeta) \Rightarrow m = \frac{\lambda \varphi}{4\pi \sin(\theta_i - \zeta)}$

Η τελευταία σχέση αποδεικνύει πως, πράγματι, η φάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της εδαφικής παραμόρφωσης και, μάλιστα, με ακρίβεια αντίστοιχη του μήκους κύματος.

Η αρχική αυτή υπόθεση (λήψη και των δύο απεικονίσεων από το ίδιο σημείο) βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της πραγματικότητας, όπου οι δύο λήψεις γίνονται από διαφορετικά σημεία.

Όσον αφορά στον όρο φ_{geom} που επιδρά στην αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση, οφείλεται στη γεωμετρία λήψης των εικόνων και μπορεί να διακριθεί στους όρους φ_{flat} και φ_{topo} .

Η ανάλυση, με βάση το Σχήμα 1.2, έχει ως εξής:

Ο νόμος των συνημιτόνων στο τρίγωνο που ορίζεται από τα σημεία A_1 , A_2 , P , δίνει:

$$R_2^2 = R_1^2 + B^2 - 2R_1B \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 + a\right)$$

ή, σύμφωνα με την τριγωνομετρία:

$$R_2^2 = R_1^2 + B^2 - 2R_1B \sin(\theta_1 - a)$$

Υπολογισμοί:

$$\begin{aligned} R_2^2 &= R_1^2 + B^2 - 2R_1B \sin(\theta_1 - a) \Rightarrow \\ R_2^2 - R_1^2 &= B^2 - 2R_1B \sin(\theta_1 - a) \Rightarrow \\ (R_2 - R_1) \cdot (R_2 + R_1) &= B^2 - 2R_1B \sin(\theta_1 - a) \Rightarrow \\ \Delta R \cdot (R_2 + R_1) &= B^2 - 2R_1B \sin(\theta_1 - a) \Rightarrow \\ \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_1)}{-2R_1} &= \frac{B^2}{-2R_1} - \frac{2R_1B \sin(\theta_1 - a)}{-2R_1} \end{aligned}$$

Παραδοχές:

- Οι αποστάσεις R_1 και R_2 είναι της τάξης των 800 km οπότε μπορούν να θεωρηθούν περίπου ίσες (δηλαδή $R_1 + R_2 = 2R$).
- Η απόσταση R είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με τη βάση B οπότε ο όρος $B^2 / 2R$ είναι αμελητέος.

Συνεπώς, η προηγούμενη εξίσωση παίρνει τη μορφή: $\Delta R = B \sin(\theta_1 - a)$

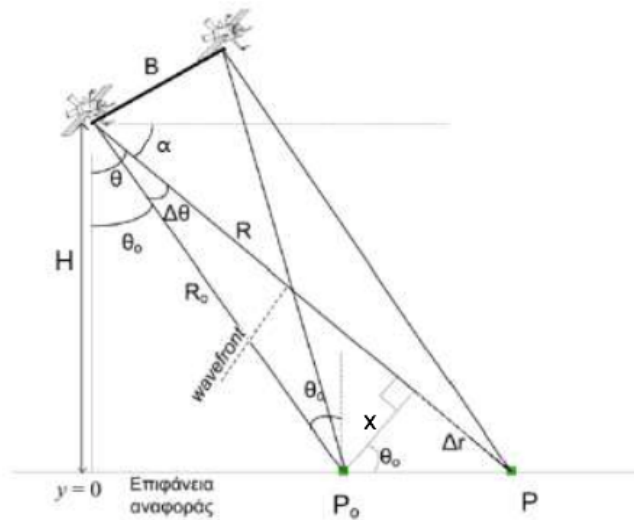
Άρα, η σχέση που περιγράφει τη συμβολομετρική φάση γίνεται: $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_1 - a)$

Επίσης, σύμφωνα με τη γεωμετρία του σχήματος 1.2 ισχύει: $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 + a\right) = \frac{B_p}{B}$

Όπως είδαμε, με βάση την τριγωνομετρία είναι: $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 + a\right) = \sin(\theta_1 - a)$

Άρα: $\sin(\theta_1 - a) = \frac{B_p}{B} \Rightarrow B \sin(\theta_1 - a) = B_p$ και, τελικά: $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} B_p$

Ας θεωρηθούν τώρα δύο σημεία P_0 και P με το ίδιο υψόμετρο ($\Delta h = 0$).



Σχήμα 1.4: Σημεία ίδιου υψομέτρου
Πηγή: Καραμβάσης, 2014

Ποθούμενο είναι η διαφορά φάσης δύο τέτοιων σημείων να ισούται με το μηδέν. Ωστόσο, όπως φαίνεται από την ανάλυση που ακολουθεί, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, λόγω της γεωμετρίας λήψης, δηλαδή, λόγω των διαφορετικών αποστάσεών τους R_0 και R από το δέκτη. Όπως προκύπτει, η διαφορά φάσης τους εκφράζει την επίδραση του παράγοντα της «επίπεδης γης» στη συμβολομετρική φάση. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \varphi_{flat} &= \varphi - \varphi_0 \Rightarrow \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B_p - \frac{4\pi}{\lambda} B_{p_0} \Rightarrow \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} (B_p - B_{p_0}) \Rightarrow \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta - a) - B \sin(\theta_0 - a)] \\ \Rightarrow \varphi_{flat} &= \frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta - a) - \sin(\theta_0 - a)] \Rightarrow \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a)] \end{aligned}$$

Σύμφωνα με την τριγωνομετρία είναι:

$$\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a) = \sin \Delta\theta \cos(\theta_0 - a) + \cos \Delta\theta \sin(\theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a)$$

Επειδή η γωνία $\Delta\theta$ είναι πολύ μικρή παραδεχόμαστε ότι: $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ και $\cos \Delta\theta \approx 1$.

Τότε, η προηγούμενη σχέση γίνεται: $\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a) = \Delta\theta \cos(\theta_0 - a)$

$$\text{Άρα: } \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B \Delta\theta \cos(\theta_0 - a) \Rightarrow \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B_n \Delta\theta$$

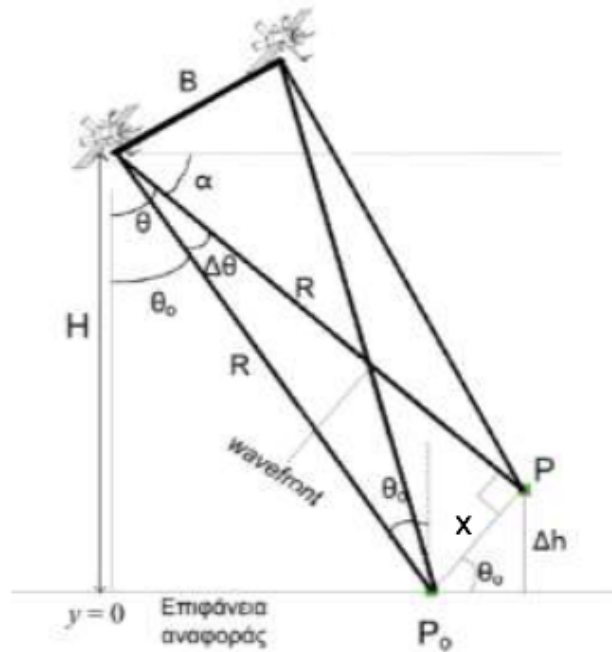
Σύμφωνα με τη γεωμετρία του σχήματος 1.4 έχουμε: $\sin \Delta\theta = \frac{x}{R} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{x}{R} \Rightarrow x = \Delta\theta R$

$$\text{Και: } \tan \theta_0 = \frac{\Delta r}{x} \Rightarrow \tan \theta_0 = \frac{\Delta r}{\Delta\theta R} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{\Delta r}{R \tan \theta_0}$$

Αν, τελικά, αντικαταστήσουμε την τιμή του $\Delta\theta$ στην τελευταία έκφραση της φάσης παίρνουμε:

$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n \Delta r}{R \tan \theta_0}$$

Έστω τώρα δύο σημεία P_0 και P με την ίδια πλάγια απόσταση R αλλά διαφορετικό υψόμετρο ($\Delta h \neq 0$).



Σχήμα 1.5: Σημεία ίδιας πλάγιας απόστασης
Πηγή: Καραμβάσης, 2014

Θα περίμενε κανείς, η διαφορά φάσης δύο τέτοιων σημείων να ισούται με το μηδέν, εφόσον απέχουν ίδια απόσταση R από το δέκτη. Ωστόσο, όπως φαίνεται από την ανάλυση που ακολουθεί, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει. Αντίθετα, η διαφορά φάσης τους εκφράζει την επίδραση του παράγοντα της «τοπογραφίας» στη συμβολομετρική φάση. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \varphi_{topo} &= \varphi - \varphi_0 \Rightarrow \varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} B_p - \frac{4\pi}{\lambda} B_{P_0} \Rightarrow \varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} (B_p - B_{P_0}) \Rightarrow \varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta - a) - B \sin(\theta_0 - a)] \\ &\Rightarrow \varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta - a) - \sin(\theta_0 - a)] \Rightarrow \varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a)] \end{aligned}$$

Σύμφωνα με την τριγωνομετρία είναι:

$$\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a) = \sin \Delta\theta \cos(\theta_0 - a) + \cos \Delta\theta \sin(\theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a)$$

Επειδή η γωνία $\Delta\theta$ είναι πολύ μικρή παραδεχόμαστε ότι: $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ και $\cos \Delta\theta \approx 1$.

Τότε, η προηγούμενη σχέση γίνεται: $\sin(\Delta\theta + \theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a) = \Delta\theta \cos(\theta_0 - a)$

$$\text{Άρα: } \varphi_{\text{τοπο}} = \frac{4\pi}{\lambda} B \Delta\theta \cos(\theta_0 - a) \Rightarrow \varphi_{\text{τοπο}} = \frac{4\pi}{\lambda} B_n \Delta\theta$$

Σύμφωνα με τη γεωμετρία του σχήματος 1.5 έχουμε: $\sin \Delta\theta = \frac{x}{R} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{x}{R} \Rightarrow x = \Delta\theta R$

$$\text{Και: } \sin \theta_0 = \frac{\Delta h}{x} \Rightarrow \sin \theta_0 = \frac{\Delta h}{\Delta\theta R} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{\Delta h}{R \sin \theta_0}$$

Αν, τελικά, αντικαταστήσουμε την τιμή του $\Delta\theta$ στην τελευταία έκφραση της φάσης παίρνουμε:

$$\boxed{\varphi_{\text{τοπο}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n \Delta h}{R \sin \theta_0}}$$

Γίνεται, λοιπόν, σαφές πως για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας απαιτείται προηγουμένως να υπολογιστούν άλλοι όροι/επιδράσεις και να αφαιρεθούν. Αρχικά, για τον υπολογισμό και την αφαίρεση του όρου $\varphi_{\text{geom}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{τοπο}}$ πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ΨΜΕ. Εκτός αυτού, όπως φαίνεται και από τις προηγούμενες εκφράσεις τους, ο ακριβής προσδιορισμός του μήκους και της διεύθυνσης της γραμμής βάσης είναι σημαντικός. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να είναι γνωστή η ακριβής θέση και η τροχιά της πλατφόρμας του radar. Είναι, ακόμη, πολύ σημαντικό ο βαθμός συμφωνίας (coherence) ανάμεσα στις δύο SAR απεικονίσεις να είναι υψηλός. Για παράδειγμα, εποχιακές μεταβολές στη φυτοκάλυψη, που επηρεάζουν τις υψομετρικές τιμές του αναγλύφου μειώνουν το βαθμό συμφωνίας μεταξύ των εικόνων. Φυσικά, οι παράγοντες που θα καθορίσουν την ακρίβεια της διαφορικής συμβολομετρίας δε σταματούν εκεί. Τα μεγαλύτερα σφάλματα της διαδικασίας εισάγονται από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Αυτές οι επιδράσεις συνιστούν το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής και θα αναλυθούν αμέσως.

1.2 Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας

Οι χωροχρονικές μεταβολές της στρωματοποίησης του αέρα εισάγουν σφάλματα στη μετρημένη συμβολομετρική φάση. Τα μικροκύματα, λόγω της αλληλεπίδρασής τους με την ατμόσφαιρα διαθλώνται, σκεδάζονται, επιταχύνονται ή επιβραδύνονται. Ωστόσο, για λόγους απλούστερης και σαφέστερης διατύπωσης, το φαινόμενο αυτό θα καλείται από εδώ και στο εξής «καθυστέρηση φάσης». Είναι σημαντικό να καταγραφεί, πως αυτή η καθυστέρηση της φάσης εξαιτίας της ατμόσφαιρας είναι συχνά τόσο σημαντική (της τάξης των μερικών εκατοστών) που υπερκαλύπτει το σήμα που έχει προκύψει λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους [Hanssen, 2001]. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται τόσο σε ατμοσφαιρικά φαινόμενα που εκτυλίσσονται στην ιονόσφαιρα όσο και στις βαθμίδες διάθλασης της τροπόσφαιρας. Η μελέτη των επιδράσεων της ιονόσφαιρας δε θα εξεταστεί, καθώς ξεπερνά τις προσδοκίες της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά στην τροπόσφαιρα, λοιπόν, η καθυστέρηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται στην επίδραση δύο διαφορετικών, ανεξάρτητων μεταξύ τους συνιστωσών [Doi et al., 2009]. Η πρώτη συνιστώσα προκύπτει εξαιτίας διαταραχών που λαμβάνουν χώρα στην τροπόσφαιρα και τα μοτίβα που μπορούν να την περιγράψουν θεωρείται πως κατανέμονται με τυχαίο τρόπο στο χώρο και στο χρόνο. Για το λόγο αυτό, η επίδρασή της μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση μιας χρονοσειράς SAR εικόνων. Σε κάθε περίπτωση, η ελάττωση της επίδρασης αυτής της συνιστώσας που επηρεάζει τη μέθοδο με ακανόνιστο τρόπο δε θα εξεταστεί στην εργασία αυτή. Η δεύτερη συνιστώσα, που προκαλεί την καθυστέρηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οφείλεται στη στρωματοποίηση της τροπόσφαιρας. Αυτή η μελέτη, λοιπόν, καταπιάνεται με την ανάλυση της επίδρασης της τροπόσφαιρας στα μικροκύματα εξαιτίας της στρωματοποίησής της.

Για τη διόρθωση της καθυστέρησης φάσης έχουν προταθεί τόσο εμπειρικές όσο και προγνωστικές μέθοδοι.

Οι εμπειρικές μέθοδοι αξιολογούν την εξάρτηση της καθυστέρησης της συμβολομετρικής φάσης από το υψόμετρο μέσα σε ξεχωριστά συμβολογράμματα. Πολλές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για το διαχωρισμό της επίδρασης των εναπομεινάντων τροχιακών σφαλμάτων, των τεκτονικών παραμορφώσεων και της στρωματοποιημένης τροποσφαιρικής συνιστώσας, μεταξύ των οποίων, η χρήση *a priori* πληροφορίας από μοντέλα παραμόρφωσης ή η εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της φάσης και της τοπογραφίας του εδάφους σε τοπικό επίπεδο. Δυστυχώς, οι εμπειρικές μέθοδοι δε μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν όταν το σήμα που έχει προκύψει εξαιτίας της παραμόρφωσης σχετίζεται με την τοπογραφία της περιοχής, όπως στην περιοχή ενός ηφαιστείου, ή σε περιοχή μεγάλων ρηγμάτων. Κάποιες φορές, αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί αποσυνθέτοντας τη συμβολομετρική φάση και τη σχετισμένη τοπογραφία σε πολλά χωρικά μήκη κύματος, με σκοπό το διαχωρισμό των διαφορετικών συνεισφορών πριν τον υπολογισμό. Παρ' όλα αυτά, η σχέση που συνάγεται από τη χρήση εμπειρικών μεθόδων μεταξύ της καθυστέρησης φάσης και της τοπογραφίας εξαρτάται από τη χωρική έκταση της κάθε απεικόνισης και, γι' αυτό το λόγο, μερικές φορές ο χρήστης μπορεί να οδηγηθεί σε λανθασμένο υπολογισμό για τη χωρική μεταβολή των στρωμάτων της τροπόσφαιρας. Οι εμπειρικές μέθοδοι είναι χρήσιμες σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όμως, δε μπορούν να γενικευτούν και η εφαρμογή τους θα πρέπει κάθε φορά να αξιολογείται με προσοχή [Jollivet et al., 2014].

Οι προγνωστικές μέθοδοι βασίζονται στην εισαγωγή εξωτερικών δεδομένων, με σκοπό τη δημιουργία συνθετικών χαρτών καθυστέρησης και την άμεση διόρθωση των

τροποσφαιρικών καθυστερήσεων στα συμβολογράμματα. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που χρησιμοποιούν τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα, μετρήσεις GPS, πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες ή/και δεδομένα από τοπικά μετεωρολογικά μοντέλα. Αυτές οι μέθοδοι δεν εφαρμόζονται πάντα με επιτυχία, διότι βασίζονται στη συλλογή εξωτερικών δεδομένων, τα οποία δεν είναι πάντα διαθέσιμα για κάθε SAR απεικόνιση. Μιας και για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων απαιτείται η συνεχής διόρθωση κάθε συμβολογράμματος, η απαίτηση για διαθεσιμότητα ανεξάρτητων μετεωρολογικών δεδομένων εισάγει ένα σημαντικό περιορισμό [Jolivet et al., 2014].

Πρόσφατα, πολλές μελέτες εστίασαν στη χρήση των Παγκόσμιων Ατμοσφαιρικών Μοντέλων (Global Atmospheric Models - GAMs), με σκοπό την πρόβλεψη της καθυστέρησης τη στιγμή της λήψης της SAR εικόνας και τη διόρθωση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Βασισμένα σε παγκόσμια μετεωρολογικά δεδομένα, αυτά τα μοντέλα παρέχουν εκτιμήσεις για ορισμένες ατμοσφαιρικές μεταβλητές, όπως είναι η θερμοκρασία, η μερική πίεση των υδρατμών της ατμόσφαιρας και τα επίπεδα του γεωδυναμικού ύψους της πίεσης σε ένα (τοπικό ή παγκόσμιο) χωρικό δίκτυο, ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

1.3 Η περιγραφή του ατμοσφαιρικού μοντέλου

Παγκόσμια και τοπικά μοντέλα ατμοσφαιρικών δεδομένων παρέχουν εκτιμήσεις για ατμοσφαιρικές μεταβλητές αρκετές στιγμές κάθε μέρα σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το παγκόσμιο ατμοσφαιρικό μοντέλο ERA5 του οργανισμού ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Ο ECMWF είναι ένας ανεξάρτητος διακυβερνητικός οργανισμός που εδρεύει στο Ηνωμένο Βασίλειο και υποστηρίζεται από την πλειοψηφία των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ιδρύθηκε το 1975 όταν αναγνωρίστηκε η επιτακτική ανάγκη να συλλεχθούν τα απαραίτητα επιστημονικά και τεχνικά δεδομένα για την παροχή καιρικών προβλέψεων μεσοπρόθεσμα (για διάστημα περίπου δύο εβδομάδων).

Το ERA5 είναι το πιο καινούριο ατμοσφαιρικό μοντέλο του ECMWF και έρχεται να αντικαταστήσει το ERA-Interim. Η λειτουργία του ξεκίνησε από τον Ιανουάριο του 2016, με το ERA-Interim να είναι προγραμματισμένο να διακόψει τη λειτουργία του τον Αύγουστο του 2019. Παρέχει δεδομένα κάθε μία ώρα (από το 1979 μέχρι σήμερα) για ένα μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων μεταβλητών, 7 μόλις ημέρες μετά τον πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά είναι ελεύθερα για κάθε χρήστη και διαθέσιμα στη διεύθυνση: <https://apps.ecmwf.int/datasets/>. Το μοντέλο προσφέρει τα δεδομένα σε κάναβο 30x30 km, μια χωρική ανάλυση πολύ βελτιωμένη σε σχέση με το ERA-Interim (80x80 km). Επίσης, βελτιωμένη είναι και χρονική διακριτική ικανότητα του ERA5, το οποίο παρέχει δεδομένα κάθε ώρα, σε αντίθεση με το ERA-Interim, που καταγράφει μετρήσεις κάθε 6 ώρες. Στην κατακόρυφη διεύθυνση, το μοντέλο έχει 37 διαφορετικά επίπεδα πίεσης (1000 hPa έως 1 hPa) από την επιφάνεια της θάλασσας ως το ύψος των 80km. Το ERA5 περιέχει, τέλος, πληροφορίες για την αβεβαιότητα της κάθε μεταβλητής με μειωμένη, βέβαια, χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα.

Οι εικόνες SAR του Sentinel-1A που χρησιμοποιήθηκαν (Interferometric Wide Swath mode - 250 km) έχουν χωρική διακριτική ικανότητα 20 x 5 m. Προφανώς, η χωρική ανάλυση του ERA5 είναι πολύ χειρότερη και, γι' αυτό το λόγο, το ατμοσφαιρικό μοντέλο ίσως να μην μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά την επίδραση των διαταραχών μικρής κλίμακας. Όμως, μιας και χρησιμοποιήθηκε και το SRTM, το οποίο έχει χωρική ανάλυση 30 x 30 m, το ατμοσφαιρικό μοντέλο πιθανότατα θα υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια την επίδραση της στρωματοποίησης της τροπόσφαιρας, η οποία είναι σημαντικά συσχετισμένη με την τοπογραφία (Hanssen, 2001).

Για να υπολογιστεί η καθυστέρηση της φάσης του σήματος καθώς αυτό περνά μέσα από την ατμόσφαιρα, πρέπει πρωτίστως να οριστεί το μέτρο διαθλαστικότητας N του αέρα. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως εξής [Doin et al., 2009]:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} + k_4 W_{cl} + k_5 \frac{ne}{f^2}$$

όπου P_d είναι η μερική πίεση της ξηρής συνιστώσας του αέρα, e είναι η πίεση των υδρατμών, T είναι η θερμοκρασία (σε Kelvin), W_{cl} είναι το περιεχόμενο στα σύννεφα νερό (σε kg/m^3), ne είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα και f είναι η συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην επίδραση του ξηρού αέρα στη διάθλαση, ο δεύτερος και ο τρίτος όρος σχετίζονται με την υγρασία του αέρα, ο τέταρτος οφείλεται στο νερό που

βρίσκεται αποθηκευμένο στα σύννεφα σε υγρή μορφή και ο πέμπτος όρος εκφράζει τη σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την επίδραση της ιονόσφαιρας.

Οι σταθερές της παραπάνω εξίσωσης είναι εμπειρικές και έχουν υπολογιστεί [Smith and Weintraub, 1953] και χρησιμοποιούνται ως εξής:

$k_1 = 0.776 \text{ K Pa}^{-1}$	$k_2 = 0.716 \text{ K Pa}^{-1}$	$k_3 = 3.75 \times 10^3 \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-1}$
$k_4 = 1.45 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$		$k_5 = -4.03 \times 10^7 \text{ s}^{-2} \text{ m}^3$

Για την πίεση και τη θερμοκρασία του ξηρού αέρα μπορεί να θεωρηθεί πως στρωματοποιούνται σε κατακόρυφα επίπεδα και, γι' αυτό το λόγο, οδηγούν σε μεγάλες καθυστερήσεις της φάσης, οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το υψόμετρο μέσα στην εικόνα radar. Αντίθετα, οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας παρουσιάζουν αλλαγές τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια ακόμη και σε μικρές αποστάσεις και έτσι, οδηγούν σε τυχαία μοτίβα όσον αφορά στην καθυστέρηση της φάσης. Τέλος, η καθυστέρηση που οφείλεται στα σύννεφα αντιστοιχεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, σε μόλις ένα περίπου χιλιοστό μεγαλύτερο μήκος στη διαδρομή του σήματος [Doin et al., 2009].

Εστιάζοντας, λοιπόν, μόνο στην υδροστατική και στην υγρή συνιστώσα, μιας και η ποσότητα του νερού στα σύννεφα είναι, συνήθως, αμελητέα (εκτός αν υπάρχει κορεσμός στην ατμόσφαιρα) και η επίδραση της ιονόσφαιρας στο κανάλι C ($\lambda=5\text{cm}$) είναι ελάχιστη καταλήγουμε στην εξής σχέση [Jolivet et al. 2014]:

$$N = \underbrace{k_1 \frac{P_d}{T}}_{hydr} + \underbrace{k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}}_{wet}$$

όπου P_d είναι η μερική πίεση της ξηρής συνιστώσας του αέρα, e είναι η πίεση των υδρατμών και T είναι η θερμοκρασία (σε Kelvin).

Οι σταθερές της παραπάνω εξίσωσης χρησιμοποιούνται όπως ορίστηκαν προηγουμένως:

$k_1 = 0.776 \text{ K Pa}^{-1}$	$k_2 = 0.716 \text{ K Pa}^{-1}$	$k_3 = 3.75 \times 10^3 \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-1}$
---------------------------------	---------------------------------	--

Συνεπώς, για την επίδραση της στρωματοποίησης της τροπόσφαιρας στη μέτρηση της συμβολομετρικής φάσης γίνεται η θεώρηση ότι αυτή καθορίζεται από δύο, κυρίως, συνιστώσες:

- Υδροστατική συνιστώσα (hydrostatic or dry delay)

Η συμβολομετρική φάση επηρεάζεται από την καθυστέρηση που οφείλεται στην υδροστατική πίεση της τροπόσφαιρας και στη σχέση αυτής με τη θερμοκρασία. Η υδροστατική πίεση της τροπόσφαιρας μεταβάλλεται ραγδαία από σημείο σε σημείο στα χαμηλά υψόμετρα και η προσπάθεια μείωσης της επίδρασής της δε μπορεί να παραληφθεί.

• Υγρή συνιστώσα (wet delay)

Η συμβολομετρική φάση επηρεάζεται, επίσης, από την καθυστέρηση που οφείλεται στην υγρασία της τροπόσφαιρας, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια των στόχων.

Η συνολική καθυστέρηση $\delta L_{LOS}^{total}(z,t)$ του σήματος στη γραμμή όρασης για μονή διαδρομή εξαιτίας της τροπόσφαιρας, προκύπτει από το ολοκλήρωμα του μέτρου διαθλαστικότητας N του αέρα ανάμεσα στο υψόμετρο z του εδάφους και σε ένα υψόμετρο αναφοράς z_{ref} πάνω από το οποίο οι χωροχρονικές μεταβολές του N είναι αμελητέες. Η συνολική καθυστέρηση αποτελείται από την υδροστατική $\delta L_{LOS}^{dry}(z)$ και από την υγρή $\delta L_{LOS}^{wet}(z)$ συνιστώσα. Για ένα χρόνο t και για ένα pixel σε υψόμετρο z από το έδαφος ισχύουν [Jolivet et al. 2014]:

$$\delta L_{LOS}^{total}(z,t) = \delta L_{LOS}^{dry}(z,t) + \delta L_{LOS}^{wet}(z,t)$$

$$\delta L_{LOS}^{dry}(z,t) = \frac{10^{-6}}{\cos(\theta)} \frac{k_1 R_d}{g_m} [P(z,t) - P(z_0,t)]$$

$$\delta L_{LOS}^{wet}(z,t) = \frac{10^{-6}}{\cos(\theta)} \int_z^{z_{ref}} \left[\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e(z,t)}{T(z,t)} + k_3 \frac{e(z,t)}{T(z,t)^2} \right] dz$$

όπου θ είναι η τοπική γωνία πρόσπτωσης, $P=P_d+e$ είναι η συνολική πίεση και g_m είναι το μέτρο της τοπικής βαρύτητας στη μέση της απόστασης μεταξύ των z και z_{ref} .

Οι δύο σταθερές των αερίων για ξηρό αέρα και υδρατμούς αντίστοιχα έχουν υπολογιστεί [Saastamoinen, 1972] και χρησιμοποιούνται ως εξής:

$R_d = 287.05 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$	$R_v = 461.495 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$
--	---

Συνεπώς, έχοντας ως δεδομένα τα κατακόρυφα προφίλ για τη θερμοκρασία, την πίεση και τη μερική πίεση των υδρατμών, μέσω της πρώτης εξίσωσης μπορεί να υπολογιστεί η απόλυτη καθυστέρηση φάσης για δύο λήψεις σε δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 και ύστερα, να υπολογιστεί η συνολική (total) συμβολομετρική καθυστέρηση φάσης ως εξής [Jolivet et al. 2014]:

$$\delta L_{LOS}^{t_1-t_2}(z) = \delta L_{LOS}^s(z,t_2) - \delta L_{LOS}^s(z,t_1)$$

Κεφάλαιο 2 - Προηγούμενες μελέτες

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται περιληπτικά δύο προηγούμενες μελέτες που καταπιάνονται με τον υπολογισμό και τη μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, τόσο με εμπειρικό τρόπο (σχέση καθυστέρησης φάσης/υψομέτρου), όσο και με χρήση παγκόσμιων ατμοσφαιρικών μοντέλων.

2.1 Η εργασία των [Doin et al., 2009]

Το 2009, δημοσιεύτηκε στο έγκριτο επιστημονικό περιοδικό Journal of Applied Geophysics η εργασία των M.-P. Doin, C. Lasserre, G. Peltzer, C. Doubre με τίτλο “Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models”. Στην εργασία αυτή, οι προσπάθειες εστιάστηκαν στη σύγκριση των τροποσφαιρικών διορθώσεων με εμπειρικές μεθόδους, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ατμοσφαιρικά μοντέλα.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποίησαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τους είναι αυτό που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο:

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

Σημείωση: Όλες οι παράμετροι του μοντέλου έχουν αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο.

Επίσης, στην εργασία τους ορίζεται και η μέση αναλογία (average ratio) S, μεταξύ της καθυστέρησης φάσης και του υψόμετρου/τοπογραφίας ανάμεσα στο ελάχιστο και στο μέγιστο υψόμετρο της εικόνας SAR ως:

$$S = \frac{\delta L_{LOS}^S(z_{max}) - \delta L_{LOS}^S(z_{min})}{z_{max} - z_{min}}$$

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα που χρησιμοποίησαν ήταν τα ERA40 και OPERA του οργανισμού ECMWF και το NARR (North American Regional Reanalysis) του NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research).

Το ERA40 καλύπτει τη χρονική περίοδο 1961-2001 παρέχοντας δεδομένα 4 φορές τη μέρα με χωρική διακριτική ικανότητα 1.125°. Περιλαμβάνει 23 διαφορετικά επίπεδα πίεσης. Τα δεδομένα του OPERA χρησιμοποιήθηκαν μετά το 2001, όταν το ERA40 δεν ήταν διαθέσιμο. Το μοντέλο OPERA έχει ίδια χρονική και χωρική διακριτική ικανότητα και περιλαμβάνει 21 επίπεδα πίεσης. Το NARR περιορίζεται στις περιοχές της Βόρειας και της Κεντρικής Αμερικής, με μέγεθος κανάβου 32km, ενώ καλύπτει τη χρονική περίοδο από το 1979 μέχρι σήμερα, παρέχοντας δεδομένα 8 φορές τη μέρα. Περιλαμβάνει 29 διαφορετικά επίπεδα πίεσης, με σχετικά πυκνή στρωματοποίηση στα χαμηλότερα υψόμετρα.

Από τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου (inputs) η θερμοκρασία (temperature), η υγρασία (specific humidity), το γεωδυναμικό ύψος (geopotential height) και οι υδρατμοί (total column water vapor).

Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή μελετήθηκαν τρεις περιοχές για να συγκριθούν η τροποσφαιρική καθυστέρηση που φαίνεται στα συμβολογράμματα με την πρόβλεψη που δίνουν τα ατμοσφαιρικά μοντέλα: η λίμνη Mead στην Νεβάδα των Η.Π.Α., η περιοχή Haiyuan στην Κίνα και η περιοχή Afar στο Τζιμπουτί. Αυτές οι περιοχές επιλέχθηκαν, διότι διαφέρουν τόσο σε επίπεδο τοπογραφίας και κλίματος, όσο και σε επίπεδο εδαφικών παραμορφώσεων [Doin et al., 2009].

Για τη λίμνη Mead, χρησιμοποιήθηκαν 53 εικόνες από τους δορυφόρους ERS-1 και ERS-2 της ESA, για την περίοδο 1992-2007 και 26 εικόνες από το δορυφόρο ENVISAT της ESA, για την περίοδο 2003-2007. Με τα δεδομένα αυτά, οι [Doin et al., 2009] σχημάτισαν 413 διαφορετικά συμβολογράμματα με κάθετες βάσεις μικρότερες των 300m. Το υψόμετρο της περιοχής αυτής κυμαίνεται μεταξύ 300m-2000m. Σε πολλά συμβολογράμματα που διορθώθηκαν από τα εναπομείναντα τροχιακά σφάλματα, η καθυστέρηση της φάσης και το υψόμετρο είχαν μια ισχυρά γραμμική σχέση μεταξύ τους. Για όλα τα συμβολογράμματα, υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης r μεταξύ καθυστέρησης φάσης και τοπογραφίας. Από το μοντέλο NARR εξάχθηκαν οι μεταβλητές: θερμοκρασία (temperature), υγρασία (specific humidity), πίεση (specific pressure), υδρατμοί (total column water vapor). Το εύρος (peak to peak) της επίδρασης της υδροστατικής συνιστώσας φτάνει τα 3.7cm, νούμερο που ξεπερνά το σήμα της παραμόρφωσης, άρα σε καμία περίπτωση δε μπορεί να παραβλεφθεί. Το εύρος της επίδρασης της υγρής συνιστώσας φτάνει περίπου τα 7.0cm, όμως μιας και οι δύο αυτές συνιστώσες έχουν συχνά αντίθετες φάσεις, αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα το εύρος της συνολικής καθυστέρησης να είναι περίπου 3.4cm.

Για την περιοχή Haiyuan, πρέπει αρχικά να αναφερθεί πως, λόγω του ρήγματος που υπάρχει εκεί, η περιοχή μετακινείται περίπου 4.5-8.5mm/yr. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 24 εικόνες για το σχηματισμό 25 συμβολογραμμάτων. Στα περισσότερα συμβολογράμματα ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και του υψομέτρου είναι μεγαλύτερος του 0.8. Το εύρος της επίδρασης της υδροστατικής συνιστώσας φτάνει τα 3.3cm, ενώ της υγρής φτάνει τα 6.0cm. Βέβαια, και σε αυτήν την περίπτωση οι δύο συνιστώσες έχουν συχνά αντίθετες φάσεις, με αποτέλεσμα, σχεδόν να αλληλοαναιρούνται.

Για την περιοχή Afar, παρατηρούνται παραμορφώσεις της τάξης των 15-17mm/yr, λόγω της κίνησης των τεκτονικών πλακών. Χρησιμοποιήθηκαν 91 εικόνες, και 427 συμβολογράμματα. Το εύρος της επίδρασης της υδροστατικής συνιστώσας φτάνει μόλις τα 1.5cm, ενώ της υγρής φτάνει τα 3.8cm. Η συνολική καθυστέρηση είναι περίπου 4.2cm και είναι μεγαλύτερη από την καθυστέρηση που παρατηρήθηκε στις δύο προηγούμενες περιοχές.

Στην εργασία αυτή, η σύγκριση των δύο μεθόδων δείχνει μεγάλη συμφωνία. Με άλλα λόγια, τόσο η παρατηρούμενη αναλογία φάσης/υψομέτρου στα συμβολογράμματα, όσο και η προβλεπόμενη από τα μοντέλα αναλογία παρουσιάζουν περίπου την ίδια συμπεριφορά και μεταβλητότητα. Συνεπώς, οι [Doin et al., 2009] καταλήγουν στο συμπέρασμα, πως η διόρθωση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης του σήματος δύναται να εφαρμοστεί, είτε με τον έναν (σχέση φάσης/υψομέτρου) είτε με τον άλλον (ατμοσφαιρικό μοντέλο) τρόπο. Ίσως, κάποιες φορές η αναλογία που δίνει η σχέση φάσης/υψομέτρου να είναι ακριβέστερη, όμως, σε περίπτωση που στην περιοχή μελέτης η τοπογραφία είναι ισχυρά συσχετισμένη με την εδαφική παραμόρφωση (π.χ. ηφαίστια, ρήγματα κ.λπ.), μόνο τα ατμοσφαιρικά μοντέλα μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

2.2 Η εργασία των [Jolivet et al., 2014]

Το 2014, ίσως σε συνέχεια και προς το σκοπό της ενίσχυσης της προηγούμενης εργασίας που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 2.1, δημοσιεύτηκε στο επιστημονικό περιοδικό *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* η εργασία των Jolivet R., Agram P.S., Lin N.Y., Simons M., Doin M.P., Peltzer G., Li Z., με τίτλο *“Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models”*. Στην εργασία αυτή, υπολογίζεται η καθυστέρηση που προκαλεί στο σήμα η στρωματοποίηση της τροπόσφαιρας μέσω παγκόσμιων ατμοσφαιρικών μοντέλων και συγκρίνεται με παρατηρήσεις του δέκτη MERIS (Medium-Resolution Imaging Spectrometer). Ο δέκτης αυτός είναι ένα παθητικό πολυφασματικό όργανο, που καταγράφει ακτινοβολία σε 15 κανάλια (395nm-900nm), είναι ενσωματωμένος στον δορυφόρο Envisat της ESA και έχει λάβει δεδομένα ταυτόχρονα με τη λήψη των απεικονίσεων SAR που χρησιμοποίησαν.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τους είναι αυτό που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο:

$$\delta L_{LOS}^{total}(z,t) = \delta L_{LOS}^{dry}(z,t) + \delta L_{LOS}^{wet}(z,t)$$

Σημείωση: Όλες οι παράμετροι του μοντέλου έχουν αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο.

Οι [Jolivet et al., 2014], χρησιμοποίησαν τρία διαφορετικά ατμοσφαιρικά μοντέλα, το ERA-Interim, το NARR και το MERRA, συγκρίνοντας την απόδοσή τους στην εξέταση των τροποσφαιρικών επιδράσεων σε διαφορετικά γεωγραφικά και τεκτονικά περιβάλλοντα.

Το ERA-Interim ήταν τότε η τελευταία έκδοση του ECMWF, ακολουθώντας το ERA-40. Παρέχει εκτιμήσεις για τη θερμοκρασία (temperature), τη μερική πίεση των υδρατμών (water vapor partial pressure) και το γεωδυναμικό ύψος (geopotential height) για 37 επίπεδα πίεσης σε ένα παγκόσμιο δίκτυο 0.7° στις 0:00, 6:00, 12:00 και 18:00 UTC καθημερινά από το 1989 μέχρι σήμερα. Το NARR είναι ένα τοπικό μοντέλο που παρέχει εκτιμήσεις για τις ίδιες ατμοσφαιρικές μεταβλητές για 29 επίπεδα πίεσης σε μια κωνική προβολή του Lambert στις 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 και 21:00 UTC καθημερινά από το 1979 μέχρι σήμερα. Το MERRA είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο που παρέχει εκτιμήσεις για τις ίδιες ατμοσφαιρικές μεταβλητές για 42 επίπεδα πίεσης σε ένα παγκόσμιο δίκτυο (0.5° μήκος, 0.75° πλάτος) στις 0:00, 6:00, 12:00 και 18:00 UTC καθημερινά από το 1979 μέχρι σήμερα.

Ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιήθηκε το SRTM της USGS. Το υψόμετρο αναφοράς ορίστηκε στα 30km, μιας και αυτό είναι και το ανώτερο σημείο του τελευταίου στρώματος της ατμόσφαιρας, το οποίο έχει μοντελοποιηθεί από το ERA-Interim και από το NARR. Ψηλότερα από το υψόμετρο αυτό οι χωροχρονικές επιδράσεις λόγω της στρωματοποίησης της ατμόσφαιρας θεωρήθηκαν αμελητέες.

Τα συμβολογράμματα που παρουσιάζονται στη μελέτη αυτή έχουν προκύψει από ανεπεξέργαστα δεδομένα μέσω του λογισμικού ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package) και έχουν παραχθεί γεωαναφερμένα προϊόντα με αποκατεστημένη φάση.

Μέσα από τρία διαφορετικά παραδείγματα τονίζεται η ικανότητα πρόγνωσης μεταβολών σε καθυστερήσεις κατά μήκος περιοχών με σχετικά οριζόντιο έδαφος, η δυνατότητα πρόβλεψης καθυστερήσεων που αναφέρονται σε παραμορφώσεις μεγάλου εύρους και οι

βελτιώσεις στις μετρήσεις εδαφικών παραμορφώσεων που οφείλονται σε σεισμική δραστηριότητα.

Μέσω του παραδείγματος της περιοχής της Χιλής, γίνεται σαφές πως οριζόντιες μεταβολές στη στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας που οδηγούν σε αλλαγές στη σχέση φάσης και υψομέτρου, συνήθως, δεν αποδίδονται με εμπειρικές μεθόδους, μπορούν, όμως, να εντοπιστούν με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων. Επιπλέον, υποστηρίζεται πως οι περισσότερες εμπειρικές μέθοδοι δε μπορούν να εντοπίσουν τέτοια μεταβλητότητα πάνω από σχετικά οριζόντιο έδαφος, όπως κατά μήκος μιας ακτογραμμής.

Για την πρόβλεψη καθυστερήσεων που αναφέρονται σε παραμορφώσεις μεγάλου εύρους, οι [Jolivet et al., 2014] μελέτησαν την περιοχή Makran στο Pakistan. Η εκτίμηση τέτοιου είδους παραμορφώσεων με συμβολομετρικά δεδομένα συνιστά μια απαιτητική διαδικασία, λόγω της πολλαπλότητας του θορύβου που υπεισέρχεται στη συμβολομετρική φάση. Τέτοια σήματα, όπως είναι αυτά που παρατηρούνται σε μια ζώνη υποβύθισης, μπορούν να παρερμηνευθούν με σήματα που οφείλονται σε μη ακριβείς δορυφορικές τροχιές, σε ωκεάνια παλιρροϊκά φορτία, στην επίδραση μεγάλων εποχιακών υδρολογικών φορτίων και, φυσικά, σε μεταβολές στη στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας. Ωστόσο, τα ωκεάνια παλιρροϊκά φορτία μπορούν να μοντελοποιηθούν και να αφαιρεθούν. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται μοντέλα για την πρόβλεψη της επίδρασης των εποχιακών υδρολογικών φορτίων στις ηπείρους. Ως συνέπεια αυτού, χρησιμοποιώντας εξωτερικά δεδομένα για τον περιορισμό των υπολειπόμενων τροχιακών σφαλμάτων, με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων ο χρήστης θα μπορεί να ξεχωρίσει τα ατμοσφαιρικά σήματα από τα σήματα που έχουν προκύψει εξαιτίας παραμορφώσεων.

Συχνά, σε περίπτωση σεισμού, η εδαφική παραμόρφωση είναι τόσο μεγάλη που υπερκαλύπτει το ατμοσφαιρικό σήμα. Στην εργασία τους μελετήθηκε η περίπτωση του σεισμού Tararaca. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συμβολογράμματα που, αρχικά, είχαν αρκετές διαφορές. Μετά τη διόρθωση από τις επιδράσεις της στρωματοποιημένης τροποσφαιρικής συνιστώσας, μέσω του μοντέλου ERA-Interim, φαίνεται, πως πράγματι, τα συμβολογράμματα έχουν πλέον ελάχιστες διαφορές.

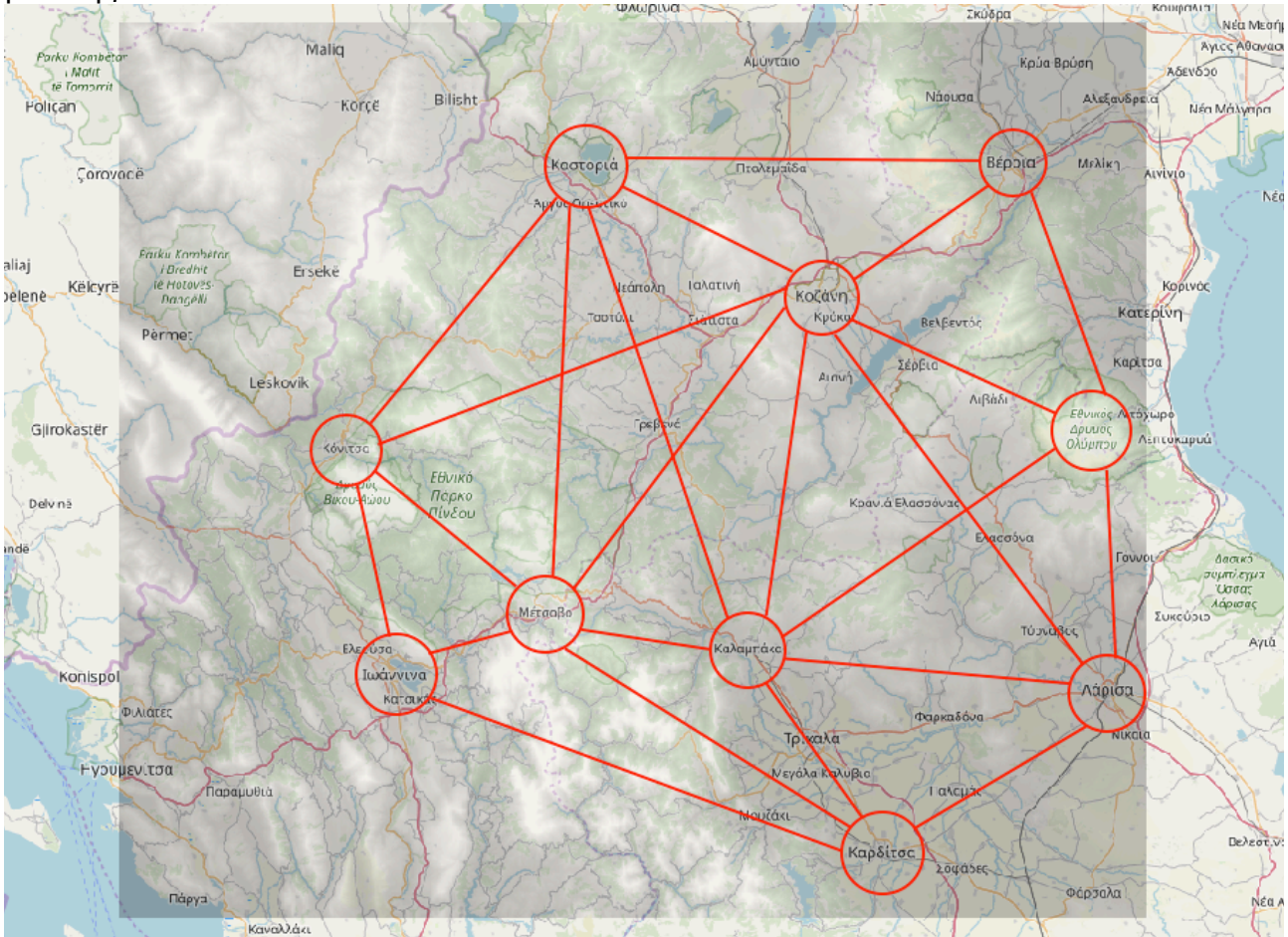
Οι [Jolivet et al., 2014] καταλήγουν στο συμπέρασμα πως, όταν η σχέση μεταξύ καθυστέρησης φάσης και υψομέτρου είναι απλή (π.χ. γραμμική), τότε οι εμπειρικές μέθοδοι διόρθωσης πιθανόν να αποδειχθούν χρήσιμες. Όταν, όμως, η παραμόρφωση είναι ισχυρά συσχετισμένη με την τοπογραφία (π.χ. ηφαίστεια, ρήγματα), τότε η χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων είναι αναγκαία. Φυσικά, αναφέρουν πως πιο άμεσες μέθοδοι διόρθωσης, όπως μέσω παρατηρήσεων GPS ή μέσω συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων, μπορούν και πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν τέτοια δεδομένα είναι διαθέσιμα. Βέβαια, τα παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε SAR απεικόνιση, ειδικά όταν δεν υπάρχουν εξωτερικά δεδομένα. Τελικά, στην εργασία τους επιβεβαιώνουν τη λειτουργικότητα της χρήσης των ατμοσφαιρικών μοντέλων για τη διόρθωση των συμβολογραμμάτων από τις τροποσφαιρικές καθυστερήσεις. Μέσω των παραδειγμάτων, τονίζεται η προοπτική αυτής της προσέγγισης για μια αυτόματη, συστηματική πρόβλεψη της τροποσφαιρικής καθυστέρησης στη συμβολομετρία SAR και προτείνεται αυτές οι διορθώσεις να γίνουν συστηματική διαδικασία στην επεξεργασία των SAR δεδομένων.

Κεφάλαιο 3 - Περιοχή μελέτης και προεπεξεργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά τόσο στην περιοχή μελέτης, όσο και στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) και στα συμβολογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διόρθωσης των τροχιακών σφαλμάτων.

3.1 Περιοχή μελέτης, ΨΜΕ και συμβολογράμματα

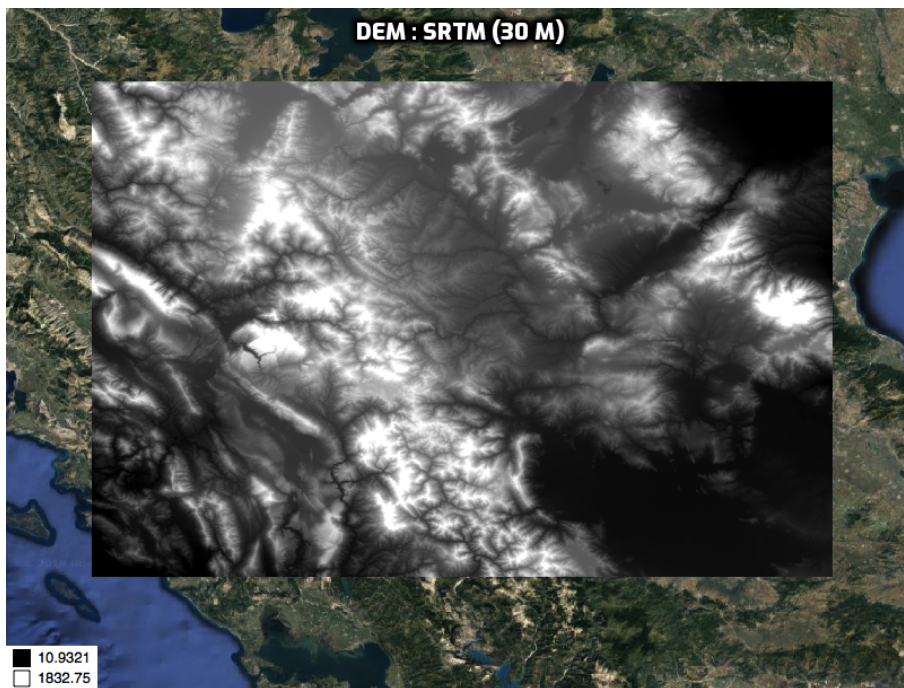
Η περιοχή μελέτης είναι αυτή που οριοθετείται από τη γραμμοσκιασμένη περιοχή που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Καλύπτει ένα σημαντικό μέρος της ελληνικής επικράτειας, από το ύψος της Καρδίτσας στα νότια, μέχρι το ύψος της Καστοριάς στα βόρεια. Περιέχει τόσο περιοχές με ήπιο ανάγλυφο (π.χ. βορειο-ανατολικό τμήμα) όσο και μεγάλους ορεινούς όγκους με έντονο ανάγλυφο (π.χ. Όλυμπος, Πίνδος). Με κόκκινο χρώμα έχουν σημειωθεί 10 «κεντρικοί» μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 3.1: Η περιοχή μελέτης

Το ΨΜΕ (Εικόνα 3.2) που χρησιμοποιήθηκε είναι το SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) της USGS (United States Geological Survey), το οποίο έχει προκύψει από συμβολομετρία radar. Τα δεδομένα για την παραγωγή του προέρχονται από μια αποστολή, στην οποία συνεργάστηκαν η NASA (National Aeronautics and Space Administration) και η NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). Το μοντέλο καλύπτει σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια της γης (εκτός από τους πόλους) με χωρική διακριτική ικανότητα 30x30m.

Για την αυτόματη απόκτηση των δεδομένων του ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε το script “Download_SRTM.py”, μέσω του οποίου λήφθηκαν (def “Download_SRTM_tiles”) και ενώθηκαν (def “Merge_DEM_files”) μόνο τα απαραίτητα «κομμάτια» του ΨΜΕ σύμφωνα με τις συντεταγμένες της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, η χωρική ανάλυση (30x30m) του μοντέλου προσαρμόστηκε (def “Resample_DEM”), με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής, ώστε να συμφωνεί με την ανάλυση των συμβολογραμμάτων (20x5m).



Εικόνα 3.2: Το ΨΜΕ

Για την εκπόνηση της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκαν, συμβολογράμματα αποκατεστημένης φάσης (FRAME: 080OD_05003_131312), τα οποία λήφθηκαν από τη διεύθυνση: <https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>

Η πλατφόρμα COMET (Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics) αξιοποιεί δορυφορικά δεδομένα και με τη χρήση επίγειων παρατηρήσεων και γεωφυσικών μοντέλων μελετά σεισμούς και ηφαιστεια και βοηθά στην κατανόηση του κινδύνου που αυτά τα φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν. Συγκεκριμένα, το project LiCS (Looking inside the Continents from Space) χρησιμοποιεί δεδομένα από τους δορυφόρους της αποστολής Sentinel-1 για να περιγράψει την παραμόρφωση των ηπείρων, τη συσσώρευση της έντασης μεταξύ σεισμικών γενότων, την κατανομή των φυσικών κινδύνων κ.α.. Πιο συγκεκριμένα, οι εικόνες SAR που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συμβολογραμμάτων από τη LiCS έχουν ληφθεί από το δορυφόρο Sentinel-1A της ESA (European Space Agency), τον πρώτο δορυφόρο του προγράμματος Copernicus. Αυτή η διαστημική αποστολή αποτελείται από δύο δορυφόρους (Sentinel-1A και Sentinel-1B), που μεταφέρουν ένα σύστημα SAR που λειτουργεί στο κανάλι C και καταγράφει τη μικροκυματική ακτινοβολία ανεξαρτήτως καιρού, ημέρα και νύχτα.

Για την εργασία αυτή αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν 3 συμβολογράμματα, τα οποία έχουν παραχθεί από 3 διαφορετικές ημερομηνίες λήψης και έχουν συνδυαστεί ανά ζεύγη. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τόσο οι ημερομηνίες λήψης των δορυφορικών εικόνων όσο και οι συνδυασμοί τους για την παραγωγή των συμβολογραμμάτων.

Πίνακας 3.1: Εικόνες και Συμβολογράμματα

	Εικόνες		Συμβολογράμματα
A	20180111	AB	20180111-20180117
B	20180117	BΓ	20180117-20180204
Γ	20180204	AΓ	20180111-20180204

Οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων δεν επιλέχθηκαν τυχαία. Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται εγκατεστημένοι 10 «μεγάλοι» μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπίου Αθηνών (ΕΑΑ). Πρόκειται για τους σταθμούς που φαίνονται με επισήμανση (κόκκινοι κύκλοι) στην Εικόνα 3.1, οι οποίοι περιέχονται και στον επόμενο πίνακα. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει την ημερήσια βροχόπτωση (σε mm) για τις ημερομηνίες λήψης των εικόνων. Τα δεδομένα προέρχονται από την υπηρεσία: <http://meteosearch.meteo.gr>

Η υπηρεσία αυτή έχει ως σκοπό την παροχή των μετρήσεων του δικτύου αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του ΕΑΑ στο κοινό. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 428 σταθμούς σε όλη τη χώρα με συνεχή επέκταση. Το δίκτυο αυτόματων σταθμών του ΕΑΑ αποτελείται από σταθμούς τύπου Davis, οι οποίοι μετρούν όλες τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, δηλαδή πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, διεύθυνση και ένταση του ανέμου. Ορισμένοι σταθμοί καταγράφουν επίσης την ηλιακή και υπεριώδη ακτινοβολία. Όλες οι καταγραφές (ανά 10 λεπτά) συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από το ΕΑΑ και αφού περάσουν από ποιοτικό έλεγχο, αρχειοθετούνται για μελλοντική χρήση.

Πίνακας 3.2: Ημερήσια βροχόπτωση (mm)

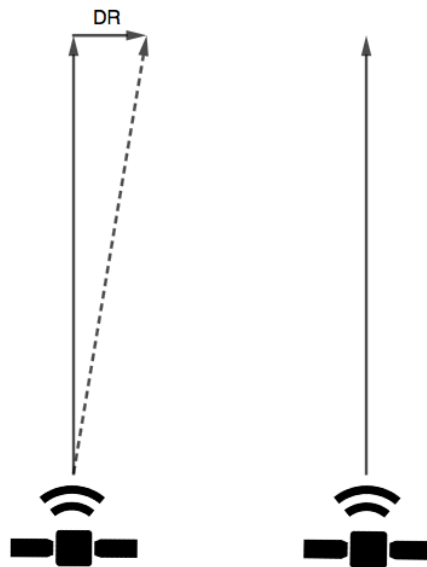
Ημερομηνία	Ιωάννινα	Μέτσοβο	Κόνιτσα	Καστοριά	Κοζάνη
20180111	0,8	0,0	0,8	0,0	0,2
20180117	16,0	24,6	9,0	1,2	6,2
20180204	43,4	62,2	28,4	21,4	16,4
	Βέροια	Όλυμπος	Καλαμπάκα	Λάρισα	Καρδίτσα
20180111	0,0	0,0	0,0	0,4	1,8
20180117	0,8	5,2	1,4	0,0	4,6
20180204	3,2	6,8	20,4	2,0	7,4

Φαίνεται, λοιπόν, πως έχει αποφασιστεί να μελετηθεί μια περίοδος κατά την οποία οι βροχοπτώσεις είναι αρκετές. Οι τόσο διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταξύ των λήψεων θα προκαλέσουν σημαντικές επιδράσεις στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτές οι επιδράσεις θα εξεταστούν και θα μετρηθούν.

3.2 Διόρθωση τροχιακών σφαλμάτων

Όπως θα έχει ήδη γίνει σαφές, η διαφορική συμβολομετρία και, συγκεκριμένα, οι εφαρμογές της που αποσκοπούν στον εντοπισμό και στην παρακολούθηση μικρομετακινήσεων της επιφάνειας της γης απαιτούν πολύ υψηλή ακρίβεια. Ο τηλεπισκοπικός δέκτης radar, το έδαφος και το μέσο διάδοσης της ηλεκτομαγνητικής ακτινοβολίας δημιουργούν ένα σύνθετο σύστημα παρατήρησης. Μέσα σε αυτό το σύστημα υπάρχουν πολλές πηγές σφαλμάτων, όπως είναι οι μη ακριβείς δορυφορικές τροχιές, η χρονική και η χωρική αποσυσχέτιση μεταξύ των εικόνων του συμβολομετρικού ζευγαριού και, φυσικά, η ατμόσφαιρα. Όσον αφορά στις τροχιές, τα σφάλματα προκύπτουν από την αβεβαιότητα με την οποία υπολογίζονται τα διανύσματα θέσης (state vectors) των δορυφόρων. Τα διανύσματα αυτά δίνουν τη θέση και την ταχύτητα των δορυφόρων για μια χρονική στιγμή t . Θεωρητικά, η ακρίβεια αυτών των δεδομένων μπορεί να φτάσει από μερικά εκατοστά ακόμη και σε επίπεδο χιλιοστού [Xin Tian et al., 2018].

Σύμφωνα με τον [Carrasco, 1998], το σημαντικότερο τροχιακό σφάλμα προκύπτει από το σφάλμα στη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων. Είναι καθοριστικό να μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή DR (Σχήμα 3.1) όταν ένας από τους δύο δορυφόρους αποκλίνει από την παράλληλη τροχιά, μιας και μία απόκλιση της τάξης του μήκους κύματος (π.χ. 3.95 cm) είναι πιθανό να προκαλέσει την εμφάνιση επιπλέον κροσσών συμβολής, οι οποίοι θα αποτελούν θόρυβο.



Σχήμα 3.1: Τροχιακό σφάλμα

Στη συνέχεια, η απόκλιση αυτή μπορεί από τη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων να μετασχηματιστεί σε διαφορά φάσης με την απλή σχέση:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} DR$$

Τα τροχιακά σφάλματα προσθέτουν επιπλέον κροσσούς συμβολής στα συμβολογράμματα, οι οποίοι πρέπει, φυσικά, να αφαιρεθούν. Το σφάλμα αυτό αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως *phase ramp* και η διαδικασία αφαίρεσής του καλείται *deramping*. Μια απλή μέθοδος είναι η χρήση ενός μοντέλου ελαχίστων τετραγώνων, μέσω του οποίου αφαιρείται το σφάλμα αυτό σε κάθε συμβολόγραμμα ξεχωριστά.

Είναι, λοιπόν, σαφές πως η πιο συνηθισμένη μέθοδος διόρθωσης των τροχιακών σφαλμάτων είναι η «αφαίρεση επιπέδου» (*surface fitting*) με γραμμικά ή τετραγωνικά μοντέλα. Η γενική μορφή αυτών των μοντέλων είναι η εξής:

$$z = P_1x + P_2y + P_3$$

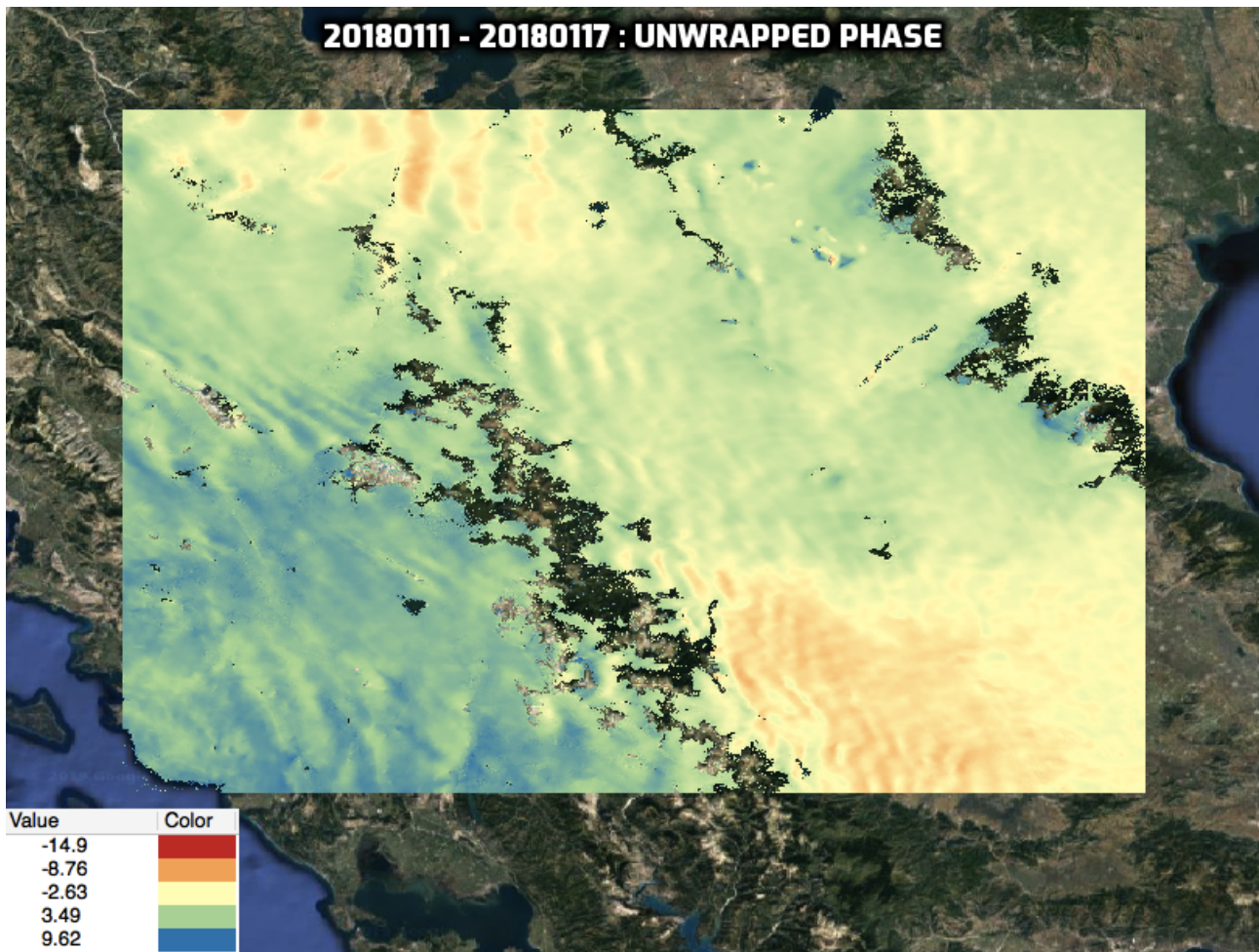
όπου z είναι οι παρατηρήσεις της αποκατεστημένης φάσης, x και y είναι οι συντεγμένες του κάθε *pixel* στο σύστημα αναφοράς του *radar* και P_1 , P_2 και P_3 είναι οι άγνωστες παράμετροι. Για να λυθεί η προηγούμενη εξίσωση ως προς τις τρεις αυτές άγνωστες παραμέτρους, χρησιμοποιείται η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (MET). Η λύση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$P = (A^T A)^{-1} A^T Z$$

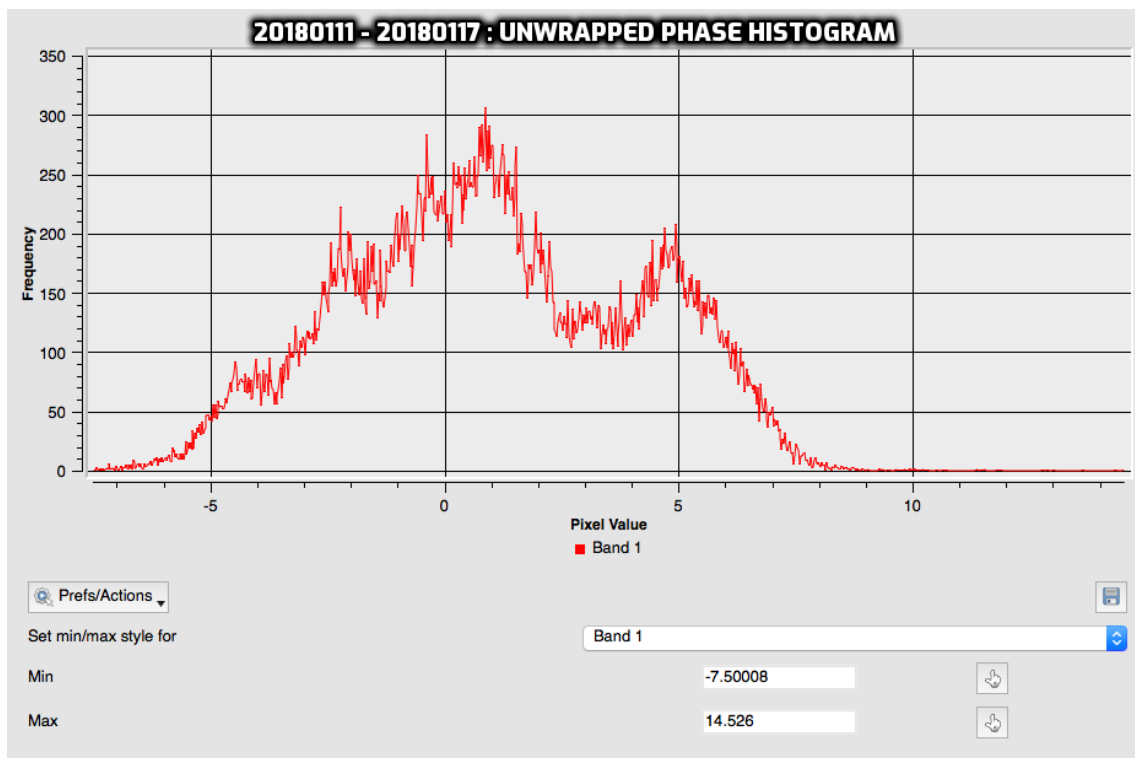
όπου $P^T = [P_1, P_2, P_3]$ είναι το διάνυσμα που περιέχει τις τρεις άγνωστες παραμέτρους, Z είναι ο πίνακας των παρατηρήσεων μεγέθους N και ο A είναι ο πίνακας διαστάσεων $N \times 3$ που περιέχει τις συντεταγμένες x και y .

Για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας το σφάλμα που οφείλεται στην τροχιά του δορυφόρου αντιμετωπίστηκε με το script “*deramping.py*”. Στις επόμενες σελίδες, για κάθε ένα από τα τρία συμβολογράμματα, αρχικά φαίνεται η εικόνα της μη διορθωμένης από σφάλματα τροχιάς φάσης (*unwrapped phase*), ακολουθεί η εικόνα της διόρθωσης (*ramp*) και, τέλος, φαίνεται η εικόνα της διορθωμένης φάσης (*deramped phase*). Σημειώνεται ότι κάθε εικόνα συνοδεύεται από το ιστόγραμμά της.

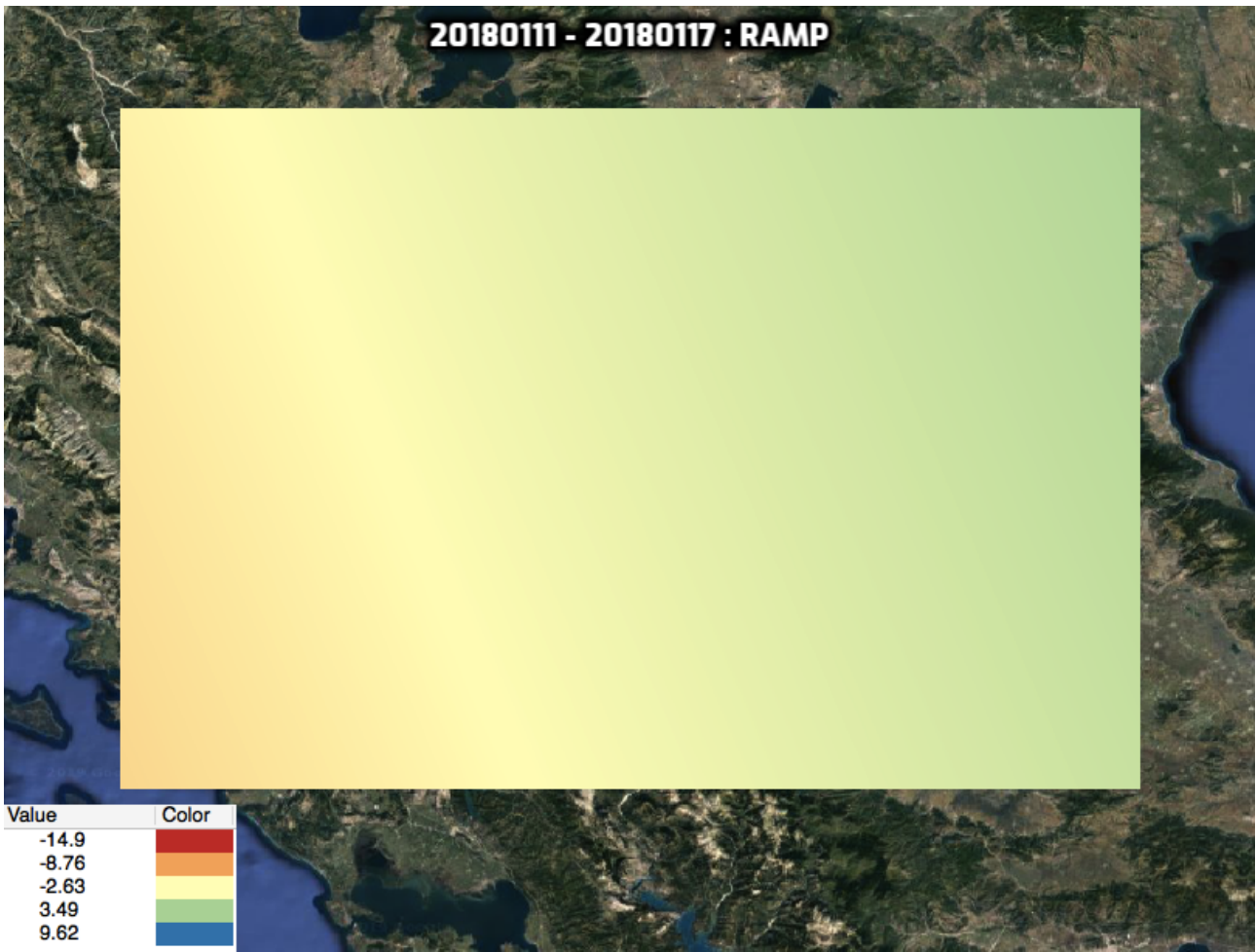
Τόσο από την ερμηνεία των εικόνων με βάση το χρωματισμό, όσο και με βάση την τυπική απόκλιση (*STATISTICS_STDDEV*) της κάθε εικόνας είναι σαφές πως η διόρθωση των τροχιακών σφαλμάτων πέτυχε και στις τρεις περιπτώσεις.



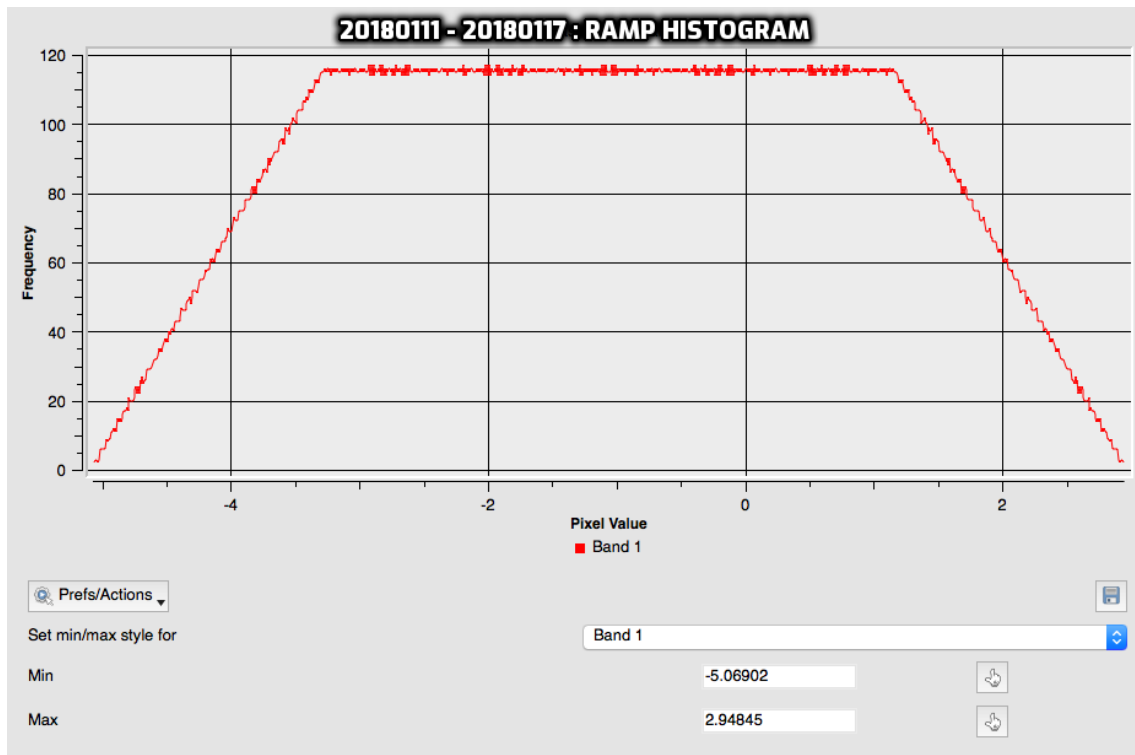
Εικόνα 3.3: Μη διορθωμένη φάση (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=3.0892251961801



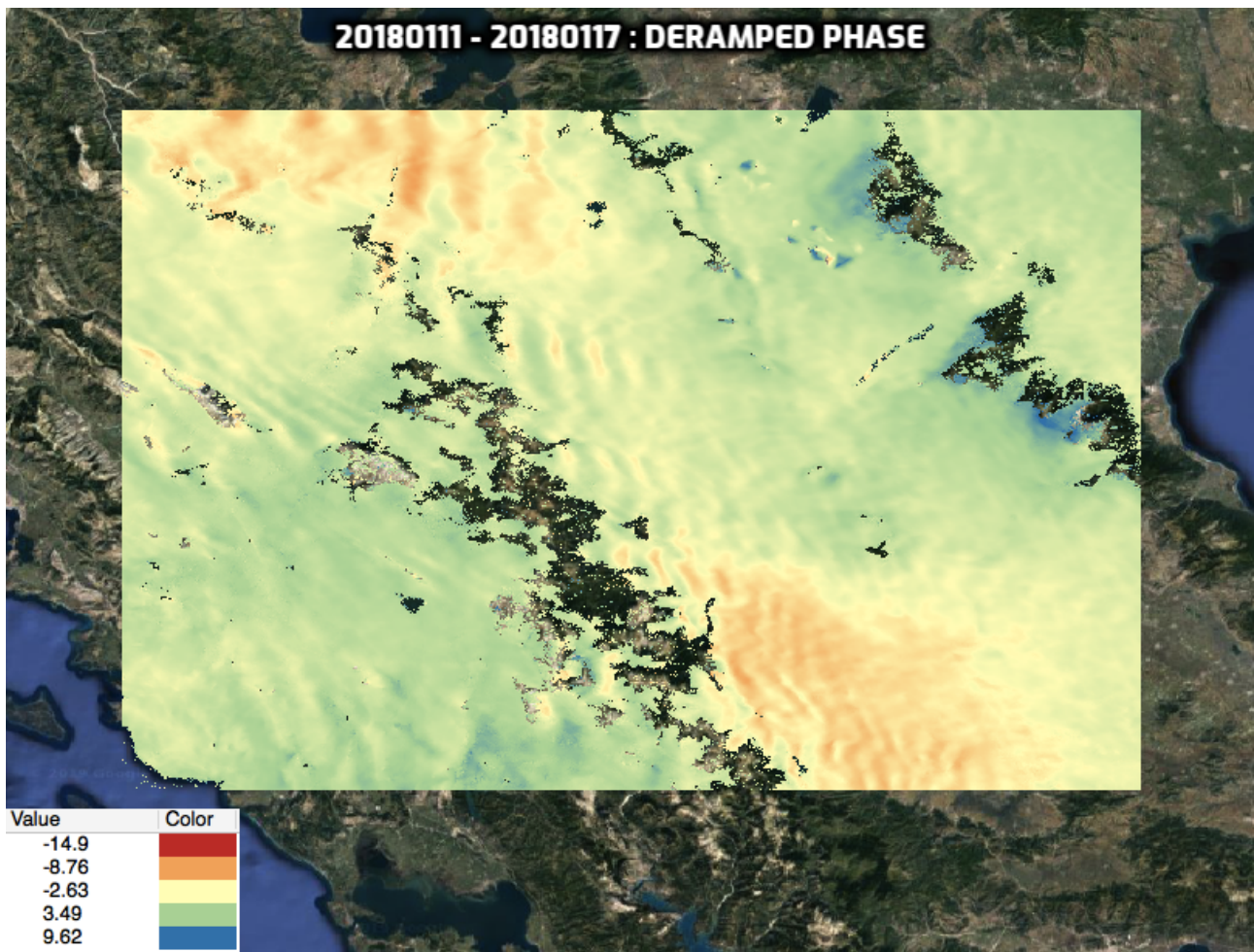
Εικόνα 3.4: Ιστόγραμμα της εικόνας 3.3



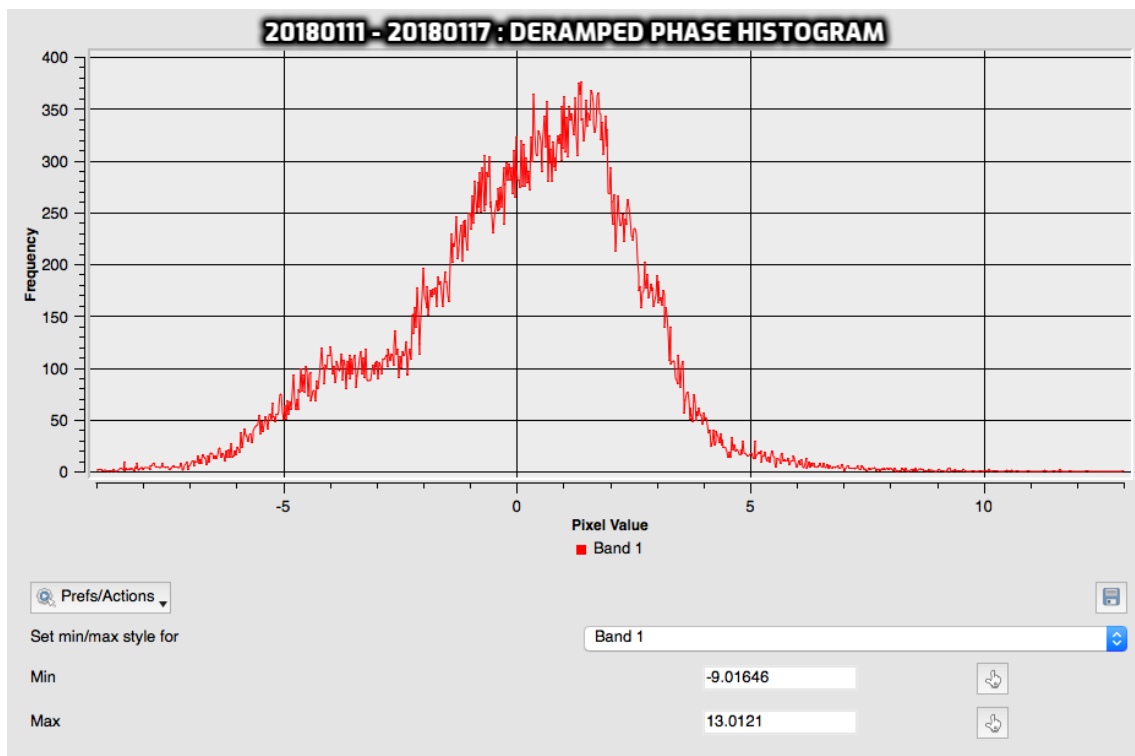
Εικόνα 3.5: Διόρθωση (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=1.8805392221933



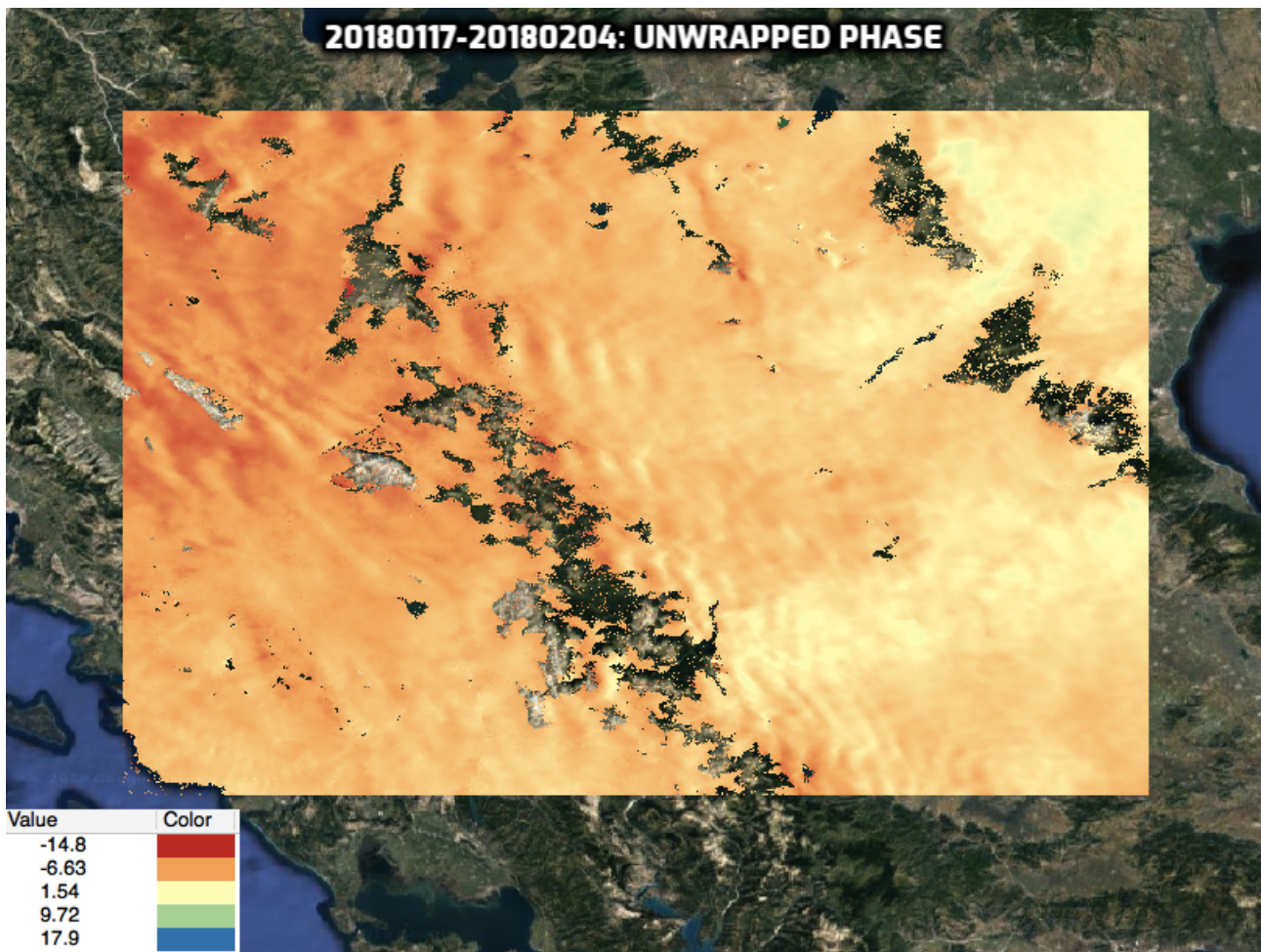
Εικόνα 3.6: Ιστόγραμμα εικόνας 3.5



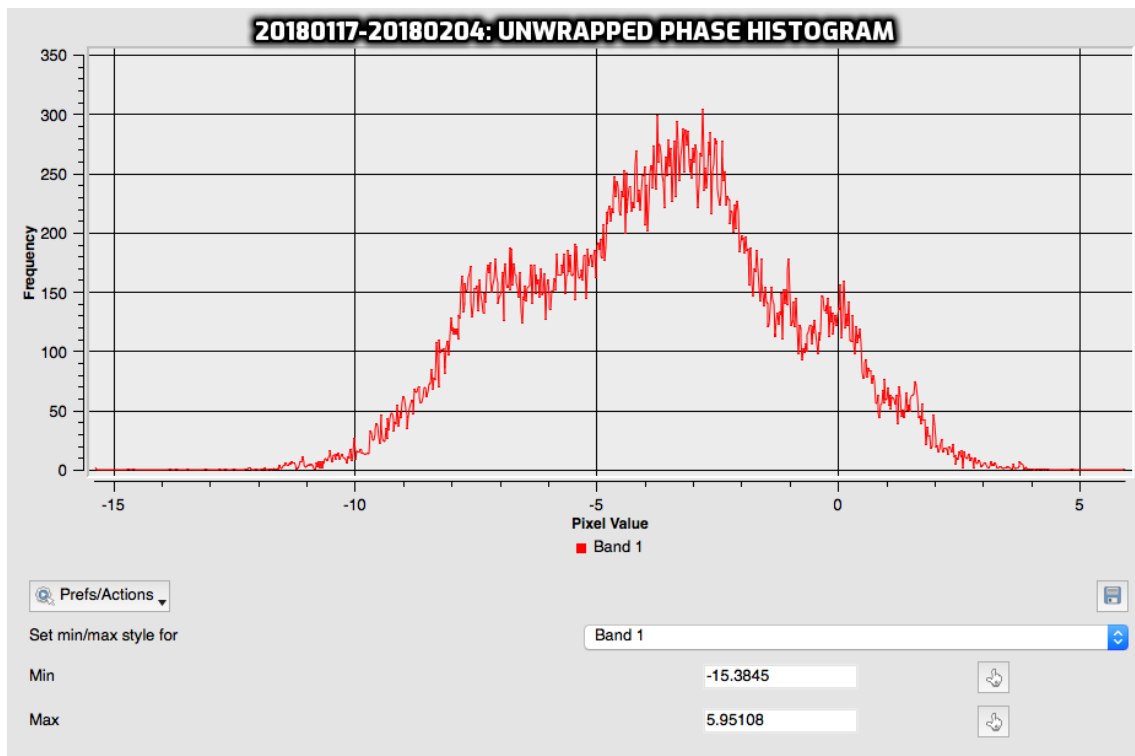
Εικόνα 3.7: Διορθωμένη φάση (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=2.4619276815476



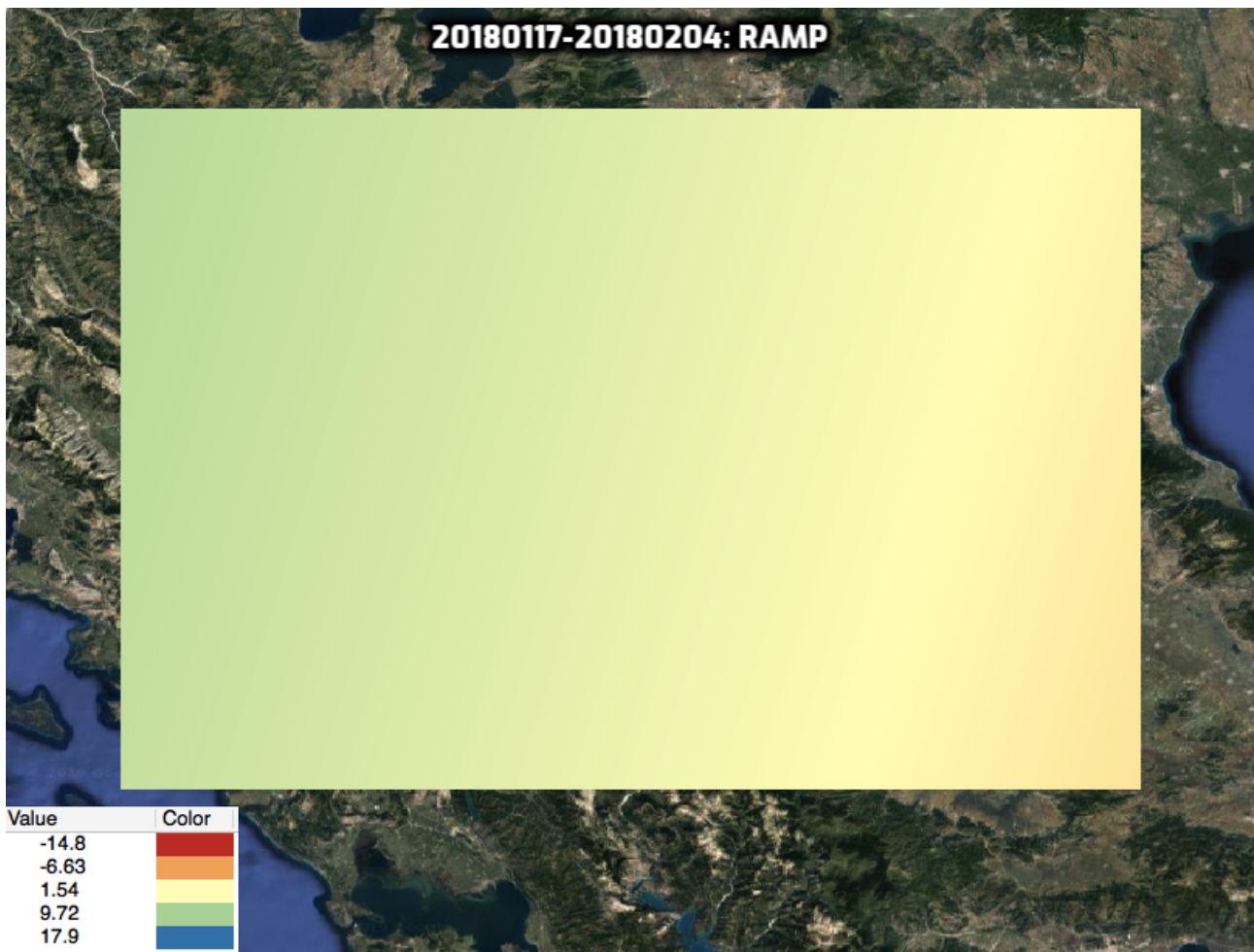
Εικόνα 3.8: Ιστόγραμμα εικόνας 3.7



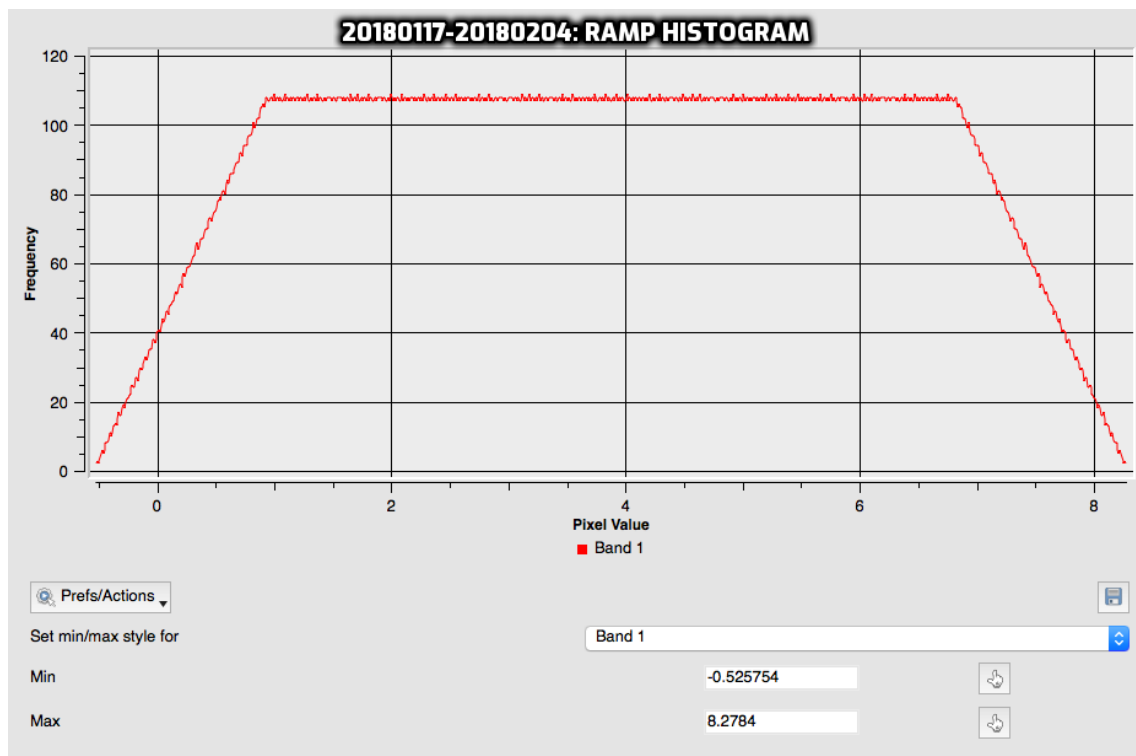
Εικόνα 3.9: Μη διορθωμένη φάση (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.7502725725963



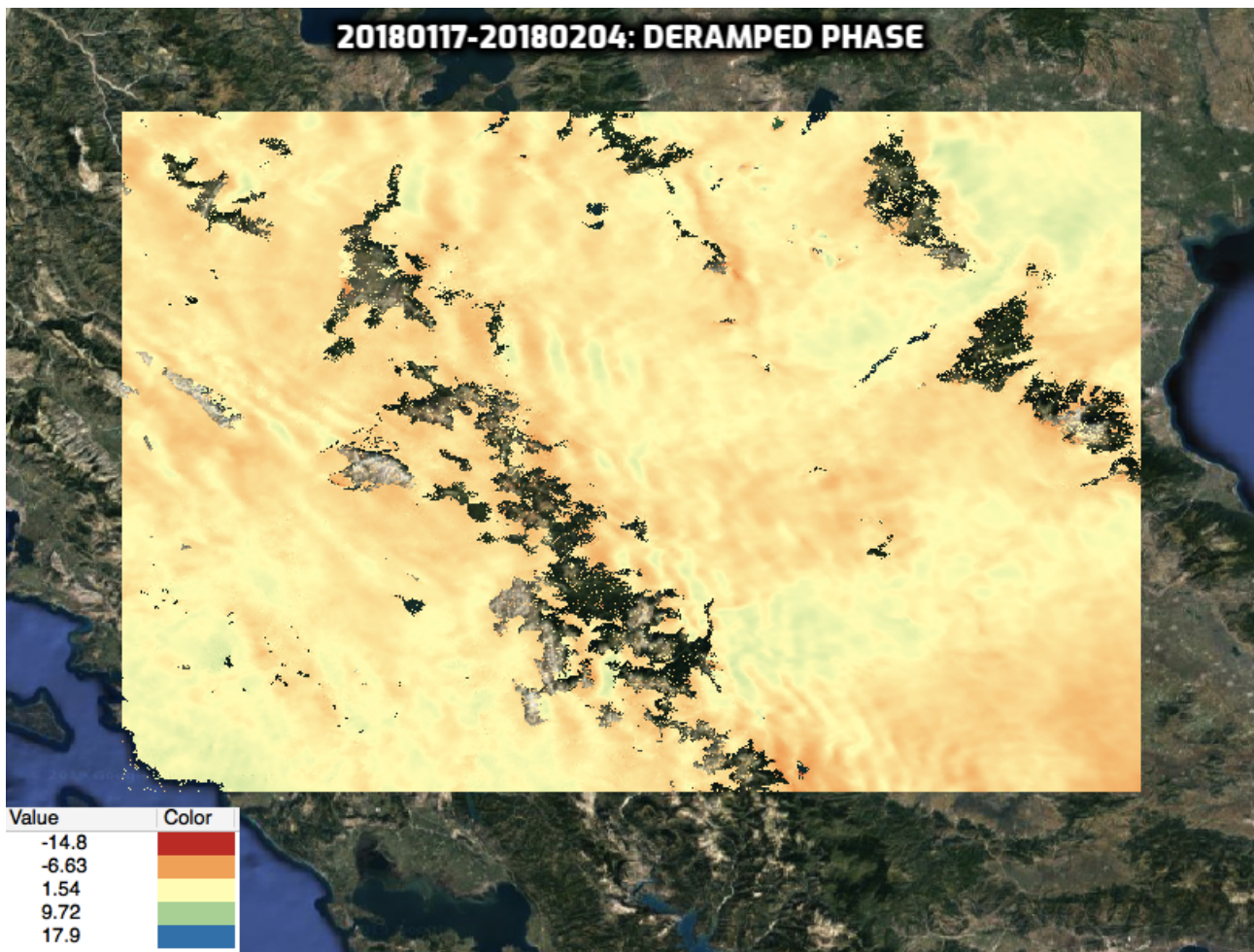
Εικόνα 3.10: Ιστόγραμμα εικόνας 3.9



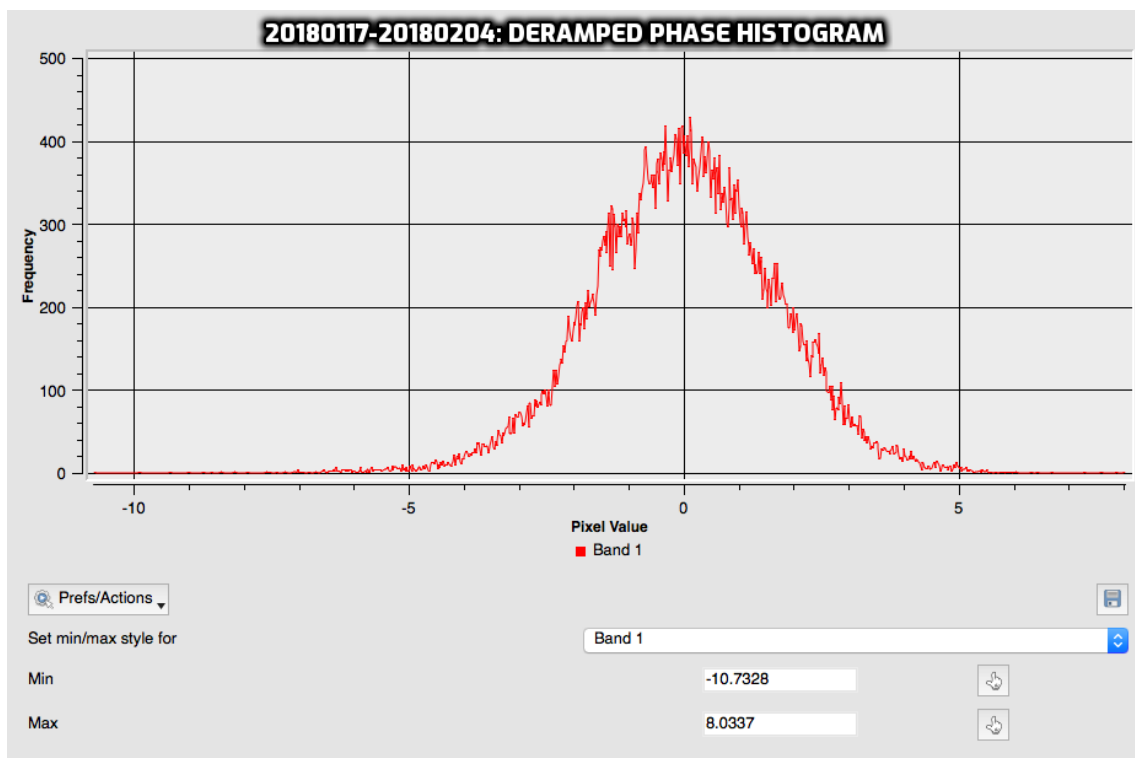
Εικόνα 3.11: Διόρθωση (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.1682754571202



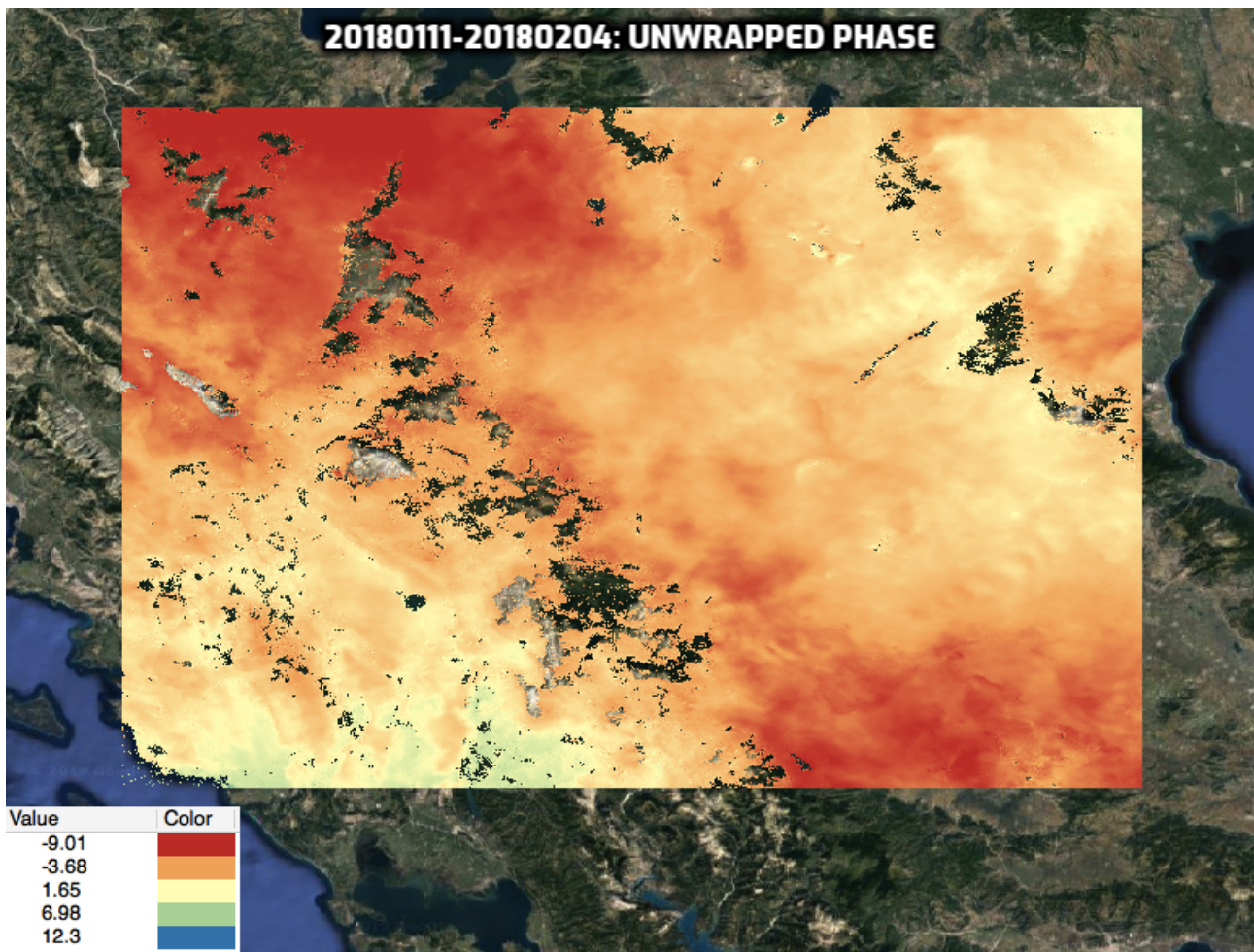
Εικόνα 3.12: Ιστόγραμμα εικόνας 3.11



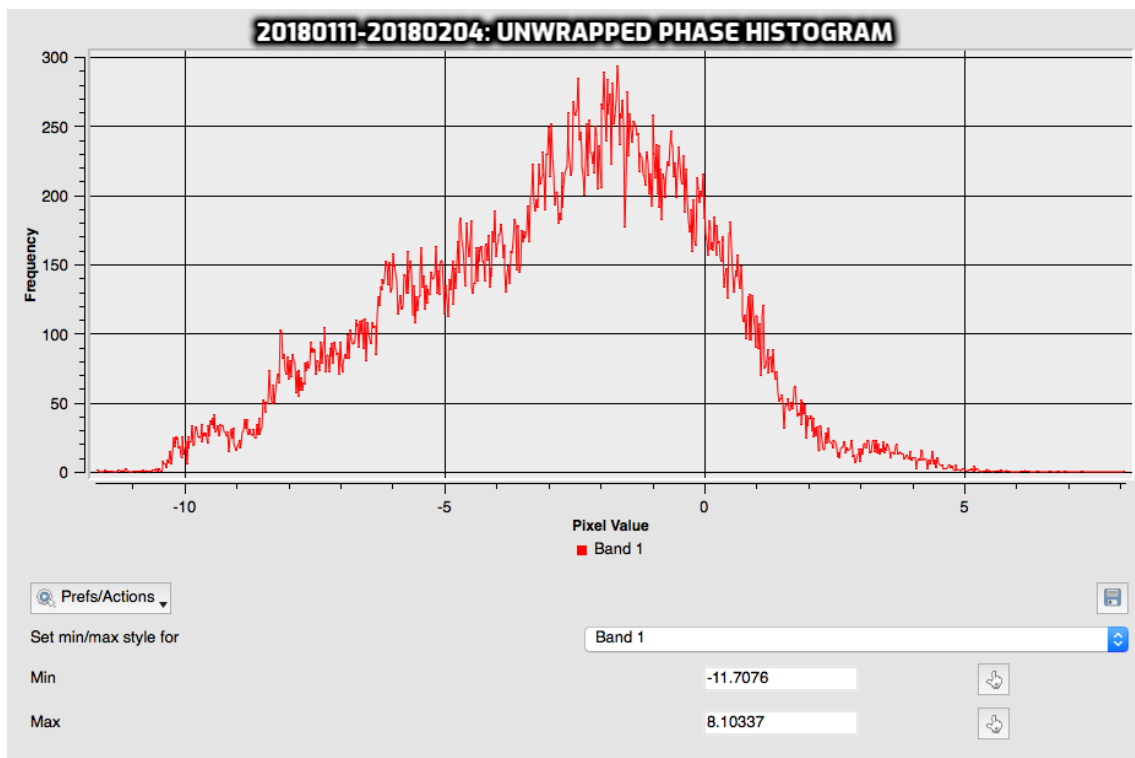
Εικόνα 3.13: Διορθωμένη φάση (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=1.6566202526909



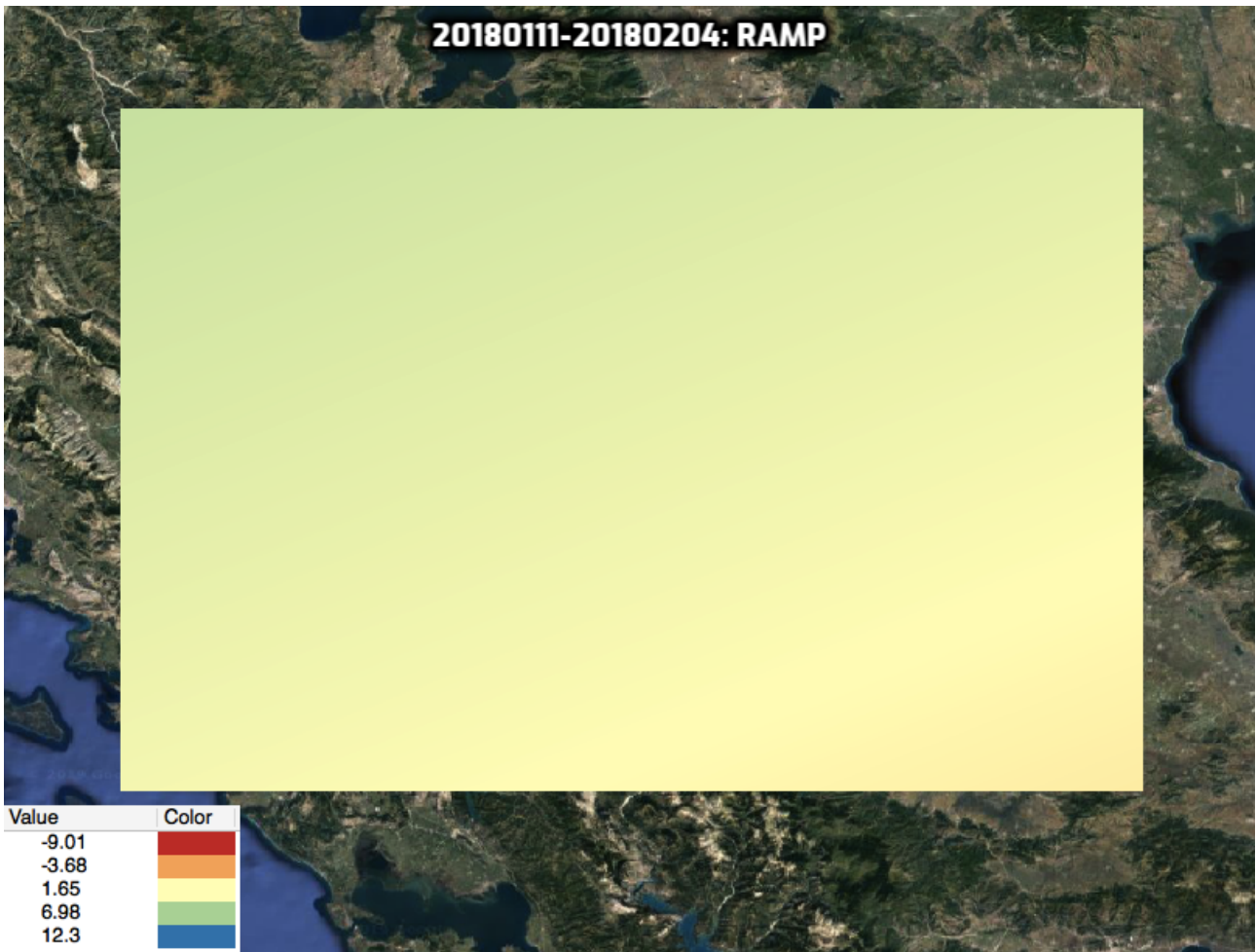
Εικόνα 3.14: Ιστόγραμμα εικόνας 3.13



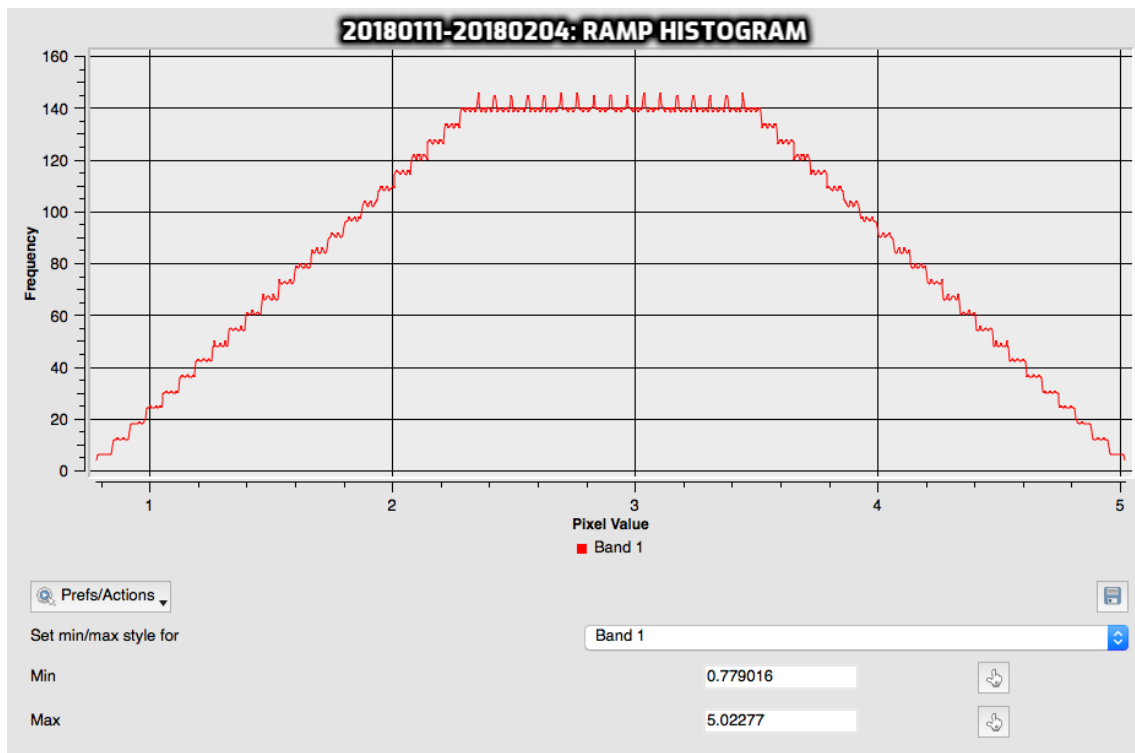
Εικόνα 3.15: Μη διορθωμένη φάση (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.8505271840244



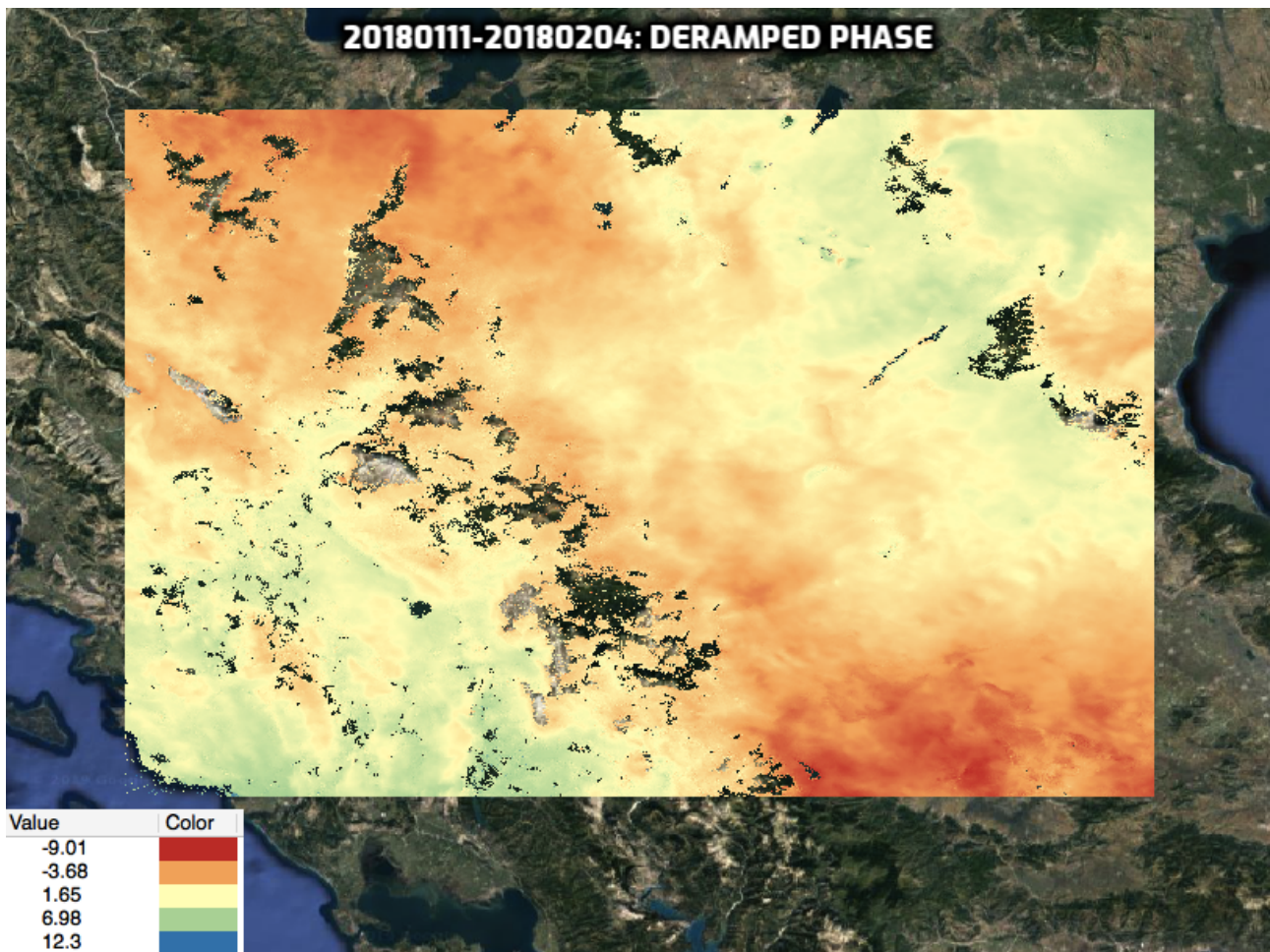
Εικόνα 3.16: Ιστογράμμο της εικόνας 3.15



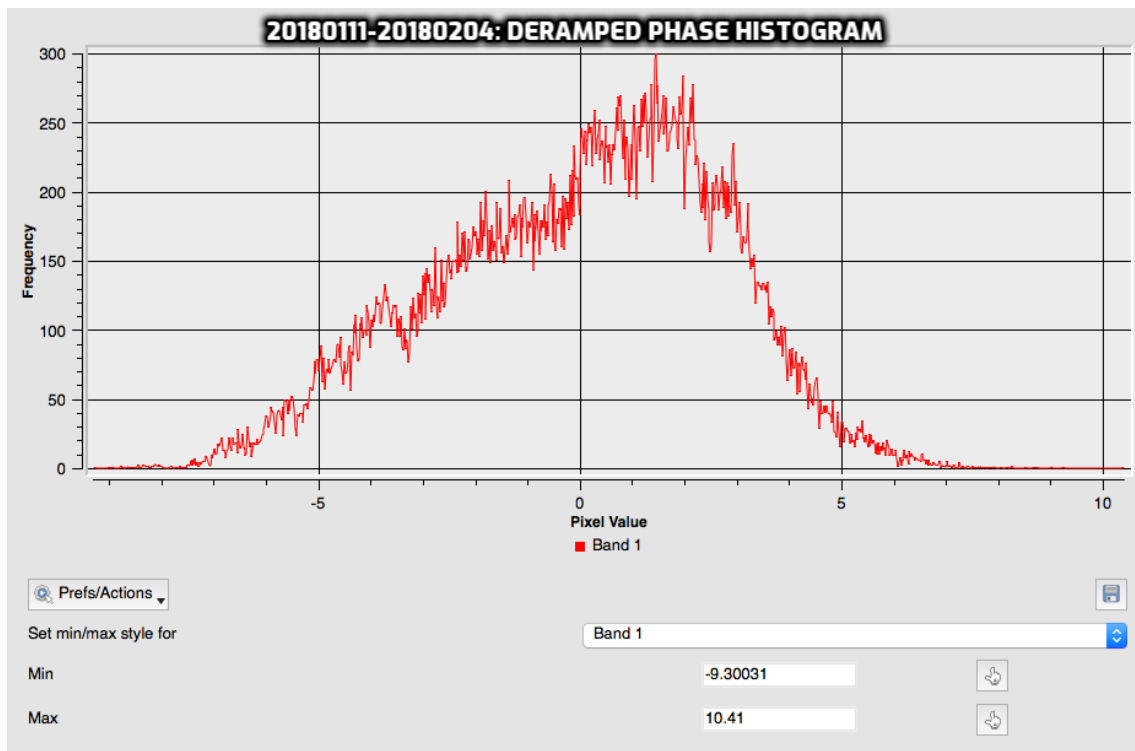
Εικόνα 3.17: Διόρθωση (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=0.91099713409976



Εικόνα 3.18: Ιστογράμμο της εικόνας 3.17



Εικόνα 3.19: Διορθωμένη φάση (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.6947027088739



Εικόνα 3.20: Ιστόγραμμα εικόνας 3.19

Κεφάλαιο 4 - Η εμπειρική μέθοδος

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διόρθωση των συμβολογραμμάτων με εμπειρικό τρόπο, μέσω δηλαδή της υπόθεσης της γραμμικότητας μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και της τοπογραφίας της περιοχής. Επίσης, εξηγείται το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) που εφαρμόστηκε στα δεδομένα.

4.1 Περιγραφή της μεθόδου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εμπειρικές μέθοδοι αξιολογούν την εξάρτηση της καθυστέρησης της συμβολομετρικής φάσης από το υψόμετρο για κάθε συμβολόγραμμα. Με άλλα λόγια, για τη διόρθωση ενός συμβολογράμματος από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις με εμπειρικό τρόπο γίνεται η θεώρηση πως η καθυστέρηση της συμβολομετρικής φάσης είναι γραμμικά συσχετισμένη με την τοπογραφία της περιοχής. Άλλωστε, ένα πιο σύνθετο πολυώνυμο που ίσως περιέγραφε καλύτερα τη σχέση φάσης-υψόμετρου θα προσέθετε πολλούς αγνώστους στην επίλυση και, άρα, τα σφάλματα της μεθόδου θα ήταν αρκετά μεγαλύτερα [Jolivet et al., 2011]. Σύμφωνα με τον [Hanssen, 2001], η σχέση καθυστέρησης φάσης/υψόμετρου οφείλεται στη μεταβολή της συγκέντρωσης των υδρατμών μεταξύ των δύο λήψεων. Αυτή η μεταβολή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπογραφία της περιοχής, δηλαδή, μεταβάλλεται σημαντικά με το υψόμετρο. Αυτό σημαίνει πως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο θα υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ καθυστέρησης φάσης και υψόμετρου, ενώ σε περιοχές με σχεδόν οριζόντιο έδαφος η σχέση αυτή θα παρουσιάζει ομοιογένεια στο χώρο και θα εμφανίζεται με τυχαία μοτίβα [Cavalié et al, 2007]. Όπως φαίνεται από τα scatterplots που σχεδιάστηκαν και περιγράφουν τη σχέση μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και της τοπογραφίας της περιοχής, αυτή η γραμμική θεώρηση άλλοτε συνιστά μια καλή προσέγγιση και άλλοτε δεν προσαρμόζεται ιδανικά στα δεδομένα. Εξάλλου, η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει μεν μεγάλους ορεινούς όγκους (π.χ. Όλυμπος, Πίνδος) και έντονο ανάγλυφο, δηλαδή περιοχές στις οποίες αναμένεται η τοπογραφία να είναι έντονα συσχετισμένη με την καθυστέρηση της συμβολομετρικής φάσης, υπάρχουν όμως και περιοχές με πιο ήπιο ανάγλυφο (π.χ. Βέροια) στις οποίες η υπόθεση της γραμμικότητας όσον αφορά στη σχέση καθυστέρησης φάσης/υψόμετρου ίσως δεν είναι ακριβής.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως οι εμπειρικές μέθοδοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης δε μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν όταν στην περιοχή μελέτης υπάρχουν εδαφικές παραμορφώσεις και το σήμα που έχει προκύψει εξαιτίας αυτών των παραμορφώσεων συσχετίζεται με την τοπογραφία της περιοχής [Jolivet et al., 2014]. Βέβαια, στη συγκεκριμένη περιοχή που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία έχει υποτεθεί πως δεν υπάρχουν εδαφικές παραμορφώσεις, μιας και η χρονική βάση μεταξύ των λήψεων είναι σχετικά μικρή (18 μέρες) και δεν παρενεβλήθη σεισμός ή άλλη τεκτονική δραστηριότητα. Εν γένει, οι εμπειρικές μέθοδοι μπορούν να φανούν χρήσιμες σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όμως, δε μπορούν να γενικευτούν και η εφαρμογή τους θα πρέπει κάθε φορά να αξιολογείται με προσοχή.

Στα scatterplots που παρουσιάζονται έχει εφαρμοστεί ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια στατιστική μέθοδος, μέσω της οποίας δύναται να μελετηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η σχέση μεταξύ δύο συνεχών μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μεταβλητή στον άξονα των x είναι το υψόμετρο (η τοπογραφία, το ΨΜΕ), ενώ στον άξονα των y είναι η καθυστέρηση της αποκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης, διορθωμένης από σφάλματα που οφείλονται στις δορυφορικές τροχιές.

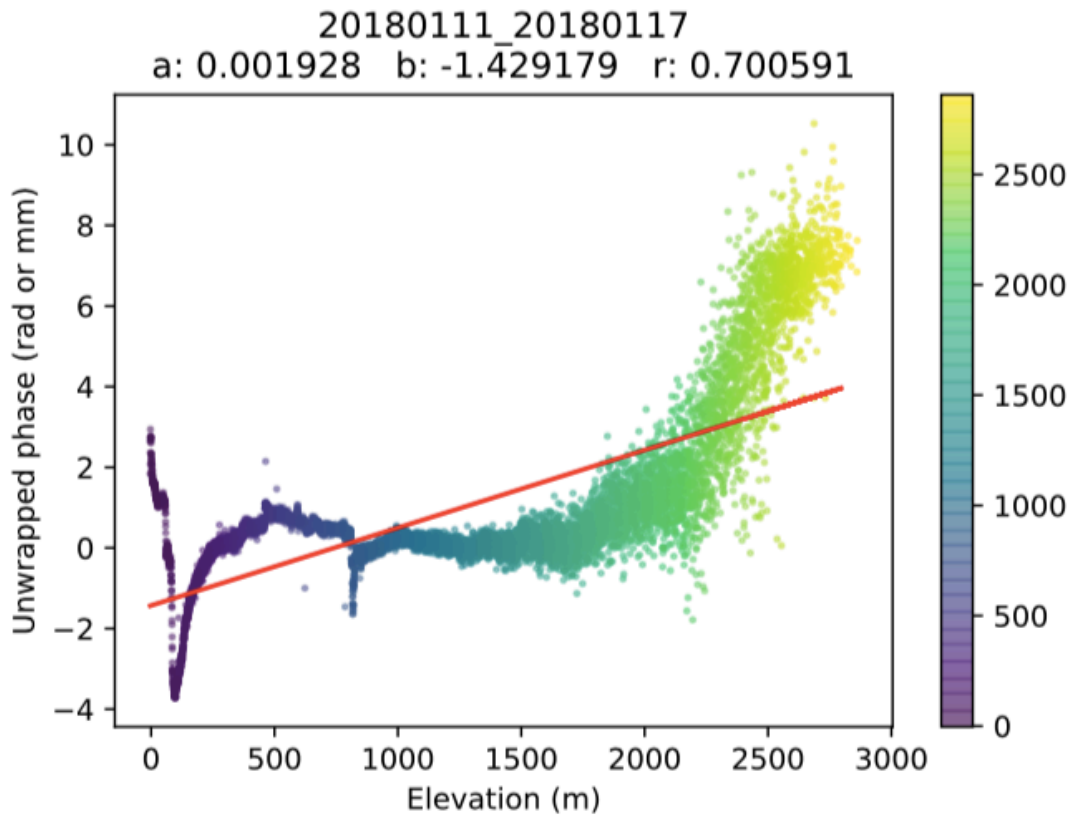
Όπως αναφέρθηκε, γίνεται η υπόθεση πως η καθυστέρηση (delay) της φάσης και το υψόμετρο (h) του κάθε σημείου συσχετίζονται γραμμικά. Με μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει πως υπάρχουν δύο μεταβλητές a , b για τις οποίες ισχύει:

$$\text{delay} = a \times h + b$$

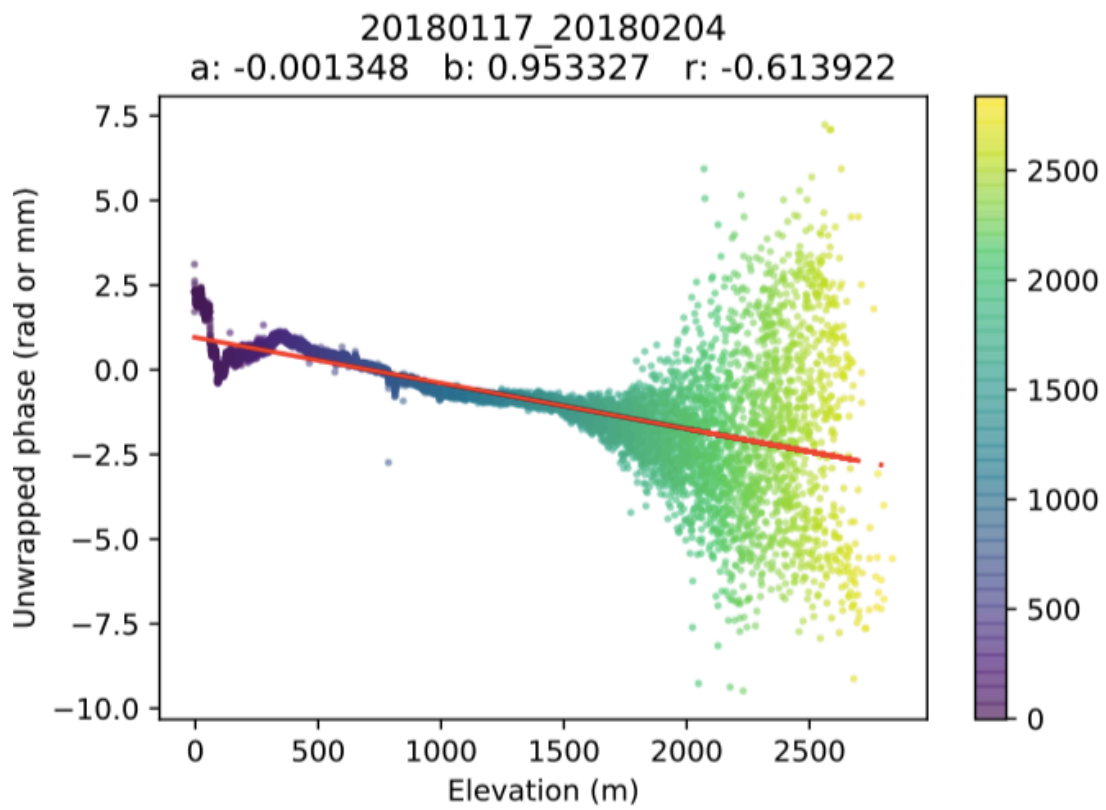
όπου a είναι η κλίση της ευθείας και b είναι η τιμή που τέμνει η ευθεία τον άξονα των y .

4.2 Εφαρμογή και αποτελέσματα

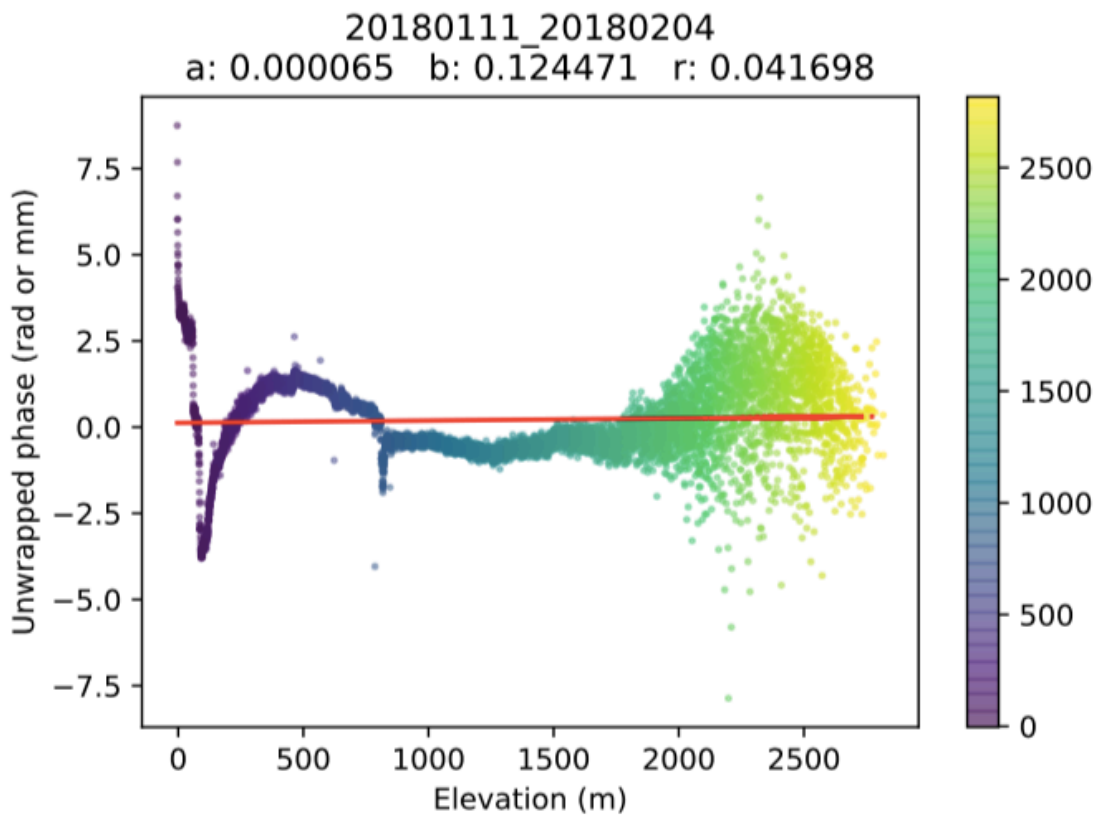
Πριν τη διόρθωση των εικόνων παρουσιάζονται τα scatterplots που σχεδιάστηκαν. Όπως αναφέρθηκε, όπου a , είναι η κλίση της ευθείας και b , είναι το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα y . Με r συμβολίζεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και της τοπογραφίας.



Εικόνα 4.1: Scatterplot 20180111_20180117 (full)



Εικόνα 4.2: Scatterplot 20180117_20180204 (full)



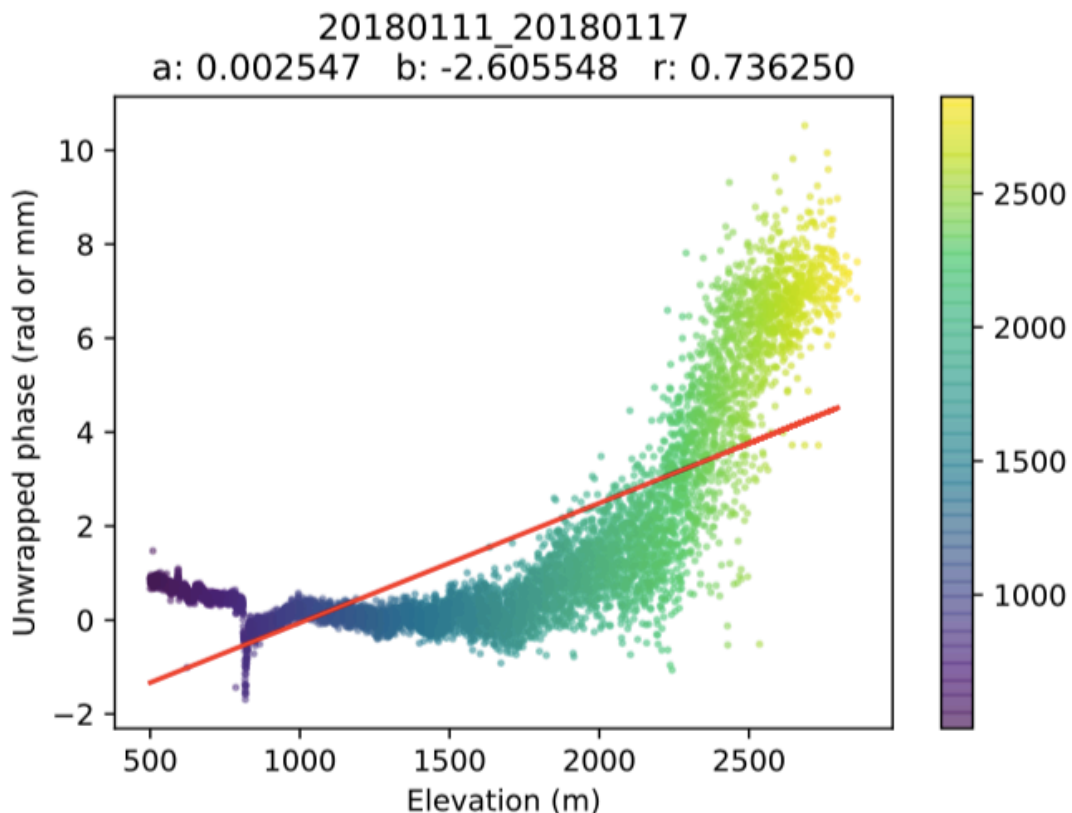
Εικόνα 4.3: Scatterplot 20180111_20180204 (full)

Μια πρώτη παρατήρηση είναι η εξής: στα μικρά υψόμετρα εμφανίζονται μεγάλες ανωμαλίες όσον αφορά στη σχέση μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και του υψομέτρου. Με άλλα λόγια, δε μπορεί να προκύψει κανένα συμπέρασμα για τη μεταξύ τους σχέση για τα υψόμετρα αυτά. Πιθανώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτή η συμπεριφορά των δεδομένων να οφείλεται στην ομοιογένεια που παρουσιάζει η φάση σε μεγάλες εκτάσεις με οριζόντιο έδαφος. Μια άλλη αιτία για την εμφάνιση αυτών των ανωμαλιών ίσως είναι ορισμένα σφάλματα που προέκυψαν κατά την αποκατάσταση της φάσης, στάδιο το οποίο προηγήθηκε της εργασίας αυτής, μιας και τα συμβολογράμματα που χρησιμοποιούνται είναι αποκατεστημένης φάσης.

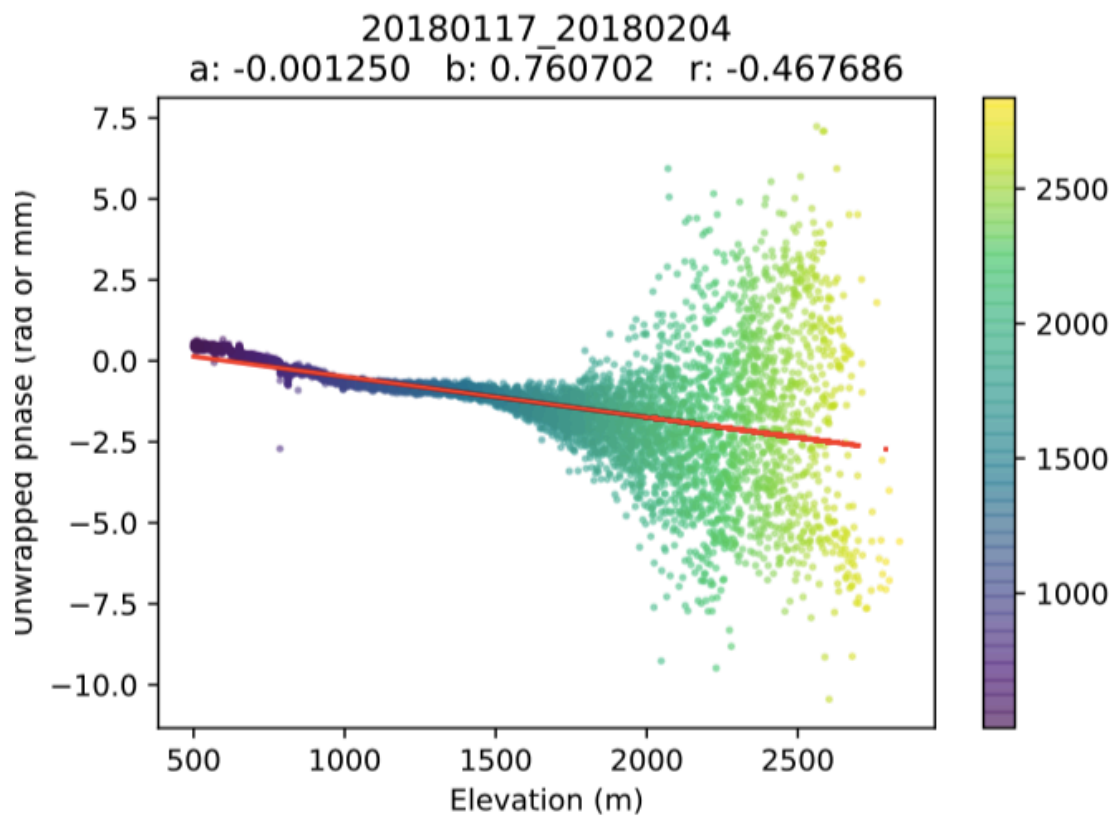
Σημείωση: Στο scatterplot της εικόνας 4.2, παρατηρείται αρνητική τιμή κλίσης ($a < 0$). Αυτό δεν επηρεάζει με κανένα τρόπο τη μελέτη. Σημαίνει απλά ότι η φάση που μετρήθηκε στην δεύτερη (slave) απεικόνιση είναι μεγαλύτερη από την φάση που μετρήθηκε στην πρώτη (master) εικόνα.

Όπως, λοιπόν, αναφέρεται στη βιβλιογραφία [Doin et al, 2009], [Cavalié et al, 2007], [Lopez et al, 2009], εξαιρέθηκαν ορισμένα σημεία με σχετικά μικρό υψόμετρο (0-500m), με σκοπό τη βελτίωση της δυναμικής της σχέσης φάσης-υψομέτρου. Όπως φαίνεται από τα νέα scatterplots που ακολουθούν, σε δύο από τις τρεις περιπτώσεις ο συντελεστής συσχέτισης r αυξήθηκε. Έτσι, λοιπόν, αποφασίστηκε, σε κάθε ένα συμβολόγραμμα να διορθωθούν από την επίδραση της ατμόσφαιρας μόνο τα σημεία (>500m) για τα οποία προκύπτει ισχυρή γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στην καθυστέρηση της φάσης και στο υψόμετρό τους. Τα σημεία με μικρότερο υψόμετρο δε διορθώθηκαν.

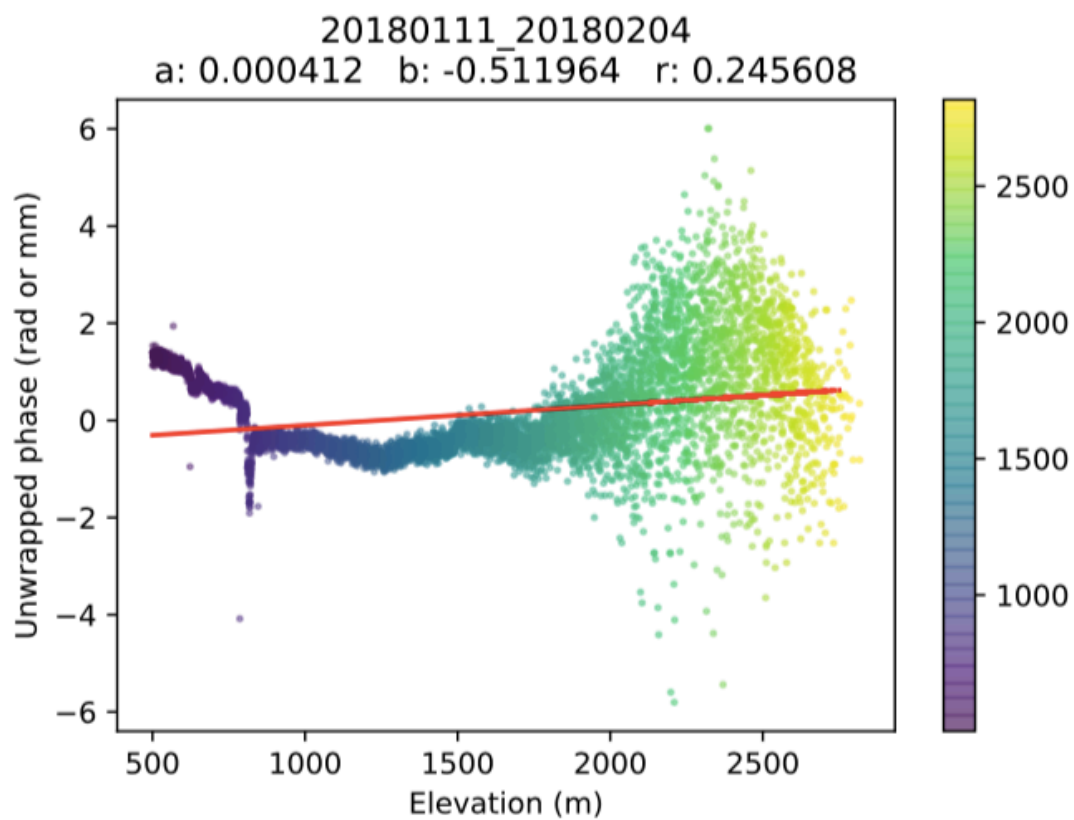
Ακολουθούν τα νέα scatterplots, μετά την εξαίρεση των σημείων με μικρά υψόμετρα.



Εικόνα 4.4: Scatterplot 20180111_20180117 (cropped)



Εικόνα 4.5: Scatterplot 20180117_20180204 (cropped)



Εικόνα 4.6: Scatterplot 20180111_20180204 (cropped)

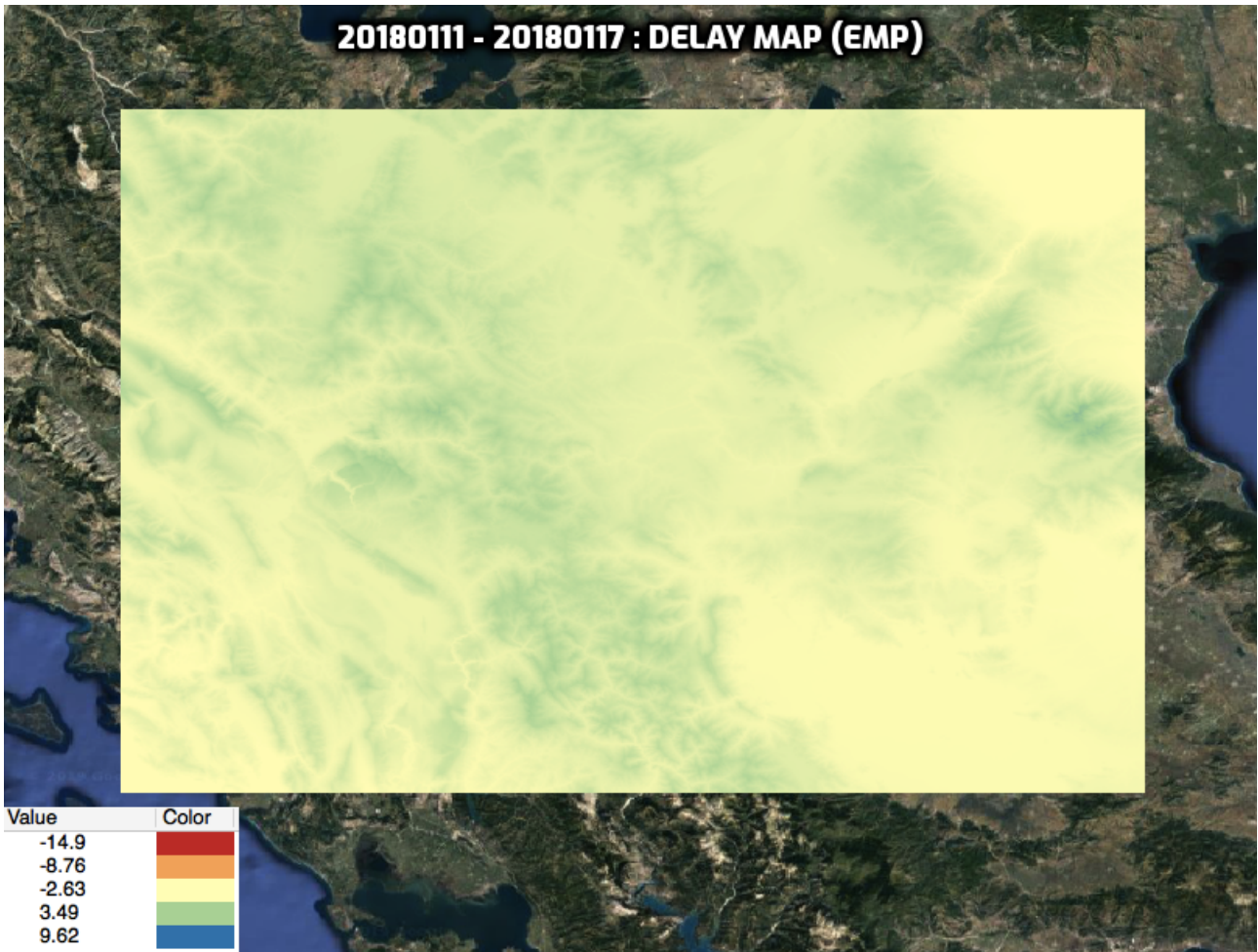
Αφού, λοιπόν, υπολογιστούν οι συντελεστές a , b μέσω του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης, για κάθε συμβολόγραμμα, με χρήση του SRTM (h) υπολογίζεται και η τιμή της καθυστέρησης της φάσης για κάθε συμβολόγραμμα. Στη συνέχεια, η τιμή αυτή αφαιρείται από την τιμή της αποκατεστημένης συμβολομετρικής φάσης και, κατά αυτόν τον τρόπο, προκύπτει η διορθωμένη από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις εικόνα.

Στις επόμενες σελίδες, λοιπόν, φαίνονται τόσο οι εικόνες καθυστέρησης της φάσης (delay maps), όσο και τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης για κάθε συμβολόγραμμα (empirically corrected). Οι αρχικές εικόνες (deramped) έχουν παρουσιαστεί στην ενότητα (3.2). Κάθε εικόνα συνοδεύεται από το ιστόγραμμά της.

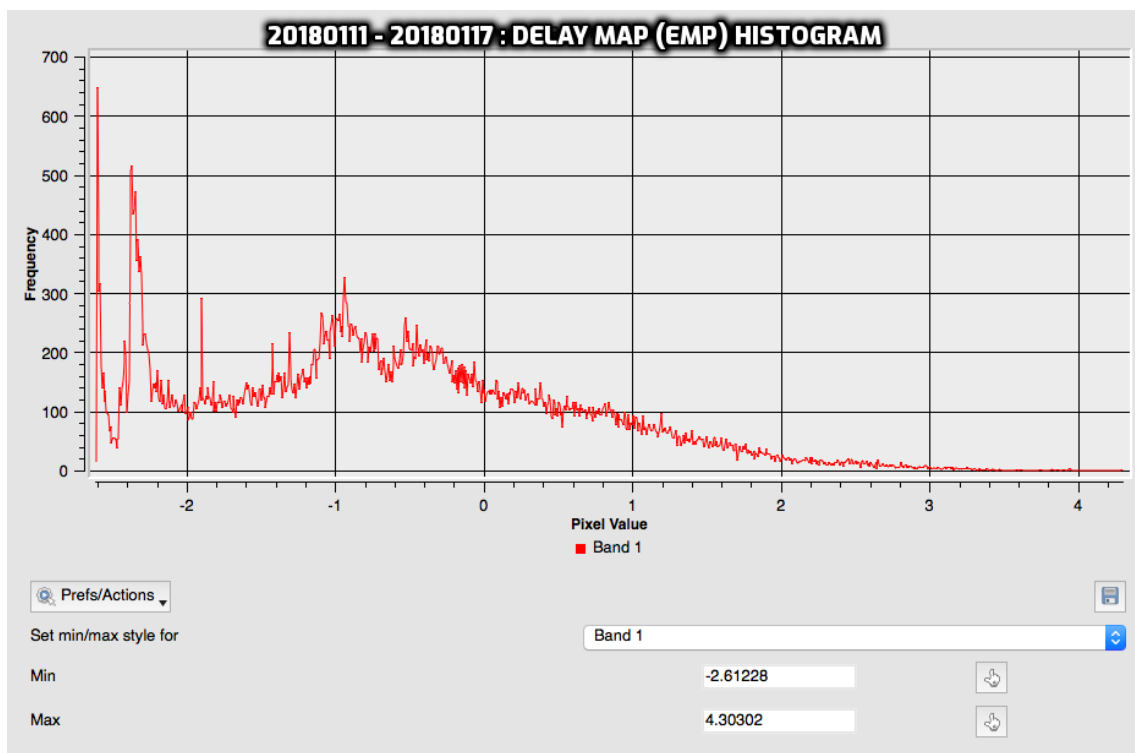
Είναι σαφές, πως στην πρώτη περίπτωση (20180111_20180117) η εμπειρική διόρθωση μάλλον χειροτέρευσε την εικόνα παρά τη βελτίωσε. Άλλωστε, ο χάρτης καθυστέρησης έχει σχετικά μεγάλες τιμές (βλ. Delay map σελ. 56) και ο ανεξάρτητος δείκτης της τυπικής απόκλισης της εικόνας συνολικά παρουσιάζει αύξηση αντί για μείωση. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, γιατί το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης δεν ταιριάζει ικανοποιητικά στα δεδομένα (βλ. Εικόνα 4.4 σελ. 53). Ενδεχομένως, η σχέση μεταξύ της καθυστέρησης της φάσης και της τοπογραφίας να έπρεπε να μοντελοποιηθεί είτε με εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης τμηματικά, είτε με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

Όμοια φαινόμενα, μεγάλων καθυστερήσεων και αύξησης της τυπικής απόκλισης της εικόνας παρατηρούνται και στην τρίτη περίπτωση (20180111_20180204). Πιθανόν, οι τιμές που αντιστοιχούν σε pixels με υψόμετρο μικρότερο των 750m να μην είναι απόλυτα αξιόπιστες, μιας και όπως φαίνεται από το αντίστοιχο scatterplot (Εικόνα 4.6 σελ. 54), στα υψόμετρα αυτά ενδεχομένως να υπάρχουν διαταραχές (turbulence) στην ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση, για τα pixels με υψόμετρο μικρότερο των 750m η γραμμική παλινδρόμηση που έχει εφαρμοστεί, δε βρίσκεται σε συμφωνία με τα δεδομένα.

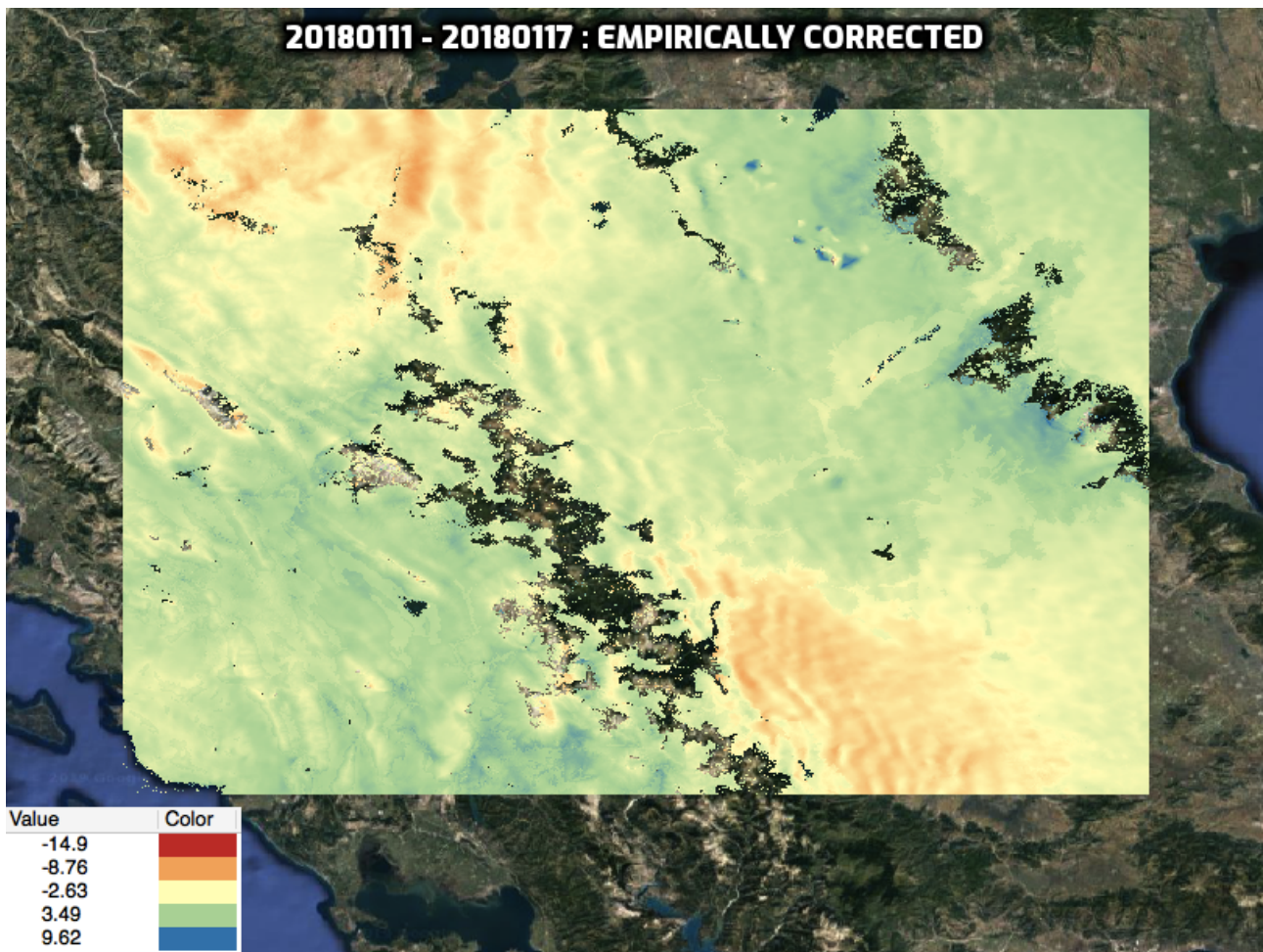
Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση (20180117_20180204) η εμπειρική μέθοδος διόρθωσης έχει λειτουργήσει αρκετά καλά. Ο χάρτης καθυστέρησης παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές (βλ. Delay map σελ. 58), οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη στιγμή λήψης των δύο εικόνων δεν ήταν πολύ διαφορετικές (βλ. Πίνακα 3.2 σελ. 36), ενώ το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης δείχνει να ταιριάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό στα δεδομένα (βλ. Εικόνα 4.5 σελ. 54). Εξάλλου, η τυπική απόκλιση της εικόνας συνολικά μειώνεται.



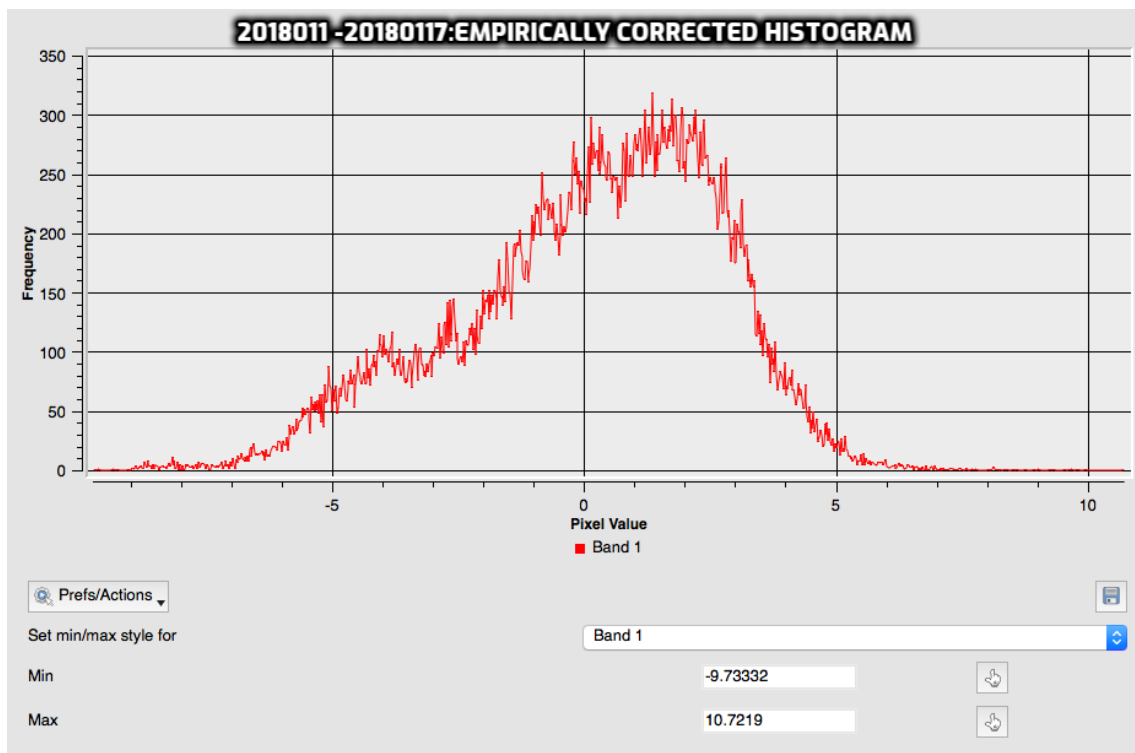
Εικόνα 4.7: Delay map (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=1.222112258399



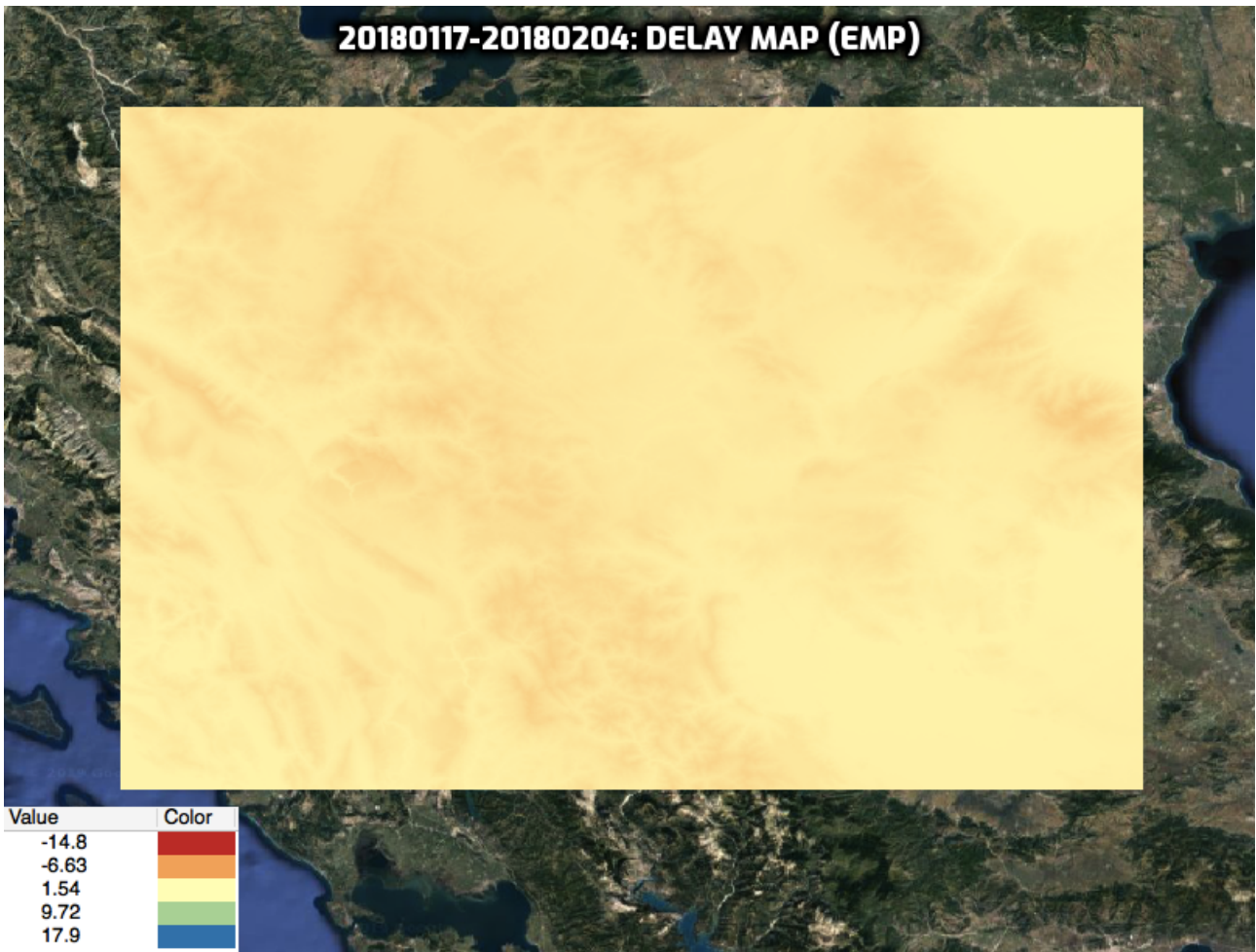
Εικόνα 4.8: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.7



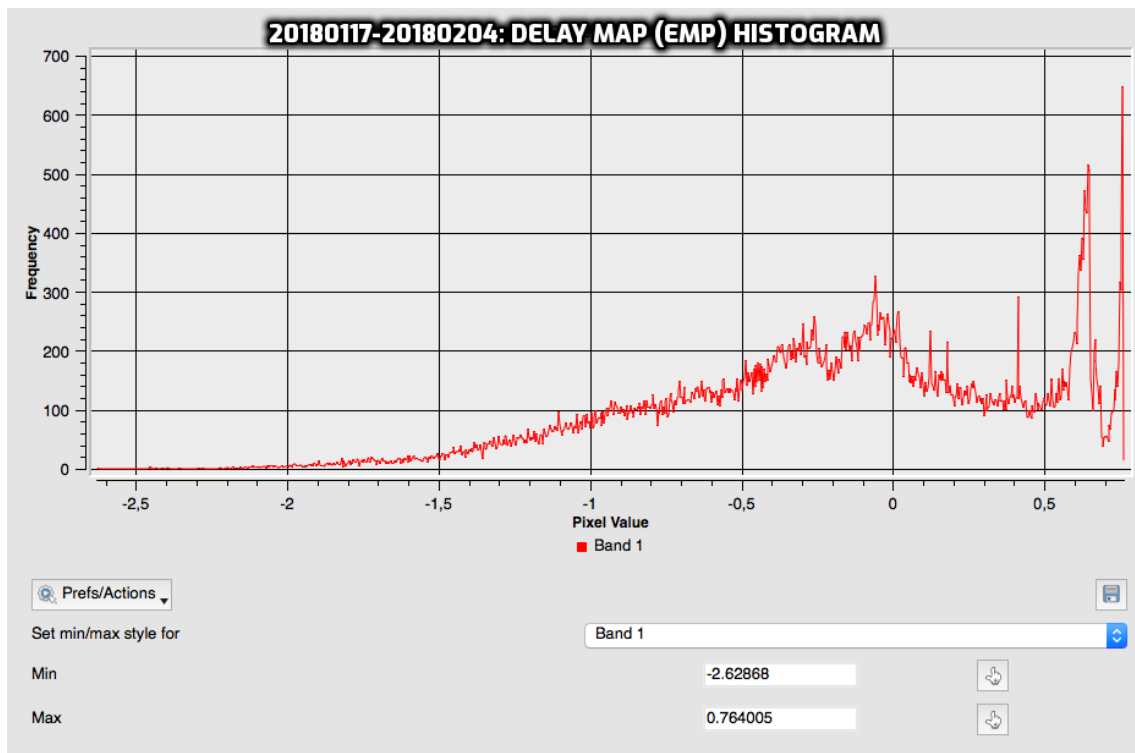
Εικόνα 4.9: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=2.5799941051448



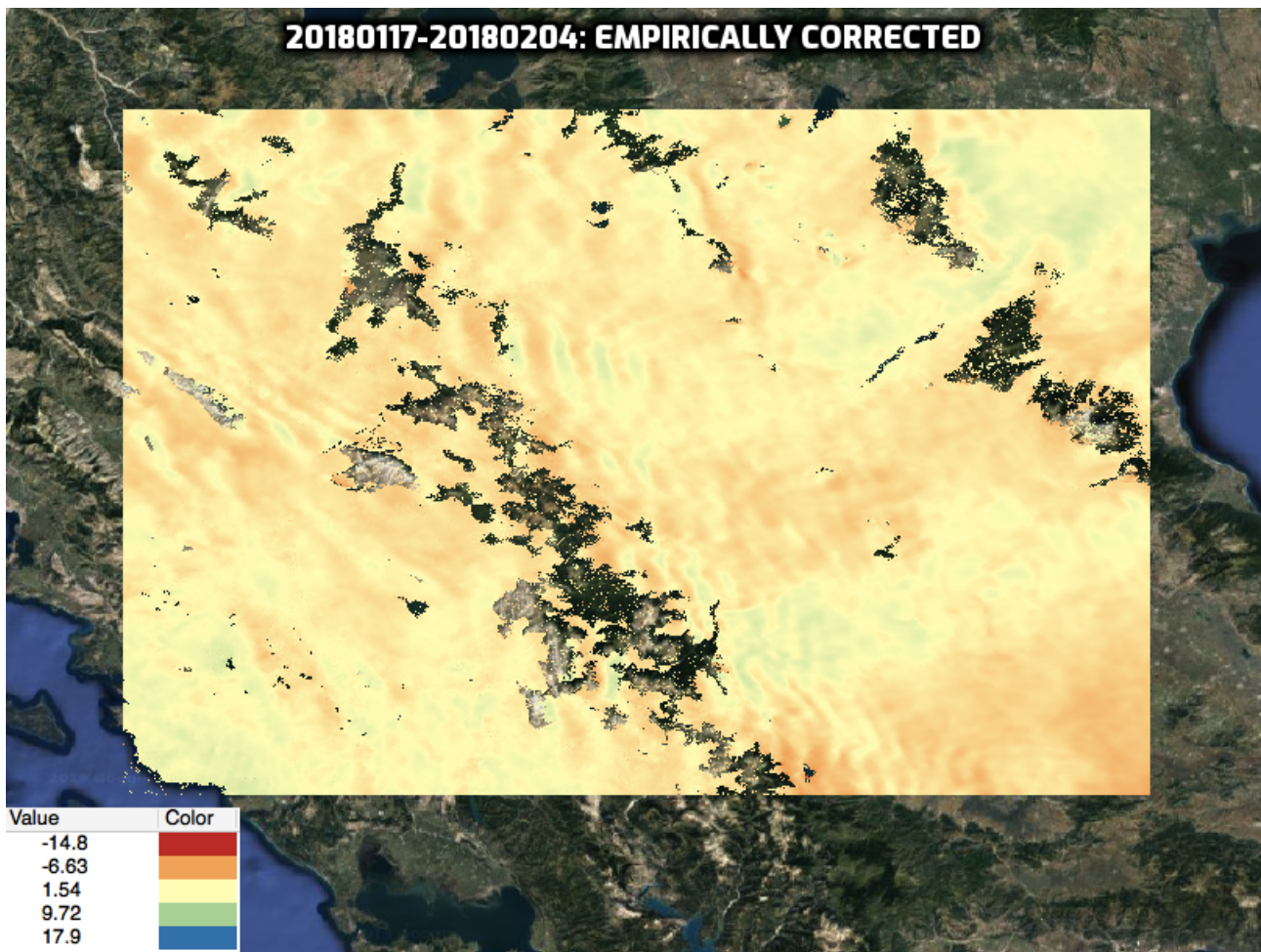
Εικόνα 4.10: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.9



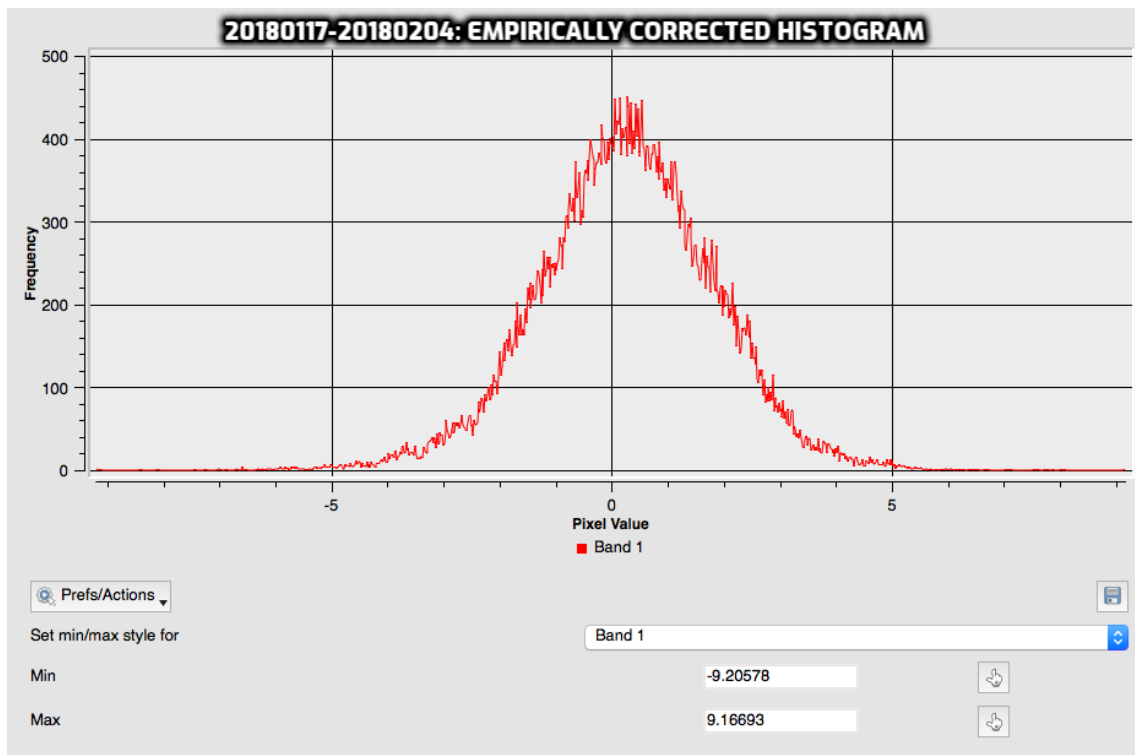
Εικόνα 4.11: Delay map (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=0.59957481095921



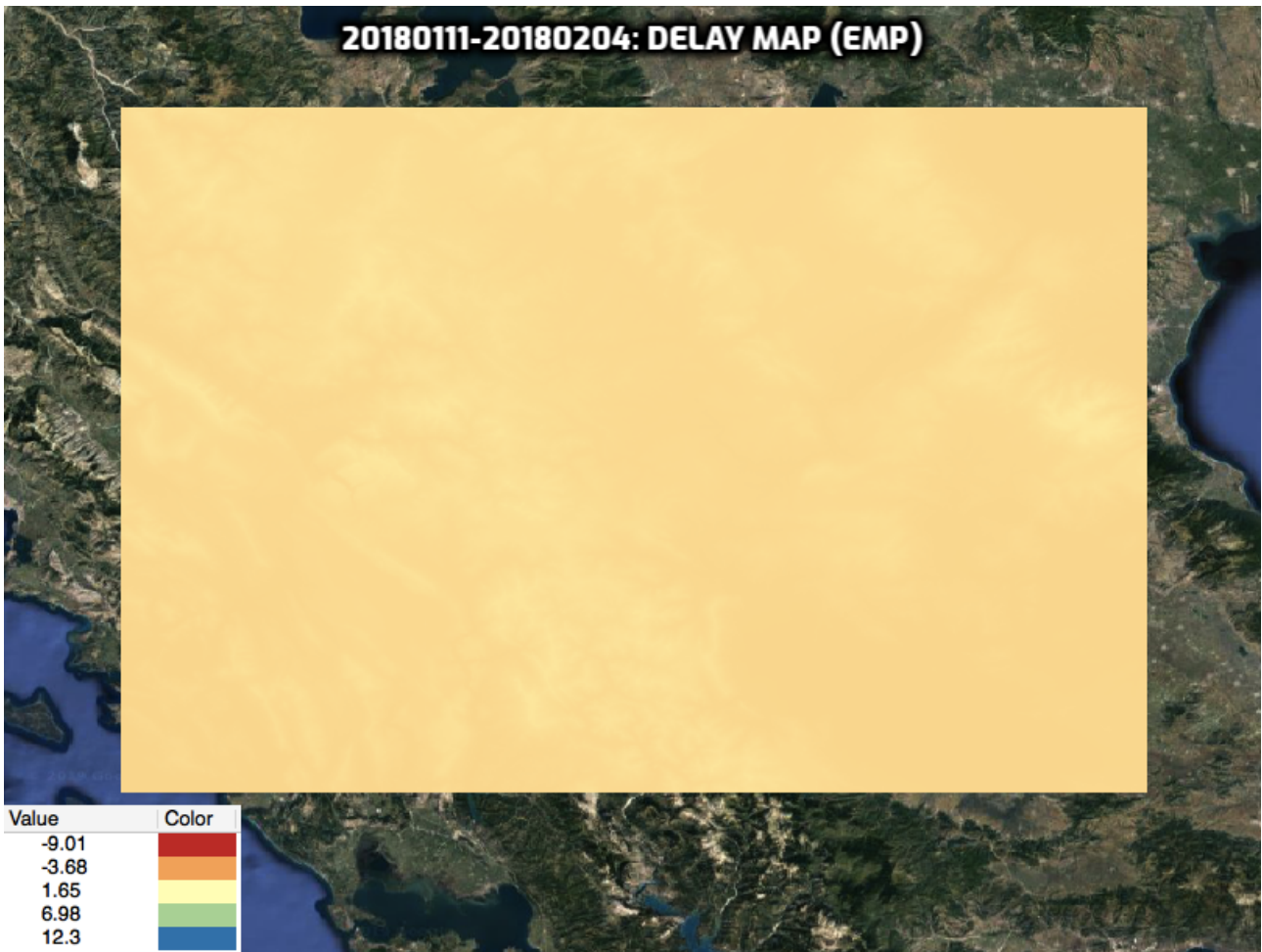
Εικόνα 4.12: Ιστογράμμο της εικόνας 4.11



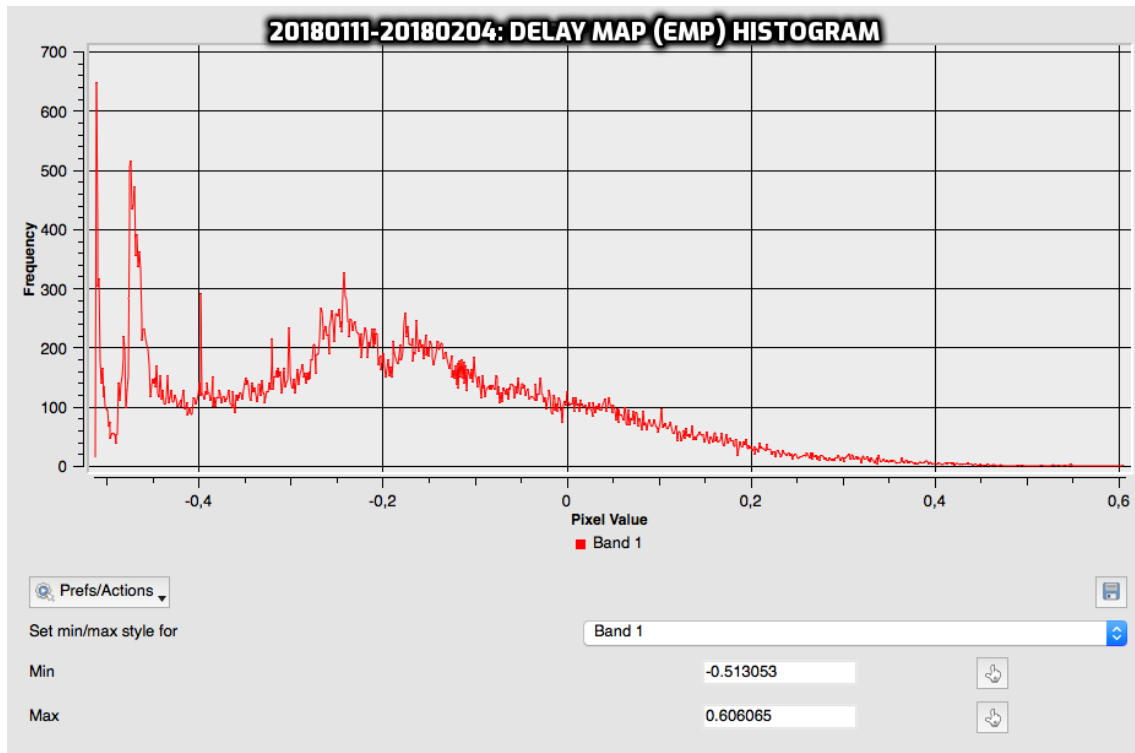
Εικόνα 4.13: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=1.5714742158899



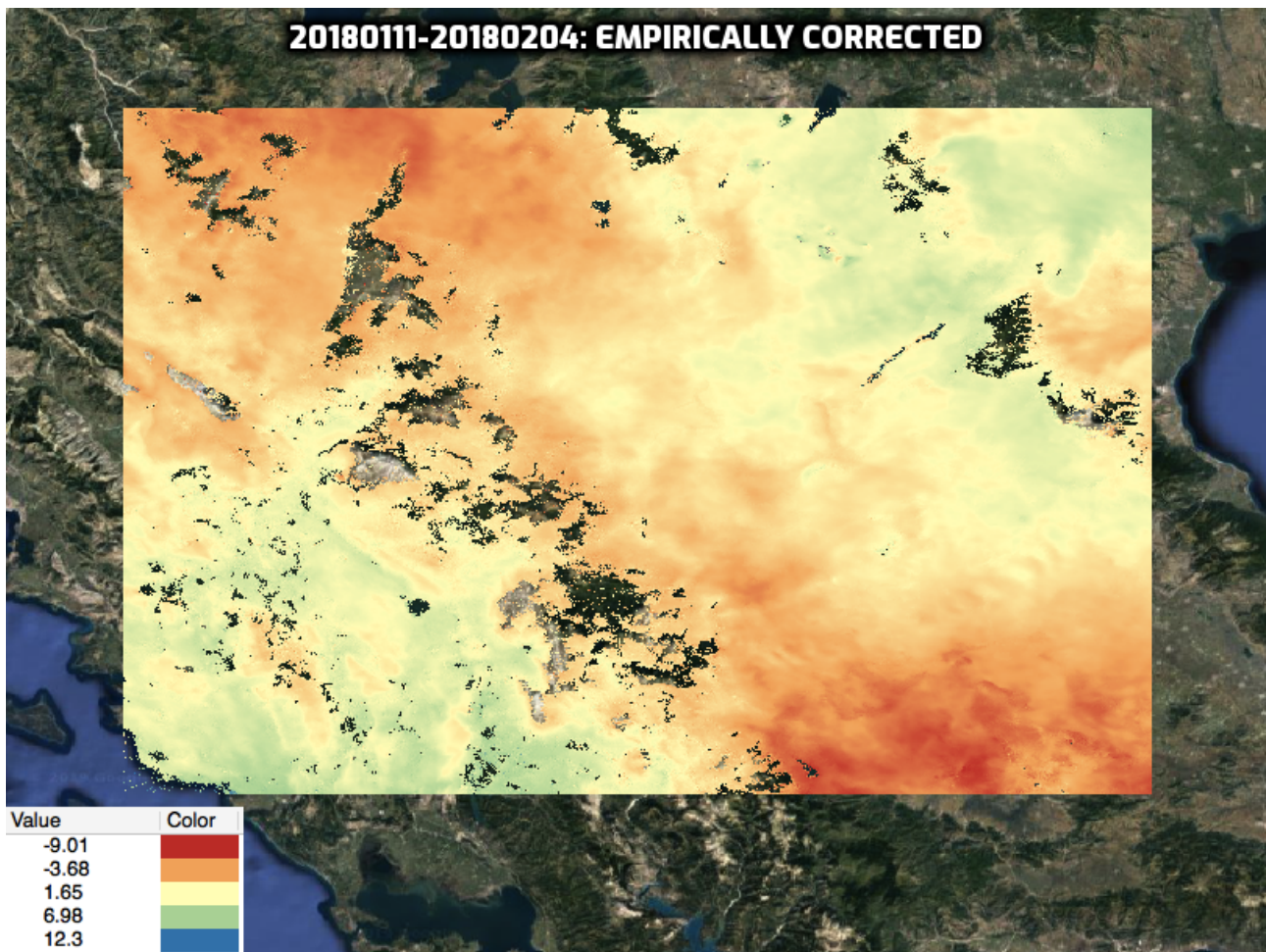
Εικόνα 4.14: Ιστογράμμο της εικόνας 4.13



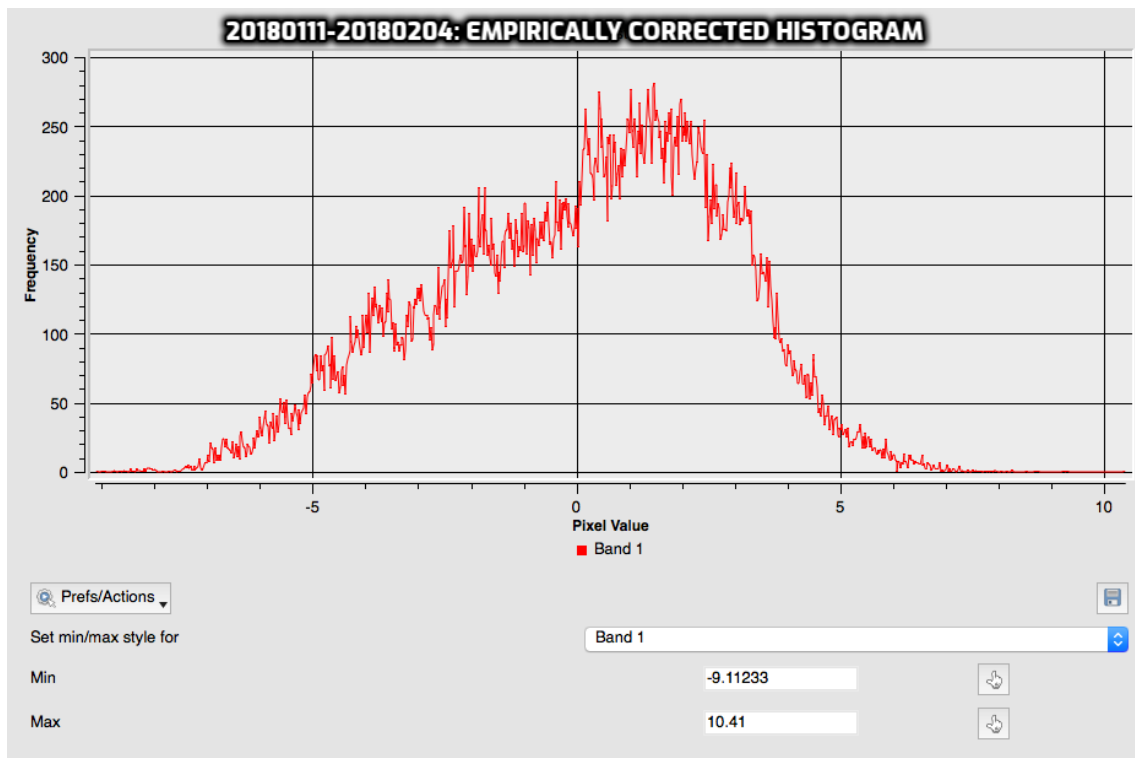
Εικόνα 4.15: Delay map (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=0.19777683437954



Εικόνα 4.16: Ιστογράμμα της εικόνας 4.15



Εικόνα 4.17: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.7130118761962



Εικόνα 4.18: Ιστογράμμο της εικόνας 4.17

Κεφάλαιο 5 - Η διόρθωση με το ERA5

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διόρθωση των συμβολογραμμάτων με βάση δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο ERA5.

5.1 Επιλογή δεδομένων

Το ERA5 παρέχει δεδομένα για τις μεταβλητές που φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 5.1: Μεταβλητές του ERA5

MAIN VARIABLES	
Name	Units
Divergence	s^{-1}
Fraction of cloud cover	(0 - 1)
Geopotential	$m^2 s^{-2}$
Ozone mass mixing ratio	$kg kg^{-1}$
Potential vorticity	$K m^2 kg^{-1} s^{-1}$
Relative humidity	%
Specific cloud ice water content	$kg kg^{-1}$
Specific cloud liquid water content	$kg kg^{-1}$
Specific humidity	$kg kg^{-1}$
Specific rain water content	$kg kg^{-1}$
Specific snow water content	$kg kg^{-1}$
Temperature	K
U-component of wind	$m s^{-1}$
V-component of wind	$m s^{-1}$
Vertical velocity	$Pa s^{-1}$
Vorticity (relative)	s^{-1}

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή είναι οι εξής:

- Specific humidity (Ειδική υγρασία)
- Geopotential (Γεωδυναμικό)
- Temperature (Θερμοκρασία)

Η υγρασία (humidity) αναφέρεται στην ποσότητα των υδρατμών (water vapor) που περιέχονται στον αέρα. Μπορεί να εκφραστεί είτε ως απόλυτη υγρασία (absolut humidity) είτε ως σχετική υγρασία (relative humidity).

Η απόλυτη υγρασία είναι το σύνολο των υδρατμών που περιέχονται σε συγκεκριμένο όγκο αέρα. Με άλλα λόγια, ισούται με τη μάζα των υδρατμών διαιρεμένη με τον όγκο του αέρα (gr υδρατμών/ cm^3 αέρα). Για παράδειγμα, για κορεσμένο αέρα στους $30^{\circ}C$ η απόλυτη υγρασία κυμαίνεται απο 0 έως $30 gr/m^3$.

Η σχετική υγρασία είναι συνάρτηση τόσο των υδρατμών όσο και της θερμοκρασίας. Ισούται με την ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα διαιρεμένη με τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που θα μπορούσε να περιέχει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία. Δηλαδή, η σχετική υγρασία εκφράζεται πάντα με ποσοστό. Για παράδειγμα, η σχετική υγρασία εμφανίζεται με 100% αν ο αέρας είναι κορεσμένος με υδρατμούς και με 0% αν ο αέρας δεν περιέχει καθόλου υδρατμούς.

Όσον αφορά στην ειδική υγρασία (specific humidity), αυτή ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχει ένα σωματίδιο αέρα προς τη συνολική μάζα του σωματιδίου. Είναι καθαρός αριθμός, χωρίς δηλαδή μονάδες μέτρησης.

Το γεωδυναμικό ύψος είναι μια κατακόρυφη συντεταγμένη, που αναφέρεται στην απόσταση από την Μέση Στάθμη Θάλασσας (Μ.Σ.Θ.). Πρόκειται για μια «βελτίωση» του γεωμετρικού υψομέτρου, χρησιμοποιώντας τη μεταβλητότητα της επιτάχυνσης της βαρύτητας αναλογικά με το γεωγραφικό πλάτος, με το υψόμετρο και με την τοπική γεωλογία της περιοχής. Συνήθως, γίνεται αναφορά στο γεωδυναμικό ύψος ενός συγκεκριμένου επιπέδου πίεσης, το οποίο αντιστοιχεί στο ύψος στο οποίο εμφανίζεται αυτό το μέγεθος πίεσης.

Το γεωδυναμικό σε ένα ύψος h ορίζεται ως εξής:

$$\Phi(h) = \int_0^h g(\varphi, z) dz$$

όπου $g(\varphi, z)$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας στο συγκεκριμένο σημείο, φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του σημείου και z είναι το γεωμετρικό υψόμετρό του.

Συνεπώς, το γεωδυναμικό ύψος ορίζεται ως:

$$Z_g(h) = \frac{\Phi(h)}{g_0}$$

όπου το γεωδυναμικό κανονικοποιείται με βάση το g_0 , την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας στη Μ.Σ.Θ..

Τέλος, όσον αφορά στη θερμοκρασία, αυτή αποτελεί μια φυσική ποσότητα που εκφράζει πόσο ψυχρός ή πόσο θερμός είναι ο αέρας. Μετρείται είτε σε Kelvin (K), είτε σε Fahrenheit (°F), είτε σε Celsius (°C).

5.2 Κώδικας και αποτελέσματα

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας είναι το PyAPS (Python based Atmospheric Phase Screen Estimation), το οποίο είναι αναρτημένο στο Github. Η σελίδα με την περιγραφή του λογισμικού είναι η:

<http://earthdef.caltech.edu/projects/pyaps/wiki/Main>

Και η δουλειά είναι των:

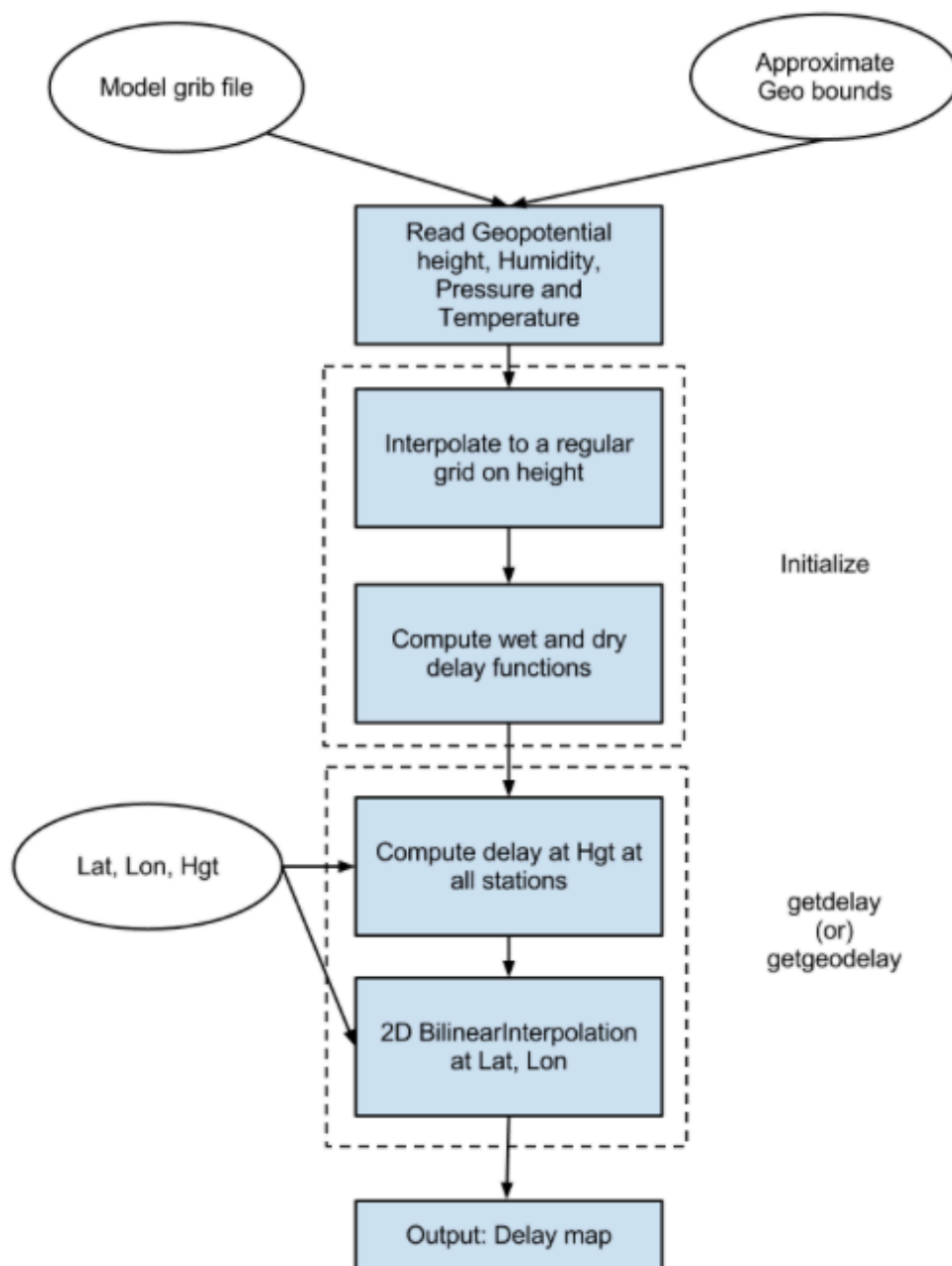
- Jolivet, R., R. Grandin, C. Lasserre, M.-P. Doin and G. Peltzer (2011), Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17311, doi:10.1029/2011GL048757
- Jolivet, R., P. Agram and C. Liu, Python-based Atmospheric Phase Screen estimation - User Guide (2012), <http://earthdef.caltech.edu>

Η ανάλυση του κώδικα

Στις επόμενες σελίδες αναλύεται η λειτουργία του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε. Στο παρακάτω πλαίσιο καταγράφεται περιληπτικά το σύνολο της επεξεργασίας των δεδομένων μέσω του κώδικα, η οποία συνοδεύεται από το διάγραμμα ροής της σελίδας 67. Έπειτα, ξεκινά μια προσπάθεια ανάλυσης του κάθε βήματος ξεχωριστά, με τα αντίστοιχα αποσπάσματα του κώδικα να παρατίθενται.

Για να μοντελοποιηθεί η καθυστέρηση της φάσης σε μονή διαδρομή σε μία λήψη μία χρονική στιγμή t_i , εξάγονται τα κατακόρυφα προφίλ της θερμοκρασίας, της μερικής πίεσης των υδρατμών και του γεωδυναμικού ύψους από το ατμοσφαιρικό μοντέλο στην εγγύτερη χρονική στιγμή με την t_i σε κάθε σημείο του κανάβου. Ύστερα, μέσω των εξισώσεων (1.2) και (1.3) υπολογίζονται οι επιδράσεις της υδροστατικής και της υγρής συνιστώσας αντίστοιχα, σε κάθε σημείο του κανάβου. Τέλος, εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή στην κατακόρυφη διεύθυνση για τον υπολογισμό της καθυστέρησης στο υψόμετρο του κάθε pixel και διγραμμική παρεμβολή στην οριζόντια διεύθυνση. Έτσι, προκύπτουν χάρτες καθυστέρησης για κάθε στιγμή λήψης και με το συνδυασμό τους ανά δύο, εξάγεται ο χάρτης καθυστέρησης που αντιστοιχεί σε κάθε συμβολόγραμμα [Jolivet et al., 2011].

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής (πηγή:<http://earthdef.caltech.edu/projects/pyaps/files>) που περιγράφει σχηματικά τη διαδικασία που μόλις εξηγήθηκε.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής

Βήμα 1ο

Τα δεδομένα λήφθηκαν αυτόματα/προγραμματιστικά (από τον οργανισμό ECMWF) σε μορφή αρχείων grib. Για την απόκτηση των δεδομένων αυτών χρησιμοποιήθηκε το script “autoget.py”, τμήμα του οποίου φαίνεται εδώ:

```
# CASE 1: request for CDS API client (new ECMWF platform, for ERA-5)
if model in 'ERA5':
    url = 'https://cds.climate.copernicus.eu/api/v2'
    key = config.get('CDS', 'key')

    # Contact the server
    c = cdsapi.Client(url=url, key=key)

    # Pressure levels
    pressure_lvls = ['1', '2', '3', '5', '7', '10', '20', '30', '50',
                    '70', '100', '125', '150', '175', '200', '225',
                    '250', '300', '350', '400', '450', '500', '550',
                    '600', '650', '700', '750', '775', '800', '825',
                    '850', '875', '900', '925', '950', '975', '1000']

    # Dictionary
    indict = {'product_type' : 'reanalysis',
              'format'       : 'grib',
              'variable'     : ['geopotential', 'temperature', '{}'.format(humidparam)],
              'pressure_level' : pressure_lvls,
              'year'         : '{}'.format(day[0:4]),
              'month'        : '{}'.format(day[4:6]),
              'day'          : '{}'.format(day[6:8]),
              'time'         : '{}:00'.format(hr)}

    # download a geographical area subset
    if snwe is not None:
        s, n, w, e = snwe
        indict['area'] = '/'.join(['{:2f}'.format(x) for x in [n, w, s, e]])

    # Assert grib file not yet downloaded
    if not os.path.exists(fname):
        print('Downloading %d of %d: %s'%(k+1, len(bdate), fname))
        print(indict)

    # Make the request
    c.retrieve('reanalysis-{}-pressure-levels'.format(model.lower()), indict, target=fname)
```

Εικόνα 5.1: autoget.py

Βήμα 2ο

Για να «διαβαστούν» τα αρχεία grib χρησιμοποιήθηκε το script “era.py” και συγκεκριμένα η συνάρτηση “get_ecmwf”, απόσπασμα της οποίας φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

Επιπλέον, μέσω της ίδιας συνάρτησης υπολογίζεται η μερική πίεση των υδρατμών της ατμόσφαιρας για κάθε σημείο για το οποίο υπάρχουν δεδομένα θερμοκρασίας και πίεσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$P_{vpr}(z) = S_h(z)P(z) \frac{a}{1 + (a-1)S_h(z)} \quad \text{με} \quad a = \frac{R_v}{R_d}$$

Τα R_d και R_v είναι σταθερές και έχουν παρουσιαστεί στο εδάφιο 1.3. Η μεταβλητή $S_h(z)$ αναφέρεται την ειδική υγρασία συναρτήσει του υψομέτρου και στον κώδικα συμβολίζεται ως “temp”. Η μεταβλητή $P(z)$ αναφέρεται στην πίεση συναρτήσει του υψομέτρου και στον κώδικα συμβολίζεται ως “lvls”.

```

assert humidity in ('Q','R'), 'Undefined humidity field in get_era.'
assert model in ('ERA5', 'ERAINT', 'HRES'), 'Model not recognized.'
if verbose:
    print('PROGRESS: READING GRIB FILE')
if model in 'HRES':
    if verbose:
        print('INFO: USING PRESSURE LEVELS OF HRES DATA')
    lvls = np.array([1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150,
                    200, 250, 300, 400, 500, 600, 700,
                    800, 850, 900, 925, 950, 1000])
else:
    if verbose:
        print('INFO: USING PRESSURE LEVELS OF ERA-INT OR ERA-5 DATA')
    lvls = np.array([1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175,
                    200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775,
                    800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000])
nlvls = len(lvls)

alpha = cdic['Rv']/cdic['Rd']
gphind = np.arange(nlvls)*3

grbs = pygrib.open(fname)
grbs.seek(gphind[0])
grb = grbs.read(1)[0]
lats, lons = grb.latlons()
if model == 'ERA5':
    lons[lons < 0.] += 360.
g = cdic['g']

mask = ((lats > minlat) & (lats < maxlat)) & ((lons > minlon) & (lons < maxlon))
#extract indices
uu = [i for i in list(range(np.shape(mask)[0])) if any(mask[i,:])]
vv = [j for j in list(range(np.shape(mask)[1])) if any(mask[:,j])]

latlist = lats[uu,:][:,vv]
lonlist = lons[uu,:][:,vv]
#nsth = len(lat.flatten())
nlat, nlon = latlist.shape

###Create arrays for 3D storage
gph = np.zeros((nlvls, nlat, nlon)) #Potential height
tmp = gph.copy() #Temperature
vpr = gph.copy() #Vapor pressure
if verbose:
    print('INFO: IMAGE DIMENSIONS: {} LATITUDES AND {} LONGITUDES'.format(nlat, nlon))

lvls = 100.0*lvls #Conversion to absolute pressure

for i in range(nlvls):
    grbs.seek(gphind[i]) #Reading potential height.
    grb = grbs.read(3)
    gph[i,:,:] = grb[0].values[uu,:][:,vv]/g

    #Reading temperature
    temp = grb[1].values[uu,:][:,vv]
    tmp[i,:,:] = temp

    if humidity in ('R'): # Relative humidity
        esat = cc_era(temp,cdic)
        temp = grb[2].values[uu,:][:,vv]/100.0
        vpr[i,:,:] = temp*esat

    elif humidity in ('Q'): # Specific humidity
        val = grb[2].values
        temp = grb[2].values[uu,:][:,vv]
        vpr[i,:,:] = temp*lvls[i]*alpha/(1+(alpha - 1)*temp)

    else:
        assert 1==0, 'Undefined Humidity in get_ecmwf().'

return lvls, latlist, lonlist, gph, tmp, vpr

```

Εικόνα 5.2: era.py

Βήμα 3ο

Χρησιμοποιώντας το script “processor.py”, και συγκεκριμένα τη συνάρτηση “intP2H” υπολογίζονται, μέσω παρεμβολής, τιμές για την πίεση, για την θερμοκρασία και τους υδρατμούς σε 300 υψόμετρα, από τα 30 επίπεδα πίεσης του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Τμήμα της συνάρτησης αυτής φαίνεται εδώ:

```
minAlt = cdic['minAlt'] #Hardcoded parameter.
maxAlt = gph.max().round()
#print (lvls.shape, hgt.shape, gph.shape, tmp.shape, vpr.shape)
if verbose:
    print('PROGRESS: INTERPOLATING FROM PRESSURE TO HEIGHT LEVELS')
nlat = gph.shape[1] #Number of stations
nlon = gph.shape[2]
nhgt = len(hgt) #Number of height points
Presi = np.zeros((nlat, nlon, nhgt))
Tempi = np.zeros((nlat, nlon, nhgt))
Vpri = np.zeros((nlat, nlon, nhgt))
#print (Presi.shape, Tempi.shape, Vpri.shape)
for i in range(nlat):
    for j in range(nlon):
        temp = gph[:, i, j] #Obtaining height values
        hx = temp.copy()
        sFlag = False
        eFlag = False
        if (hx.min() > minAlt): #Add point at start
            sFlag = True
            hx = np.concatenate((hx, [minAlt-1]), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        if (hx.max() < maxAlt): #Add point at end
            eFlag = True
            hx = np.concatenate((maxAlt+1, hx), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        hx = -hx #Splines needs monotonically increasing.
        hy = lvls.copy() #Interpolating pressure values
        if (sFlag == True):
            val = hy[-1] + (hx[-1] - hx[-2]) * (hy[-1] - hy[-2]) / (hx[-2] - hx[-3])
            hy = np.concatenate((hy, [val]), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        if (eFlag == True):
            val = hy[0] - (hx[0] - hx[1]) * (hy[0] - hy[1]) / (hx[1] - hx[2])
            hy = np.concatenate((val, hy), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        tck = intp.interp1d(hx, hy, kind='cubic')
        temp = tck(-hgt) #Again negative for consistency with hx
        Presi[i, j, :] = temp.copy()
        del temp
        temp = tmp[:, i, j] #Interpolating temperature
        hy = temp.copy()
        if (sFlag == True):
            val = hy[-1] + (hx[-1] - hx[-2]) * (hy[-1] - hy[-2]) / (hx[-2] - hx[-3])
            hy = np.concatenate((hy, [val]), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        if (eFlag == True):
            val = hy[0] - (hx[0] - hx[1]) * (hy[0] - hy[1]) / (hx[1] - hx[2])
            hy = np.concatenate((val, hy), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        tck = intp.interp1d(hx, hy, kind='cubic')
        temp = tck(-hgt)
        Tempi[i, j, :] = temp.copy()
        del temp
        temp = vpr[:, i, j] #Interpolating vapor pressure
        hy = temp.copy()
        if (sFlag == True):
            val = hy[-1] + (hx[-1] - hx[-2]) * (hy[-1] - hy[-2]) / (hx[-2] - hx[-3])
            hy = np.concatenate((hy, [val]), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        if (eFlag == True):
            val = hy[0] - (hx[0] - hx[1]) * (hy[0] - hy[1]) / (hx[1] - hx[2])
            hy = np.concatenate((val, hy), axis=0) #changed from 1 to 0 (-1 should also work), CL
        tck = intp.interp1d(hx, hy, kind='cubic')
        temp = tck(-hgt)
        Vpri[i, j, :] = temp.copy()
        del temp
return Presi, Tempi, Vpri
```

Εικόνα 5.3: processor.py (1)

Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιείται για να λάβουν τιμές πίεσης, θερμοκρασίας και υδρατμών τα 300 νέα υψόμετρα είναι η τμηματική κυβική πολυωνμική παρεμβολή (cubic splines interpolation). Κατ' αρχάς, με τον όρο παρεμβολή εννοούμε ένα συγκεκριμένο τρόπο απόδοσης τιμών σε ορισμένα σημεία που βρίσκονται μεταξύ δύο σημείων μιας συνάρτησης με δεδομένες, γνωστές τιμές. Η προσέγγιση με την οποία θα δοθεί τιμή για τα σημεία αυτά, εν προκειμένω τα υψόμετρα, επιλέγεται να γίνει με πολυώνυμο έως τρίτου βαθμού. Βέβαια, μιας και μεταξύ κάθε δύο γνωστών σημείων παρεμβάλλεται διαφορετικό πολυώνυμο, θα υπάχουν και διαστήματα στα οποία το πολυώνυμο θα είναι μικρότερου (δευτέρου) βαθμού.

Βήμα 4ο

Μέσω της συνάρτησης “PTV2del” του ίδιου script, από τα δεδομένα πίεσης, θερμοκρασίας και υδρατμών υπολογίζονται τόσο η υδροστατική (dry) όσο και η υγρή (wet) συνιστώσα της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης του σήματος.

Συγκεκριμένα, έχουν χρησιμοποιηθεί οι σχέσεις της σελίδας 25. Τμήμα του κώδικα φαίνεται εδώ:

```

nhgt = len(hgt)          #Number of height points
nlat = Presi.shape[0]   #Number of stations
nlon = Presi.shape[1]
WonT = Vpri/Tempi
WonT2 = WonT/Tempi

k1 = cdict['k1']
Rd = cdict['Rd']
Rv = cdict['Rv']
k2 = cdict['k2']
k3 = cdict['k3']
g = cdict['g']

#Dry delay
DDry2 = np.zeros((nlat,nlon,nhgt))
DDry2[:, :, :] = k1*Rd*(Presi[:, :, :] - Presi[:, :, -1][:, :, np.newaxis])*1.0e-6/g

#Wet delay
S1 = intg.cumtrapz(WonT,x=hgt,axis=-1)
val = 2*S1[:, :, -1]-S1[:, :, -2]
val = val[:, :, None]
S1 = np.concatenate((S1,val),axis=-1)
del WonT

S2 = intg.cumtrapz(WonT2,x=hgt,axis=-1)
val = 2*S2[:, :, -1]-S2[:, :, -2]
val = val[:, :, None]
S2 = np.concatenate((S2,val),axis=-1)
DWet2 = -1.0e-6*((k2-k1*Rd/Rv)*S1+k3*S2)

for i in range(nlat):
    for j in range(nlon):
        DWet2[i,j,:] = DWet2[i,j,:] - DWet2[i,j,-1]

return DDry2,DWet2

```

Εικόνα 5.4: processor.py (2)

Βήμα 5ο

Η συνάρτηση “get_delay” του script “ryapsobj.py” αναλαμβάνει να υλοποιήσει τη διγραμμική παρεμβολή (bilinear interpolation), ώστε από τις διακριτές τιμές που εξάγονται από το μοντέλο σε μορφή κανάβου, να παραχθούν οι χάρτες καθυστέρησης του σήματος. Τμήμα της συνάρτησης αυτής φαίνεται εδώ:

```
#####
# BILINEAR INTERPOLATION

# Create the 1d interpolator to interpolate delays in altitude direction
if self.verb:
    print('PROGRESS: FINE INTERPOLATION OF HEIGHT LEVELS')
intp_1d = si.interp1d(self.hgt, self.Delfn, kind='cubic', axis=-1)

# Interpolate the delay function every meter, for each station
self.dem[np.isnan(self.dem)] = minAltp
self.dem[self.dem < minAltp] = minAltp
minH = np.max([np.nanmin(self.dem*self.mask), self.hgt.min()])
maxH = int(np.nanmax(self.dem*self.mask) + 100.
kh = np.arange(minH,maxH)
self.Delfn_1m = intp_1d(kh)
self.alti = kh

# no reshape
Lonu = self.lonlist[0,:]
Latu = self.latlist[:,0]

# Create the cube interpolator for the bilinear method, to interpolate delays into a grid (x,y,z)
if self.verb:
    print('PROGRESS: CREATE THE BILINEAR INTERPOLATION FUNCTION')

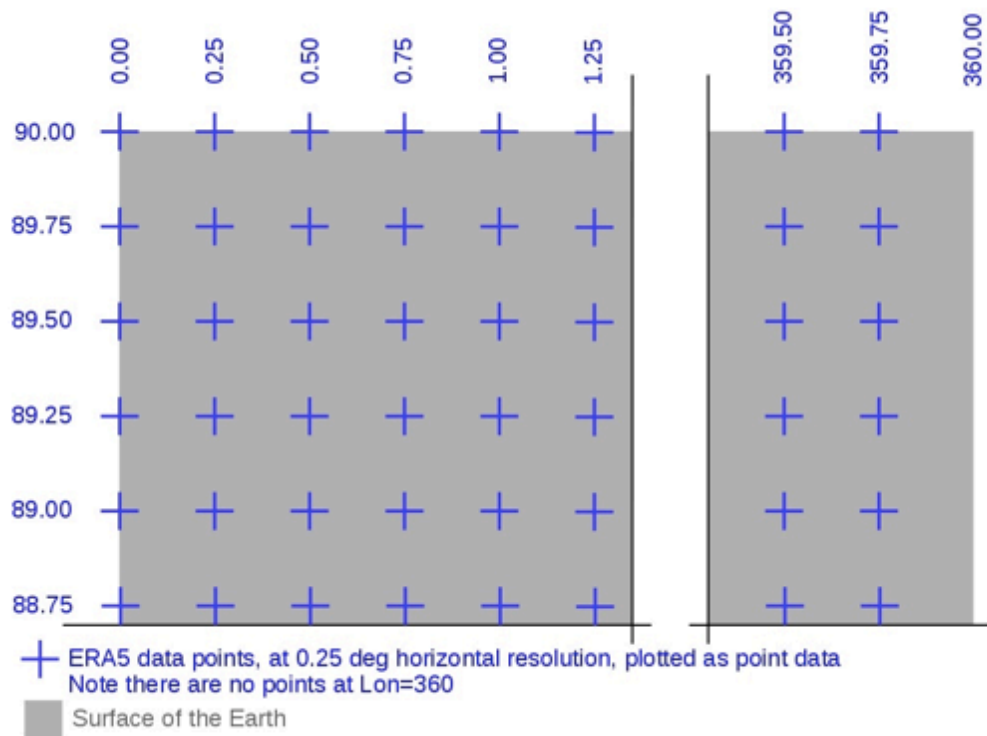
# Define a linear interpolating function on the 3D grid: ((x, y, z), data)
# We do the weird trick of [::-1, :, :] because Latu has to be in increasing order
# for the RegularGridInterpolator method of scipy.interpolate
linearint = si.RegularGridInterpolator((Latu[::-1], Lonu, kh),
self.Delfn_1m[::-1, :, :],
method='linear',
bounds_error=False,
fill_value = 0.0)
```

Εικόνα 5.5: ryapsobj.py

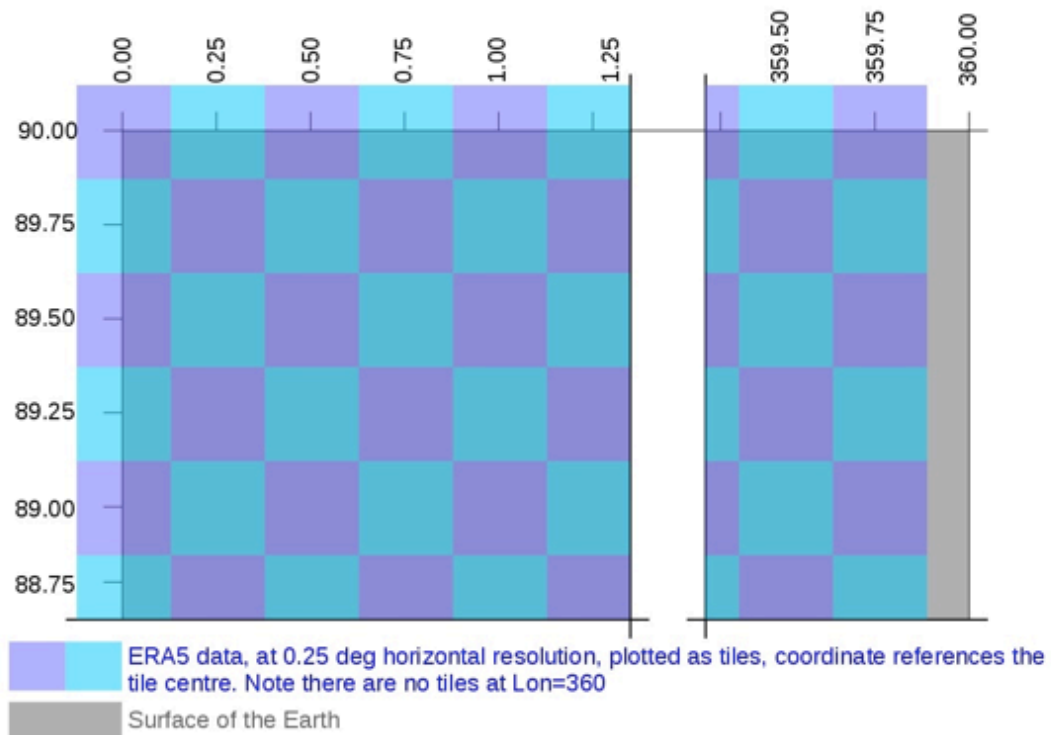
Ως γνωστόν, όλα τα δεδομένα του ατμοσφαιρικού μοντέλου, είναι διαθέσιμα σε διακριτά σημεία, στην επιφάνεια ενός κανάβου. Αυτό ακριβώς φαίνεται και στην εικόνα 5.6 της επόμενης σελίδας. Στην εικόνα 5.7, αναπαριστάται το ίδιο μοτίβο, ως pixel αυτή τη φορά, με τα δεδομένα του μοντέλου να αναφέρονται πάντα στο κέντρο του κάθε pixel.

Στη σελίδα 74 δίνεται ένα παράδειγμα με pixels τυχαίων τιμών, για να γίνει απολύτως σαφής η διαδικασία ανάθεσης τιμών σε όλα τα pixels με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής, ώστε να προκύψουν τελικά οι χάρτες καθυστέρησης φάσης με συνεχείς τιμές.

Η παρουσίαση των χαρτών καθυστέρησης και των αντίστοιχων διορθωμένων εικόνων γίνεται στις σελίδες 75-80 του κεφαλαίου. Στην πρώτη (20180111_20180117) και στη δεύτερη περίπτωση (20180117_20180204) τα αποτελέσματα αποκλείουν αρκετά από τα αντίστοιχα που προέκυψαν με την εμπειρική μέθοδο. Αντίθετα, στην τρίτη (20180111_20180204) περίπτωση η διόρθωση φαίνεται να συμφωνεί σε μεγαλύτερο βαθμό με την εμπειρική διόρθωση. Αξίζει, τέλος να σημειωθεί πως ο ανεξάρτητος δείκτης της τυπικής απόκλισης (STATISTICS_STDDEV) των εικόνων αυξάνεται και στις τρεις εικόνες, χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα πως η διόρθωση με τη χρήση του ατμοσφαιρικού μοντέλου απέτυχε.



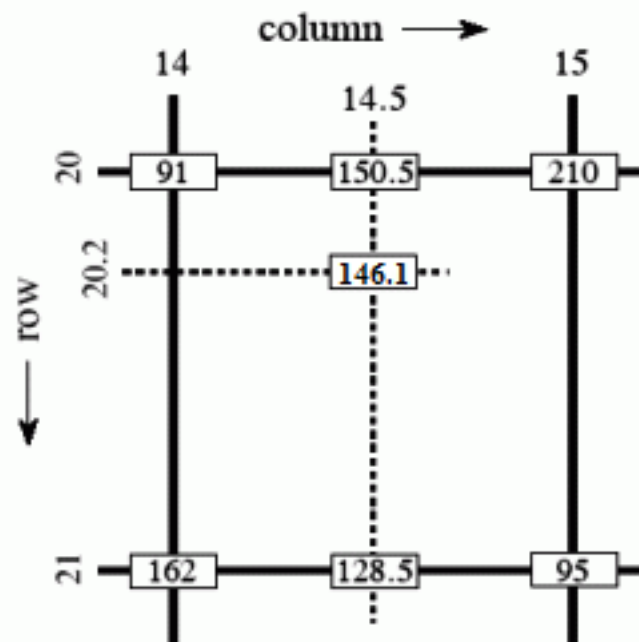
Εικόνα 5.6: Σημεία δεδομένων του ERA5 (1)



Εικόνα 5.7: Σημεία δεδομένων του ERA5 (2)

Παράδειγμα: Εφαρμογή διγραμμικής παρεμβολής στην επεξεργασία εικόνων

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τέσσερα pixels με τιμές 91, 210, 162 και 95. Στόχος είναι να εξηγηθεί πως υπολογίστηκε η τιμή 146.1 που δόθηκε σε ένα ενδιάμεσο pixel.



Εικόνα 5.8: Διγραμμική παρεμβολή

Αρχικά, πραγματοποιείται η πρώτη ($I_{(1)}^x$) γραμμική παρεμβολή στην οριζόντια (column) διεύθυνση:

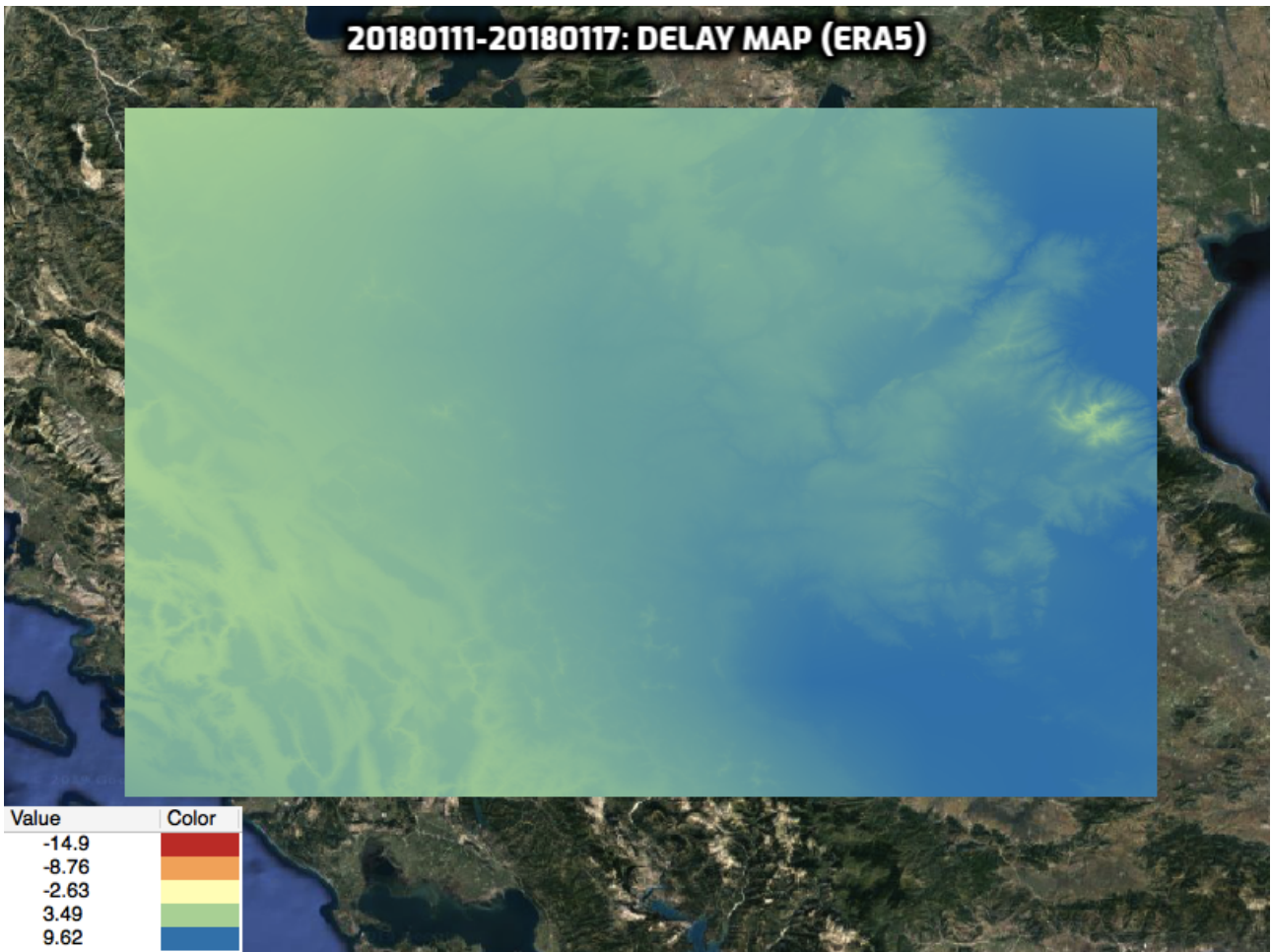
$$I_{(1)}^x = \frac{15-14.5}{15-14} \times 91 + \frac{14.5-14}{15-14} \times 210 = 150.5$$

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η δεύτερη ($I_{(2)}^x$) γραμμική παρεμβολή στην οριζόντια (column) διεύθυνση:

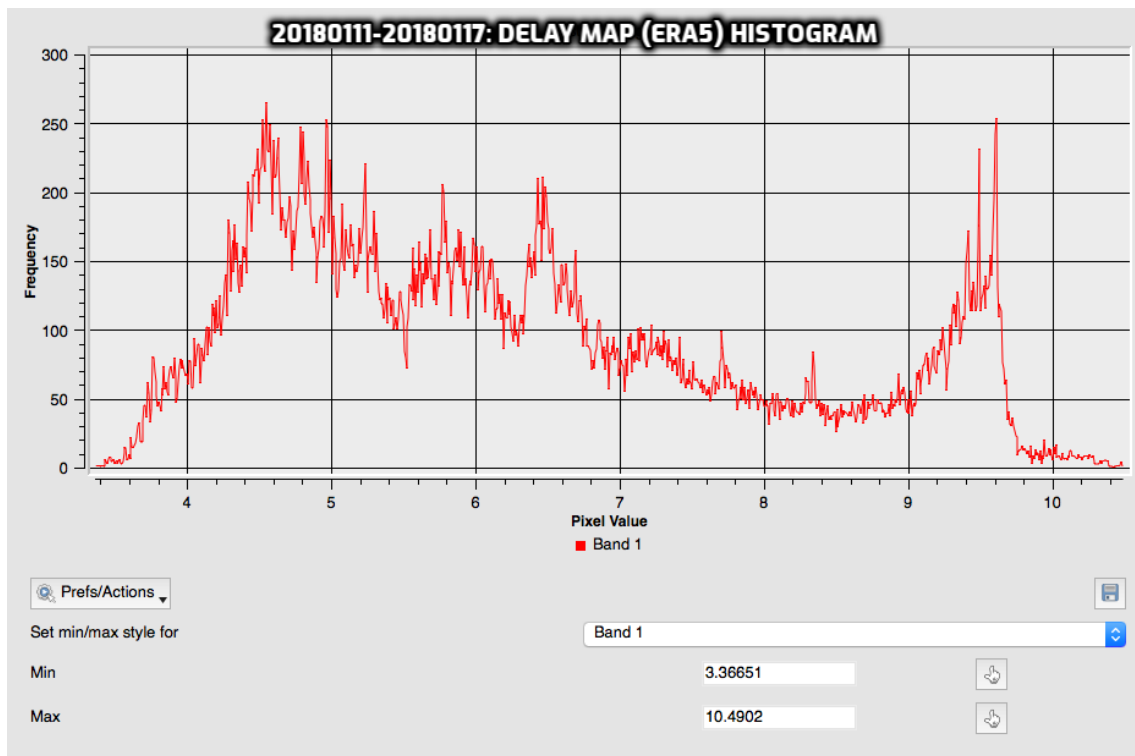
$$I_{(2)}^x = \frac{15-14.5}{15-14} \times 162 + \frac{14.5-14}{15-14} \times 93 = 128.5$$

Τέλος, πραγματοποιείται μία γραμμική παρεμβολή (I^y) στην κατακόρυφη (row) διεύθυνση μεταξύ των νέων τιμών που υπολογίστηκαν προηγουμένως:

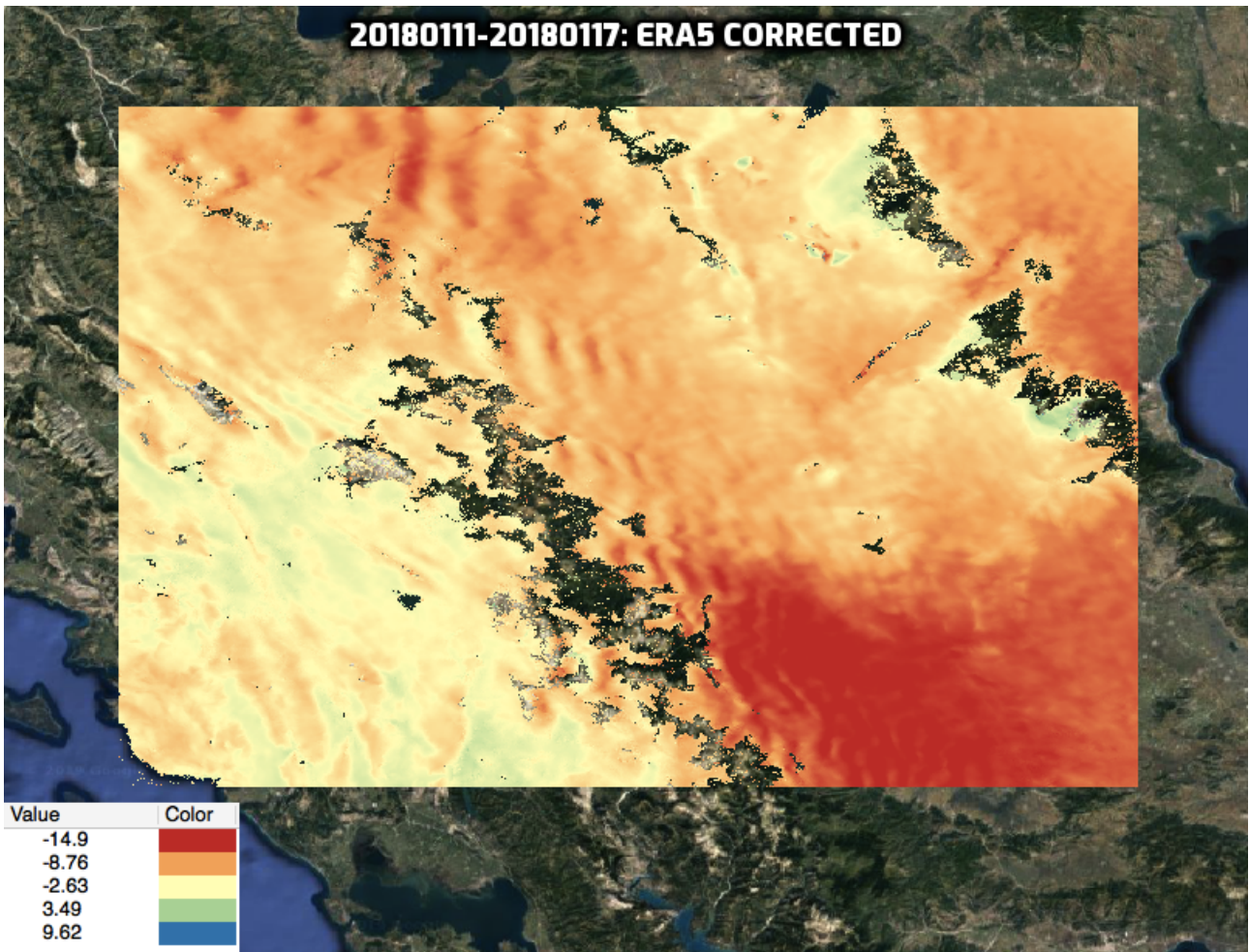
$$I^y = \frac{21-20.2}{21-20} \times 150.5 + \frac{20.2-20}{21-20} \times 128.5 = 146.1$$



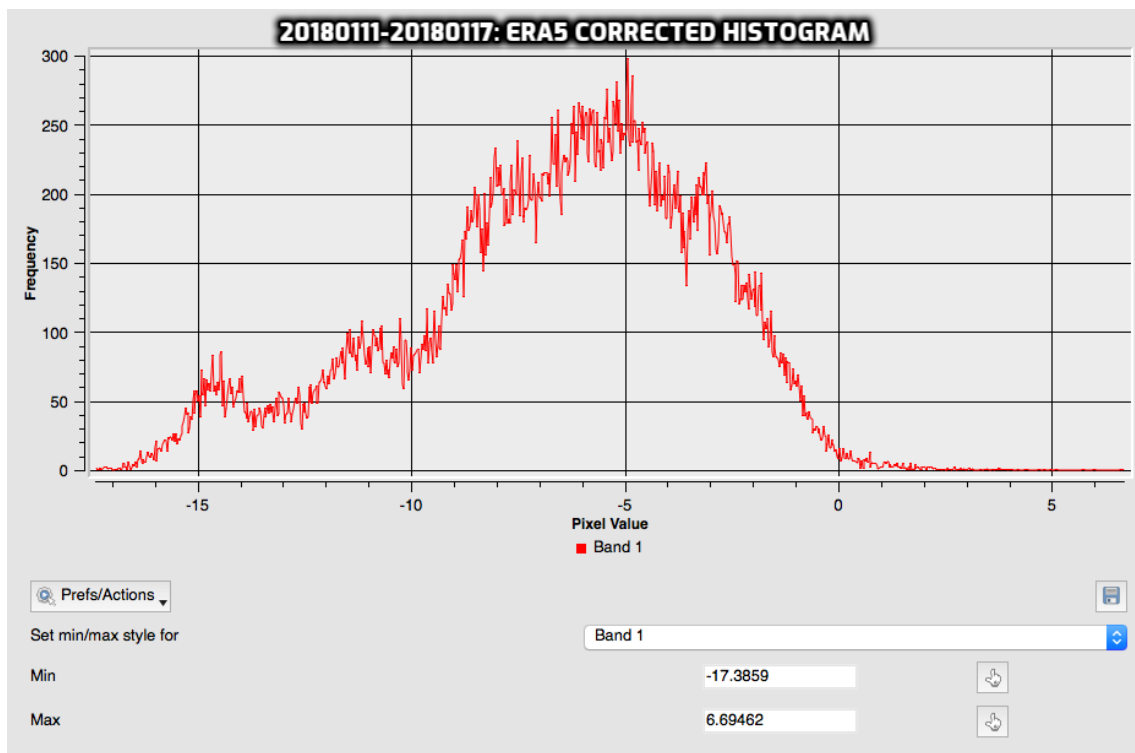
Εικόνα 5.9: Delay map (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=1.6986383298523



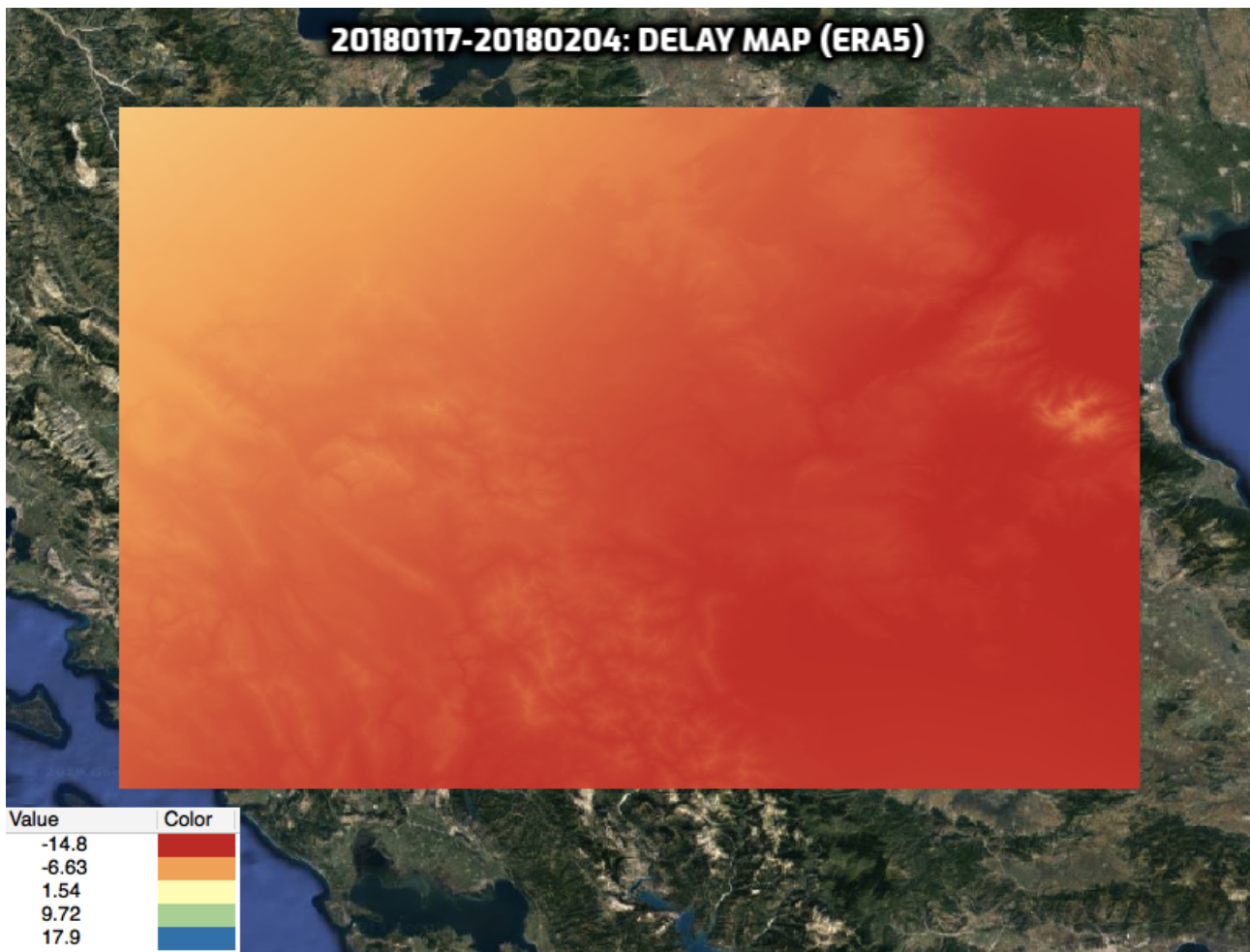
Εικόνα 5:10: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.9



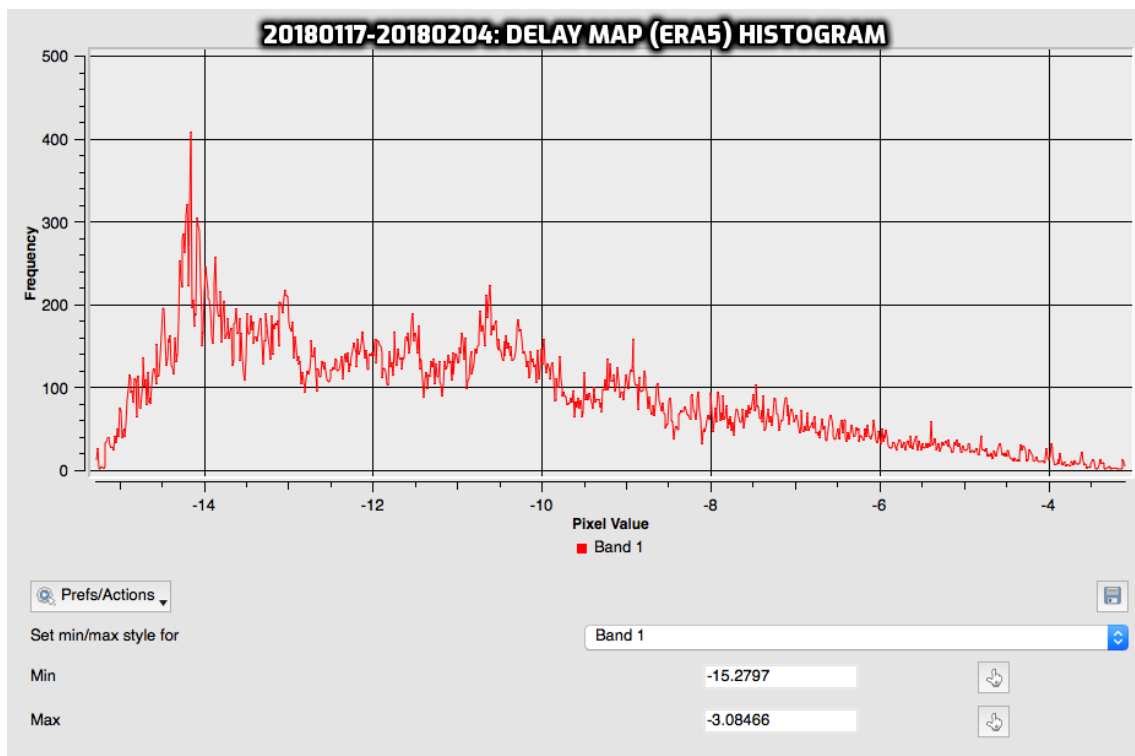
Εικόνα 5.11: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=3.5316514811622



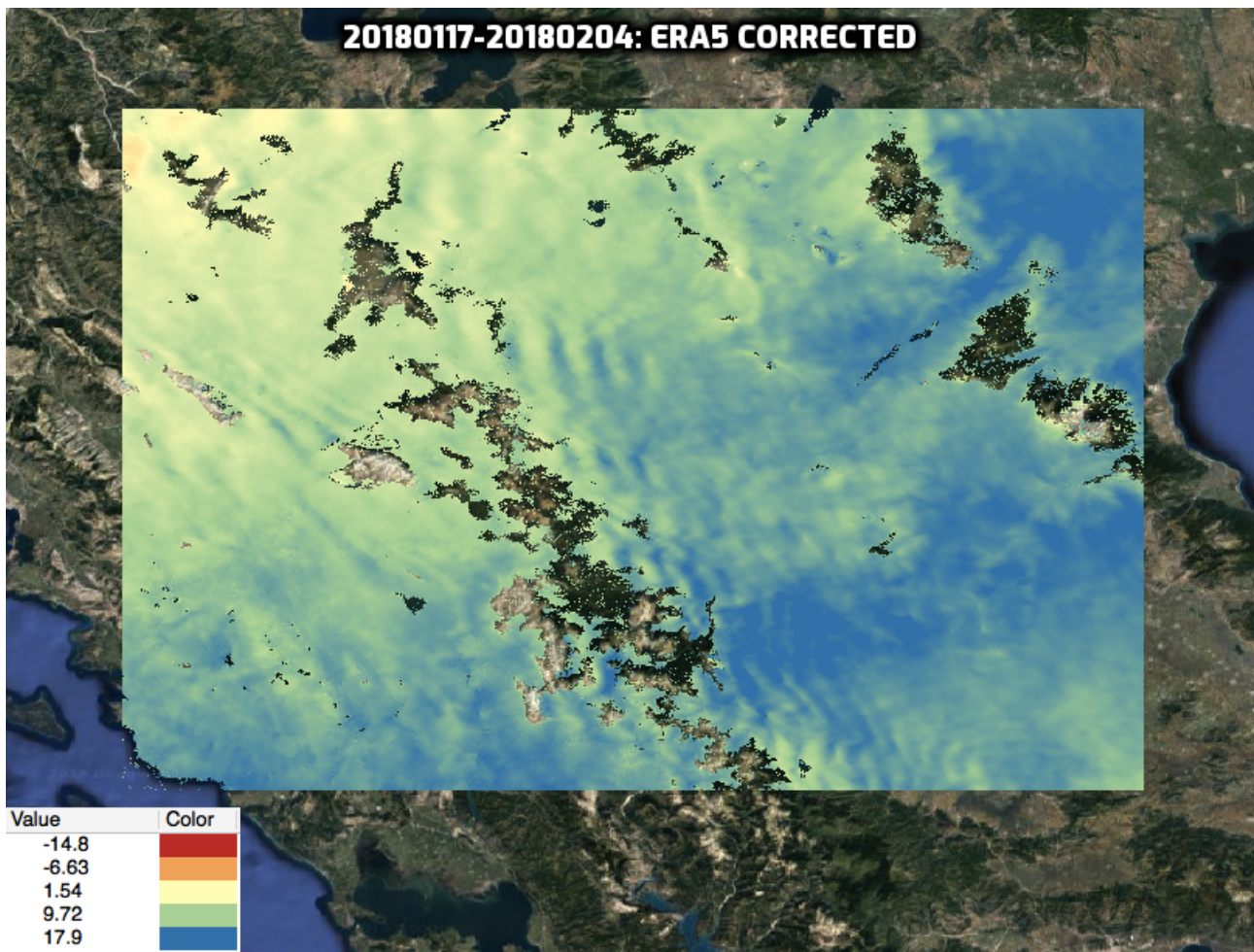
Εικόνα 5.12: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.11



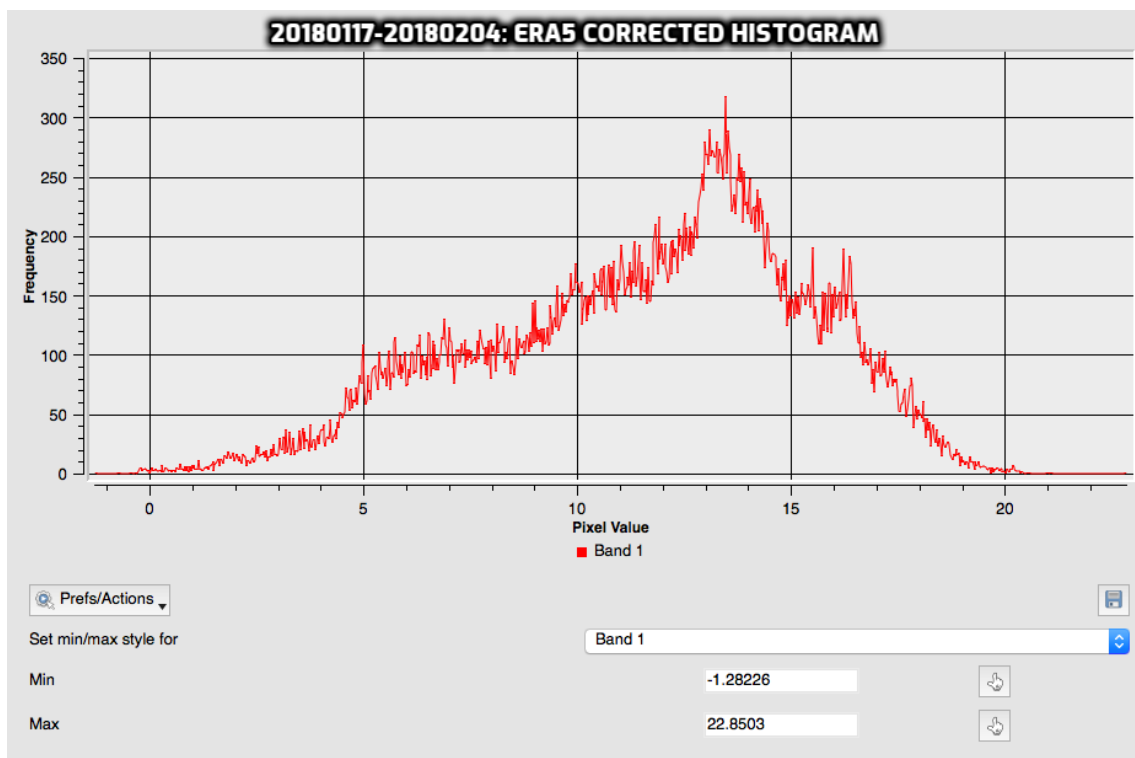
Εικόνα 5.13: Delay map (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.709141795858



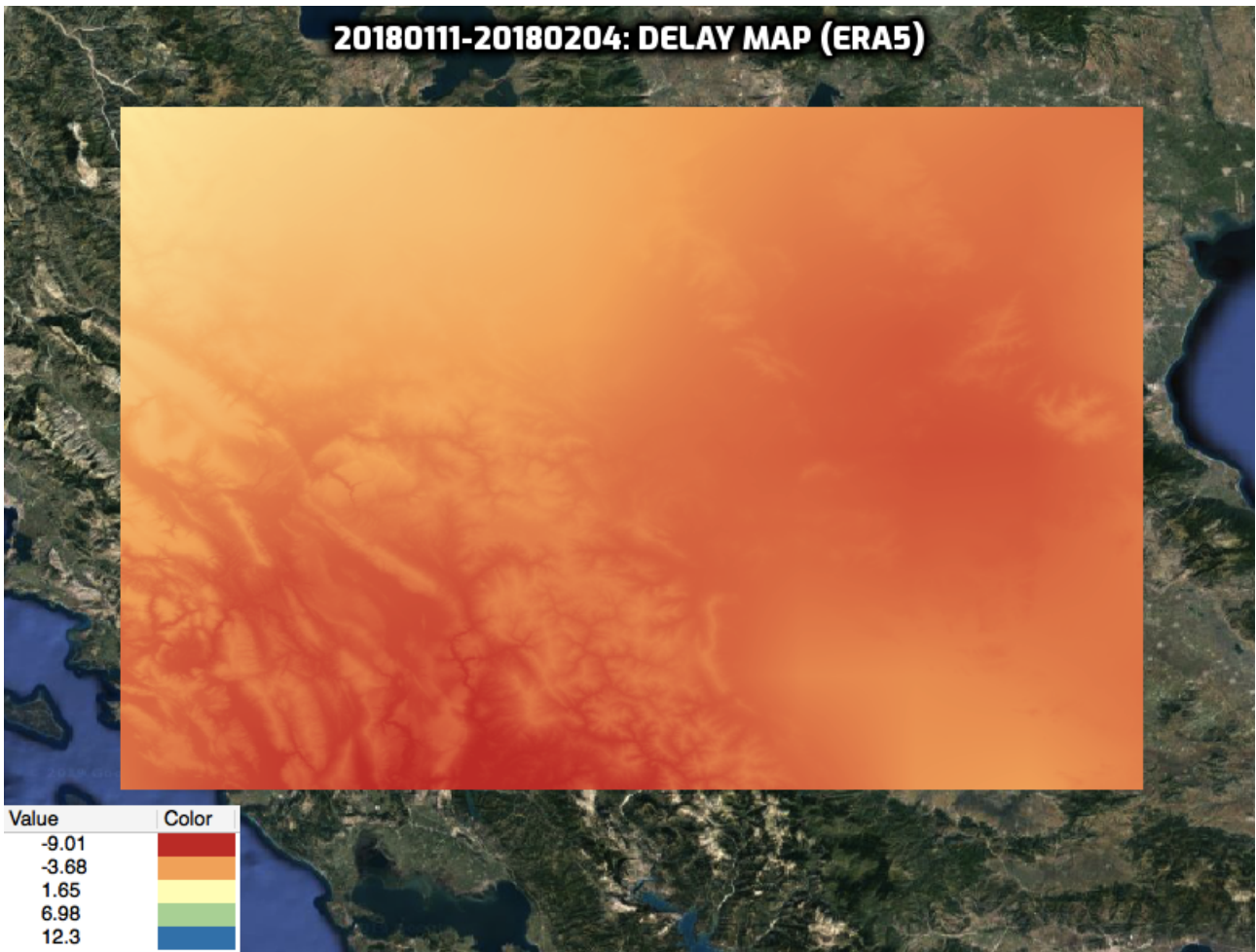
Εικόνα 5.14: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.13



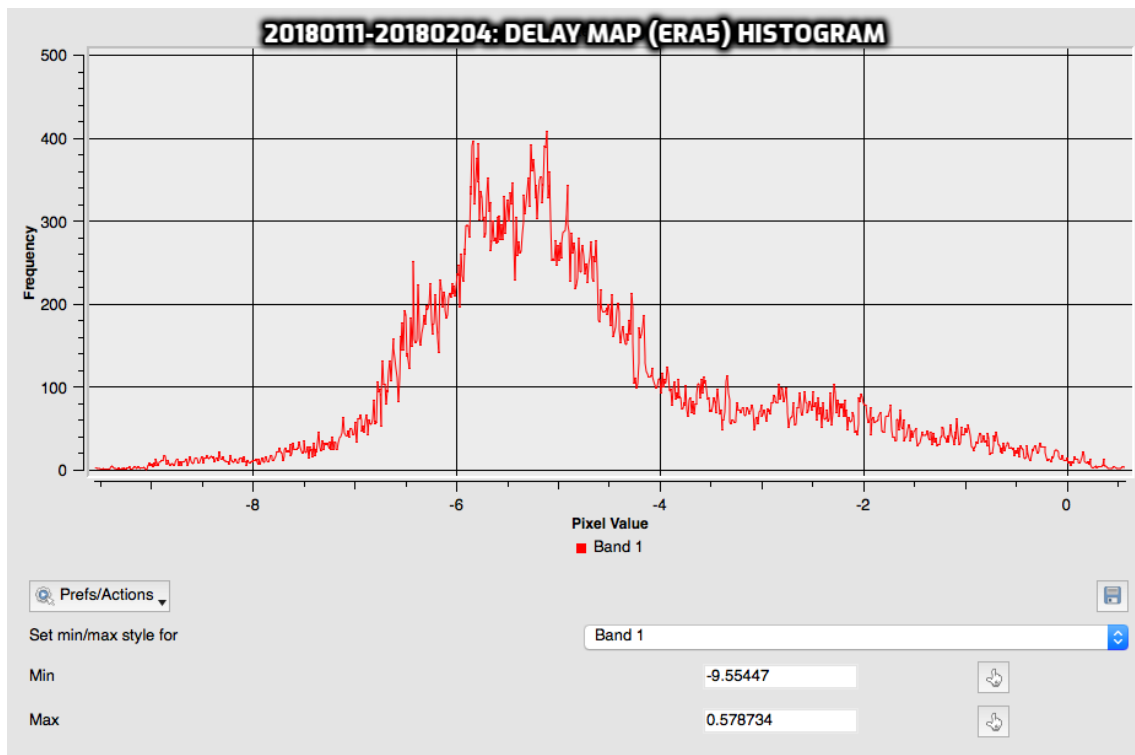
Εικόνα 5.15: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=3.7645261800301



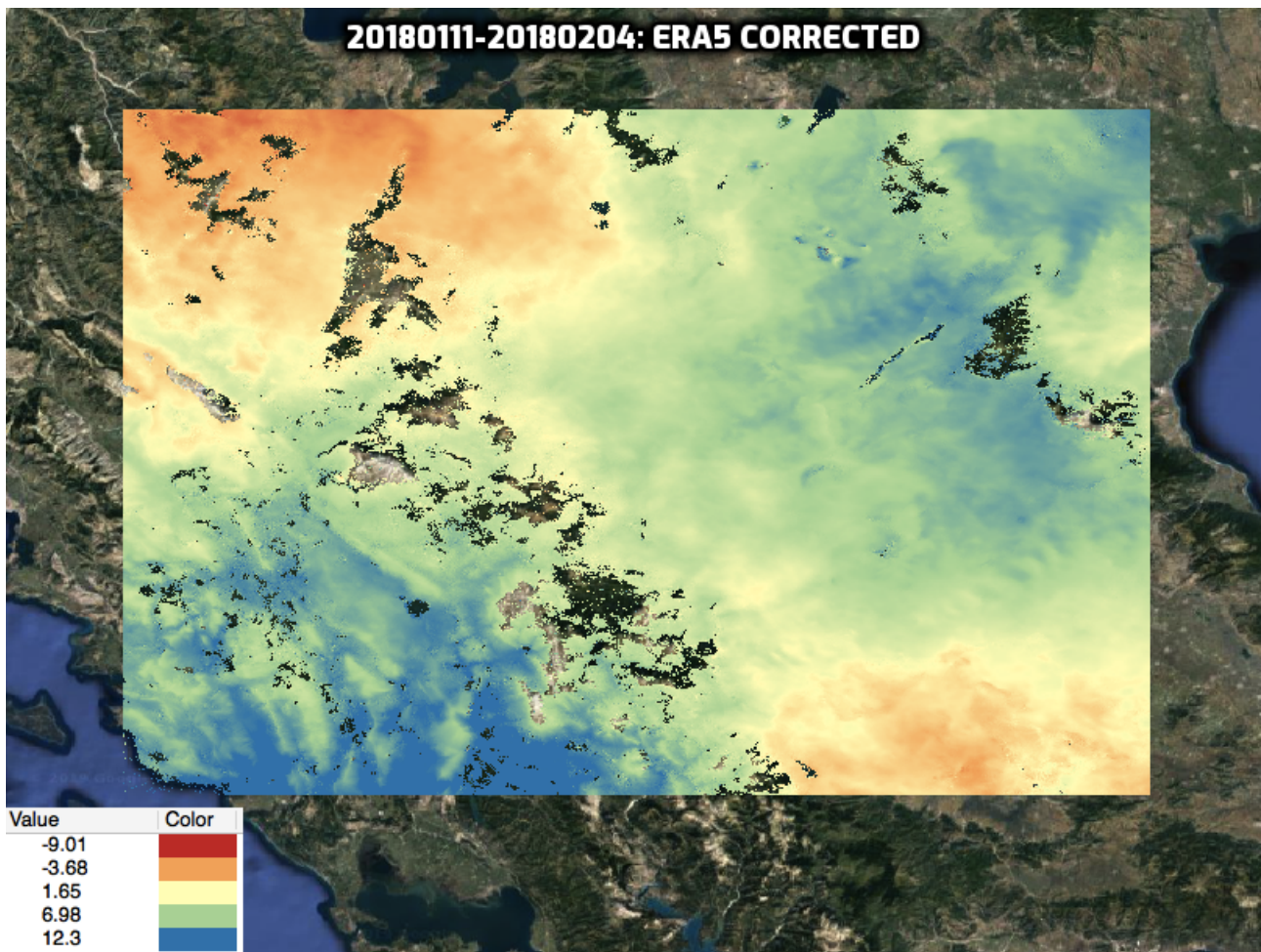
Εικόνα 5.16: Ιστογράμμο της εικόνας 5.15



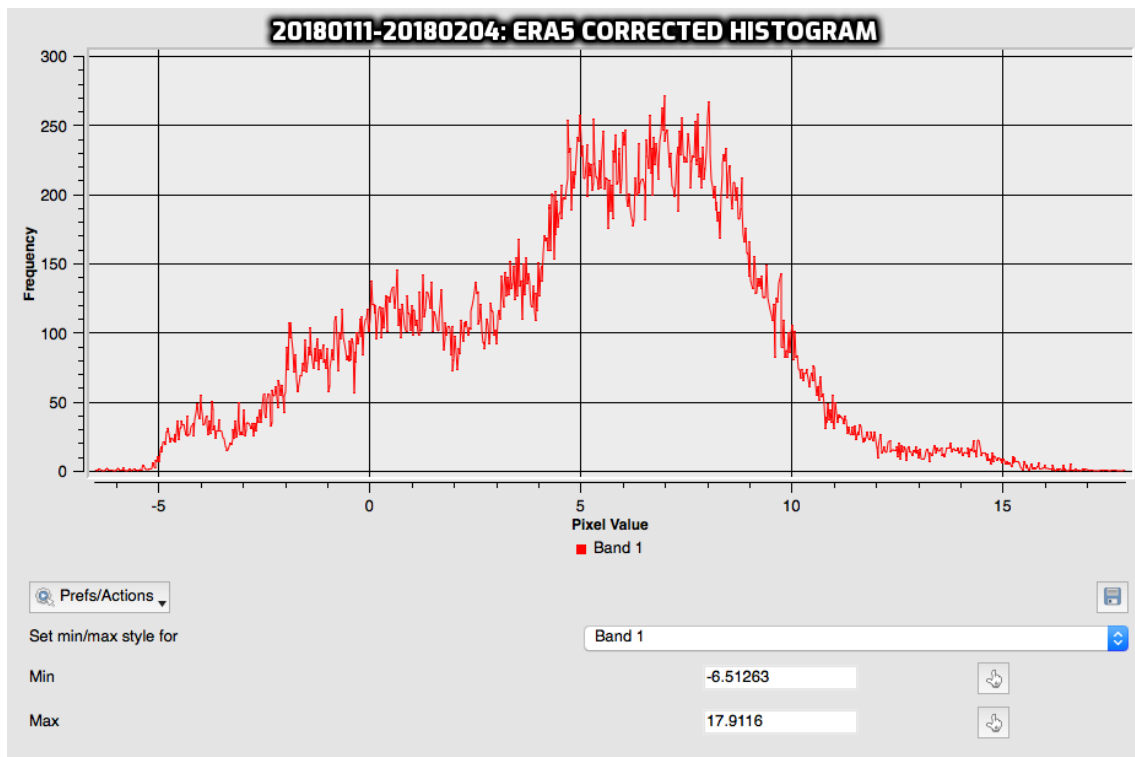
Εικόνα 5.17: Delay map (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=1.6509631646113



Εικόνα 5.18: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.17



Εικόνα 5.19: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=3.9434449481756



Εικόνα 5.20: Ιστογράμμο της εικόνας 5.19

Κεφάλαιο 6 - Η διόρθωση με το GPS

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διόρθωση των συμβολογραμμάτων με βάση μετρήσεις GPS. Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται είναι δανεισμένα από μια προηγούμενη εργασία για την ίδια περιοχή μελέτης, του Υποψήφιου Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., κ. Καραμβάση.

6.1 Η Περιγραφή του μοντέλου

Οι σημειακές μετρήσεις GPS για τη ζενίθια συνολική καθυστέρηση (zenith total delay - ZTD) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως αυτά διαπερνούν τα στρώματα της ατμόσφαιρας μπορούν, με χρήση παρεμβολής, να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υψηλής ακρίβειας χαρτών υδρατμών, οι οποίοι με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση εικόνων SAR.

Αρκετές μελέτες έχουν επισημάνει την εξάρτηση της περιεκτικότητας των υδρατμών από το υψόμετρο, όμως, πολλές φορές είναι δύσκολο να διαχωριστεί η καθυστέρηση που οφείλεται στους υδρατμούς από την καθυστέρηση που οφείλεται στην ακανόνιστη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας. Οι χάρτες καθυστέρησης της εργασίας του κ. Καραμβάση που παρουσιάζονται εδώ, έχουν παραχθεί μέσω της πλατφόρμας GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR), η οποία παράγει χάρτες καθυστέρησης φάσης σε αρχεία δυαδικής μορφής (YYYYMMDD.ztd). Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα GACOS προέρχονται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο του ECMWF με χωρική ανάλυση 0.125° και χρονική διακριτική ικανότητα 6 ωρών και το SRTM DEM με χωρική ανάλυση 90m. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας είναι τα εξής:

- Έχει διαθέσιμα δεδομένα για όλες τις περιοχές της γης
- Λειτουργεί και διαθέτει δεδομένα σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο
- Είναι εύκολη στην εφαρμογή
- Ενημερώνει με μήνυμα τους χρήστες για το αν η ατμοσφαιρική διόρθωση που υπολογίστηκε συνιστάται να εφαρμοστεί

Η πλατφόρμα GACOS, για την παραγωγή των χαρτών καθυστέρησης χρησιμοποιεί το Επαναληπτικό Τροποσφαιρικό Αποσυνθετικό - ETA μοντέλο (Iterative Tropospheric Decomposition ITD model), το οποίο διαχωρίζει την καθυστέρηση της φάσης που οφείλεται στην στρωματοποίηση της τροπόσφαιρας και στην καθυστέρηση που οφείλεται στην ακανόνιστη συμπεριφορά της. Το ITD model παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους [Yu et al, 2017] και ορίστηκε ως εξής:

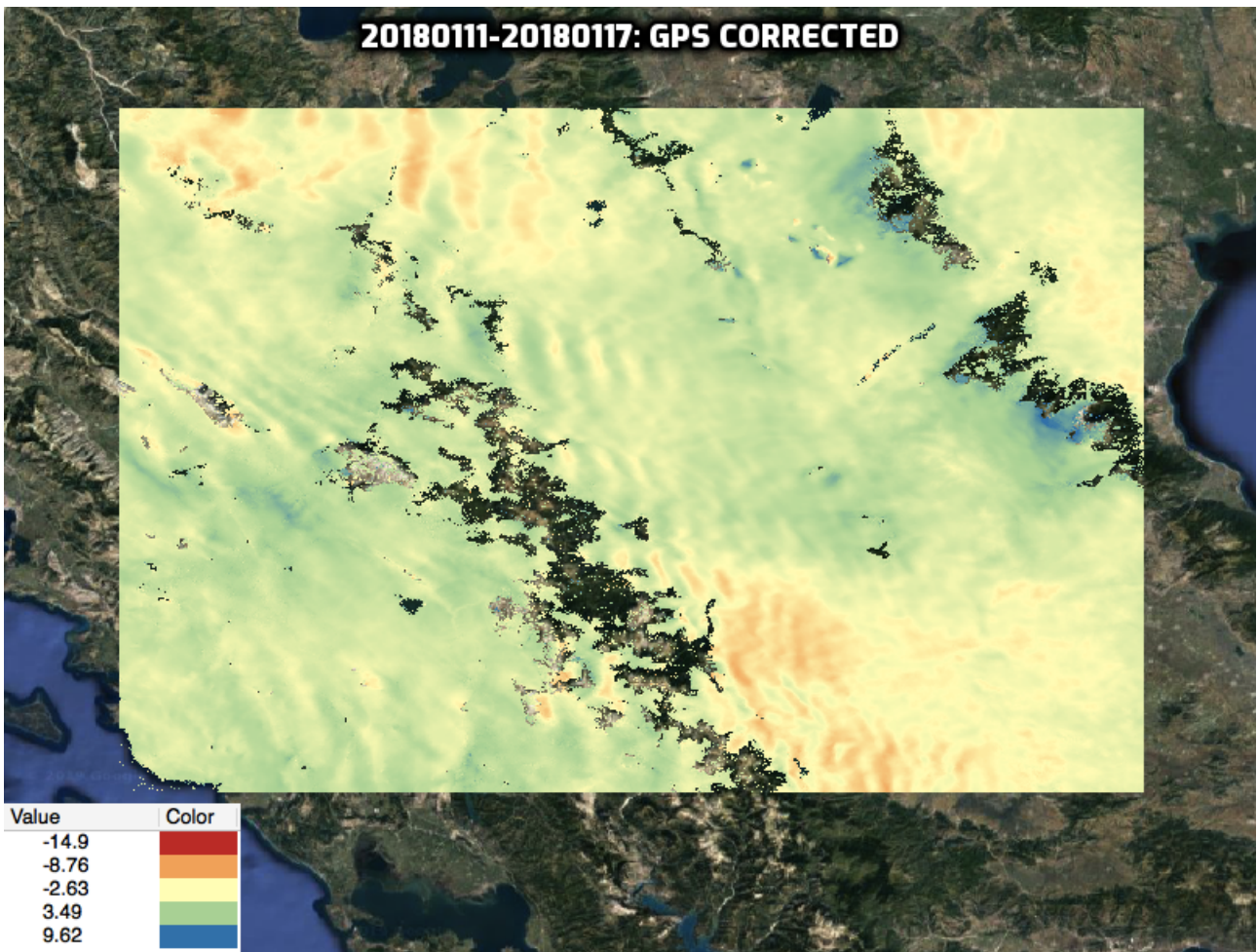
$$ZTD_k = T(x_k) + L_0 e^{-\beta \bar{h}_k} + \varepsilon_k$$

Στη σχέση αυτή, η καθυστέρηση στο σημείο k συμβολίζεται με ZTD_k , η ακανόνιστη συνιστώσα της ατμόσφαιρας συμβολίζεται με T και το διάνυσμα x_k είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου k στο τοπικό τοποκεντρικό σύστημα. Η συνιστώσα που οφείλεται στη στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας ορίζεται με μια εκθετική συνάρτηση με το συντελεστή β , ενώ με L_0 συμβολίζεται η αντίστοιχη τιμή της στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας. Το $\bar{h}_k = (h_k - h_{\min}) / (h_{\max} - h_{\min})$ είναι το σταθμισμένο ύψος και το ε_k αναφέρεται στα εναπομείναντα σφάλματα λόγω της ατμόσφαιρας.

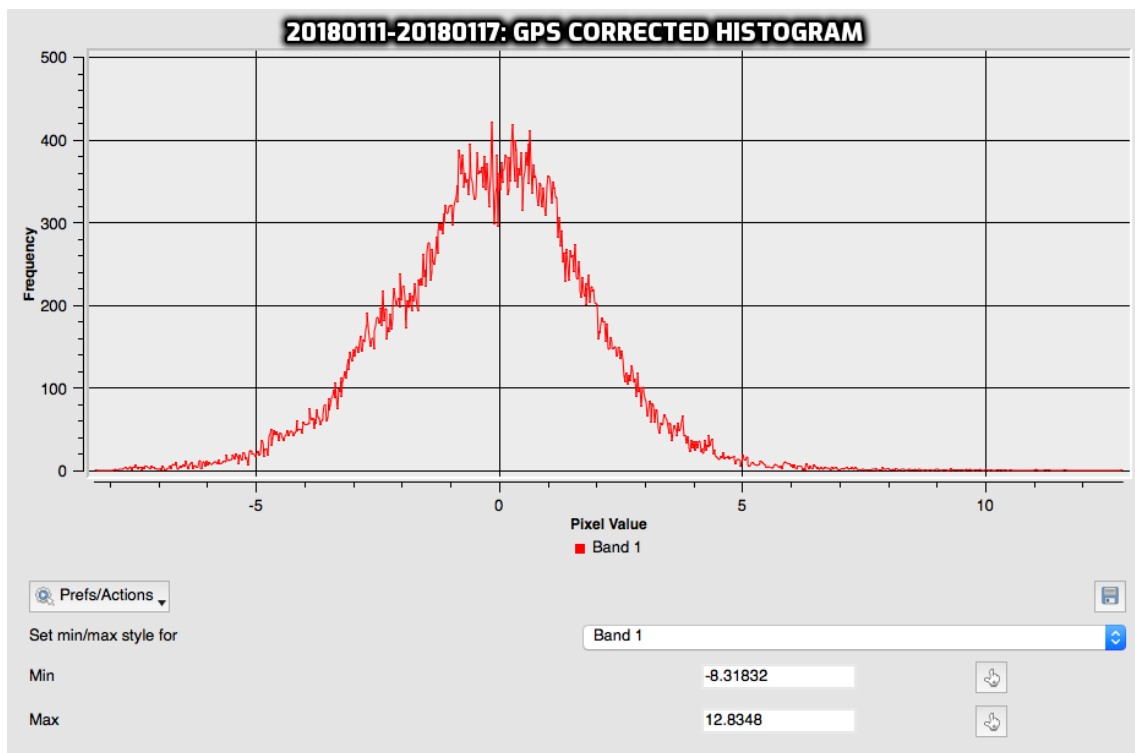
6.2 Αποτελέσματα της διόρθωσης με GPS

Όπως ήδη έχει γίνει σαφές, για αυτήν τη μέθοδο διόρθωσης θα παρουσιαστούν κατευθείαν τα αποτελέσματα, δηλαδή οι διορθωμένες εικόνες, μιας και η επεξεργασία έχει γίνει σε προηγούμενη εργασία του κ. Καραμβάση. Στις επόμενες σελίδες, λοιπόν, φαίνονται οι τρεις διορθωμένες μέσω μετρήσεων GPS εικόνες και τα αντίστοιχα ιστογράμματά τους.

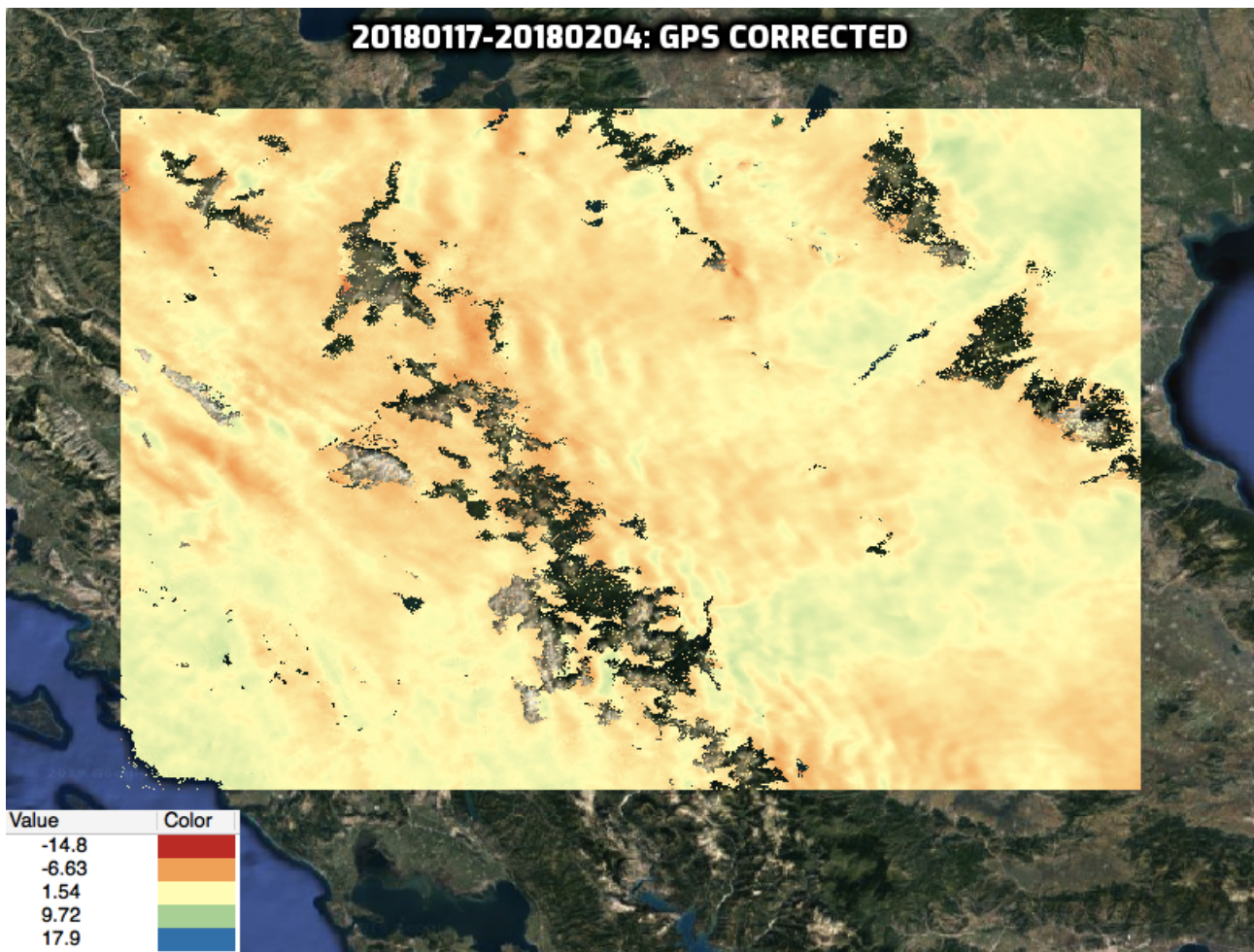
Και οι τρεις εικόνες δείχνουν μεγάλη συμφωνία με την εμπειρική μέθοδο, όχι όμως και με το ατμοσφαιρικό μοντέλο ERA5. Μάλιστα, στην πρώτη (20180111_20180117) και στην τρίτη (20180111_20180204) περίπτωση η τυπική απόκλιση (STATISTICS_STDDEV) της εικόνας μειώνεται, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (20180117_20180204) αυξάνεται, χωρίς αυτό να σημαίνει κατ' ανάγκη πως η διόρθωση με τη χρήση των μετρήσεων GPS απέτυχε.



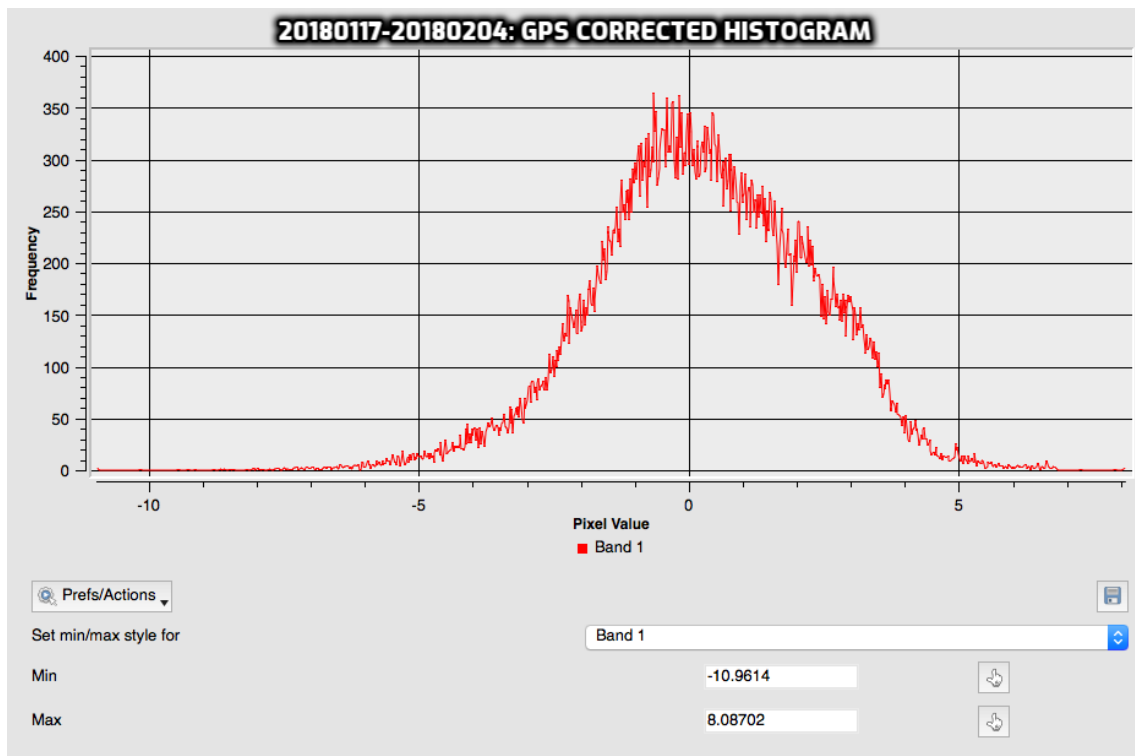
Εικόνα 6.1: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180111_20180117)
 STATISTICS_STDDEV=2.0493272986104



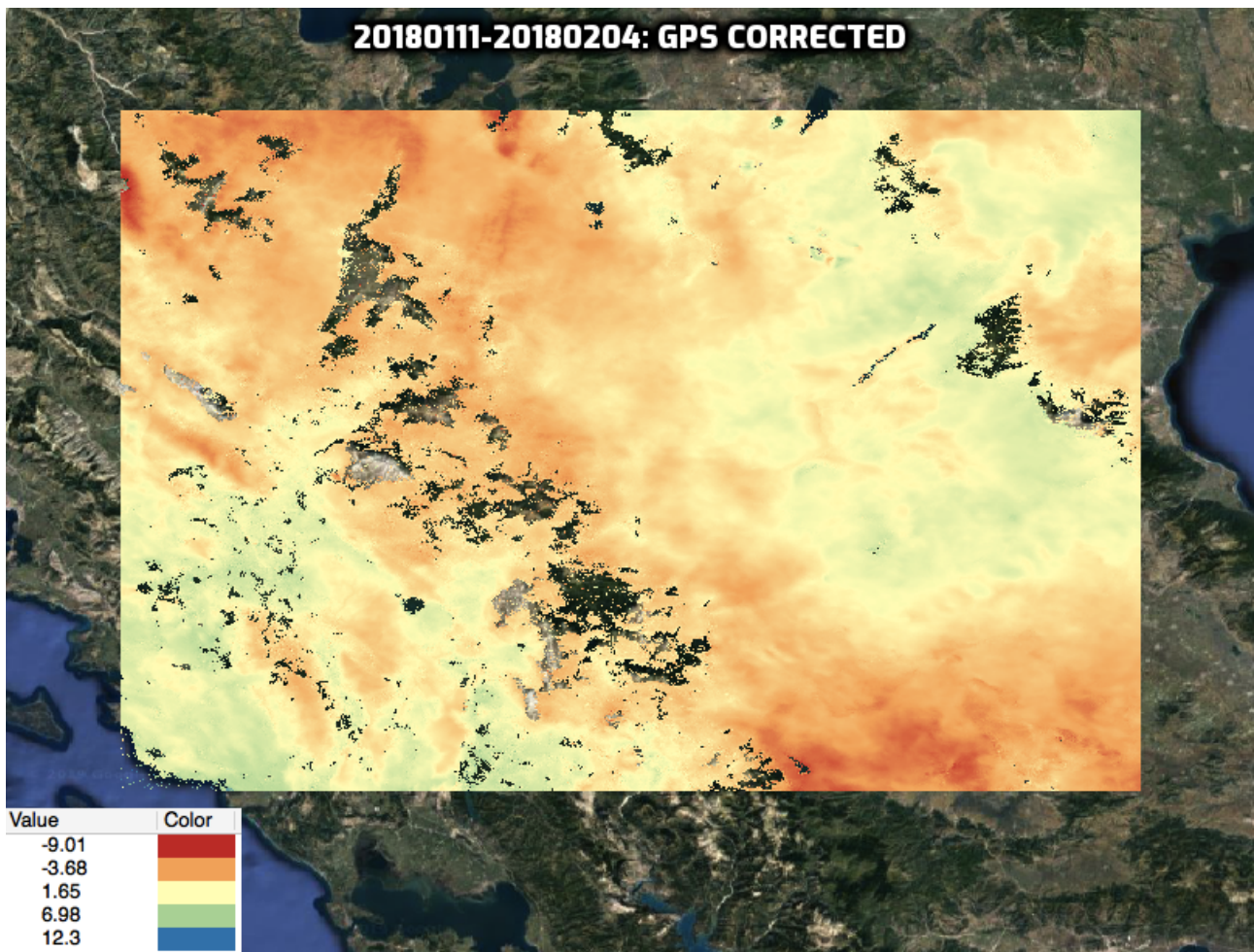
Εικόνα 6.2: Ιστογράμμο της εικόνας 6.1



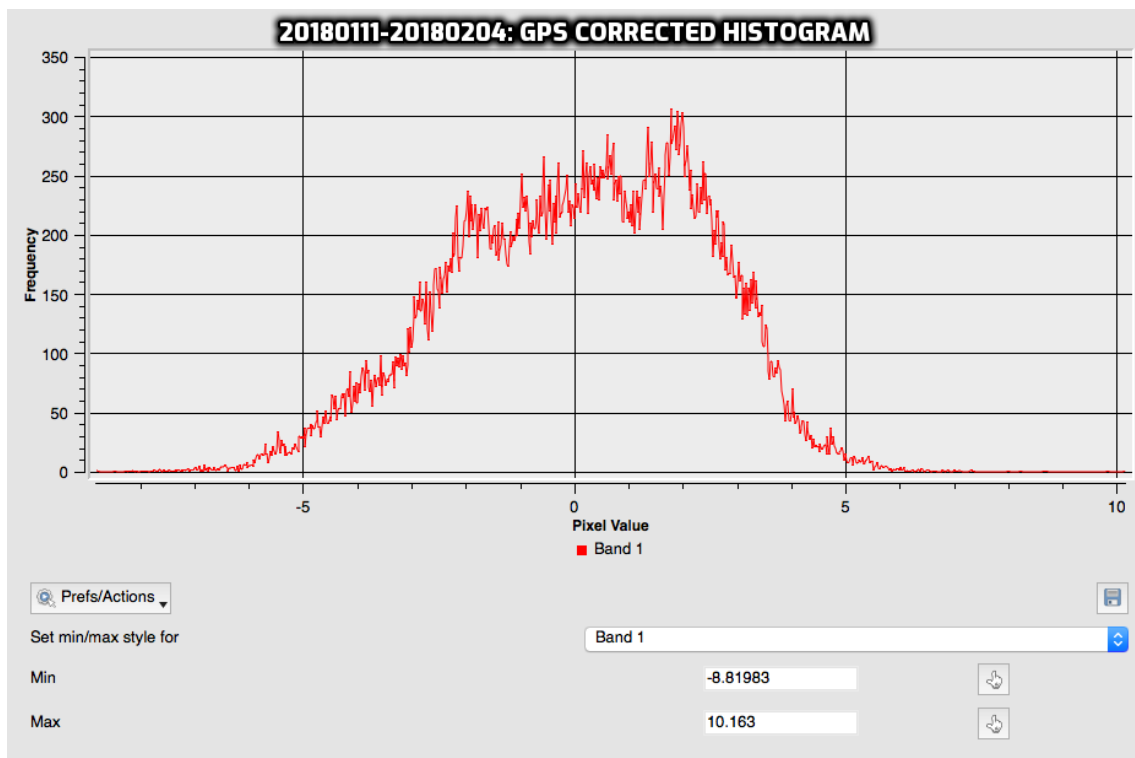
Εικόνα 6.3: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180117_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=1.9909388325161



Εικόνα 6.4: Ιστόγραμμα της εικόνας 6.3



Εικόνα 6.5: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180111_20180204)
 STATISTICS_STDDEV=2.2803056514213



Εικόνα 6.6: Ιστόγραμμα της εικόνας 6.5

Κεφάλαιο 7 - Σύγκριση, σχόλια, συμπεράσματα

Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, σχολιάζονται εκτενέστερα οι επιλογές και οι αποφάσεις που λήφθηκαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν και συγκρίνονται οι τρεις μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

Προς το σκοπό της σύγκρισης των μεθόδων και των αποτελεσμάτων που αυτές παρουσιάζουν, υπολογίστηκαν οι εικόνες των βρόχων (nets). Οι βρόχοι έχουν προκύψει από την εξής αλγεβρική πράξη:

$$NET = AB + B\Gamma - A\Gamma$$

Τα συμβολογράμματα έχουν αντιστοιχιστεί με τα ονόματα AB, BΓ και AΓ στη σελίδα 35.

Το νόημα της δημιουργίας της εικόνας του βρόχου είναι ότι, εφόσον οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων συνιστούν ένα κλειστό δίκτυο, τότε, η «μετάβαση» από την ημερομηνία A στην ημερομηνία Γ θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τη διαδρομή. Με άλλα λόγια, το αλγεβρικό άθροισμα των συμβολογραμμάτων AB και BΓ θα πρέπει να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με το συμβολόγραμμα AΓ.

Ως γνωστόν, η εικόνα της φάσης ενός συμβολογράμματος XY υπολογίζεται ως η τιμή της φάσης την ημερομηνία X μείον την τιμή της φάσης την ημερομηνία Y.

Συνεπώς, ισχύουν οι επόμενες ισότητες:

$$AB = \text{phase}A - \text{phase}B$$

$$B\Gamma = \text{phase}B - \text{phase}\Gamma$$

$$A\Gamma = \text{phase}A - \text{phase}\Gamma$$

$$\text{Άρα: } AB + B\Gamma = \text{phase}A - \text{phase}B + (\text{phase}B - \text{phase}\Gamma) \Rightarrow$$

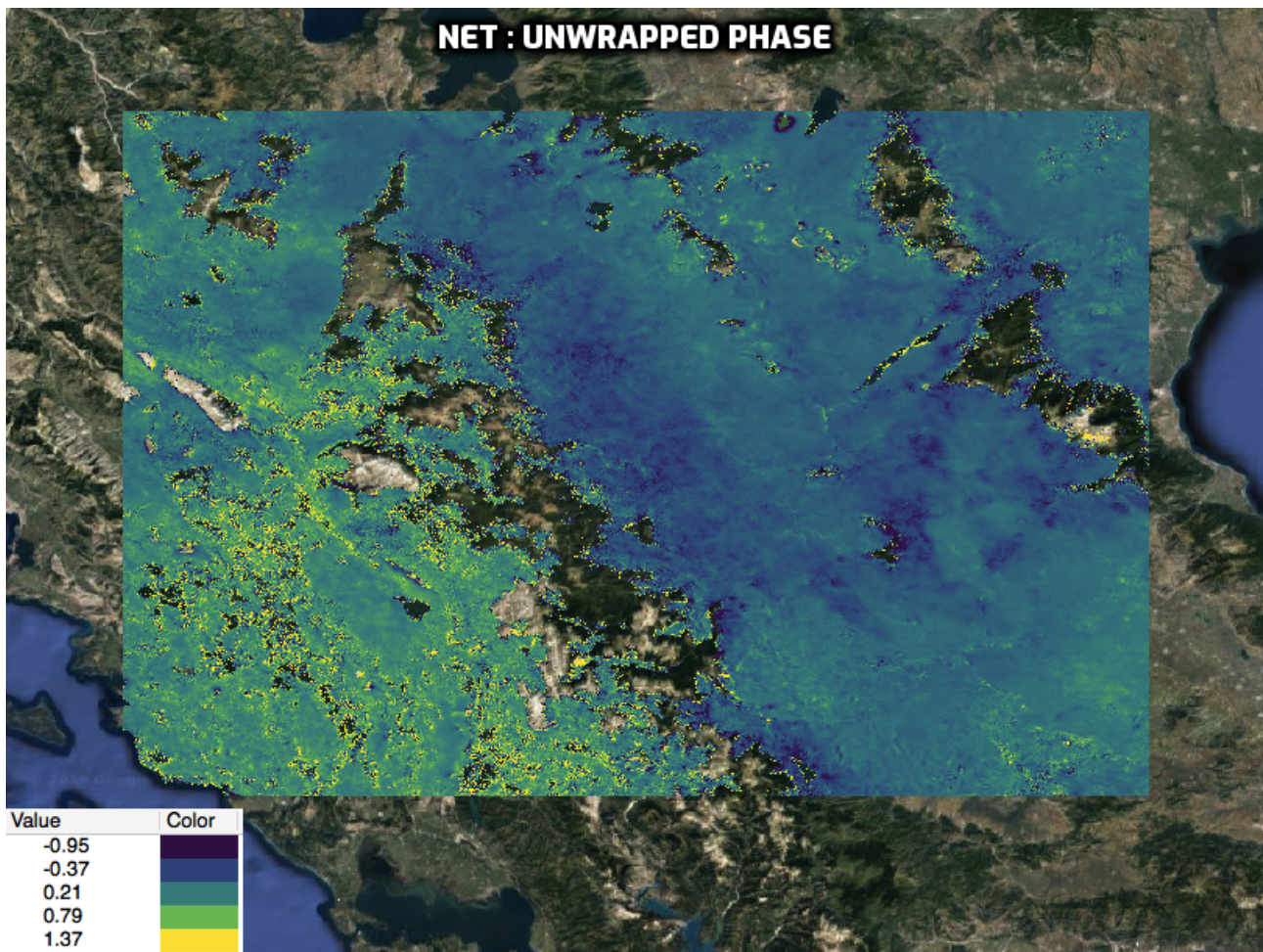
$$AB + B\Gamma = \text{phase}A - \text{phase}B + \text{phase}B - \text{phase}\Gamma \Rightarrow$$

$$AB + B\Gamma = \text{phase}A - \text{phase}\Gamma \Rightarrow$$

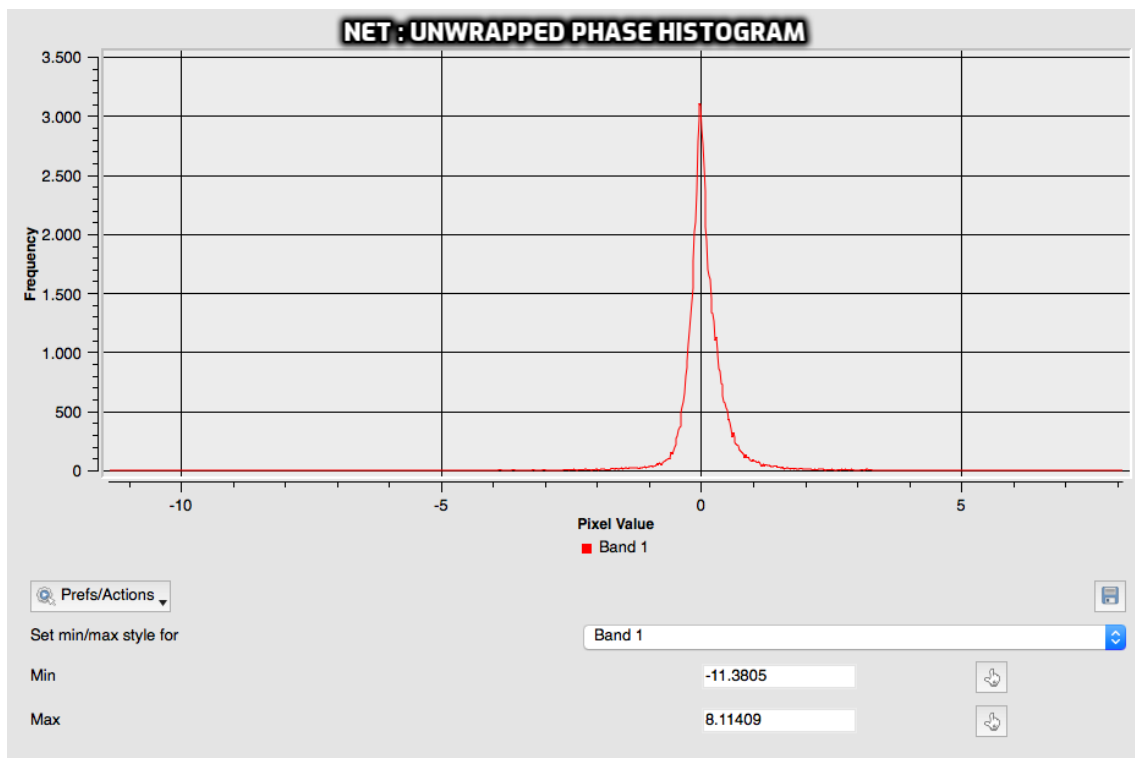
$$AB + B\Gamma = A\Gamma \Rightarrow$$

$$AB + B\Gamma - A\Gamma = 0$$

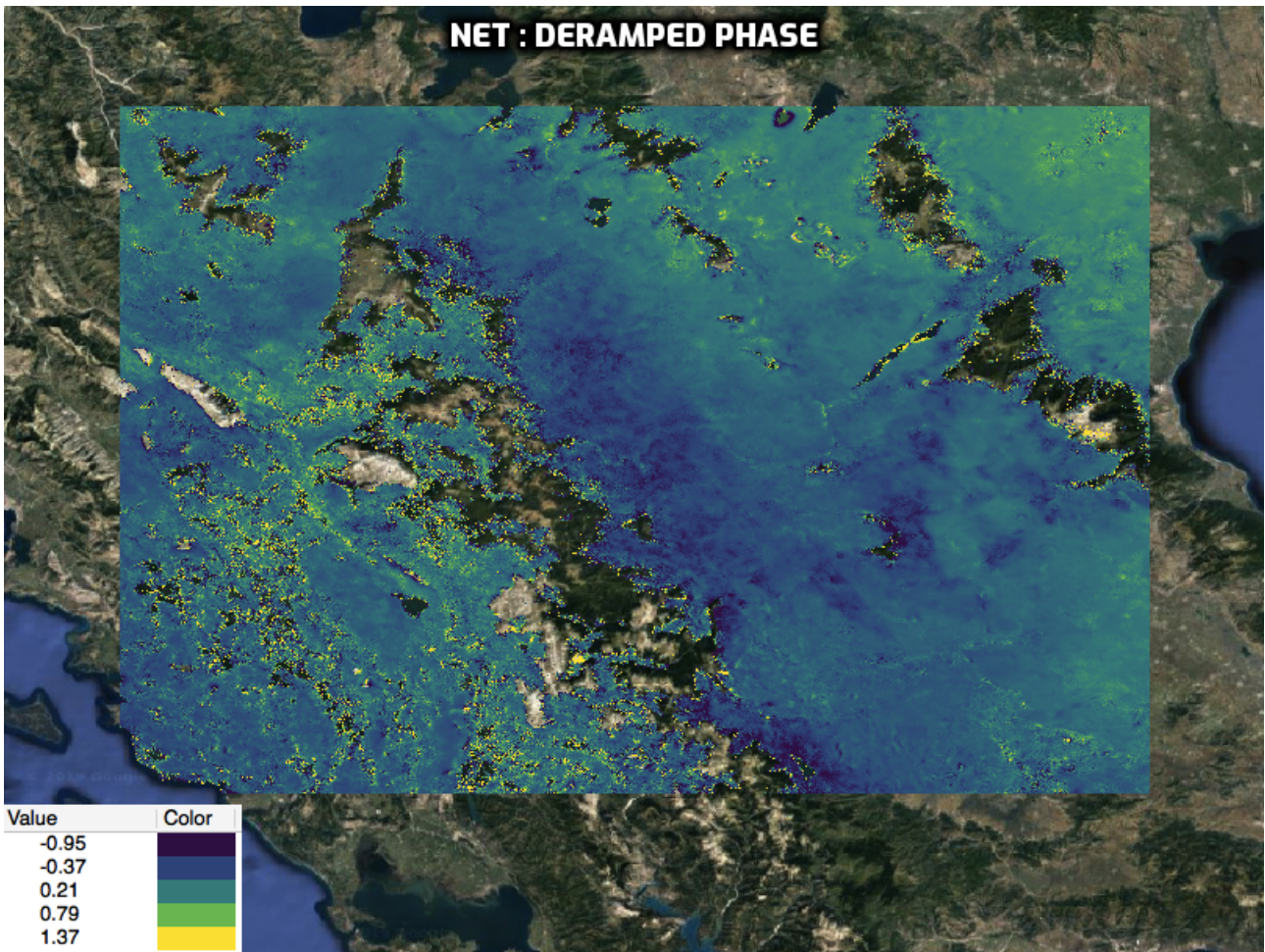
Η προηγούμενη σχέση δείχνει ότι το αποτέλεσμα του βρόχου πρέπει να ισούται με μηδέν. Δηλαδή, η εικόνα του βρόχου πρέπει να έχει μηδενικές τιμές (NET=0). Όπως θα δούμε στις επόμενες εικόνες, οι τιμές της τελικής εικόνας δεν είναι ακριβώς 0, προσεγγίζουν όμως πολύ μικρές τιμές, πράγμα που μαρτυρά πως όλες οι μέθοδοι λειτουργούν σωστά. Όλες οι εικόνες συνοδεύονται από τα ιστογράμματά τους.



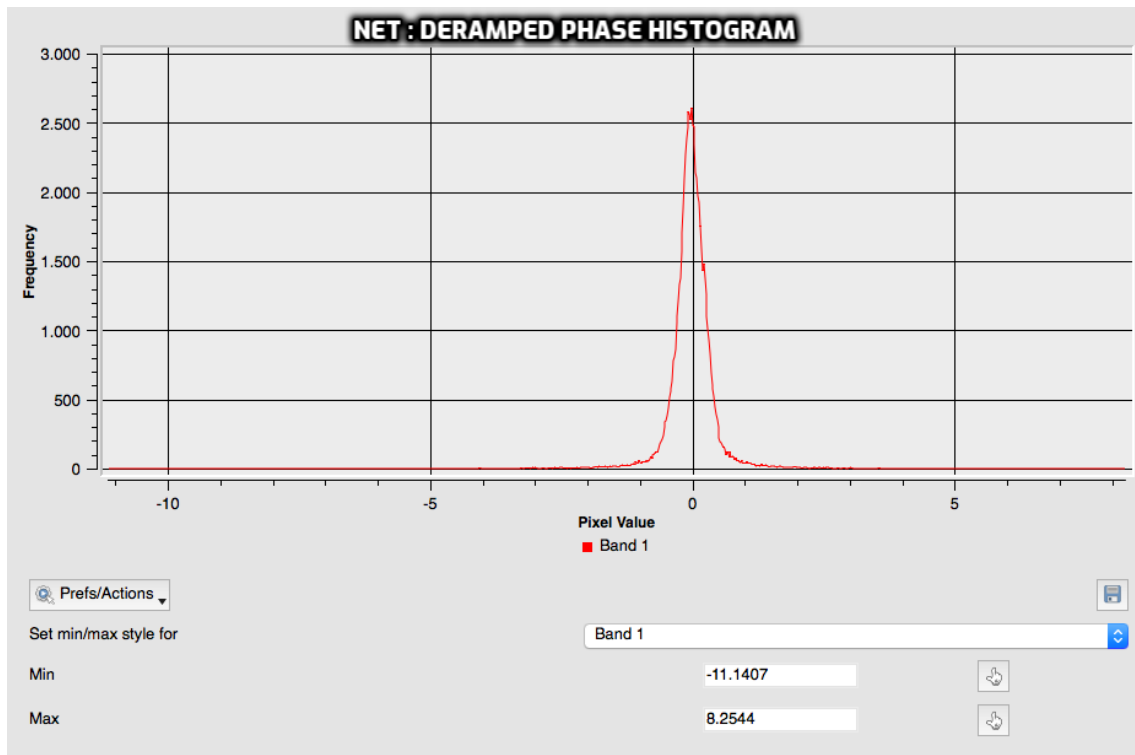
Εικόνα 7.1: Βρόχος μη διορθωμένης φάσης



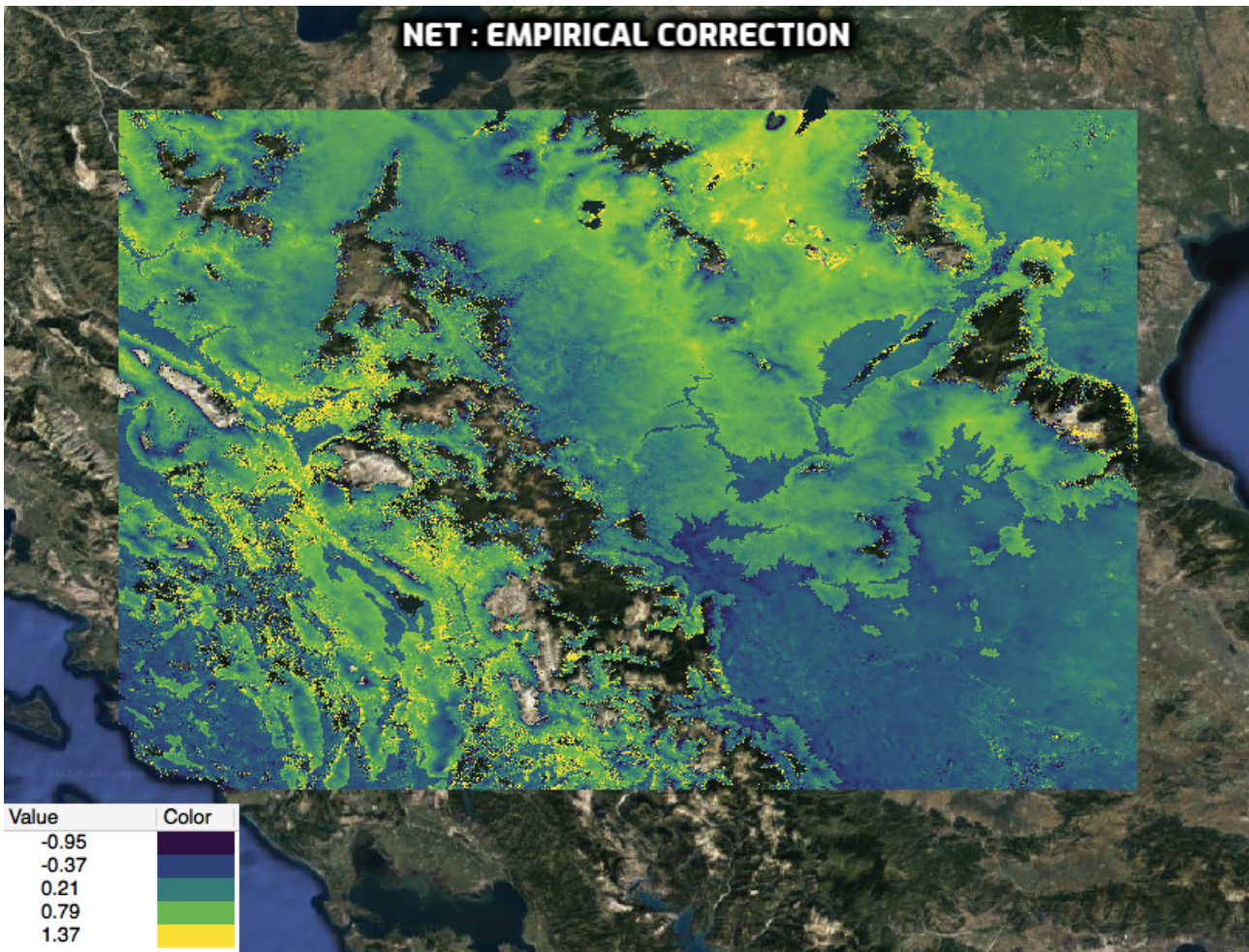
Εικόνα 7.2: Ιστόγραμμα εικόνας 7.1



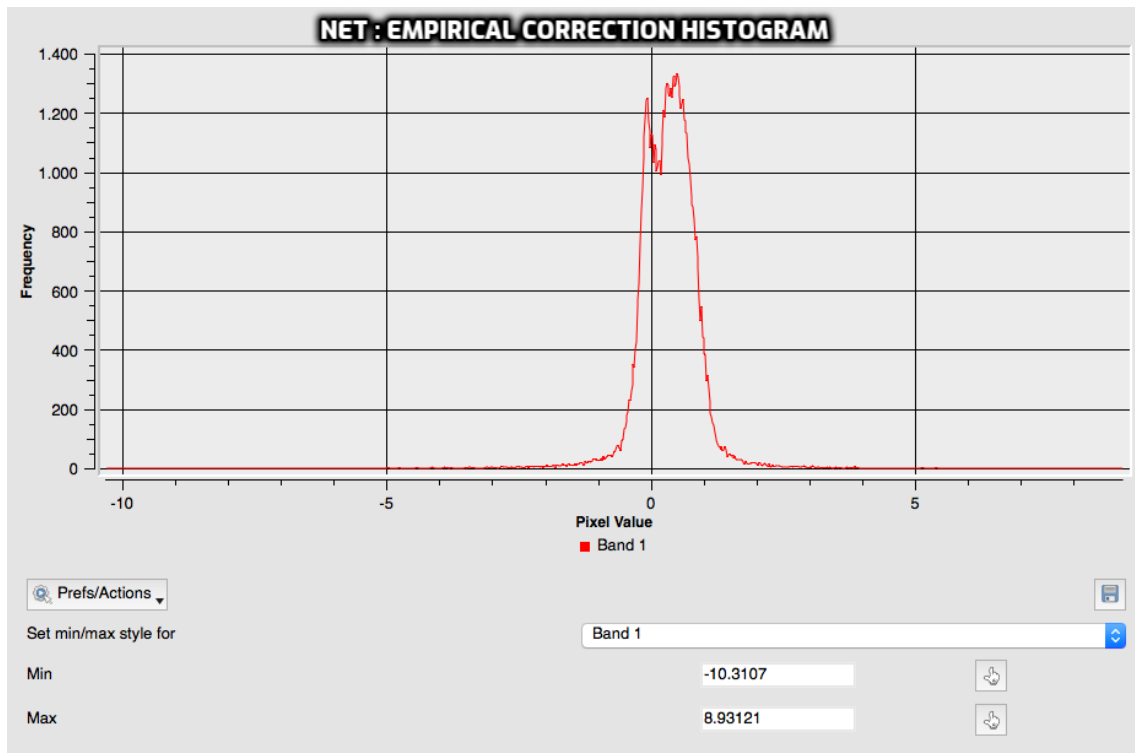
Εικόνα 7.3: Βρόχος διορθωμένης τροχιακά φάσης



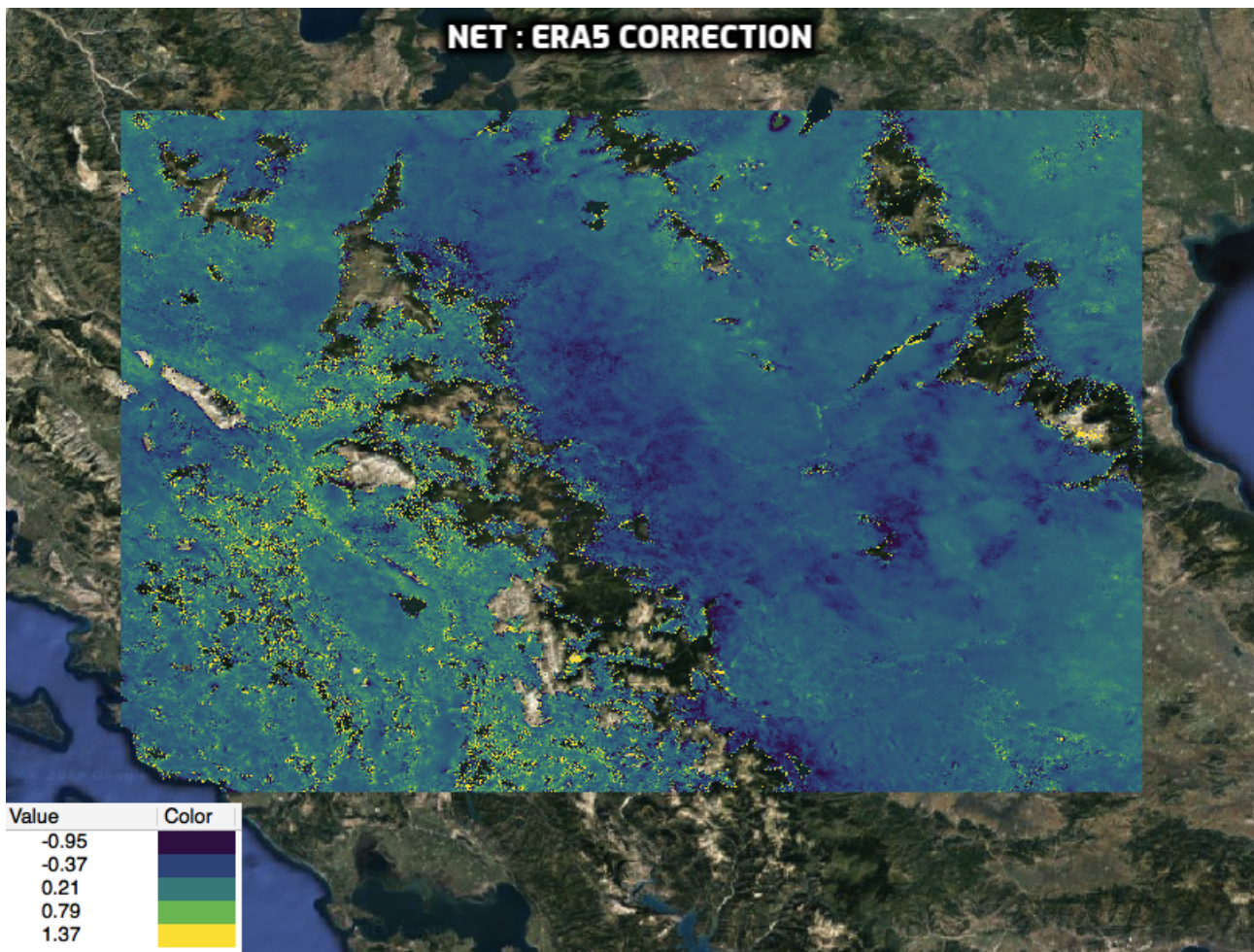
Εικόνα 7.4: Ιστόγραμμα εικόνας 7.3



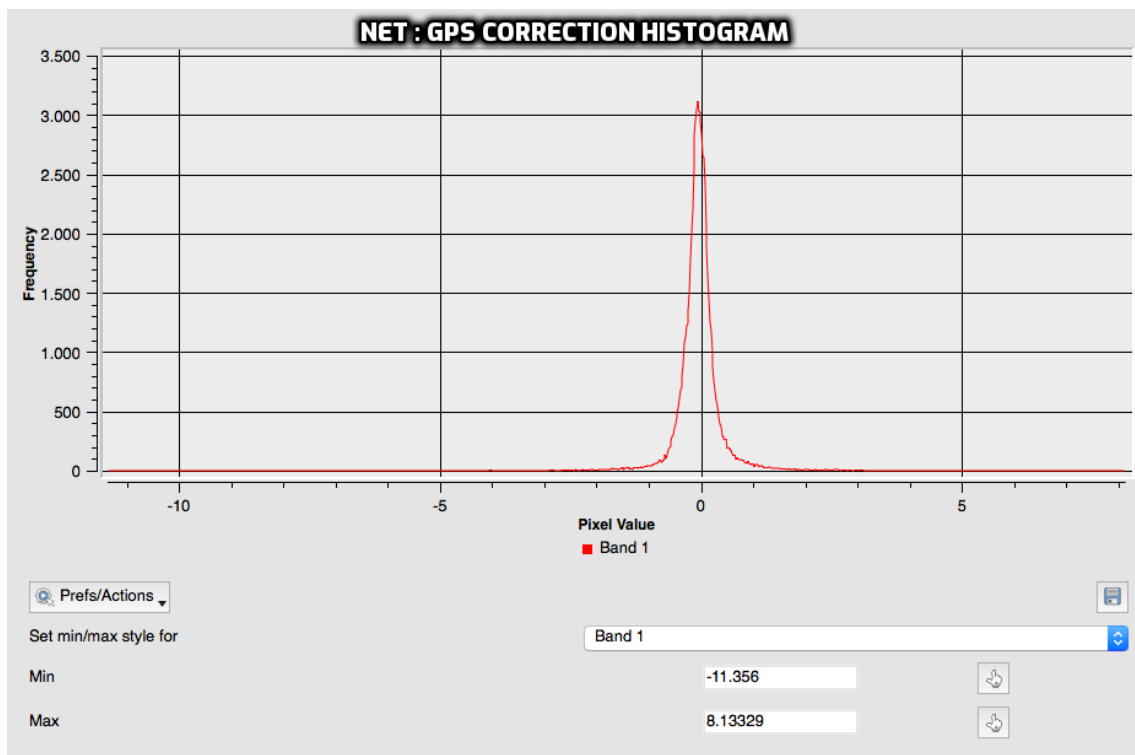
Εικόνα 7.5: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση την εμπειρική μέθοδο



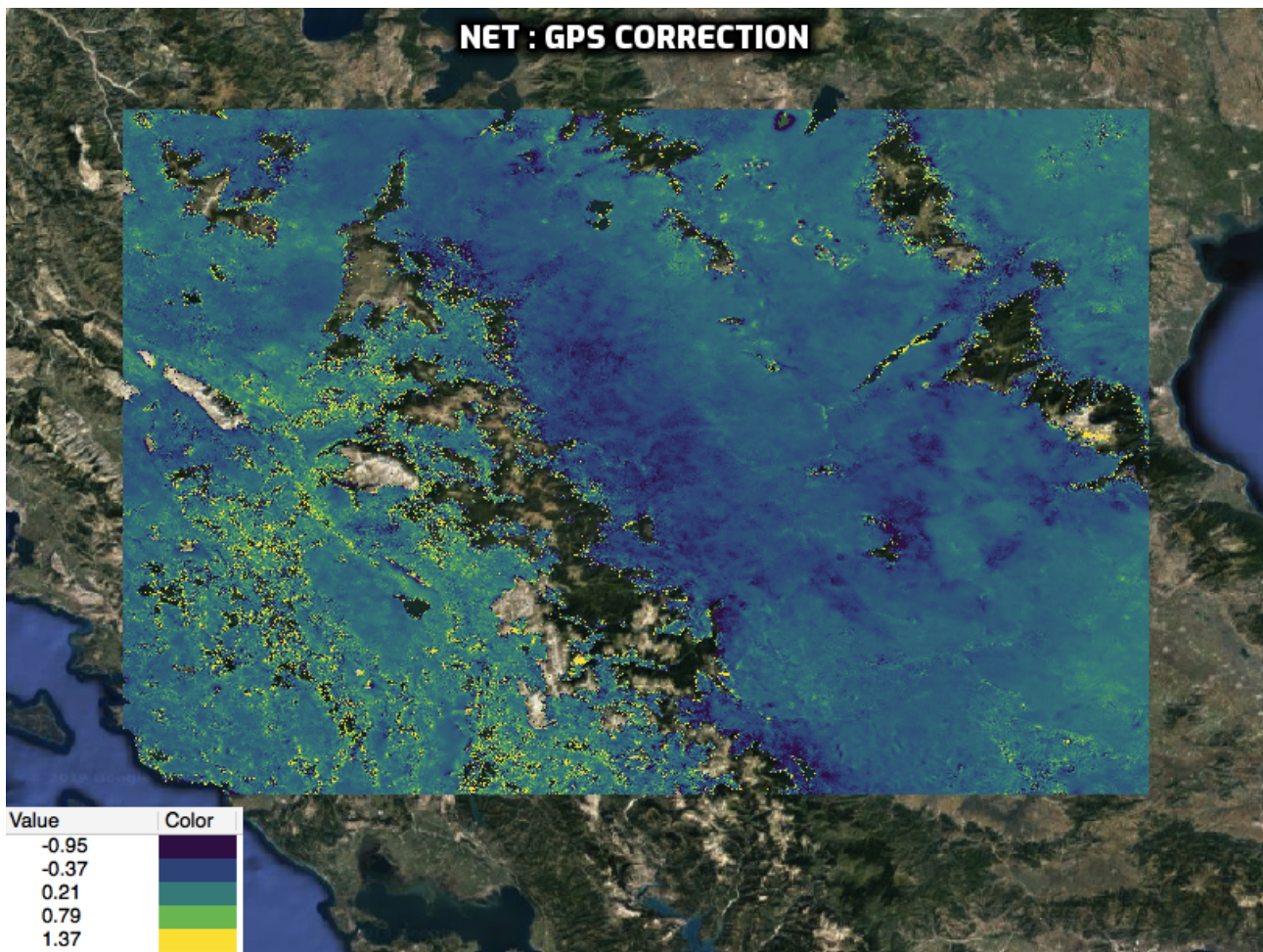
Εικόνα 7.6: Ιστόγραμμα της εικόνας 7.5



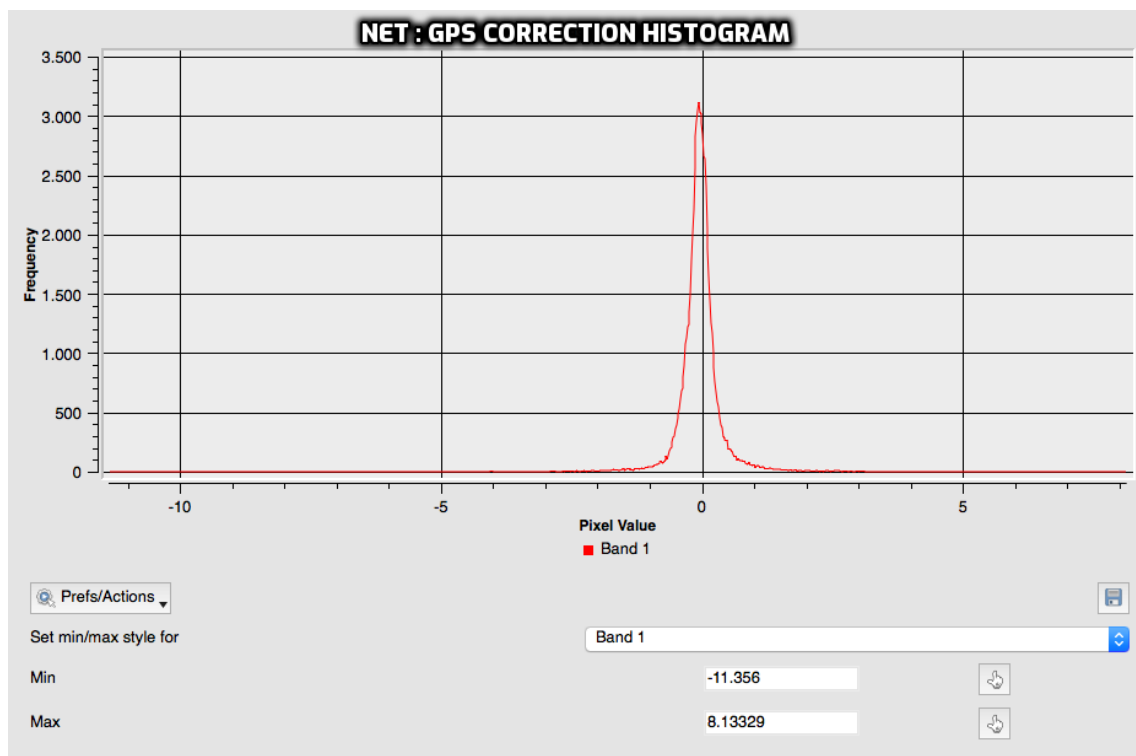
Εικόνα 7.7: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση το μοντέλο ERA5



Εικόνα 7.8: Ιστόγραμμα της εικόνας 7.7



Εικόνα 7.9: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση τις μετρήσεις GPS



Εικόνα 7.10: Ιστογράμμο της εικόνας 7.9

Ένας ακόμη ανεξάρτητος δείκτης για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας των επεξεργασιών είναι η τυπική απόκλιση των εικόνων. Στον επόμενο πίνακα, λοιπόν, καταγράφονται συγκεντρωτικά, η μέση τιμή (MEAN) και η τυπική απόκλιση (STDDEV) του κάθε βρόχου.

Πίνακας 7.1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση βρόχων

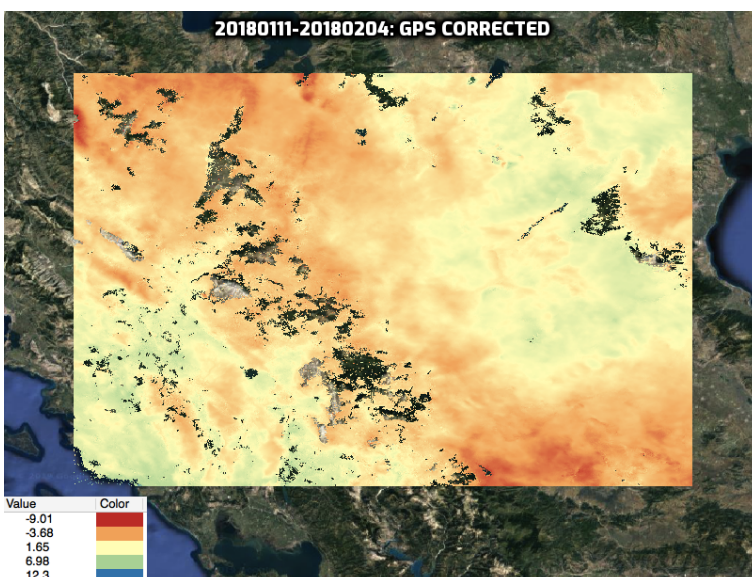
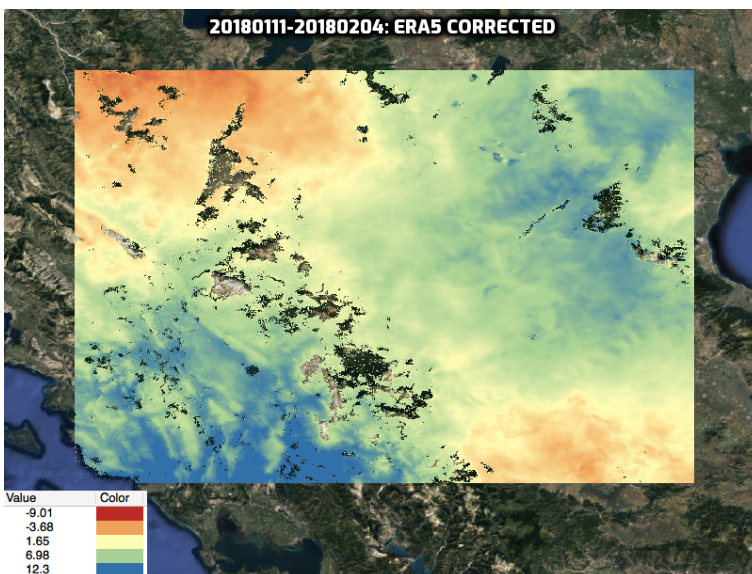
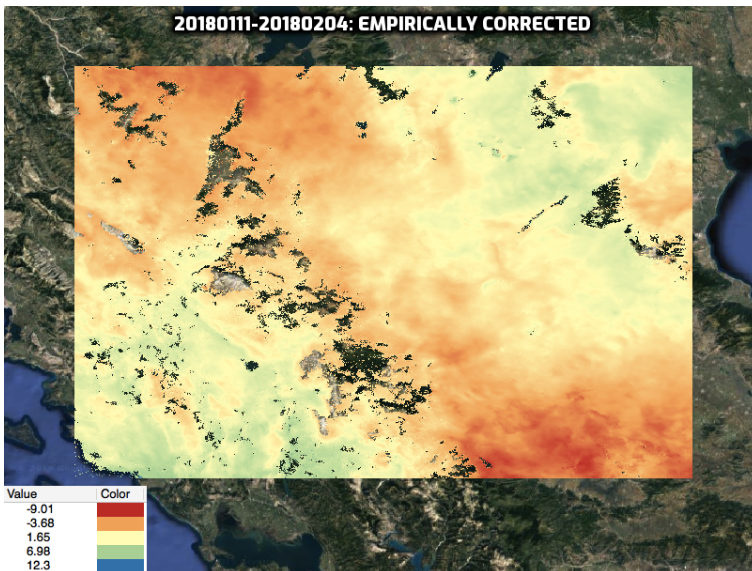
	IMAGES	MEAN	STDDEV
NETS	UNWRAPPED PHASE	0.064236572697329	0.5144367529297
	DERRAMPED PHASE	-0.016371004359536	0.49708076326797
	EMP CORRECTION	0.33600931638258	0.57776365751652
	ERA5 CORRECTION	-0.037029389844456	0.49438562109891
	GPS CORRECTION	-0.037354716867241	0.49479887614255

Αρχικά, πρέπει να παρατηρηθεί ότι η εικόνα που έχει υπολογιστεί μετά την αφαίρεση των τροχιακών σφαλμάτων στις περισσότερες περιοχές παρουσιάζει μικρότερες (δηλαδή καλύτερες) τιμές, με περισσότερο μπλε χρώμα αντί για κίτρινο. Η μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με την εικόνα της μη διορθωμένης τροχιακά φάσης επιβεβαιώνει πως η διόρθωση των τροχιακών σφαλμάτων έχει πετύχει.

Όσον αφορά στην εικόνα του βρόχου της εμπειρικής διόρθωσης, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση με την εικόνα του βρόχου για τα σφάλματα τροχιάς, δεν υπάρχουν διαφορές σε σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 500m διότι όπως εξηγήθηκε, τα σημεία αυτά δεν διορθώθηκαν από τις τροποσφαιρικές επιδράσεις. Στα υπόλοιπα σημεία φαίνονται διαφορές στις δύο εικόνες. Μάλλον η εμπειρική διόρθωση έχει χειροτερέψει την κατάσταση στις περισσότερες περιοχές. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Πρώτον, η θεώρηση για γραμμική σχέση μεταξύ καθυστέρησης φάσης και υψομέτρου δεν περιγράφει ικανοποιητικά την πραγματική τους σχέση για όλα τα σημεία. Εκτός αυτού, είναι γνωστό πως οι εμπειρικές μέθοδοι τροποσφαιρικής διόρθωσης έχουν δοκιμαστεί με μεγαλύτερη επιτυχία σε μικρότερες περιοχές. Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας καλύπτει έκταση της τάξης των 250x160km. Ίσως αν η ίδια μεθοδολογία εφαρμοστεί σε μια λιγότερο ευρεία περιοχή να έχει καλύτερα αποτελέσματα.

Οι βρόχοι της διόρθωσης με χρήση του ατμοσφαιρικού μοντέλου ERA5 και με χρήση των μετρήσεων GPS παρουσιάζουν συνολικά καλύτερα αποτελέσματα, όπως μαρτυρά η σχεδόν ίδια και μειωμένη τιμή της τυπικής τους απόκλισης.

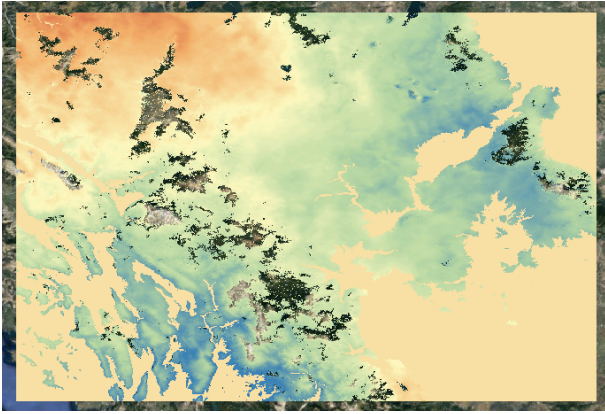
Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στην τρίτη περίπτωση (20180111_20180204) όπου τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων δείχνουν να συμφωνούν περισσότερο. Στην επόμενη σελίδα, παρουσιάζονται ξανά οι τρεις διορθωμένες εικόνες προκειμένου να συζητηθεί εκτενέστερα η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου και να καταγραφούν πιθανοί λόγοι που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα.



Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ξανά πως τα σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 500m δεν έχουν διορθωθεί με την εμπειρική μέθοδο (βλ. και Εικόνα 7.11). Κατά συνέπεια, για τα σημεία αυτά θα προτιμηθεί είτε η διόρθωση με το ERA5 είτε η διόρθωση με το GPS.

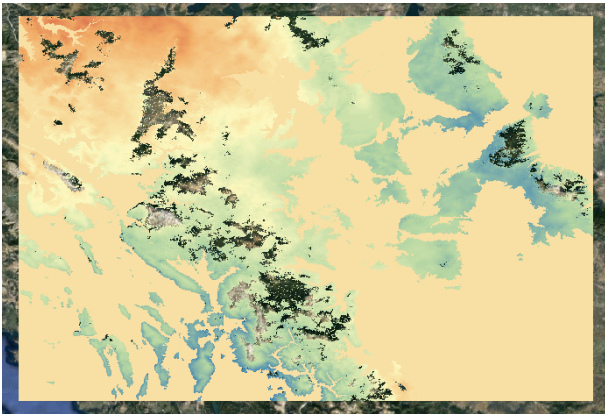
Επιπλέον, έχει νόημα να αξιολογηθούν οι υψηλές τιμές που εμφανίζονται με μπλε χρώμα στη δεύτερη εικόνα. Αναλύοντας το scatterplot (Εικόνα 4.6 σελ. 54) της συγκεκριμένης εικόνας, είναι εμφανές πως στα σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 750m (βλ. και Εικόνα 7.12) παρατηρούνται διαταραχές (turbulence) στην ατμόσφαιρα. Ως γνωστόν, τα ατμοσφαιρικά μοντέλα, δεν είναι ικανά να ανιχνεύουν τις διαταραχές αυτές μέσω σε κάθε συμβολόγραμμα. Γι' αυτό το λόγο, για τα σημεία αυτά μάλλον η καλύτερη διόρθωση είναι αυτή που έχει υπολογιστεί μέσω μετρήσεων GPS, μιας και με αυτή τη μέθοδο συνυπολογίζονται και αφαιρούνται και οι επιδράσεις των διαταραχών της ατμόσφαιρας.

Όσον αφορά στα υπόλοιπα σημεία (47%), η εμπειρική μέθοδος δείχνει να συμφωνεί περισσότερο με τα αποτελέσματα του GPS, ενώ η διόρθωση με βάση το ERA5 παρουσιάζει ορισμένες αποκλίσεις. Βέβαια, τα σημεία αυτά αφορούν ένα σχετικά μικρό τμήμα της εικόνας και, γι' αυτό το λόγο, δε μπορεί να διατυπωθεί πως τα αποτελέσματα αυτά είναι βαρύνουσας σημασίας.



Τα σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 500m φαίνονται με μπεζ χρώμα και αντιστοιχούν στο 32% της επιφάνειας της εικόνας. Σε αυτά τα σημεία δεν έχει γίνει εμπειρική διόρθωση και, κατά συνέπεια, στην πρώτη εικόνα, για τα σημεία αυτά, παρουσιάζονται οι τιμές της αρχικής φάσης (deramped phase).

Εικόνα 7.11: Σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 500m



Τα σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 750m φαίνονται με μπεζ χρώμα και αντιστοιχούν στο 53% της επιφάνειας της εικόνας. Σύμφωνα και με το αντίστοιχο scatterplot, σε αυτά τα σημεία παρατηρούνται διαταραχές (turbulence) στην ατμόσφαιρα. Κατά συνέπεια, για τα σημεία αυτά μάλλον η διόρθωση μέσω των μετρήσεων GPS είναι η πιο αξιόπιστη.

Εικόνα 7.12: Σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 750m

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτή, πρέπει οπωσδήποτε να τονιστεί ότι η ατμοσφαιρική διόρθωση των απεικονίσεων SAR συνιστά ένα ζήτημα, το οποίο δεν έχει ακόμη εξεταστεί επαρκώς από την επιστημονική κοινότητα και, κατά συνέπεια, δεν έχει «λυθεί». Με άλλα λόγια, δεν έχει δοθεί μέχρι σήμερα μια συγκεκριμένη απάντηση όσον αφορά στο βέλτιστο τρόπο ατμοσφαιρικής διόρθωσης των συμβολογραμμάτων. Οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις προς το σκοπό του εντοπισμού μικρομετακινήσεων στην επιφάνεια της γης δεν έχουν αποκτήσει συστηματικό χαρακτήρα, ούτε μπορεί κανείς να υποστηρίξει πως μία συγκεκριμένη μέθοδος διόρθωσης λειτουργεί καλύτερα σε κάθε περίπτωση. Αντίθετα, προσπάθειες καταβάλλονται προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου ξεχωριστά και ύστερα από πολλά πειράματα κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές αφορούν σε μεγαλύτερες ή μικρότερες περιοχές, σε επιφάνειες με ήπιο ή εντονότερο ανάγλυφο, σε διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να επανειπωθεί πως μόνο η μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης με το GPS λαμβάνει υπόψη της τα τυχαία φαινόμενα «διαταραχών» της ατμόσφαιρας. Τόσο η εμπειρική μέθοδος, όσο και η διόρθωση με τη χρήση του μοντέλου ERA5 επιχειρούν να μειώσουν τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στα συμβολογράμματα εξετάζοντας την καθυστέρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που οφείλεται μόνο στην στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας. Γίνεται, λοιπόν, σαφές πως καμία μέθοδος δεν μειώνει πάντα και με συνέπεια την επίδραση της ατμόσφαιρας. Οι μέθοδοι πρέπει κάθε φορά να συνδυάζονται, να εξετάζεται ξεχωριστά η αποτελεσματικότητά τους και να επιλέγεται μια ξεχωριστή προσέγγιση για κάθε περίπτωση. Συνεπώς, μελλοντική εργασία θα αποτελέσει η εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε σαφώς μεγαλύτερο δείγμα εικόνων, προκειμένου να εξαχθούν πολυτιμότερα και καθολικά συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

- Bekaert, D.P.S., Hooper, A., Wright, T.J., 2015. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 1345-1356.
- Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A., Parker, D.J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- Carrasco, D., 1998. SAR Interferometry for digital elevation model generation and differential applications. Polytechnic University of Catalonia.
- Cavalié, O., Doin, M.P., Lasserre, C., Brille, P., 2007. Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing the lithosphere rheological structure, *J. Geophys. Res.*, 112, B03403.
- Ding, X., Li, Z., Zhu, J., Feng, G., Long, J., 2008. Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. *Sensors* 8, 5426–5448.
- Delacourt, C., Briole, P., Achache, J., 1998. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2849–2852.
- Doin, M.P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., Doubre, C., 2009. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models., *Journal of Applied Geophysics*, 69, 35-50.
- Goldstein, R., 1995. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 22, 2517-2520.
- Hanssen, R.F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer, Dordrecht.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, *Tectonophysics*, 514-517.
- Jensen, J.R., 2007. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource perspective, 2nd Edition, Pearson Education, Inc.
- Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.P., Peltzer, G., 2011. Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data., *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17311.
- Jolivet, R., Agram P.S, Lin N.Y., Simons M., Doin M.P., Peltzer G., Li Z., 2014. Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 2324-2341.
- Jolivet, R., Lasserre, C., Doin, M.P., Giullaso, S., Peltzer, G., Dailu, R., Sun, J., Shen, Z.K., Xu, X., 2012. Shallow creep on the Haiyuan Fault (Gansu, China) revealed by SAR interferometry, *J. Geophys. Res.*, 117, B06401.

- Karathanassi, V., 2014. Microwave Remote Sensing. National Technical University of Athens.
- Karathanassi, V., Saqellari, A., 2014. Solving rank-deficient linear systems for the estimation of the atmospheric phase delay parameter. *Universal Journal of Geoscience*. 2, 35–42.
- Liao, M., Jiang, H., Wang, Y., Wang, T., Zhang, L., 2013. Improved topographic mapping through high-resolution SAR interferometry with atmospheric effect removal. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 80, 72–79.
- Lin, Y., Simons, M., Hetland, E., Muse, P., DiCaprio, C., 2010. A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol 11. N. 9, 1525-2027.
- Sabins, F.F., 1997. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 3rd Edition, Remote Sensing Enterprises, Inc.
- Saqellari, A., Karathanassi, V., 2007. Tropospheric signal delay estimation in repeat-pass SAR Interferometry with QR-factorization. *IEEE, Mediterranean Conference on Control & Automation*.
- Saqellari, A., Karathanassi, V., 2008. An approach for solving rank-deficient systems that enable atmospheric path delay and water vapour content estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 3187–3195.
- Saqellari, A., 2016. Developing new multi-image InSAR methods for atmospheric delay estimation. Doctoral Thesis, National Technical University of Athens.
- Tian, X., Malhotra, R., Xu, B., Qi, H., 2018. Modelling Orbital Error in InSAR Interferogram Using Frequency and Spatial Domain Based Methods, *Remote Sens.*, 10, 508.
- Woodhouse, I., 2006. *Introduction to Microwave Remote Sensing*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Yu, C., Penna, N. T., Li, Z., 2017. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 2008-2025.
- Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., 2018. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, *Remote Sensing of Environment*, 204, 109-121.
- Zebker, H.A., Goldstein, R.M., 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91, 4993–4999.
- Zebker, H.A., Rosen, P.A., Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 102, 7547–7563.

Παράρτημα

A. Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μορφές συμβολομετρίας	12
Σχήμα 1.2: Γεωμετρία λήψης	13
Σχήμα 1.3: Γεωμετρία διαφορικής συμβολομετρίας	16
Σχήμα 1.4: Σημεία ίδιου υψομέτρου	18
Σχήμα 1.5: Σημεία ίδιας πλάγιας απόστασης	19
Σχήμα 3.1: Τροχιακό σφάλμα	37
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής	67

B. Λίστα εικόνων

Εικόνα 3.1: Η περιοχή μελέτης	34
Εικόνα 3.2: Το ΨΜΕ	35
Εικόνα 3.3: Μη διορθωμένη φάση (20180111_20180117)	39
Εικόνα 3.4: Ιστόγραμμα της εικόνας 3.3	39
Εικόνα 3.5: Διόρθωση (20180111_20180117)	40
Εικόνα 3.6: Ιστόγραμμα εικόνας 3.5	40
Εικόνα 3.7: Διορθωμένη φάση (20180111_20180117)	41
Εικόνα 3.8: Ιστόγραμμα εικόνας 3.7	41
Εικόνα 3.9: Μη διορθωμένη φάση (20180117_20180204)	42
Εικόνα 3.10: Ιστόγραμμα εικόνας 3.9	42
Εικόνα 3.11: Διόρθωση (20180117_20180204)	43
Εικόνα 3.12: Ιστόγραμμα εικόνας 3.11	43
Εικόνα 3.13: Διορθωμένη φάση (20180117_20180204)	44
Εικόνα 3.14: Ιστόγραμμα εικόνας 3.13	44
Εικόνα 3.15: Μη διορθωμένη φάση (20180111_20180204)	45
Εικόνα 3.16: Ιστόγραμμα της εικόνας 3.15	45
Εικόνα 3.17: Διόρθωση (20180111_20180204)	46
Εικόνα 3.18: Ιστόγραμμα της εικόνας 3.17	46
Εικόνα 3.19: Διορθωμένη φάση (20180111_20180204)	47
Εικόνα 3.20: Ιστόγραμμα εικόνας 3.19	47
Εικόνα 4.1: Scatterplot 20180111_20180117 (full)	51
Εικόνα 4.2: Scatterplot 20180117_20180204 (full)	52
Εικόνα 4.3: Scatterplot 20180111_20180204 (full)	52
Εικόνα 4.4: Scatterplot 20180111_20180117 (cropped)	53
Εικόνα 4.5: Scatterplot 20180117_20180204 (cropped)	54
Εικόνα 4.6: Scatterplot 20180111_20180204 (cropped)	54
Εικόνα 4.7: Delay map (20180111_20180117)	56
Εικόνα 4.8: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.7	56
Εικόνα 4.9: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180111_20180117)	57
Εικόνα 4.10: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.9	57
Εικόνα 4.11: Delay map (20180117_20180204)	58
Εικόνα 4.12: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.11	58
Εικόνα 4.13: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180117_20180204)	59
Εικόνα 4.14: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.13	59
Εικόνα 4.15: Delay map (20180111_20180204)	60
Εικόνα 4.16: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.15	60

Εικόνα 4.17: Εμπειρικά διορθωμένη εικόνα (20180111_20180204)	61
Εικόνα 4.18: Ιστόγραμμα της εικόνας 4.17	61
Εικόνα 5.1: autoget.py	68
Εικόνα 5.2: era.py	69
Εικόνα 5.3: processor.py (1)	70
Εικόνα 5.4: processor.py (2)	71
Εικόνα 5.5: ryapsobj.py	72
Εικόνα 5.6: Σημεία δεδομένων του ERA5 (1)	73
Εικόνα 5.7: Σημεία δεδομένων του ERA5 (2)	73
Εικόνα 5.8: Διγραμμική παρεμβολή	74
Εικόνα 5.9: Delay map (20180111_20180117)	75
Εικόνα 5.10: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.9	75
Εικόνα 5.11: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180111_20180117)	76
Εικόνα 5.12: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.11	76
Εικόνα 5.13: Delay map (20180117_20180204)	77
Εικόνα 5.14: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.13	77
Εικόνα 5.15: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180117_20180204)	78
Εικόνα 5.16: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.15	78
Εικόνα 5.17: Delay map (20180111_20180204)	79
Εικόνα 5.18: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.17	79
Εικόνα 5.19: Διορθωμένη εικόνα με βάση το ERA5 (20180111_20180204)	80
Εικόνα 5.20: Ιστόγραμμα της εικόνας 5.19	80
Εικόνα 6.1: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180111_20180117)	84
Εικόνα 6.2: Ιστόγραμμα της εικόνας 6.1	84
Εικόνα 6.3: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180117_20180204)	85
Εικόνα 6.4: Ιστόγραμμα της εικόνας 6.3	85
Εικόνα 6.5: Διορθωμένη εικόνα με βάση τις μετρήσεις GPS (20180111_20180204)	86
Εικόνα 6.6: Ιστόγραμμα της εικόνας 6.5	86
Εικόνα 7.1: Βρόχος μη διορθωμένης φάσης	89
Εικόνα 7.2: Ιστόγραμμα εικόνας 7.1	89
Εικόνα 7.3: Βρόχος διορθωμένης τροχιακά φάσης	90
Εικόνα 7.4: Ιστόγραμμα εικόνας 7.3	90
Εικόνα 7.5: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση την εμπειρική μέθοδο	91
Εικόνα 7.6: Ιστόγραμμα της εικόνας 7.5	91
Εικόνα 7.7: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση το μοντέλο ERA5	92
Εικόνα 7.8: Ιστόγραμμα της εικόνας 7.7	92
Εικόνα 7.9: Βρόχος διορθωμένης φάσης με βάση τις μετρήσεις GPS	93
Εικόνα 7.10: Ιστόγραμμα της εικόνας 7.9	93
Εικόνα 7.11: Σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 500m	96
Εικόνα 7.12: Σημεία με υψόμετρο μικρότερο των 750m	96

Γ. Λίστα πινάκων

Πίνακας 3.1: Εικόνες και Συμβολογράμματα	35
Πίνακας 3.2: Ημερήσια βροχόπτωση (mm)	36
Πίνακας 5.1: Μεταβλητές του ERA5	64
Πίνακας 7.1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση βρόχων	94