

ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ (2013-2015) ΒΑΣΕΙ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Υπό
ΑΓΓΕΛΙΚΗΣ ΡΟΖΗ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Ευάγγελος Λάγιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Παναγιώτης Παπαδημητρίου
Λέκτωρ Γεώργιος Καβύρης

ΑΘΗΝΑΙ
2016



Εικόνα 1
Σαντορίνη. Εικόνα χωρίς κλίμακα

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Ευάγγελο Λάγιο, Καθηγητή του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ) και Διευθυντή του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την επίβλεψη, την βοήθεια και την κατανόησή του κατά την εκπόνησή της. Ως και τον Δρ. Βασίλειο Σακκά, ΕΔΙΠ στον Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, ΕΚΠΑ, για τον χρόνο που διέθεσε για την καθοδήγησή μου κατά την εκπόνηση της εργασίας, την ουσιαστική βοήθεια σε θεωρητικά και τεχνικά ζητήματα, για την καταλυτική παρέμβασή του στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και την γενικά άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	03
Πίνακας Περιεχομένων	04
Περίληψη	05
Abstract	07
Εισαγωγικά	08
Η Σαντορίνη	09
Ονομασία	09
Γεωλογία Σαντορίνης	11
Α. Δραστηριότητα του ηφαιστείου	14
Η Γεωδυναμική της περιοχής της Σαντορίνης	14
Β. Μόνιμοι σταθμοί στη Σαντορίνη	16
1. GPS- BERNESE	17
1.1 Το IGS08	17
1.2 Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού GPS	18
1.2.1 Επίγειο τμήμα ελέγχου	19
1.2.2 Satellite frequencies (Συχνότητες)	20
1.3 Δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS	22
1.3.1 Οι Ευρωπαϊκοί σταθμοί	23
1.3.2 Παρακολούθηση του χώρου της Σαντορίνης	25
1.4 Το Πρόγραμμα Επεξεργασίας BERNESE 5.2	26
1.4.1 Λειτουργία προγράμματος	26
1.4.1.1. Γενικά στοιχεία για το BERNESE 5.2	26
Λογισμικό Bernese Έκδοση 5.2	26
Προγράμματα επεξεργασίας του Bernese 5.2 GPS Software	27
1.4.2 Χρήσιμα στοιχεία από τη θεωρία	28
Α) Μετρήσεις φάσης & ψευδοαποστάσεων	29
Β) Χρονόμετρα δορυφόρων και δεκτών	29
Γ) Ασάφειες φάσης-Απώλειες κύκλων	30
Δ) Δορυφορικές τροχιές	31
Ε) Ατμόσφαιρα	31
ΣΤ) Απλές και διπλές διαφορές φάσης	32
Ζ) Γραμμικοί συνδυασμοί παρατηρήσεων	34
Η) Message format	35
Θ) Αποδιαμόρφωση & Αποκωδικοποίηση	37
1.5 Οργάνωση δεδομένων	38
2. Επεξεργασία Δεδομένων, ανάλυση Πειραμάτων, αξιολόγηση αποτελεσμάτων	39
2.1 Επεξεργασία Δεδομένων	39
2.1.1 Επίλυση δεδομένων από τις δυο περιόδους μετρήσεων (2013-2014)	39
2.2 Αποτελέσματα μεθόδου	43
2.2.1. Υπολογισμός γραμμικών ταχυτήτων	43
2.2.2 Διαγράμματα	51
2.2.3 Απεικονίσεις	63
3. Συζήτηση	76
Appendix	80
Βιβλιογραφία	84
Αναφορές	84
Διαδίκτυο	86

Περίληψη

Τα τελευταία 20 χρόνια τα δίκτυα μόνιμων σταθμών GPS γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη σε ηπειρωτική και παγκόσμια κλίμακα. Σε συνδυασμό με τη βελτίωση των τεχνικών επεξεργασίας των δεδομένων, είναι δυνατή η ανάκτηση γεωδαιτικής πληροφορίας υψηλής ακρίβειας. Η τελευταία αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση γεωδυναμικών φαινομένων και ειδικότερα για τις παραμορφώσεις του γήινου φλοιού.

Ο Ελλαδικός χώρος βρίσκεται στο όριο σύγκλισης των δύο λιθοσφαιρικών πλακών, αυτών της Ευρασίας και της Αφρικής και για αυτόν το λόγο παρουσιάζει έντονη τεκτονική δραστηριότητα. Το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου ειδικότερα, παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον τόσο για την σεισμική δραστηριότητα που καταγράφεται, όσο και αυτή των ενεργών ηφαιστείων που περιλαμβάνει.

Ένα από αυτά είναι το ηφαίστειο της Σαντορίνης, που συγκεντρώνει την προσοχή των γεωφυσικών καθώς έδινε εκρήξεις μέχρι πολύ πρόσφατα (1950), ενώ είναι από τα λίγα ενεργά ηφαίστεια τύπου Καλδέρας παγκοσμίως του οποίου η δραστηριότητα τεκμηριώνεται ήδη από τα αρχαία χρόνια. Στη Σαντορίνη είναι εγκατεστημένοι από το 2011 10 μόνιμοι σταθμοί GPS.

Από τις αρχές του 2011 παρατηρήθηκε μια ασυνήθιστη δραστηριότητα του ηφαιστείου, η οποία τελείωσε την άνοιξη του 2012. Παραμόρφωσε το χώρο του νησιωτικού συγκροτήματος στο συγκεκριμένο διάστημα, και έγινε αντιληπτή κυρίως μέσω των μετατοπίσεων των μόνιμων σταθμών GPS.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επεξεργασία των δεδομένων του τοπικού δικτύου της Σαντορίνης με το πακέτο λογισμικού Bernese (έκδοση 5.2) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με παλαιότερες μετρήσεις.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι πρωτογενή από συνεχή (ή και διακεκομμένη σε ένα δυο σταθμούς) καταγραφή. Όλα τα αποτελέσματα εντάσσονται στο σύστημα αναφοράς ITRF2008 με την χρήση δεδομένων από ευρωπαϊκούς μόνιμους σταθμούς GPS της IGS στην επεξεργασία.

Στη περιοχή μελέτης για το έτος 2013 οι μετρήσεις έδειξαν μια γενική ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης, και καθίζηση στο υπόλοιπο νησί, με τιμές που μεταξύ των 3-35 mm. Κατά την ίδια περίοδο, οι οριζόντιες μετατοπίσεις κυμαίνονται από 20-35 mm, και κατεύθυνση νοτιοδυτικά σε σχέση με ITRF2008.

Για το έτος 2014 οι μετρήσεις παρουσίασαν μια παρόμοια, αν και εμφανώς μικρότερη ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης και του συνόλου του νησιού με εξαίρεση το σταθμό NOMI, με τιμές που κυμαίνεται από 5-20 mm. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις

του έτους 2014 κυμαίνονται μεταξύ των 20-25 mm και κατεύθυνση νοτιοδυτικά σε σχέση με ITRF2008.

Για το έτος 2015 (παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις ήταν ελλείψεις και κατέστησαν δύσκολη την ανάλυση των αποτελεσμάτων) παρατηρήθηκαν παρόμοιες οριζόντιες μετατοπίσεις που κυμαίνονται από 5-20 mm με κατεύθυνση νότιο-ανατολική σε σχέση με ITRF2008 και ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης και καθίζηση του νότιου τμήματος και της Παλαιάς Καμένης (PKMN).

Συμπερασματικά η κίνηση του νησιού κατά τη περίοδο μελέτης 2013-2015 επανήλθε στην κατάσταση που είχε και πριν την κρίση του 2010, με μια γενική κίνηση νότια νοτιοανατολική, με ανύψωση σε γενικές γραμμές του νησιού, και των νησιών Παλαιά και Νέα Καμένη.

Abstract

The Hellenic region is located in the collision zone between the Eurasian and African plates and therefore shows intense tectonic activity. The southern Aegean volcanic arc is of special interest for its seismic and its active volcanoes' activity.

One of those active volcanoes is the one of Santorini, which is of particular interest for geophysicists, as it has been giving explosions until recently (1950), while it is one of the few Caldera-type volcanoes globally whose activity is well documented since the ancient years.

During the past 20 years, permanent GPS networks have widely expanded in continental and global scale. In addition with the improvement of data processing, high precision geodetic information is feasible, the latter is used as a tool for monitoring geodynamic phenomena, especially for crustal deformation. There are 10 permanent GPS stations installed in Santorini's island complex since 2011. Since January 2011, unusual volcanic activity is observed, which seems to weaken in the spring of 2012, and deforms the island complexes' area in the meantime, and becomes perceptible mostly through the permanent GPS stations' position displacement.

The objective of this thesis is the processing of the Santorini network data using Bernese GPS data processing software (version 5.2 (latest)) and the comparison of the results with those derived from previous observations.

Data used are raw measurements from January 2013- February 2016.

All the results are referred to the ITRF2008 reference system by using European IGS stations in the network processing.

Along with the processing, the experiments and the results comparison, the capabilities and options provided by the Bernese GPS data processing software (version 5.2) package are investigated, by analyzing its functions, its algorithms and its general methods of processing methods.

Εισαγωγικά

Ο Ελλαδικός Χώρος βρίσκεται στο όριο σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρασίας και της Αφρικής, και παρουσιάζει υψηλή σεισμικότητα. Η σεισμικότητα αυτή της περιοχής και η ύπαρξη αρκετών ενεργών ηφαιστειών την καθιστούν ιδανική για την μελέτη και παρακολούθηση των γεωδυναμικών φαινομένων, κάτι που αποδεικνύεται και από τον αριθμό των ερευνητών που ασχολούνται, το πλήθος των μελετών και της γενικά έντονης ερευνητικής δραστηριότητας.

Η περιοχή της Σαντορίνης, ιδιαίτερα, συγκεντρώνει την προσοχή των ερευνητών λόγω του ενεργού της ηφαιστείου, που για τελευταία φορά εξερράγη το 1950, ενώ αποτελεί ένα από τα λίγα ηφαίστεια τύπου καλδέρας παγκοσμίως για το οποίο υπάρχουν τεκμήρια της δραστηριότητάς του από τα αρχαία χρόνια. Εντεκα μόνιμοι σταθμοί είναι τοποθετημένοι στο συγκρότημα των νησιών της από τις αρχές του 2011. Η Σαντορίνη θεωρείται ότι είναι ένα ανενεργό ηφαίστειο με αρκετά υψηλή γεωδυναμικών αναταραχή. Δυο μεγάλες τεκτονικές ζώνες από ΒΑ προς ΝΔ ‘διατρέχουν’ το νησί. Οι γραμμές Καμένη και Κολούμπο, οι οποίες τέμνουν το κύριο μέρος του ηφαιστειακού οικοδομήματος, έχουν επηρεάσει τη ροή μάγματος σε σχετικά ρηχά βάθη με αποτέλεσμα την εμφάνιση επιμέρους ηφαιστειακών κέντρων στο νησί.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την ανάλυση των μετρήσεων του δικτύου των μόνιμων σταθμών ανά έτος, ήτοι 2013, 2014 και 2015 και εύρεση των παραμορφώσεων των μόνιμων σταθμών. Με βάση αυτήν την επεξεργασία υπολογίζονται οι μετατοπίσεις καθώς και οι ταχύτητες των μόνιμων σταθμών ημερησίως. Δημιουργήθηκαν χρονοσειρές συνιστωσών με σκοπό την περαιτέρω παρακολούθηση της μετακίνησης με την πάροδο των ετών.

Η Σαντορίνη¹

Η Σαντορίνη, ευρέως αναφέρεται ως Θήρα, ανήκει στα νησιά των Κυκλάδων και βρίσκεται 120 km βόρεια της Κρήτης. Αποτελείται από τα νησιά Θήρα, Θηρασιά, Ασπρονήσι, Παλαιά Καμένη και Νέα Καμένη. Η Θήρα, η Θηρασιά και το Ασπρονήσι είναι τα υπολείμματα της μεγάλης Μινωικής έκρηξης, ενώ η Παλαιά και Νέα Καμένη σχηματίστηκαν στο κέντρο της καλδέρας από μεταγενέστερες εκχύσεις λάβας κατά τους ιστορικούς χρόνους, με τελευταία έκρηξη το 1950.

Η Σαντορίνη έχει ένα ορθογώνιο σχήμα περίπου 12 χιλιόμετρα επί 7 χιλιόμετρα. Στις τρεις πλευρές αυτή η 'λιμνοθάλασσα' είναι περικυκλωμένη από 300μ. ύψος βάραθρα ή βραχώδη ακρωτήρια. Το νησί έχει κλίση κατάβασης από τα ψηλά βράχια στο Αιγαίο Πέλαγος. Υπάρχει επίσης ένα συγκριτικά μικρότερο νησί, η Θηρασιά, που αποτελεί το σύνορο της 'λιμνοθάλασσας'. Αρχικά, περίπου 2 εκατομμύρια χρόνια πριν, η Σαντορίνη ήταν ένα μικρό μη ηφαιστειακό νησί. Το Βουνό Προφήτης Ηλίας, που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού, μαρτυρεί το γεγονός αυτό καθώς αποτελείται από μη ηφαιστειακό ασβεστόλιθο.

Το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης είναι το πιο ενεργό του Ηφαιστειακού Τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Το ηφαιστειακό τόξο έχει μήκος 500 km και πλάτος 20-40 km και εκτείνεται από την ηπειρωτική Ελλάδα μέχρι την Τουρκία.

Τα κύρια ηφαιστειακά κέντρα στον ελληνικό χώρο είναι τα Μέθανα, η Μήλος, η Σαντορίνη και η Νίσυρος. Το τόξο σχηματίζεται από την καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική, ή ακριβέστερα την υποπλάκα του Αιγαίου. Η κατάδυση γίνεται με ταχύτητα 5 εκ/έτος προς τα βορειοδυτικά με γωνία 30-40°, και το όριο μεταξύ των δύο πλακών βρίσκεται στην Ελληνική Τάφρο νότια της Κρήτης βλ. εικόνα 3.

Ονομασία ²

Το όνομα της νήσου "Θήρα" προέρχεται από τον αρχαίο Σπαρτιάτη Θήρα που, αποίκησε πρώτος τη νήσο αυτή. Το δε όνομα "Σαντορίνη" προέρχεται από τους διερχόμενους Φράγκους Σταυροφόρους οι οποίοι κατά το πέρασμά τους στέκονταν για ανεφοδιασμό κοντά σε εκκλησία της Αγίας Ειρήνης, που βρίσκεται στη σημερινή περιοχή της Περίσας πίσω από τον ιερό ναό του Τιμίου Σταυρού (την αποκάλεσαν Σάντα Ιρίνα), η οποία υπήρχε στο νησί.

Αρχικά υπήρχε η άποψη ότι η εκκλησία αυτή ήταν το παρεκκλήσι της Αγίας Ειρήνης που

1 Παραδείσης Δ. (2000)

2 Παραδείσης Δ. (2000)

υπήρχε στη Θηρασιά, σήμερα θεωρείται πιθανότερο να πρόκειται για τη μεγαλοπρεπέστατη παλαιοχριστιανική τρίκλιτη βασιλική της Αγίας Ειρήνης στη Θήρα.

Η Σαντορίνη είναι το γνωστότερο ενεργό ηφαίστειο του Ηφαιστειακού Τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Είναι ένα πολυσύνθετο στρωματοηφαίστειο με μία μεγάλη καλδέρα που σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια διαφόρων μεγάλων και βίαιων εκρήξεων. Στην εικόνα 2 είναι εμφανή τα διαφορετικά στρώματα λάβας, κίσσης, σκωριών και πυροκλαστικών.



Εικόνα 2

Μερική άποψη των κατακόρυφων τοιχωμάτων της καλδέρας, που προήλθε από την εγκατακρήμνιση του ηφαιστειακού κώνου κατά την έκρηξη τον 16ο αιώνα π.Χ.. Διακρίνεται η εντυπωσιακή αλληλουχία των ηφαιστειακών σχηματισμών από λάβες και πυροκλαστικά υλικά, χαρακτηριστικά υψηλής αισθητικής και επιστημονικής προσέγγισης (πηγή: Ευθύμιος Λέκκας).

Το νησί, εκτός από ένα μικρό μη ηφαιστειακό αλπικό υπόβαθρο, αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ηφαιστειακά πετρώματα, τα οποία διακρίνονται ως μία πολύχρωμη ακολουθία στα απότομα τοιχώματα της εντυπωσιακής καλδέρας. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Σαντορίνη ξεκίνησε πριν από περίπου 2 Ma όταν ήταν ένα μικρό στρογγυλό νησί, παρόμοιο με τα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων. Η μορφολογία του νησιού άλλαξε απότομα μετά την έκρηξη του ηφαιστείου.

Η Σαντορίνη πριν τη Μινωική έκρηξη ήταν ένα πλούσιο οικονομικά και πολιτισμικά ανεπτυγμένο κέντρο στη Μεσόγειο. Η Μινωική έκρηξη, που συνέβη το 1613 π.Χ., κατά την ύστερη περίοδο του Χαλκού, και συγκλόνισε την ανατολική Μεσόγειο ήταν μία από τις μεγαλύτερες εκρήξεις των ιστορικών χρόνων. Οι αποθέσεις της έκρηξης σχημάτισαν το παχύ λευκό κάλυμμα από στάχτη και κίσηρη που κάλυψε σχεδόν όλο το νησί κατέστρεψε τα πάντα στο νησί κρατώντας τα θαμμένα για 3.700 χρόνια περίπου. Από το 1969 ξεκίνησαν ανασκαφές στην περιοχή του Ακρωτηρίου, οι οποίες έφεραν στο φως μία σημαντική Κυκλαδική πόλη. Εκτός από τα πολύ εντυπωσιακά ευρήματα (πχ. τοιχογραφίες, κεραμικά, κ.ά.) οι ανασκαφές αποκαλύπτουν ότι οι άνθρωποι εγκατέλειψαν το νησί πριν την έκρηξη.

Γεωλογία Σαντορίνης¹

Η Σαντορίνη βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος από 36° 19' 56" έως 36° 28' 40" Βόρειο και γεωγραφικό μήκος από 25° 19' 22" έως 25° 29' 13"Α. Η σημερινή ημικυκλική και περισσότερο πεταλοειδής μορφή της νήσου οφείλεται στις κατά καιρούς ηφαιστειακές εκρήξεις που μετέβαλαν το αρχικό στρογγυλό σχήμα του νησιού.

Η όψη της από την πλευρά του ηφαιστείου παρουσιάζεται βραχώδης και απόκρημνη σε αντίθεση με την ομαλότητα του εδάφους της στο υπόλοιπό νησί. Η επιφάνειά της, 76,19 km², είναι κατά το πλείστον ελαφρόπετρα πολύ δεκτική σε καλλιέργεια. Αναφορικά θα επισημάνουμε ότι στη Σαντορίνη το κυριότερο εξαγωγικό προϊόν είναι το κρασί.

Στο ΝΑ τμήμα της, βρίσκεται το βουνό του Προφήτη Ηλία με το ομώνυμο μοναστήρι του 18ου αι., το οποίο έχει υψόμετρο 567m και αποτελείται από τιτανώδη βράχια και λευκό μάρμαρο. Αυτά τα ασβεστολιθικά πετρώματα είναι τα παλαιότερα της Σαντορίνης και σχημάτιζαν ένα μικρό νησί πριν αρχίσει η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Συνέχεια αυτού είναι το Μέσα Βουνό ή Βουνό του Αγίου Στεφάνου, λόγω του παλαιοχριστιανικού ναού που υπάρχει εκεί και το οποίο έχει υψόμετρο 366μ. Ο ενδιάμεσος αυχένας που συνδέει τα δύο βουνά αποκαλείται Σελλάδα. Η περίμετρος της Σαντορίνης είναι περίπου 66 km και παρουσιάζει έξι όρμους: Το Αμμούνδι ή Άγιος Νικόλαος, η Πάνω Μεριά (Οία Θήρας), ο Αρμένης, ο όρμος Μουζάκι, τους όρμους Φηρών και Αθηνιού και τον όρμο του Μπάλου στο Ακρωτήριο.

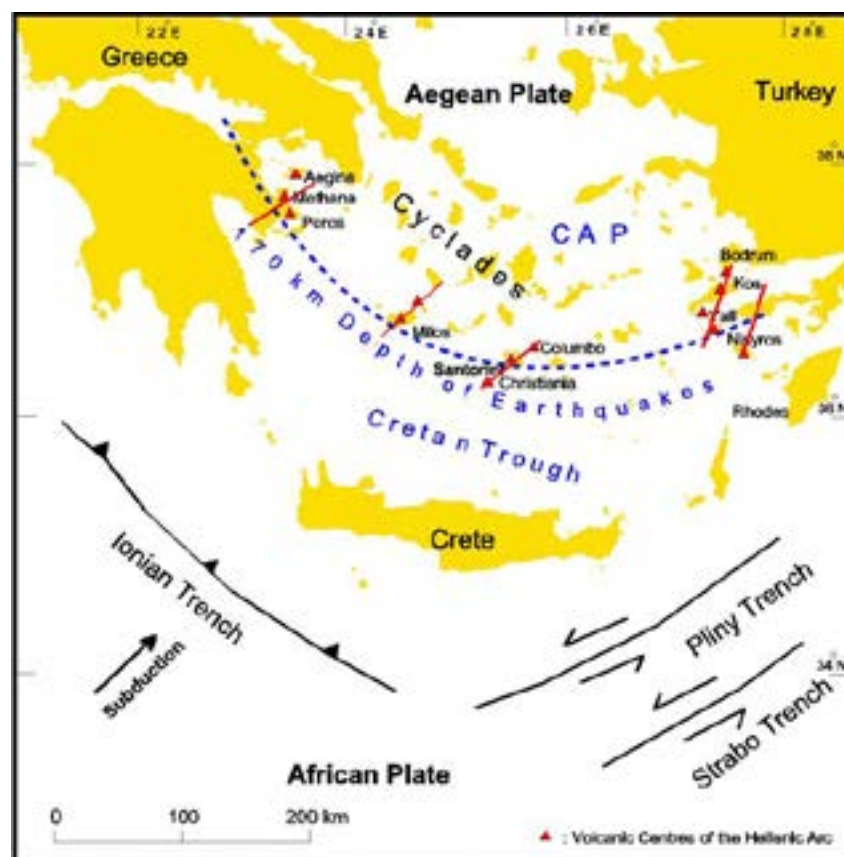
1 Παραδείσης Δ. (2000)

Γενικά η Σαντορίνη είναι άνυδρη και ξερή, χωρίς λίμνες, ποταμούς, ρεματιές ή χαράδρες. Οι αρδευτικές ανάγκες της καλύπτονται κυρίως από γεωτρήσεις που γίνονται στο υπέδαφός της, όπου συγκεντρώνεται κυρίως το βρόχινο νερό. Υφίστανται στη νήσο 3 κύριες πηγές καθώς και 4 ιαματικές πηγές. Το έδαφος του νησιού είναι ηφαιστειογενές, πεδινό στο μεγαλύτερο μέρος του και βραχώδες από την πλευρά του ηφαιστείου. Το έδαφος είναι εύφορο και ευνοεί την καλλιέργεια των αμπελιών, της φάβας και της ντομάτας (άνυδρη και μικρόκαρπη ποικιλία). Στο νησί καλλιεργούνται 15.000 στρέμματα με αμπελώνες, ενώ σχεδόν τα μισά (7.100 στρέμματα) καλλιεργούνται στην περιοχή της Οίας.

Πριν αρχίσει η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη θέση της Σαντορίνης υπήρχε ένα μικρό νησί που αποτελούνταν από μεταμορφωσιγενή πετρώματα, κυρίως μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους και σχιστόλιθους.

Εικόνα 3

Ηφαιστειακό τόξο Αιγαίου. πηγή www.geo.auth.gr



Η ηφαιστειακή δραστηριότητα αρχικά έλαβε χώρα στην περιοχή του Ακρωτηρίου και στις νησίδες Χριστιανά Θήρας. Αυτά τα πετρώματα σήμερα έχουν αλλοιωθεί έντονα. Στη συνέχεια, πριν 500.000 χρόνια περίπου, δημιουργήθηκε στα βόρεια του νησιού το ηφαίστειο της Περιστερίας, το οποίο παρήγαγε ανδεσιτικές λάβες.

Σήμερα υπολείμματα του ηφαιστείου αυτού βρίσκονται στον Μικρό Προφήτη Ηλία και το Μεγάλο Βουνό. Συγχρόνως μικρότερα ηφαίστεια - κώνοι σκωρίας - ήταν ενεργά προς τα

νότια, στον Μπάλο, Κόκκινη Παραλία και Κοκκινόπετρα. Στη συνέχεια μέχρι πριν 200.000 χρόνια, δημιουργείται ένα ασπιδωτό ηφαίστειο που ενώνει όλα τα επιμέρους νησιά. Αυτή η φάση τελειώνει με μια σειρά ισχυρών εκρήξεων που δημιουργεί την πρώτη καλδέρα.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα παρατηρείται ξανά πριν 180.000 χρόνια. Μια δεύτερη καλδέρα δημιουργείται πριν 40.000 με 60.000 χρόνια από ισχυρές εκρήξεις. Στη συνέχεια σχηματίζονται ηφαίστεια του Σκάρου και της Θηρασίας, τα οποία καταστρέφονται από την έκρηξη του Ρίβα πριν 21.000 χρόνια. Τον 17ο αιώνα π.Χ. λαμβάνει χώρα η μινωική έκρηξη, η οποία δίνει στην καλδέρα το σημερινό της σχήμα.

Η μινωική έκρηξη είναι από τις μεγαλύτερες των ιστορικών χρόνων και είχε σημαντικό αντίκτυπο στην Ανατολική Μεσόγειο. Ο όγκος των ηφαιστειακών αναβλημάτων υπολογίζεται ανάμεσα σε 39 και 61, ίσως και 99 km³ και κάλυψαν με ένα στρώμα πάχους δεκάδων μέτρων τη Σαντορίνη. Η δραστηριότητα κατά τους ιστορικούς χρόνους δημιούργησε τις νησίδες Νέα Καμένη Θήρας και Παλαιά Καμένη Θήρας μέσα στην καλδέρα.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Σαντορίνη είναι αποτέλεσμα της καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική, ή ακριβέστερα την υποπλάκα του Αιγαίου. Η καταβύθιση γίνεται με ταχύτητα 5 cm/έτος προς τα βορειοανατολικά με γωνία 30°-40° και το όριο μεταξύ των δύο πλακών βρίσκεται στην ελληνική τάφρο νότια της Κρήτης. Πλάκα της Αφρικής λιώνει σε μεγάλο βάθος και στη συνέχεια τα λιωμένα πετρώματα ανέρχονται στην επιφάνεια και σχηματίζουν τα ηφαίστεια των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης και της Νισύρου, τα οποία αποτελούν το Ηφαιστειακό Τόξο του Νοτίου Αιγαίου. Το σύμπλεγμα της Σαντορίνης, που περιλαμβάνει επίσης τις νησίδες Χριστιανά και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο, είναι το πιο ενεργό του τόξου.

Η ιδιομορφία και μοναδικότητα του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης, όπως την προσεγγίζει η επιστήμη της γεωλογίας έγκειται στον συνδυασμό των ακόλουθων στοιχείων:

- Των εντυπωσιακών γεωλογικών-γεωδυναμικών διεργασιών και ιδιαίτερα της γεωλογικής δομής και εξέλιξης του ηφαιστειακού οικοδομήματος.
- Των υφιστάμενων γεωμορφολογικών ιδιοτεροτήτων με την ανάπτυξη της μεγαλύτερης καλδέρας.
- Της πλούσιας ιστορικής κληρονομιάς με γεγονότα και έργα άρρηκτα συνδεδεμένα με τη δράση του ηφαιστείου από τους προϊστορικούς χρόνους έως σήμερα.
- Της αρχιτεκτονικής μεγάλου τμήματος του δομημένου περιβάλλοντος, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στο γεωλογικό, γεωμορφολογικό, φυ-

Δραστηριότητα του Ηφαιστείου

Η καλδέρα της Σαντορίνης έχει υπάρξει πηγή μεγάλων εκρήξεων και τσουνάμι κατά το παρελθόν. Από το 1570 μ.Χ. ξεκίνησε μια σειρά εκρήξεων, με χρονική απόσταση μεταξύ τους από 14 έως 160 χρόνια (Parks et al., 2012), που είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία του νησιού της Νέας Καμένης, με την πιο πρόσφατη δραστηριότητα να τελειώνει το 1950. Από τότε το ηφαίστειο ήταν ήρεμο, με ασήμαντες παραμορφώσεις (Stiros et al., 2010), με την κύρια σεισμική δραστηριότητα έξω από την καλδέρα δηλαδή 10 km ΒΑ της Θήρας (Dimitriadis et al., 2009). Παρόλα αυτά, η περίοδος που το ηφαίστειο κοιμόταν τελείωσε στις αρχές του 2011. Σποραδικές μετρήσεις GPS και παρατηρήσεις δικτύου σειсмоγράφων της περιοχής (Newman et al., 2012) δείχνουν ότι το ηφαιστειακό συγκρότημα είχε μπει σε μια νέα φάση ανησυχίας, ενώ παρατηρήθηκε ευρεία παραμόρφωση της καλδέρας και αυξημένη σεισμική δραστηριότητα. Μελέτες που αφορούν τα ηφαίστεια τύπου καλδέρας, αλλά και το ηφαίστειο της Σαντορίνης ειδικά, δείχνουν πως πριν από κάθε έκρηξη λαμβάνει χώρα μια διαδικασία συσσώρευσης μάγματος σε έναν θόλο σε βάθος λίγων χιλιομέτρων από την επιφάνεια, στην περίπτωση της Σαντορίνης 4-5 km (Papadimitriou et al).

Ο χρόνος συσσώρευσης και ο όγκος του μάγματος ποικίλουν στην κάθε περίπτωση, δείχνοντας συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού συσσώρευσης μάγματος στον θόλο και της αντίστοιχης εκτόνωσης προς την επιφάνεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις εκρήξεις που δημιούργησαν την Νέα Καμένη ο όγκος ήταν στην κάθε περίπτωση από μερικές δεκάδες εκατομμύρια m³ έως και εκατό εκατομμύρια m³ (Parks et al., 2012). Σε μια τέτοια διαδικασία φάνηκε να είχε μπει το ηφαίστειο της Σαντορίνης στις αρχές του 2011.

Η Γεωδυναμική της Σαντορίνης³

Αντικείμενο της Γεωδυναμικής είναι η μελέτη του μεγέθους της Γης, του σχήματός της, του πεδίου βαρύτητάς της και οι μεταβολές αυτών στο χρόνο. Από τον ορισμό της, επομένως, γίνεται αντιληπτό πως η γεωδυναμική συνεισφέρει και αλληλεπιδρά και με άλλους επιστημονικούς τομείς, όπως είναι η γεωφυσική και η γεωδυναμική ειδικότερα. Η δορυφορική γεωδυναμική συγκεκριμένα, με την αξιοποίηση των GNSS (Global Navigation Satellite System -παγκόσμιο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού) παρέχει στους ερευνητές χρήσιμα εργαλεία για την μελέτη διάφορων φαινομένων.

2 Ευθ. Λέκκας – Χ. Καραγεωργίου

3 Δ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ 2013

Έντονο είναι και το ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με αυτά τα φαινόμενα, με πλήθος ερευνητικών υπηρεσιών από όλο τον κόσμο να μελετούν και να παρακολουθούν την δραστηριότητα της περιοχής.

Από τις αρχές του 2011 υπάρχουν ενδείξεις αφύπνισης του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Η φαινόμενη δραστηριότητα του μπορεί να αποτυπωθεί με την ποσοτικοποίηση των τοπικών παραμορφώσεων και μετατοπίσεων με γεωδαιτικές μεθόδους.

B. Μόνιμοι σταθμοί GPS στην Σαντορίνη

Διάφορα ιδρύματα έχουν εγκαταστήσει μόνιμους σταθμούς GPS στην περιοχή της Σαντορίνης, οι οποίοι τον Σεπτέμβρη του 2012 έφταναν το αριθμό των 10. Αυτό το αρκετά πυκνό δίκτυο τοποθετήθηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος μετά τα μέσα του 2011, ακολουθώντας την έναρξη της ‘ενεργοποίησης’ του ηφαιστείου (αυτό ισχύει για τους σταθμούς DSLN, WNRV,



Εικόνα 4
Α) Κεντρικός σταθμός NOMI
Β) Περιφερειακός σταθμός KERA
Γ) Περιφερειακός σταθμός PKMN

SANT, RIBA, MOZI και MKMN), ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί (KERA, NOMI, PKMN) είχαν ήδη τοποθετηθεί από την Unavco το Μάιο του 2006.

Το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας) έχει εγκατατήσει τους SNTR, MKAM, SANT, τους WNRV, DSLN (ΕΜΠ), τον THIR (Αστεροσκοπείου), η UNAVCO τους RIBA, NOMI, MOZI, KERA, PKMN, MKMN.

Το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου και το εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας του ΕΜΠ, επεξεργάζονται τα δεδομένα από αυτούς τους σταθμούς GPS από τις αρχές του 2011. Το δίκτυο είναι ενσωματωμένο στο σχήμα αυτόματης επεξεργασίας που αναπτύσσεται από το ΚΔΔ και τα αποτελέσματα αναλύονται με σκοπό την απόκτηση “εικόνας” για τα υποκείμενα γεωφυσικά φαινόμενα. Λόγω της μοναδικής δραστηριότητας της καλδέρας, είναι κρίσιμη η στενή παρακολούθηση του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, γίνεται μια ταχεία επίλυση συνεταγμένων κάθε 24 ώρες, που μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα του ΚΔΔ σε μορφή χρονοσειρών (ΕΜΠ-ΚΔΔ, 2012).

1. GPS- BERNESE

1.1 Το IGSο8

Το IGSο8 είναι ένα παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς το οποίο υλοποιείται από ένα σύνολο μόνιμων σταθμών GPS, κατανεμημένων σε όλη την Γη, με τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σταθμών και των γραμμικών ταχυτήτων τους σε κάθε συνιστώσα.

Η εικόνα 5 δείχνει τους σταθμούς αναφοράς IGS Reference Frame (RF) που χρησιμοποιείται από βδομάδα GPS 1709 (7η Οκτωβρίου 2012). Αυτό το πλαίσιο αναφοράς, που ονομάζεται IGbο8, είναι μια μικρή ενημέρωση της προηγούμενης IGSο8.

Εικόνα 5



Χάρτης των σταθμών IGbο8 core network υπό τη σκέπη του IGS Reference Frame (RF) stations απο <http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Είναι στενά συνδεδεμένο με το ITRF2008. Ορίζεται από ένα σύνολο 232 επιλεγμένων μόνιμων σταθμών του ITRF2008, παγκόσμια κατανεμημένους και σταθερούς στην απόδοσή τους. Ένας σταθμός έχει σταθερή απόδοση όταν η πραγματική του θέση με την πάροδο του χρόνου είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην θέση που προσδιορίζεται από το γραμμικό μοντέλο του συστήματος αναφοράς (συντεταγμένες και ταχύτητες). Για την επιλογή των σταθμών χρησιμοποιούνται και άλλα κριτήρια (Rebischung et al., 2011).

Από αυτούς τους 232 σταθμούς, λόγω της ετερογενούς πυκνότητας σταθμών ανά περιοχή, επιλέγεται ένα υποσύνολο 91 από αυτούς με ομοιογενή κατανομή πάνω στην Γη, το οποίο αποτελεί την βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος αναφοράς. Ονομάζεται IGSο8 core network (“δίκτυο πυρήνας”) και προορίζεται για χρήση σε εφαρμογές παγκόσμιας κλίμακας καθώς και σαν αναφορά για τα προϊόντα της IGS (π.χ. δορυφορικές τροχιές ακριβείας).

Στην περιοχή της Ευρώπης υπάρχει πυκνό δίκτυο σταθμών που συμμετέχει στην υλοποίηση του IGS08.

1.2 Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού GPS

Συνοπτικά, το GPS είναι ένα δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (3-Δ), χρόνου και ταχύτητας για ακίνητο και κινούμενο δέκτη σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λίγες ώρες ανάλογα με το είδος των εφαρμογών), παραβλέποντας κλασικές επίγειες τεχνικές που εφαρμόζονται, όπως ο τριγωνισμός, ο τριπλευρισμός ή συνήθως ο συνδυασμός αυτών των δυο μεθόδων, που παρέχουν τις επιφανειακές ελλειψοειδείς συντεταγμένες και η υψομετρία, που παρέχει την τρίτη παράμετρο, τα υψόμετρα. Βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοΐας και εξασφαλίζει συνεχή παγκόσμια πλοήγηση, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες σε απεριόριστο αριθμό χρηστών.



Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται είναι ο προσδιορισμός θέσης με την μέτρηση 4 “ψευδοαποστάσεων” μεταξύ του παρατηρητή και του δορυφόρου.

Για το λόγο αυτό η σχεδίαση των τροχιών των δορυφόρων έγινε με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση 4 τουλάχιστον δορυφόρων από οποιοδήποτε σημείο της γης κάθε χρονική στιγμή. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου άγνωστων συντεταγμένων στο χώρο αρκούν οι μετρήσεις των αποστάσεων από τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων (πλευρική οπισθοτομία στο χώρο), συνεπώς θα αρκούσαν και 3 δορυφόροι για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στο σύστημα αναφοράς των δορυφόρων. Ο λόγος που απαιτούνται τουλάχιστον 4 δορυφόροι (αποστάσεις) είναι για να προσδιοριστεί η διάφορα ανάμεσα στην ένδειξη του χρονομέτρου του χρήστη και την ένδειξη του χρονομέτρου του δορυφόρου, δηλαδή την καθυστέρηση του χρονομέτρου του δέκτη σε σχέση με το χρόνο αναφοράς του GPS. Ακριβώς για αυτόν το λόγο της ύπαρξης του σφάλματος χρησιμοποιείται και ο όρος ψευδοαπόσταση.

Ο χρόνος αναφοράς του GPS έχει έναρξη την 00.00 UTC της 5ης Ιαν. 1980. Η προσδιοριζόμενη θέση (X,Y,Z) αναφέρεται στο Παγκόσμιο Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς 1984, γνωστό ως WGS 84.

1.2.1 Επίγειο Τμήμα Ελέγχου

Οι δορυφόροι, όπως είναι αναμενόμενο, είναι πολύ πιθανό να αντιμετωπίσουν ανά πάσα στιγμή προβλήματα στη σωστή λειτουργία τους. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε αυτούς αφορούν στη σωστή τους ταχύτητα, το υψόμετρο και την κατάσταση της επάρκειάς τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, εφαρμόζονται όλες οι διορθωτικές ενέργειες που αφορούν στο σύστημα χρονομέτρησης των δορυφόρων, ώστε να αποτρέπεται η παροχή λανθασμένων πληροφοριών στους χρήστες του συστήματος. Το τμήμα επίγειου ελέγχου αποτελείται από 1 επανδρωμένο και 4 μη επανδρωμένα κέντρα, εγκατεστημένα σε ισάριθμες περιοχές του πλανήτη.



Εικόνα 6

Επίγειο τμήμα ελέγχου των σταθμών GPS (<http://www.gps.gov/systems/gps/>)

Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής:

- α) Κολοράντο (ΗΠΑ)
- β) Χαβάη (Ανατολικός Ειρηνικός Ωκεανός)
- γ) Ascension Island (Ατλαντικός Ωκεανός)
- δ) Diego Garcia (Ινδικός Ωκεανός)
- ε) Kwajalein (Δυτικός Ειρηνικός Ωκεανός)

Ο κυριότερος σταθμός βάσης είναι αυτός του Κολοράντο, ο οποίος είναι μάλιστα και ο μοναδικός που βρίσκεται στην ξηρά. Αναλαμβάνει τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των εναπομεινάντων τεσσάρων σταθμών, καθώς και τον συντονισμό τους. Σημειώνοντας τη θέση των σταθμών αυτών πάνω σε έναν παγκόσμιο χάρτη, παρατηρεί κανείς ότι η διάταξή τους δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθούν μια γραμμή παράλληλη με τα γεωγραφικά μήκη της Γης.

1.2.2 Συχνότητες δορυφόρων

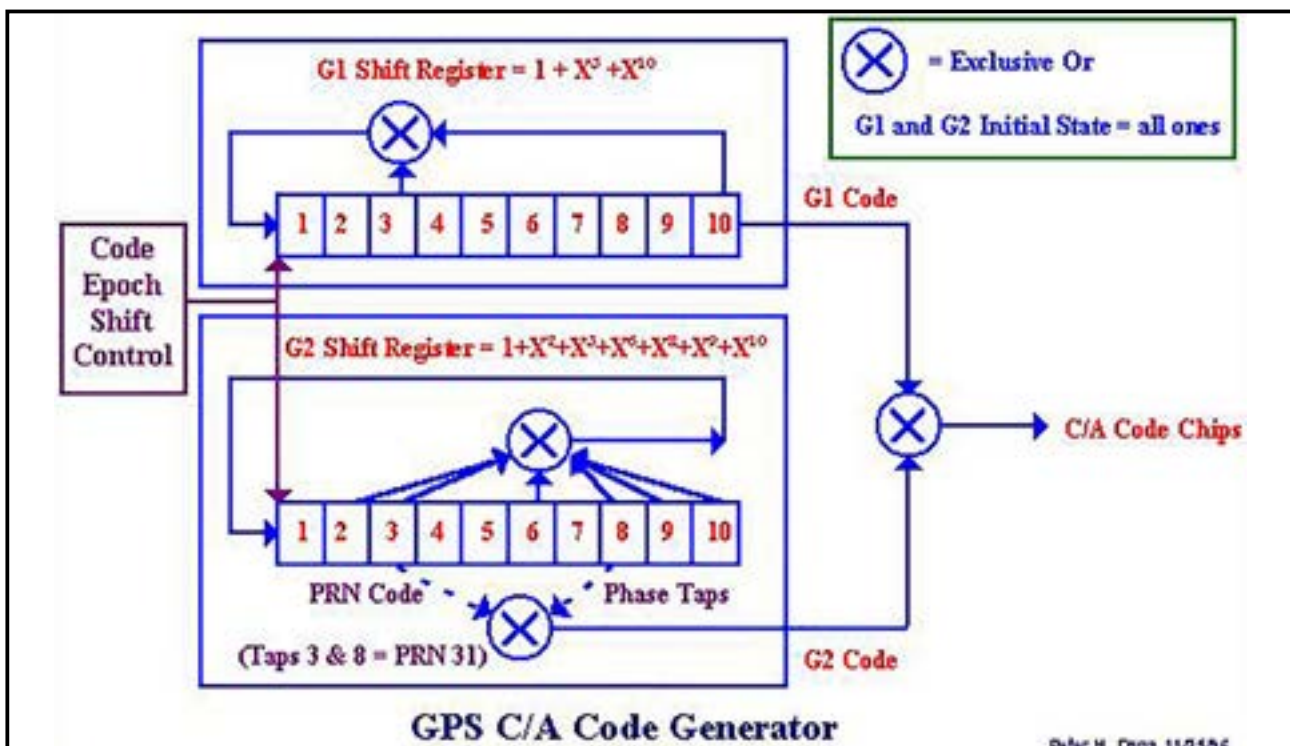
Όλοι οι δορυφόροι εκπέμπουν στις δυο ίδιες συχνότητες, 1.57542 GHz (L1 signal) και 1.2276 GHz (L2 signal).

Το σήμα που εκπέμπει κάθε δορυφόρος είναι “μοναδικό”, εξαιρετικά σύνθετο και βασίζεται σε δυο φέρουσες συχνότητες στην περιοχή του φάσματος των μικροκυμάτων

$$L1 = 154 \times 10.23 = 1575.42 \text{ MHz και}$$

$$L2 = 120 \times 10.23 = 1227.60 \text{ MHz, (πίνακας 1)}$$

πολλαπλάσιες της βασικής συχνότητας των 10.23 MHz.



Εικόνα 7
C/A ‘γεννήτρια κωδικών’ (πηγή: www.gps.gov)

Γενικότερα, για την απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία πέραν των δύο συχνοτήτων διάφοροι γραμμικοί συνδυασμοί τους όπως η L3 για εξάλειψη του φαινομένου της ιονοσφαιρικής διάθλασης.

Το σήμα παράγεται από την σύνθεση δυο κωδικών μοναδικών για κάθε δορυφόρο, του C/A (coarse/acquisition) που προστίθεται μόνον στον φορέα (συχνότητα) L1 και του P (precision), που διαμορφώνεται και στις δυο συχνότητες L1, L2. Οι κώδικες καλούνται και ψευδοτυχαίοι εξαιτίας του γεγονότος ότι με τη βοήθεια αυτών είναι δυνατή η μέτρηση των ψευδοαποστάσεων.

Ο δέκτης δέχεται το σήμα, συγκρίνει τον λαμβανόμενο κώδικα με ένα αντίγραφο που παράγει ο ίδιος και τελικά ταυτίζει το σήμα και ο χρόνος διαδρομής του σήματος πολλαπλασιαζόμενος με την ταχύτητα του φωτός c μας δίνει την απόσταση μεταξύ δέκτη και δορυφόρου. Αυτή η απόσταση ονομάζεται ψευδοαπόσταση γιατί δεν περιλαμβάνει την χρονική ολίσθηση μεταξύ χρονομέτρων δέκτη και δορυφόρου και η οποία προστίθεται σαν επιπλέον άγνωστος στην εξίσωση υπολογισμού.

Οι μετρήσεις με δορυφορικό σύστημα εντοπισμού διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: σε μετρήσεις ψευδοποαστάσεων και σε μετρήσεις φάσεων. Ακριβέστερες από αυτές είναι οι μετρήσεις φάσεων.

Στις μετρήσεις φάσης μετράται η διαφορά φάσης του σήματος του δορυφόρου τη στιγμή εκπομπής με τη φάση του σήματος του δέκτη τη στιγμή της λήψης. Η διαφορά φάσης σε κύκλους πολλαπλασιαζόμενη με το μήκος κύματος λ μετατρέπεται σε απόσταση.

Band	Frequency	Description
L1	1575.42 MHz	Coarse-acquisition (C / A) και κρυπτογραφημένη ακριβείας (P (Y)) κωδικούς, συν το L1 πολιτική (L1C) και στρατιωτική (M) πληροφορία
L2	1227.60 MHz	P(Y) κώδικα, συν το L2C και στρατιωτικών κωδικών στο Block IIR-M και νεότερους δορυφόρους
L3	1381.05 MHz	Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση πυρηνική έκρηξη (NUDET)
L4	1379.913 MHz	Μελετάται για πρόσθετες ιονόσφαιρικές διορθώσεις.
L5	1176.45 MHz	Προτείνεται για χρήση ως ένα πολιτικό μήνυμα ασφάλειας της ζωής (SoL)

Πίνακας 1

ανάλυση GPS συχνοτήτων. πηγή: www.gps.gov/

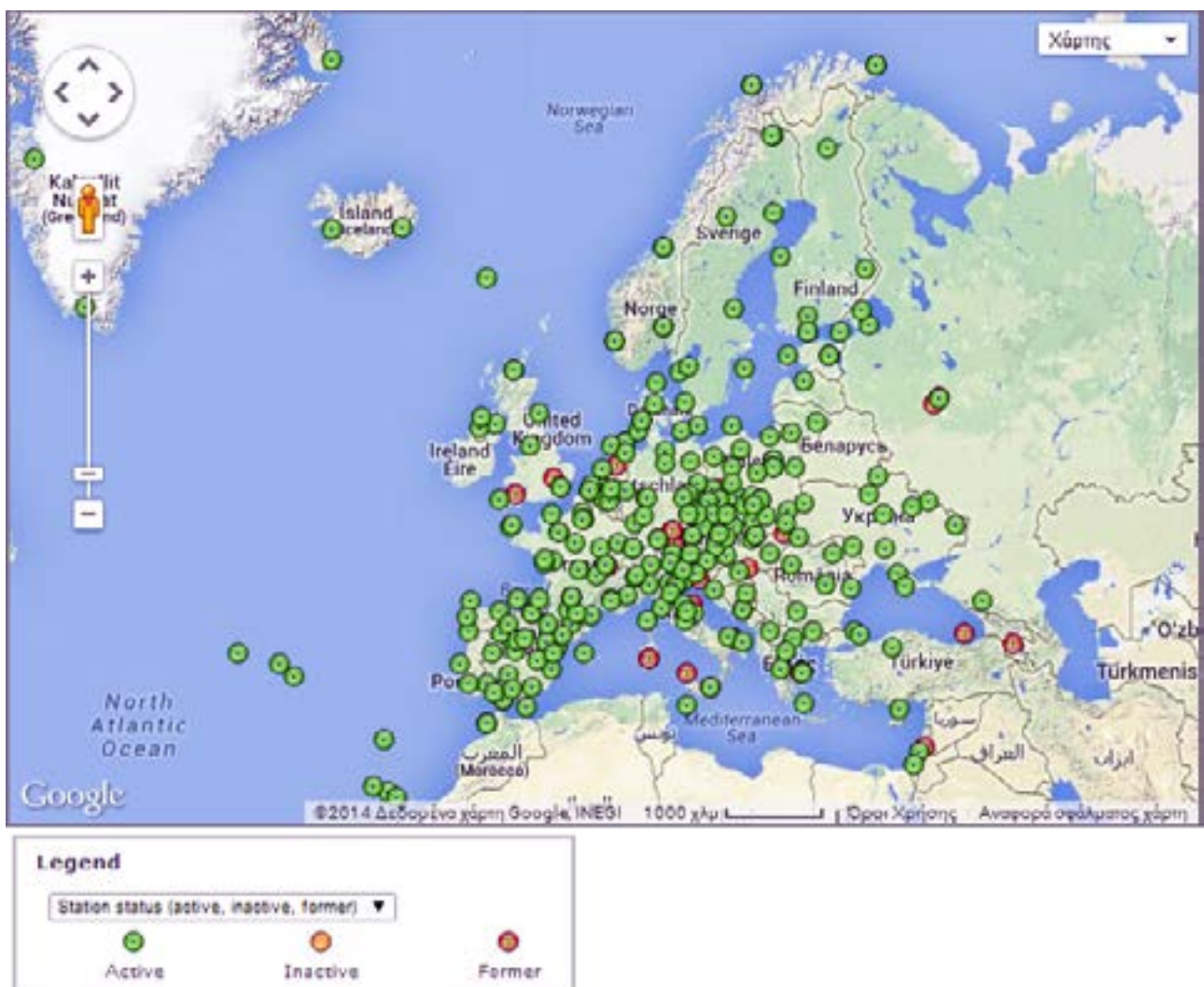
Τη στιγμή της λήψης ο δέκτης μετράει μόνο το κλασματικό μέρος της φάσης μιας και δεν μπορεί να μετρήσει και τον ακέραιο αριθμό κύκλων που αντιστοιχεί στην απόσταση δορυφόρου-δέκτη. Επομένως, οι μετρήσεις φάσης παρουσιάζουν το πρόβλημα της αβεβαιότητας (ambiguity) στον προσδιορισμό αυτού του ακέραιου αριθμού N , κάτι το οποίο λύνει με συγκεκριμένο αλγόριθμο ο κάθε δέκτης στην έναρξη των μετρήσεων.

Στην περίπτωση αδυναμίας λήψης του σήματος χάνεται ένας αριθμός ακέραιων κύκλων με συνέπεια όλες οι επόμενες μετρήσεις να είναι μετατοπισμένες κατά τον ίδιο αριθμό κύκλων.

Το πρόβλημα αυτό (ολίσθηση κύκλων) αντιμετωπίζεται όπως και η ασάφεια των ακέραιων κύκλων από το δέκτη κατά την προεπεξεργασία ή και κατά τη διάρκεια της συνόρθωσης. Ο συνδυασμός μετρήσεων φάσης και κώδικα θεωρείται ο ιδανικότερος για τον εντοπισμό της ολίσθησης των κύκλων.

1.3 Δίκτυα Μόνιμων Σταθμών GNSS

Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ανάπτυξη και την διάδοση της χρήσης των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού, αναπτύσσονται και τα δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS. Δίκτυα εκατοντάδων σταθμών κατανεμημένων σε όλη τη Γη χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με παρατηρήσεις άλλων μεθόδων (VLBI, SLR) για την υλοποίηση των σύγχρονων γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς, όπως το ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ή το σύστημα αναφοράς της IGS. Παρέχουν με τις συνεχείς παρατηρήσεις τους τη δυνατότητα πέρα από τις συντεταγμένες, να προσδιορίζονται και οι ταχύτητες των σταθμών στο χώρο, σύμφωνα με την σύγχρονη αντίληψη για τα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς που τα θεω-



Εικόνα 8
Μόνιμο δίκτυο σταθμών EUREF epncb.oma.be

ρεί δυναμικά συστήματα.

Αυτή ακριβώς η αντίληψη και η αντίστοιχη υλοποίηση των συστημάτων αναφοράς, σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων του GPS που επιτυγχάνεται με τις σύγχρονες μεθόδους επεξεργασίας των δεδομένων, καθιστά τα δίκτυα μόνιμων σταθμών ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην παρακολούθηση και μελέτη των παραμορφώσεων του γήινου φλοιού και άλλων φαινομένων που σχετίζονται με τη γεωφυσική, τόσο σε παγκόσμια και ηπειρωτική κλίμακα, όσο και σε τοπική.

1.3.1 Οι Ευρωπαϊκοί Σταθμοί

Στις 17 Σεπτεμβρίου 2016, το EUREF δίκτυο είχε 293 μόνιμους σταθμούς εντοπισμού GNSS (συμπεριλαμβανομένου ενός ανενεργού).

Οι 16 σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά για τους τοπικούς σταθμούς της Σαντορίνης με μόνιμα παρακολουθούμενους σταθμούς στην Ευρώπη φαίνονται ενδεικτικά στο πίνακα 2. Οι 16 αυτοί σταθμοί έχουν γνωστές ταχύτητες, και δίνονται στην σελίδα ‘PRODUCTS & SERVICES > COORDINATES’ της ιστοσελίδας του EUREF.

Πίνακας 2

Τοποθεσίες μόνιμων σταθμών από Euref

<u>GRAZ ΑΥΣΤΡΙΑ</u>	<u>USAL ΙΤΑΛΙΑ</u>
<u>GRAS ΑΥΣΤΡΙΑ</u>	<u>WTZR ΓΕΡΜΑΝΙΑ</u>
<u>GSR1 ΣΛΟΒΕΝΙΑ</u>	<u>SOFI Βουλγαρία</u>
<u>MATE ΙΤΑΛΙΑ</u>	<u>ORID FYROM</u>
<u>NOT1 ΙΤΑΛΙΑ</u>	<u>TUC2 ΧΑΝΙΑ</u>
<u>AUT1 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ</u>	<u>ZIMM ΕΛΒΕΤΙΑ</u>
<u>DUTH ΞΑΝΘΗ</u>	<u>ZOUF ΙΤΑΛΙΑ</u>
<u>PATo ΠΑΤΡΑ</u>	<u>SBG2 ΑΥΣΤΡΙΑ</u>

Για να εξαχθεί η ταχύτητα του σταθμού ή για να αποκτηθούν οι θέσεις του σταθμού σε μια εποχή t διαφορετική από την t_0 , εφαρμόζεται η εξίσωση για τις ταχύτητες του σταθμού:

$$X(t) = X(t_0) + (t-t_0)*VX; Y(t) = Y(t_0) + (t-t_0)*VY$$

$$Z(t) = Z(t_0) + (t-t_0)*VZ$$

Για τον WTZR για παράδειγμα:

WTZR / IGb08	epoch to	Position (m)			Velocity (m/y)		
		X	Y	Z	V _x	V _y	V _z
185/2010 - 144/2015	001/2005	4075580.549 ± 0.000	931853.798 ± 0.000	4801568.133 ± 0.000	-0.0158 ± 0.0000	0.0173 ± 0.0000	0.0104 ± 0.0000

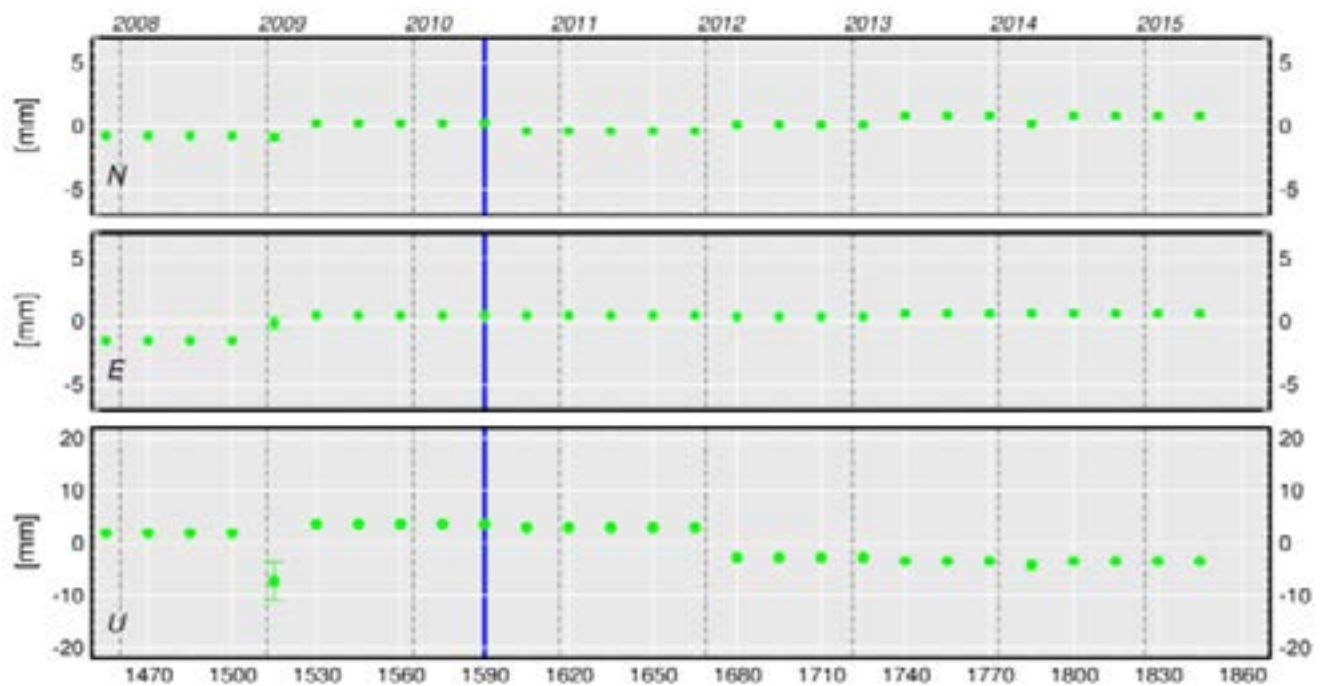
Ή

WTZR/ ITRF2008	epoch to	Position (m)			Velocity (m/y)		
		X	Y	Z	V _x	V _y	V _z
start - 365/2008	001/2005	4075580.553 ± 0.001	931853.797 ± 0.001	4801568.136 ± 0.001	-0.0160 ± 0.0001	0.0171 ± 0.0000	0.0101 ± 0.0001



Εικόνα 9

Ο μόνιμος σταθμός WTZRW



Εικόνα 10

Χρονοσειρά σταθμού WTZR

1.3.2 Παρακολούθηση του χώρου της Σαντορίνης

Το ηφαιστειακό συγκρότημα της Σαντορίνης συνίσταται από τα νησιά Ασπρονήσι, Θηρασιά, Παλαιά Καμένη, Νέα Καμένη, και Θήρα. Εκεί υπάρχει ένα δίκτυο 11 μόνιμων σταθμών GPS και τους επιλέχθηκαν όλοι, δηλαδή οι σταθμοί SANT, RIBA, NOMI, MOZI, KERA, PKMN, MKMN, WNRV, DSLN, SNTR, MKAM.

No	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΠΕΡΙΟΧΗ
1	KERA	ΘΗΡΑΣΙΑ
2	MOZI	ΘΗΡΑ
3	NOMI	ΘΗΡΑ
4	RIBA	ΘΗΡΑΣΙΑ
5	PKMN	ΠΑΛΑΙΑ ΚΑΜΕΝΗ
6	SANT	ΘΗΡΑ
7	DSLN	ΘΗΡΑ
8	WNRV	ΘΗΡΑ
9	SNTR	ΘΗΡΑ
10	MKAM	ΝΕΑ ΚΑΜΕΝΗ
11	MKMN	ΝΕΑ ΚΑΜΕΝΗ

Πίνακας 3
Οι μόνιμοι σταθμοί της Σαντο-
ρίνης που επιλέχθηκαν για την
επίλυση



Εικόνα 11

Οι επιλεγμένοι σταθμοί στη Σαντορίνη

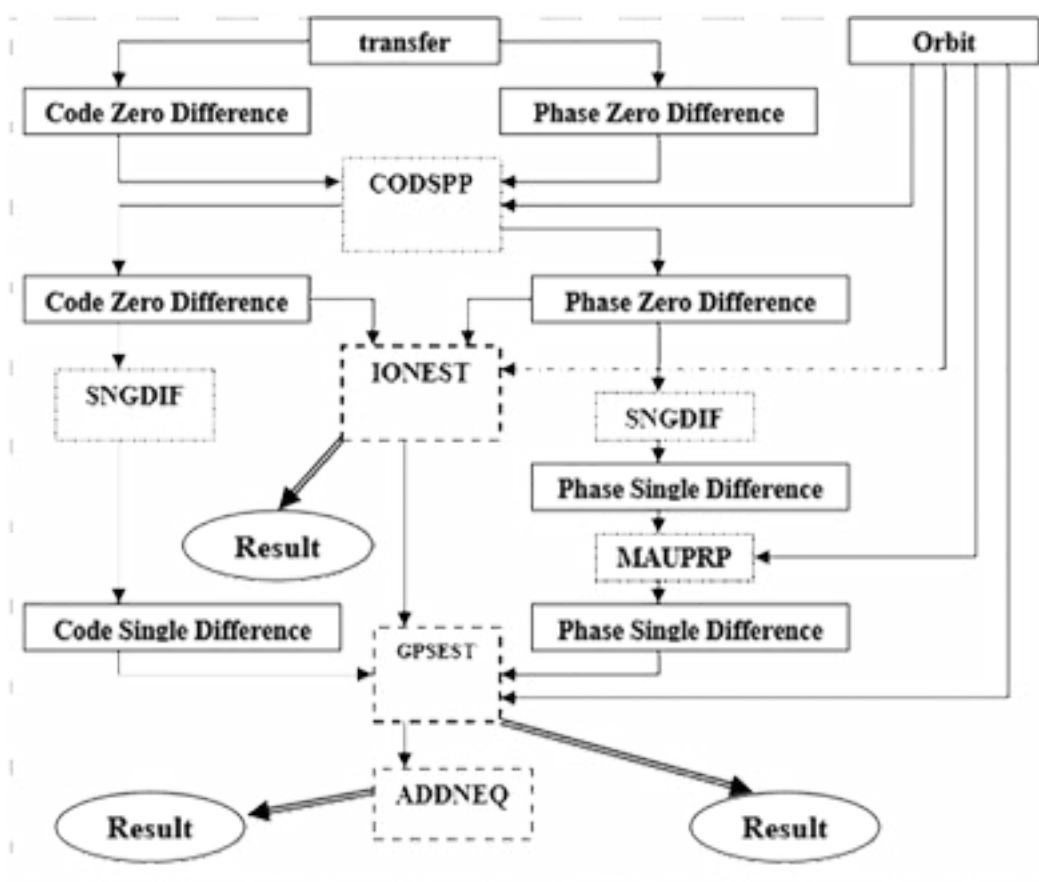
1.4 Το Πρόγραμμα Επεξεργασίας BERNESE 5.2

1.4.1 Λειτουργία προγράμματος

1.4.1.1. Λογισμικό Bernese Έκδοση 5.2

Η έκδοση του λογισμικού Bernese GPS 5.2 δημιουργήθηκε και αναπτύχθηκε από το Αστρονομικό Ινστιτούτο του Πανεπιστημίου της Βέρνης (AIUB). Αποτελείται κυρίως από προγράμματα Formula Translator (FORTRAN) που λειτουργούν σε λειτουργικό σύστημα Linux. Η ανάπτυξη του λογισμικού ξεκίνησε από την έκδοση 4.0 και επί του παρόντος έχει ενημερωθεί με την έκδοση 5.2. Σχετικά με την Microsoft Windows XP και τα Windows 98, το Bernese μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μέσα στο MS-DOS περιβάλλον γνωστό ως batch-mode (Hugentobler et al., 2001). Εμείς δουλέψαμε κατεξοχήν σε LINUX.

Το πρόγραμμα Bernese 5,2, ανάλογα πάντα με το μήκος της βάσης, χρησιμοποιεί διαφορετικούς γραμμικούς συνδυασμούς για την επίλυση των ασαφειών φάσης των διπλών διαφορών σε ακέραιους κύκλους. Ακόμα, για την επιβολή δεσμεύσεων στο δίκτυο εφαρμόζει την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με ελάχιστες δεσμεύσεις.



Εικόνα 13

Εικόνα των Menu του Bernese 5.2

Το τμήμα επεξεργασίας του Bernese GPS, έκδοση λογισμικού 5.2, που λειτουργεί σε batch-mode λειτουργία θα μπορούσε να τροποποιηθεί για να αυτοματοποιηθεί, πράγμα που δεν θα απαιτούσε οποιαδήποτε αλληλεπίδραση του χρήστη κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του.

Ωστόσο, από προεπιλογή (πρωτότυπο λογισμικό) και στο εγχειρίδιο, και το διαδραστικό μενού είναι προσιτά και βήμα – βήμα βοηθούν στη ρύθμιση των επιλογών για τα προγράμματα, την προετοιμασία των στοιχείων και των βοηθητικών αρχείων, και εύκολα μπορούμε να βρούμε τα αποτελέσματα (Outputs).

Το πρόγραμμα Bernese GPS είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο που πληροί τα υψηλότερα πρότυπα ποιότητας για γεωδαιτικές και περαιτέρω εφαρμογές που χρησιμοποιούν Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) και οι δύο του ενεργού GNSS, υποστηρίζονται από: το αμερικανικό Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) και το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης ρωσικό (GLONASS).

Τρεις διαφορετικοί τύποι των πινάκων είναι αναγνωρίσιμοι στο μενού: α) οι πίνακες για την επιλογή του προγράμματος, β) οι πίνακες δεδομένων για τα αρχεία εισόδου και επιλογές και γ) τα πάνελ “Βοήθεια” για τις πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές επιλογές των προγραμμάτων .

Στο κυρίως πρόγραμμα, έχουμε 5 βασικές λειτουργίες (Rozsa at al., 2002):

- α. υπολογισμός τροχιάς δορυφόρων
- β. μετατροπή δεδομένων RINEX
- γ. επεξεργασία δεδομένων
- δ. στρατηγική επίλυσης αβεβαιοτήτων
- ε. εκτίμηση αποτελέσματος

Προγράμματα επεξεργασίας του Bernese 5.2 GPS Software

Αυτά τα προγράμματα δεν παράγουν τελικά αποτελέσματα, αλλά ελέγχουν και προετοιμάζουν τα δεδομένα για την κύρια εκτίμηση [main estimation program (GPSEST)]. Αυτά είναι:

- RNXSMT (βρίσκεται στην καρτέλα ”Menu>RINEX>RINEX utilities>Clean/smooth observation files”) ανιχνεύει ολισθήσεις κύκλων και των ακραίων τιμών σε επίπεδο RINEX χρησιμοποιώντας και τις δύο συχνότητες από κάθε δορυφόρο. Οι παρατηρήσεις λειαιώνονται

χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις φάσης.

- CODSPP ("Menu>Processing>Code-based clock synchronization") υπολογίζει τις διορθώσεις για το συγχρονισμό των ρολογιών δέκτη σε σχέση με το χρόνο GPS. Μόνο οι παρατηρήσεις κώδικα, χρησιμοποιείται για αυτό το βήμα.
- Program SNGDIF ("Menu>Processing>Baseline file creation") σχηματίζει γραμμές βάσης από τα αρχεία παρατήρησης μηδενικής διαφοράς. Η έξοδος είναι αρχεία παρατήρησης μίας διαφοράς.
- Program MAUPRP ("Menu>Processing>Phase preprocessing") εντοπίζει και επιλύει ολισθήσεις κύκλων, απομακρύνει ακραίες τιμές, και προσθέτει πολλαπλές ασάφειες για τα αρχεία παρατήρησης φάσης. Λειτουργεί με αρχεία παρατήρησης (λειτουργία μηδενικής διαφοράς) και με αρχική τιμή τα αρχεία παρατήρησης (λειτουργία μίας διαφοράς).
- Program RESRMS ("Menu>Service>Residual files>Generate residual statistics") screens the post-fit residuals produced in a GPSEST run to identify outliers . Το πρόγραμμα RESRMS αναλύει ένα σετ από επιλεγμένα residual files. Δίνει στατιστικές πληροφορίες για τα residuals και δημιουργεί ένα περιληπτικό αρχείο (default κατάληξη .SUM). δίνει ένα overview of the residual's RMS.
- Program SATMRK ("Menu>Service>Bernese observation files>Mark/delete observations") σηματοδοτεί τις παρατηρήσεις που προσδιορίζονται ως ακραίες τιμές από RESRMS στην Bernese αρχεία παρατήρησης.
- Επίλυση ασαφειών: program GPSEST: στρατηγικές επίλυσης αναφορικά: SIGMA, SEARCH, and QIF.
- Δημιουργεί κανονικές εξισώσεις 'Normal Equations' by GPSEST and ADDNEQ2.

Το πρόγραμμα Bernese, ανάλογα με το μήκος της βάσης, χρησιμοποιεί διαφορετικούς γραμμικούς συνδυασμούς για την επίλυση των ασαφειών φάσης των διπλών διαφορών σε ακέραιους κύκλους. Ακόμα, για την επιβολή δεσμεύσεων στο δίκτυο εφαρμόζει την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με ελάχιστες δεσμεύσεις.

1.4.2 Χρήσιμα Στοιχεία

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GNSS- Global Navigation Satellite System), ένα εκ των οποίων είναι και το GPS, βασίζονται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοΐας. Οι επίγειοι δέκτες παρακολουθούν το σήμα που εκπέμπεται από τους δορυφόρους και καταγράφουν μετρήσεις της φάσης του φέροντος H/M κύματος και του κώδικα που μεταδίδεται μαζί με αυτό. Οι δορυφόροι του συστήματος κινούνται σε

απόσταση περίπου 20 χιλιάδων χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης με ταχύτητα ίση με 3 km/h περίπου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια χρήσιμα στοιχεία από την θεωρία της επεξεργασίας των παρατηρήσεων GPS.

A) Μετρήσεις Φάσης & Ψευδοαποστάσεων

Οι δορυφόροι του συστήματος GPS εκπέμπουν σήμα σε δυο συχνότητες, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, που προκύπτουν ως ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας (10.23 MHz).

Είναι: $L1 = 154 \cdot 10.23 = 1575.42 \text{ MHz}$.

$L2 = 120 \cdot 10.23 = 1227.60 \text{ MHz}$

Το μήκος κύματος είναι περίπου 19 cm για την $L1$ και 24 cm για την $L2$. Η μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος γίνεται με την σύγκριση της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος με ένα αντίγραφο της αντίστοιχης συχνότητας που παράγεται από τον ταλαντωτή (χρονόμετρο) του δέκτη και καταγράφονται οι δεκαδικοί κύκλοι σε διακριτό χρόνο με σταθερό βήμα. Η ακρίβεια μέτρησης της φάσης είναι 1/100 του κύκλου, δηλαδή η μέτρηση της απόστασης δορυφόρου δέκτη έχει ακρίβεια της τάξης των 2 mm, επαρκής για γεωδαιτικές εφαρμογές (Παραδείσης, 2000).

Οι φέρουσες συχνότητες $L1$ και $L2$ διαμορφώνονται από δύο κώδικες, τον P(Precise-ακρίβης) με μήκος κύματος 30 m, και τον C/A (Coarse Acquisition-χονδροειδούς ανάκτησης) με μήκος κύματος 300 m. Από τις παρατηρήσεις του κώδικα υπολογίζονται ψευδοαποστάσεις μεταξύ δορυφόρου και δέκτη. Η ακρίβεια των μετρήσεων κώδικα, συνεπώς και των ψευδοαποστάσεων, είναι για τον P της τάξης των 30 cm και για τον C/A των 3 m. Η ακρίβεια αυτή είναι αρκετή για λύσεις πλοήγησης όχι όμως για γεωδαιτικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις κώδικα είναι χρήσιμες στις γεωδαιτικές εφαρμογές για το συγχρονισμό των χρονομέτρων των δεκτών, την επίλυση ασαφειών φάσης και την επιδιόρθωση απωλειών κύκλων (Herring et al, 2009).

B) Χρονόμετρα Δορυφόρων και Δεκτών

Οι μετρήσεις φάσης και κώδικα γίνονται σε διακριτό χρόνο με σταθερό χρονικό βήμα που ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή (για γεωδαιτικά δίκτυα συνήθως 30 sec ή μεγαλύτερο). Η αναφορά των μετρήσεων γίνεται στον χρόνο του GPS (GPS Time), ο οποίος υλοποιεί δική του κλίμακα χρόνου από τον μέσο όρο αρκετών ατομικών χρονομέτρων στο κέντρο ελέγχου

του συστήματος.

Παρόλα αυτά, η κλίμακα χρόνου του δορυφόρου διαφέρει από αυτή του GPST λόγω αποκλίσεων της κλίμακας του χρονομέτρου του δορυφόρου (ατομικό χρονόμετρο), όπως επίσης και η κλίμακα χρόνου του δέκτη διαφέρει από αυτή του GPST λόγω σφαλμάτων του χρονομέτρου του δέκτη (συνήθως χαμηλής ποιότητας χρονόμετρο χαλαζία) (Παραδείσης, 2000). Το γεγονός αυτό οδηγεί στο να καταγράφονται μετρήσεις οι οποίες στην πραγματικότητα αναφέρονται σε διαφορετικό χρόνο GPS από τον ονομαστικό τους.

Τα χρονόμετρα των δορυφόρων διορθώνονται για να αναφέρονται στον GPST κατά μια ποσότητα Δt_s που υπολογίζεται ανά δίκτυο από τις παραμέτρους ενός πολυωνύμου που περιέχονται στο μήνυμα ναυσιπλοΐας του δορυφόρου (ή το συνδυασμένο αρχείο ναυσιπλοΐας όλων των δορυφόρων για μια ημέρα) και η αναλυτική σχέση που δίνει την διόρθωση είναι¹:

$$\Delta t_s = t_s - t'_s = a^{(0)} + a^{(1)} * (t - t_o^{(c)}) + (t - t_o)^2 \quad (3.1)$$

t_s :ο χρόνος GPST

t'_s :ο ονομαστικός χρόνος του δορυφόρου

$t_o^{(c)}$: η εποχή αναφοράς των συντελεστών του πολυωνύμου σε εβδομάδα GPS και δευτερόλεπτο αυτής.

Γ) Ασάφειες Φάσης-Απώλειες Κύκλων

Την χρονική στιγμή που εγκλωβίζεται για πρώτη φορά το δορυφορικό σήμα, ο δέκτης διαβάσει την φάση του φέροντος κύματος, δηλαδή σε ποιο τμήμα του κύκλου του βρίσκεται (δεκαδικός κύκλος). Η απόσταση δορυφόρου-δέκτη εκείνη τη χρονική στιγμή αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή της φάσης του φέροντος κύματος συν έναν ακέραιο αριθμό κύκλων, ο οποίος είναι άγνωστος και καλείται αρχική ασάφεια φάσης. Για τις επόμενες μετρήσεις η απόσταση είναι ίση με τους δεκαδικούς κύκλους που έχουν μετρηθεί στο διάστημα από την πρώτη μέτρηση συν την δεκαδική φάση συν την αρχική ασάφεια φάσης.

Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως εξής (Παραδείσης, 2000): Η πρώτη ανάγνωση ορίζεται ως

$$\Phi_r^s = N_r^s + \theta + \varphi_r^s \quad (3.2)$$

όπου: Φ : η μέτρηση της φάσης σε κύκλους

N : ο αριθμός ακέραιων κύκλων της αρχικής ασάφειας

φ : το δεκαδικό μέρος της μέτρησης

s : ο δορυφόρος

r : ο δέκτης

Όλες οι επόμενες μετρήσεις ορίζονται $\Phi_r^s = N_r^s + I_r^s + \varphi_r^s$ (3.3)

όπου I : ο αριθμός των ακέραιων κύκλων που μεσολαβούν από την προηγούμενη μέτρηση.

Βέβαια συμβαίνει συχνά η καταγραφή του δορυφορικού σήματος να διακόπτεται σε έναν δέκτη για διάφορους λόγους. Συνέπεια της διακοπής του σήματος είναι η απώλεια ενός ακέραιου αριθμού κύκλων (η κλασματική φάση διατηρείται) που δημιουργούν ασυνέχεια στην παρατήρηση της φάσης, άρα δημιουργούν σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη. Η αποκατάσταση των ασυνεχειών είναι απαραίτητη για την επεξεργασία όλων των μετρήσεων. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μεγάλων διακοπών στην λήψη του σήματος εισάγονται νέες αρχικές ασάφειες φάσης στο σύστημα (Παραδείσης, 2000).

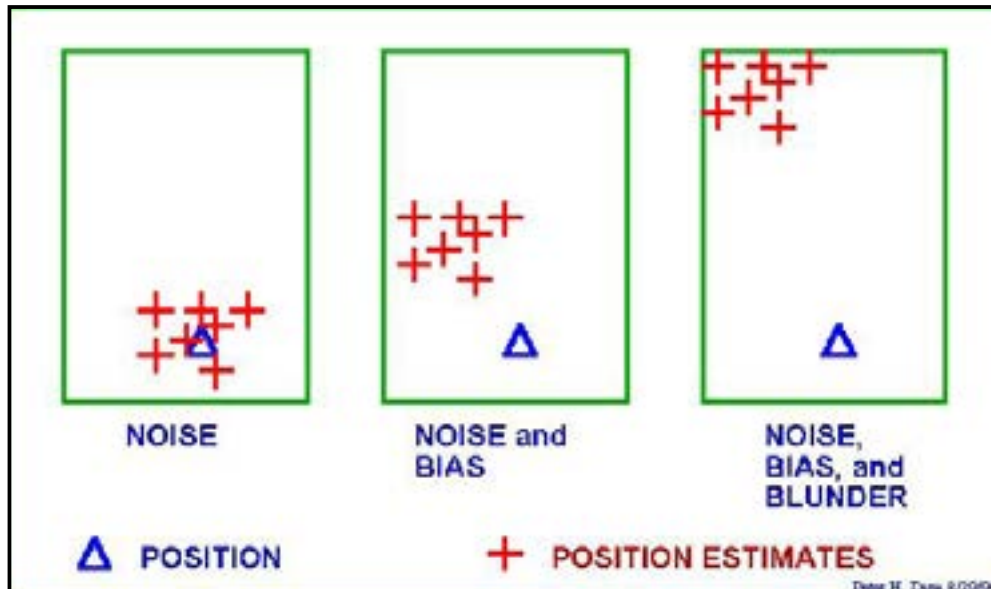
Επομένως, για τον ακριβή προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη σε κάθε εποχή, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της αρχικής ασάφειας φάσης και των ενδιάμεσων απωλειών κύκλων. Σημειώνεται η σημασία του προσδιορισμού των ασαφειών φάσης στους σωστούς ακέραιους κύκλους καθώς σφάλμα ενός κύκλου, π.χ. στη συχνότητα L1 επιφέρει συστηματικό σφάλμα 19εκ. σε όλες τις μετρήσεις. Στο εξής οι αρχικές ασάφειες φάσης και οι απώλειες κύκλων θα αναφέρονται απλά ως ασάφειες φάσης.

Δ) Δορυφορικές Τροχιές

Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός δέκτη GPS απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση των τροχιακών στοιχείων των δορυφόρων συναρτήσει του χρόνου για την περίοδο των παρατηρήσεων. Η πληροφορία αυτή παρέχεται είτε από το μήνυμα ναυσιπλοΐας του κάθε δορυφόρου, είτε από υπολογισμένες εκ των υστέρων εφημερίδες ακριβείας (π.χ. της IGS). Οι εφημερίδες των δορυφορικών τροχιών περιέχουν τα κεπλέρια στοιχεία για κάθε δορυφόρο καθώς και παραμέτρους για τον υπολογισμό διορθώσεων των κεπλέρια στοιχείων λόγω της επίδρασης των μη βαρυτικών δυνάμεων που ασκούνται στους δορυφόρους.

Ε) Ατμόσφαιρα

Η διάδοση του δορυφορικού σήματος μέχρι τον δέκτη γίνεται κατά ένα μέρος στο κενό και κατά το υπόλοιπο στην ατμόσφαιρα, άρα δεν διαδίδεται εξ ολοκλήρου στο ίδιο μέσο. Υφίσταται, συνεπώς, κατά την διαδρομή του μέσα στην ατμόσφαιρα και την αντίστοιχη επίδραση στην ταχύτητα διάδοσης του, αλλά και στην πορεία που ακολουθεί, δημιουργώντας αποκλίσεις από το μοντέλο της ευθύγραμμης διάδοσης στο κενό, επομένως και σφάλματα στις παρατηρήσεις.



Για την απαλοιφή αυτών των σφαλμάτων υπολογίζονται διορθωτι-

κές παράμετροι που ανάγουν το καθυστερημένο και καμπυλωμένο σήμα στο ευθύγραμμο. Οι ατμοσφαιρικές παράμετροι συνήθως

υπολογίζονται από υπάρχοντα μοντέλα, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται η πλήρης εξάλειψη των αντίστοιχων σφαλμάτων. Συνήθης πρακτική των επιστημονικών πακέτων επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS είναι να υπολογίζονται παραμέτροι ατμοσφαιρικών διορθώσεων, ως άγνωστοι, μαζί με τις συντεταγμένες των σταθμών κλπ.

$$\Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T^s, T_r) - f \cdot [\delta\tau_r(\tau_r) - \delta t^s(t^s)] + N_r^s + \text{datm}_r^s \quad (3.4)$$

Εικόνα 14 GPS Πηγές σφάλματος, θορύβου.

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} \quad (3.5)$$

ΣΤ) Απλές και Διπλές Διαφορές Δάσης

Οι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS είναι η εξάλειψη των σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις καθώς επίσης και η επίλυση των ασαφειών φάσης σε ακέραιους κύκλους. Η εξίσωση παρατήρησης φάσης της φέρουσας συχνότητας είναι η εξής (Παραδείσης, 2000): όπου

είναι η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη σε m

dt το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη σε sec

dt : το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου σε sec

datm_r^s : η επίδραση της ατμόσφαιρας

$$\Phi_{r1,r2}^{s1} = \Phi_{r1}^{s1} - \Phi_{r2}^{s1} \quad (3.6)$$

f : η τιμή της φέρουσας συχνότητας

$$\Phi_{r1,r2}^s(\tau_{r1}, \tau_{r2}) = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1,r2}^s(T^s, T_{r1}, T_{r2}) - f \cdot [\delta\tau_{r1,r2}(\tau_{r1}, \tau_{r2})] + N_{r1,r2}^s + \text{datm}_{r1,r2}^s \quad (3.7)$$

$$\delta\tau_{r1,r2} = \delta\tau_{r1} - \delta\tau_{r2}$$

$$N_{r1,r2}^s = N_{r1}^s - N_{r2}^s$$

c : η ταχύτητα του φωτός σε m/sec

Η διαφορά φάσης μεταξύ δυο δεκτών που παρατηρούν το σήμα του ίδιου δορυφόρου (απλή διαφορά δεκτών) είναι:

και ισοδύναμα αντικαθιστώντας την (3.4) στην (3.6):

όπου

$$\Phi_r^{s1,s2}(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^{s1,s2}(T^{s1}, T^{s2}, T_r) - f \cdot [\delta t^{s1,s2}(t^{s1}, t^{s2})] + N_r^{s1,s2} + \text{datm}_r^{s1,s2} \quad (3.8)$$

Με τον ίδιο τρόπο αναλύονται όλες οι διαφορές που εμφανίζονται στις παρακάτω εξισώσεις. Στην απλή διαφορά μεταξύ δεκτών μειώνεται σημαντικά το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου. Στην απλή διαφορά μεταξύ δορυφόρων μειώνεται σημαντικά το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη. Ως διπλή διαφορά μεταξύ δεκτών και δορυφόρων ορίζεται η διαφο-

$$\Phi_{r1,r2}^{s1,s2}(\tau_{r1}, \tau_{r2}) = \frac{f}{c} \cdot \rho_{r1,r2}^{s1,s2}(T^{s1}, T^{s2}, T_{r1}, T_{r2}) + N_{r1,r2}^{s1,s2} + \text{datm}_{r1,r2}^{s1,s2} \quad (3.9)$$

ρά μεταξύ δυο απλών διαφορών ως προς δέκτες ή ως προς δορυφόρους. Από την διαφορά δυο σχέσεων της μορφής (3.7) (απλή διαφορά δεκτών) προκύπτει:

Στις διπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων και δεκτών μειώνονται σημαντικά τα σφάλματα των χρονομέτρων των δεκτών, ενώ ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους, δηλαδή τα σφάλματα των χρονομέτρων τους, τα σφάλματα των τροχιών και της ατμόσφαιρας.

$$\varphi_i = \left(\alpha \frac{\varphi_{L1}}{\lambda_{L1}} + \beta \frac{\varphi_{L2}}{\lambda_{L2}} \right) \lambda_i \quad \text{Z) Γραμμικοί Συνδυασμοί Παρατηρήσεων} \quad (3.10)$$

Όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα φάσης και στις δύο φέρουσες συχνότητες του GPS, για την επιτυχή επίλυση των ασαφειών φάσης καθώς και για την εξάλειψη ή ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυασμοί των παρατηρήσεων στις δυο συχνότητες (L1 και L2). Για να αξιοποιούνται με τον βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα της φάσης, οι γραμμικοί συνδυασμοί των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Η γενική σχέση από την οποία προκύπτουν όλοι οι γραμμικοί συνδυασμοί είναι η εξής:

όπου: φ_{L1} , φ_{L2} : οι μετρήσεις στις φέρουσες συχνότητες L1 και L2 σε m.

λ_{L1} , λ_{L2} , λ_i : τα μήκη κύματος των δυο συχνοτήτων και του γραμμικού τους συνδυασμού.

Οι συντελεστές α και β υπολογίζονται με βάση τις ιδιότητες που ζητείται να έχει ο γραμμικός συνδυασμός. Αναλυτική παρουσίαση των γραμμικών συνδυασμών των συχνοτήτων του GPS καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους γίνεται από τον Collins (1999). Ιδανικός γραμμικός συνδυασμός παρατηρήσεων φάσης είναι αυτός που διατηρεί την ακέραια φύση των ασαφειών φάσης, εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί τα σφάλματα λόγω ιονόσφαιρας, έχει μεγάλο μήκος κύματος και μικρό επίπεδο θορύβου. Επειδή τέτοιος γραμμικός συνδυασμός δεν υπάρχει, χρησιμοποιούνται διάφοροι γραμμικοί συνδυασμοί για τον προσδιορισμό των ασαφειών φάσης και την εξάλειψη των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων (Collins, 1999).

Συνήθως οι γραμμικοί συνδυασμοί των μετρήσεων φάσης στις δύο φέρουσες συχνότητες εφαρμόζονται στους συνδυασμούς παρατηρήσεων μεταξύ δορυφόρων και δεκτών (διπλές διαφορές), όπως περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα, ώστε να συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι συνδυασμοί όλων των ειδών.

Οι συχνότητες που προκύπτουν ως γραμμικοί συνδυασμοί των L1 και L2 και χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των μετρήσεων φάσης είναι η Wide-Lane (WL, ευρείας ζώνης), η Narrow-Lane (NL, βραχείας ζώνης) και η L3 (ή LC, ή συνδυασμός ελευθέρας ιονόσφαιρας). Για αυτούς τους γραμμικούς συνδυασμούς ισχύει (Παραδείσης, 2000):

Η WL έχει την ιδιότητα του μεγάλου μήκους κύματος (86.2 cm) σε σχέση με τον αντίστοιχο θόρυβο (19.4 cm) και της ακέραιας ασάφειας φάσης. Η NL έχει επίσης ακέραια ασάφεια

φάσης, το μήκος κύματός της όμως είναι πιο μικρό από των L1, L2, γεγονός που καθιστά σχεδόν αδύνατο τον απευθείας προσδιορισμό των ασαφειών φάσης της, είναι όμως δυνατός ο προσδιορισμός τους με γνωστές τις ακέραιες τιμές των ασαφειών της WL. Η L3 (ή LC) είναι απαλλαγμένη από την επίδραση της ιονόσφαιρας (στα αγγλικά ionosphere free), ιδιότητα πολύ χρήσιμη όταν επιλύονται δίκτυα με μεγάλες βάσεις, στα οποία οι διπλές διαφορές δεν εξαλείφουν τα σχετικά σφάλματα.

Συνδυασμός	Συντελεστές		Μήκος Κύματος	Σφάλμα Ιονόσφαιρας	Θόρυβος
	α	β			
L1	+1	0	19 cm	0.779	3.0 mm
L2	0	+1	24.4 cm	1.283	3.9 mm
Ευρείας Ζώνης (WL)	+1	-1	86.2 cm	-1.000	19.4 mm
Βραχείας Ζώνης (NL)	+1	+1	10.7 cm	+1.000	2.4 mm
Ελεύθερος Ιονόσφαιρας (L3)	$\approx +9$	≈ -7	≈ 5.4 cm	0.000	10.3 mm

Εικόνα 15

Συντελεστές γραμμικών συνδυασμών παρατηρήσεων φάσης στις δυο φέρουσες συχνότητες του GPS και ιδιότητές τους. Ως “Σφάλμα Ιονόσφαιρας” εννοείται η ενίσχυση του ιονοσφαιρικού σφάλματος στις παρατηρήσεις.

Το πολύ μικρό μήκος κύματος της, ειδικά σε σχέση με το επίπεδο του θορύβου της καθιστούν αδύνατο τον απευθείας υπολογισμό των ασαφειών σε αυτόν τον συνδυασμό. Ωστόσο, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ασαφειών στην L3 εμμέσως, καθώς προκύπτει θεωρητικά ότι εάν είναι γνωστές οι τιμές των ασαφειών σε δυο γραμμικούς συνδυασμούς των οποίων οι ασάφειες είναι ακέραιου τύπου, μπορούν να προσδιοριστούν οι ασάφειες φάσης οποιουδήποτε άλλου γραμμικού συνδυασμού (Collins, 1999, Παραδείσης, 2000).

Είναι, επομένως, δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση γεωδαιτικών παραμέτρων ο απαλλαγμένος από την επίδραση της ιονόσφαιρας γραμμικός συνδυασμός L3. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να προσδιοριστούν οι ακέραιες τιμές των ασαφειών στις WL και NL, κάτι που στα σύγχρονα πακέτα επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS γίνεται με τυποποιημένους αλγόριθμους όπως αυτός που περιγράφεται από τους Dong και Bock στην σχετική τους εργασία (1989).

Η) Τύπος μηνύματος

Κάθε δορυφόρος GPS μεταδίδει διαρκώς ένα μήνυμα πλοήγησης στο L1 C/A και L2 Π/Y συχνότητες σε ποσοστό 50 bits ανά δευτερόλεπτο (βλέπε bitrate). Κάθε ολοκληρωμένο μήνυμα διαρκεί 750 δευτερόλεπτα (12 λεπτά 1/2) για να ολοκληρωθεί.

Η δομή του μηνύματος έχει μια βασική μορφή ενός 1500-bit-μακροπρόθεσμο πλαίσιο που αποτελείται από πέντε υποπλαίσια, κάθε υποπλαίσιο είναι 300 bits (6 δευτερόλεπτα). Τα

υποπλάισια 4 και 5 subcommutated 25 φορές το καθένα, έτσι ώστε ένα πλήρες μήνυμα δεδομένων απαιτεί τη διαβίβαση των 25 πλήρων καρτέ. Κάθε υποπλάισιο αποτελείται από δέκα λέξεις, το καθένα μήκους 30 μπιτς (bits). Οπότε, με 300 bits σε ένα υποπλάισιο, 5 υποπλάισια σε ένα πλαίσιο, 25 καρτέ σε ένα μήνυμα, κάθε μήνυμα είναι 37500 bits μακρύ. Σε ένα ρυθμό μετάδοσης 50-bit/s, αυτό δίνει 750 δευτερόλεπτα για να μεταδώσει ένα μήνυμα ολόκληρο αλμανάκ (GPS). Κάθε καρτέ 30-δευτέρων αρχίζει ακριβώς στο λεπτό ή μισό λεπτό, όπως υποδεικνύεται από το ατομικό ρολόι για κάθε δορυφόρο. Το πρώτο υποπλάισιο

SV 8: SUBFRAME 1

WORD	BITS	#1-8	#9-16	#17-24	#25-30
1	1-30	10001011	11000000	00111111	101000
2	31-60	00110101	10110001	10000100	110000
3	61-90	00111010	01010011	00000000	011000
4	91-120	01011000	01001101	11111100	010101
5	121-150	11011010	10110101	10100010	000101
6	151-180	00001111	10001111	01101010	010100
7	181-210	00111010	00111000	11111101	001001
8	211-240	00101001	00101001	01001111	010100
9	241-270	00000000	00000001	10110000	011101
10	271-300	01010010	10100111	01110000	001100↑

PREAMBLE: 10001011

TIME OF WEEK: 00110101 10110001 1 = 27491 subframes = 164946 seconds = 1 day, 21 hours 49 minutes, 06 seconds = SV time at end of bit 300 (↑)

toc: 00101001 01001111 = 169200

af2: 00000000 = 0.0

af1: 00000001 10110000 = 4.91127138959 E-11

af0: 01010010 10100111 011100 = 6.30600377918E-04

(Δt_r = relativistic correction)

ΔT_{sv} = af0 + af1 (t-toc) + af2(t-toc)² + Δt_r = 630.392 microseconds + Δt_r

Peter H. Dana 12/23/94

Εικόνα 16 SV χρόνος σε GPS δεδομένα (εικόνα του Peter Dana)

του κάθε πλαισίου κωδικοποιεί τον αριθμό εβδομάδων και το χρόνο εντός της εβδομάδας, καθώς και τα δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του δορυφόρου. Το δεύτερο και το τρίτο υποπλάισιο περιέχει τις εφημερίδες ήτοι την ακριβή τροχιά για το δορυφόρο. Το τέταρτο και το πέμπτο υποπλάισιο περιέχουν το αλμανάκ, το οποίο περιέχει τη τροχιά και τις πληροφορίες κατάστασης για έως και 32 δορυφόρους του σχηματισμού, καθώς και δεδομένα που σχετίζονται με τη διόρθωση σφαλμάτων. Έτσι, για να ληφθεί μια ακριβής θέση δορυφόρου από αυτό το μήνυμα που μεταδίδεται, ο δέκτης πρέπει να αποδιαμορφώνει το μήνυμα από κάθε δορυφόρο που βρίσκεται στην επίλυση 18 έως 30 δευτερόλεπτα.

Για να συλλέξει όλα τα άλμανακ που μεταδίδονται, ο δέκτης θα πρέπει να αποδιαμορφώνει το μήνυμα για 732-750 δευτερόλεπτα ή 12 & 1/2 λεπτά.

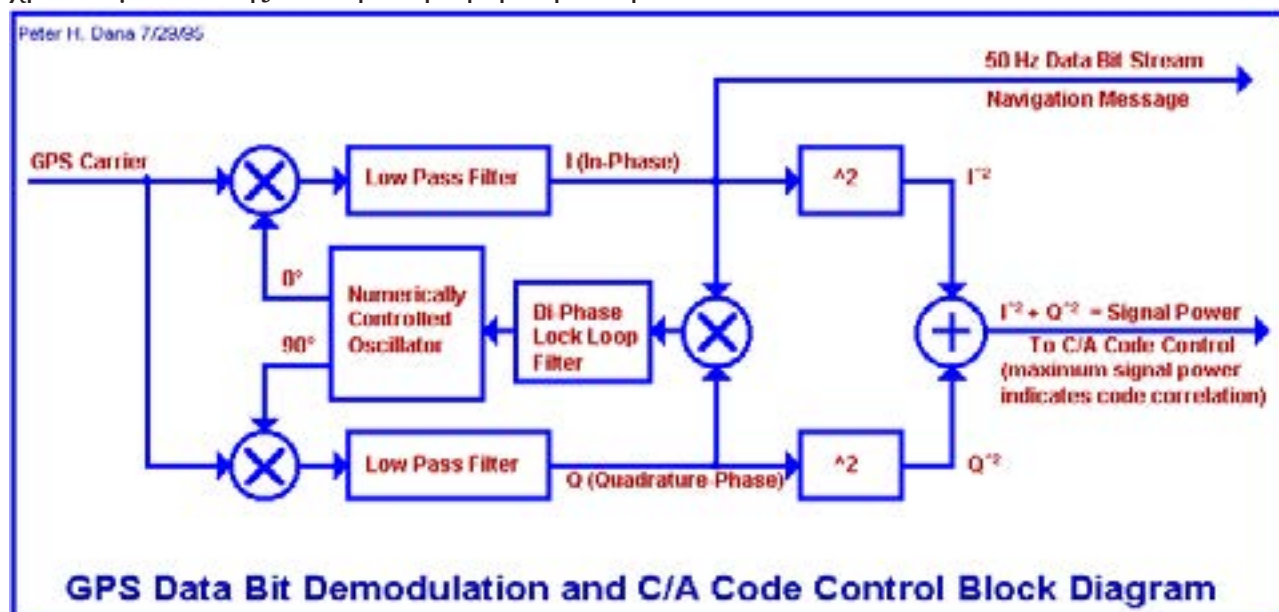
Όλοι οι δορυφόροι μεταδίδουν στις ίδιες συχνότητες τα κωδικοποιημένα σήματα χρησιμοποιώντας μοναδικές διαιρέσεις κώδικα πολλαπλής πρόσβασης (CDMA), ώστε ο δέκτης να μπορεί να διακρίνει μεμονωμένα τον ένα δορυφόρο από τον άλλο. Το σύστημα χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς τύπους CDMA κωδικοποίησης: τον coarse/acquisition (C/A) κώδικα,

μορφή η οποία είναι προσβάσιμη από το ευρύ κοινό, και τον ‘ακριβή’ precise (P (Y)) κώδικα. Οι εφημερίδες ενημερώνονται κάθε 2 ώρες και ισχύουν για 4 ώρες, με διατάξεις για ενημερώσεις κάθε 6 ώρες ή περισσότερο σε μη εικονικές συνθήκες. Το αλμανάκ ενημερώνεται συνήθως κάθε 24 ώρες. Επιπλέον, τα δεδομένα για μερικές εβδομάδες μετά ανεβαίνουν στο διαδίκτυο στην περίπτωση ενημερώσεων.

Θ) Αποδιαμόρφωση & Αποκωδικοποίηση

Επειδή όλα τα δορυφορικά σήματα διαμορφώνονται στην ίδια φέρουσα συχνότητα L1, τα σήματα πρέπει να διαχωρίζονται μετά την αποδιαμόρφωση. Αυτό γίνεται με την ανάθεση σε κάθε δορυφόρο μίας μοναδικής δυαδικής ακολουθίας, η οποία και είναι γνωστή ως κωδικός Gold. Τα σήματα αποκωδικοποιούνται μετά την αποδιαμόρφωση χρησιμοποιώντας προσθήκη των κωδικών Gold, οι οποίοι αντιστοιχούν στους δορυφόρους που παρακολουθούνται από το δέκτη.

Αν οι πληροφορίες του αλμανάκ έχουν ήδη αποκτηθεί, ο δέκτης επιλέγει τους δορυφόρους για να ακούσουν από τους PRNs, μοναδικοί αριθμοί στην περιοχή 1 έως 32. Εάν οι πληροφορίες του αλμανάκ δεν είναι στη μνήμη, ο δέκτης εισέρχεται σε μια λειτουργία αναζήτησης μέχρι να ληφθεί ένα ‘κλειδί’ από έναν από τους δορυφόρους. Για να αποκτηθεί ένα κλειδί, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια ανεμπόδιστη οπτική επαφή από τον δέκτη προς τον δορυφόρο. Ο δέκτης μπορεί να αποκτήσει το αλμανάκ και να καθορίσει τους δορυφόρους που θα πρέπει να “ακούσει”. Όπως ανιχνεύει το σήμα του κάθε δορυφόρου, τον προσδιορίζει με το διακριτό της C/A μοτίβο κωδικού. Μπορεί να υπάρξει μια καθυστέρηση έως και 30 δευτερόλεπτα πριν την πρώτη εκτίμηση της θέσης, λόγω της ανάγκης να “διαβάσει” τα δεδομένα της εφημερίδας. Η επεξεργασία του μηνύματος πλοήγησης επιτρέπει τον προσδιορισμό του χρόνου μετάδοσης και την δορυφορική θέση.



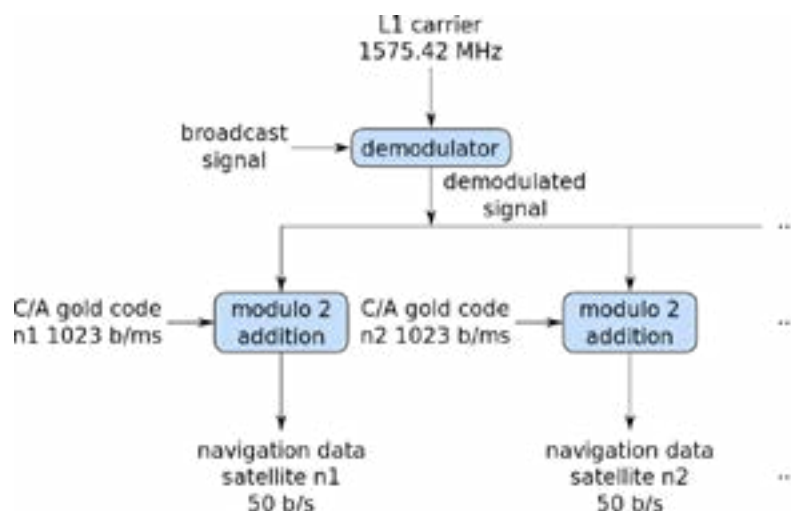
Εικόνα 17

Αποδιαμόρφωση δεδομένων Bit και έλεγχος κώδικα C / A. εικόνα: Dana Peter Αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση δορυφορικών σημάτων GPS χρησιμοποιώντας τον κωδικό C/A

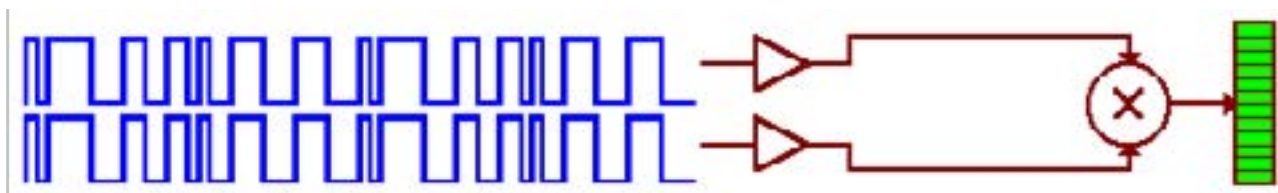
1.5 Οργάνωση Δεδομένων

Το πρόγραμμα BERNESE προϋποθέτει μια συγκεκριμένη οργάνωση φακέλων για τα δεδομένα και τα αρχεία ελέγχου των διαφόρων προγραμμάτων του. Κατά την εγκατάσταση δημιουργεί ένα φάκελο στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή, με όποιο όνομα του δοθεί κατά τη διαδικασία, που αντιστοιχεί στο πείραμα. Μέσα σε αυτόν τον φάκελο αποθηκεύονται όλα τα πρωτογενή δεδομένα (RAW). Τα απαραίτητα αρχεία για την επεξεργασία με το Bernese είναι δύο ειδών:

- Τα αρχεία που αντιστοιχούν σε μοντέλα φαινομένων και τεχνικές παραμέτρους του συστήματος GPS (global files - εφημερίδες τροχιάς Ηλίου, Σελήνης, πίνακας της διαφοράς UT1-TAI για κάθε ημερομηνία, πίνακας εμβόλιμων δευτερολέπτων στη διαφορά TAI-UTC-leap seconds, πίνακας της κίνησης του πόλου συναρτήσεως του χρόνου, πίνακας κλόνησης



Εικόνα 18 Επιτευξη της ταύτησης του σήματος. (πηγή:wikimedia.org)



του άξονα περιστροφής της Γης συναρτήσεως του χρόνου, μοντέλα συμπεριφοράς της ατμόσφαιρας, αρχεία γεωδαιτικών παραμέτρων του πλαισίου αναφοράς, αρχεία με πληροφορίες για τα κέντρα φάσης των δορυφόρων και των επίγειων κεραιών και δεκτών).

Επιγραμματικά: GNSS Satellite Orbits(GNSS δορυφορικές τροχιές), Precise Orbit Files (ακριβής τροχιά αρχεία), RINEX Navigation Files(αρχεία πλοήγησης), IGS and IERS Pole Files(αρχεία πόλων), Clock RINEX File (αρχεία ρολογιού), External Data Sources (εξωτερικές πηγές δεδομένων), όπως προϊόντα CODE , παράμετροι προσανατολισμού ,GNSS Broadcast πληροφορίες, πληροφορίες ακριβής τροχιάς, δορυφορικό ρολόι, διορθώσεις και λοιπά.

- Τα αρχεία εντολών των προγραμμάτων, control files. Πρόκειται για αρχεία που περιέχουν πληροφορίες για το πείραμα (αριθμό και πληροφορίες σταθμών, a priori συντεταγμένες, αριθμό και ταυτότητα δορυφόρων) και εντολές που καθορίζουν τη ροή της επεξεργασίας, τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε κάθε αλγόριθμο του προγράμματος Bernese και τους a priori περιορισμούς των μεγεθών που υπολογίζονται. Σε επόμενη ενότητα περιγράφεται συγκεκριμένα το περιεχόμενο όλων των απαραίτητων αρχείων και οι δυνατότητες παραμετροποίησης της επεξεργασίας.

Επιγραμματικά: Επιλογή δεδομένων, ονομασίες σταθμών και κεραίας, επαλήθευση πληροφοριών στο τίτλο των RINEX (header), ονοματοδοσία αρχείων Bernese και λοιπά.

2. Επεξεργασία Δεδομένων, Ανάλυση Πειραμάτων, Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

2.1 Επεξεργασία Δεδομένων

2.1.1 Επίλυση δεδομένων από τις δυο περιόδους μετρήσεων (2013-2014)

Αρχικά για τους σταθμούς της Ευρώπης υπάρχουν δεδομένα στην ιστοσελίδα του EUREF (http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php).

Επιλέχθηκαν 16 σταθμοί της Ευρώπης, από τους συνολικά 276 μόνιμους GNSS σταθμούς. Για τις ημερήσιες μετρήσεις ελήφθησαν δεδομένα μορφής RINEX V2.10, των 30 sec που έχουν συμπίεστεί με το πρόγραμμα Hatanaka.

GNSS Data (RINEX, RTCM, ...)									
SATELLITE SYSTEM	STATION LOG : GPS RINEX V2.10 : GPS								
DAILY	FORMAT : RINEX V2.10 , 30 sec, Hatanaka compressed Less ... ACCESS : Yes								
DATA CENTRES				DOWNLOAD DATA					
Name	Online	Last date	Availability	August 2014					
EPNCB (Historical)	✓	20/1/2015	100%	Wk No	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu
EPGE	✓	29/7/2013	100%	1803					01 (213) 02 (214)
OLG	✓	29/7/2013	100%	1804	03 (215) 04 (216) 05 (217) 06 (218) 07 (219) 08 (220) 09 (221)				
AS3	✓	29/7/2013	100%	1805	10 (222) 11 (223) 12 (224) 13 (225) 14 (226) 15 (227) 16 (228)				
				1806	17 (229) 18 (230) 19 (231) 20 (232) 21 (233) 22 (234) 23 (235)				
				1807	24 (236) 25 (237) 26 (238) 27 (239) 28 (240) 29 (241) 30 (242)				
				1808	01 (243)				

Εικόνα 19

Εικόνα από EUREF για την συλλογή δεδομένων για τους EUREF σταθμούς (εικόνα απο την ιστοσελίδα του EUREF)

ABREVIATION TABLE			05-MAR
14 11:44			

Station name	4-ID	2-ID	
*****	****	..	
*****	*****	*****	
AUT1	AUT1	AU	
GRAZ	GRAZ	GR	
MATE	MATE	MA	
WTER	WTER	WT	
KERA	KERA	KE	
MOZI	MOZI	MO	
NCMI	NCMI	NO	
PKEN	PKEN	PK	
RIBA	RIBA	RI	
SANT	SANT	SA	
PATO	PATO	PA	
USAL	USAL	US	
DUTH	DUTH	DU	

Εικόνα 20

Πίνακας με τις ονομασίες των σταθμών, δημιουργείται πριν την επεξεργασία, εικόνα απο το πρόγραμμα

Ορίστηκαν οι ονομασίες των σταθμών στο πρόγραμμα Bernese 5.2 (βλ. abbreviation table Εικόνα 20) καθώς και οι ιδιαιτερότητες τους (log), πχ. κεραία δέκτη, είδος κεραίας. Δημιουργήθηκαν αρχεία με τις αρχικές συντεταγμένες της μορφής της εικόνας 23 που ακολουθεί. Ως αρχικές συντεταγμένες τέθηκαν οι τελικές της 31ης Δεκεμβρίου 2012, που είχαν παραχθεί κατά την επεξεργασία ανάλογης εργασίας από τον κ. Βασίλειο Σακκά. Η σήμανση στην τελευταία στήλη δηλώνει με E τους σταθμούς προς επεξεργασία και με F τους σταθερούς σταθμούς της Ευρώπης (βλ. εικόνα 23).

μους της Ευρώπης (βλ. εικόνα 23).

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τι Baseline θα χρησιμοποιήσει ή και την στρατηγική που θα ακολουθήσει το πρόγραμμα. Είτε να επιλέξει “έτοιμες στρατηγικές” από το αρχείο είτε να αφήσει το πρόγραμμα να επιλέξει αυτόματα την καλύτερη στρατηγική έτσι ώστε το άθροισμα των μηκών των baselines να ελαχιστοποιείται. (βλ. πίνακα 4).

Program	Input data type	Location
Station Coordinates		
CODSPP	code, zero-difference	"Menu>Processing>Code based clock synchronization"
MAUPRP	phase, epoch-difference	"Menu>Processing>Phase preprocessing"
GPSEST	code and/or phase, zero- or double-difference	"Menu>Processing>Parameter estimation"
ADDNEQ2	combination on NEQ level	"Menu>Processing>Normal equation stacking"
Station Velocities		
ADDNEQ2	combination on NEQ level	"Menu>Processing>Normal equation stacking"

Εικόνα 21. Λίστα προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των συντεταγμένων/ταχυτήτων. Εικόνα απο το πρόγραμμα.

```

Ocean loading displacement
MATE
$$ FES2004_PP ID: 2014-03-11 10:27:41
$$ Computed by OLMPP by H G Scherneck, Onsala Space Observatory, 2014
$$ MATE,
      RADI TANG lon/lat: 16.7000 40.6500 0.000
      .00535 .00194 .00111 .00054 .00146 .00076 .00049 .00011 .00033 .00016 .00013
      .00125 .00023 .00031 .00006 .00036 .00016 .00012 .00001 .00003 .00002 .00002
      .00089 .00032 .00015 .00010 .00026 .00009 .00009 .00003 .00003 .00002 .00001
      -79.2 -56.5 -90.6 -68.5 -74.0 -106.0 -75.4 -112.8 -2.7 1.8 0.2
      65.7 99.6 42.0 82.4 139.4 72.4 137.5 -27.7 -170.1 -162.5 -176.6
      -77.4 -42.4 -95.0 -53.0 38.1 56.3 34.7 96.5 -135.2 -161.5 -172.9

```

Εικόνα 22

Παράδειγμα δεδομένων ocean loading displacement για τους μόνιμους σταθμούς. Εικόνα απο το πρόγραμμα.


```

$$ Atmospheric Tidal loading displacement
$$
$$ station AUT1; coord.(long,lat) 23.003719 40.566818
$$
AUT1
    0.0531    -0.1398    0.1186    0.5857
   -0.0341    -0.0934    0.0100    0.0388
    0.0615    -0.0025   -0.0341   -0.0046

$$
$$ station GRAZ; coord.(long,lat) 15.493483 47.067131
$$
GRAZ
    0.0572    -0.0053   -0.0209    0.4674
   -0.0183    -0.0894   -0.0067    0.0314
    0.0560     0.0138   -0.0217   -0.0131

```

Εικόνα 23

Παράδειγμα δεδομένων. Εικόνα από το πρόγραμμα, διορθώσεις λόγω ατμοσφαιρικών παρεμβολών

```

PANTORINI SESSION 131210- INICIAL COORDINATES 20-MAY-14 15:27 28-MAY-
14 13:29
-----
LOCAL GEODETIC DATUM: IGB08 EPOCH: 2013-04-15 12:00:00
NUM STATION NAME X (M) Y (M) Z (M) FLAG
1 AUT1 4466283.30740 1896167.05050 4126096.82330 F
2 GRAZ 4194427.67590 1162702.84110 4647245.50380 F
5 KERA 4644059.22140 2200009.64430 3765747.42710 E
3 MATE 4641949.40540 1393045.58010 4133287.59360 F
6 MOZI 4639049.09050 2204980.05690 3769175.80340 E
7 NOMI 4640783.44210 2206447.69010 3766127.17860 E
8 PKMN 4643871.01340 2203539.48400 3763744.88850 E
9 RIBA 4641874.61970 2198523.54680 3768942.49430 E
10 SANT 4640366.19570 2205651.96420 3767241.48310 E
4 WTZR 4075580.41740 931853.94210 4801568.22050 F

```

BASLINE	
MONIMOΙ ΣΤΑΘ- MOI	ΣΤΑΘMOI ΠPOC EYPECΗ
GRAZ	MOZI
SANT	KERA
MATE	NOMI
WTZR	RIBA
AUT1	PKMN
PATo	WNRV
DUTH	NKAM

Εικόνα 24

Παράδειγμα αρχείου αρχικών συντεταγμένων. Απουσιάζουν οι σταθμοί DUTH, PATo, USAL καθώς η εικόνα είναι από αρχικό πείραμα

Πίνακας 4

Η αρχική στρατηγική (baseline)

Τέλος μετά τις παραπάνω διαδικασίες στο φάκελο STA δημιουργείται ένα αρχείο CRD με τελικές συντεταγμένες FINAL COORDINATE/ TROPOSPERE RESULTS. Έπειτα από την επεξεργασία το τελικό αρχείο (ίδιας μορφής με αυτό των αρχικών συντεταγμένων) με τις τελικές συντεταγμένες έχει την μορφή της εικόνας 25.

LOCAL GEODETIC DATUM: IGL08		EPOCH: 2013-02-01 12:00:00			
NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)	FLAG
1	AUT1	4466283.31090	1896167.04540	4126096.82240	F
2	GRAZ	4194424.67990	1162702.83680	4647245.50120	F
5	KERA	4644059.17340	2200009.67860	3765747.26130	E
3	MATE	4641949.40980	1393045.57550	4133287.58990	F
6	MOZI	4639049.09050	2204980.05690	3769175.80340	E
7	NOMI	4640783.43450	2206447.69140	3766127.17790	E
8	PKMN	4643868.94170	2203539.53060	3763744.01020	E
9	RIBA	4641874.61970	2198523.54680	3768942.49430	E
10	SANT	4640364.12360	2205651.91060	3767241.34930	E
4	WTZR	4075580.42120	931853.93790	4801568.21790	F

Εικόνα 25

Παράδειγμα τελικών συντεταγμένων, εικόνα απο το προγραμμα.

2.2 Αποτελέσματα Μεθόδου

2.2.1. Υπολογισμός Γραμμικών Ταχυτήτων

Έγινε υπολογισμός γραμμικών ταχυτήτων των σταθμών για το διάστημα από 1/2013 έως 12/2015. Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται τόσο η ταχύτητα όσο και το σφάλμα ανά τρίμηνο.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Sant:

SANT 2013 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
0,1	4,4	-5,8	3,7	46,3	11,6
18,6	7,7	-31,7	7,4	13,3	19,2
0,8	2,7	-27,9	1,8	12,5	5,1
2,8	2,3	-11,0	1,7	19,3	4,6
2014 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-7,4	2,1	-13,1	1,7	29,0	4,8
5,1	2,2	-12,1	2,1	19,1	7,5
-8,7	4,9	-18,8	3,8	2,3	12,1
11,8	2,3	-9,1	2,4	7,9	5,9
2015 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-3,2	2,4	-5,1	2,2	18,8	6,0
14,7	1,9	-15,8	1,4	-7,6	5,1
14,2	2,3	-15,4	1,7	-9,4	4,4

-22,8	8,1	-4,8	7,8	13,0	25,5

Κατά το 4ο τρίμηνο του 2015, διακρίνεται ένα αρκετά μεγάλο σφάλμα στις μετρήσεις του V_{up} .

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Dsln:

dsln 2013 σε mm/y					
V_e	error	V_n	error	V_{up}	error
7,0	1,7	-11,5	1,8	25,8	6,1
20,9	2,3	-30,7	1,8	44,4	7,0
0,4	2,1	-23,1	1,7	-11,8	8,6
-3,4	2,5	-5,0	3,6	-38,4	9,0
2014 σε mm/y					
V_e	error	V_n	error	V_{up}	error
5,5	2,1	-23,9	1,6	62,4	6,5
6,2	2,2	-28,3	1,6	4,9	6,8
-1,9	1,9	-19,6	2,3	-4,1	7,0
-7,7	1,7	12,2	2,4	-53,3	7,6

Ο σταθμός δεν είχε δεδομένα για το έτος 2015.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Kera:

Kera- 2013 σε mm/y					
V_e	error	V_n	error	V_{up}	error
9,3	1,7	-12,7	1,5	62,4	6,5
7,5	1,8	-17,6	1,2	-1,8	5,8
7,7	2,1	-17,8	1,4	6,5	5,0
14,4	1,7	-11,2	1,4	15,3	4,9
2014 σε mm/y					
V_e	error	V_n	error	V_{up}	error
11,5	1,7	-12,2	1,3	62,4	6,5
6,5	2,1	-18,8	1,2	1,3	5,6
-1,9	2,1	-14,8	1,8	16,3	5,8
4,8	1,9	-14,9	1,4	5,2	5,4

2015 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
4,9	2,1	-10,1	1,5	62,4	6,5
15,8	1,9	-15,8	1,3	-21,8	4,3
1,9	2,2	-19,7	1,6	12,1	5,1
1,8	9,5	-1,7	7,5	14,4	30,0

Κατά το 4ο τρίμηνο του 2015, παρατηρείται ένα αρκετά μεγάλο σφάλμα στις μετρήσεις της συνιστώσας Up.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Mkmn:

mkmn 2013 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-0,4	2,0	-17,3	1,6	-0,5	6,2
13,7	4,5	-20,2	3,2	-12,8	10,4
-2,2	1,6	-20,9	1,5	16,6	6,2
12,0	2,1	-11,5	1,6	-0,8	5,9
2014 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-2,4	2,0	-7,3	1,6	19,5	4,9
10,0	2,4	-19,4	2,1	10,6	9,0
2015 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
12,8	10,2	-10,2	11,7	9,2	33,4

Για το σταθμό Mkmn δεν υπήρχαν δεδομένα σε αρκετές περιόδους, καθώς εμφανίζεται και ένα μεγάλο σφάλμα κατά το 1ο τρίμηνο του 2015.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Mozi:

Mozi 2013 σε mm/y

Ve	error	Vn	error	Vup	error
1,8	0,6	0,5	1,3	-3,1	2,4
-5,8	8,5	-15,0	4,6	-25,2	20,8
-7,8	3,7	-30,4	6,9	3,5	21,0
-0,9	1,0	-4,5	4,9	-21,9	23,8
2014 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-11,6	3,4	-12,4	11,5	-27,0	18,9
-27,3	9,1	-8,7	10,1	19,9	14,6
-8,0	7,1	-33,4	7,2	7,5	15,1
-13,7	17,4	-6,2	13,1	10,8	29,6

Για το σταθμό Mozi τα παρατηρείται ένα μεγάλο σφάλμα στο 4ο τρίμηνο του 2014 για τη συνιστώσα Easting, καθώς και σχεδόν σε όλες τις περιόδους για τη συνιστώσα Up.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Mkam:

mkam 2014 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
3,2	68,0	-28,8	46,0	-45,8	192,2
-24,0	8,6	21,6	14,7	11,2	21,9
mkam 2015 σε mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
2,4	5,3	-11,0	5,4	-47,0	15,0
-19,3	8,6	13,6	8,8	-41,4	37,5

Το σφάλμα που παρατηρείται κατά το 3ο τρίμηνο του 2014 είναι ασυνήθιστα μεγάλο. Μετά από επανέλεγχο εμφανίστηκε το ίδιο αποτέλεσμα. Συνεπώς πρέπει να απορριφθεί την τιμή του Vup για το 3ο τρίμηνο γιατί η καθίζηση που φαίνεται, παροτι μοιάζει με τις μετρήσεις του 2014, θεωρείται λανθασμένη. Επισημαίνεται ότι οι τιμές της 3/11/2014 είχαν ήδη αφαιρεθεί πριν την εύρεση των ταχυτήτων καθώς θεωρηθήκαν εντελώς λανθασμένες από τα διαγράμματα (επισυνάπτονται παρακάτω). Πιθανόν να οφείλεται σε Ξαφνική Ιονοσφαιρική Διαταραχή (SID) αφού τον Οκτώβριο του 2014 υπήρξαν 309 ιονοσφαιρικές διαταραχές

οπώς αναφέρεται στην ιστοσελίδα <https://www.aavso.org/sid-database>, ενώ πχ. τον Ιανουάριο του 2013 μόλις 79, επίσης υπήρξαν 190 ηλικάκες εκρήξεις το Νοέμβριο του 2014 και μια X-class, που ίσως επηρέασαν την ιονόσφαιρα σημαντικά.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Nomi:

nomi 2013 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-7,3	3,2	-24,7	3,1	49,3	9,0
11,1	2,0	-22,6	1,5	1,0	5,2
3,7	1,8	-24,2	1,6	12,0	6,0
2,6	2,3	-15,6	1,7	17,3	5,1
2014 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-9,8	3,3	-17,2	2,7	40,6	6,8
12,5	1,9	-20,5	1,6	10,5	6,4
0,3	2,2	-20,2	1,9	24,3	6,2
34,9	13,6	-25,1	11,9	-94,6	55,0
2015 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
0,4	3,2	-14,5	3,0	8,1	10,2
18,2	1,2	-20,8	0,9	-3,3	3,6
-4,7	2,8	-12,9	2,7	11,8	8,4

Κατά το 4ο τρίμηνο του 2014 το σφάλμα που παρατηρείται είναι αρκετά μεγάλο για να θεωρήσουμε την ταχύτητα του Vup σωστή. Παρατηρείται μια αύξηση της ταχύτητας κατά το έτος 2014 και στις 3 συνιστώσες. Εάν ωστόσο αφαιρεθούν παντελώς οι ταχύτητες και των 3 συνιστωσών του 4ο τριμήνου για το έτος 2014 που εξετάστηκε, η ταχύτητα στη συνιστώσα Easting μειώνεται, στη Northing δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου και για την Up αλλάζει πραγματικά πολύ, βέβαια, λόγω του μεγάλου σφάλματος, δικαιολογείται αυτή η διαφορά. Επισυνάπτεται ο πίνακας με αφαιρεμένες τις τιμές των συνιστωσών κατά το 4ο τρίμηνο για το έτος 2014.

Nomi 2014 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-9,8	3,3	-17,2	2,7	40,6	6,8
12,5	1,9	-20,5	1,6	10,5	6,4

0,3	2,2	-20,2	1,9	24,3	6,2

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Pkmn:

Pkmn 2013 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
7,4	1,4	-14,7	1,6	21,0	6,1
11,1	1,7	-19,0	1,4	-1,6	5,0
7,2	1,6	-17,6	1,0	11,0	5,3
15,2	1,7	-6,3	1,6	16,0	4,7
2014 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
4,4	1,4	-8,5	1,4	23,4	4,6
8,7	1,7	-23,7	1,5	1,6	5,5
5,7	1,6	-17,4	1,6	18,5	5,1
7,9	1,6	-19,6	1,5	3,8	5,6
2015 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
7,1	2,0	-9,1	1,5	17,4	5,9
13,1	1,4	-16,7	1,3	-13,4	4,6
7,0	1,4	-21,8	1,5	11,8	4,8
-11,2	7,5	26,8	7,1	-33,6	28,0

Κατά το κατά το 4ο τρίμηνο του 2014 το σφάλμα που παρατηρείται είναι αρκετά μεγάλο και λόγω αυτού δε μπορεί να θεωρηθεί σωστή την ταχύτητα του Vup. Εάν αφαιρεθεί, όπως εμφανίζεται πιο παρακάτω, η ταχύτητα αλλάζει πρόσημο, και να επανέρχεται σε αυτό των προηγούμενων ετών. Μια πιθανή τοπική καθίζηση δηλαδή για το 2ο τρίμηνο.

2015 Vup mm/y	error
17,4	5,9
-13,4	4,6
11,8	4,8

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Riba:

Riba 2013 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
25,2	6,1	-6,7	7,9	6,1	20,4
20,7	2,2	-30,3	2,8	-16,4	8,6
2014 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
-21,0	9,9	-7,6	10,1	-32,0	35,5
9,5	1,7	-18,4	1,4	6,8	5,0
0,8	1,4	-16,4	1,6	21,4	5,0
-2,1	1,4	-10,3	1,7	8,6	5,8
2015 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
3,6	1,9	-10,7	1,6	20,6	5,4
14,7	1,4	-14,7	1,5	-12,9	4,3
2,8	1,3	-22,6	1,5	9,5	4,9
-1,6	6,2	13,6	7,4	55,6	18,2

Παρατηρείται μια μεγάλη διακύμανση της ταχύτητας κατά το 1ο τρίμηνο του 2014 στην Easting συνιστώσα. Η σεισμική δραστηριότητα δε δικαιολογεί τόσο μεγάλη μεταβολή, βέβαια υπάρχει έλλειψη πειραματικών μετρήσεων κατά το 4ο τρίμηνο του προηγούμενου έτους.

Παρακάτω δίνονται οι ταχύτητες (σε mm/y) και τα σφάλματα για το σταθμό Thir:

Thir 2013 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
0,2	3,1	-20,3	3,1	-17,8	5,7
15,3	2,2	-26,7	1,5	6,6	6,1
3,1	1,8	10,9	0,8	-2,2	1,4
13,2	3,8	-17,4	0,7	8,3	2,1
2014 mm/y					
Ve	error	Vn	error	Vup	error
2,4	1,8	-16,3	1,9	46,7	5,7
7,1	2,8	-23,0	1,9	8,4	6,0
2,4	2,2	-20,4	1,8	11,5	6,5
4,3	4,3	-16,7	4,0	-12,1	11,3
2015 mm/y					

Ve	error	Vn	error	Vup	error
-15,7	27,8	-23,8	15,9	-78,5	61,3
16,4	2,4	-21,3	2,0	7,9	6,7
7,5	1,6	-21,0	1,6	-4,8	4,6
15,8	13,0	0,2	8,7	21,5	27,1

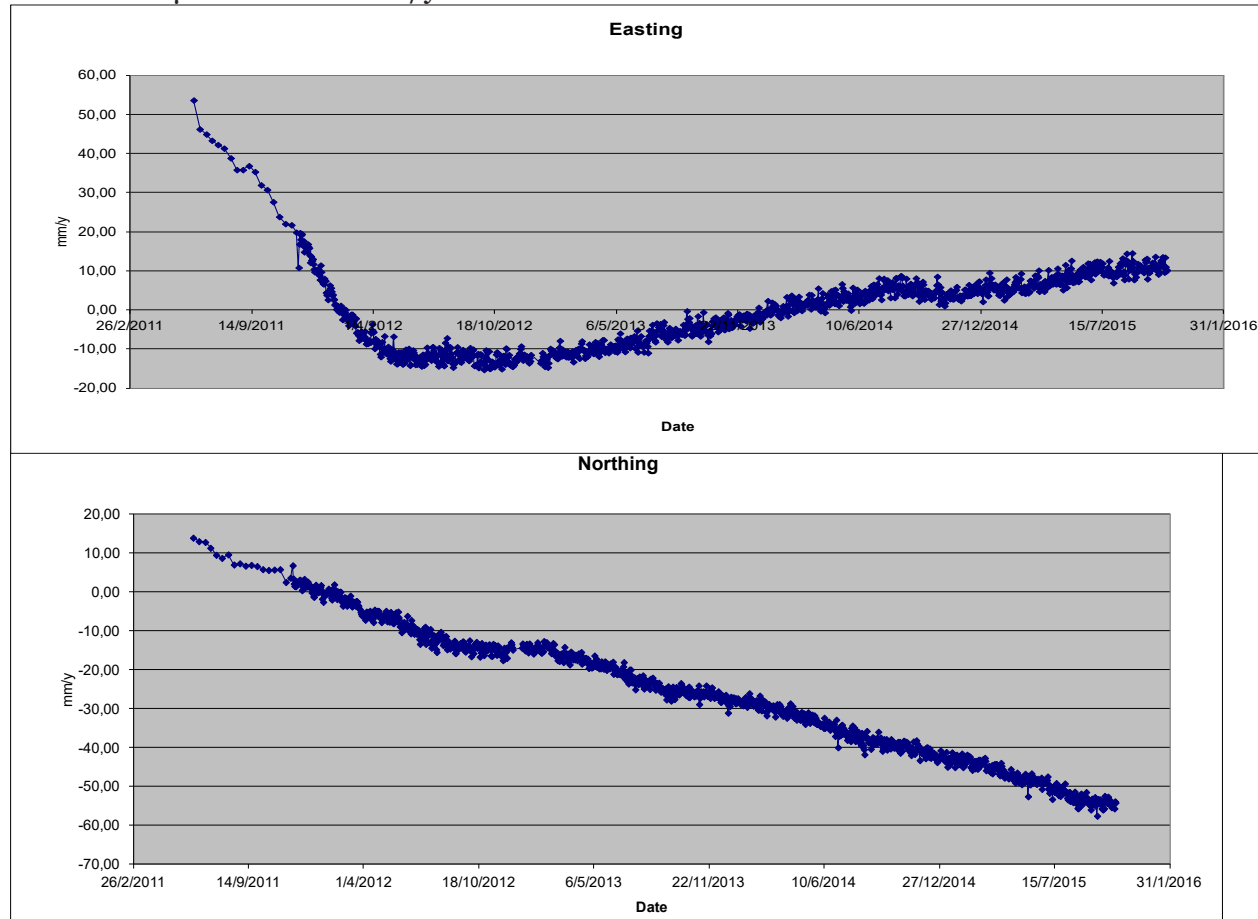
Παρατηρείται και εδώ μια μεγάλη διακύμανση της ταχύτητας κατά το 1ο τρίμηνο του 2014 στις 3 συνιστώσες. Η σεισμική δραστηριότητα όμως, ή μάλλον η απουσία αυτής, δε δικαιολογεί τόσο μεγάλη μεταβολή, όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 26, όπου απεικονίζεται η σεισμική δραστηριότητα περιοχής Σαντορίνης κατά τα έτη 2013-2014. Το σφάλμα στη συνιστώσα Vup είναι μεγάλο σε σχέση με τα επόμενα τρίμηνα.

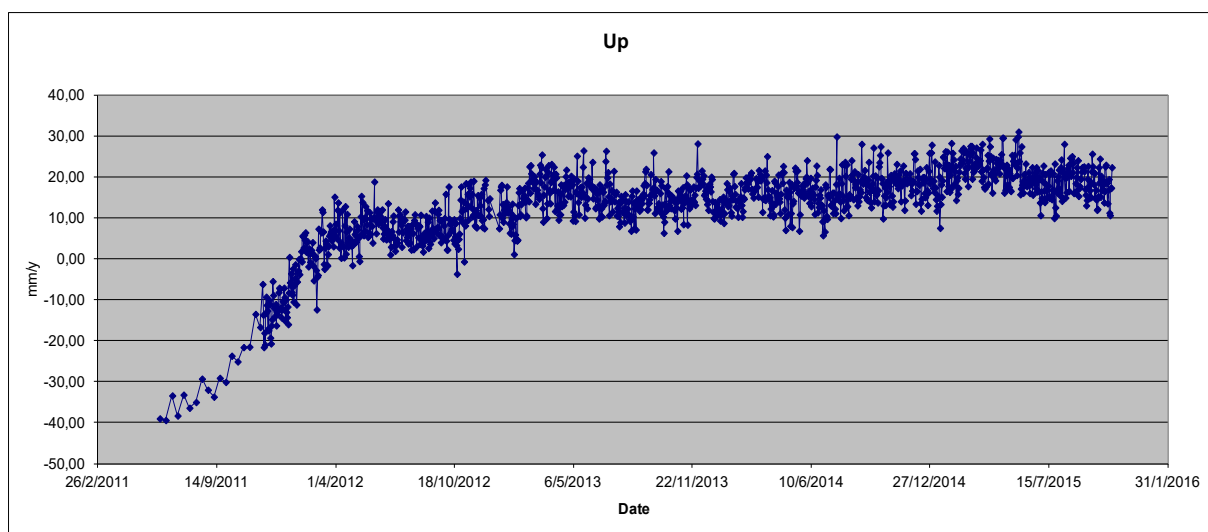
2.2.2 Διαγράμματα

Μετά το πέρας της επεξεργασίας με το πρόγραμμα BERNESE 5.2 εξήχθησαν τα αποτελέσματα και δημιουργήθηκαν γραφήματα έτσι ώστε με τις χρονοσειρές των σταθμών για τις χρονιές 2013-2015 σε easting, northing και up συνιστώσες να εξαχθούν συμπεράσματα προς συζήτηση.

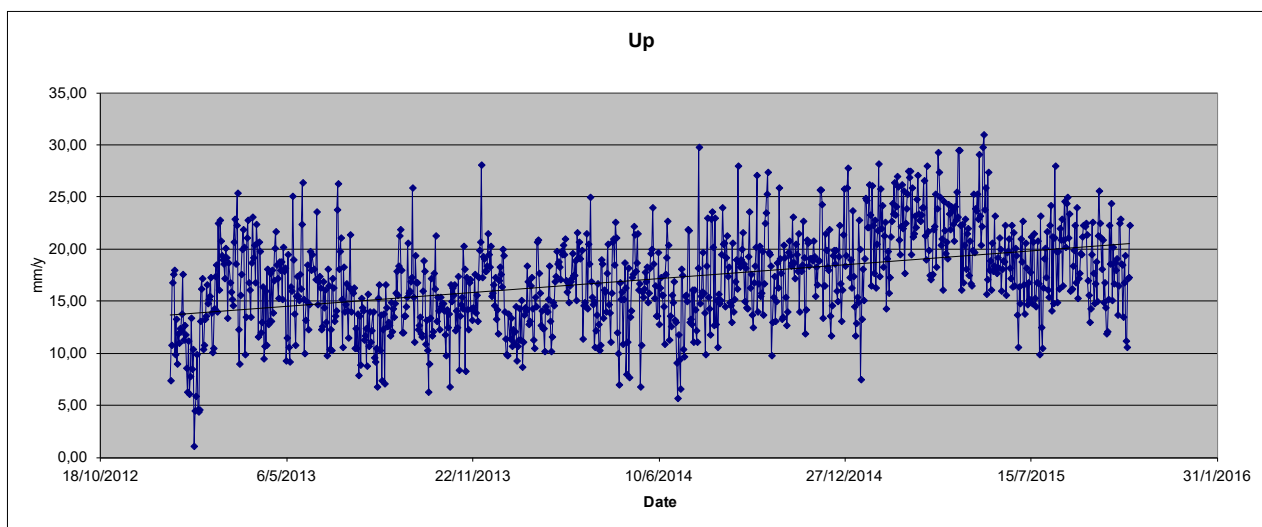
Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει τιμές σε απολυτες συντεταγμένες (ΕΓΣΑ 87) σε mm/yr, ενώ ο οριζόντιος χρόνο σε μορφή ημερομηνίας.

Για το σταθμό ΚΕΡΑ σε mm/yr:



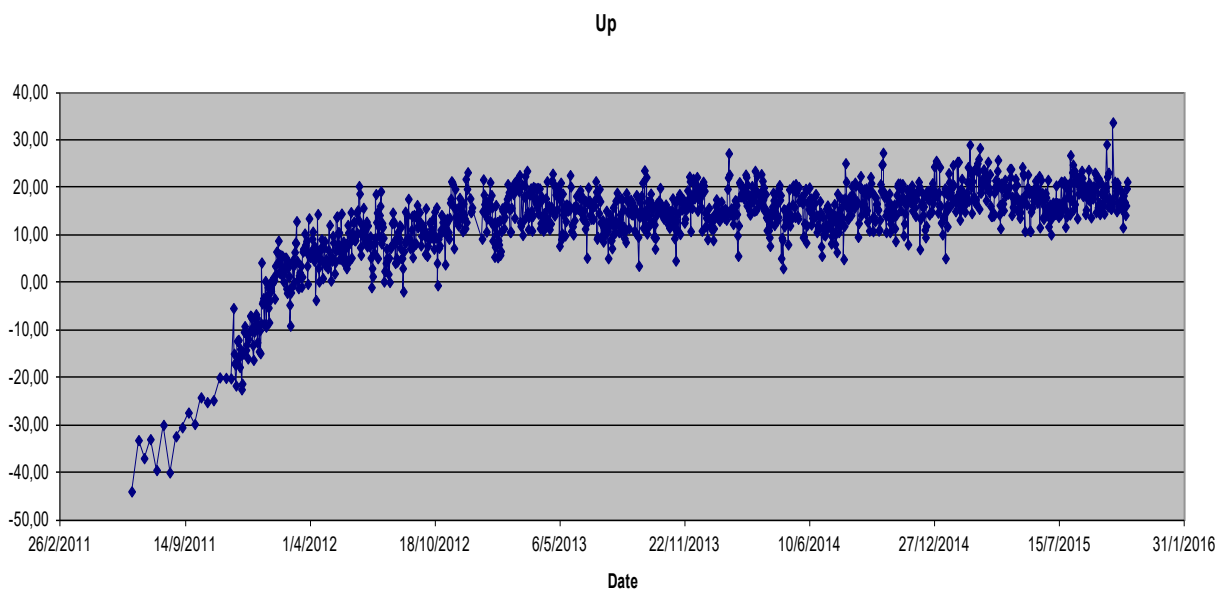
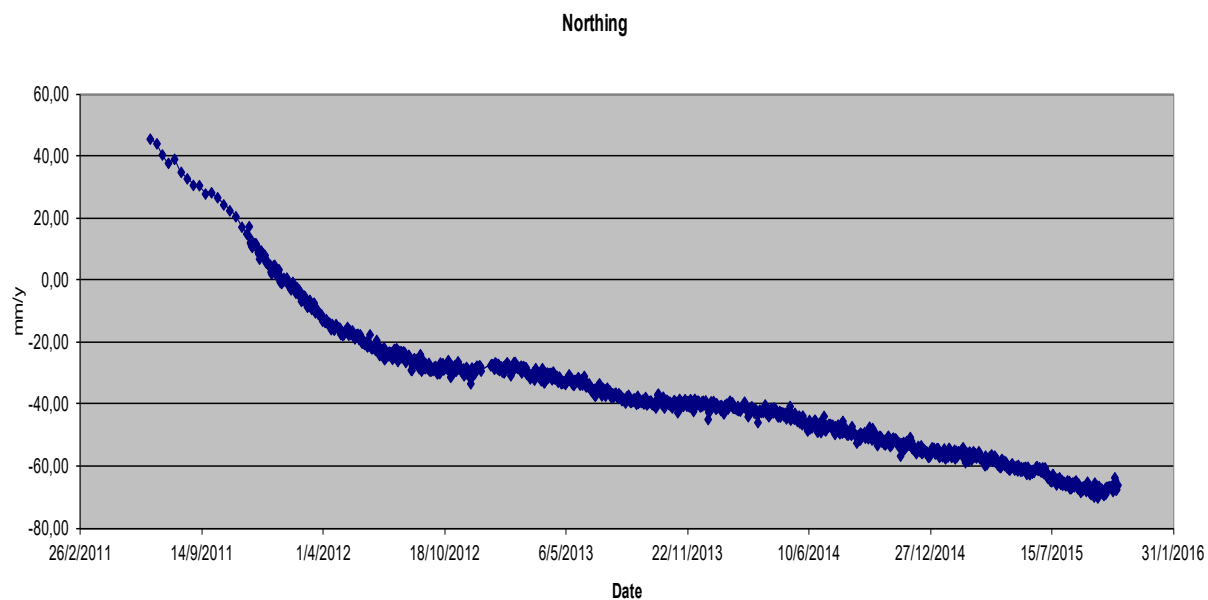
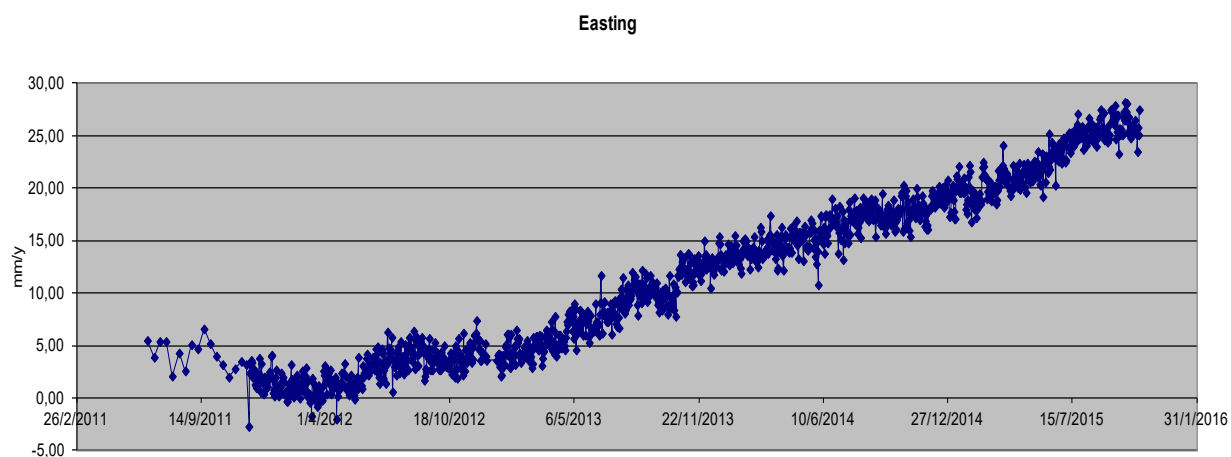


Στο σταθμό ΚΕΡΑ είναι εμφανής η αλλαγή της διεύθυνσης της συνιστώσας Easting στα μέσα του 2012 και μια μικρή στροφή τον Οκτώβριο του 2014. Έκτοτε η διεύθυνση παραμένει ίδια δηλαδή ανατολική. Στην συνιστώσα Northing η διεύθυνση είναι νότια σε όλα τα έτη. Στη κατακόρυφη συνιστώσα (Up) παρατηρείται μια άνοδος έντονη κατά τα έτη 2011-2012 έπειτα συνεχίζει να παραμένει ανοδική αλλά με μικρή κλίση. Εάν απομονωθούν τα έτη μελέτης, ήτοι 2013-2015 τότε είναι η εμφανής η άνοδος της τάξης των 7mm/yr.

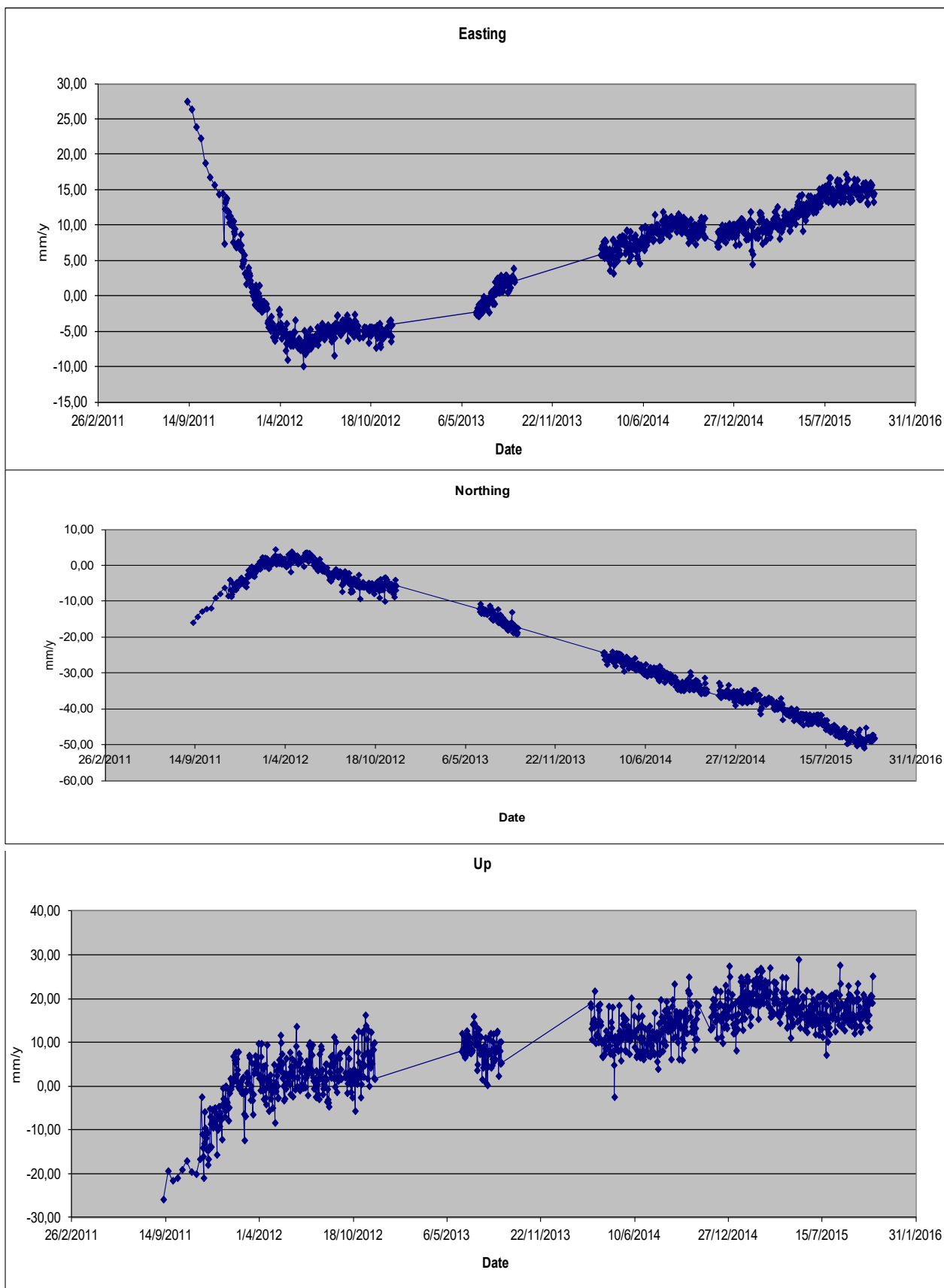


Για τον σταθμό ΡΚΜΝ (διαγράμματα του οποίου εμφανίζονται πιο κάτω σελ.51) παρατηρείται μια πανομοιότυπη κίνηση κατά τα τελευταία έτη. Η κατακόρυφη συνιστώσα εμφανίζει μια απότομη κλίση το 2011, εάν απομονωθούν όμως τα χρόνια 2013-2015, η ανύψωση στη συνιστώσα Up είναι της τάξης των 4 mm/yr, φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

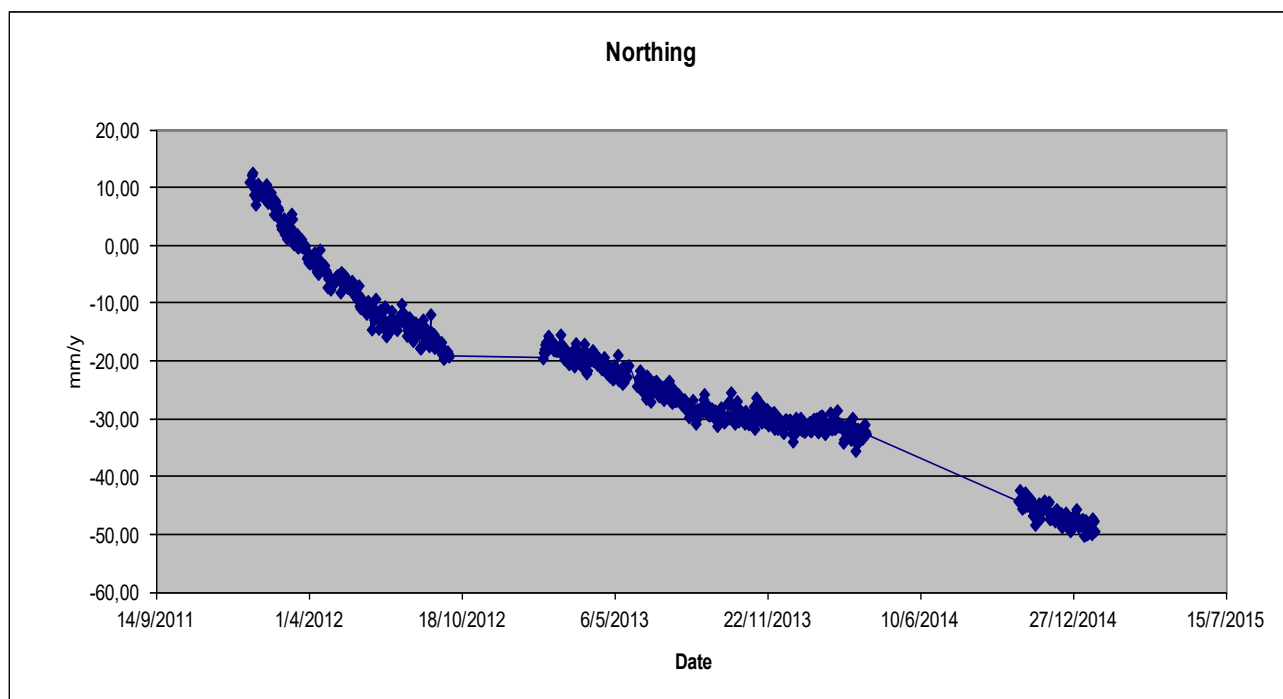
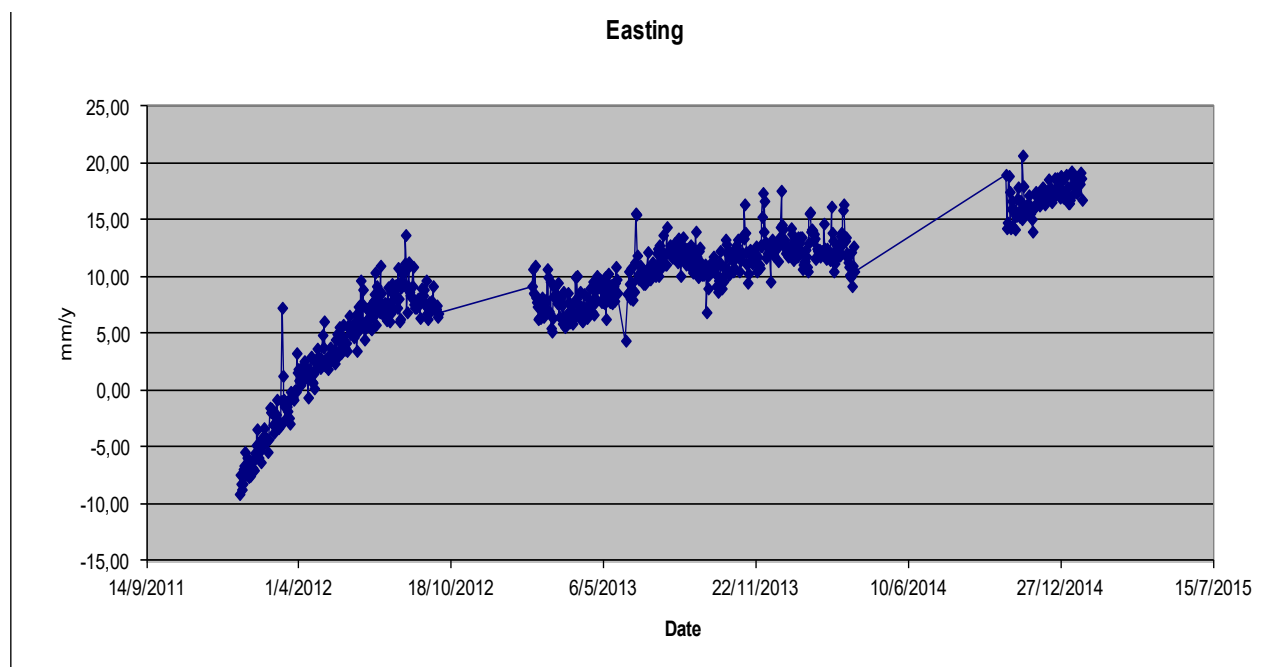
Ακολουθούν τα διαγράμματα των συνιστώσων NEU για το σταθμό ΡΚΜΝ σε mm/yr:



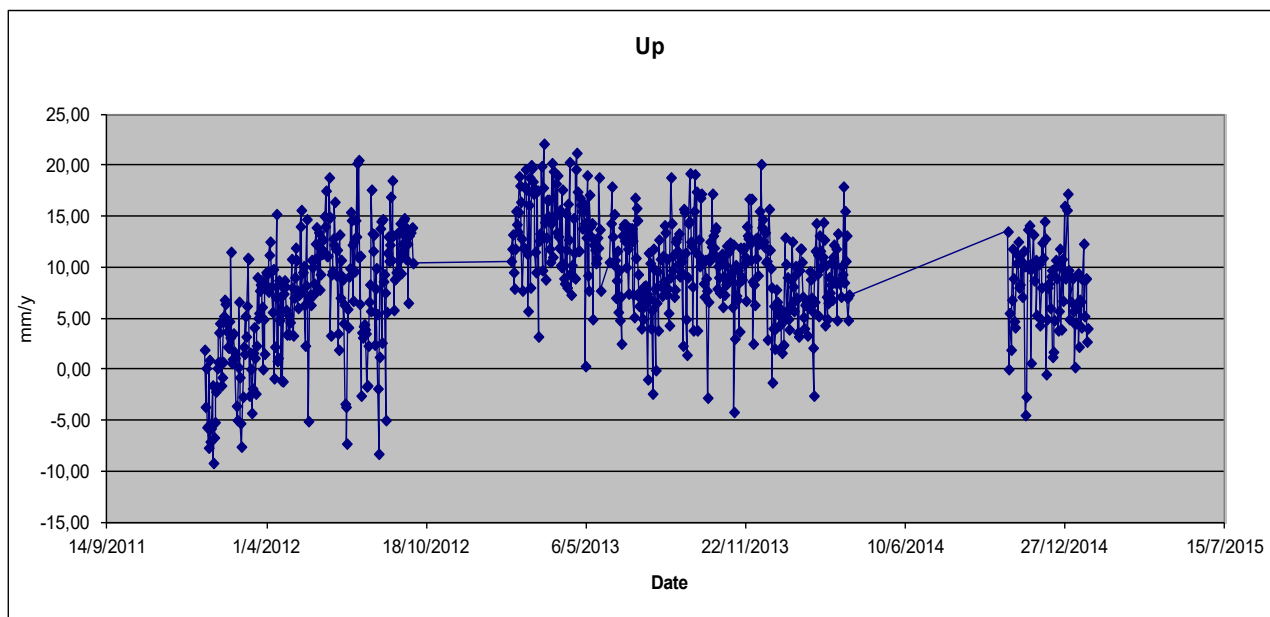
Ο σταθμός RIBA εμφάνισε μια στροφή το 2012 και συνέχισε έκτοτε να κινείται ανατολικά νοτια ανατολικά, ωστόσο το 2014 πιθανόν να επηρεάζόμενος από τοπικές δομές εμφανίζει μια περιστροφή και έπειτα γυρίζει πάλι ανατολικά, όπως εμφανίζουν τα διαγράμματα που ακολουθούν. Για τη κατακόρυφη συνιστώσα (Up) είναι εμφανής η συνεχόμενη άνοδος.



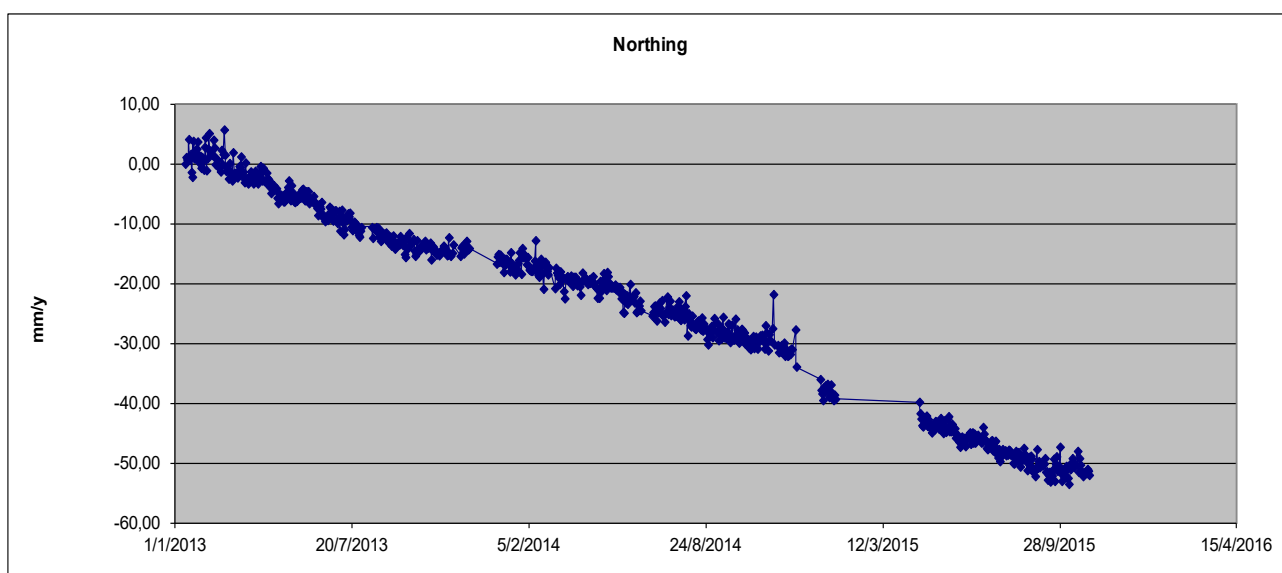
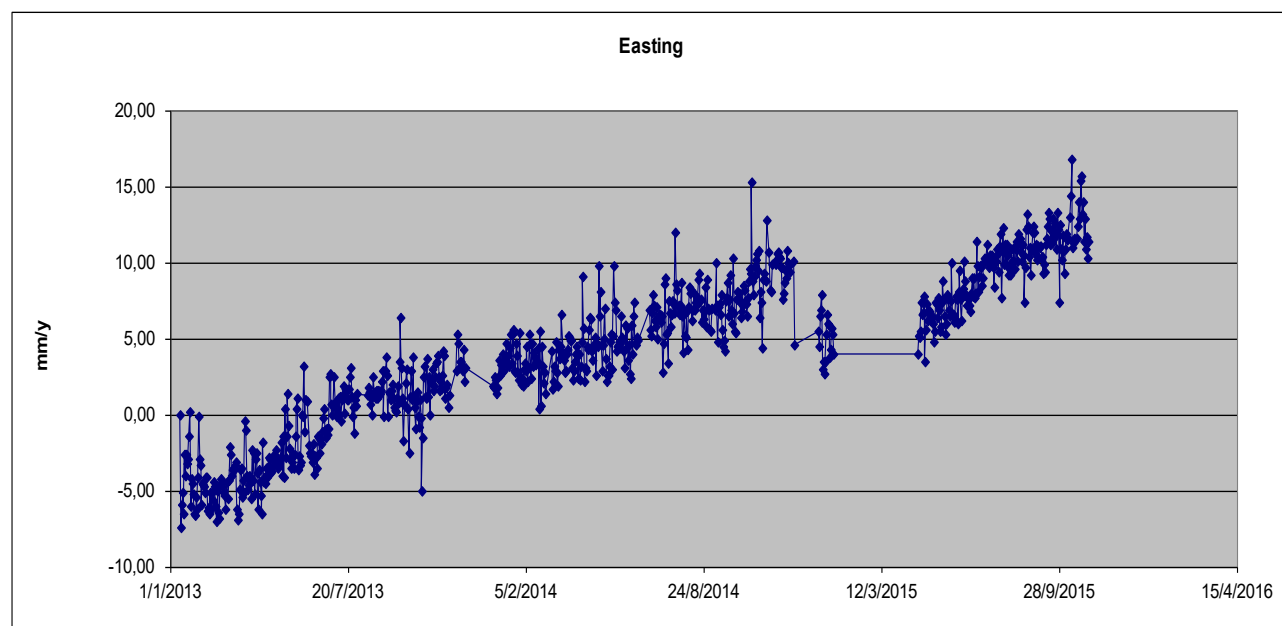
Για το σταθμό ΜΚΜΝ παρατηρείται μια διεύθυνση κίνησης νοτια-νοτιανατολική σε όλα τα έτη, με μια μικρή ίσως στροφή προς τα νότια στις αρχές του 2013. Αρκετό διάστημα δεν υπήρχαν δεδομένα λόγω βλάβης της κεραίας του σταθμού.



Και στη κατακόρυφη συνιστώσα, (ακολουθεί το διάγραμμα), είναι εμφανής η έλλειψη δεδομένων ωστόσο η μέση τάση δείχνει να παραμένει σταθερή, ίσως με μια μικρή καθίζηση. Υπενθυμίζεται ότι η ΜΚΜΝ βρίσκεται στη Νέα Καμένη.

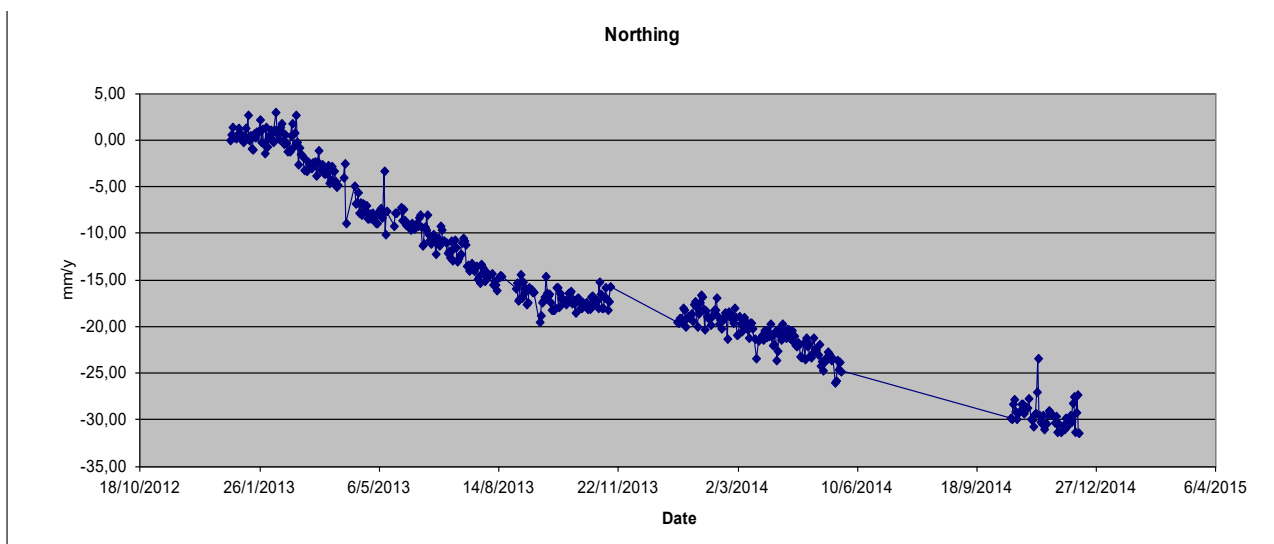
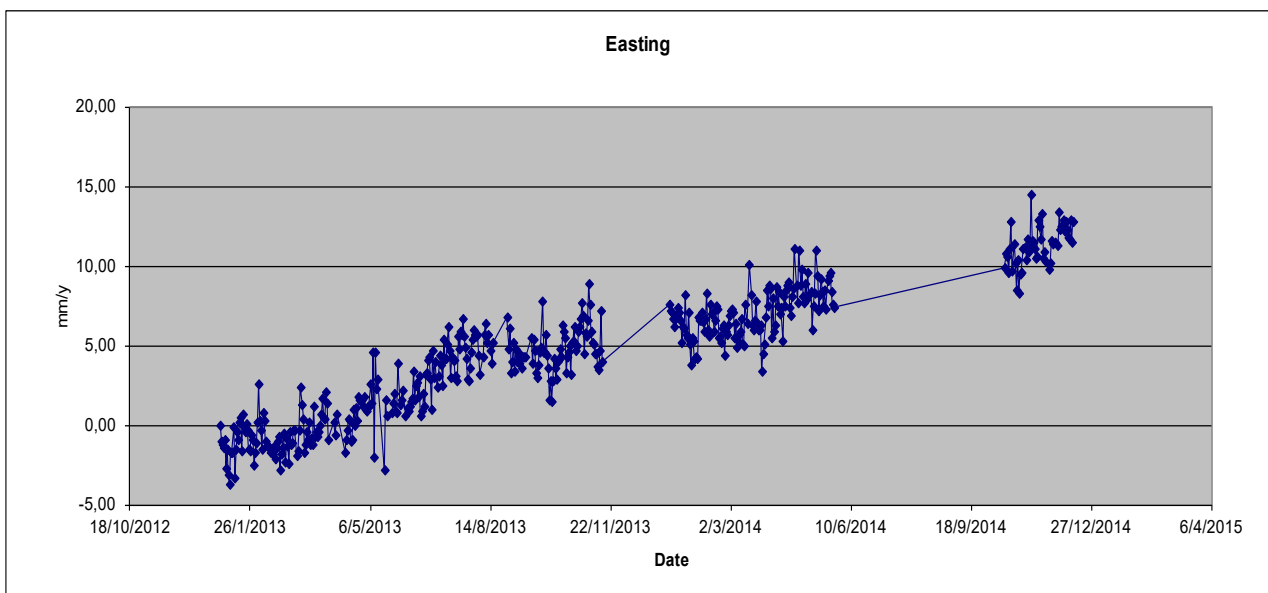


Ακολουθούν τα διαγράμματα των συνιστώσων NEU του σταθμού THIR:

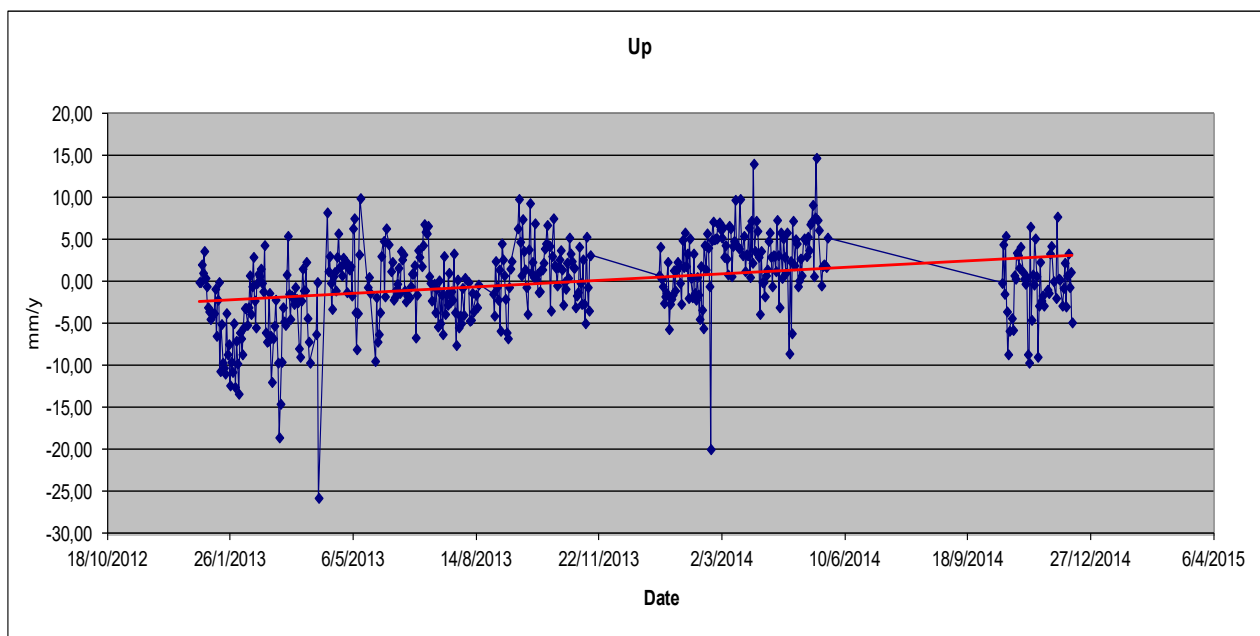


Είναι εμφανής η νοτιανατολική διεύθυνση της κίνησης του σταθμού καθ' όλα τα έτη μελέτης. Πιθανά να υπήρξε μια μικρή στροφή της διεύθυνσης το 2014 αλλά τα δεδομένα ήταν ελεεινή. Μερικές μετρήσεις έδειχναν μεγάλα σφάλματα όπως έδειξαν και οι ταχύτητες πιο πριν.

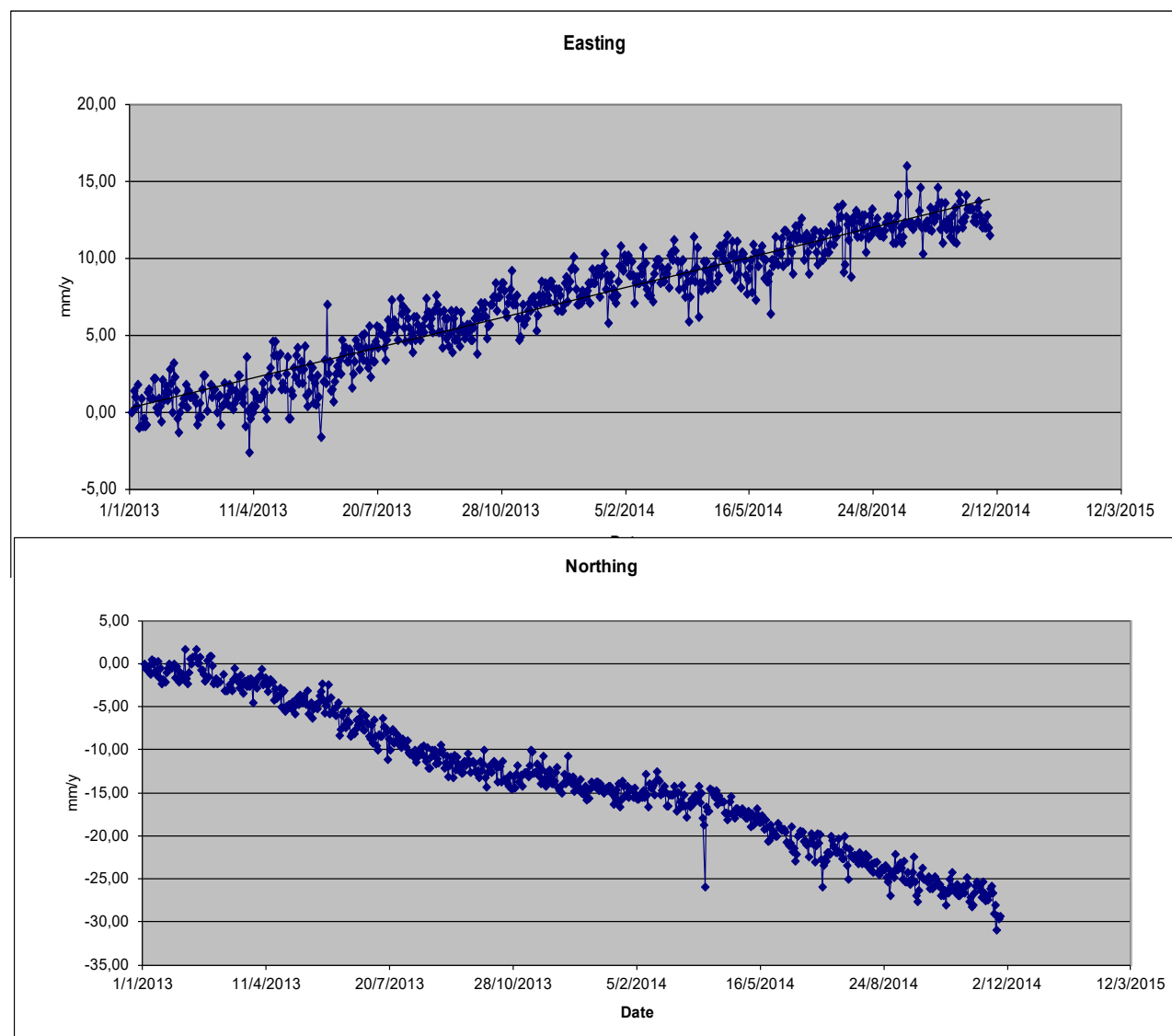
Στην κατακόρυφη συνιστώσα το 2013 εμφανίζει μικρή καθίζηση, ενώ το 2014 ανύψωση, το 2015 δείχνει να επανέρχεται σε καθιζήση με ένα σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις. Ακολουθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων συνιστώσων και της κατακόρυφης του σταθμού WNRΥ: Η κίνηση είναι νοτιοανατολική όπως φαίνεται στα διαγράμματα των οριζόντιων συνιστώσων (Easting, Northing).

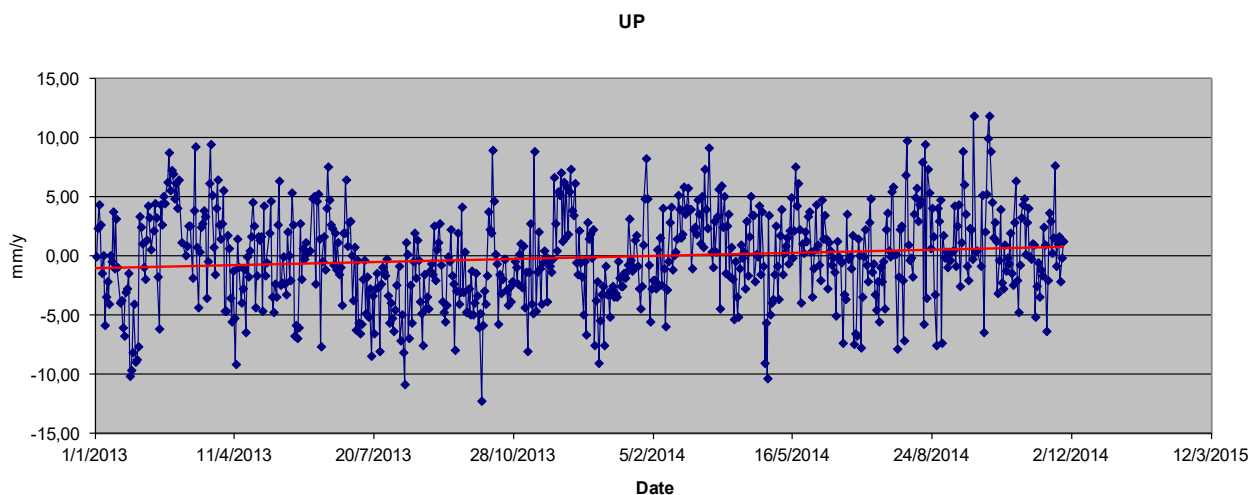


Στην κατακορυφη συνιστώσα U_r που ακολουθεί εμφανίζεται μια ανύψωση (έχει σχεδιαστεί με κόκκινο η γραμμή τάσης), ίσως να σημαίνει πιθανή “ενεργοποίηση” του νότιου τμήματος. Στο σταθμό WNRΥ είχαμε δεδομένα απο το 2013 και έκτοτε.



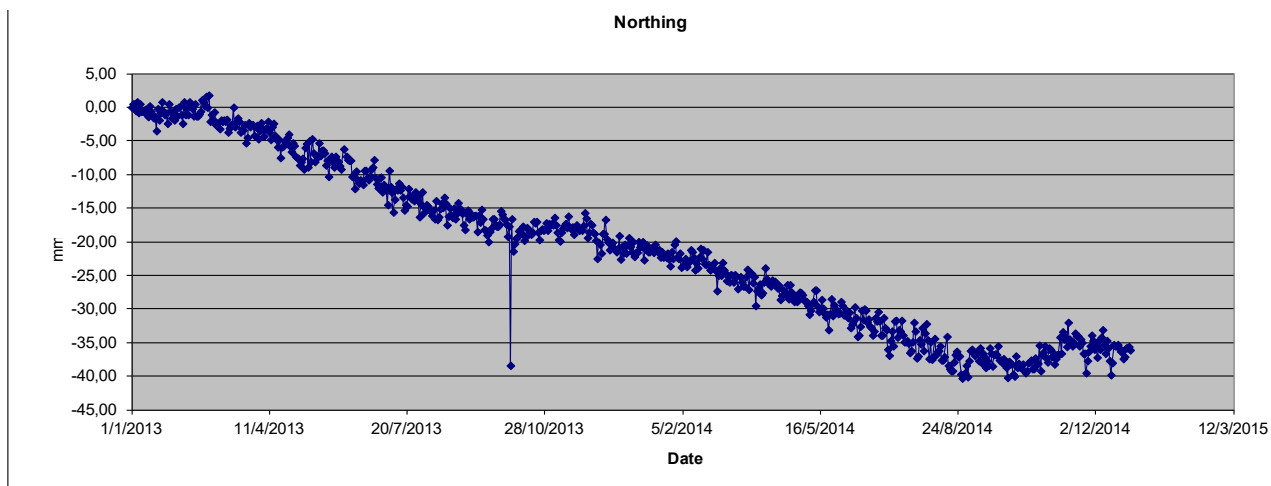
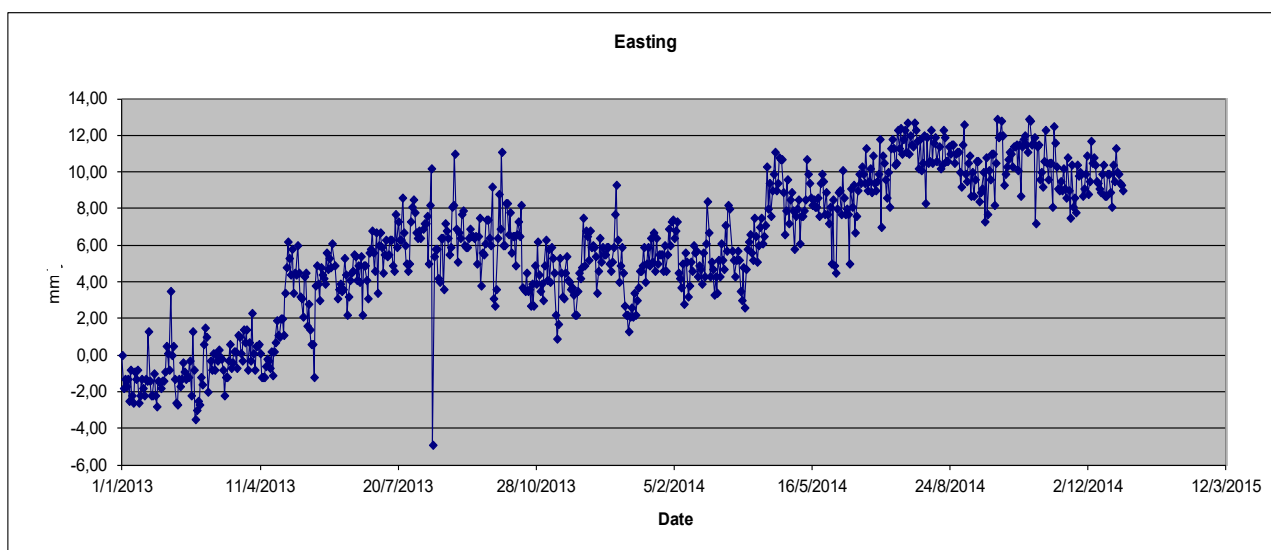
Ακολουθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων συνιστωσών και της κατακόρυφης του σταθμού SNTR:

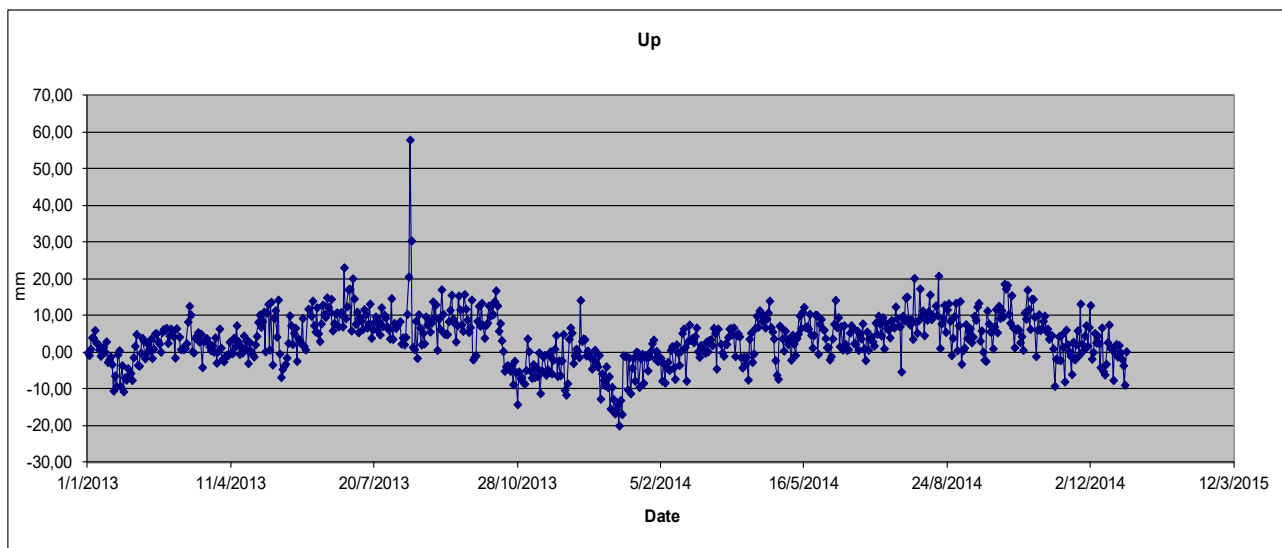




Η κίνηση του σταθμού SNTR νοτια-νοτιανατολική όπως προκύπτει από τα διαγράμματα Easting, Northing, και η ανύψωση είναι μικρή ($<2\text{mm/y}$). Ο SNTR βρίσκεται στα νότια του νησιού. Δεν υπήρξαν άλλα δεδομένα από το 2014 και μετά, από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Δεν έχει γίνει γνωστό γιατί ο σταθμός δεν είναι σε λειτουργία.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων συνιστωσών και της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού DSLN:

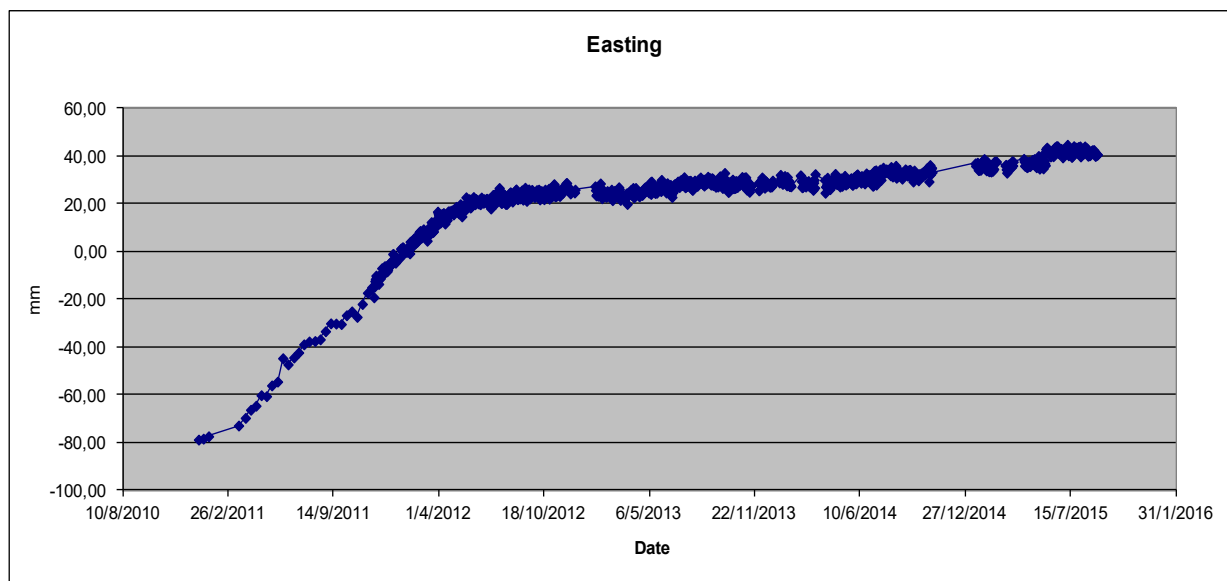




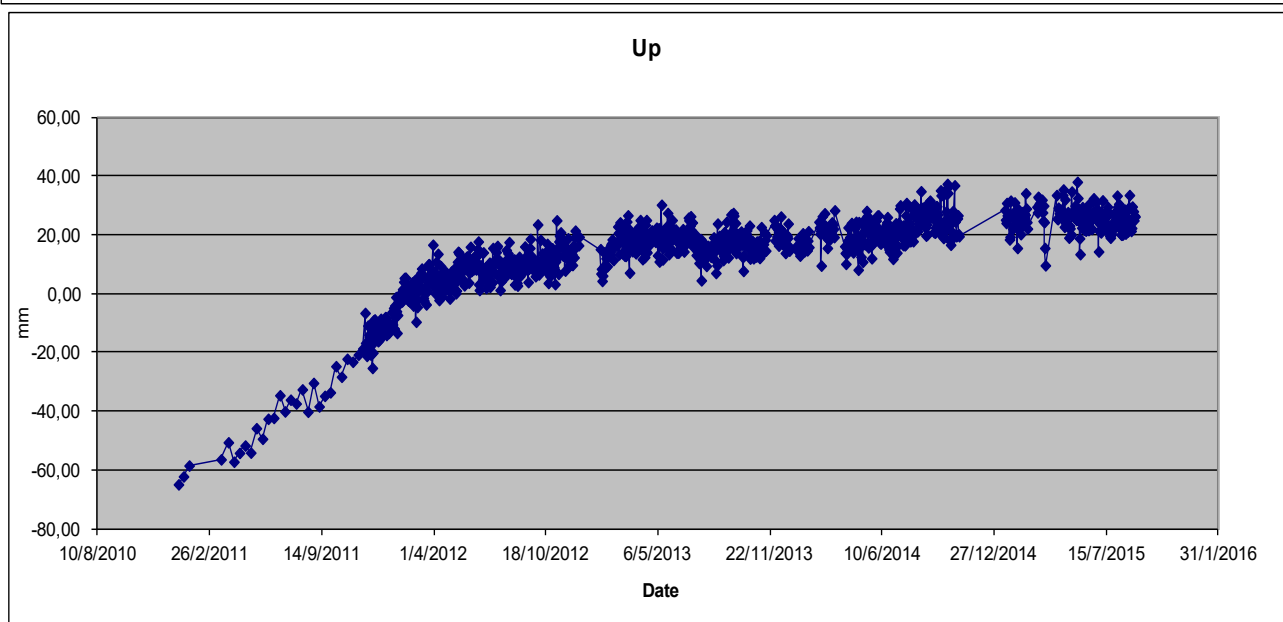
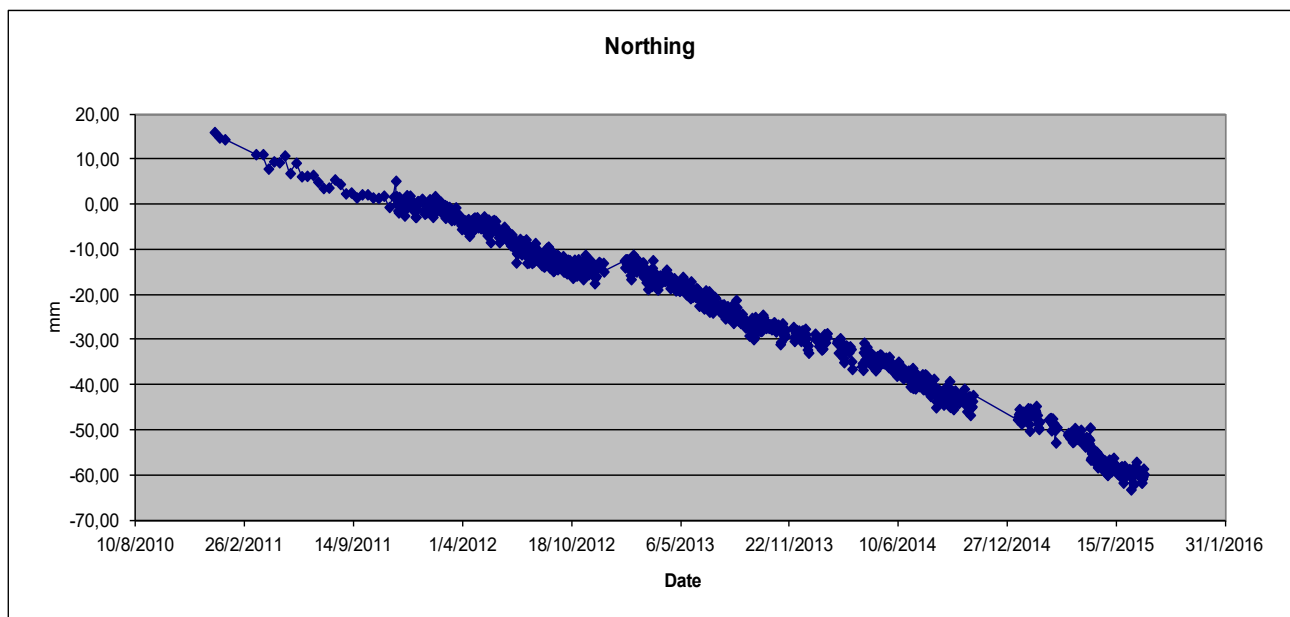
Ο σταθμός DSLN τοποθετήθηκε το 2011 και έκτοτε εμφανίζει μια σύνθετη κίνηση. Στις αρχές του 2013 έδειχνε να καθιζάνει, αργότερα και περίπου μέχρι τα μέσα Οκτωβρίου έδειχνε να ανυψώνεται, όπου και εμφάνισε μια απότομη καθίζηση για να ακολουθήσει μια άνοδος και ξάνα μια καθίζηση στις αρχές του 2014 και να συνεχιστεί μέχρι τον Ιούνιο του ίδιου έτους. Δυστυχώς δεν είχαμε δεδομένα μέσα στο 2015.

Στις οριζόντιες συνιστώσες εμφάνισε μια κίνηση νότια (στην συνιστώσα northing) και ανατολικά για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με μια στροφή προς τα δυτικά μεταξύ του Σεπτεμβρίου του 2013 και του Δεκεμβρίου, όπου και επανέρχεται ανατολικά.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των οριζόντιων συνιστωσών και της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού NOMI:

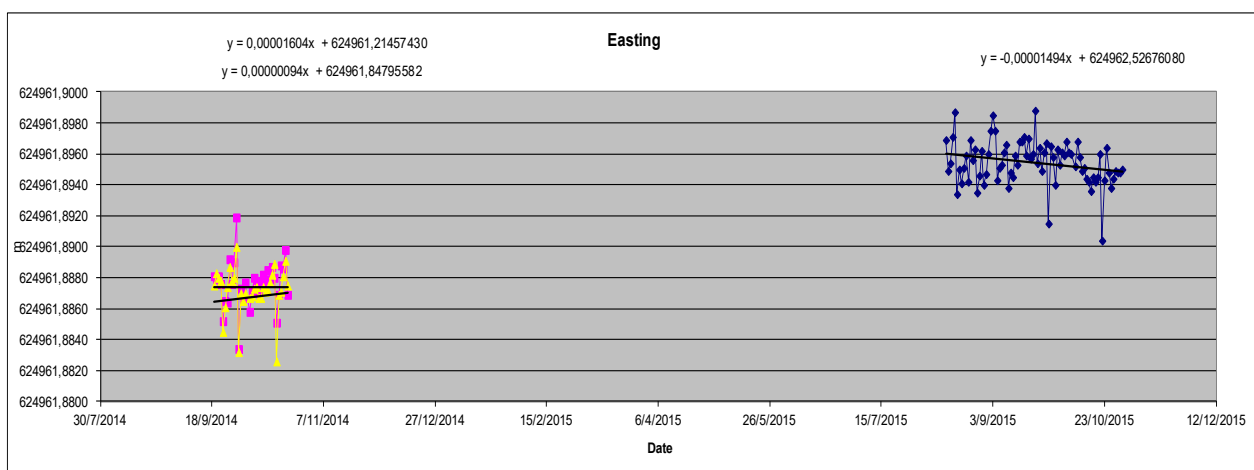


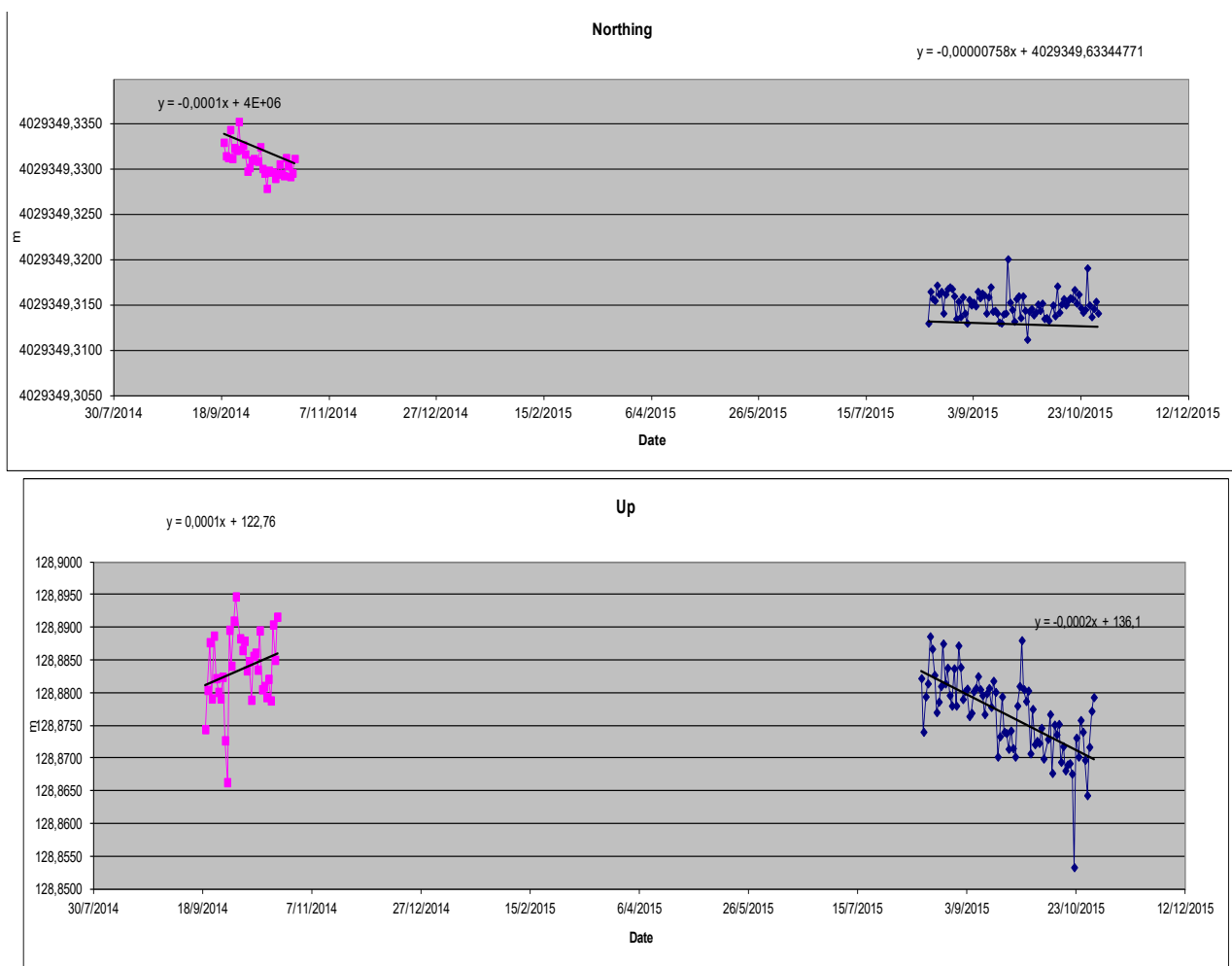
Στην οριζόντια συνιστώσα μετά την περίοδο της κρίσης, η ταχύτητα κυμαίνεται από 20 -40mm/y. Κίνηση νότιανατολική, η οποία δεν μεταβλήθηκε αισθητά κατά τα έτη.



Στην κατακόρυφη συνιστώσα για το σταθμό NOMI, παρατηρείται η απότομη ανύψωση περί τα 60mm/y και μετέπειτα η αύξηση είναι μικρή.

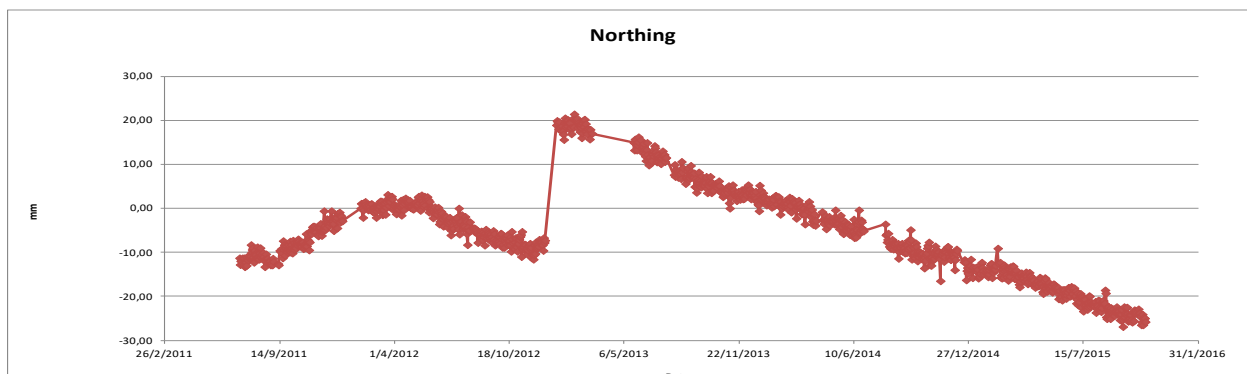
Ακολουθούν τα διαγράμματα και στις 3 συνιστώσες για το σταθμό NKAM σε απόλυτες



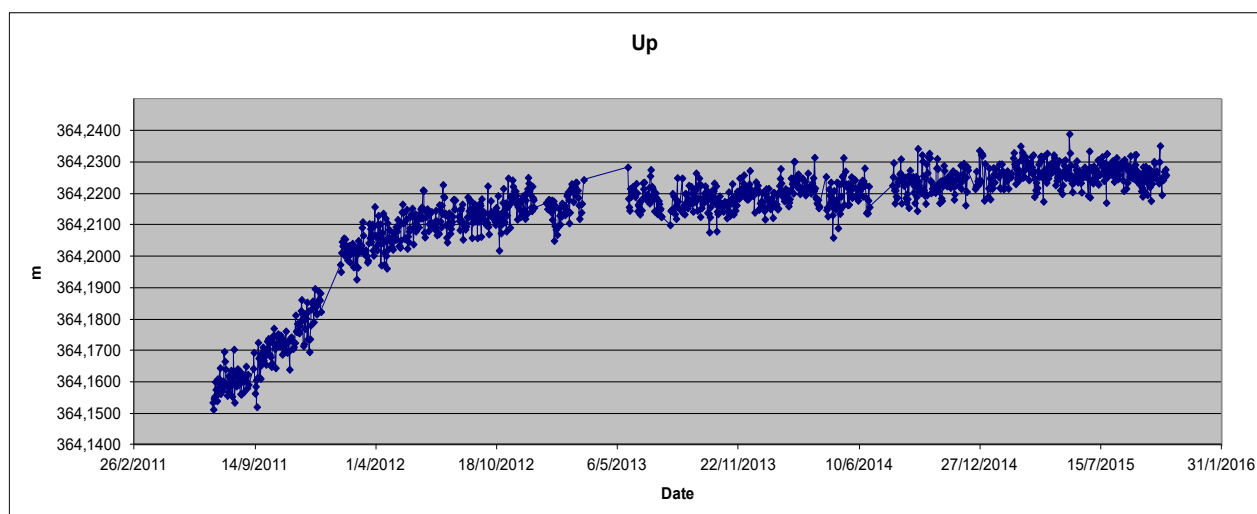
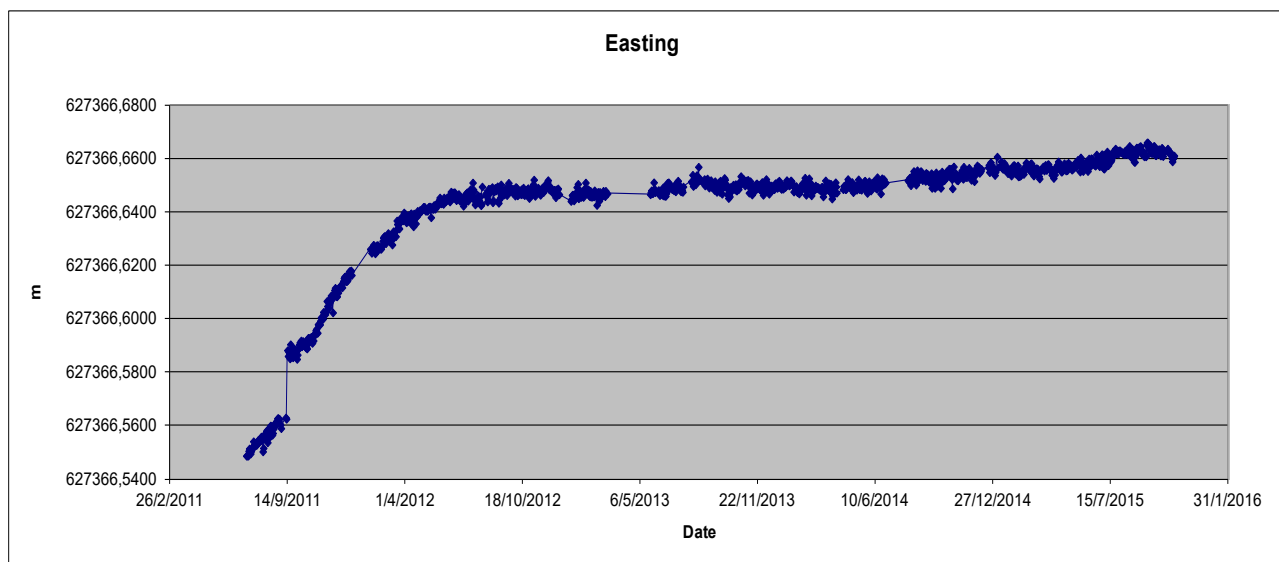
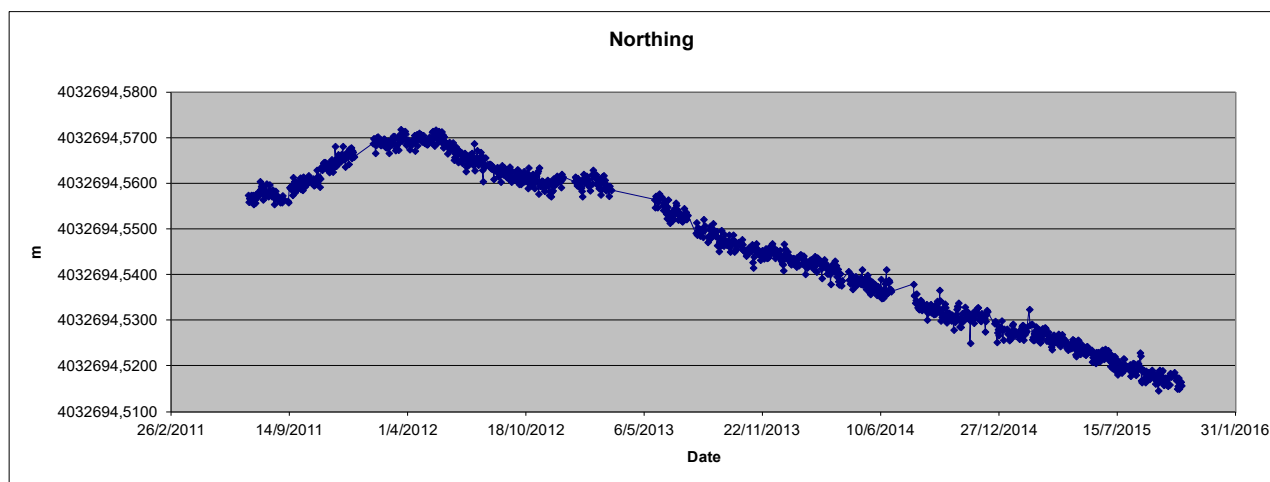


συντεταγμένες, διότι δεν μπορεί να συγκριθούν οι μετρήσεις με μια μέση τιμή. Στην κατακόρυφη συνιστώσα παρατηρείται μια καθίζηση στα τέλη του 2015, ενώ περι τα μέσα του 2014 εμφάνιζε μια ανύψωση, αρχικά δεν είχε συμπεριληφθεί στις μετρήσεις με τους ευρωπαϊκούς σταθμούς και για αυτό δεν αποτυπώνεται στις απεικονήσεις που ακολουθούν. Στις οριζόντιες συνιστώσες κίνηση νοτιοδυτική.

Τέλος ακολουθούν τα διαγράμματα του σταθμού SANT και στις 3 συνιστώσες (σελ. 61). Λόγω αλλαγής της κεραίας του σταθμού τον Ιανουάριο του 2013, απεικονίζονται οι συνιστώσες σε απόλυτες συντεταγμένες, διότι θα είχαν τη μορφή του διαγράμματος που ακολουθεί. Στο οριζόντιο επίπεδο ο σταθμός SANT στις αρχές του 2011 έως το Σεπτέμβριο του



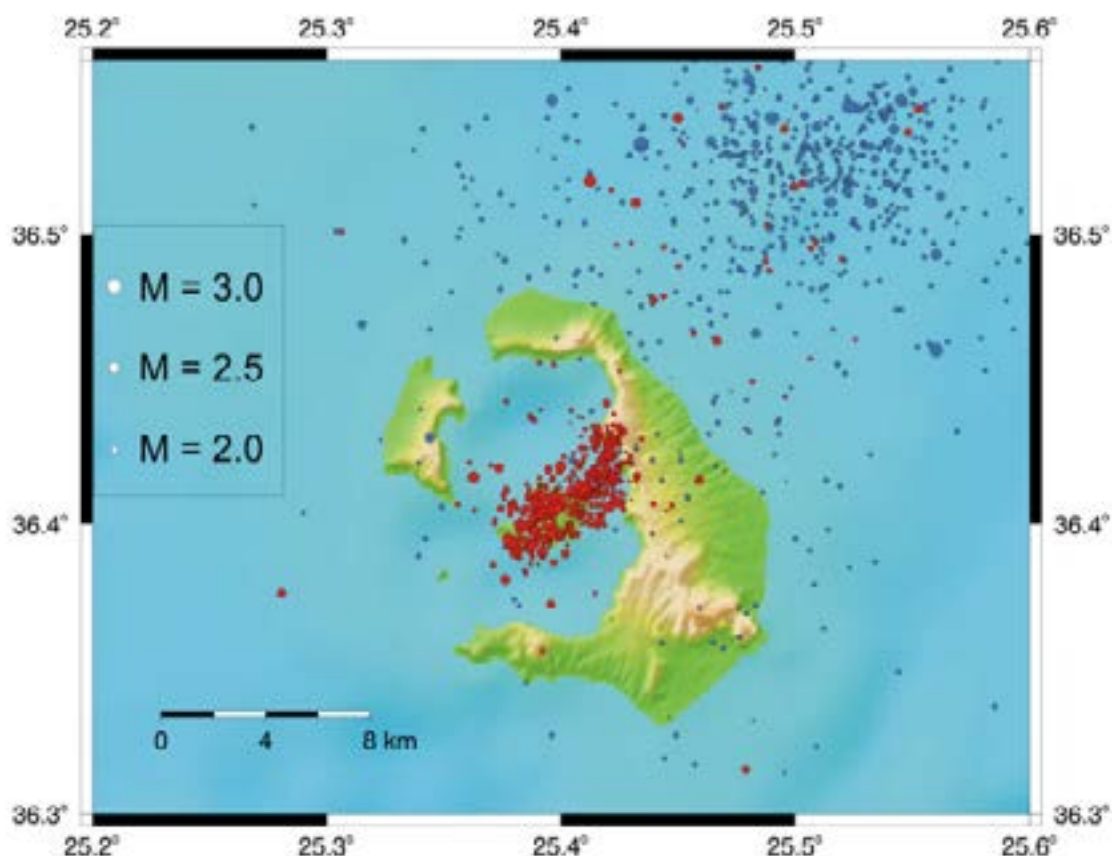
2012 κινείται κινείται βοριοανατολικά και έπειτα νότιοανατολικά εως νότιο-νοτιανατολικά. Στη κατακόρυφη συνιστώσα μετά την απότομη άνοδο του 2011-2012 κινείται ομαλά ανοδικά με μικρή ταχύτητα.



2.2.3 Απεικονίσεις

Αρχικά θα μελετηθούν οι μετακινήσεις των σταθμών σε σύγκριση τα προηγούμενα έτη όπου και είχε παρατηρηθεί η έντονη σεισμική δραστηριότητα καθώς και η σεισμική δραστηριότητα κατά τα έτη που αναλύθηκαν, ήτοι 2013-2015.

Στην εικόνα 28 (α) επάνω παρατηρείται η κατανομή των επίκεντρων στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνη-Κολούμπο. Οι κύκλοι με μπλε αντιπροσωπεύουν επίκεντρα για την περίοδο 2011-2012 (Paradimitriou et al 2012). Στην εικόνα 28 (β) το ιστόγραμμα των μηνιαίων σεισμικών γεγονότων ($M > 0.5$) μέσα στην καλδέρα της Σαντορίνης για την περίοδο 2011-2012. Αντίστοιχα, δημιουργήθηκαν διάφορα ιστογράμματα βασισμένα σε χάρτη επικέντρων για την περίοδο 2013-2014, που επιμελήθηκε ο κ. Παπαδημητρίου. απο το κατάλογο του Τομέα Γεωφυσικής & Γεωθερμίας (βλ. εικόνες 27-28 και 31-35).

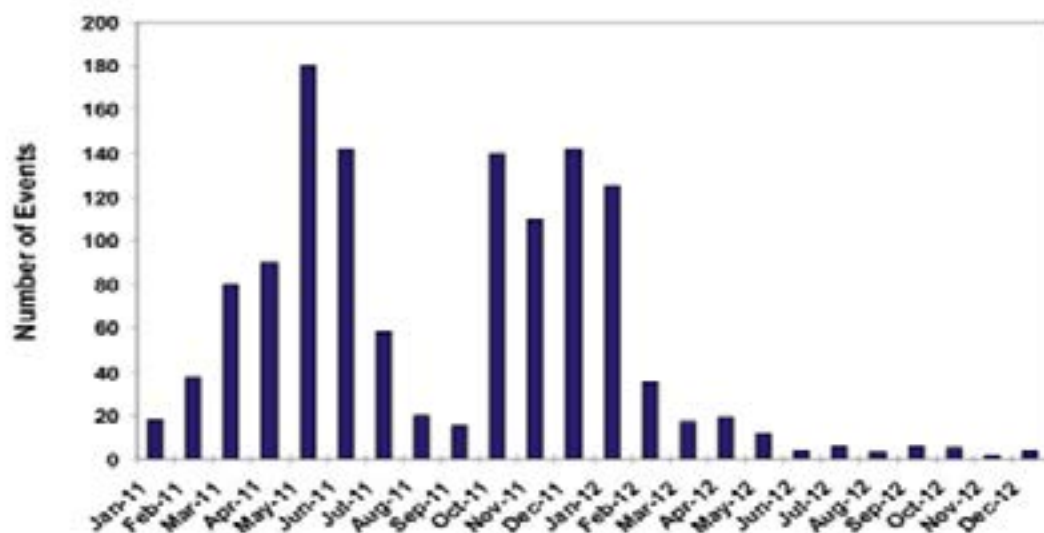


Εικόνα 28

(πάνω) κατανομή επικέντρων στη Σαντορίνη. Με μπλε και κόκκινους κύκλους τα επίκεντρα των σεισμών τη περίοδο 2011-2012 (Paradimitriou et al., 2012)

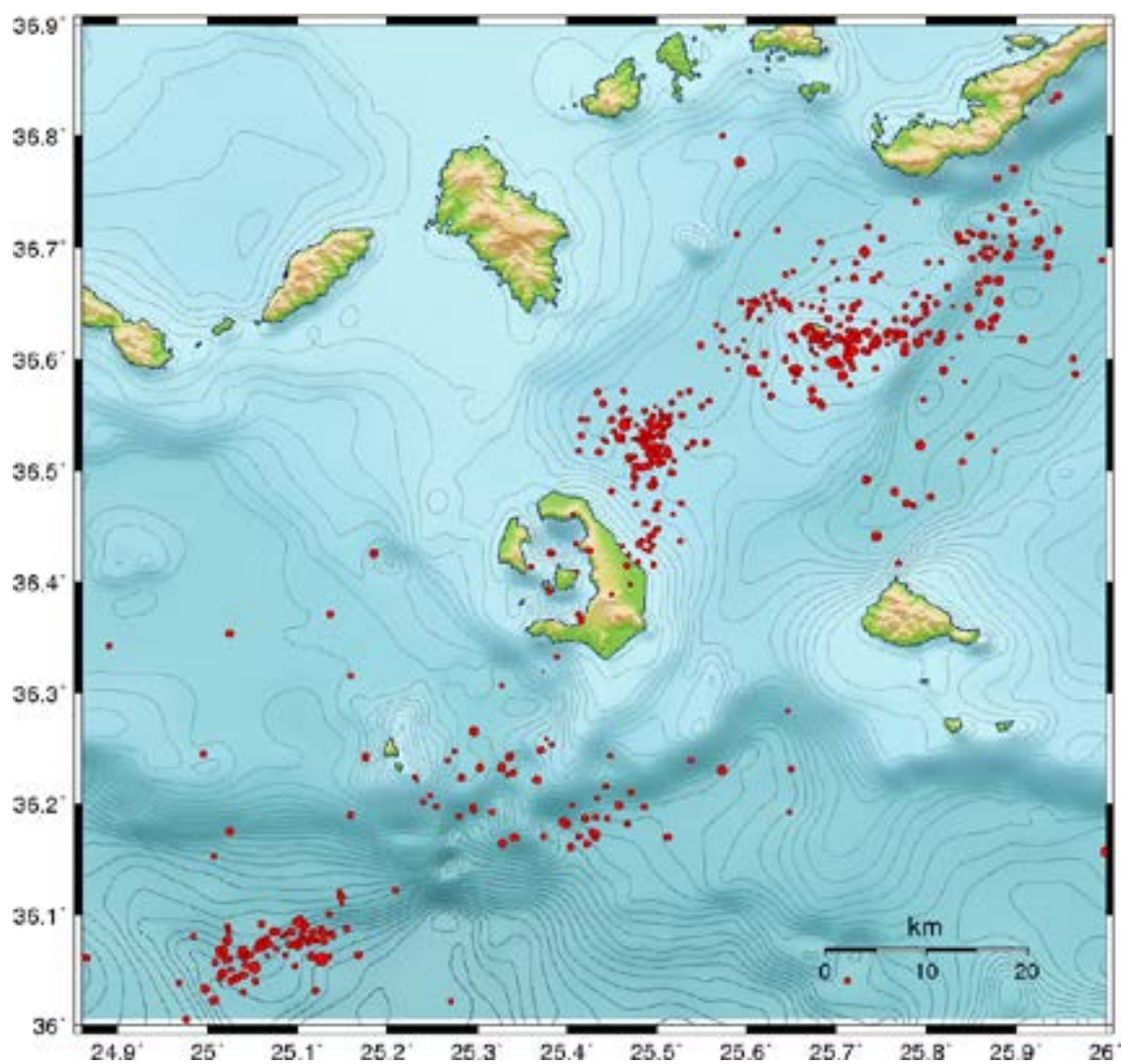
(κάτω) ιστόγραμμα σεισμικών γεγονότων στη καλδέρα της Σαντορίνης για τη περίοδο 2011-2012

b



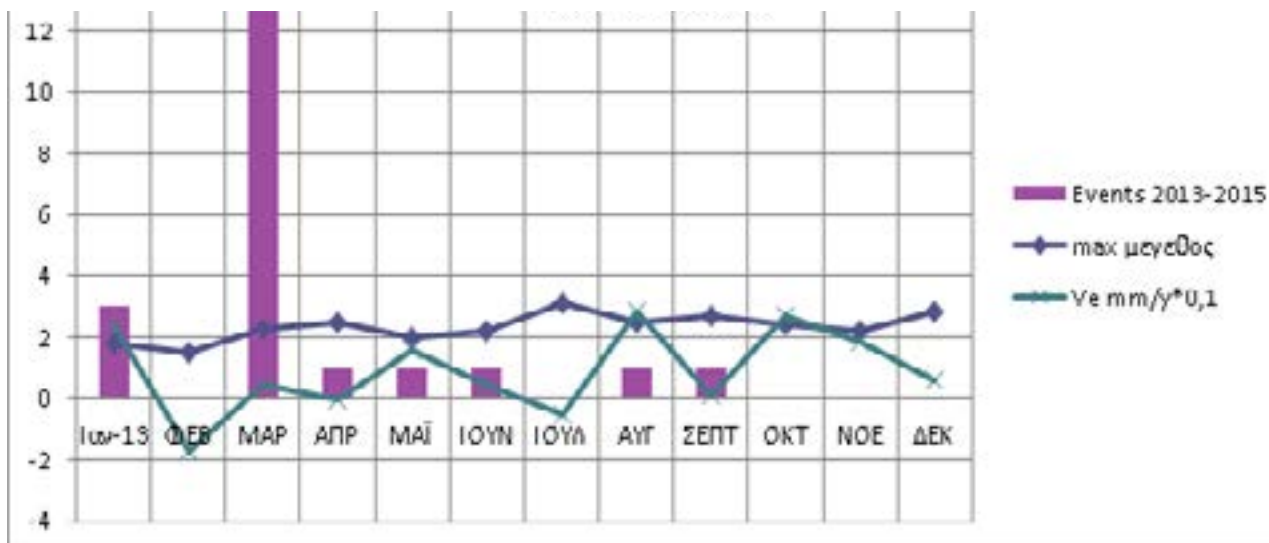
Εικόνα 29

Απεικόνιση μεγεθών, αριθμού σεισμικών γεγονότων και ταχύτητας του ετους 2013 (mm/year). Πίνακας απο δεδομένα του καταλόγου του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.



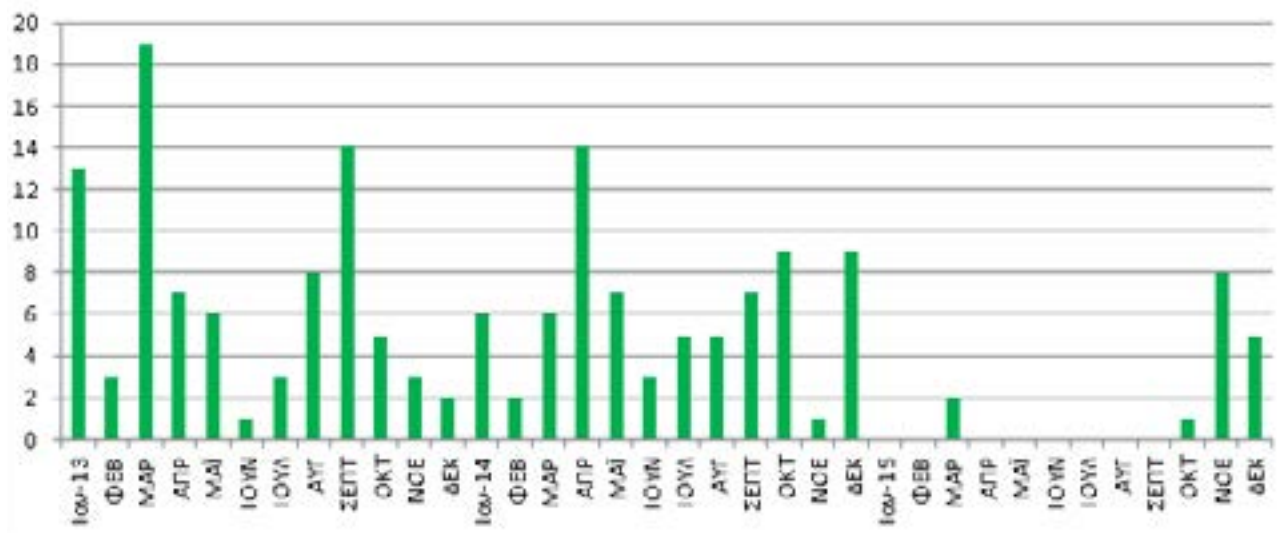
Εικόνα 33

Σεισμική δραστηριότητα της Σαντορίνης έτη 2013-2014. (Χάρτης από προσωπική επικοινωνία με κ. Παπαδημητρίου)



Εικόνα 34

Το ιστόγραμμα των μηνιαίων σεισμικών γεγονότων ($M > 0.5$) στη Σαντορίνη για την περίοδο 2008-2010. Απο δεδομένα του καταλόγου του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.

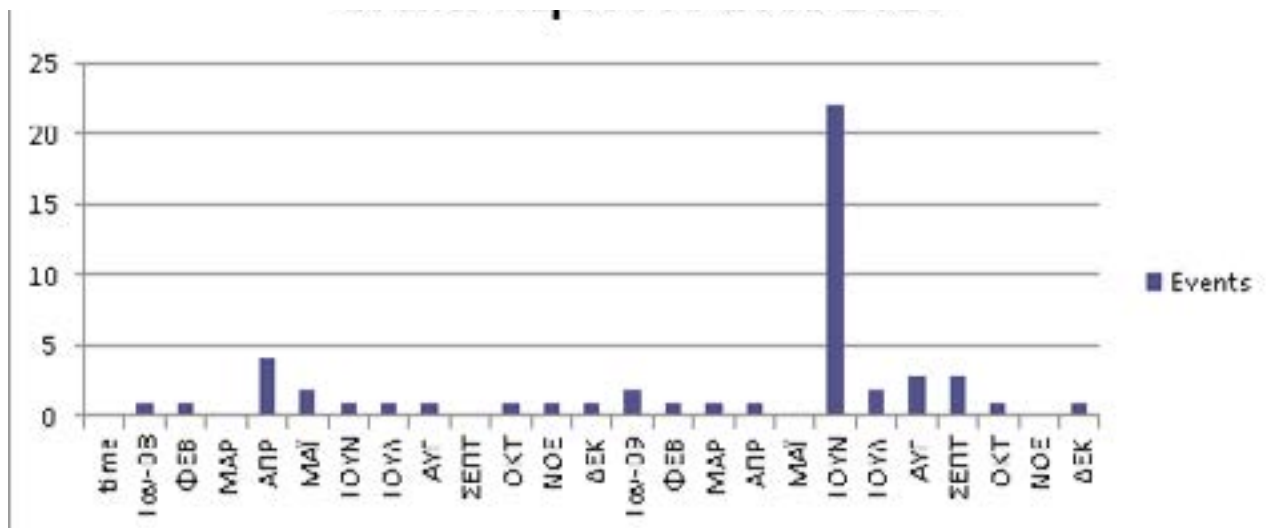


Εικόνα 35

Το ιστόγραμμα των μηνιαίων σεισμικών γεγονότων ($M > 0.5$) μέσα στην καλδέρα της Σαντορίνης αλλά και εκτός αυτής για την περίοδο 2013-2014 από δεδομένα του καταλόγου του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας

Στην εικόνα 33 οι κόκκινοι κύκλοι αντιπροσωπεύουν επίκεντρα σεισμών για την περίοδο 2013-2014. Παρατηρείται ότι ελάχιστοι σεισμοί έγιναν μέσα στην καλδέρα τα έτη 2013-2014 και επικρατεί μια έντονη δραστηριότητα στη περιοχή του Κολούμπο όπως για την πε-

ρίοδο 1990-2010. Πιστεύεται ότι η περιοχή της Σαντορίνης επέστρεψε στην προηγούμενη κατάσταση της, οπότε ενδιαφέρον θα έχει να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά των προηγούμενων ετών από την ‘κρίση’.



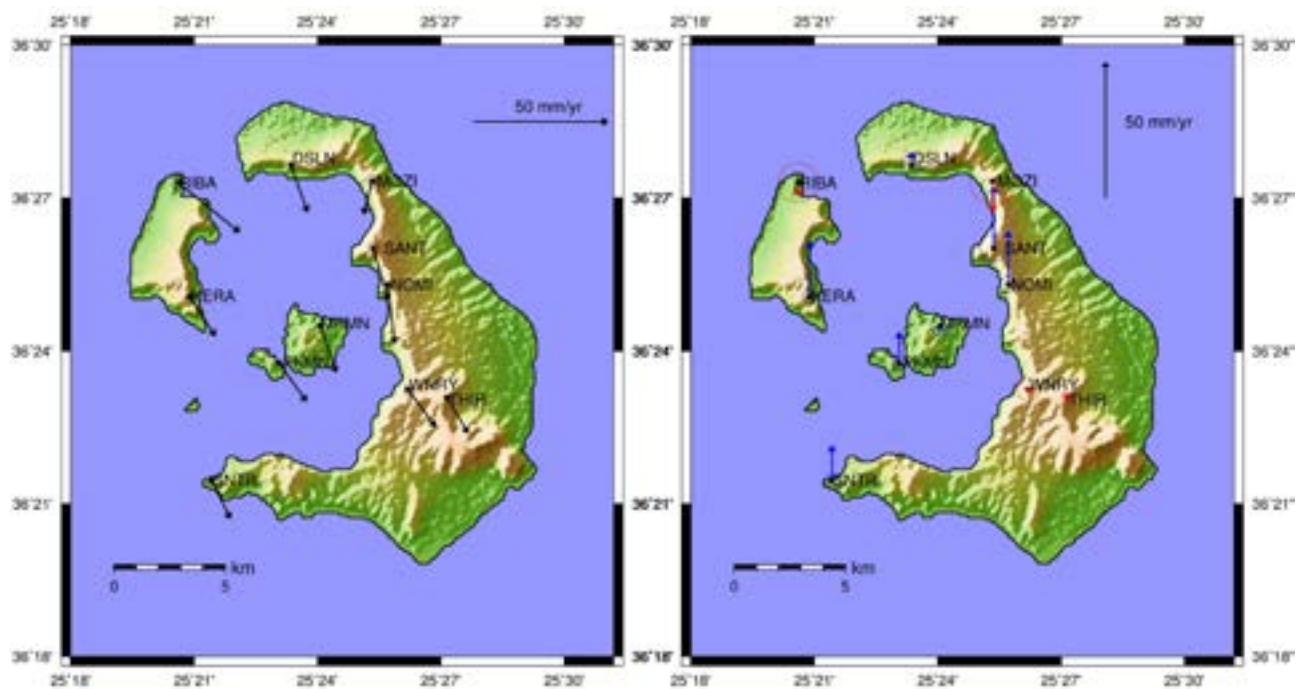
Εικόνα 36

Ιστογράμμοι σεισμικών γεγονότων κατά το έτος 2015, από δεδομένα του καταλόγου του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.

Στην εικόνα 37, παρουσιάζεται η κίνηση για ολόκληρο το έτος 2013 του συνόλου της Σαντορίνης, ήτοι Νοτιοανατολική κίνηση ως προς το κέντρο μάζας της Γης (ITRF2008). Παρατηρείται μια γενική ανύψωση στους σταθμούς της Παλαιάς και Νεας Καμένης και καθίζηση στα νοτιο ανατολικά, με τιμές που κυμαίνονται από 3-35 mm/yr. Κατά την ίδια περίοδο οι οριζόντιες μετατοπίσεις κυμαίνονται μεταξύ 20-35 mm/yr και κατεύθυνση νοτιοανατολικά. Η σεισμική δραστηριότητα είναι μικρή εκείνη τη περίοδο (μικροσεισμοί).

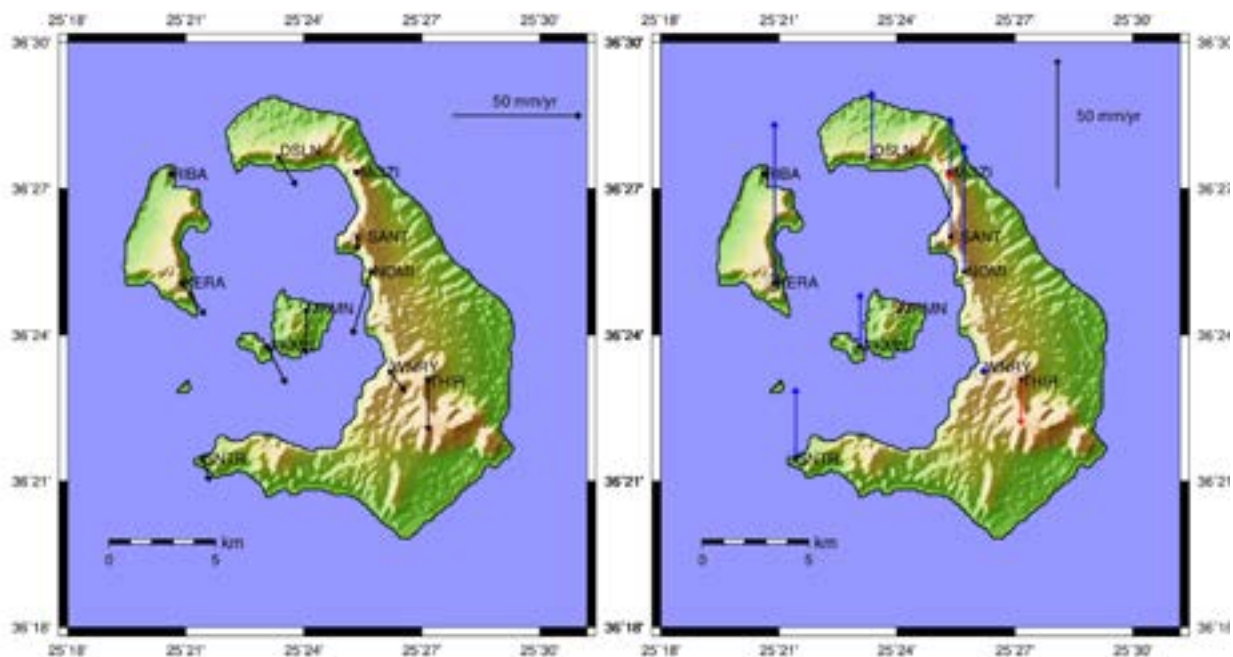
Στην εικόνα 38, (βλ. επόμενη σελίδα) απεικονίζεται η περίοδος Ιανουάριος-Μάρτιος 2013, στην οποία υπάρχει μεγάλη ανύψωση του νησιού, με τιμές που κυμαίνονται από 30-50mm/yr, εκτός του σταθμού THIR που εμφανίζει καθίζηση περί τα 10mm/yr.

Κατά τη περίοδο Απρίλιος-Ιούνιος 2013 (εικόνα 39) οι μετρήσεις έδειξαν μια καθίζηση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης και ανύψωση στο υπόλοιπο νησί, με τιμές που κυμαίνονται από 3-35 mm/yr. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις κυμαίνονται μεταξύ 30-50 mm/yr και κατεύθυνση νοτιοανατολικά με εξαίρεση το σταθμό MOZI, αλλά με αρκετό σφάλμα.

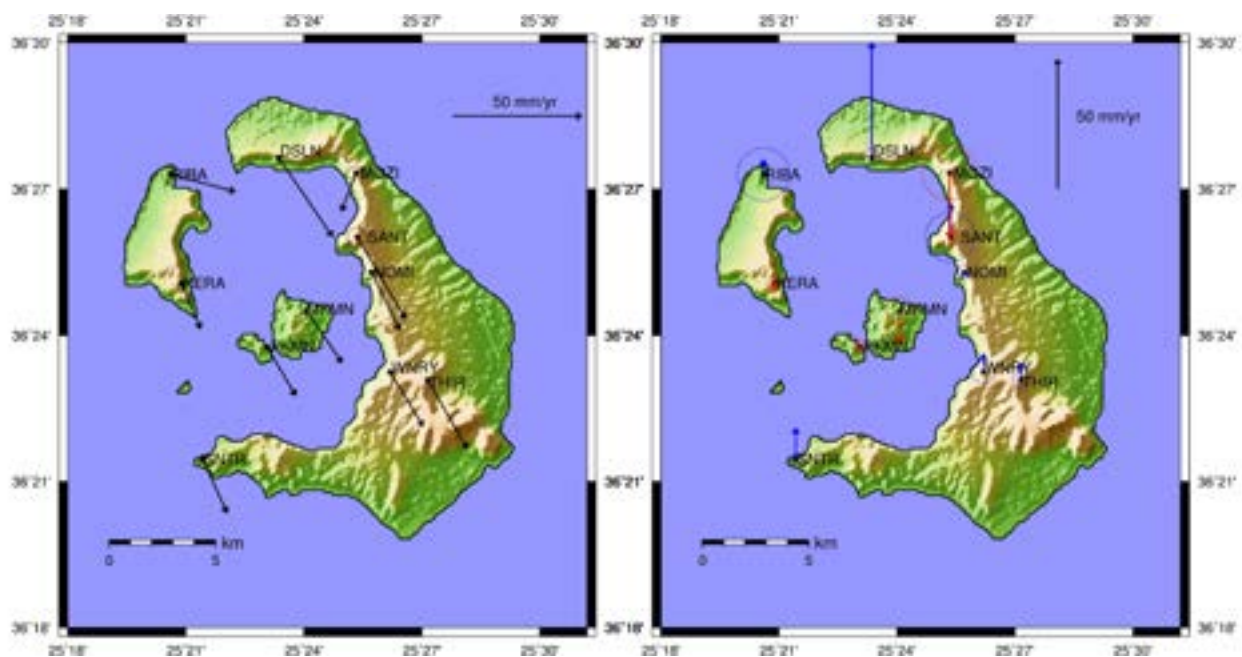


Εικόνα 37

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2013-12/2013



Εικόνα 38 Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2013-03/2013



Εικόνα 39

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 04/2013-06/2013

Στην εικόνα 40, απεικονίζεται η περίοδος Ιούλιος - Σεπτέμβριος του 2013. Παρατηρείται νότια νοτιοανατολική κίνηση του συνόλου της Σαντορίνης, σε ITRF2008. Καθίζηση στο βόρειο τμήμα του νησιού και του σταθμού THIR. Ο σταθμός WNRV έχει κατεύθυνση νότια. Καθίζηση στα βόρεια για τους DSLN και RIBA και του THIR (μικρή καθίζηση) στα νότιοανατολικά του νησιού, ωστόσο ο διπλανός σταθμός WNRV παρουσιάζει ανύψωση. Ανύψωση στο υπόλοιπο τμήμα της τάξης των 5-10mm/yr.

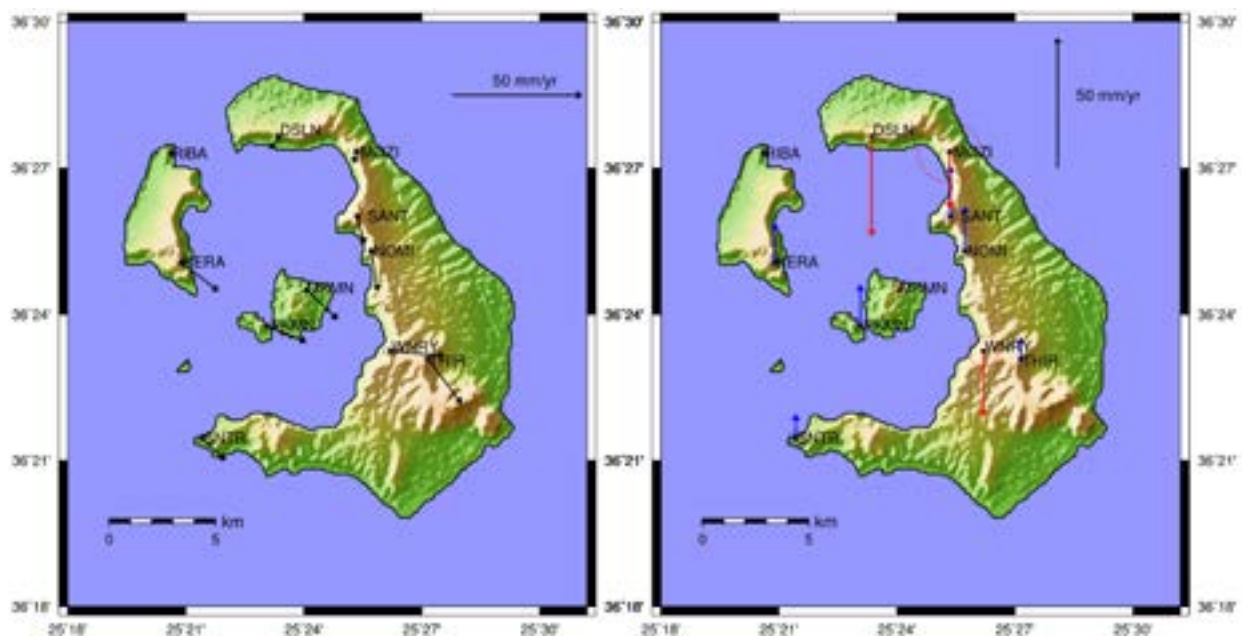


Εικόνα 40

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 07/2013-09/2013

Στην εικόνα 41 απεικονίζεται η περίοδος Οκτώβριος-Δεκέμβριος 2013. Παρατηρείται συνθετη κίνηση του συνόλου της Σαντορίνης σε ITRF2008, οι νότιοι σταθμοί ακολουθούν τη συνηθισμένη νοτιοανατολική κίνηση και οι σταθμοί του βόρειου τμήματος RIBA, DSLN και MOZI κινούνται νότια με μικρό άνυσμα. Ο σταθμός WNRΥ έχει κατεύθυνση ανατολικά. Καθίζηση στα βόρεια για το σταθμό DSLN αρκετά μεγάλη και για το σταθμό MOZI με ένα μεγάλο σφάλμα.

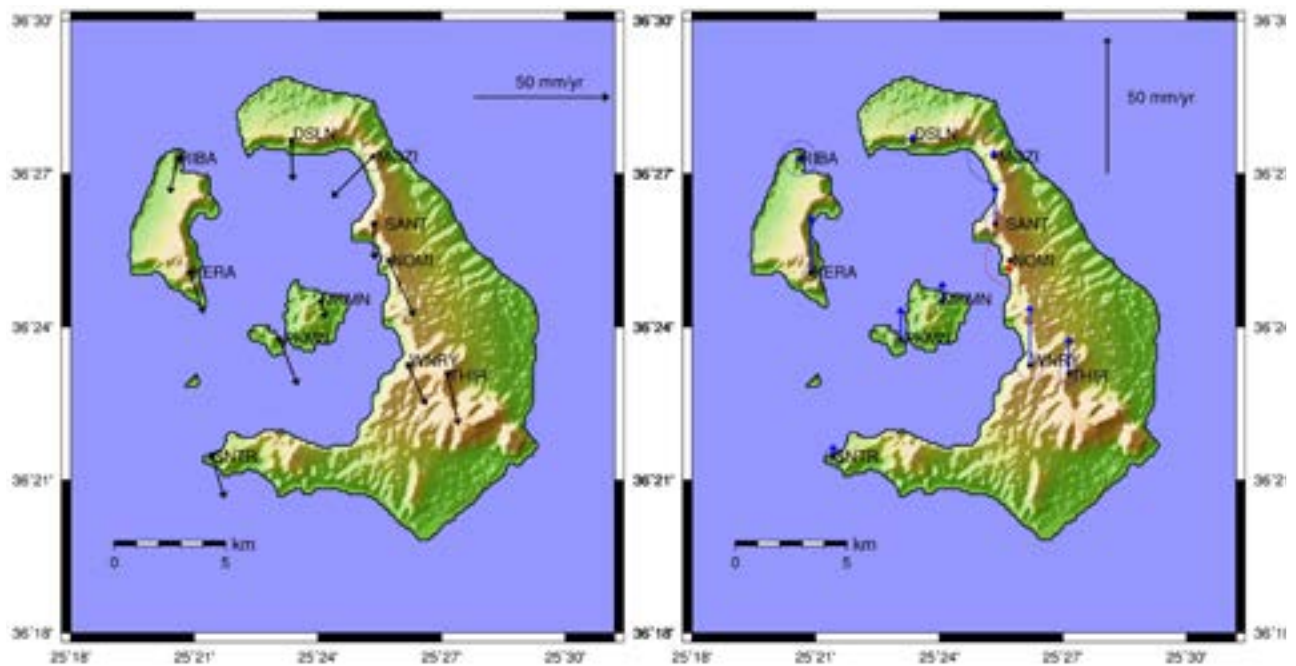
Επίσης ο WNRΥ εμφανίζει μια σημαντική καθίζηση στα νότιοανατολικά του νησιού, ωστόσο ο διπλάνος σταθμός THIR εδώ παρουσιάζει ανύψωση εν αντιθέση με το προηγούμενο τρίμηνο που έδειχνε να ανυψώνεται. Ανύψωση στο υπόλοιπο τμήμα της τάξης των 10-15mm/yr.



Εικόνα 41

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 10/2013-12/2013

Στην εικόνα 42 (βλ. σελ. 69) παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα της κίνησης της Σαντορίνης για το έτος 2014. Παρατηρείται μια νότια νοτιοανατολική κίνηση για τους περισσότερους σταθμούς της Σαντορίνης ως προς ITRF2008, με εξαίρεση τους σταθμούς MOZI που κινείται νότια και του σταθμού RIBA που κινείται δυτικά νοτιοδυτικά. Μικρές ανυψώσεις για τους περισσότερους σταθμούς και καθιζήσεις για τον SANT και NOMI της τάξης των 1-5mm/yr.

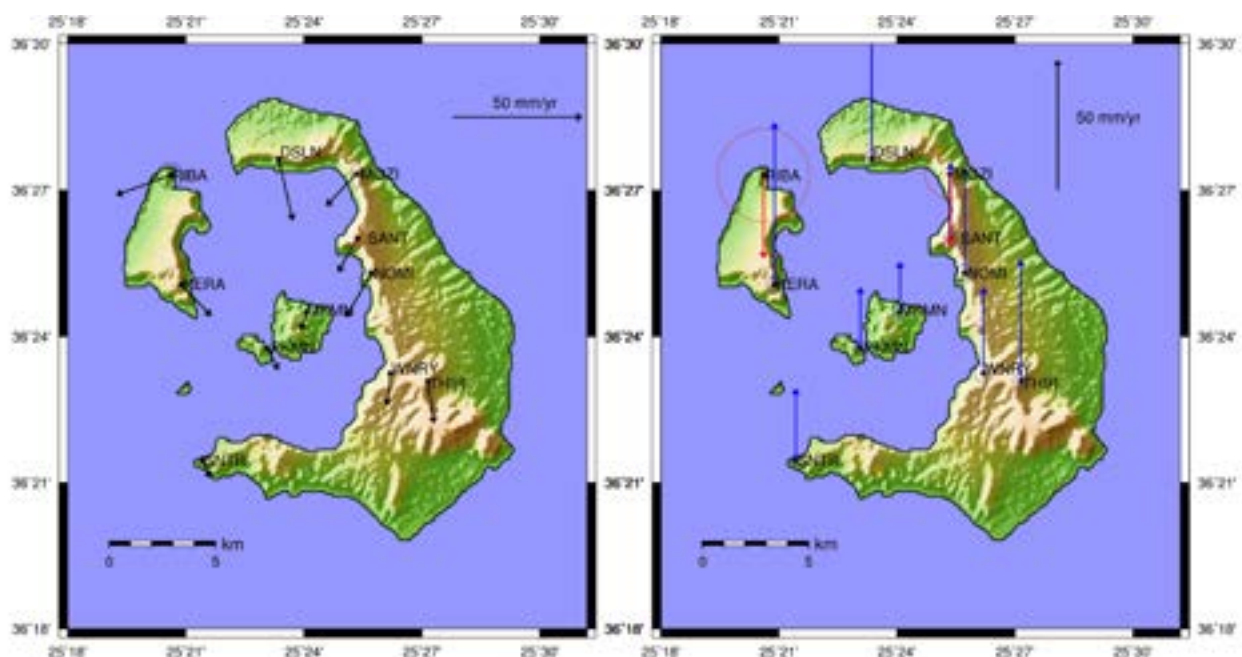


Εικόνα 42

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2014-12/2014

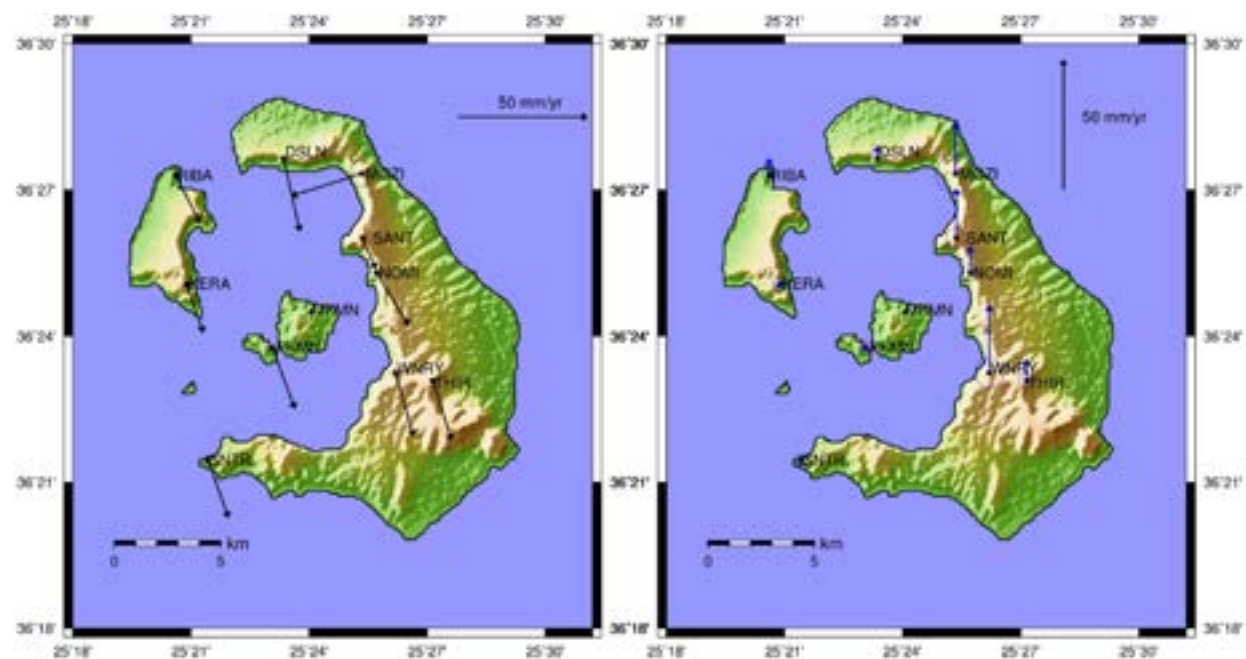
Στην εικόνα 43, παρατηρείται το πρώτο τρίμηνο του έτους 2014. Καθιζήσεις και ανυψώσεις με μεγάλο σφάλματα παρατηρούνται καθολικά στο νησί. Γενική νοτιοανατολική κίνηση. Η μικροσεισμική δραστηριότητα πιθανόν και να δικαιολογεί αυτήν την κίνηση. Ο σταθμός RIBA φαίνεται να κινείται δυτικά και παρουσιάζει καθίζηση, πιθανόν να επηρεάζεται απο κάποιες τοπικές δομές.

Στην εικόνα 44, παρατηρείται το δεύτερο τρίμηνο του 2014. Παρατηρείται κίνηση ανατολική κίνηση του συνόλου της Σαντορίνης σε ITRF2008 ωστόσο αυξάνονται οι ταχύτητες των σταθμών. Ο σταθμός MOZI παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα, πιθανότατα λόγω των λίγων μετρήσεων τη συγκεκριμένη περίοδο γεγονός που οδήγησε σε ιδιαίτερα προβλήματα επίλυσης και διότι βρίσκεται σε ζώνη έντονων παραμορφώσεων και πιθανόν να δικαιολογεί τη κίνηση του παρουσιάζει τετοια απόκλιση. Μικρή ανύψωση καθολικά στο νησί.



Εικόνα 43

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2014-04/2014



Εικόνα 44

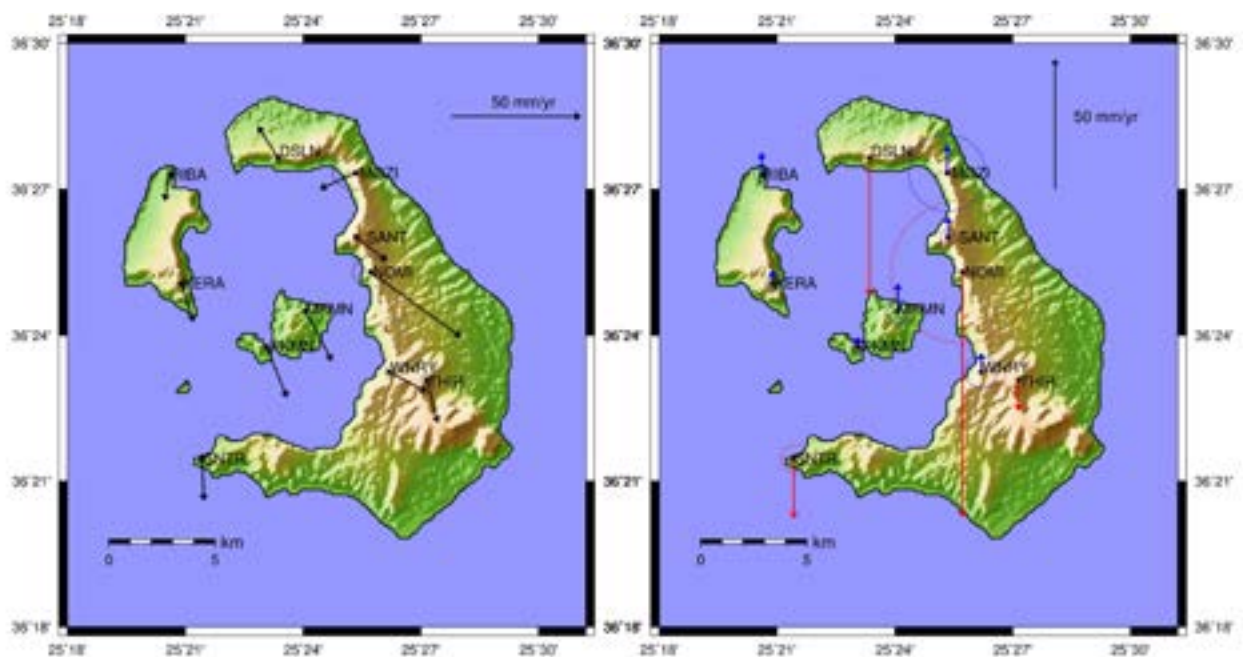
Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 04/2014-06/2014

Στην εικόνα 45, παρατηρείται το τρίτο τρίμηνο του έτους 2014. Νοτια νοτιοανατολική κίνηση. Μεγάλη καθίζηση για το DSLN Οι σταθμοί MOZI και DSLN παρουσιάζουν σημαντικό σφάλμα.



Εικόνα 45

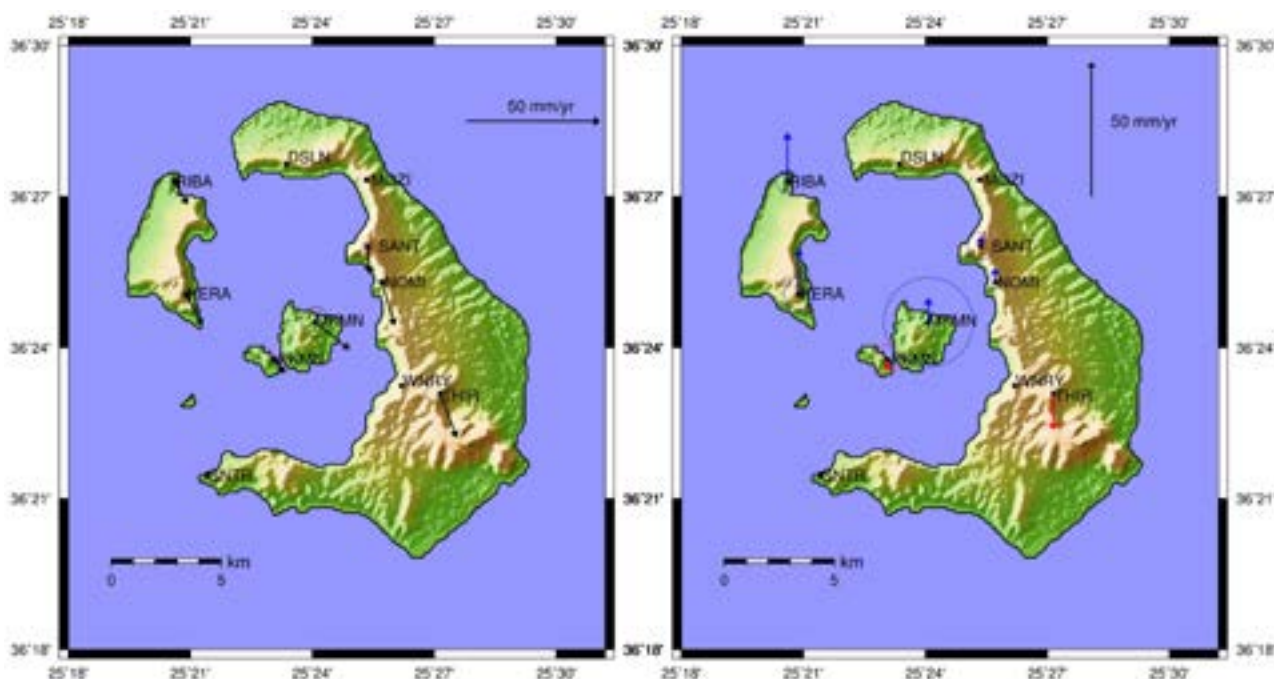
Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 07/2014-09/2014



Εικόνα 46

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 10/2014-12/2014

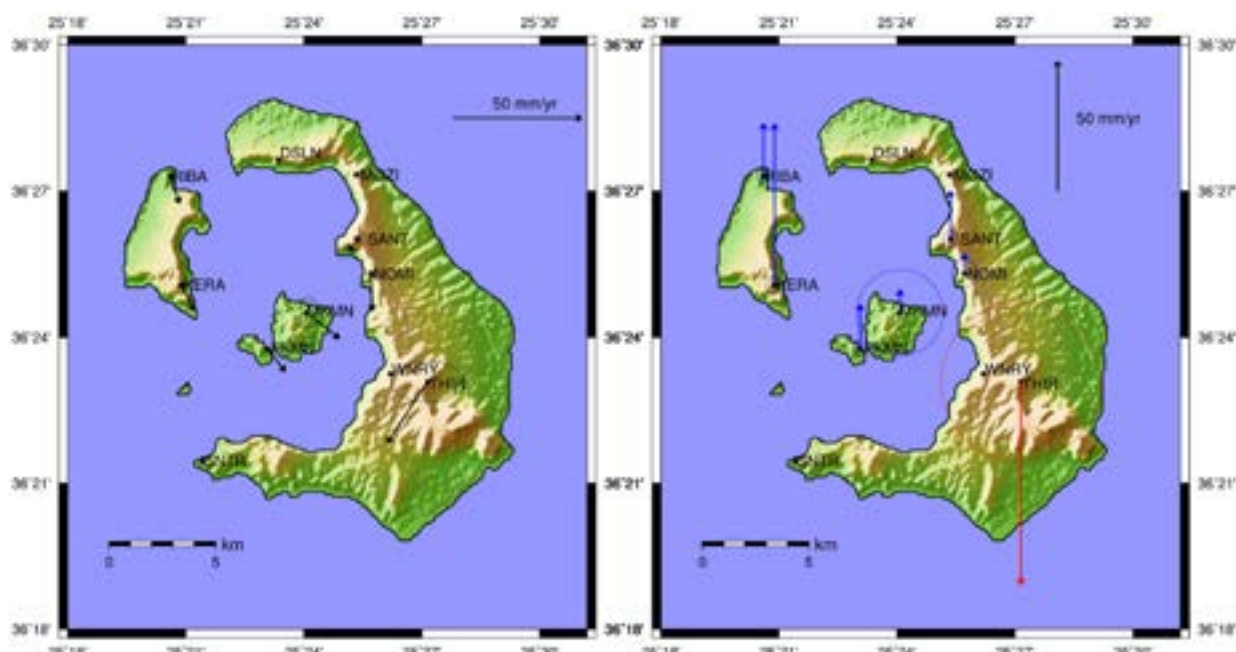
Στην εικόνα 46, παρατηρείται νοτιοανατολική κίνηση του συνόλου της Σαντορίνης, σε ITRF2008, εκτός του σταθμού MOZI ξανά. Να σημειωθεί ότι, ο σταθμός NOMI παρουσιάζει τεράστια καθίζηση με επίσης τεράστιο σφάλμα και καλό θα ήταν να παραβλεφθεί.



Εικόνα 47

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2015-12/2015

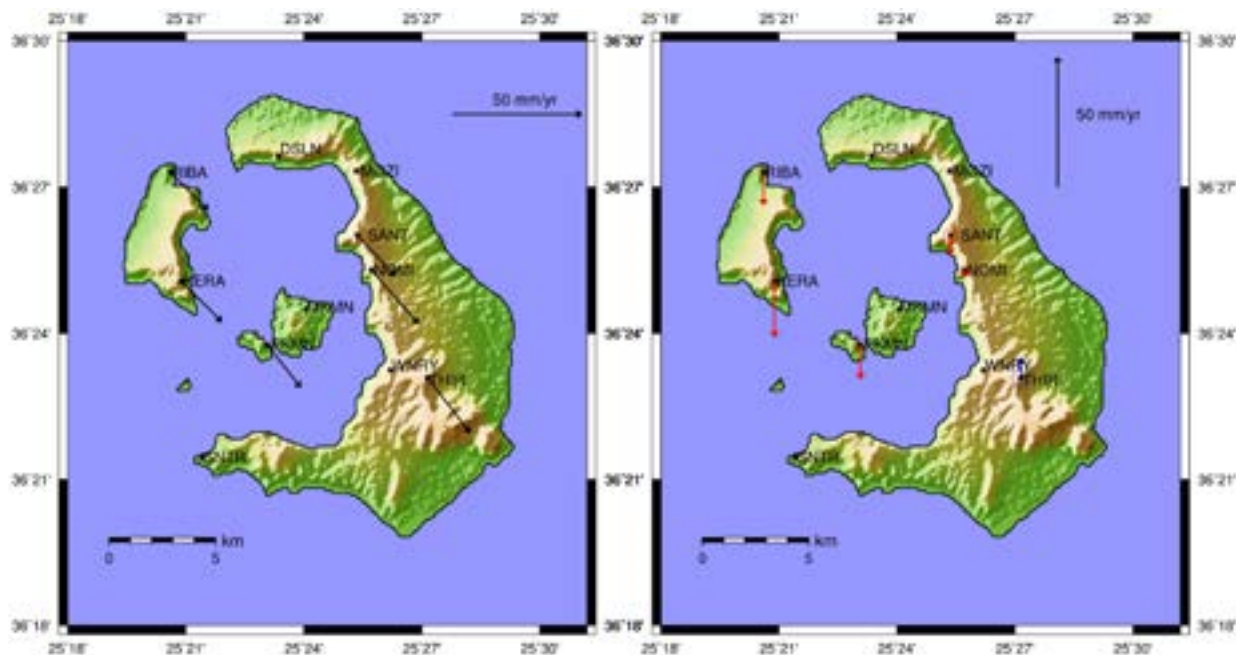
Στην εικόνα 47, απεικονίζεται η συνολική κίνηση για το έτος 2015. Παρατηρείται η χαρακτηριστική νότιο-νοτιοανατολική κίνηση της Σαντορίνης, σε σχέση με ITRF2008, αν και οι μετρήσεις είναι λιγότερες από τα προηγούμενα έτη. Παρατηρείται επίσης μια μικρή ανύψωση, μικρότερη των 10mm, στο βόρειο τμήμα του νησιού και μια ανύψωση στη Νέα Καμένη και το σταθμό MKMN. Καθίζηση για το σταθμό THIR.



Εικόνα 48

Γραφική απεικόνιση για την περίοδο 01/2015-03/2015

Στην εικόνα 48, παρουσιάζεται η απεικόνιση για την περίοδο 01/2015-03/2015 η χαρακτηριστική Νοτιοανατολική κίνηση της Σαντορίνης, σε σχέση πάντα με το κεντρο μάζας, εκτός του σταθμού THIR. Παρατηρείται μια σημαντική ανύψωση στη Θηρασιά και τη Νέα Καμένη. Το μεγάλο σφάλμα για το σταθμό THIR δε μπορεί να ληφθεί σοβαρά υποψιν, μάλλον οφείλεται σε προβλήματα του σταθμού ή ιονοσφαιρικών παρεμβολών που εμφανίστηκαν εκείνη τη περίοδο.

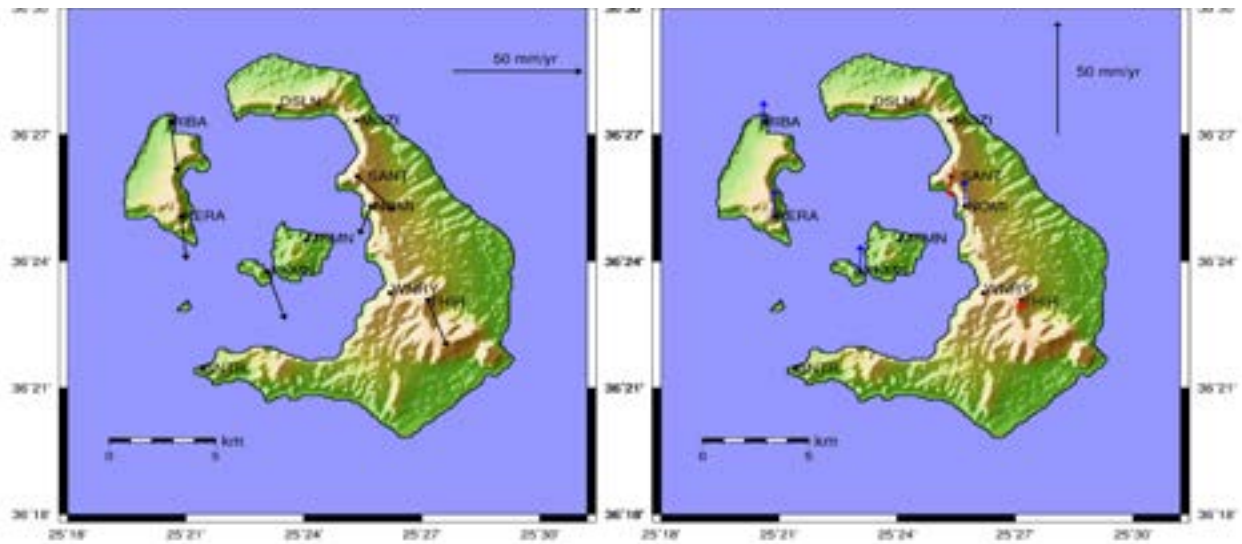


Εικόνα 49

Απεικόνιση για την περίοδο 04/2015-06/2015

Στην εικόνα 49, παρουσιάζεται η περίοδος Απρίλιος -Ιούνιος 2015 . Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα για το 2015 ήταν ελλιπή. Εμφανίζεται κίνηση νοτιοανατολική ως προς το κέντρο μάζας της Γης. Παρατηρείται καθίζηση γενικά στο νησί, εκτος του σταθμου THIR οποίος αυτή τη περίοδο δείχνει να ανυψώνεται.

Στην εικόνα 50, παρουσιάζεται η Ιούλιος-Σεπτέμβριος 2015 και παρατηρείται η χαρακτηριστική νοτιο-νοτιοανατολική κίνηση της Σαντορίνης, ως προς ITRF2008 με εξαίρεση το σταθμό NOMI. Παρατηρείται ακόμα καθίζηση στους σταθμούς THIR (μικρής τάξης) και SANT.



Εικόνα 50

Απεικόνιση για την περίοδο 07/2015-09/2015



Εικόνα 51

Απεικόνιση για την περίοδο 10/2015-12/2015

Στην εικόνα 51, παρατηρείται μια σύνθετη κίνηση του συνόλου της Σαντορίνης ως προς ITRF2008. Ο σταθμός PKMN παρουσιάζει μια στροφή βορειοδυτικά καθώς και μεγάλη καθίζηση ωστόσο με μεγάλο σφάλμα. Ο RIBA επίσης περιστρέφεται βόρεια και δείχνει να ανυψώνεται πολύ αλλά φυσικά έχει σφάλμα στις μετρήσεις και ο σταθμός SANT γυρίζει τελείως δυτικά. Ο σταθμός KERA εμφανίζει σφάλμα στην κατακόρυφη συνιστώσα που τον φέρει να ανυψώνεται.

3. Συζήτηση

Η μέθοδος GPS αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης σε διάφορα ηφαιστειακά κέντρα. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα του συστήματος της Σαντορίνης, όπως είναι αναμενόμενο, συνδέεται με την παραμόρφωση του εδάφους, όπως η ανύψωση και καθίζηση.

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι η περίοδος από το 1950 μέχρι το 2011 αναφέρεται σαν «ανενεργή φάση», ενώ την περίοδο που ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2011 ως ενεργή φάση του ηφαιστείου. Εκείνη την περίοδο μια σημαντική παραμόρφωση με ρυθμό άνω των 100 χιλ/έτος παρατηρήθηκε στο βόρειο τμήμα της καλδέρας και συνδέεται με την εισροή μάγματος, που έχει προσομοιωθεί ως πηγή Mogi περίπου 2 χλμ βόρεια της Νέας Καμένης και σε βάθος μικρότερη από 5 km. Το μοντέλο Mogi [1958] υπολογίζει μια αναλυτική λύση για την επιφάνεια παραμόρφωσης που οφείλεται σε μια σημειακή πηγή σε ένα ελαστικό ημι-χώρο.

Οι Lagios et al. (2013) αναφέρουν για την περίοδο 1994-2005 μια γενική κίνηση νότια νοτιοδυτικά (SSE, περίπου 154° N) και πλάτος περίπου 20 mm / year των διανυσμάτων της ταχύτητας σε σχέση με ITRF2008, για όλους τους σταθμούς GPS. Αυτή η ταχύτητα θα μπορούσε επίσης να αντιπροσωπεύει τη παραμόρφωση μέχρι το 2010. (βλ. εικόνα 44)

Κατά τη διάρκεια της περιόδου 1994-2005 διαπιστώθηκε καθίζηση στην περιοχή των νησιών Παλαιά και Νέα Καμένη τουλάχιστον 45 mm, καθώς επίσης του ΝΔ τμήματος της Θήρας και γύρω από την περιοχή του Φάρου καθίζηση περί 20 χιλιοστά.

Το ηφαιστειακό οικοδόμημα της Σαντορίνης κυριαρχείται από ένα ενεργό επεκτεινόμενο καθεστώς (Parazachos & Kiratzi 1996) που φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από τα χαρακτηριστικά των τεκτονικών χαρακτηριστικών διαρρήξεων (γραμμές Καμένη & Κολούμπο) που σε μεγάλο βαθμό συνέβαλαν στην παρατηρούμενη καθίζηση και ανύψωση της περιοχής.

Η ανύψωση που παρατηρείται για τους σταθμούς στην Θηρασιά και την καθίζηση που παρατηρείται γενικά στη Νέα Καμένη έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση μήκους του baseline μεταξύ των σταθμών αυτών των περιοχών με 26- 30 mm (± 10 mm). Αυτό συμφωνεί με προηγούμενες EDM εργασίες Stiros et al. (2005) για την ίδια περιοχή μεταξύ Θηρασιάς και Νέας Καμένης.

Η αλλαγή της κατεύθυνσης της οριζόντιας συνιστώσας όλων των σταθμών στο βόρειο τμήμα της Θήρας θα πρέπει να έχουν επηρεαστεί από την παρουσία της ρηξιγενούς ζώνης Κολούμπο, γεγονός που υποδηλώνει μια σημαντική τεκτονική συνιστώσα, διαφοροποιώντας τις μετατοπίσεις κατά μήκος αυτής της ζώνης.

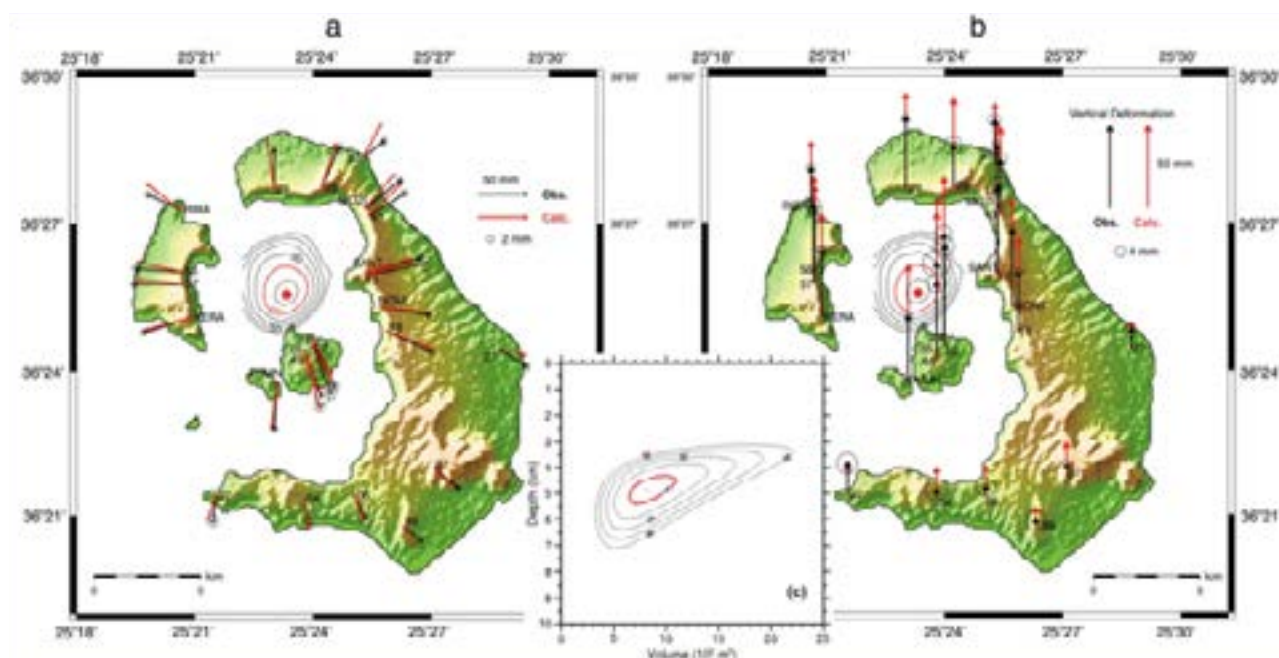
Η ανύψωση που παρατηρείται γενικά στο μισό βόρειο τμήμα της Θήρας είναι συνεπής με

τις προηγούμενες μικροβαρυτομετρικές μελέτες (Lagios, 1995), όπου αυτή η περιοχή έχει δείξει μια ανοδική τάση για την περίοδο 1984-1991.

Τον Ιανουάριο λοιπόν του 2011, μια νέα φάση της αναταραχής άρχισε στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, χαρακτηρίζεται έντονη μικροσεισμική δραστηριότητα που επικεντρώθηκε κατά μήκος της γραμμής Καμένης, καθώς και εντός της καλδέρας, με κύρια χαρακτηριστικά το σχετικά μικρό μέγεθος (ρηχή σεισμική δραστηριότητα του σεισμού μεγέθη που κυμαίνονται μεταξύ $1,0 < M < 3.2$ (Chouliaras et al 2012, Newman κ.ά., 2012, Papadimitriou et al, 2012, Papazachos et al., 2012 με μέγιστο $ML = 3,5$) και το μικρό βάθος (με μέγιστο βάθος τα 10km), με τα επίκεντρα τους να τοποθετούνται μεταξύ της Παλαιάς και της Νέας Καμένης. Η επικρατέστερη άποψη είναι ότι η παραμόρφωση και σεισμικότητα προκλήθηκαν από την άνοδο μαγματικού υλικού σε δύο ηφαιστειακά κέντρα και όχι ένα όπως είχε αρχικά προταθεί. Ειδικότερα, το πρώτο και μεγαλύτερο ηφαιστειακό κέντρο λειτούργησε πάνω στη γραμμή της Καμένης (στην περιοχή της Νέας Καμένης), ενώ το μικρότερο στην περιοχή της γραμμής του Κολούμπο, στο βόρειο τμήμα της καλδέρας.

Εικόνα 52

Μοντέλο για την εύρεση του σημείου Mogi (ηφαιστειακό κέντρο), μετρήσεις GPS όπως παρατηρήθηκαν (μαύρα βέλη) και όπως υπολογίστηκαν (κόκκινα βέλη) της περιόδου Sept. 2011 to June 2012 for (a) οριζόντια and (b) κατακόρυφη συνιστώσα. Η κόκκινη βούλα δείχνει το βέλτιστο σημείο Mogi source. Το διάγραμμα (c) δεί-



χνει μεταξύ βάθους και όγκου την καλύτερη λύση. Εικόνα από το 'SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications' των E. Lagios a , V. Sakkas a, F. Novali b, F. Bellotti b, A. Ferretti b, K. Vlachou a, V. Dietrich.

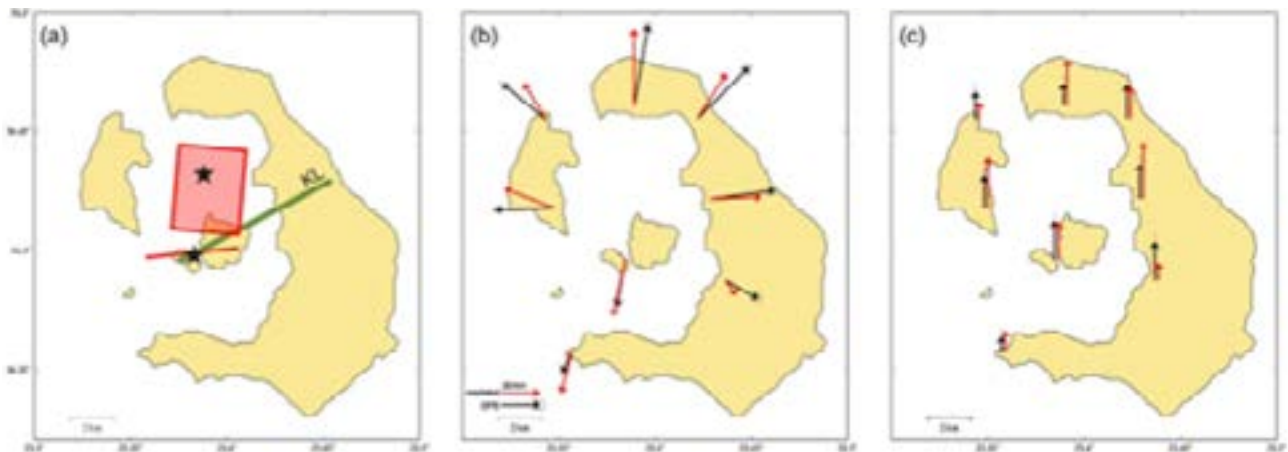
Όπως έχει ήδη ειπωθεί, οι Newman et al., 2012 αρχικά πρότειναν ότι υπάρχει ένα ηφαιστει-

ακό κέντρο στην καλδέρα της Σαντορίνης, όμως οι Saltogianni, Stiros et al (2014)¹ μιλούν για 2 Mogi sources, το ένα σημείο δυτικά, νότιο –δυτικά της Θηρασίας και το άλλο δυτικά της Καμένης. (βλ. εικόνα 53.)

Το ίδιο επισημαίνουν και οι Foumelis et al., 2013; Lagios et al., 2013; Papoutsis et al., 2013 σε δική τους αναφορά για την περίοδο της αναταραχής. Quote: “*This may explain also why all investigators of the recent unrest of Santorini on the basis of deformation data were practically confined to Mogi sources*”.

Εικόνα 53

Τοποθεσίες των 2 Mogi sources σύμφωνα με το paper Time-space modeling of the dynamics of Santorini volcano (Greece) during the 2011–2012 unrest των Vasso Saltogianni, Stathis C. Stiros, Andrew V. Newman,



Kelly Flanagan and Fanis Moschas

Η παρούσα όμως εργασία επικεντρώνεται στο τι έγινε από το 2011 και μετά.

Στην περιοχή μελέτης για το έτος 2013 οι μετρήσεις εμφανίζουν μια γενική ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης, και καθίζηση στο υπόλοιπο νησί, με τιμές που κυμαίνονται από 3-35 mm. Κατά την ίδια περίοδο, οι οριζόντιες μετατοπίσεις κυμαίνονται μεταξύ 20-35 mm και κατεύθυνση Νοτιοανατολικά σε σχέση με ITRF2008. Η σεισμική δραστηριότητα είναι μικρή εκείνη την περίοδο με μικροσεισμούς που δεν αποκλείεται να προέρχονται από μετακίνηση ή και διάχυση του μάγματος εντός της καλδέρας.

Για το έτος 2014 οι μετρήσεις εμφανίζουν μια παρόμοια αν και εμφανώς μικρότερη ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολούμπο και Καμένης, και του συνόλου του νησιού με εξαίρεση το σταθμό NOMI, με τιμές που κυμαίνεται από 5-20 mm. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις του έτους 2014 κυμαίνονται μεταξύ 20-25 mm, και κατεύθυνση νοτιοανατολικά σε σχέση με ITRF2008, εκτός του σταθμού MOZI ο οποίος βρίσκεται πάνω στη γραμμή του Κολούμπο, η μικροσεισμική δραστηριότητα του Κολούμπο ήταν έντονη, 48 σεισμοί, με μέγιστο μέγεθος 2,8 και μέγιστο βάθος 29,1Km (βλ. εικόνα 54) και έδειξε ΝΔ μετακίνηση, καθώς και ο σταθμός SANT να επηρεάστηκε επίσης. Πιθανόν στον ίδιο λόγο να οφείλεται και η μετακίνηση

1 «Time-space modeling of the dynamics of Santorini volcano (Greece) during the 2011–2012 unrest»

του σταθμού Kera.



Εικόνα 54

Ιστογράμμο μεγέθους βάθους των σεισμών που έγιναν κατά το έτος 2014 στη περιοχή του Κολουμπο

Για το έτος 2015 δε προκύπτουν ιδιαίτερα συμπεράσματα καθώς οι ελλείψεις μετρήσεις καθιστούν δύσκολη την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ωστόσο σε γενικές γραμμές εμφανίζονται παρόμοιες οριζόντιες μετατοπίσεις που κυμαίνονται από 5-20 mm, με κατεύθυνση νοτιοδυτικά σε σχέση ως προς ITRF 2008 και ανύψωση κατά μήκος των γραμμών Κολουμπο και Καμένης του νότιου τμήματος και καθίζηση της Παλαιάς Καμένης (PKMN), πιθανόν και της Νέας, καθώς η ανύψωση που εμφανίζεται έχει μεγάλο σφάλμα. Σημαντικό ίσως αποτέλεσμα είναι αυτό του σταθμού WNRΥ να παρουσιάζει σημαντική ανύψωση στο τέλος του 2015.

Συνοπτικά η κίνηση του νησιού κατά τη περίοδο μελέτης 2013-2015 φαίνεται να επανέρχεται στην κατάσταση που είχε και πριν την κρίση του 2011-12, με μια γενική κίνηση νότια νοτιοανατολική, με ανύψωση σε γενικές γραμμές του νησιού και ιδιαιτέρως του σταθμού WNRΥ να παρουσιάζει σημαντική ανύψωση στο τέλος του 2015, και καθίζηση των νησιών Παλαιά και Νέα Καμένη. Ωστόσο ο σταθμός ΜΟΖΙ δείχνει να περιστρέφεται ίσως λόγω της θέσης του, βρίσκεται πάνω σε ζώνη εντονών παραμορφώσεων και ίσως επηρεάζεται από το ηφαίστειο του Κολουμπο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.

Παράδειγμα log σταθμού WTZR

NETWORK & DATA > STATION LIST > WTZR > **wtzr_20141104.log**

WTZR Site Information Form (site log)

International GNSS Service

1. Site Identification of the GNSS Monument

Site Name : Wettzell / Germany
Four Character ID : WTZR
Monument Inscription : Pillar 1202
IERS DOMES Number : 14201M010
CDP Number : (A4)
Monument Description : STEEL PLATE ON CONCRETE SURVEY TOWER
Height of the Monument : 0.8 m
Monument Foundation : SCREW ANCHORED TO CONCRETE SURVEY TOWER
Foundation Depth : (m)
Marker Description : STEEL REFERENCE SURVEY MARKER 1202
Date Installed : 1995-02-09T00:00Z
Geologic Characteristic : Bedrock
Bedrock Type : (IGNEOUS/METAMORPHIC/SEDIMENTARY)
Bedrock Condition : WEATHERED
Fracture Spacing : (0 cm/1-10 cm/11-50 cm/51-200 cm/over 200 cm)
Fault zones nearby : NO
Distance/activity : (multiple lines)

2. Site Location Information

City or Town : Bad Koetzing
State or Province : Bavaria
Country : Germany
Tectonic Plate : EURASIAN
Approximate Position (ITRF)
X coordinate (m) : 4075580.6852
Y coordinate (m) : 931853.6596
Z coordinate (m) : 4801568.0542
Latitude (N is +) : +490839.11
Longitude (E is +) : +0125244.07

Elevation (m,ellips.) : 666.0

Additional Information : (multiple lines)

3. GNSS Receiver Information

Receiver Type : LEICA GR25
Satellite System : GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS
Serial Number : 1831022
Firmware Version : 3.11.1639/6.403
Elevation Cutoff Setting : 0 deg

Date Installed : 2014-11-03T10:30Z

Date Removed : CCYY-MM-DDThh:mmZ

Temperature Stabiliz. : (deg C) +/- 2.0

Additional Information : (multiple lines)

4. GNSS Antenna Information

4.1 Antenna Type : AOAD/M_T NONE

Serial Number : 400

Antenna Reference Point : BPA

Marker->ARP Up Ecc. (m) : 0.0710

Marker->ARP North Ecc(m) : 0.0000

Marker->ARP East Ecc(m) : 0.0000

Alignment from True N : 0 deg

Antenna Radome Type : NONE

Radome Serial Number :

Antenna Cable Type : RG 214

Antenna Cable Length : 30 m

Date Installed : 1995-02-09T00:00Z

Date Removed : 2002-07-02T08:04Z

Additional Information : (multiple lines)

13. More Information

Primary Data Center : BKGI

Secondary Data Center : OLG

URL for More Information : <http://www.ifag.de> <http://wettzell.ifag.de>

Hardcopy on File

Site Map : (Y or URL)

Site Diagram : Y

Horizon Mask : Y

Monument Description : Y

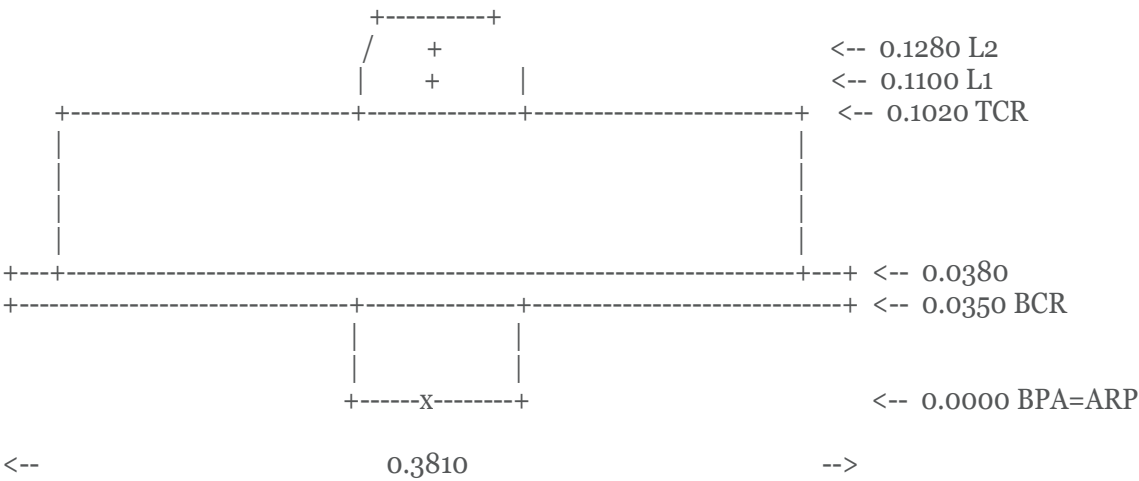
Site Pictures : Y

Additional Information : (multiple lines)

Antenna Graphics with Dimensions

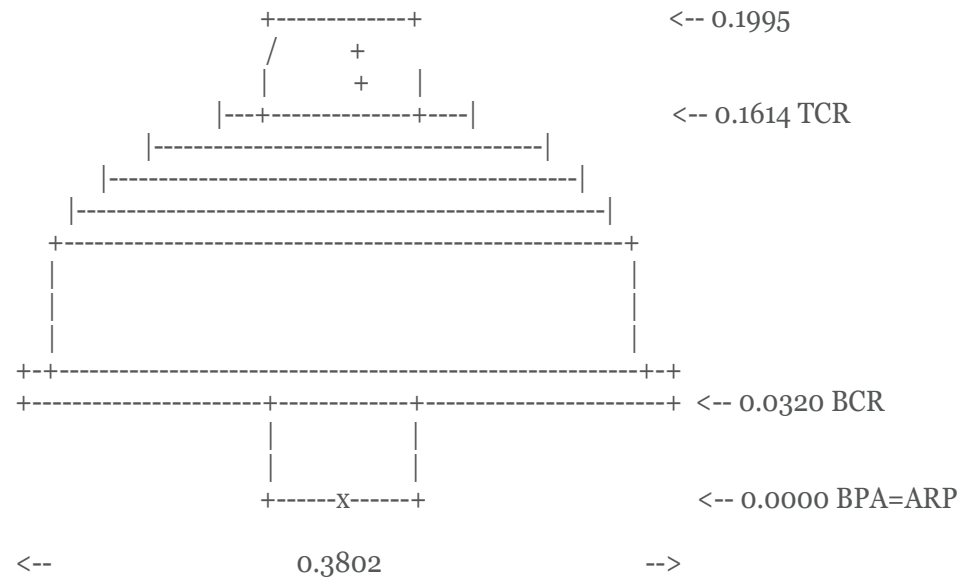
AOAD/M_T

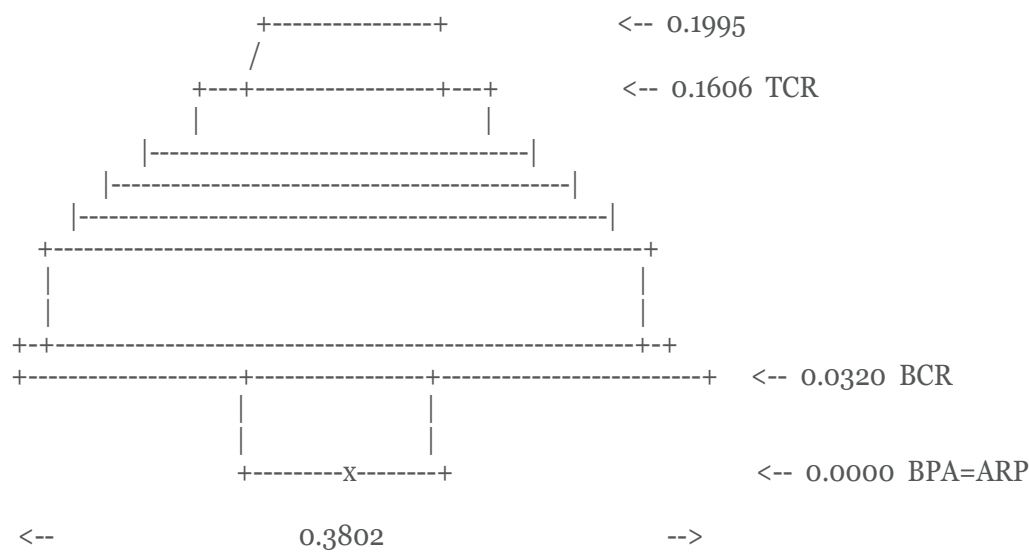
from 1995-02-09 until 2009-01-19



LEIAR25

from 2009-01-19 until 2010-06-30





ARP: Antenna Reference Point
L1 : L1 Phase Center
TCR: Top of Choking
TGP: Top of Ground Plane
TPA: Top of Preamplifier
TOP: Top of Pole

L2 : L2 Phase Center
BCR: Bottom of Choking
BGP: Bottom of Ground Plane
BPA: Bottom of Preamplifier
BAM: Bottom of antenna mount

Βιβλιογραφία

Collins J. P. (1999), An overview of GPS inter-frequency carrier phase combinations, October, 1999, UNB/GSD

D. Thaller, M. Mareyen, R. Dach, G. Beutler, W. Gurtner, B. Richter, J. Ihde, Preparing the Bernese GPS Software for the analysis of SLR observations to geodetic satellites pages 1-15

Dimitriadis, I. M., D.G. Panagiotopoulos, C.B. Papazachos, P. M. Hatzidimitriou, E. E. Karagianni, and I. Kane (2005), Recent seismic activity (1994–2002) of the Santorini volcano using data from local seismological network, in The South Aegean Active Volcanic Arc Present Knowledge and Future Perspectives Milos Conferences, Dev. Volcanol., vol. 7, edited by M. Fytikas and G. Vougioukalakis, Elsevier, pages 185–203

Dimitriadis, I., E. Karagianni, D. Panagiotopoulos, C. Papazachos, P. Hatzidimitriou, M. Bohnhoff, M. Rische and T. Meier (2009), Seismicity and active tectonics at Coloumbo Reef (Aegean Sea, Greece): Monitoring an active volcano at Santorini Volcanic Center using a temporary seismic network, Tectonophysics, 465(1–4), doi:10.1016/j.tecto.2008.11.005. pages 136–149

Dong D., Bock Y. (1989), Global Positioning System Network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, Journal of Geophysical Research Vol. 94 NO. B4 Pages 3949-3966 April 10 1989

E. Lagios, V. Sakkas, F. Novali; F. Bellotti, A. Ferretti, K. Vlachou, V. Dietrich. SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications Tectonophysics, Published by Elsevier B.V. 2013, vol. 1. pages 10-14, 19

G. Kaviris *, P. Papadimitriou, Ph. Kravvariti, V. Kapetanidis, A. Karakostas, N. Voulgaris, K. Makropoulos 2014- A detailed seismic anisotropy study during the 2011-2012 unrest period in the Santorini Volcanic Complex. Published by Elsevier 2014, pages 1-9

Geoffrey Blewitt 1997, Basics of the GPS Technique: Observation Equations, , Department of Geomatics, University of Newcastle, published by the Swedish Land Survey, pages 2-24

Introduction to Gamit/GLOBK T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky, 2010 pages 3-9

K.I. Konstantinou, C.P. Evangelidis, W.-T. Liang, N.S. Melis, I. Kalogeras. ‘Seismicity, Vp/Vs and shear wave anisotropy variations during the 2011 unrest at Santorini caldera, southern Aegean. Journal of Volcanology and Geothermal Research 267 (2013), published by Elsevier B.V. pages 57–67

Lagios, E., 1995. High Precision study of gravity variations over Thera Volcano, Greece. Tiré à part des Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, pages 8, 293-305

Michelle M. Parks, James D. P. Moore, Xanthos Papanikolaou, Juliet Biggs, Tamsin A. Mather, David M. Pyle, Costas Raptakis, Demetris Paradissis, Andrew Hooper, Barry Parsons, Paraskevi Nomikou 2015. From quiescence to unrest: 20 years of satellite geodetic measurements at Santorini volcano, Greece, Vol. 120 JGR 2015 (Pages 1309–1328), pages 1-5

P. Papadimitriou, V. Kapetanidis, A. Karakostas, G. Kaviris, N. Voulgaris, K. Makropoulos' the Santorini Volcanic Complex. A detailed multi-parameter seismological approach with emphasis on the 2011-2012 unrest period' Published by Elsevier (2014) B.V pages 1-8

Papageorgiou E., Lagios E., Vassilopoulou S. and Sakkas V. Vertical & horizontal ground deformation on Santorini island deduced by dgps measurements, Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII, 2007 Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May, 2007 Pages 1-6

Papazachos, B.C. & Kiratzi, A., 1996. A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area. Tectonophysics, pages 253, 129-153

Prof. Efthymis Lekkas Landslide hazard and risk in geologically active areas. The case of the caldera of the Santorini (Thera) volcano island complex (Greece). Pages 1-7

Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl . Bernese 5.0 user's manual 2007. Astronomical Institute, University of Bern . Produced in Digital Print by Stampfli Publications AG, Bern in January 2011 pages 5-344, 456-475

Vasso Saltogianni , Stathis C. Stiros , Andrew V. Newman , Kelly Flanagan , and Fanis Moschas, (2014), "Time-space modeling of the dynamics of Santorini volcano (Greece) during the 2011–2012 unrest", pages 5-19

Δ. Δημητρίου 2013. 'ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ με χρήση λογισμικού επεξεργασίας παρατηρήσεων GPS Gamit/Globk (Release 10.4)'. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, pages 59-67

Ευθ. Λέκκας – Χ. Καραγεωργίου 2008. Στοιχεία τέχνης και αισθητικής στα γεωδυναμικά φαινόμενα της Σαντορίνης. Μεταβλητότητα και εξέλιξη στη δυναμική του ωραίου. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ pages 7-9

Παραδείσης Δ. (2000), Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου-Τομέας Τοπογραφίας ΕΜΠ, Αθήνα Pages 1-14

Διαδίκτυο

Ιστοσελίδα της UNAVCO <http://www.unavco.org/>

Ιστοσελίδα της IGS : igscb.jpl.nasa.gov/index.html

Ιστοσελίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών : www.gein.noa.gr/gps.html

Ιστοσελίδα του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου (τελευταία πρόσβαση 12/2015):
<http://147.102.110.73/>

Ιστοσελίδα Global Positioning System Overview, http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html

<http://www.landmark.com.gr/basikitheoriagps.html>

<https://www.aavso.org/sid-database>