



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Η σύγχρονη κινηματική του νοτίου Αιγαίου σύμφωνα με
διαφορικές μετρήσεις GNSS**

Χρυσάνθη Ν. Δόξα

Επιβλέπων: Ανδρέας Τζάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η σύγχρονη κινηματική του Νοτίου Αιγαίου σύμφωνα με
Διαφορικές μετρήσεις GNSS

Χρυσάνθη Ν. Δόξα

A.M.: 21527

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: **Ανδρέας Τζάνης**, Αναπλ. Καθηγητής
Χαράλαμπος Κράνης, Επίκ. Καθηγητής
Βασίλειος Σακκάς, Ε.ΔΙ.Π.

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΜΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ

Προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας θεωρείται η ολική ή η μερική αναπαραγωγή του έργου άλλου προσώπου ή η παρουσίαση του έργου κάποιου άλλου ως προσωπικού του γράφοντος. Το Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη και καταδικάζει την προσφυγή σε τέτοιου είδους πρακτικές από τους Μεταπτυχιακούς Φοιτητές. Σε περιπτώσεις πρόδηλης ή εκ προθέσεως προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας, τα αρμόδια όργανα του Τμήματος δύνανται να επιβάλουν ως κύρωση έως και την οριστική διαγραφή από το ΠΜΣ. Κατά την εκπόνηση Διπλωματικής Εργασίας Ειδίκευσης οι Μεταπτυχιακοί Φοιτητές οφείλουν να τηρούν τις ακόλουθες κατευθυντήριες οδηγίες:

1. Η Διπλωματική Εργασία Ειδίκευσης πρέπει να αποτελεί έργο του υποβάλλοντος αυτήν φοιτητή.
2. Η αντιγραφή ή η παράφραση έργου τρίτου προσώπου αποτελεί προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας και συνιστά σοβαρό αδίκημα. Στο αδίκημα αυτό περιλαμβάνεται τόσο η προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας άλλου φοιτητή όσο και η αντιγραφή από δημοσιευμένες πηγές, όπως βιβλία, εισηγήσεις ή επιστημονικά άρθρα. Το υλικό που συνιστά αντικείμενο λογοκλοπής μπορεί να προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή. Η αντιγραφή ή χρήση υλικού προερχόμενου από το διαδίκτυο ή από ηλεκτρονική εγκυκλοπαίδεια είναι εξίσου σοβαρή με τη χρήση υλικού προερχόμενου από τυπωμένη πηγή ή βάση δεδομένων.
3. Η χρήση αποσπασμάτων από το έργο τρίτων είναι αποδεκτή εφόσον, αναφέρεται η πηγή του σχετικού αποσπάσματος. Σε περίπτωση αυτολεξεί μεταφοράς αποσπάσματος από το έργο άλλου, η χρήση εισαγωγικών ή σχετικής υποσημείωσης είναι απαραίτητη, ούτως ώστε η πηγή του αποσπάσματος να αναγνωρίζεται.
4. Η παράφραση κειμένου, αποτελεί προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας.
5. Οι πηγές των αποσπασμάτων που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να καταγράφονται πλήρως σε πίνακα βιβλιογραφίας στο τέλος της εργασίας.
6. Η προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας επισύρει την επιβολή κυρώσεων. Κατά την απόφαση επί των ενδεδειγμένων κυρώσεων, τα αρμόδια όργανα του Τμήματος θα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως το εύρος και το μέγεθος του τμήματος της εργασίας που οφείλεται σε προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας. Οι κυρώσεις θα επιβάλλονται σύμφωνα με το Άρθρο 7 Παράγραφος 7 του Κανονισμού Σπουδών.

ΒΕΒΑΙΩΣΗ

Βεβαιώνω ότι η Διπλωματική Εργασία Ειδίκευσης με τίτλο «Η σύγχρονη κινηματική του νοτίου Αιγαίου σύμφωνα με διαφορικές μετρήσεις GNSS» την οποία υποβάλλω, δεν περιλαμβάνει στοιχεία προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας, όπως αυτά προσδιορίζονται από την παραπάνω δήλωση, τους όρους της οποίας διάβασα και αποδέχομαι.

Παρέχω τη συναίνεσή μου, ώστε ένα ηλεκτρονικό αντίγραφο της διπλωματικής εργασίας μου να υποβληθεί σε ηλεκτρονικό έλεγχο για τον εντοπισμό τυχόν στοιχείων προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ημερομηνία

Υπογραφή

10/6/2020



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Δορυφορική Γεωδαισία είναι μία από τις Γεωεπιστήμες που μελετά τις χρονικές μεταβολές του γήινου φλοιού μέσω δορυφορικών δεδομένων. Υπάρχουν διάφορα δορυφορικά συστήματα (VLBI, SLR, LLR, DORIS, GNSS) για την μελέτη των μετακινήσεων του φλοιού της γης ωστόσο συνηθίζεται η επιλογή GNSS συστημάτων, διότι προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια και με χαμηλότερο κόστος η σχετική θέση ενός σημείου. Η εξέλιξη της τεχνολογίας καθώς και η μείωση του κόστους επέτρεψε με την πάροδο των χρόνων, την ίδρυση μόνιμων δικτύων GPS για την συνεχή παρακολούθηση και μελέτη του γήινου φλοιού.

Η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου είναι μια από τις πιο ενεργές τεκτονικά περιοχές της γης όπως διαπιστώνεται από σεισμολογικά δεδομένα και δικαίως χαρακτηρίζεται ως ιδανικό φυσικό εργαστήριο για την μελέτη της κινηματικής και δυναμικής αλληλεπίδρασης των τεκτονικών πλακών. Η Ελλάδα βρίσκεται στα όρια σύγκλισης τριών τεκτονικών πλακών αποτελώντας την πιο δραστήρια τεκτονικά και σεισμικά περιοχή της Ευρώπης.

Η ανάπτυξη της δορυφορικής γεωδαισίας συνεισφέρει, σε μεγάλο βαθμό, στην καλύτερη κατανόηση των παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα στον ανώτερο φλοιό της γης. Καθότι συνεισφέρει σημαντικά στον εντοπισμό των ορίων των μεγάλων λιθοσφαιρικών πλακών καθώς και των μικρομετακινήσεων τους, αλλά και στον εντοπισμό ηπειρωτικών τεμαχών σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Τα δορυφορικά γεωδαιτικά δεδομένα της παρούσας διπλωματικής προέρχονται, είτε από την επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων, είτε από προγενέστερες δημοσιευμένες εργασίες.

Να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, Καθ. Α.Τζάνη για την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς με βοήθησε να θεμελιώσω γνώσεις που έλαβα και να τις διευρύνω.

Τον Δρ. Β.Σακκά για την συνεργασία, τις συμβουλές και τις υποδείξεις του κατά την εκπόνηση της εργασίας, η οποία δε θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την δική του συμβολή.

Τέλος τον Καθ. Χ.Κράνη διότι συνέβαλε καθοριστικά για την ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στον ποσοτικό προσδιορισμό της τεκτονικής παραμόρφωσης στο νότιο Αιγαίο αξιοποιώντας δορυφορικά γεωδαιτικά δεδομένα 47 μόνιμων σταθμών GNSS κατανεμημένων στην περιοχή των Κυκλάδων, Δωδεκανήσων, Κρήτης, Ανατολικής Πελοποννήσου και Αττικής.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από σταθμούς του τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του πανεπιστημίου Αθηνών, του πολυτεχνείου, από το εθνικό κτηματολόγιο, καθώς και από ελεύθερες πηγές, όπως το δίκτυο GNSS του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών NOANET, το δίκτυο RING της Ιταλίας, το εργαστήριο γεωδαισίας της Νεβάδα και το UNAVCO.

Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων από το εμπορικό λογισμικό BERNESSE v5.2. Η εξαγωγή ημερήσιων επιλύσεων των συντεταγμένων των μόνιμων σταθμών, η δημιουργία χρονοσειρών σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ημερήσιων επιλύσεων, με σκοπό την εύρεση των ταχυτήτων μετατόπισης αυτών των σταθμών.

Τα γεωδαιτικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή χαρτών όπου απεικονίζονται τα ανύσματα ταχυτήτων των σταθμών του δικτύου αλλά και για τον χάρτη πεδίου ρυθμού παραμόρφωσης. Όσον αφορά τους χάρτες των ανυσμάτων ταχυτήτων πρέπει να σημειωθεί ότι πέρα από την παραγωγή των ανυσμάτων ταχυτήτων ως προς το ITRF, επίσης υπολογίστηκαν οι διαφορικές ταχύτητες αυτών ως προς τους σταθμούς της Αναβύσσου, της Νάξου και της Αστυπάλαιας.

Στη συνέχεια όλοι οι παραγόμενοι χάρτες συνδυαστικά συγκρίνονται σύμφωνα με το δίκτυο ενεργών σεισμικών ρηγμάτων και σεισμικής δραστηριότητας.

Έπειτα με βάση την ανάλυση των τεκτονικών ταχυτήτων των σταθμών και με τον χάρτη εκτίμησης των ανηγμένων παραμορφώσεων, η περιοχή έχει χωριστεί σε ηπειρωτικά τεμάχια (blocks) για περαιτέρω ανάλυση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Νότιο Αιγαίο, τεκτονική παραμόρφωση, δορυφορικά γεωδαιτικά δεδομένα GNSS, blocks, ταχύτητες τεκτονικής μετατόπισης.

EXTENDED SUMMARY

One of the most tectonically and seismically active areas in the world is the Aegean Sea and its surrounding region. It lies within the convergence zone between the African and the Eurasian plates along the Hellenic Arc south of Crete.

Specifically the south Aegean Sea and its adjacent areas is a highly segmented tectonically active domain, characterized by high-rate extension and severe crustal thinning. The different segments (blocks) that make up the south Aegean crust are bounded by significant fault zones and/or dislocation surfaces whose their relative motion varies in size and direction.

The present study studies the kinematic characteristics of the southern Aegean crustal segments using geodetic data of 47 permanent GNSS stations distributed over the eastern Peloponnese, Attica, Cyclades, Dodecanese, Crete and the coast of western Anatolia.

To be more accurate, the data used herein comprise:

- Primary (unprocessed/raw) data from 24 permanent stations operated by METRICA S.A. (<https://www.metrice.gr>), spanning the period 2011-2018 and generously provided by said organization.
- Primary data, from 8 stations of the HEPOS (Hellenic Positioning System) facility, Hellenic National Cadaster (<http://www.hepos.gr>), spanning the period 2013-2017 and generously provided by said organization.
- Primary data from one station, operated by the RING network of Italy (Rete Integrata Nazionale GPS - <http://ring.gm.ingv.it>), spanning the period 2017-2018.
- Primary data from one station operated by UNAVCO (<https://www.unavco.org/>), spanning the period 2011-2017.

All primary data were processed with the Bernese v5.2 software.

- Processed data (displacement time series) from 4 stations operated by the Geodetic Laboratory of Nevada, spanning the periods 2009-2018 (http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html).
- Velocity vectors from 7 stations located in Attica and Peloponnese, extracted from Chousianitis et al., (2013) and spanning a period of approx. five years.
- Velocity vectors from 2 stations operated by the National Technical University of Athens (NTUA), spanning the period 2012-2015 and kindly provided by Dr. J. Galanis (personal communication, 2018).

Hitherto studies of the kinematics of the Aegean Plate have mainly focused on the analysis of the regional strain rate field and large-scale relative motion between the Aegean, Anatolian and Eurasian plates, either using the ITRF coordinate frame or remote poles of rotation located in Western Europe or Africa. This approach does not facilitate discrimination of local-scale relative motion between tectonic blocks. Inasmuch as we are mainly interested in studying *local-scale* effects in the south and eastern Aegean region, we have based our analysis on a *local* reference point situated at Anavyssos, Attica.

Given the reference point, it is apparent that to the west of longitude 24°E, relative block motion is somewhat uncertain because the majority of estimated relative velocities are associated with large errors. Nevertheless, at least four well estimated vectors clearly indicate that the eastern Peloponnese slides in a roughly N210°–N220° direction, expectedly and approximately normal to the strike of the western half of the Hellenic Trench.

Eastward of longitude 24°E things appear to be quite different; the errors associated with the relative velocity vectors are rather small and the distribution of velocities allows the

identification of five and tentatively seven major blocks with different kinematics, whose boundaries are illustrated in Fig.31 , page 48. Thus, direction of motion and average velocities respectively are :

- Ikaria and Naxos-Paros-Amorgos group of islands, N230° and 1.6mm/yr respectively.
- The south-western Cyclades, N225° and 3.5 mm/yr.
- The northern Dodecanese, N150° and 3.20 mm/yr.
- The southern Dodecanese , N120° and 7.35 mm/yr respectively.
- The Cretan Sea and Crete, N160° and 2.0 mm/yr respectively.

An interpretation of the nature and kinematics of the boundaries between these blocks will be presented and discussed. Overall, the area of the south Aegean appears to exhibit a rather complex kinematic pattern, the origin of which remains to be confirmed and validated with future research.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | II |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | III |
| EXTENDED SUMMARY | IV |
| ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ | 1 |
| 1.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΑ | 2 |
| 1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ | 5 |
| 1.3.1 Γενικά | 5 |
| 1.3.2 Οι μηχανισμοί γένεσης των επιφανειακών σεισμών της περιοχής μελέτης..... | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΑΡΧΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΕΩΣ (GNSS)1 | 1 |
| 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 2.2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ GNSS | 2 |
| 2.2.1 Το σύστημα GPS | 3 |
| 2.2.2 Το σύστημα GLONASS | 5 |
| 2.2.3 Ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα, GALILEO | 6 |
| 2.2.4 Κινέζικο δορυφορικό σύστημα, BEIDOU | 7 |
| 2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ | 9 |
| 2.3.1 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης..... | 10 |
| 2.3.2 Σχετικός προσδιορισμός θέσης..... | 11 |
| 2.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΗΜΑ GPS | 12 |
| 2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΕΙΣΕΡΧΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 13 |
| 2.5.1 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις | 13 |
| 2.5.2 Επιδράσεις λόγω πολυανάκλασης | 15 |
| 2.6 ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ | 16 |
| 2.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ | 18 |
| 2.8 ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ GPS (DGPS) | 20 |
| 2.8.1 Απλές διαφορές δεκτών..... | 20 |
| 2.8.2 Απλές διαφορές δορυφόρων | 21 |
| 2.8.3 Διπλές διαφορές δεκτών – δορυφόρων | 21 |
| 2.8.4 Τριπλές διαφορές..... | 21 |
| 2.9 ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ | 23 |
| 2.9.1 Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς ITRF2008..... | 23 |
| 2.9.2 Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, ΕΓΣΑ 87' | 23 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ GNSS ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 25 |
| 3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ | 25 |
| 3.2 Το ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ BERNESE | 29 |
| 3.2.1 BPE (Bernese Processing Engine)..... | 29 |
| 3.3 ΠΕΔΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ | 32 |
| 3.3.1 Χάρτης Ταχυτήτων μετατόπισης ως προς ITRF2008 | 36 |
| 3.3.2 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Ανάβυσσο | 37 |
| 3.3.3 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Νάξο..... | 38 |
| 3.3.4 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Αστυπάλαια | 39 |
| 3.4 ΠΕΔΙΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 40 |
| 3.4.1 Τανυστής Ρυθμού Παραμόρφωσης | 40 |
| 3.4.2 Χάρτης Πεδίου Ρυθμού Παραμόρφωσης..... | 44 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 45 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 54 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1. ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ | 2 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. ΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΛΕΚΑΝΕΣ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΕΙΟ-ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΟΥΣ..... | 3 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΑΠΑΝΤΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ | 4 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΓΕΝΕΣΗΣ ΣΕΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ | 6 |
| ΕΙΚΟΝΑ 5 ΤΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GNSS | 2 |
| ΕΙΚΟΝΑ 6. ΔΕΚΤΗΣ GNSS | 3 |
| ΕΙΚΟΝΑ 7. ΤΡΟΧΙΕΣ ΤΩΝ GPS ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ | 3 |
| ΕΙΚΟΝΑ 8. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ GPS ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ BLOCK..... | 4 |
| ΕΙΚΟΝΑ 9. ΤΡΟΧΙΕΣ ΤΩΝ GLONASS ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ | 5 |
| ΕΙΚΟΝΑ 10. ΤΡΟΧΙΕΣ ΤΩΝ GALILEO ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ | 6 |
| ΕΙΚΟΝΑ 11. ΤΡΟΧΙΕΣ ΤΩΝ BEIDOU ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ | 7 |
| ΕΙΚΟΝΑ 12. ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΤΩΝ GNSS ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Η ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟΥΛΑΧΙΣΤΟΝ 4 ΔΟΡΥΦΟΡΟΥΣ..... | 9 |
| ΕΙΚΟΝΑ 13. ΑΠΟΛΥΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ | 10 |
| ΕΙΚΟΝΑ 14. ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ | 11 |
| ΕΙΚΟΝΑ 15. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΗΜΑ GPS | 12 |
| ΕΙΚΟΝΑ 16. ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑ ... | 14 |
| ΕΙΚΟΝΑ 17. ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΕΡΑΙΑ..... | 15 |
| ΕΙΚΟΝΑ 18. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ | 18 |
| ΕΙΚΟΝΑ 19. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΥΠΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 20. ΔΙΠΛΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ | 22 |
| ΕΙΚΟΝΑ 21. ΑΠΛΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ. | 22 |
| ΕΙΚΟΝΑ 22. ΤΡΙΠΛΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ. | 22 |
| ΕΙΚΟΝΑ 23. ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 24. ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΙΛΟ ΣΤΗΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ Α-Δ..... | 33 |
| ΕΙΚΟΝΑ 25. ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΙΛΟ ΣΤΗΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ Β-Ν | 33 |
| ΕΙΚΟΝΑ 26. ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΙΤRF2008 | 36 |
| ΕΙΚΟΝΑ 27. ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΝΑΒΥΣΣΟ | 37 |
| ΕΙΚΟΝΑ 28. ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ..... | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 29 ΠΕΔΙΟ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ. | 44 |
| ΕΙΚΟΝΑ 30. ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΑΝΑΒΥΣΣΟ. | 47 |
| ΕΙΚΟΝΑ 31. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ..... | 49 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΣΕΙΡΕΣ BLOCK..... | 4 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ GNSS..... | 8 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ | 28 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ..... | 35 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΑΖΙΜΟΥΘΙΩΝ ΤΩΝ ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ/BLOCKS . | 46 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΑΝΑΒΥΣΣΟ | 54 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΝΑΕΟ | 55 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΑΣΤΥΠΑΛΑΙΑ | 56 |

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

CODE Central Orbit Determination Europe

EPOS IP European Plate Observing System Implementation Phase

ETRF European Terrestrial Reference Frame

ETRS89 European Terrestrial Reference System 1989

EUREF European Reference Frame

GLONASS Global NAVigation Satellite System

GMT The Generic Mapping Tools

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

HEPOS Hellenic Position System

IGS International GNSS Service

ITRF International Terrestrial Reference Frame

ITRS International Terrestrial Reference System

STIB Strain Tensor from Inversion of Baselines

RINEX Receiver Independent Exchange Format

WGS World Geodetic System

ΕΓΣΑ'87 Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γεωδυναμικό καθεστώς

Το Αιγαίο πέλαγος καθώς και η γειτονική της περιοχή ανήκει γεωτεκτονικά στον Αλπικό κύκλο. Οι υψηλότεροι ρυθμοί διάνοιξης του Νότιου Ατλαντικού ως προς τον Βόρειο Ατλαντικό, έχουν ως αποτέλεσμα η αφρικάνική πλάκα να κινείται αριστερόστροφα και να ωθεί την ευρασιατική πλάκα βορειοδυτικά (Kahle 1998) (Mueller 1993). Ο θαλάσσιος πυθμένας της Μεσογείου χρονολογείται μεσοζωικής ηλικίας (Chaumillon E 1997) (Chaumillon E 1995) και βυθίζεται κάτω από την Κρήτη με ρυθμό 3.5-4 cm/year, (Le Pichon 1979) (L. a. Jolivet 2000) (S. B. McClusky 2000).

Η έναρξη σύγκλισης μεταξύ Ευρασίας και Αφρικής τοποθετείται στο Av. Κρητιδικό (~90 Ma) με την διάσπαση της Πανγαίας και την αριστερόστροφη περιστροφή της Αφρικανικής και της Αραβικής λιθοσφαιρικής πλάκας ως προς τη λιθοσφαιρική πλάκα της Ευρασίας (Dercourt 1986) (Faccenna 2003).

Ο παρατηρούμενος εφελκυσμός λαμβάνει χώρα από το Ολιγοκαίνο (~30-25 Ma) και οφείλεται είτε στο εφελκυστικό μοντέλο της οπισθοχώρας είτε σε κατάρρευση αλπικού φλοιού στο εσωτερικό των τόξων εξαιτίας της βαρύτητας (Dercourt 1986), (Dewey 1989).

Από το ανώτερο Μειόκαινο - Πλειόκαινο το πεδίο των τάσεων αλλάζει διεύθυνση (από B-N σε BBA-NNΔ), εξαιτίας της σύγκρουσης της Αραβικής λιθοσφαιρικής πλάκας που κινείται προς τα βόρεια, με την πλάκα της Ανατολίας. Αυτό προκάλεσε την εξώθηση της πλάκας της Ανατολίας προς τα δυτικά, κατά μήκος των ρηγμάτων της βόρειας και της ανατολικής Ανατολίας (Dewey 1989), (Ταγμαζ 1991), με συνέπεια την αλλαγή αυτή στη διεύθυνση της κίνησης της μικροπλάκας του Αιγαίου από B-N σε BBA-NNΔ. Κατά την ίδια περίοδο, αναπτύχθηκαν εφελκυστικές λεκάνες σε όλο το χώρο του Αιγαίου (Mascle 1990) (Brun 2010) σε συνδυασμό με την επέκταση του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας στην περιοχή του Αιγαίου πριν 5 εκ. χρόνια περίπου (Armijo 1996) (Faccenna 2006).

Στην παρακάτω εικόνα 1, αναπαρίσταται ο σεισμοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας ως αποτέλεσμα των λιθοσφαιρικών πλακών καθώς και οι μεταξύ τους κινήσεις (B. C. Parazachos 1998).



Εικόνα 1. Σεισμοτεκτονικός χάρτης Ελλάδας (B. C. Papazachos 1998)

1.2 Τεκτονικό καθεστώς και Γεωλογία

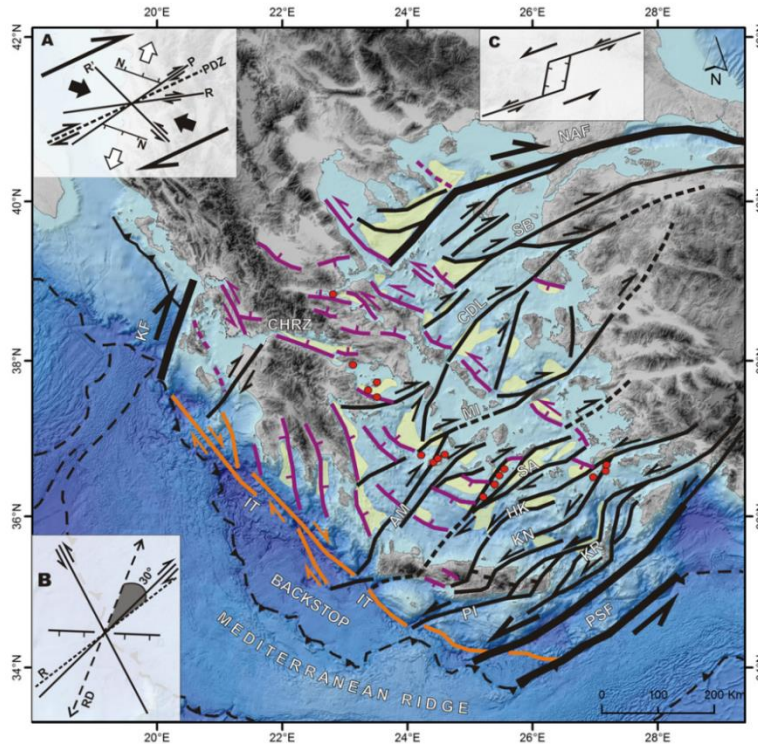
Σύμφωνα με τους (Le Pichon X. 1995) στο σημερινό γεωτεκτονικό καθεστώς για το χώρο του Αιγαίου διακρίνουμε μια σύνθετη κίνηση με σημαντική δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα και συνιστώσα συμπίεσης ΒΒΑ-ΝΝΔ διεύθυνσης στις τάφρους Πλίνιου και Στράβωνα. Αντίθετα πίσω από το τόξο κυριαρχούν εφελκυστικές τάσεις.

Η κατάσταση και το πεδίο των τάσεων στην περιοχή δεν είχαν πάντα τη σημερινή μορφή, αλλά εξελίχθηκαν χρονικά στις εξής φάσεις (Armiijo R. 2004).

- 15-21 Ma: Έναρξη εφελκυσμού στο Αιγαίο.
- 10-13 Ma: Γέννηση του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας στην Ανατολική Τουρκία και επέκτασή του δυτικά.
- 5 Ma: Μετακίνηση του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας στη σημερινή θέση της θάλασσας του Μαρμαρά και αρχή αλληλεπίδρασης με το εφελκυστικό πεδίο στο Αιγαίο.

Η πρώτη συστηματική χαρτογράφηση των υποθαλάσσιων ρηγμάτων με βάση την ερμηνεία σεισμικών τομών έγινε από τους Mascle J. και Martin L. (Mascle 1990), οι οποίοι πρότειναν πως η παραμόρφωση του Αιγαίου συνδέεται κυρίως με ζώνες οριζόντιας ολίσθησης ΝΔ-ΒΑ διεύθυνσης.

Στην εικόνα 2, αναπαρίστανται τα ενεργά υποθαλάσσια ρήγματα και οι λεκάνες ιζηματογένεσης του Πλειο-Τεταρτογενούς σύμφωνα με τους Τσαμπουράκη Κ. και Σακελλαρίου Δ. (Sakellariou D. 2019). Για την δημιουργία του συγκεκριμένου χάρτη λήφθηκαν υπόψη το γεωλογικό καθεστώς που επικρατεί στην περιοχή του Αιγαίου, τα βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με υποθαλάσσια ρήγματα στο Αιγαίο και ερμηνεύτηκαν πρόσφατες και παλιότερες σεισμικές τομές και δεδομένα βυθομετρίας.

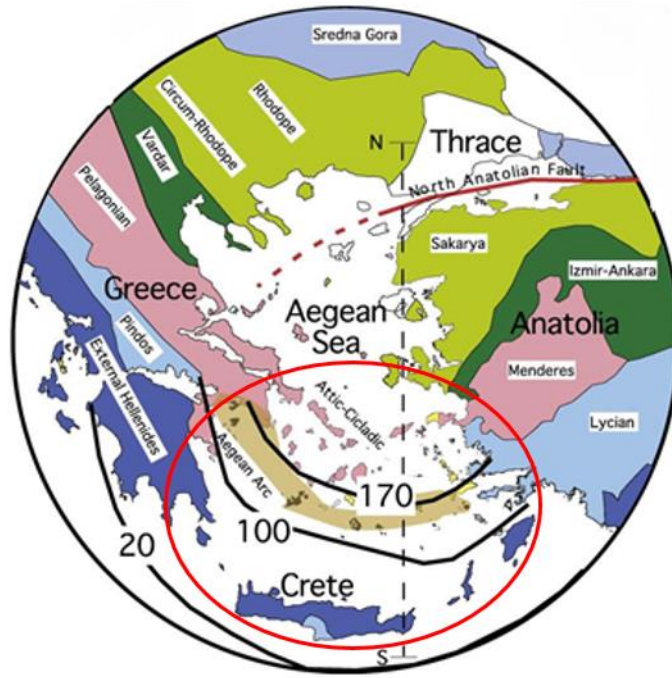


Εικόνα 2. Τα ενεργά υποθαλάσσια ρήγματα και οι λεκάνες ιζηματογένεσης του Πλειο-Τεταρτογενούς (Sakellariou D. 2019)

Το Αιγαίο γεωλογικά αποτελείται από ηπειρωτικό φλοιό μικρού πάχους (25 περίπου km) που θεωρείται ίσως απολεπτυσμένος ηπειρωτικός φλοιός λόγω εφέλκυσμού.

Σύμφωνα με τον (D. Παπανικόλαου 2004), μία τομή Β-Ν διεύθυνσης (αντίστοιχη της μαύρης διακεκομμένης στον χάρτη εικόνα 3 νότια από τη Λεκάνη του Βορείου Αιγαίου και βόρεια των Κυκλάδων, αρχικά διατρέχει τις Εσωτερικές Ελληνίδες. Έπειτα η γεωτομή διασχίζει το σύγχρονο ηφαιστειακό τόξο στη Μήλο και στη συνέχεια την Κρητική οπισθοτάφρο, που είναι πληρωμένη με ιζήματα του Ανωτέρου Μειοκαιίνου – Τεταρτογενούς. Κάτω από την Κρητική Λεκάνη η τομή διασχίζει τις Εξωτερικές Ελληνίδες.

Στο Κεντρικό Αιγαίο (Κυκλάδες), στη Νότια Εύβοια και στο μεγαλύτερο τμήμα της Αττικής συναντάμε την Αττικό-κυκλαδική Μάζα. Η Αττικό-κυκλαδική Μάζα έχει θεωρηθεί από πολλούς ερευνητές ως υπόλειμμα μιας μικροπλάκας μεταξύ της Απούλιας και Πελαγονικής, ενώ από ορισμένους άλλους ως η προς το νότο προέκταση της Πελαγονικής. Η Μάζα αποτελεί ένα πολύ-μεταμορφωμένο τμήμα του αλπικού ορογενούς και χαρακτηρίζεται από ένα πολυσύνθετο σύστημα καλυμμάτων που έχουν υποστεί μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων, κύριο χαρακτηριστικό που απαντάται σε ζώνες καταβύθισης.



Εικόνα 3. Οι γεωλογικές ενότητες που απαντούν στην περιοχή μελέτης (Agostini S. 2009). (Όπου μαύρες γραμμές οι ισοβαθείς του ελληνικού τόξου σε km (B. K. Papazachos 2000)

1.3 Σεισμικότητα

1.3.1 Γενικά

Οι περισσότεροι σεισμοί οφείλονται στις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών και κατά συνέπεια οι ζώνες έντονης σεισμικής δράσης ουσιαστικά ταυτίζονται με τις παρυφές των πλακών. Εφόσον ο ελληνικός χώρος βρίσκεται στα όρια επαφής και σύγκλισης της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική, είναι χώρος μεγάλης σεισμικότητας. Το τόξο που δημιουργείται στην περίπτωση αυτή αποτελείται από την ελληνική τάφρο, το νησιωτικό τόξο, την οπισθοτάφρο και το ηφαιστειακό τόξο.

Η Ελληνική τάφρος δημιουργείται κατά μήκος της επαφής των δύο λιθοσφαιρικών πλακών. Πρόκειται για ένα σύστημα τάφρων, μία σειρά από βαθιές θαλάσσιες λεκάνες από τη Ρόδο έως και την Κεφαλονιά.

Το νησιωτικό τόξο αποτελείται από μία σειρά διαδοχικών νησιών όπως η Ρόδος, η Κρήτη, τα Κύθηρα και από την Πελοπόννησο. Τοποθετείται παράλληλα ως προς την Ελληνική τάφρο και σε μικρή απόσταση από αυτήν. Το τόξο αυτό δημιουργείται από την παραμόρφωση και ανύψωση κυρίως ιζηματογενών πετρωμάτων του περιθωρίου της Ευρασιατικής πλάκας.

Η οπισθοτάφρος είναι μία θαλάσσια λεκάνη στο Κρητικό πέλαγος, μικρότερου βάθους από την Ελληνική τάφρο. Το μέγιστο βάθος της φτάνει τα 2.000m περίπου. Η λεκάνη αυτή βρίσκεται μπροστά από το νησιωτικό τόξο και ανήκει στην Ευρασιατική πλάκα.

Το ηφαιστειακό τόξο αποτελείται από διαδοχικά ενεργά και ανενεργά ηφαίστεια όπως Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη, Νίσυρος. Η δημιουργία τους οφείλεται σε ανάτηξη υλικού της υποβυθιζόμενης Αφρικανικής πλάκας. Κατά την άνοδό του το υλικό αυτό διαπερνά την Ευρασιατική πλάκα και σχηματίζει τα ηφαίστεια.

Η γνώση της χωρικής κατανομής των σεισμικών εστιών σε μια περιοχή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τη μελέτη της ενεργού τεκτονικής της, γιατί οι σεισμικές εστίες βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε ζώνες διάρρηξης οι οποίες καθορίζουν τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

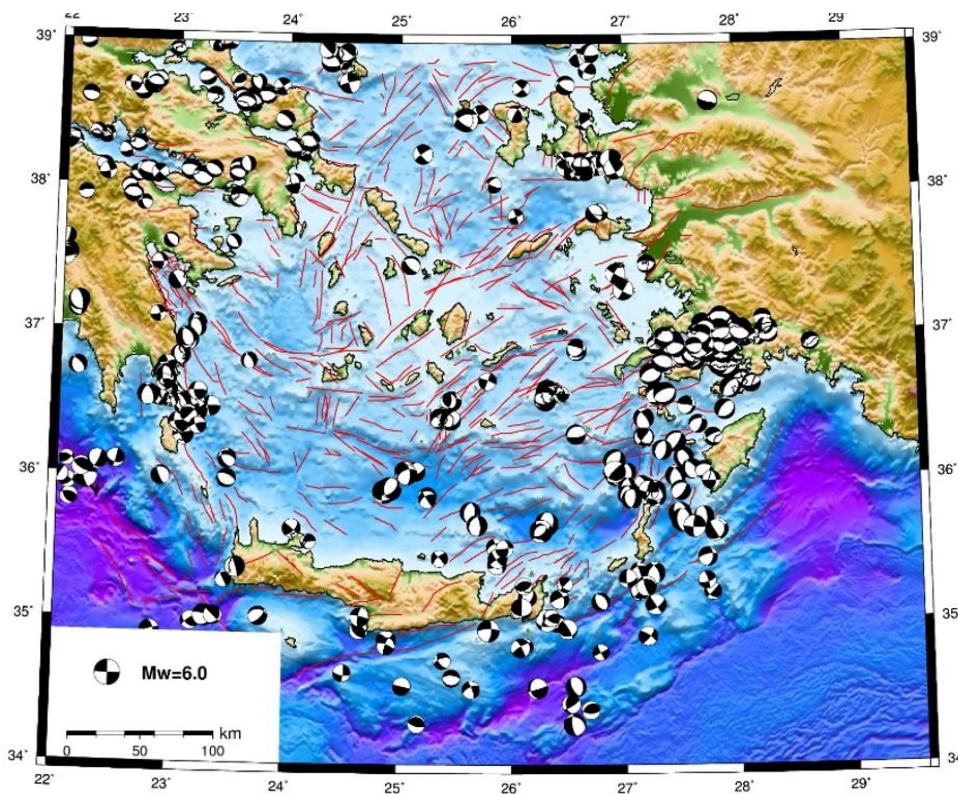
1.3.2 Οι μηχανισμοί γένεσης των επιφανειακών σεισμών της περιοχής μελέτης

Η γνώση της χωρικής κατανομής των σεισμικών εστιών σε μια περιοχή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τη μελέτη της ενεργού τεκτονικής της, γιατί οι σεισμικές εστίες βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε ζώνες διάρρηξης. Για αυτό τον λόγο κατασκευάστηκε (προσαρμοσμένος στα δεδομένα μας) ο χάρτης των μηχανισμών γένεσης της περιοχής μελέτης.

Για την δημιουργία του μηχανισμού γένεσης ενός σεισμού, απαιτείται ο καθορισμός του προσανατολισμού του επιπέδου του ρήγματος (παράταξη, κλίση), της κατεύθυνσης ολίσθησης πάνω στο ρήγμα (γωνία ολίσθησης) και της διεύθυνσης των κυρίων συνιστωσών τάσης (διεύθυνση και κλίση της μέγιστης συμπίεσης και μέγιστου εφελκυσμού). Τα παραπάνω προκύπτουν με βάση τη φορά των πρώτων αποκλίσεων των καταγραφών των επιμηκών κυμάτων.

Στο εικόνα 4 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών της περιοχής με βάθος μέχρι 30 km, με μέγεθος μεγαλύτερο της τάξεως των 4 Mw και καλύπτουν την χρονική περίοδο 1996-2018.

Στο εσωτερικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου, στην περιοχή των Κυκλάδων σημειώνεται ασθενή σεισμικότητα. Σύμφωνα με τους (Jackson 1988) πιθανών να οφείλεται σε ασεισμική παραμόρφωση της οπισθοχώρας αφού η ζώνη Benioff τερματίζεται ουσιαστικά κάτω από το ηφαιστειακό τόξο, χωρίς να επεκτείνεται σε βάθη πέραν των 200 km, όπου και καταγράφονται οι βαθύτεροι σεισμοί στην περιοχή.



Εικόνα 4. Μηχανισμοί γένεσης σεισμών της περιοχής μελέτης. (Depth < 30 km, Mw > 4.0, 1996 - 2018). Πηγές μηχανισμών γένεσης:ISC, Konstantinou et al. (2010). Πηγές ρηγμάτων: Kokkalas et al. (2013), Sakellariou et al. (2019), IGME, 1989

Κυριαρχούν τα κανονικά τύπου ρήγματα, έντονα βόρεια της Ρόδου. Παρατηρούνται ανάστροφα ρήγματα κατά μήκος της Ελληνικής Τάφρου. Διακρίνονται κανονικά ρήγματα κατά μήκος της γραμμής Κάλυμνος-Σαντορίνη- Χριστιανά Θήρας.

Κεφάλαιο 2: Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

2.1 Εισαγωγή

Το Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού και Πλοήγησης, GNSS (Global Navigation Satellite Systems), χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στην ξηρά, τη θάλασσα ή το διάστημα, μέσω ενός συστήματος τεχνητών δορυφόρων. Ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα, δύναται κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες να προσδιορίσει αξιόπιστα θέση, χρόνο και ταχύτητα σε κάθε σημείο του πλανήτη ή κοντά σε αυτόν, αρκεί να υπάρχει ελεύθερο οπτικό πεδίο με τέσσερις ή παραπάνω δορυφόρους GNSS.

Η εποχή της δορυφορικής και διαστημικής γεωδαισίας ξεκινά την δεκαετία του 1960 με την πρώτη εκτόξευση του τεχνητού δορυφόρου Sputnik από το έδαφος της Σοβιετικής ένωσης στις 4/10/1957. Το πρώτο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα που τέθηκε σε ισχύ είναι το αμερικάνικο Global Positioning System (GPS). Έπειτα ακολούθησαν το Ρωσικό GLONASS, το κινέζικο BEIDU και το Ευρωπαϊκό GALILEO.

Το σύστημα GPS, ξεκίνησε για στρατιωτικούς σκοπούς, προκειμένου να συμβάλει στις παγκόσμιες κατασκοπευτικές τους δραστηριότητες κατά την περίοδο κορύφωσης του Ψυχρού Πολέμου. Κατά την δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε και ξεκίνησε να γίνεται επιχειρησιακό από τις αρχές του 1990.

Στις ενότητες που ακολουθούν, γίνεται επισκόπηση του κάθε συστήματος GNSS ξεχωριστά. Ωστόσο περιγράφεται εκτενέστερα το δορυφορικό σύστημα γεωδαισίας των ΗΠΑ (GPS) μιας και ήταν το πρώτο όλων.

2.2 Δορυφορικά συστήματα GNSS

Δορυφορικά συστήματα εντοπισμού GNSS (Global Navigation Satellite Systems) θεωρούνται τα συστήματα που επιτρέπουν τον προσδιορισμό θέσης σημείων πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης, με τη βοήθεια οργάνων που χρησιμοποιούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από κάποια σώματα σε τροχιά γύρω από τη γη (δορυφόροι) ή από κάποια ουράνια σώματα που βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις. Οι σύγχρονες μη επίγειες μέθοδοι προσδιορισμού θέσης βασίζονται κυρίως σε δορυφορικές και διαστημικές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί μετά το 1957. Σήμερα, τα κυριότερα γεωδαιτικά δορυφορικά συστήματα περιλαμβάνουν το Παγκόσμιο Σύστημα Κάθε παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού και πλοήγησης (GNSS) αποτελείται από τρία βασικά τμήματα.

- Το δορυφορικό τμήμα
- Το τμήμα ελέγχου
- Το τμήμα χρήσης

Το δορυφορικό τμήμα αποτελείται από πολλούς δορυφόρους τοποθετημένους πάνω από τη Γη σε σχεδόν κυκλικά σε τροχιακά επίπεδα, οι οποίοι συνήθως κινούνται σε τροχίες μεσαίου υψομέτρου, εικόνα 5.

Το τμήμα ελέγχου είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο ολόκληρου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης και συντήρησης του συστήματος, της παρακολούθησης των δορυφορικών τροχιών και των παραμέτρων του χρόνου, της παρακολούθησης βοηθητικών δεδομένων και της μεταφόρτωσης του μηνύματος δεδομένων στους δορυφόρους. Το τμήμα ελέγχου είναι επίσης υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση δεδομένων και την προστασία των υπηρεσιών από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Επιπλέον, σταθμοί παρακολούθησης σε όλο τον κόσμο συντονίζουν τις δραστηριότητες για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του συστήματος, χρησιμοποιώντας αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των εν λόγω σταθμών και των δορυφόρων GNSS.



Εικόνα 5 Τα μέρη ενός συστήματος GNSS

Το τμήμα χρηστών αποτελείται από παθητικούς δέκτες, εικόνα 6, με δυνατότητα αποκωδικοποίησης των λαμβανόμενων σημάτων από τους δορυφόρους. Ωστόσο, οι πολίτες δεν επιτρέπεται να έχουν πρόσβαση στα στρατιωτικά GNSS σήματα. Επομένως, εκτός από τους ειδικούς δέκτες που αποσκοπούν σε στρατιωτικές εφαρμογές, υπάρχει μια ποικιλία δεκτών GNSS διαθέσιμων στην αγορά σήμερα, για πολιτική χρήση.

Στις ενότητες που ακολουθούν, γίνεται επισκόπηση του κάθε GNSS ξεχωριστά. Παρατίθενται βασικές πληροφορίες για το GPS των ΗΠΑ, το οποίο συγκρίνεται με το GLONASS της Ρωσίας, το Galileo της Ευρώπης και το BeiDou της Κίνας, πίνακας 2.

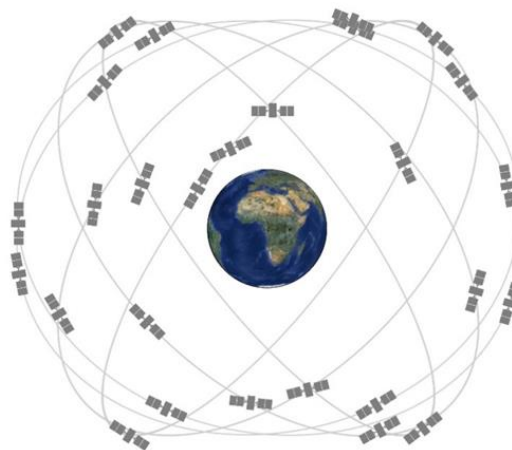
2.2.1 Το σύστημα GPS

Το δορυφορικό τμήμα αναφέρεται στους δορυφόρους και στις τροχιές τους. Το σύστημα στην πλήρη εξέλιξη του αποτελείται σήμερα από 31 δορυφόρους και είναι της σειράς BLOCK



Εικόνα 6. Δέκτης GNSS

IIR/IIRM/IIF. Είναι τοποθετημένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα τα οποία σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 60° με το προηγούμενο και γωνία κλίσης σχεδόν 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο, εικόνα 7.



Εικόνα 7. Τροχιές των GPS δορυφόρων (Πηγή, NOAA)

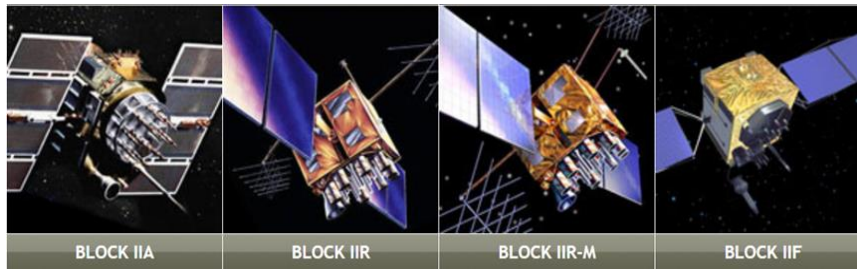
Οι σειρές BLOCK I, II ΚΑΙ IIA έχουν αποσυρθεί καθώς οι δορυφόροι έχουν εκτιμώμενη ζωή 10 έτη εικόνα 8,πίνακας 1.Το ύψος της τροχιάς τους είναι περίπου 20180 km και η διάταξη του συστήματος εξασφαλίζει παρακολούθηση σε οποιαδήποτε θέση στη επιφάνεια της Γης έως τα 5000 km στο διάστημα.

Ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύθηκε το 1978 και ήταν της σειράς BLOCK I. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει δορυφορικό σήμα δύο υψηλών συχνοτήτων και μάλιστα από το 2010 εκπέμπει τριών συχνοτήτων σήμα.

Η περίοδος κάθε δορυφόρου είναι μισής αστρικής μέρας ή 12 ωρών σε αστρικό χρόνο. Το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός και χρειάζεται 67ms για να φθάσει στην επιφάνεια της γης όταν ο δορυφόρος εκπέμπει από τους πόλους και αντίστοιχα 86 ms από τον ισημερινό μιας και η γη είναι πεπλατυσμένη. Κατά την περιστροφή της γης 1° με διάρκεια $3' 55.91''$ ο δορυφόρος διανύει 914 km που αντιστοιχεί σε $\approx 2^\circ - 2.6^\circ$ στην επιφάνεια της γης.

Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από 16 μόνιμους σταθμούς ελέγχου και παρακολούθησης των δορυφορικών σημάτων, 4 σταθμούς τηλεπικοινωνιών και έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου.



Εικόνα 8. Δορυφόροι GPS της σειράς BLOCK (Πηγή GPS.GOV)

Πίνακας 1. Σειρές Block (Πηγή, GPS.GOV)

| BLOCK | ΕΚΤΟΞΕΥΜΕΝΑ | ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ |
|------------|-------------|---------------|
| BLOCK I | 11 | 0 |
| BLOCK II | 9 | 0 |
| BLOCK IIA | 19 | 0 |
| BLOCK IIR | 13 | 12 |
| BLOCK IIRM | 8 | 7 |
| BLOCK IIF | 12 | 12 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 72 | 31 |

Το τμήμα χρηστών αποτελείται από τους δέκτες που χρησιμοποιούν το σύστημα GNSS.

2.2.2 Το σύστημα GLONASS

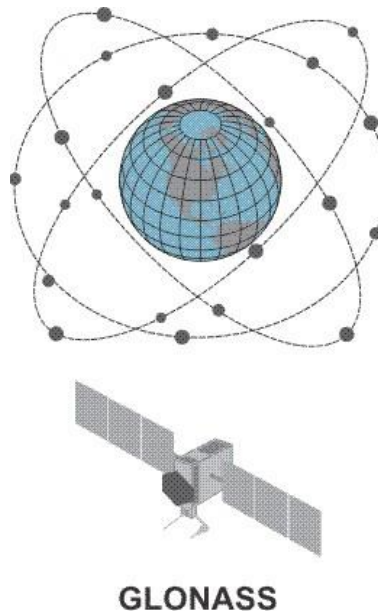
Το σύστημα GLONASS έχει αναπτυχθεί και συντηρείται από τη Ρωσική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαστήματος και το Υπουργείο Άμυνας της Ρωσίας, από το 1970. Το 1996, το GLONASS άρχισε να λειτουργεί πλήρως με έναν ολοκληρωμένο σχηματισμό 24 δορυφόρων.

Το 1994, το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων άλλαξε σε SGS-90. Το SGS-90 είναι γνωστό στις μέρες μας ως Parametry Zemli 1990. Το ελλειψοειδές του SGS-90 διαφέρει από το WGS84 κατά λιγότερο από 0.4 m ως προς κάθε κατεύθυνση (Dawoud 2012).

Το GLONASS έχει τη δική του κλίμακα χρόνου που ονομάζεται χρόνος Glonass, συγχρονισμένος στην κλίμακα του 1 second με τον χρόνο UTC. Το μήνυμα πλοήγησης διαθέτει τα απαραίτητα δεδομένα για τη μετατροπή μεταξύ του χρόνου GLONASS και του UTC. Το μήνυμα πλοήγησης περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις δορυφορικές τροχιές, την κατάσταση υγείας των δορυφόρων, τα δεδομένα διόρθωσης, και τα ημερολογιακά δεδομένα (almanac data) για όλους τους δορυφόρους του σχηματισμού. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη διόρθωση του χρόνου GLONASS σε σχέση με το UTC και τη διαφορά στο χρόνο μεταξύ του συστήματος GLONASS και του συστήματος GPS.

Το διαστημικό τμήμα του GLONASS αποτελείται από 24 δορυφόρους, σε τρία τροχιακά επίπεδα. Μεταξύ αυτών των δορυφόρων υπάρχουν 21 ενεργοί, ενώ οι άλλοι τρεις χρησιμοποιούνται ως εφεδρικοί, καλύπτοντας έτσι το 97-99% της επιφάνειας της Γης.

Οι τροχιές των δορυφόρων είναι σχεδόν κυκλικές, με πολύ μικρή εκκεντρότητα, μεγάλο ημιάξονα στα 25440 km και γωνία κλίσης στις 64.8 μοίρες. Οι δορυφόροι κατανέμονται ομοιόμορφα στις τροχιές, δηλαδή η μεταξύ τους γωνία είναι 45 μοίρες. Τα τρία τροχιακά επίπεδα κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από τον ισημερινό, που σημαίνει ότι η μεταξύ τους γωνία είναι 120 μοίρες, εικόνα 9. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι τροχιές των δορυφόρων GLONASS έχουν μεγαλύτερη γωνία κλίσης από τους GPS και Galileo, παρέχοντας έτσι μια καλύτερη δορυφορική κάλυψη σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το GLONASS συνεπώς, αντιμετωπίστηκε με ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους, όπως για παράδειγμα στη Νορβηγία όπου για τη θαλάσσια ναυσιπλοΐα, ο αξιόπιστος δορυφορικός εντοπισμός είναι σημαντικός.



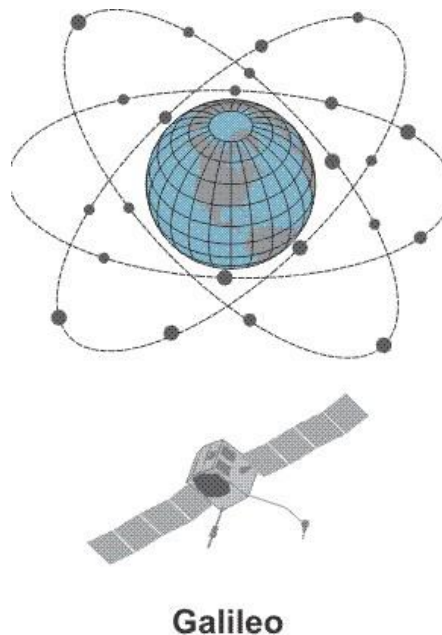
Εικόνα 9. Τροχιές των GLONASS δορυφόρων (Πηγή, GPS for Land Surveyors)

2.2.3 Ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα, GALILEO

Το σύστημα Galileo είναι το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης της Ευρώπης που κληρονόμησε το όνομά του από τον αστρονόμο που εντόπισε την πραγματική θέση της Γης στο ηλιακό μας σύστημα. Παρέχει μία υψηλής ακρίβειας παγκόσμια υπηρεσία προσδιορισμού θέσης, για πολιτική χρήση. Εκπέμπει σήματα σε δύο συχνότητες, ώστε να παρέχει σε πραγματικό χρόνο ακρίβεια στον εντοπισμό θέσης της τάξης του μέτρου (m).

Το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης Galileo, έχει σήμερα 22 δορυφόρους σε τροχιά. Η ολοκλήρωση του συστήματος έχει προγραμματιστεί για το 2020. Το πλήρως αναπτυγμένο δορυφορικό τμήμα του συστήματος Galileo θα αποτελείται από 24 εν λειτουργία δορυφόρους, συν έξι εφεδρικούς σε τροχιά, τοποθετημένους σε τρία κυκλικά επίπεδα, σε υψόμετρο 23 222 km πάνω από τη Γη, και με κλίση των τροχιακών επιπέδων 56 μοίρες ως προς τον ισημερινό, εικόνα 10.

Ο χρόνος αναφοράς του συστήματος Galileo GST (Galileo System Time) καθορίζεται από το σύστημα Galileo και από άλλες κλίμακες χρόνου και ακολουθεί τις διεθνείς προδιαγραφές. Πρόκειται μία συνεχής κλίμακα χρόνου σε ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, με 1 second διαφορά σε σχέση με τον χρόνο UTC.



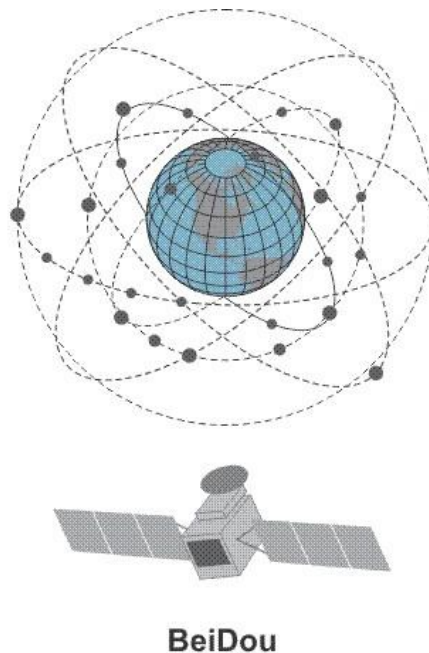
Εικόνα 10. Τροχιές των GALILEO δορυφόρων (Πηγή, GPS for Land Surveyors)

2.2.4 Κινέζικο δορυφορικό σύστημα, BEIDOU

Το BeiDou είναι το σύστημα πλοήγησης της Κίνας, το οποίο βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της κατασκευής. Η κινεζική κυβέρνηση αποφάσισε να κατασκευάσει το δικό της παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης, το 1980. Από το 2000, το BeiDou παρέχει τις υπηρεσίες του στην Κίνα και τις γειτονικές περιοχές, καλύπτοντας μία έκταση περίπου 120 μοίρες γεωγραφικό μήκος στο Βόρειο Ημισφαίριο. Το Compass έρχεται ως μια δεύτερη γενιά του Δορυφορικού Συστήματος Πλοήγησης BeiDou, το οποίο έχει προγραμματιστεί να παρέχει υπηρεσίες πλοήγησης σε παγκόσμια κλίμακα έως το 2020.

Το Compass θα διατίθεται για πολιτική χρήση, με ακρίβεια στον εντοπισμό θέσης της τάξης των 10 μέτρων, περίπου 20 nanosecond ακρίβεια στον χρόνο και 0.2 m/s στην ταχύτητα. Το Compass θα διατίθεται επίσης για στρατιωτική χρήση και εξουσιοδοτημένους χρήστες, παρέχοντας υψηλότερη ακρίβεια. Ο δορυφορικός σχηματισμός του Compass θα αποτελείται από 35 δορυφόρους, εικόνα 11.





Η διαφορά ανάμεσα στον χρόνο BeiDou και UTC είναι μικρότερη από 50 ns. Το σύστημα συντεταγμένων είναι το Κινεζικό Γεωδαιτικό Σύστημα Συντεταγμένων 2000. Είναι σύμφωνο με το ITRF στην κλίμακα των 5 cm (Hecimovic 2013).



Εικόνα 11. Τροχιές των BEIDOU δορυφόρων (Πηγή, GPS for Land Surveyors)

Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

Πίνακας 2. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων GNSS

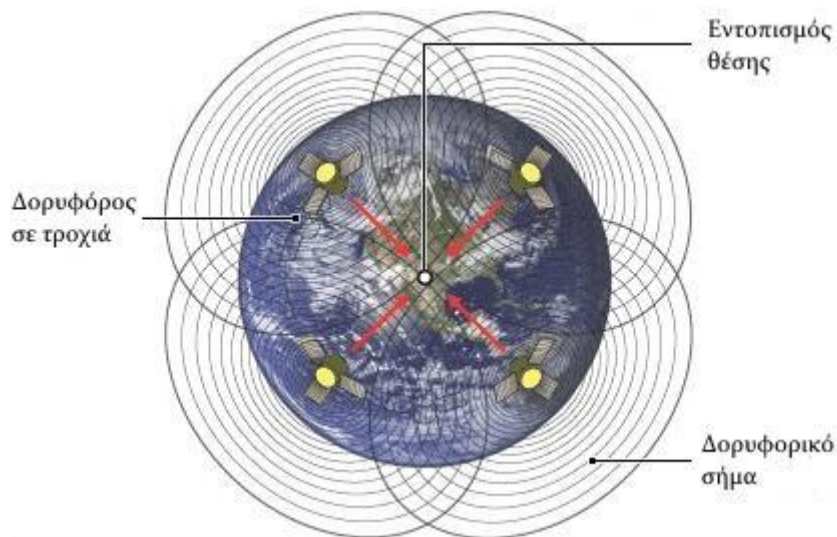
| Χαρακτηριστικά | GPS | GLONASS | GALILEO | BEIDU |
|---------------------------------|---|---|--|---|
| |  |  |  |  |
| Πρώτη Εκτόξευση | Φεβρουάριος 1978 | Οκτώβριος 1982 | Δεκέμβριος 2005 | Απρίλιος 2007 |
| Αριθμός Δορυφόρων σε λειτουργία | 31 | 24 | 22 | 34 |
| Τροχιακά Επίπεδα | 6 | 3 | 3 | 3 |
| Κλίση ως προς τον Ισημερινό | 55° | 64.8° | 56° | 55° |
| Ύψος Τροχιάς | 20180 km | 19100 km | 23 222 km | 21500 km |
| Περίοδος Περιφοράς | 11h 57.96 min | 11h 15.73 min | 14h 4.75 min | 12h 35 min |
| Γεωδαιτικό Σύστημα | WGS-84 | PE-90 | GTRF | CGS2000 |
| Σύστημα Χρόνου | GPS time, UTC | GLONASS time, UTC | Galileo system time | BeiDou System Time (BDT) |

2.3 Προσδιορισμός θέσης

Με την χρήση του GNSS πλέον, δεν απαιτείται ορατότητα ούτε καλές καιρικές συνθήκες προκειμένου να πραγματοποιηθούν με επιτυχία οι μετρήσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ανοικτού ορίζοντα μεταξύ δορυφόρων και δέκτη ώστε ο δέκτης να λαμβάνει σήμα από, τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους και ορατοί από κάθε σημείο στη Γη. Κάθε δορυφόρος, στέλνοντας κωδικοποιημένα σήματα (μηνύματα), οριοθετεί την επιφάνεια μίας σφαίρας, όπου ο δορυφόρος βρίσκεται στο κέντρο της.

Τυπικά, τρεις δορυφόροι είναι αρκετοί για να καθοριστεί το γεωγραφικό μήκος, πλάτος και ύψος, με τρεις εξισώσεις. Όλοι οι δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με ατομικά χρονόμετρα που μπορούν να συγχρονιστούν στην κλίμακα του nanosecond. Αυτό όμως δεν συμβαίνει με τους ισχύοντες επίγειους δέκτες, καθώς τα ατομικά ρολόγια είναι δαπανηρά (περισσότερο από \$100.000 το καθένα). Επομένως, οι κατασκευαστές δεκτών χρησιμοποιούν φθηνά ατομικά χρονόμετρα κρυστάλλου. Ωστόσο, 1ns σφάλμα στο συγχρονισμό τους οδηγεί σε σφάλματα στον εντοπισμό θέσης της τάξης των 30 cm.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του συγχρονισμού, ένα τέταρτο δορυφορικό σήμα απαιτείται, έτσι ώστε να υπολογιστεί αυτή η χρονική απόκλιση (Δt). Από μαθηματικής άποψης, για την επίλυση τεσσάρων αγνώστων (x , y , z και Δt), πρέπει να υπάρχουν τέσσερις εξισώσεις. Χρησιμοποιώντας περισσότερους από τέσσερις δορυφόρους, δεν επιτρέπεται μόνο ο υπολογισμός του Δt , αλλά αυξάνεται και η ακρίβεια στον υπολογισμό της θέσης του δέκτη, εικόνα 12.



Εικόνα 12. Βασική αρχή των GNSS συστημάτων η ταυτόχρονη μέτρηση από τουλάχιστον 4 δορυφόρους

Την θέση ενός σημείου μπορούμε να την προσδιορίσουμε είτε *σε πραγματικό χρόνο είτε σε ύστερο χρόνο* και με *απόλυτο ή σχετικό τρόπο*. Επίσης ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να διακριθεί σε σχέση με την κίνηση των δεκτών του σε *στατικό και κινηματικό προσδιορισμό* ανάλογα με το ο δέκτης είναι ακίνητος ή κινείται.

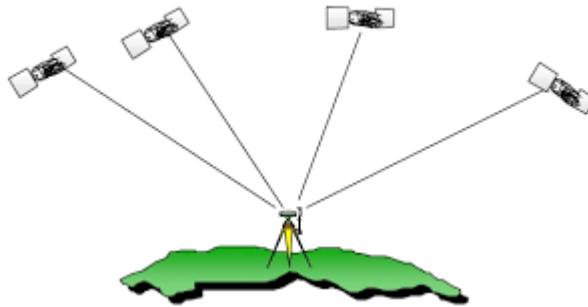
Πιο συγκεκριμένα κατά τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης, προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου μόνο από τον ίδιο τον δέκτη σε πραγματικό χρόνο ως προς ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, όπως το WGS84.

Κατά τον σχετικό προσδιορισμό θέσης, προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο με γνωστές συντεταγμένες WGS84 συστήματος.

Αναγκαία συνθήκη η ταυτόχρονη λήψη δορυφορικών δεδομένων από τους ίδιους δορυφόρους από τους δέκτες.

2.3.1 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης

Με τον όρο απόλυτος προσδιορισμός θέσης εννοείται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων (X,Y,Z,δt) ενός σημείου χρησιμοποιώντας έναν δέκτη, ο οποίος μετράει ταυτόχρονα αποστάσεις προς τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Οι συντεταγμένες του σημείου αυτού προσδιορίζονται από τις εκπεμπόμενες τροχιές και τις μετρήσεις των αποστάσεων (ψευδοαπόσταση). Για τον σκοπό αυτό απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις μετρήσεις ώστε η τέταρτη να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του σφάλματος του χρονομέτρου του δέκτη ως προς τα ατομικά χρονόμετρα των δορυφόρων. Σήμερα υπάρχουν εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή του προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο όπως η πλοήγηση και ναυσιπλοΐας, εικόνα 13.

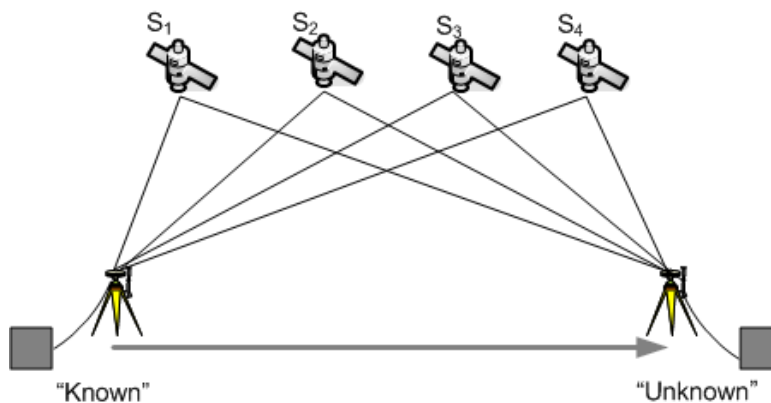


Εικόνα 13. Απόλυτος προσδιορισμός θέσης

2.3.2 Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης αφορά τον προσδιορισμό της θέσης ενός ή περισσότερων σημείων ως προς ένα σημείο με γνωστές συντεταγμένες (σταθμός αναφοράς). Όλα τα όργανα παρακολουθούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων. Ως αποτέλεσμα του σχετικού εντοπισμού είναι ένα διάνυσμα $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ μεταξύ του σημείου με γνωστές συντεταγμένες και των άλλων άγνωστων σημείων. Οι συντεταγμένες των αγνώστων σημείων προσδιορίζονται αν προστεθούν οι συνιστώσες του κάθε διανύσματος $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ στις συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς. Το διάνυσμα αυτό $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ ονομάζεται **βάση (baseline)**.

Επειδή όλοι οι δέκτες παρακολουθούν τους ίδιους δορυφόρους ταυτόχρονα, η επίδραση των περισσότερων σφαλμάτων (ατμοσφαιρικά, χρονόμετρα κ.α.) είναι κοινά σε μεγάλο βαθμό και επομένως το διάνυσμα της σχετικής θέσης είναι απαλλαγμένο σε μεγάλο ποσοστό από τα σφάλματα αυτά. Η παραδοχή ότι τα σφάλματα είναι κοινά εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων. Αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη των 15km τότε τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροπόσφαιρα, ιονόσφαιρα) μπορούν να θεωρηθούν κοινά και να απαλειφθεί το μεγαλύτερο μέρος αυτών. Αν όμως οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων είναι μεγαλύτερες των 15km τότε απαιτείται να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μοντέλα διορθώσεων των σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις GNSS. Παρακάτω φαίνεται η διάταξη δορυφόρων - δέκτη σε σχετικό εντοπισμό θέσης, εικόνα 14.



Εικόνα 14. Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Στον σχετικό προσδιορισμό θέσης επιτυγχάνεται με υψηλή ακρίβεια η σχετική θέση ανάμεσα στους δύο δέκτες, δηλαδή το διάνυσμα βάσης. Εξαιτίας της ταυτόχρονης λήψης από τουλάχιστον δύο δέκτες και με την χρήση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών είναι δυνατή η απαλοιφή-ελαχιστοποίηση συστηματικών σφαλμάτων και η επίτευξη υψηλής ακρίβειας αποτελεσμάτων της τάξεως των 1-2 ppm. Αντίθετα, κατά τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης η παρατήρηση μεμονωμένων σημείων δεν μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα και ο προσδιορισμός των συντεταγμένων είναι χαμηλότερης ακρίβειας.

2.4 Δορυφορικό σήμα GPS

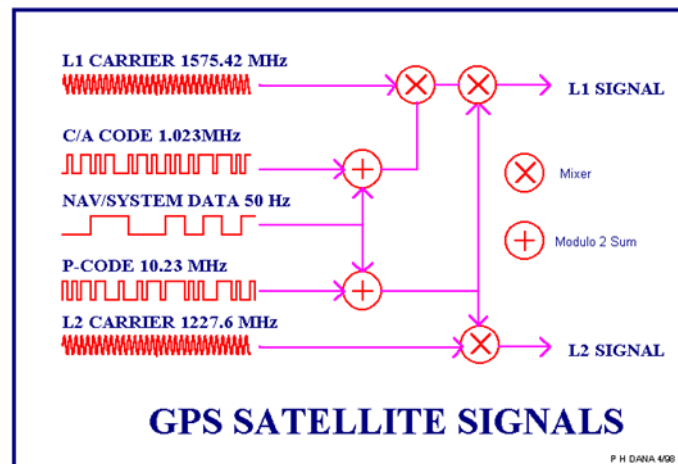
Το ατομικό ρολόι του δορυφόρου, εκτός από τη διατήρηση της κλίμακας του χρόνου, παράγει μια θεμελιώδη συχνότητα την $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$. Το σύνθετο αυτό σήμα βασίζεται σε δυο φέρουσες συχνότητες ή κύματα φορείς $L1, L2$ με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$L1 = 154, f_0 = 154 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz} \ \& \ \lambda_1 = 19,03 \text{ cm}$$

$$L2 = 120, f_0 = 120 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz} \ \& \ \lambda_2 = 24,42 \text{ cm}$$

Στις φέρουσες αυτές συχνότητες προστίθενται κώδικας τυχαίου θορύβου PRN, C/A κώδικας και ο P κώδικας. Ο κώδικας C/A προστίθεται στην συχνότητα $L1$ και ο P που διαμορφώνεται και στις δυο συχνότητες $L1, L2$, εικόνα 15.

Πέραν των δύο συχνοτήτων χρησιμοποιούνται διάφοροι γραμμικοί συνδυασμοί για την απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων, όπως είναι η $L3$ συχνότητα για την εξάλειψη του φαινομένου της ιονοσφαιρικής διάθλασης (βλ. 2.5.1, Ατμοσφαιρικές επιδράσεις).



Εικόνα 15. Δορυφορικό σήμα GPS

Ο κώδικας C/A είναι ανοιχτός και διατίθεται ελεύθερα, ενώ ο κώδικας P είναι κρυπτογραφημένος και διατίθεται μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες που ανήκουν σε υπηρεσίες προσδιορισμού των συντεταγμένων με μεγάλη ακρίβεια. Πρόκειται για κώδικες από επαναλήψεις δυαδικών ακολουθιών, δηλαδή των ψηφίων 1 και 0, σε φαινομενικά τυχαία σειρά, με μεγάλη περίοδο άρα και διάρκεια. Δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και για αυτό προστίθενται στις φέρουσες συχνότητες.

Στις φέρουσες συχνότητες των 50 MHz διαμορφώνονται και τα μηνύματα πλοήγησης ή ναυσιπλοΐας ή ακόμα και μηνύματα δεδομένων για την παροχή πρόσθετων πληροφοριών όπως είναι τα στοιχεία της τροχιάς των δορυφόρων (δορυφορική εφημερίδα). Περιέχει τις παραμέτρους για το συγχρονισμό των ρολογιών, πληροφορίες για την διαθεσιμότητα των δορυφόρων (almanac), στοιχεία, για τυχόν αποκλίσεις, για τις τροχιές των δορυφόρων εξαιτίας περιοδικών και κοσμικών ανωμαλιών από τη μέση ελλειπτική τροχιά Kepler και υπολογισμοί για την εκτίμηση της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης αλλά και των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων.

Τέλος η συχνότητα των κυμάτων φορέων επιλέχθηκε βάση κάποιων παραμέτρων. Αρχικά, τα πιο υψηλόσυχνα σήματα από τα επιλεχθέντα, παρουσιάζουν έντονη απόσβεση κατά την διέλευση τους στην τροπόσφαιρα και έντονα φαινόμενα ανάκλασης στην ιονόσφαιρα. Αντίθετα τα πιο χαμηλόσυχνα σήματα έχουν την τάση των πολλαπλών ανακλάσεων.

2.5 Επιδράσεις που υπεισέρχονται στις παρατηρήσεις

Οι μετρήσεις GPS πραγματοποιούνται βάση μετρητικών κωδικών και μηνυμάτων πλοήγησης σε ημιτονοειδή κύματα. Πάντοτε όμως στις μετρήσεις υπεισέρχονται συστηματικές επιδράσεις που αλλοιώνουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Για την επίτευξη μετρήσεων απόστασης με ακρίβεια, πρέπει να δοθεί πολύ μεγάλη προσοχή στις μετρήσεις του χρόνου του ταξιδιού των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Καθότι το δορυφορικό μας σήμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός που πολλαπλασιαζόμενη με το χρόνο του ταξιδιού ισούται με την απόσταση δορυφόρου – δέκτη. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα 1ms(0,001 sec) επιφέρει ένα σφάλμα 300km κατά την μέτρηση της απόστασης δορυφόρου με δέκτη.

Διακρίνουμε μια σειρά επιδράσεων, συστηματικού κυρίως χαρακτήρα, που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία σφάλματα, που προφανώς είναι αναπόφευκτά, κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, ονομάζονται συνήθως ως θόρυβος.

Οι επιδράσεις GPS μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

a) Επιδράσεις που σχετίζονται με τους δορυφόρους.

Το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας ή τροχιάς, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας.

b) Επιδράσεις που σχετίζονται με τους δέκτες.

Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας, το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης ή ο θόρυβος, το σφάλμα εξαιτίας της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά την επίλυση μιας βάσης.

c) Επιδράσεις που σχετίζονται με την διάδοση του σήματος.

Τα ατμοσφαιρικά σφάλματα(τροποσφαιρικά και ιονοσφαιρικά), το σφάλμα πολυανάκλασης, το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων, καθυστερήσεις στα κυκλώματα δορυφόρου και δέκτη.

2.5.1 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Το δορυφορικό σήμα δεν διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα. Στο διάστημα το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με τη ταχύτητα του φωτός, αλλά αυτή η ταχύτητα μειώνεται κατά την διέλευσή του στην ιονόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα. Για την ακρίβεια, η ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων προκαλεί καθυστέρηση και αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του δορυφορικού σήματος (φαινόμενο διάθλασης), με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σφάλματα κατά τον υπολογισμό των αποστάσεων δορυφόρων-δεκτών. Η επίδραση του παραπάνω φαινομένου είναι ισχυρότερη για δορυφόρους που σχηματίζουν μικρή γωνία με τη διεύθυνση του οριζοντα , εικόνα 16.

Ιονοσφαιρικές επιδράσεις

Το δορυφορικό σήμα δεν διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα. Στο διάστημα το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με τη ταχύτητα του φωτός, αλλά αυτή η ταχύτητα μειώνεται κατά την διέλευσή του στην ιονόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα.

Στην ιονόσφαιρα σε ύψος 50 έως 1000 km πάνω από τη γη, μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων και θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια σχηματίζονται από την ιονίζουσα δύναμη του ήλιου. Τα ηλεκτρόνια και ιόντα συγκεντρώνονται σε τέσσερα αγώγιμα στρώματα στην ιονόσφαιρα.

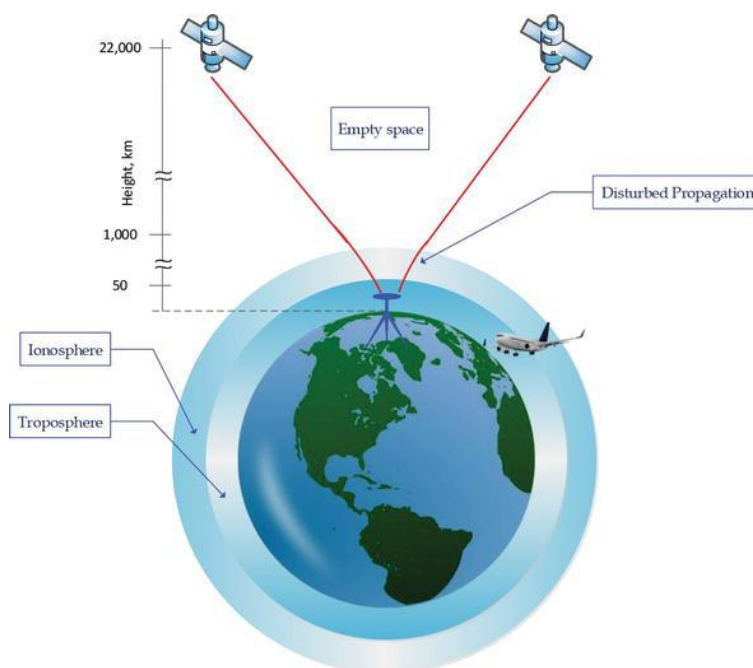
Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

Αυτά τα στρώματα διαθλούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από τους δορυφόρους, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος.

Οι τυπικές διακυμάνσεις της ταχύτητας, περνώντας στην ιονόσφαιρα, για χαμηλές και υψηλές συχνότητες είναι γνωστές για κανονικές συνθήκες και μπορούν να ληφθούν υπόψη. Ωστόσο αστικοί δέκτες δεν είναι σε θέση να διορθώσουν απρόβλεπτες αλλαγές χρόνου εκτέλεσης όπως για παράδειγμα έναν ισχυρό ηλιακό άνεμο.

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση είναι ανάλογη της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας τους καθώς διασχίζουν την ιονόσφαιρα. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με χαμηλότερες συχνότητες επιβραδύνονται περισσότερο από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με υψηλότερες συχνότητες. Επίσης μεταβάλλεται έντονα κατά τη διάρκεια μια μέρας, όπου σημειώνει σταδιακή αύξηση με την ανατολή του ήλιου και κορυφώνεται τις μεσημβρινές ώρες και μειώνεται την νύχτα όπου σταματά ο ιονισμός.

Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιούμε δύο τουλάχιστον συχνότητες (L) στο σήμα GPS, αφού με δέκτες διπλής συχνότητας το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί ουσιαστικά να απαλειφθεί με την χρήση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών πρωτογενών παρατηρήσεων των δύο φορέων, είτε ψευδοαποστάσεων από κώδικες είτε φάσεων.



Εικόνα 16. Διάθλαση του δορυφορικού σήματος κατά την διέλευση του στην ιονόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα. (Karaim 2018))

Τροποσφαιρικές επιδράσεις

Η τροπόσφαιρα είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και μεταβλητού πάχους. Εκτείνεται μέχρι το ύψος των 16km στον ισημερινό και 9km στους πόλους. Συνήθως περιλαμβάνει και ένα τμήμα της στρατόσφαιρας και έτσι θεωρείται ότι εκτείνεται μέχρι σε ύψος 50km πάνω από την γήινη επιφάνεια.

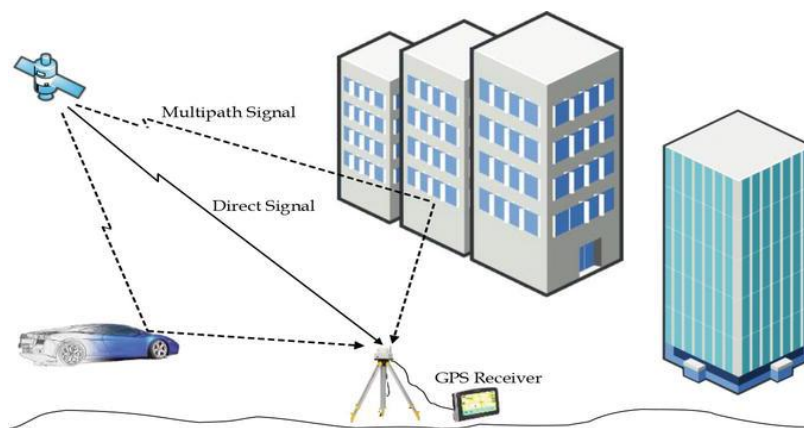
Το τροποσφαιρικό σφάλμα οφείλεται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις υδρατμών στην τροπόσφαιρα και διαθλούν το δορυφορικό σήμα. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη πίεση και την υγρασία.

Σε αντίθεση με το ιονοσφαιρικό σφάλμα, το τροποσφαιρικό επιδρά το ίδιο στους κώδικες και στις φάσεις ανεξαρτήτως την συχνότητα των φορέων επομένως δεν είναι δυνατή η απαλοιφή του με την χρήση δύο συχνοτήτων.

Αν και το τροποσφαιρικό σφάλμα είναι σε μέγεθος μικρότερο από το ιονοσφαιρικό, εντούτοις δε μπορεί να εξαλειφθεί με υπολογιστικό τρόπο.

2.5.2 Επιδράσεις λόγω πολυανάκλασης

Οι επιδράσεις της πολυανάκλασης εμφανίζονται όταν το δορυφορικό σήμα δε λαμβάνεται απευθείας από το δορυφόρο, αλλά αφού πρώτα έχει ανακλαστεί σε διάφορες επιφάνειες γύρω από την κεραία. Επιφάνειες που ανακλούν το δορυφορικό σήμα μπορεί να είναι το νερό, γειτονικά κτίρια ή μεγάλες μεταλλικές επιφάνειες. Η πολυανάκλαση του σήματος δημιουργεί θόρυβο και συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις, εικόνα 17.



Εικόνα 17. Ανάκλαση δορυφορικού σήματος σε επιφάνειες γύρω από την κεραία. Line-of-sight (απευθείας) and multipath (πολυανάκλαση.) (Karaim 2018)

Για τον περιορισμό της πολυανάκλασης δίνεται προσοχή στην επιλογή της θέσης της κεραίας, απομακρυσμένη από πιθανές επιφάνειες ανάκλασης και όσο γίνεται πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης συστήνεται η χρήση ειδικού τύπου κεραίας ώστε να μειώνει την επίδραση της πολυανάκλασης του. Τέλος κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, αν υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης του συστηματικού σφάλματος της πολυανάκλασης.

2.6 Σχετικιστικές επιδράσεις

Είναι βέβαιο ότι οι σχετικιστικές επιδράσεις επηρεάζουν τις μετρήσεις κάθε συστήματος πλοήγησης και δίχως την μελέτη αυτών κάθε σύστημα GNSS θα είχε αποτύχει. Όλα τα συστήματα GNSS χρησιμοποιούν εξισώσεις διορθώσεων ώστε να εξαλείψουν τις σχετικιστικές επιδράσεις.

Παρακάτω παρατίθενται οι σημαντικότερες συνέπειες της Γενικής και της Ειδικής Θεωρίας της σχετικότητας που επιδρούν στις μετρήσεις των GNSS.

Συνέπειες της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας:

1. Σχετικότητα του ταυτόχρονου

Κάθε σύστημα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων) έχει τον δικό του χρόνο· μια χρονική ένδειξη δεν έχει νόημα παρά μόνον εάν δηλώσουμε το σύστημα σύγκριση που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του χρόνου (Ashby 2003)

2. Φαινόμενο Sagnac

Σε ένα μη αδρανειακό σύστημα όπως η Γη, η ταχύτητα του φωτός δεν είναι σταθερή καθώς η Γη είναι ένα περιστρεφόμενο σύστημα. Οι διορθώσεις που σχετίζονται με την περιστροφή της γής ονομάζονται διορθώσεις Sagnac (Ashby 2003)

3. Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler αναφέρεται γενικά στη μεταβολή της συχνότητας των κυμάτων που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής ως προς τη συχνότητα που εκπέμπει μία πηγή όταν ο παρατηρητής και η πηγή κινούνται ο ένας ως προς τον άλλο.

Συνέπειες της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας

1. Διαστολή του χρόνου λόγω θέσης (απόστασης) από φρέαρ βαρυτικού δυναμικού, όπως αυτό που προκαλεί η Γη. Η διαστολή οφείλεται στην επιμήκυνση των τοπικών γεωδαισικών λόγω καμπύλωσης του χωροχρόνου εξ αιτίας της ύπαρξης μάζας (βαρύτητας).

2. Μετατόπιση συχνότητας Red-shift ενός του μεταδιδόμενου σήματος λόγω διαστολής χρόνου. Το μήκος κύματος του φωτός διαστέλλεται στην κόκκινη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με τρόπο ώστε να φαίνεται μετατοπισμένο στο ΗΜ σήμα διαφοράς βαρυτικού δυναμικού

Σχετικιστικές διορθώσεις εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά στο σύστημα GPS. Η εξίσωση διόρθωσης που χρησιμοποιείται στα GPS για τη σχετικιστική επίδραση στη συχνότητα, περιέχει δύο όρους. Ο πρώτος όρος προκύπτει από την σχετική ταχύτητα μεταξύ του δορυφόρου GPS και του επίγειου δέκτη (Ειδική Θεωρία Σχετικότητας) και ο δεύτερος όρος από την θέση του δορυφόρου ως προς το βαρυτικό φρέαρ της Γης. (Γενική Θεωρία Σχετικότητας).

Σύμφωνα με την Ειδική Σχετικότητα ο παρατηρητής στον σχετικά ακίνητο δέκτη αντιλαμβάνεται τον χρόνο να περνάει βραδύτερα από ότι στον κινούμενο πομπό (δορυφόρο). Αριθμητικά, και όσον αφορά το σύστημα GPS, το σχετικιστικό σφάλμα εξαιτίας της Ειδικής Σχετικότητας επιφέρει μία χρονική υστέρηση της τάξεως των $-7.2\mu\text{s}$ ($-0.000007.2\text{sec}$) κατά την διάρκεια μιας μέρας και όπου $1\mu\text{s}$ αντιστοιχεί σε απόσταση 300m.

Οι δορυφόροι GPS βρίσκονται σε ένα ύψος 20200 km πάνω από την επιφάνεια της γης, επομένως βρίσκεται σε ένα βαρυτικό πεδίο ασθενέστερο από αυτό της επιφάνειας της γης. Σύμφωνα με την Γενική Σχετικότητα και για το προαναφερόμενο ύψος τροχιάς υπεισέρχεται σφάλμα είναι της τάξεως των 45.6 μs κατά την διάρκεια μια μέρας.

Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχετικιστικές επιδράσεις και εφαρμόζοντας αυτή την διόρθωση στην συχνότητα, ο χρόνος μετάδοσης του δορυφόρου GPS επιβραδύνεται κατά 38.4 μs, που συνεπάγεται σε σφάλμα απόστασης μεγαλύτερο των 10 km.

Το σύστημα GLONASS έχει ένα πιο σύνθετο πρότυπο χρόνου/συχνότητας από το GPS, γιατί χρησιμοποιεί μία διαφορετική συχνότητα για τα L1 και L2 φέροντα σήματα. Η μέση συχνότητα των δορυφόρων GLONASS ελαττώνεται προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα σχετικιστικά φαινόμενα κατά -2.18×10^{-3} Hz. Αυτή η τιμή δίνεται για ένα μέσο υψόμετρο τροχιάς ίσο προς 19100 km. (Hecimovic 2013). Στο σύστημα Galileo η σχετικιστική διόρθωση είναι ίδια με του GPS, μόνο που στην εξίσωσή της χρησιμοποιούνται οι παράμετροι της τροχιάς των δορυφόρων του. Το σύστημα Compass δεν προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο αντιμετώπισης των σχετικιστικών επιδράσεων. Παρόλα αυτά για να επιτυγχάνει την απαιτούμενη ακρίβεια, θα πρέπει οπωσδήποτε να εφαρμόζονται σχετικιστικές διορθώσεις.

2.7 Μέτρηση αποστάσεων

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης θα λάβει ένα μήνυμα δεδομένων το οποίο θα περιέχει τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των δορυφόρων, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου καθώς και τα συστηματικά σφάλματα.

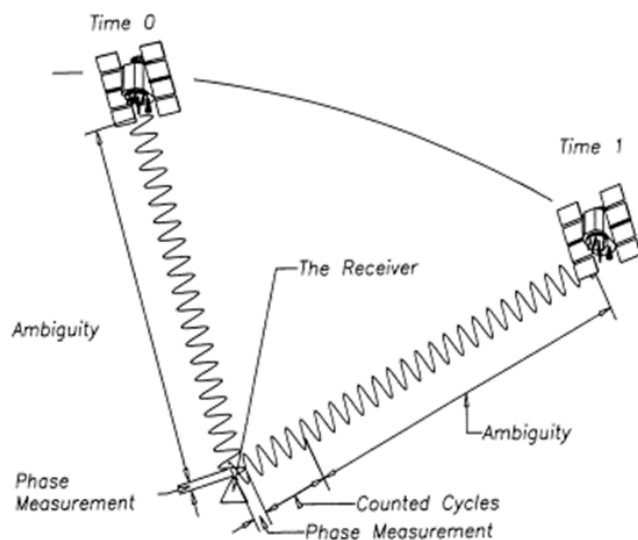
Οι μετρήσεις με δορυφορικό σύστημα εντοπισμού διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- σε μετρήσεις ψευδοαποστάσεων από μετρήσεις στους κώδικες και
- σε μετρήσεις φάσεων της φέρουσας συχνότητας.

Στις μετρήσεις των ψευδοαποστάσεων ο δέκτης δέχεται το σήμα, συγκρίνει τον λαμβανόμενο κώδικα με ένα αντίγραφο που παράγει ο ίδιος και τελικά ταυτίζει το σήμα. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται προσεγγίζει το 1 m για τον P-κώδικα και τα 3-5 m για τον C/A-κώδικα. Αυτή η απόσταση ονομάζεται ψευδοαπόσταση γιατί δεν περιλαμβάνει την χρονική ολίσθηση μεταξύ χρονόμετρων δέκτη και δορυφόρου και η οποία προστίθεται σαν επιπλέον άγνωστος στην εξίσωση υπολογισμού εικόνα 19.

Καθότι δεν είναι δυνατή η μέτρηση της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη, το υπό μελέτη πλέον μέγεθος είναι ο χρόνος. Συγκεκριμένα μετρώντας το χρονικό διάστημα (t) που χρειάζεται το δορυφορικό σήμα να καλύψει την απόσταση δορυφόρου- δέκτη και πολλαπλασιάζοντας το με την ταχύτητα του φωτός (c) έχουμε την ζητούμενη απόσταση (x).

Στις μετρήσεις φάσης μετριέται η διαφορά φάσης του σήματος του δορυφόρου την στιγμή εκπομπής με την φάση του σήματος του δέκτη τη στιγμή της λήψης. Ουσιαστικά γίνεται μία μετατόπιση έτσι ώστε να ταυτιστούν τα σήματα εξαιτίας της μετατόπισης του φαινομένου Doppler στους φορείς L1 και L2. Η διαφορά φάσης, σε κύκλους πολλαπλασιαζόμενη με το μήκος κύματος λ μετατρέπεται σε απόσταση, εικόνα 18.



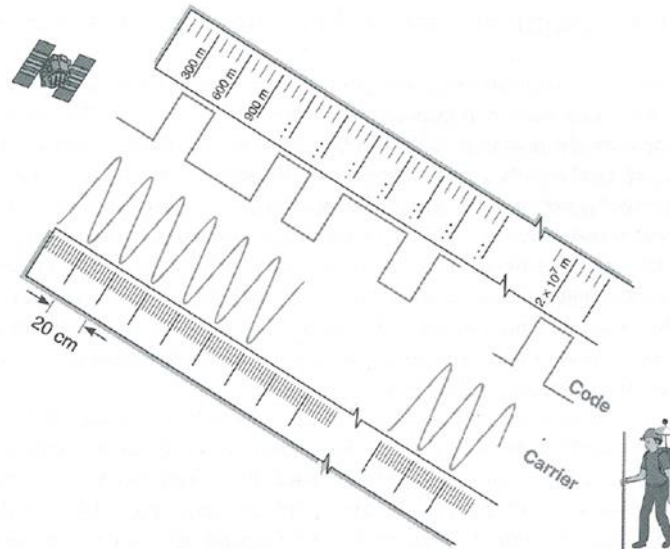
Εικόνα 18. Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης φάσης της φέρουσας συχνότητας.

Τη στιγμή της λήψης ο δέκτης μετράει μόνο το κλασματικό μέρος της φάσης μιας και δε 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. Αυτός ο

Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

ακέραιος αριθμός κύκλων ονομάζεται **ασάφεια φάσης** (phase ambiguity) και παραμένει σταθερός για κάθε ζεύγος δορυφόρου και δέκτη.

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** (cycle slip), 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, εικόνα 19.



Εικόνα 19. Αναπαράσταση των δύο τύπων μετρήσεων, (Pratap Misra, Per Enge 2011)

2.8 Διαφορικές μετρήσεις GPS (DGPS)

Στον σχετικό προσδιορισμό θέσης επιτυγχάνεται με υψηλή ακρίβεια η σχετική θέση ανάμεσα στους δύο δέκτες. Η ταυτόχρονη λήψη από τουλάχιστον δύο δέκτες και με την χρήση κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών είναι δυνατή η απαλοιφή-ελαχιστοποίηση συστηματικών σφαλμάτων και η επίτευξη υψηλής ακρίβειας αποτελεσμάτων της τάξεως των 1-2 ppm. Στην παρούσα διπλωματική εργασία που απαιτείται ακρίβεια χιλιοστού για τον προσδιορισμό θέσης, ακολουθήσαμε τη μέθοδο του σχετικού προσδιορισμού θέσης με διαφορικό GPS (DGPS).

Με την εφαρμογή της προαναφερόμενης μεθόδου σφάλματα συστηματικού χαρακτήρα(π.χ. σφάλματα ωρολογίων δέκτη και δορυφόρου, τροποσφαιρικών και ιονοσφαιρικών επιδράσεων) με τη χρήση διαφορών μεταξύ των παρατηρήσεων, δύναται να μειωθούν ή και να μηδενιστούν. Εξαιτίας αυτού επιτυγχάνεται και η επιθυμητή υψηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Ο διαφορικός εντοπισμός θέσης βασίζεται στην γνώση ενός σημείου αναφοράς γνωστών συντεταγμένων και έπειτα στον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων βάσει αυτού του σημείου. Για κάθε ζεύγος δεκτών προσδιορίζονται με ακρίβεια οι συνιστώσες του διανύσματος μεταξύ τους. Αυτό το διάνυσμα ονομάζεται **διάνυσμα βάσης (baseline)**.

Για βέλτιστα αποτελέσματα μετρούνται περισσότερες από τις ελάχιστες απαιτούμενες βάσεις ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της πλεονάζουσας πληροφορίας, τόσο για τον έλεγχο των σφαλμάτων όσο και για την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως **συνόρθωση δικτύου**.

Οι τεχνικές επεξεργασίας αυτής της μεθόδου αφορούν την επιλογή των γραμμικών συνδυασμών για τον υπολογισμό των διαφορών των παρατηρήσεων και στηρίζεται στην αντικατάσταση των αρχικών δορυφορικών παρατηρήσεων από τις διαφορές τους. Οι συνδυασμοί μπορεί να αφορούν παρατηρήσεις απλών διαφορών μεταξύ δεκτών, παρατηρήσεις απλών διαφορών μεταξύ δορυφόρων, παρατηρήσεις διπλών διαφορών μεταξύ δεκτών και χρόνου, παρατηρήσεις διπλών διαφορών μεταξύ δεκτών και δορυφόρου και παρατηρήσεις τριπλών διαφορών μεταξύ δεκτών, χρόνου και δορυφόρου. Να σημειωθεί ότι πλην τις διαφορές που συμπεριλαμβάνουν τον παράγοντα χρόνο οι υπόλοιπες διαφορές λαμβάνονται με ταυτόχρονες μετρήσεις.

2.8.1 Απλές διαφορές δεκτών

Σε μελέτες μετακινήσεων του στερεού φλοιού της γης, οι οποίες και απαιτούν τη μεγαλύτερη το δυνατόν ακρίβεια, οι διάφορες επιδράσεις παίζουν καθοριστικό ρόλο και πρέπει να μοντελοποιούνται. Το πρώτο μαθηματικό μοντέλο αποτελούν οι απλές διαφορές παρατηρήσεων ενός δορυφόρου k από ταυτόχρονα δύο δέκτες (i, j) την εποχή t_1 . Με αυτό τον συνδυασμό επιτυγχάνεται η απαλοιφή των κοινών σφαλμάτων του δορυφόρου, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου, τα ατμοσφαιρικά σφάλματα για μικρές βάσεις.

Οι απλές διαφορές μπορούν να εφαρμοσθούν είτε στις παρατηρήσεις φάσεων L είτε στις ψευδοαποστάσεις P και στις δύο συχνότητες f_1, f_2 . Στο μαθηματικό μοντέλο των απλών διαφορών για τις φάσεις, παρόμοια ισχύει και για τους κώδικες, δίνεται από τη σχέση 1.

$$L_{ij}^k = L_j^k - L_i^k \quad (1)$$

Σε μικρές βάσεις (<10 km) με τις απλές διαφορές ελαχιστοποιούνται κατά μεγάλο βαθμό τα σφάλματα λόγω της σχετικότητας ($\Delta\rho_{rel}$) και των παλιρροιών του στερεού φλοιού της γης ($\Delta\rho_{tide}$).

2.8.2 Απλές διαφορές δορυφόρων

Αφορούν διαφορές παρατηρήσεων ενός δέκτη από ταυτόχρονα δύο δορυφόρους την εποχή t_1 . Στη σχέση (2) δίνεται το μοντέλο των διπλών διαφορών των φάσεων που ισούται με την απλή διαφορά των φάσεων που σχηματίζεται από τον k δορυφόρο και τον δέκτη i , μείον την απλή διαφορά του l δορυφόρου με τον ίδιο δέκτη. Με αυτό τον συνδυασμό απαλείφεται τα σφάλματα των χρονομέτρων των δεκτών, εικόνα 21.

$$L_i^{kl} = L_i^l - L_i^k \quad (2)$$

2.8.3 Διπλές διαφορές δεκτών – δορυφόρων

Αφορούν διαφορές παρατηρήσεων δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών. Με αυτό τον συνδυασμό επιτυγχάνεται η απαλοιφή των κοινών σφαλμάτων των δεκτών, το σφάλμα των ρολογιού των δεκτών και οι αρχικές φάσεις. Οι διπλές διαφορές φάσης χρησιμοποιούνται στην τελική συνόρθωση μια βάσης ή ενός δικτύου GPS, εικόνα 20.

Στη σχέση (3) δίνεται το μοντέλο των διπλών διαφορών των φάσεων που ισούται με την απλή διαφορά των φάσεων που σχηματίζεται από τον k δορυφόρο και τους δέκτες i, j μείον την απλή διαφορά του l δορυφόρου με τον ίδιο δέκτες.

$$L_{ij}^{kl} = L_{ij}^l - L_{ij}^k = L_j^l - L_i^l - L_j^k + L_i^k \quad (3)$$

Οι διπλές διαφορές είναι το βασικότερο μαθηματικό εργαλείο για την επεξεργασία των δεδομένων GPS και τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου μέσω του σχετικού προσδιορισμού θέσης.

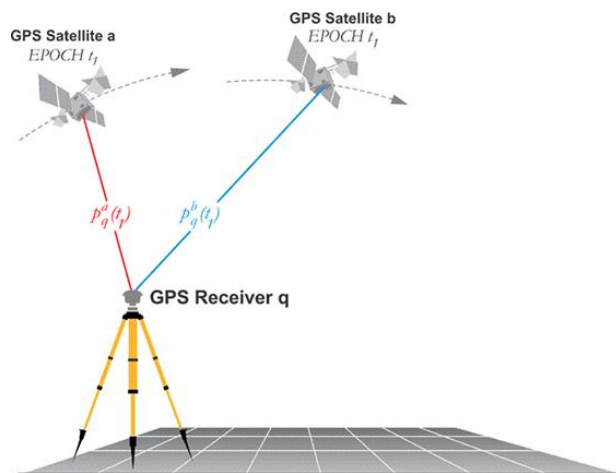
2.8.4 Τριπλές διαφορές

Τελευταίο, είναι το μοντέλο των τριπλών διαφορών (Εικόνα 22) που αφορούν διαφορές παρατηρήσεων δύο διπλών διαφορών φάσεων, όχι όμως ταυτόχρονων αλλά σε διαφορετικές εποχές t_1, t_2 , σχέση (4). Αντίστοιχα ισχύει και για τις ψευδοαποστάσεις από κώδικα.

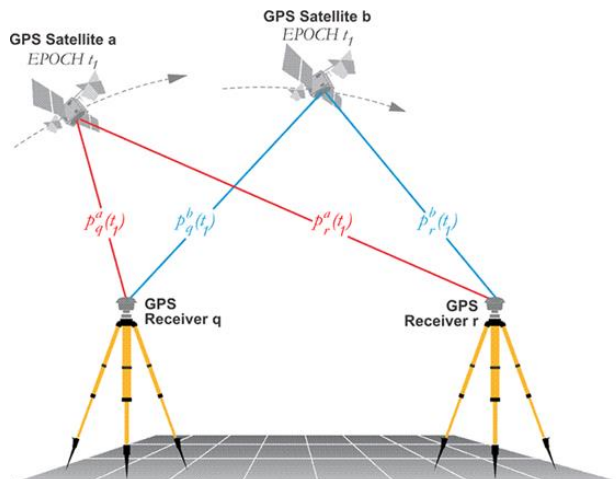
$$L_{ij}^{kl}(t_1, t_2) = L_{ij}^{kl}(t_2) - L_{ij}^{kl}(t_1) \quad (4)$$

Οι τριπλές διαφορές φάσης επιλέγονται για την απαλοιφή των σφαλμάτων του ρολογιού του δορυφόρου και του δέκτη αλλά κυρίως για την εξάλειψη του όρου των ασαφειών φάσης των διπλών διαφορών από το μαθηματικό μοντέλο, η οποία και δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού των κύκλων ολίσθησης.

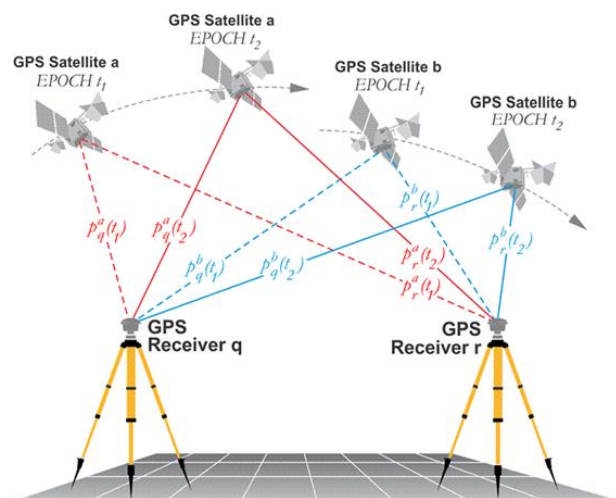
Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)



Εικόνα 21. Απλός γραμμικός συνδυασμός, διαφορές παρατηρήσεων. Πηγή: GPS for Land Surveyors



Εικόνα 20. Διπλός γραμμικός συνδυασμός, διαφορές παρατηρήσεων. Πηγή: GPS for Land Surveyors



Εικόνα 22. Τριπλός γραμμικός συνδυασμός, διαφορές παρατηρήσεων. Πηγή: GPS for Land Surveyors

2.9 Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς

Το εικόνα της γης αλλάζει συνεχώς λόγω των τεκτονικών μετατοπίσεων του φλοιού της, των παλιρροιών στους ωκεανούς και στον στερεό φλοιό, των επιδράσεων από το φορτίο των ωκεανών και της ατμόσφαιρας, των πολικών παλιρροιών καθώς και των περιφερειακών και τοπικών επιδράσεων (Bomford 1980) (Βέης Γ. 2008). Επομένως για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση ενός σημείου πρέπει να οριστούν συστήματα αναφοράς που να λαμβάνουν υπόψιν τους τις παραπάνω επιδράσεις.

Σήμερα χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικές δορυφορικές τεχνικές για τον υπολογισμό των γήινων πλαισίων: το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού GPS, η συμβολομετρία πολύ μεγάλων αποστάσεων (VLBI), η τηλεμετρία Laser προς δορυφόρους (SLR) και το Doppler και η τεχνική DORIS. Οι συντεταγμένες των ITRF είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού όλων των λύσεων από τα κέντρα ανάλυσης και όλων των παρατηρήσεων των δορυφορικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν (<http://itrf.ensg.ign.fr>).

2.9.1 Διεθνές Γήινο Σύστημα Αναφοράς ITRF2008

Τα συστήματα αναφοράς έχουν αναθεωρηθεί δώδεκα φορές ξεκινώντας από το 1988. Η ονομασία των Γήινων Συστημάτων Αναφοράς (ITRFxx) δίνεται από την τελευταία χρονιά που έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα στη συνόρθωση τους. Για παράδειγμα στο ITRF08 έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα έως και το 2008. Τα συστήματα αναφοράς αναθεωρούνται κάθε φορά που το δίκτυο των σταθμών επεκτείνεται ή η περίοδος των παρατηρήσεων αυξάνει.

Το ITRF2008 είναι το αποτέλεσμα επίλυσης και συνόρθωσης δεδομένων από 934 σταθμούς σε σύνολο 580 τοποθεσιών παγκοσμίως. Το ITRF 2008 είναι μια εκλεπτυσμένη εκδοχή του γήινου συστήματος αναφοράς, η οποία στηρίζεται στην επανεπεξεργασία λύσεων και από τις 4 δορυφορικές τεχνικές VLBI, SLR, GPS και DORIS για χρονικά διαστήματα 29, 26, 12.5 και 16 ετών αντίστοιχα.

Η αφετηρία του ITRF2008 έχει οριστεί έτσι, ώστε να έχει μηδενικές μεταθέσεις και ρυθμό μετάθεσης ως προς το μέσο κέντρο μάζας της γης, το οποίο έχει εκτιμηθεί από τις χρονοσειρές SLR (με χρήση 179 σταθμών υψηλής γεωδαιτικής ακρίβειας).

Ο προσανατολισμός του στην εποχή 2005 και ο ρυθμός μεταβολής του συμβαδίζει με αυτόν του ITRF 2005 (Altamimi 2011) .

2.9.2 Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, ΕΓΣΑ 87'

Τα τοπικά γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς χρησιμοποιούνται από πολλές χώρες για την εξυπηρέτηση δικών τους γεωδαιτικών αναγκών. Ένα τοπικό σύστημα αναφοράς αποτελεί και το ελληνικό ΕΓΣΑ'87 (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, 1987). Ως σημείο αναφοράς του ΕΓΣΑ'87 ορίστηκε το κεντρικό βάθρο στο Κέντρο Δορυφόρων του ΕΜΠ, με συντεταγμένες:

| |
|-----------------------------------|
| $\phi=38^{\circ} 04' 33''8107$ |
| $\lambda=23^{\circ} 55' 51''0095$ |
| $h=481,743m$ |
| $N=7,000m$ |

Θεμελιώδης αρχές Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GNSS)

Το ΕΓΣΑ'87 έχει την εφαρμογή του στο ελλειψοειδές αναφοράς GRS80, το ενιαίο (παγκόσμιο) γεωγραφικό σύστημα WGS84 που χρησιμοποιείται και από τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού GNSS.

Το κέντρο ελλειψοειδούς αναφοράς GRS80 έχει μετατοπισθεί ώστε να καλύπτει καλύτερα τον Ελλαδικό χώρο. Οι τιμές μετατόπισης αναθεωρούνται τακτικά. Ενδεικτικά οι τιμές είναι οι εξής:

| |
|-------------------------------|
| $\Delta X = +199,652\text{m}$ |
| $\Delta Y = -74,759\text{m}$ |
| $\Delta Z = -246,055\text{m}$ |

Οι παράμετροι του ελλειψοειδούς αναφοράς σε συνδυασμό με τις συντεταγμένες της αφετηρίας και του αζιμούθιου ορίζουν το λεγόμενο Γεωδαιτικό DATUM. Για να οριστεί ένα Γεωδαιτικό DATUM πρέπει να οριστούν 6 παράμετροι (3 θέσης και 3 προσανατολισμού).

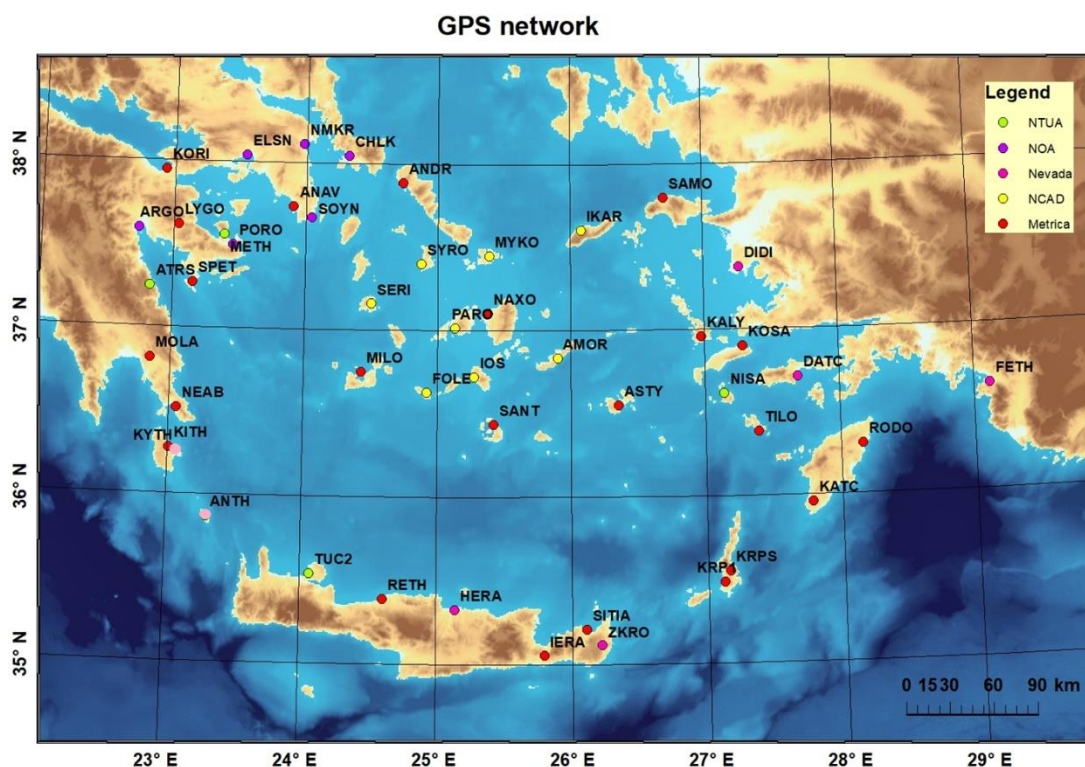
Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία και Ανάλυση GNSS Μετρήσεων

3.1 Δεδομένα περιοχής μελέτης

Η Ελλάδα ξεκίνησε την εγκατάσταση μόνιμων σταθμών το 1995 (Ο σταθμός DION στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου από τη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ) και σήμερα διαθέτει πάνω από 250 σταθμούς καταμετρημένους σε όλη την επικράτεια.

Οι μόνιμοι σταθμοί εγκαθίστανται κατά προτεραιότητα σε ασφαλή μέρη, δημόσια κτίρια κυρίως, όπου είναι διαθέσιμη παροχή ηλεκτρισμού και τηλεφωνική γραμμή για την μεταφορά των δεδομένων.

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν γεωδαιτικά δεδομένα 47 μόνιμων σταθμών GNSS(GPS και GLONASS) καταμετρημένων στην περιοχή των Κυκλάδων, των Δωδεκανήσων, της Κρήτης, της Ανατολικής Πελοποννήσου και της Αττικής (



Εικόνα 23. Το δίκτυο των σταθμών. Όπου, NTUA οι σταθμοί από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, NOA από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Nevada από το γεωδαιτικό εργαστήριο της Νεβάδας, NCAD από το Εθνικό Κτηματολόγιο και με ροζ κουκίδα είναι οι σταθμοί από το ινστιτούτο RING και στον οργανισμό unavco

, Πίνακας 3).

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από σταθμούς του τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του ΕΚΠΑ, του ΕΜΠ, το Εθνικό Κτηματολόγιο, καθώς και από ελεύθερες πηγές, όπως το δίκτυο GNSS του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών NOANET το δίκτυο RING της Ιταλίας, το εργαστήριο γεωδαισίας της Νεβάδα (<http://geodesy.unr.edu>) και τον οργανισμό UNAVCO (<https://www.unavco.org>).

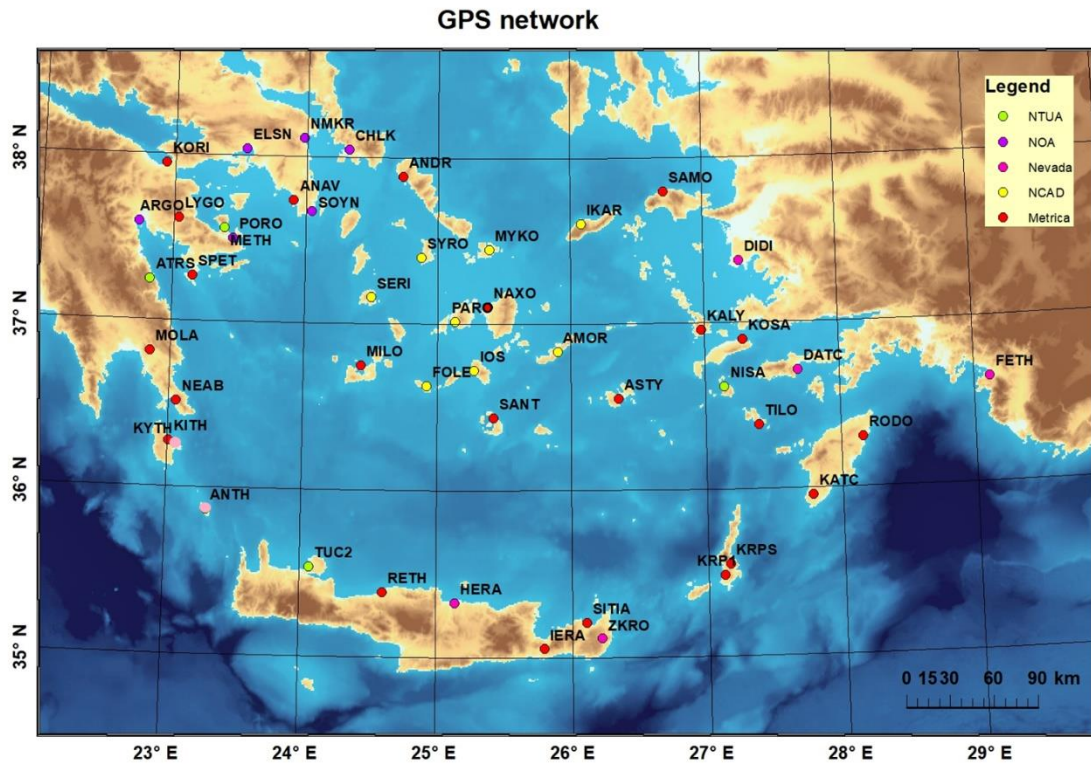
Αναλυτικότερα τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται εδώ περιλαμβάνουν:

Επεξεργασία και Ανάλυση GNSS Μετρήσεων

- Πρωτογενή δεδομένα από είκοσι τέσσερις (24) μόνιμους σταθμούς, που καλύπτουν την περιοχή μελέτης, παρασχέθηκαν από την ιδιωτική εταιρεία METRICA S.A. και συλλέχθηκαν κατά την περίοδο 2011-2018.
- Πρωτογενή δεδομένα, περίπου δέκα μέρες το χρόνο, από οχτώ (8) σταθμούς του Εθνικού Κτηματολογίου που συλλέχθηκαν κατά την περίοδο 2013-2017 (<http://www.hepos.gr>).
- Χρονοσειρές από τέσσερις (4) σταθμούς του γεωδαιτικού εργαστηρίου της Νεβάδα, που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των ετών 2009-2015 και 2014-2018. (http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html)
- Από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Chousianitis K. 2013) παρήγαγαν ταχύτητες από επτά (7) σταθμούς στην Αττική για χρονικό διάστημα περίπου πέντε ετών.
- Διανύσματα ταχύτητας από δύο (2) σταθμούς που λειτουργούν από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) για την περίοδο 2012-2015.
- Ένας (1) σταθμός ανήκει στο ινστιτούτο RING (<http://ring.gm.ingv.it/>) κατά την διάρκεια της περιόδου 2017-2018.
- Ένας (1) στον οργανισμό UNAVCO κατά τη διάρκεια της περιόδου 2011-2017.

Τα πρωτογενή δεδομένα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με το λογισμικό BERNESE v5.2 (Dach 2007) από το οποίο υπολογίστηκαν οι ημερήσιες συντεταγμένες των σταθμών.

Τα δεδομένα των μόνιμων σταθμών μας αποτελούνταν από ημερήσιους φακέλους (RINEX) με ρυθμό καταγραφής των παρατηρήσεων ανά 30 sec.



Εικόνα 23. Το δίκτυο των σταθμών. Όπου, NTUA οι σταθμοί από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, NOA από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Nevada από το γεωδαιτικό εργαστήριο της Νεβάδας, NCAD από το Εθνικό Κτηματολόγιο και με ροζ κουκίδα είναι οι σταθμοί από το ινστιτούτο RING και στον οργανισμό ιαπωνο

Επεξεργασία και Ανάλυση GNSS Μετρήσεων

Πίνακας 3. Περιγραφή των σταθμών του δικτύου
(Όπου ϕ το γεωγραφικό πλάτος και λ το γεωγραφικό μήκος σε μοίρες)

| ΑΑ | Κωδικός | λ (°) | ϕ (°) | Τοποθεσία |
|----|---------|---------------|------------|-------------------|
| 1 | ANAV | 23,91 | 37,74 | Ανάβυσσος |
| 2 | ANDR | 24,74 | 37,89 | Άνδρος |
| 3 | ASTY | 26,36 | 36,55 | Αστυπάλαια |
| 4 | ATRS | 22,84 | 37,24 | Τυρός |
| 5 | DATC | 27,69 | 36,71 | Παράκτια Τουρκίας |
| 6 | DIDI | 27,27 | 37,37 | Παράκτια Τουρκίας |
| 7 | FETH | 29,12 | 36,63 | Παράκτια Τουρκίας |
| 8 | HERA | 25,14 | 35,32 | Ηράκλειο |
| 9 | IERA | 25,80 | 35,05 | Ιεράπετρα |
| 10 | KALY | 26,98 | 36,96 | Κάλυμνος |
| 11 | KATC | 27,78 | 35,95 | Νότια Ρόδου |
| 12 | KORI | 22,93 | 37,94 | Κόρινθος |
| 13 | KOSA | 27,29 | 36,90 | Κως |
| 14 | KRP1 | 27,12 | 35,48 | Κάρπαθος |
| 15 | KRPS | 27,16 | 35,55 | Κάρπαθος |
| 16 | LYGO | 23,04 | 37,62 | Λυγουριό |
| 17 | METH | 23,39 | 37,56 | Μέθανα |
| 18 | MILO | 24,43 | 36,74 | Μύλος |
| 19 | MOLA | 22,85 | 36,81 | Μολάοι |
| 20 | NAXO | 25,38 | 37,10 | Νάξος |
| 21 | NEAB | 23,06 | 36,51 | Νεάπολη |
| 22 | NISA | 27,14 | 36,62 | Νίσυρος |
| 23 | RETH | 24,61 | 35,39 | Ρέθυμνο |
| 24 | RODO | 28,16 | 36,30 | Βόρεια Ρόδου |
| 25 | SAMO | 26,71 | 37,80 | Σάμος |
| 26 | SANT | 25,42 | 36,44 | Σαντορίνη |
| 27 | SITI | 26,11 | 35,21 | Σητεία |
| 28 | SPET | 23,16 | 37,27 | Σπέτσες |
| 29 | TILO | 27,40 | 36,38 | Τήλος |
| 30 | TUC2 | 24,07 | 35,54 | Χανιά |
| 31 | ZKRO | 26,22 | 35,12 | Ζάκρος |
| 32 | ARGO | 22,74 | 37,59 | Άργος |
| 33 | SOYN | 24,05 | 37,67 | Σούνιο |
| 34 | ELSN | 23,54 | 38,04 | Ελευσίνα |
| 35 | NMKR | 23,98 | 38,11 | Νέα Μάκρη |
| 36 | PORO | 23,45 | 37,50 | Πόρος |
| 37 | CHLK | 24,32 | 38,05 | Χαλκίδα |
| 38 | MYKO | 25,39 | 37,45 | Μύκονος |
| 39 | AMOR | 25,90 | 36,83 | Αμοργός |
| 40 | IOS | 25,28 | 36,72 | Ίος |
| 41 | SERI | 24,50 | 37,16 | Σέριφος |
| 42 | SYRO | 24,88 | 37,40 | Σύρος |
| 43 | PARO | 25,13 | 37,02 | Πάρος |
| 44 | IKAR | 26,08 | 37,60 | Ικαρία |
| 45 | FOLE | 24,92 | 36,63 | Φολέγανδρος |
| 46 | ANKY | 23,30 | 35,87 | Αντικύθηρα |
| 47 | KTHA | 23,06 | 36,26 | Κύθηρα |

3.2 Το Πρόγραμμα BERNESE

Πρόκειται για ένα λογισμικό επεξεργασίας δορυφορικών γεωδαιτικών δεδομένων από το πανεπιστήμιο της Βέρνης. Ανήκει στα εμπορικά/ακαδημαϊκά προγράμματα υψηλών προδιαγραφών, υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα και με την δυνατότητα αυτόματης επίλυσης των δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 5.2.

Αρχή πριν από κάθε ενέργεια στο BERNESE είναι η κατασκευή μια καμπάνιας στην οποία θα δημιουργηθούν και θα φιλοξενηθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία. Έτσι στο `url home/GPSDATA` θα δημιουργηθούν οι εξής φάκελοι:

- ATM, περιέχει τις πληροφορίες για τον ιονόσφαιρα και τον τροπόσφαιρα.
- RAW, αποθηκεύονται τα αρχεία RINEX πριν επεξεργαστούν.
- OBS, αποθηκεύονται οι παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε μορφοποίηση BERNESE (σε Binary format).
- STA, περιέχει αρχεία με συντεταγμένες, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τα όργανα GNSS σε κάθε σταθμό.
- OUT, αποθηκεύονται αρχεία με πληροφορίες μετά τον εκτέλεση κάθε επιμέρους προγράμματος, για ενημέρωση του χρήστη και αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων.

Με το πέρασμα του χρόνου η αύξηση των γεωδαιτικών δικτύων επομένως και των δορυφορικών δεδομένων γέννησε την ανάγκη για γρηγορότερες διαδικασίες επίλυσης. Γι' αυτό το λόγο οι νεότερες εκδόσεις του λογισμικού περιλαμβάνουν την μηχανή της αυτόματης επίλυσης των δορυφορικών παρατηρήσεων BPE (Bernese Processing Engine).

3.2.1 BPE (Bernese Processing Engine)

Η μηχανή αυτόματης επίλυσης(BPE) των δορυφορικών δεδομένων απαρτίζεται από δύο σκέλη:

- Το πρώτος σκέλος αφορά το πρόγραμμα `prepareauto.sh` καθώς και τα προγράμματα μετατροπής ημερομηνιών. Ουσιαστικά, αποτελεί το βασικό πρόγραμμα και κάνει όλη την προ-επεξεργασία πριν από την εκτέλεση των κύριων προγραμμάτων του λογισμικού. Είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού `bash`. Το `prepareauto.sh` εκτελείται σε περιβάλλον `Linux` και `MS/DOS`, αλλά στην παρούσα εργασία το λογισμικό εκτελέσθηκε σε περιβάλλον `Linux`.
- Το δεύτερος σκέλος αφορά τα κύρια προγράμματα του Bernese, τα οποία είναι όλα παραμετροποιημένα έτσι ώστε να μην χρειάζεται καμία επέμβαση από τον χρήστη καθ' όλη την διάρκεια της επεξεργασίας.

Πρόγραμμα `prepareauto`

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το πρόγραμμα `prepareauto.sh` εκτελεί συγκεκριμένες εντολές έτσι ώστε να δημιουργήσει ουσιαστικά `output` αρχεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως `input` αρχεία για το BERNESE. Συγκεκριμένα:

- Καλεί τα προγράμματα μετατροπής ημερομηνιών, για προσδιορισμό των θέσεων των σταθμών αναφοράς την τρέχουσα ημερομηνίας βάσει τις αρχικές συντεταγμένες (ημερομηνία αναφοράς 1/1/2005) και την προσδιορισθείσα ταχύτητα του σταθμού.

- Ελέγχει αν έχουν δημιουργηθεί όλοι οι απαραίτητοι φάκελοι της καμπάνιας. Αν όχι, τερματίζει το πρόγραμμα.
- Λαμβάνει από το διαδίκτυο αρχεία:
 - i. για τις ακριβείς τροχιές των δορυφόρων (precise orbits)
 - ii. για την κίνηση του πόλου της Γης
 - iii. πληροφορίες για την ιονόσφαιρα
 - iv. RINEX επιλεγμένων σταθμών GPS
 - v. DCB((Differential Code Biases)
 - vi. αποσυμπιέζει όλα τα αρχεία τα οποία συνέλεξε.

Η λήψη των παραπάνω αρχείων έγινε σε ανάλογες ιστοσελίδες που κυρίως ανήκουν στην υπηρεσία IGS. Η IGS είναι υπεύθυνη για την αρχειοθέτηση και τον διαμερισμό δεδομένων GPS και GLONASS τα οποία δεδομένα τα συλλέγει από υπηρεσίες όπως η CODE. Για τον ακριβή προσδιορισμό των συντεταγμένων, το πρόγραμμα επιλέγει να κατεβάσει δεδομένα μεγάλης χρονικής διάρκειας επεξεργασίας της τάξεως 12-18 ημερών αλλά παράλληλα μεγάλης ακρίβειας της τάξεως 4.5 mm/day για την κίνηση του πόλου και 2.5 cm για τις εφημερίδες των δορυφόρων.

Προγράμματα Bernese

Τα προγράμματα που απαρτίζουν το Bernese είναι τα κάτωθι:

- i. **COOVEL**
Ανάλογα με το σύστημα αναφοράς το οποίο έχουμε επιλέξει, πραγματοποιεί την αναγωγή των συντεταγμένων σε περίοδο μελέτης, τις οποίες και κρατάει σταθερές μέχρι το τέλος της επεξεργασίας.
- ii. **RXOBV3**
Μετατρέπει τα αρχεία από μορφή RINEX σε δυαδική (binary) μορφή. Επίσης δημιουργεί ένα αρχείο .CRD το οποίο περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των σταθμών του δικτύου.
- iii. **CRDMERGE**
Εκτελείται τρεις φορές κατά την διάρκεια της αυτόματης επεξεργασίας και κάθε φορά συγχωνεύει το αρχείο με τις συντεταγμένες των σταθμών του συστήματος αναφοράς με τις προσωρινές συντεταγμένες του τοπικού δικτύου.
- iv. **POLUPD**
Το πρόγραμμα αυτό επεξεργάζεται το αρχείο με την κίνηση του πόλου .ERD και το μετατρέπει τις εβδομαδιαίες πληροφορίες της κίνησης του πόλου σε καθημερινές πληροφορίες.
- v. **PRETAB**
Το πρόγραμμα PRETAB μετατρέπει τις τροχιές των δορυφόρων από το γήινο στο ουράνιο σύστημα αναφοράς.
- vi. **ORBGEN**
Το ORBGEN κατασκευάζει τις 'standard orbits' τροχιές των δορυφόρων με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων καθώς και τα τυπικά σφάλματα αυτών.
- vii. **CODSPP**
Πρόκειται για τον υπολογισμό των διορθώσεων στο χρονόμετρο του δέκτη και ένα ακόμα πιο ακριβές αρχείο συντεταγμένων.

- viii. **SNGDIF**
Το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί απλές διαφορές του κώδικα και της φάσης και τις αποθηκεύει σε αντίστοιχα αρχεία.
- ix. **MAUPRP**
Το πρόγραμμα MAUPRP χρησιμοποιεί ως input τα αρχεία που κατασκευάστηκαν από το SNGDIF με σκοπό να ελέγξει τα δεδομένα για απώλειες κύκλων.
- x. **GPSEST**
Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την επίλυση των ασαφειών με την μέθοδο QIF (για βάσεις με μήκος μεγαλύτερο των 20 km) και με τη μέθοδο SIGMA (για βάσεις με μήκος μικρότερο των 20 km). Έπειτα αποθηκεύει στο φάκελο .OUT τις βάσεις που επιλύθηκαν και το μήκος αυτών και το ποσοστό των ασαφειών που επιλύθηκε. Άλλη λειτουργία του προγράμματος είναι η δημιουργία αρχείων που περιλαμβάνει τις κανονικές εξισώσεις που χρειάζονται στην τελική συνόρθωση του δικτύου και κατά την τέταρτη και τελευταία εκτέλεση του υπολογίζει για κάθε σημείο τους τροποσφαιρικούς παράγοντες που επιδρούν.
- xi. **ADDNEQ2**
Είναι και το τελευταίο πρόγραμμα για τον υπολογισμό των τελικών συντεταγμένων. Χρησιμοποιεί το αρχείο .FIX όπου περιέχονται οι σταθεροί σταθμοί που επιθυμεί ο χρήστης σύμφωνα με το σύστημα αναφοράς. Κατά το στάδιο αυτό το αρχείο εισόδου είναι το αρχείου εξόδου από το GPSEST που περιέχει τις κανονικές εξισώσεις και τέλος οι τελικές συντεταγμένες αποθηκεύονται στο φάκελο STA με την κατάληξη .CRD.

3.3 Πεδίο ταχυτήτων

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων μετατόπισης των σταθμών, χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες λύσεις των μόνιμων σταθμών εφαρμόζοντας το μοντέλο γραμμικής παρεμβολής. Το πρόγραμμα Bernese επιλύει σε καρτεσιανές συντεταγμένες (X,Y,Z). Στην συνέχεια αυτές οι συντεταγμένες μετατράπηκαν σε γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ, h), και τις οποίες χρησιμοποιήσαμε για την δημιουργία χρονοσειρών. Από τις συγκεκριμένες χρονοσειρές υπολογίζεται με βάση την τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων η γραμμική ταχύτητα κίνησης του κάθε σταθμού (βλ. εξίσωση 5).

Για κάθε χρονοσειρά υπολογίζεται η εξίσωση της ευθείας,

$$y = ax + b \quad (5)$$

όπου ο συντελεστής a απεικονίζει την κλίση της ευθείας, και στην προκειμένη την ταχύτητα μετακίνησης, ο συντελεστής b την αρχή της ευθείας και τα y, x τις μετρήσεις.

Κάποιες χρονοσειρές, στις ημερήσιες συντεταγμένες των σταθμών του δικτύου μας, που παρουσιάζουν άλματα ή έντονες αποκλίσεις από την γραμμική κίνηση οφείλονται είτε σε τεκτονικές διεργασίες π.χ. άλμα λόγω σεισμού, ενώ εμφανίζονται και φαινόμενα περιοδικών εποχικών κινήσεων που δεν λαμβάνονται υπόψιν στην την υπολογισθείσα γραμμική ταχύτητα.

Για παράδειγμα, άλματα ή έντονες αποκλίσεις από την γραμμική κίνηση οφείλονται είτε σε τεκτονικές διεργασίες π.χ. άλμα λόγω σεισμού (πχ βλέπε χρονοσειρά NISY) ή να εμφανίζονται και φαινόμενα περιοδικών εποχικών κινήσεων που δεν επηρεάζουν αισθητά την υπολογισθείσα γραμμική ταχύτητα (πχ βλέπε TIL0).

Επίσης κάποιες χρονοσειρές εμφάνισαν ασυνέχειες που οφείλονται στις αλλαγές του εξοπλισμού των μόνιμων σταθμών GNSS ,δέκτης – κεραία, (βλέπε χρονοσειρά RETH).

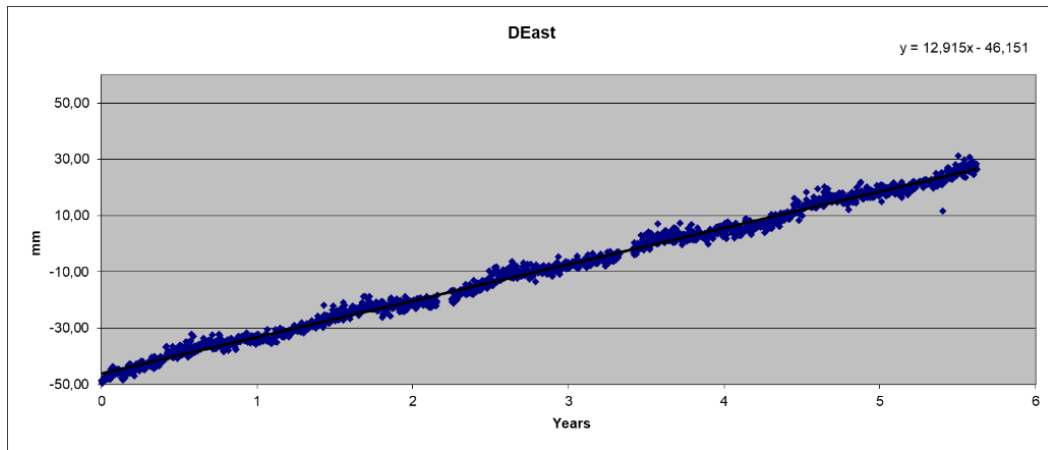
Οι χρονοσειρές των σταθμών DATC, DIDI, FETH (παράλια Τουρκίας) και ZKRO (Αν. Κρήτη) παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά τιμών. Ως έτοιμα αποτελέσματα από το εργαστήριο της Νεβάδα, τιμές των δεκαδικών ψηφίων δίνονται ομαδοποιημένες και ως εκ τούτου εμφανίζουν μεγαλύτερα σφάλματα.

Τέλος οι χρονοσειρές του σταθμού της Σαντορίνης περιορίζονται την περίοδο μετά την έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα 2011-2012 (Lagios 2013) κατά την οποία υπήρξε άνοδος μάγματος κάτω από το ηφαίστειο της Σαντορίνης και η κίνηση της περιοχής δεν περιέγραφε τις ευρύτερες τεκτονικές κινήσεις που είναι το θέμα στην παρούσα εργασία.

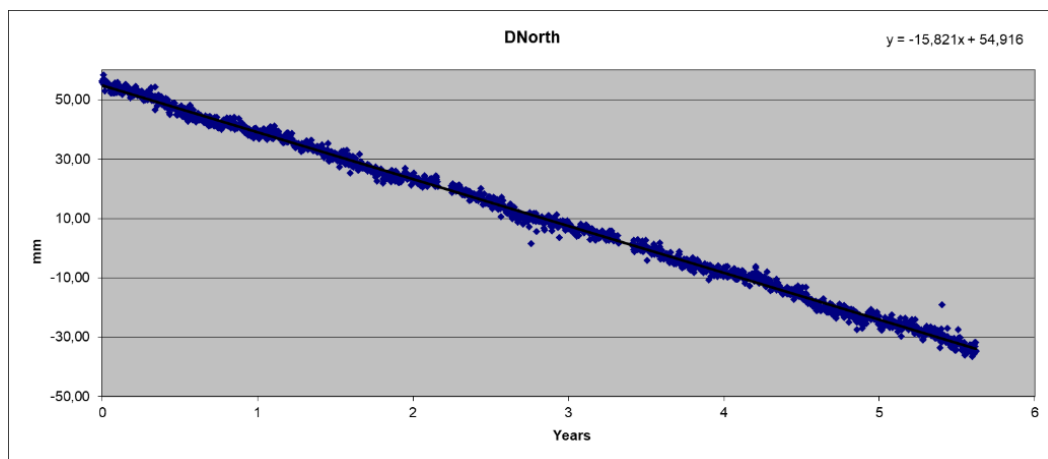
Εξαιτίας των προαναφερθέντων ιδιαιτεροτήτων σε κάποιους σταθμούς, και για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, ο υπολογισμός των ταχυτήτων στηρίχθηκε μόνο σε τιμές συντεταγμένων που περιέγραφαν την σταθερή τεκτονική κίνηση των σταθμών αυτών.

Οι ταχύτητες που προκύπτουν από τις χρονοσειρές αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς ITRF 2008.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 5 την παράμετρο a με την ταχύτητα V , την παράμετρο b με την εποχή αναφοράς t_0 , τις παρατηρήσεις του άξονα x στον χρόνο t και τις παρατηρήσεις



Εικόνα 24. Χρονοσειρά του σταθμού TILO στην οριζόντια συνιστώσα A-Δ



Εικόνα 25. Χρονοσειρά του σταθμού TILO στην οριζόντια συνιστώσα B-N

του άξονα γ με τις συντεταγμένες $X(t)$ κάθε σημείου σε χρόνο t , έχουμε την εξίσωση

$$X(t) = X(t_0) + (t - t_0)V \quad (6)$$

Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ακρίβειας του μαθηματικού μοντέλου των χρονοσειρών, αποτελεί η τυπική απόκλιση εκτίμησης της ταχύτητας μετατόπισης SD_{vel} .

$$SD_{vel} = \hat{\sigma} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m (\Delta t_i)^2}} \quad (7)$$

Όπου, $\hat{\sigma}$ η μεταβλητότητα αναφοράς.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X(t_i) - (X(t_0) + (\Delta t_i)V))}{n - 2}} \quad (8)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ακρίβεια εκτίμησης της ταχύτητας μετακίνησης βελτιώνεται όσο αυξάνεται το εύρος του χρονικού διαστήματος των δεδομένων.
- Η ακρίβεια εκτίμησης των συντεταγμένων και της ταχύτητας μετακίνησης είναι ανάλογη της μεταβλητότητας αναφοράς, δηλαδή εξαρτάται από την ακρίβεια προσαρμογής του γραμμικού μοντέλου στα σημεία, όπου στην παρούσα περίπτωση είναι οι ημερήσιες συντεταγμένες κάθε σταθμού.

Ακολουθεί ο πίνακας ταχυτήτων μετακίνησης με τα αντίστοιχα σφάλματα καθώς και την περίοδο καταγραφής, των σταθμών του δικτύου μας, πίνακας 4. Όπου, *SD* η τυπική απόκλιση των τιμών των ταχυτήτων, *Period* το χρονικό διάστημα καταγραφής σε χρόνια και *Average* το έτος της μέσης χρονικής στιγμής.

Επεξεργασία και Ανάλυση GNSS Μετρήσεων

Πίνακας 4. Ταχύτητες μετακίνησης των σταθμών του δικτύου.

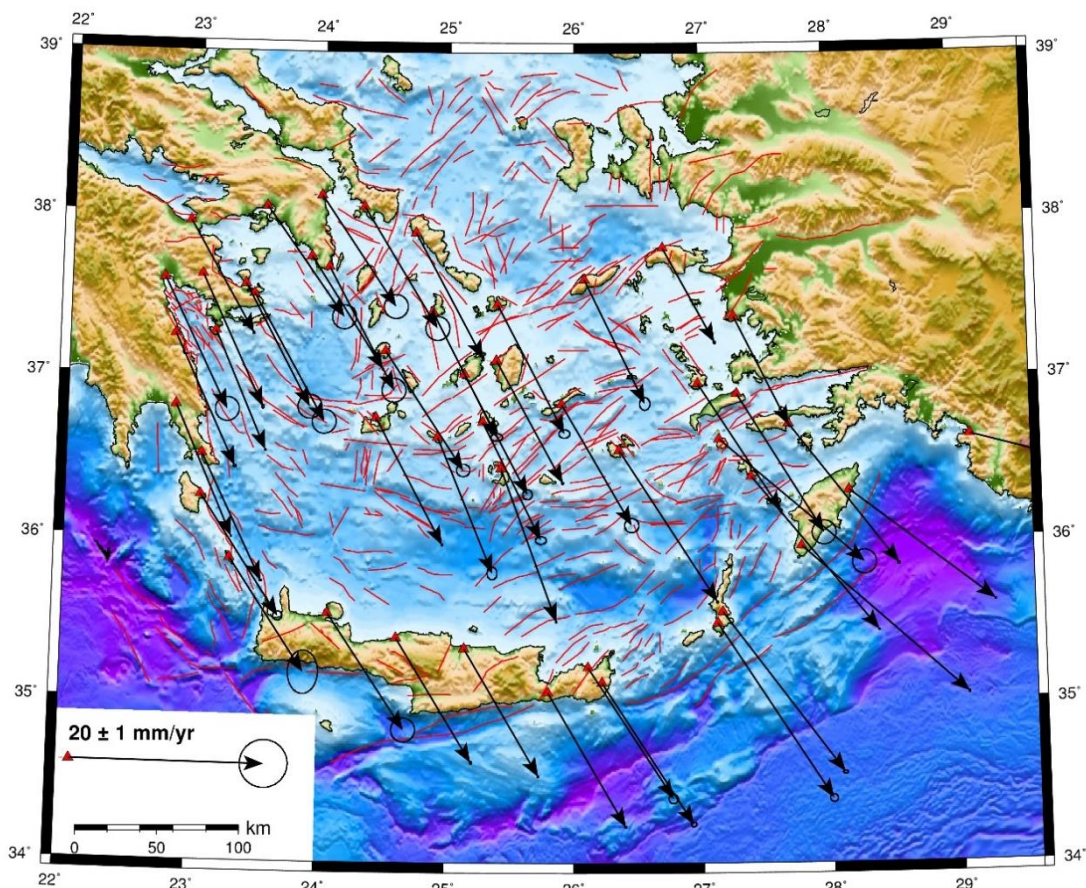
| | Σταθμό | λ(°) | φ(°) | Veast (mm/yr) | Vnorth (mm/yr) | SDeast (mm) | SDnorth (mm) | Period (year) | Average |
|----|--------|-------|-------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|---------|
| 1 | ANAV | 23,91 | 37,74 | 7,46 | -11,50 | 0,033 | 0,039 | 4,21 | 2016 |
| 2 | ANDR | 24,74 | 37,89 | 6,97 | -12,85 | 0,041 | 0,076 | 6,74 | 2015 |
| 3 | ASTY | 26,36 | 36,55 | 10,02 | -15,53 | 0,039 | 0,040 | 4,25 | 2017 |
| 4 | ATRS | 22,84 | 37,24 | 6,40 | -13,50 | 0,070 | 0,045 | 4,12 | 2015 |
| 5 | DATC | 27,69 | 36,71 | 11,13 | -14,46 | 0,041 | 0,046 | 6,83 | 2012 |
| 6 | DIDI | 27,27 | 37,37 | 5,56 | -11,22 | 0,038 | 0,041 | 6,83 | 2012 |
| 7 | FETH | 29,12 | 36,63 | 10,48 | -3,04 | 0,024 | 0,030 | 6,65 | 2012 |
| 8 | HERA | 25,14 | 35,32 | 7,72 | -13,07 | 0,031 | 0,037 | 4,33 | 2015 |
| 9 | IERA | 25,80 | 35,05 | 8,02 | -13,75 | 0,038 | 0,035 | 6,74 | 2015 |
| 10 | KALY | 26,98 | 36,96 | 8,44 | -13,08 | 0,042 | 0,056 | 4,33 | 2015 |
| 11 | KATC | 27,78 | 35,95 | 16,96 | -15,23 | 0,024 | 0,046 | 6,58 | 2014 |
| 12 | KORI | 22,93 | 37,94 | 6,70 | -11,45 | 0,036 | 0,036 | 4,33 | 2015 |
| 13 | KOSA | 27,29 | 36,90 | 8,80 | -14,30 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2010 |
| 14 | KRP1 | 27,12 | 35,48 | 11,71 | -18,06 | 0,166 | 0,158 | 1,52 | 2017 |
| 15 | KRPS | 27,16 | 35,55 | 12,37 | -16,52 | 0,097 | 0,067 | 3,21 | 2014 |
| 16 | LYGO | 23,04 | 37,62 | 6,46 | -13,53 | 0,049 | 0,067 | 3,21 | 2017 |
| 17 | METH | 23,39 | 37,56 | 6,77 | -12,51 | 1,000 | 1,000 | 5,00 | 2015 |
| 18 | MILO | 24,43 | 36,74 | 6,95 | -12,97 | 0,029 | 0,037 | 4,33 | 2015 |
| 19 | MOLA | 22,85 | 36,81 | 6,00 | -13,47 | 0,022 | 0,022 | 7,40 | 2014 |
| 20 | NAXO | 25,38 | 37,10 | 6,86 | -12,53 | 0,037 | 0,033 | 4,33 | 2015 |
| 21 | NEAB | 23,06 | 36,51 | 6,40 | -13,02 | 0,043 | 0,028 | 5,76 | 2015 |
| 22 | NISA | 27,14 | 36,62 | 14,77 | -12,69 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2010 |
| 23 | RETH | 24,61 | 35,39 | 7,83 | -12,74 | 0,032 | 0,052 | 3,59 | 2017 |
| 24 | RODO | 28,16 | 36,30 | 14,78 | -11,48 | 0,023 | 0,029 | 6,25 | 2015 |
| 25 | SAMO | 26,71 | 37,80 | 5,27 | -9,68 | 0,037 | 0,051 | 3,23 | 2015 |
| 26 | SANT | 25,42 | 36,44 | 5,75 | -15,69 | 0,033 | 0,024 | 5,67 | 2016 |
| 27 | SITI | 26,11 | 35,21 | 8,77 | -13,44 | 0,197 | 0,189 | 1,52 | 2017 |
| 28 | SPET | 23,16 | 37,27 | 5,33 | -12,16 | 0,027 | 0,033 | 4,33 | 2015 |
| 29 | TILO | 27,40 | 36,38 | 12,92 | -15,82 | 0,024 | 0,020 | 5,62 | 2013 |
| 30 | TUC2 | 24,07 | 35,54 | 8,00 | -11,90 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 31 | ZKRO | 26,22 | 35,12 | 9,39 | -14,51 | 0,114 | 0,107 | 3,87 | 2016 |
| 32 | ARGO | 22,74 | 37,59 | 6,70 | -13,40 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 33 | SOYN | 24,05 | 37,67 | 6,81 | -12,56 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 34 | ELSN | 23,54 | 38,04 | 8,09 | -11,28 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 35 | NMKR | 23,98 | 38,11 | 7,72 | -11,31 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 36 | PORO | 23,45 | 37,50 | 7,41 | -13,01 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 37 | CHLK | 24,32 | 38,05 | 7,63 | -12,41 | 1,000 | 1,000 | 10,00 | 2015 |
| 38 | MYKO | 25,39 | 37,45 | 6,90 | -13,20 | 0,233 | 0,175 | 4,50 | 2015 |
| 39 | AMOR | 25,90 | 36,83 | 7,19 | -12,40 | 0,299 | 0,295 | 4,50 | 2015 |
| 40 | IOS | 25,28 | 36,72 | 6,01 | -12,05 | 0,229 | 0,161 | 4,50 | 2015 |
| 41 | SERI | 24,50 | 37,16 | 8,09 | -12,17 | 0,281 | 0,259 | 4,50 | 2015 |
| 42 | SYRO | 24,88 | 37,40 | 6,64 | -12,79 | 0,241 | 0,159 | 4,50 | 2015 |
| 43 | PARO | 25,13 | 37,02 | 6,53 | -12,27 | 0,198 | 0,208 | 4,50 | 2015 |
| 44 | IKAR | 26,08 | 37,60 | 6,17 | -12,69 | 0,218 | 0,263 | 4,50 | 2015 |
| 45 | FOLE | 24,92 | 36,63 | 5,72 | -13,91 | 0,208 | 0,264 | 4,50 | 2015 |
| 46 | ANKY | 23,30 | 35,87 | 7,81 | -11,60 | 0,629 | 0,907 | 1,50 | 2018 |
| 47 | KTHA | 23,06 | 36,26 | 8,22 | -12,35 | 0,188 | 0,191 | 1,30 | 2018 |

3.3.1 Χάρτης Ταχυτήτων μετατόπισης ως προς ITRF2008

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ανύσματα ταχυτήτων μετακίνησης ως προς το διεθνές σύστημα αναφοράς ITRF2008, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Για την μελέτη των τεκτονικών ταχυτήτων της περιοχής επιλέχθηκε να τα ανύσματα των ταχυτήτων να παρουσιασθούν, αρχικά, ως προς το ITRF, δεδομένου ότι αποτελεί απόλυτο τρόπο παρουσίασης των ταχυτήτων κίνησης.

Οι σταθμοί παρουσιάζουν νοτιοανατολικές μετακινήσεις ως προς το ITRF08 με μέτρο κατά μέσο όρο 15,5 mm/yr και τυπική απόκλιση και για τις δύο οριζόντιες συνιστώσες $\pm 0,3$ mm/yr. Η διεύθυνση των παρατηρήσεων είναι νοτιοανατολική και με αζιμούθιο κατά μέσο όρο 148° ως προς τον Βορρά.

Τους υψηλότερους ρυθμούς μετατόπισης με μέτρο μεγαλύτερο των 20mm/yr παρουσιάζουν οι σταθμοί της Ρόδου και της Καρπάθου και της Τήλου. Ο σταθμός DATC στα παράκτια της Τουρκίας επίσης σημειώνει τιμές κοντά στα 20 mm/yr. Τις παραπάνω τιμές έδειξαν και οι (S. B. McClusky 2000) (Hollenstein 2008) (Müller 2013). Το αζιμούθιο της διεύθυνσης κυμαίνεται στις 145° κατά μέσο όρο.

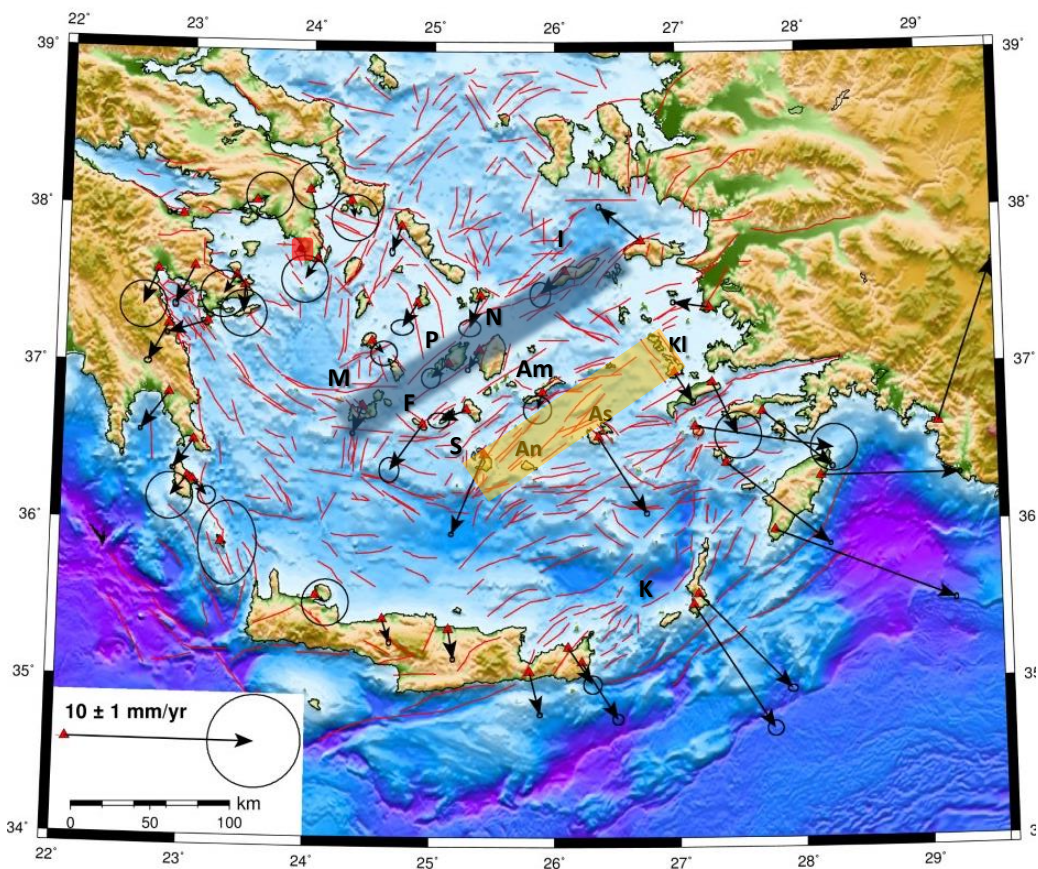


Εικόνα 26. Οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης ως προς ITRF2008

3.3.2 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Ανάβυσσο

Πέρα από την παραγωγή των ανυσμάτων ταχυτήτων ως προς το ITRF, επίσης υπολογίστηκαν οι διαφορικές ταχύτητες αυτών ως προς τους σταθμούς της Αναβύσσου, της Νάξου και της Αστυπάλαιας. Αυτό επιτυγχάνεται αφαιρώντας την ετήσια ταχύτητα των προαναφερόμενων σταθμών αναφοράς από τις ταχύτητες ως προς τον Κόσμο. Έτσι, δημιουργήσαμε το τοπικό πεδίο ταχυτήτων της περιοχής για να εξετάσουμε ενδελεχώς τις τοπικού χαρακτήρα διαφοροποιήσεις των κινήσεων εντός της περιοχής μελέτης.

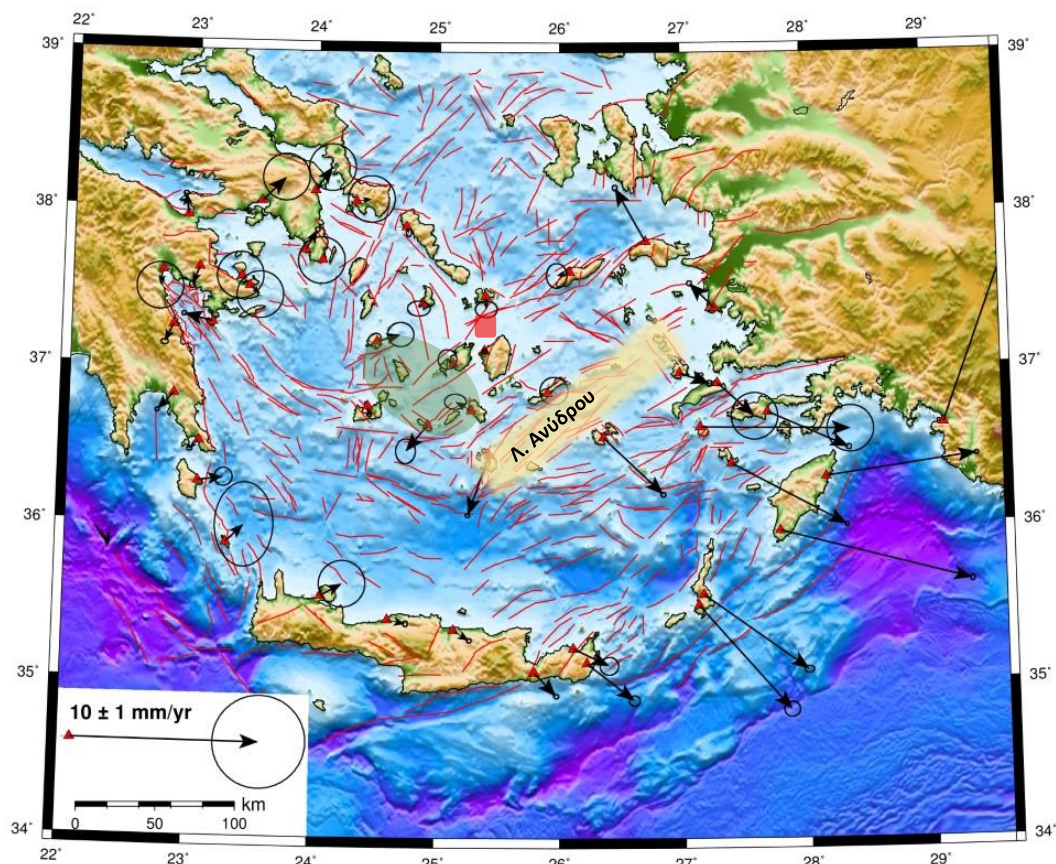
Όπου, παρατηρούμε την αλλαγή της κατεύθυνση της σχετικής κίνησης μεταξύ Κρήτης - Δωδεκανήσων. Οι Κυκλάδες έχουν ΒΑ-ΝΔ κατεύθυνση όπως το ανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου. Στην ανατολική Πελοπόννησο η πλειοψηφία των εκτιμώμενων σχετικών ταχυτήτων συνδέονται με μεγάλα σφάλματα. Ωστόσο, κινηματική συμπεριφορά της περιοχής διαφοροποιείται έντονα μεταξύ των νησιών Ικαρία-Νάξος-Πάρος-Μήλος ώστε να το υποδεικνύει ως όριο ηπειρωτικού τεμάχους και μεταξύ των νησιών Κάλυμνος- Αμοργός- Σαντορίνη-Χριστιανιά Θήρας φανερώνεται δραστική αλλαγή της κινηματικής κατάστασης.



Εικόνα 27. Οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης ως προς την Ανάβυσσο. Με μπλε χρώμα σκιαγραφείται η κινηματική ασυνέχεια μεταξύ των περιοχών: Ικαρία-Νάξος-Πάρος-Μήλος και με κίτρινο χρώμα μεταξύ των περιοχών Κάλυμνος- Αμοργός- Σαντορίνη-Χριστιανιά Θήρας. I:Ικαρία, N:Νάξος, P:Πάρος, M:Μήλος, Kl:Κάλυμνος, Am:Αμοργός, An:Ανάφη, As:Αστυπάλαια, S:Σαντορίνη, K:Κάσος.

3.3.3 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Νάξο

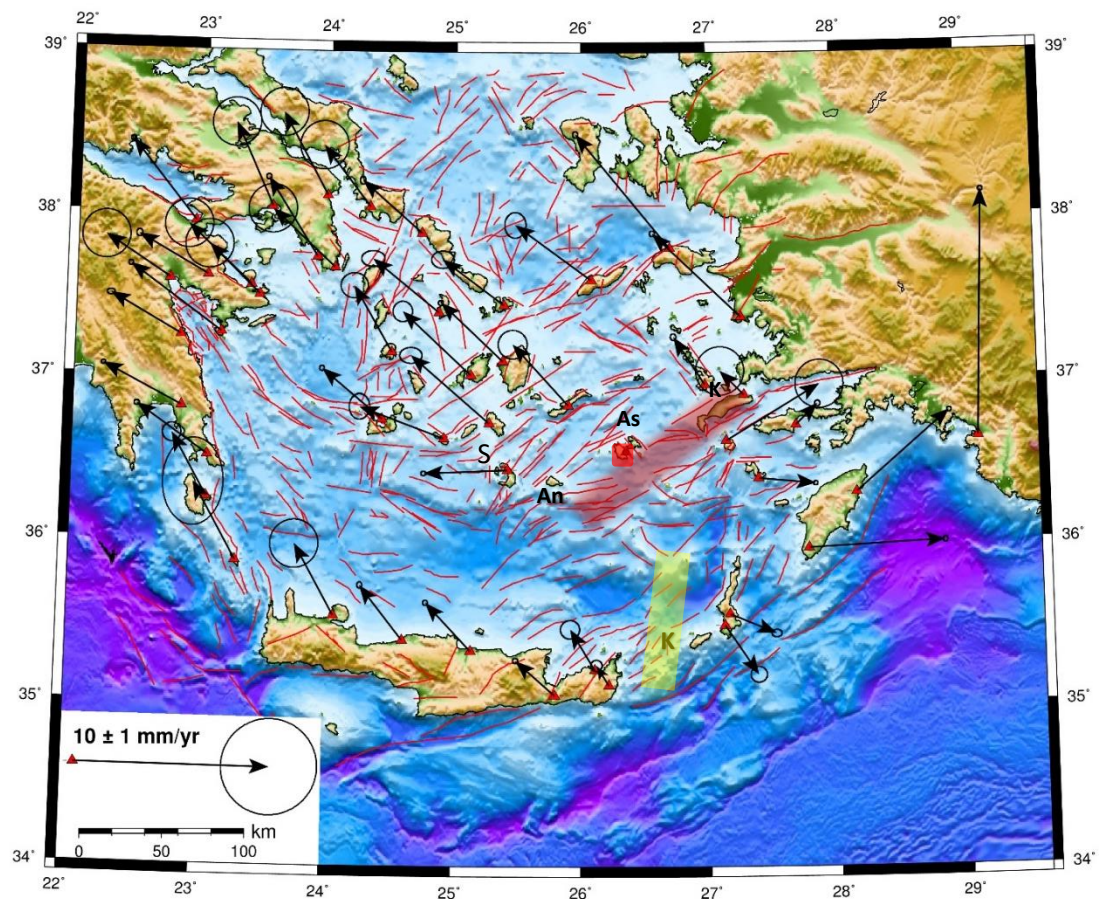
Το τοπικό πεδίο ταχυτήτων ως προς την Νάξο εμφανίζει το νοτιοδυτικό τμήμα της Δωδεκανήσου με έντονα διαφορετική κινηματική συμπεριφορά (μεγάλα μεγέθη ταχύτητας, ΝΑ διεύθυνσης) σε σχέση με το υπόλοιπο δίκτυο. Στην ανατολική Πελοπόννησο οι τέσσερις σταθμοί (LYGO,ATRS,MOLA,NEAB) που παρουσιάζουν αξιόπιστα αποτελέσματα (οι υπόλοιποι δυτικότερα των 24°Ε περιέχουν μεγάλα σφάλματα) εμφανίζουν Β210° - Β220 ° κατεύθυνση κίνησης. Οι Κυκλάδες σημειώνουν μικρές τιμές ταχυτήτων μετατόπισης με διευθύνσεις που περιστρέφονται γύρω από την περιοχή. Τέλος, και ως προς την Νάξο η κινηματική συμπεριφορά της περιοχής διαφοροποιείται έντονα μεταξύ των νησιών Κάλυμνος- Αμοργός- Σαντορίνη-Χριστιανά Θήρας, όπως αυτό αναδείχθηκε και όταν ο σταθμός αναφοράς επιλέχθηκε ο ANAV (βλ. εικ.27), με το νοτιοανατολικό μέρος της περιοχής να οροθετείται από την λεκάνη της Ανύδρου.



Εικόνα 28. Οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης ως προς την Νάξο. Με κίτρινο χρώμα σκιαγραφείται η κινηματική ασυνέχεια μεταξύ των περιοχών: Κάλυμνος- Αμοργός- Σαντορίνη-Χριστιανά Θήρας και με πράσινο κύκλο η περιοχή των Κυκλάδων με την ίδια κινηματική συμπεριφορά.

3.3.4 Τοπικό πεδίο ταχυτήτων-Χάρτης ταχυτήτων μετατόπισης ως προς Αστυπάλαια

Το τοπικό πεδίο ταχυτήτων ως προς την Αστυπάλαια εμφανίζει διαφορετική κινηματική εκατέρωθεν της γραμμής που σχηματίζεται μεταξύ των νησιών Κως- Αστυπάλαια- Ανάφη. Πέραν αυτής της κοινής παρατήρησης αξιοσημείωτη είναι η αντίθετη κατεύθυνση της σχετικής κίνησης μεταξύ Κρήτης – Δωδεκάνησων, ΒΔ και ΝΑ, αντιστοίχως, με τρόπο ώστε να σκιαγραφείται ένα όριο μεταξύ Ανάφης-Κάσου.



Εικόνα 28. Οριζόντιες ταχύτητες μετακίνησης ως προς την Αστυπάλαια. Με κόκκινο χρώμα σκιαγραφείται η κινηματική ασυνέχεια μεταξύ των περιοχών: Κως- Αστυπάλαια- Ανάφη και με κίτρινο μεταξύ των περιοχών: Κάσος- Ανάφη . ΚΙ:Κάλυμνος, An:Ανάφη, As:Αστυπάλαια, S:Σαντορίνη, Κ:Κάσος.

3.4 Πεδίο παραμόρφωσης

Η ανάπτυξη της δορυφορικής γεωδαισίας συνέβαλε δραστικά στην μελέτη της κινηματικής συμπεριφορά του στερεού φλοιού της Γης. Όμως για την κατανόηση της κινηματικής συμπεριφοράς πρέπει πρωτίστως να εκτιμηθεί το πεδίο της παραμόρφωσης.

Με τον όρο παραμόρφωση (strain) περιγράφονται οι αλλαγές της θέσης, του σχήματος και του προσανατολισμού. Πιο απλά, πρόκειται για την μεταβολή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων προς την αρχική τους απόσταση (Means 1990).

Οι επιφανειακές παραμορφώσεις παρουσιάζουν ασυνέχειες στο χώρο (π.χ. ενεργά ρήγματα) και στο χρόνο (π.χ. σεισμοί). Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις, ανάλογα με την κλίμακα στον χώρο και στον χρόνο μπορούν να αντιμετωπισθούν ως ένα συνεχές πεδίο και οι ασυνέχειες να εξετασθούν ξεχωριστά. Για να διερευνηθούν οι ασυνέχειες λεπτομερώς χρειάζεται ένα πυκνό δίκτυο χωρικά, με σημαντικό χρονικό εύρος και με πλήθος μετρήσεων γεωδαιτικού δικτύου.

Επίσης επισημαίνεται ότι η εκτίμηση της επιφανειακής ανηγμένης παραμόρφωσης ξεκινάει από το πεδίο μετατοπίσεων που διαμορφώνεται στην επιφάνεια της γης.

3.4.1 Τανυστής Ρυθμού Παραμόρφωσης

Στην μηχανική συνεχών μέσων, ο τανυστής ρυθμού παραμόρφωσης (TRΠ) αποτελεί φυσικό μέγεθος το οποίο περιγράφει την μεταβολή στον ρυθμό (ταχύτητα) με τον οποίο παραμορφώνεται κάποιο υλικό στην γειτονία κάποιου συγκεκριμένου σημείου και σε δεδομένη χρονική στιγμή. Ο TRΠ μπορεί να ορισθεί ως παράγωγος του τανυστή παραμόρφωσης ως προς τον χρόνο, ή ως η συμμετρική συνιστώσα της (χωρικής) βαθμίδας της ταχύτητας με την οποία παραμορφώνεται (ρέει) ένα υλικό. Η βαθμίδα της ταχύτητας $\nabla \mathbf{v}$ είναι τανυστής από τον οποίο λαμβάνομε:

$$\mathbf{L} = (\nabla \mathbf{v})^T = \begin{bmatrix} \partial v_x / \partial x & \partial v_y / \partial x & \partial v_z / \partial x \\ \partial v_x / \partial y & \partial v_y / \partial y & \partial v_z / \partial y \\ \partial v_x / \partial z & \partial v_y / \partial z & \partial v_z / \partial z \end{bmatrix}$$

Ο οποίος μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί σε άθροισμα ενός συμμετρικού πίνακα \mathbf{e} και ενός αντισυμμετρικού πίνακα \mathbf{w} ως εξής:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}^T)$$

$$\mathbf{w} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} - \mathbf{L}^T)$$

Ο πίνακας \mathbf{e} είναι ο TRΠ και περιγράφει τον ρυθμό μεταβολής των γραμμικών διαστάσεων του υλικού μέσω διάτασης (stretching)/ βράχυνσης (shortening) και διάτμησης (shearing). Ο πίνακας \mathbf{w} ονομάζεται τανυστής περιστροφής και περιγράφει τον ρυθμό περιστροφής του υλικού.

Για τον προσδιορισμό του TRΠ στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος STIB (Strain Tensor from Inversion of Baselines) που αναπτύχθηκε από τους Masson et al., (2014). Ο αλγόριθμος STIB δανείζεται τεχνογνωσία από την μέθοδο παθητικής σεισμικής τομογραφίας, ουσιαστικά αντικαθιστώντας τους χρόνους διαδρομής (σεισμική τομογραφία)

με την απόσταση μεταξύ βάσεων του δικτύου GNSS (baselines) και το μοντέλο ταχύτητας (σεισμική τομογραφία) με το μοντέλο παραμόρφωσης. Σύντομη περιγραφή ακολουθεί κατωτέρω.

Η παρακάτω ανάλυση ισχύει για επίπεδη γεωμετρία και συγκεκριμένα για το οριζόντιο επίπεδο, το οποίο προσεγγίζεται ως σφαιρικός τομέας. Τα διανύσματα βάσεων (baselines) προσεγγίζονται με τόξα μεγάλων κύκλων και οι ταχύτητες θεωρούνται να είναι γωνιακές.

Ορίζεται ως L_{AB} , το μήκος μιας baseline μεταξύ δύο σταθμών A και B και τις αντίστοιχες συνιστώσες ανατολική L_E και βόρεια L_N . Η παράγωγος των L_E και L_N ως προς τον χρόνο ισούται με την διαφορική ταχύτητα μεταξύ των σταθμών A και B κατά την ανατολική και βόρεια διεύθυνση αντίστοιχα. Τότε,

$$\frac{dL_E}{dt} = v_E^B - v_E^A \quad (9)$$

$$\frac{dL_N}{dt} = v_N^B - v_N^A \quad (10)$$

$$\Delta L_E = \text{sgn}(L_E) \frac{dL_E}{dt} \quad (11)$$

$$\Delta L_N = \text{sgn}(L_N) \frac{dL_N}{dt} \quad (12)$$

όπου sgn είναι η συνάρτηση προσήμου (signum) η οποία λαμβάνει τιμές (+1) ή (-1) ανάλογα με την διεύθυνση που έχουμε ορίσει ως θετική.

Το πρόβλημα γραμμικοποιείται θεωρώντας ότι οι σταθμοί A και B απέχουν απειροστικά μικρή απόσταση. Τότε, αν ο σταθμός A βρίσκεται στην θέση \mathbf{r}_A , ο σταθμός B θα βρίσκεται σε απόσταση $\mathbf{r}_A + \mathbf{dr}$ από τον B και η ταχύτητά του θα είναι, σε πρώτη προσέγγιση, συνάρτηση της βαθμίδας της ταχύτητας στον A, $\nabla \mathbf{v}|_A$:

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}_A + \mathbf{dr}) \approx \mathbf{v}(\mathbf{r}_A) + \nabla \mathbf{v}|_A \cdot \mathbf{dr} \quad (13)$$

Κάνοντας χρήση της λεγόμενης μεθόδου μέσου σημείου, η εξίσωση (13) προσεγγίζεται ως:

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}_B) \approx \mathbf{v}(\mathbf{r}_A) + \nabla \mathbf{v}|_{[AB]/2} \cdot \mathbf{dr} \quad (14)$$

όπου $\nabla \mathbf{v}|_{[AB]/2}$ είναι η ταχύτητα του μέσου της απόστασης AB. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (9), (10) και (14),

$$\frac{d\mathbf{L}_{AB}}{dt} \approx \nabla \mathbf{v}|_{[AB]/2} \cdot \mathbf{dr} \quad (15)$$

Ορίζοντας $\mathbf{dr} = dr_1 \mathbf{e}_1 + dr_2 \mathbf{e}_2$, και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (15) σε συνδυασμό με τις (11) και (12) προκύπτει ότι:

$$\Delta \mathbf{L}_{AB} = \begin{pmatrix} \text{sgn}(dr_1) \cdot dr_1 & \text{sgn}(dr_1) \cdot dr_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{sgn}(dr_2) \cdot dr_1 & \text{sgn}(dr_2) \cdot dr_2 \end{pmatrix} \times \nabla \mathbf{v}|_{4 \times 1} \quad (16)$$

όπου $\Delta \mathbf{L}_{AB}$ είναι το διάνυσμα της μεταβολής της απόστασης μεταξύ των σταθμών AB

$$\Delta \mathbf{L}_{AB} = \begin{pmatrix} \Delta L_E \\ \Delta L_N \end{pmatrix}_{AB} \quad (17)$$

και $\nabla \mathbf{v}|_{4 \times 1}$ είναι η βαθμίδα της ταχύτητας εκπεφρασμένη ως άνυσμα, προκειμένου να διευκολύνει τον φορμαλισμό της αντιστροφής:

$$\nabla \mathbf{v}|_{4 \times 1} = \begin{pmatrix} \nabla \mathbf{v}_{11} \\ \nabla \mathbf{v}_{12} \\ \nabla \mathbf{v}_{21} \\ \nabla \mathbf{v}_{22} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Η (16) μπορεί να απλοποιηθεί θέτοντας

$$s = \text{sgn}(dr_1) \text{sgn}(dr_2) \quad (19)$$

και ορίζοντας

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} s|dr_1| & s|dr_2| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s|dr_1| & s|dr_2| \end{pmatrix} \quad (20)$$

ώστε τελικά,

$$\Delta \mathbf{L}_{AB} = \mathbf{g} \nabla \mathbf{v} \quad (21)$$

Στην εξίσωση (21) μπορεί πλέον να αναγνωρισθεί το άνυσμα δεδομένων ως $\Delta \mathbf{L}_{AB}$ η μήτρα σχεδιασμού \mathbf{g} , και το άνυσμα παραμέτρων (μοντέλο παραμόρφωσης) $\nabla \mathbf{v}$.

Τελικό στάδιο της ανάλυσης είναι η γενίκευση του προσομοιώματος (21) για δίκτυο n σταθμών που απέχουν πεπερασμένες αποστάσεις από αλλήλους. Για τον λόγο αυτό ολοκληρώνεται η εξ. 21 κατά μήκος του τόξου (baseline) AB_i μεταξύ οιοδήποτε ζεύγους σταθμών A και B , και όπου το σύνολο των δεικτών $i \in [1, n(n-1)/2]$ περιλαμβάνει όλα τα δυνατά ζεύγη σταθμών. Έτσι,

$$\Delta \mathbf{L}_{AB_i} = \int_B^A \mathbf{g}_i(\mathbf{r}) \cdot \nabla \mathbf{v}|_{\mathbf{r}} \quad (22)$$

Το ολοκλήρωμα (22) μπορεί να διακριτοποιηθεί κατασκευάζοντας πλέγμα m τετραγωνικών κυψελίδων (κάνναβο), έτσι ώστε C να είναι το σύνολο των δεικτών των κυψελίδων διά των οποίων διέρχεται το τόξο (baseline) AB_i . Οι κυψελίδες του καννάβου ορίζονται στην βάση τόξων των παραλλήλων και μεσημβρινών κύκλων.

$$\Delta \mathbf{L}_{AB_i} = \sum_{k \in C} \mathbf{g}_{ik} \cdot \nabla \mathbf{v}|_k \quad (23)$$

το οποίο ισοδυναμεί με το ανυσματικό γινόμενο

$$\Delta \mathbf{L}_{AB_i} = (\mathbf{g}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{g}_m)_i \begin{pmatrix} \nabla \mathbf{v}|_1 \\ \vdots \\ \nabla \mathbf{v}|_m \end{pmatrix} \quad (24)$$

Εάν $k \notin C$, τότε η μήτρα \mathbf{g}_k είναι μηδενικός πίνακας 2×4 . Επαναλαμβάνοντας την (24) για όλα τα δυνατά $L = n(n-1)/2$ ζεύγη σταθμών, κατασκευάζεται σύστημα L εξισώσεων σε m αγνώστους:

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{L}_{AB_1} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{L}_{AB_L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{11} & \cdots & \mathbf{g}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{g}_{L1} & \cdots & \mathbf{g}_{Lm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla \mathbf{v}|_1 \\ \vdots \\ \nabla \mathbf{v}|_m \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{D} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}, \quad (25)$$

το οποίο μπορεί να λυθεί ως προς \mathbf{V} προκειμένου να υπολογισθεί η βαθμίδα της ταχύτητας για όλες τις δυνατά τόξα AB_i , και από εκεί ο τανυστής ρυθμού παραμόρφωσης. Περαιτέρω, ο φορμαλισμός της εξίσωσης (25) επιτρέπει την εισαγωγή *πινάκων συνδιακύμανσης* των δεδομένων (αριστερό σκέλος) καθώς και *αρχικού (a priori) μοντέλου* \mathbf{V}_0 . Οι πίνακες συνδιακύμανσης θεωρούνται ότι είναι διαγώνιοι (όλα τα δεδομένα – baselines – θεωρούνται είναι αμοιβαία ανεξάρτητα), έτσι ώστε κάθε διαγώνιο στοιχείο τους να είναι ίσο προς την διακύμανση που αντιστοιχεί σε κάθε ζεύγος $\Delta \mathbf{L}_{AB_i}$.

Η επίλυση της (25) γίνεται με την μέθοδο του Tarantola (2005), και η λύση είναι:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{C}_D^{-1} + \mathbf{C}_M^{-1})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{C}_D^{-1} \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}_0) \quad (26)$$

και όπου \mathbf{C}_D , \mathbf{C}_M είναι οι πίνακες συνδιακύμανσης των δεδομένων και του μοντέλου αντίστοιχα. Ο πίνακας \mathbf{C}_M χρησιμεύει *κανονικοποίηση (regularization)* μέσω μίας *παραμέτρου καταστολής* d_c , η οποία εξομαλύνει την αντιστροφή για ολόκληρο τον κάρναβο. Τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{C}_M έχουν την μορφή

$$(C_M)_{ij} = \sigma_0^2 \exp\left(\frac{d_{ij}}{d_c}\right) \quad (27)$$

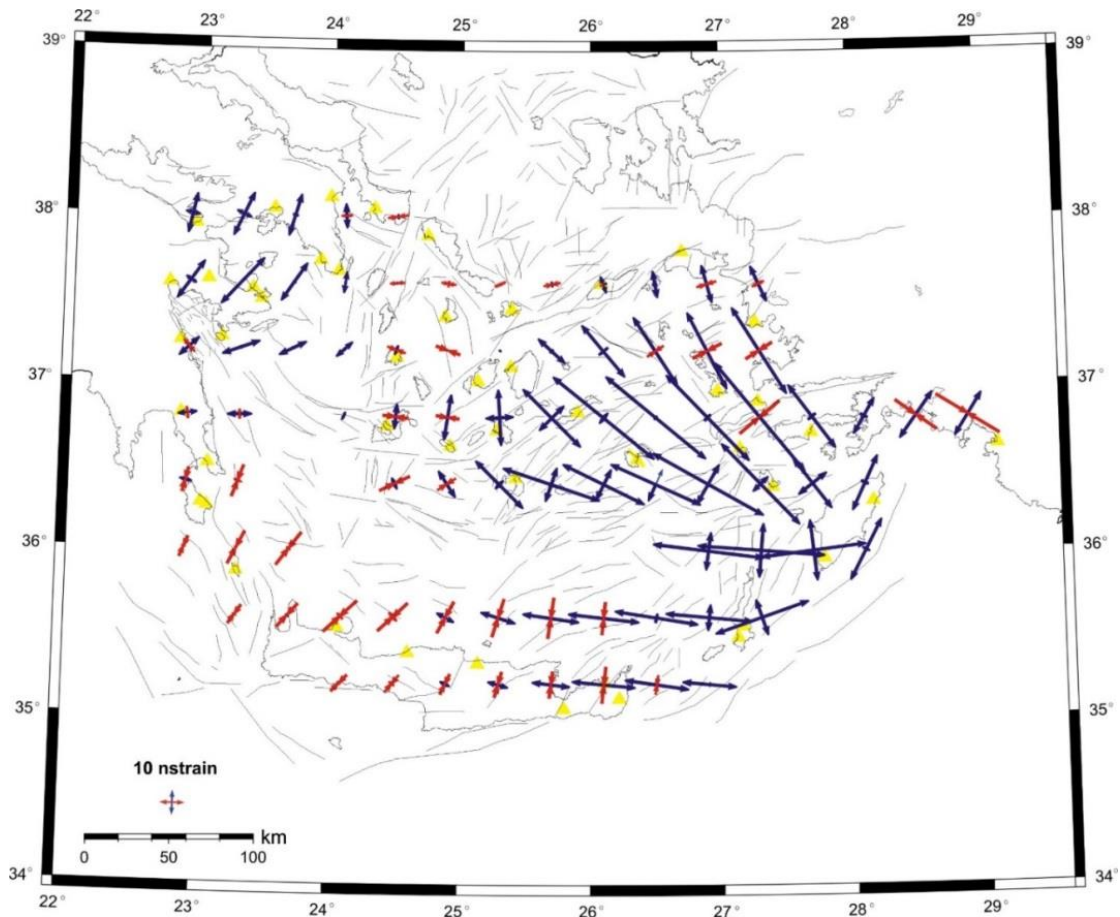
όπου d_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ της i -στης και j -στης κυψελίδας του καννάβου και σ_0^2 η διακύμανση διακύμανση που προσδίδεται (από τον αναλυτή) στο αρχικό μοντέλο.

3.4.2 Χάρτης Πεδίου Ρυθμού Παραμόρφωσης

Σύμφωνα με την βασική μαθηματική θεωρία του ταυστή ρυθμού παραμόρφωσης που παραθέσαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, υπολογίσθηκε το πεδίο ρυθμού παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης, με βάση τις ταχύτητες μετατόπισης των σταθμών ως προς το ITRF2008, εικόνα 29.

Σημειώνεται ότι το λογισμικό STIB υπολογίζει τα ιδιοδιανύσματα του ταυστή ρυθμού παραμόρφωσης (βλέπε κεφάλαιο 3.4.1) για όλες τις κυψελίδες του καννάβου και τα απεικονίζει στο κέντρο αυτών. Ωστόσο, για την αξιολόγηση, αφαιρέθηκαν τα ιδιοδιανύσματα από τις κυψελίδες αυτές, που οι κοντινότεροι σταθμοί GNSS απέχουν μεταξύ τους, απόσταση μεγαλύτερη της μιας (1°) γεωγραφικής μοίρας. Το μέγεθος της πλευράς μίας κυψελίδας ορίστηκε στις 0.4° μοίρες.

Στον χάρτη που ακολουθεί, τα κίτρινα τρίγωνα δηλώνουν τους σταθμούς του δικτύου. Τα ιδιοδιανύσματα, του ταυστή ρυθμού παραμόρφωσης με μπλε χρώμα παριστούν τους ρυθμούς επιμήκυνσης σε ns/year, ενώ αυτά με κόκκινο χρώμα τους ρυθμούς βράχυνσης.



Εικόνα 29 Πεδίο ρυθμού παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης.

Κεφάλαιο 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εκτιμήσεις των ταχυτήτων ως προς το ITRF της παρούσας εργασίας συμφωνούν με ανάλογες μελέτες και επιβεβαιώνουν το έντονο γεωδυναμικό πεδίο του Νοτίου Αιγαίου ((Le Pichon X. 1995) (S. B. McClusky 2000) (Kreemer 2004) (Nyst 2004) (Hollenstein 2008) (Rontogianni 2010) (Floyd 2010) (Sakellariou D. 2019)). Όσον αφορά τα αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων ως προς τα τοπικά σημεία (Ανάβυσσος, Νάξος, Αστυπάλαια), που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, υποδεικνύουν υποπεριοχές κινηματικής ανομοιογένειας.

Στον χάρτη του πεδίου ρυθμού παραμόρφωσης, εικόνα 30, με γαλάζιο χρώμα αποτυπώνονται ομαδοποιημένοι οι τανυστές όπου ο άξονας της μέγιστης τάσης και ο άξονας της ελάχιστης τάσης δηλώνουν εφελκυστικό εντατικό πεδίο. Ανάλογα, το συμπιεστικό καθεστώς περιγράφεται με τανυστές κόκκινου χρώματος. Παρατηρώντας τον χάρτη διακρίνουμε:

- Εφελκυστικό πεδίο τάσεων στα Δωδεκάνησα. Ωστόσο, δεν παρατηρείται σταθερή διεύθυνση διάνοιξης σε όλο το μήκος της περιοχής. Διακρίνεται αλλαγή διεύθυνσης διάνοιξης στα νότια Δωδεκάνησα (περιοχή Ρόδου, Καρπάθου) σε σχεδόν Ανατολή-Δύση, ενώ βορειότερα η διεύθυνση διάνοιξης είναι περίπου ΒΔ-ΝΑ (περιοχή Καλύμνου, Κω). Ανάλογη παρατήρηση για την Α-Δ διεύθυνση διάνοιξης στο νότιο άκρο της περιοχής μελέτης έχει διατυπωθεί και από τους Floyd et al.(2010)
- Εφελκυστικές τεκτονικές δομές παρατηρούνται στον Αργοσαρωνικό κόλπο. Στον αργολικό κόλπο η διεύθυνση διάνοιξης είναι σχεδόν Α-Δ, ενώ στον Σαρωνικό κόλπο, και όσο πλησιάζει τον Κορινθιακό κόλπο, Ο άξονας εφελκυσμού έχει διεύθυνση ΒΑ ως ΒΒΑ. Οι παρούσες παρατηρήσεις συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Tzanis et al (2018).
- Διατμητική παραμόρφωση εκδηλώνεται στην νότιοδυτική άκρη των Κυκλάδων (Μύλος, Φολέγανδρος) με κύριο χαρακτηριστικό την περιστροφή της διεύθυνση των τανυστών ρυθμού παραμόρφωσης.
- Συμπιεστικό καθεστώς επικρατεί στην ευρύτερη περιοχή Κυθήρων- Αντικυθήρων – Δυτικής Κρήτης. Αντίστοιχα και το μοντέλο παραμόρφωσης μέσω μετρήσεων GPS, που αναπτύχθηκε από τους Hollenstein et al, δείχνει κάθετη συμπίεση στην συγκεκριμένη περιοχή (Hollenstein 2008).
- Ζώνη αλλαγής εντατικού πεδίου εκτατικού καθεστώτος αναγνωρίζεται στην Ανατολική Κρήτη/Κρητικό πέλαγος, τόσο από την βαθυμετρία της περιοχής όσο και από τις μεγάλες αλλαγές των τιμών των ταχυτήτων και των διευθύνσεων αυτών. Αντίστοιχα και οι Κοκκαλάς και Δούτσος προβλέπουν διάνοιξη στην περιοχή παράλληλη στο ελληνικό τόξο η οποία συνδυάζεται με αριστερόστροφη διάτμηση (Kokkalas 2001).

Συμπεράσματα

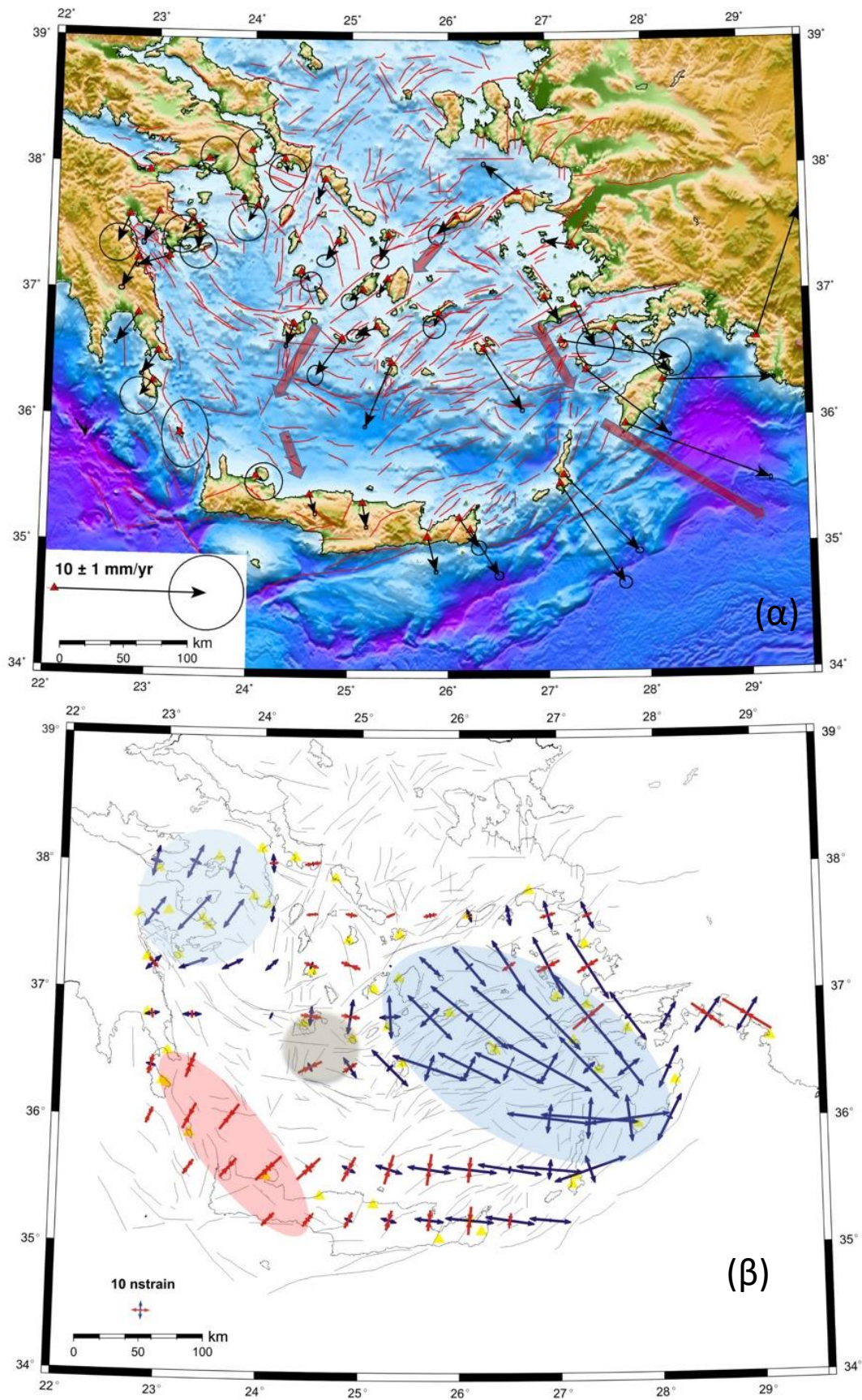
Εν συνεχεία και σύμφωνα με τα προηγούμενα ομαδοποιήθηκαν γειτονικοί σταθμοί με την ίδια κινηματική συμπεριφορά (τιμές ταχυτήτων και αζιμούθια διεύθυνσης). Οι μέσες τιμές ταχυτήτων και διεύθυνσης αυτών παρουσιάζονται με κόκκινα ανύσματα στο εικόνα 30α.

Ερμηνεύοντας παράλληλα τον χάρτη των ανυσμάτων ταχύτητας και τον χάρτη ρυθμού παραμόρφωσης (εικόνα 30) οριοθετήθηκαν οι περιοχές ομοειδούς κίνησης και οι ζώνες έντονης παραμόρφωσης όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 31. Το μοντέλο στην εικόνα 32(α) εικονογραφεί λεπτομερώς την τεκτονική και κινηματική συμπεριφορά της περιοχής του νοτίου Αιγαίου και έχει ληφθεί από τους Sakka et al. (2020), ενώ στην εικόνα 32(β) γίνεται προσπάθεια οριοθέτησης των ηπειρωτικών τεμαχών/blocks. Πρόκειται για πέντε (5) ομοειδείς κινηματικά περιοχές και τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5. Ταχύτητες και τιμές αζιμούθιων των ηπειρωτικών τεμαχών/blocks .

| AA | Ηπειρωτικά τεμάχη | V(mm/yr) | φ(°) |
|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | Κυκλάδες & Ικαρία | 1,60 | 230 |
| 2 | Νοτιοδυτικές Κυκλάδες | 3,75 | 225 |
| 3 | Βόρεια Δωδεκάνησα | 3,25 | 150 |
| 4 | Κρήτη/Κρητικό πέλαγος | 2,00 | 160 |
| 5 | Νότια Δωδεκάνησα | 7,35 | 120 |

Συμπεράσματα



Εικόνα 30. (α) Χάρτης πεδίου ταχυτήτων ως προς Ανάβυσσο. Τα κόκκινα βέλη να αναπαριστούν τον μέσο όρο των ανυσμάτων ταχύτητας γειτνιαζόντων σταθμών (β) Χάρτης πεδίου ρυθμού παραμόρφωσης με ομαδοποίηση περιοχών αντίστοιχου εντατικού πεδίου.

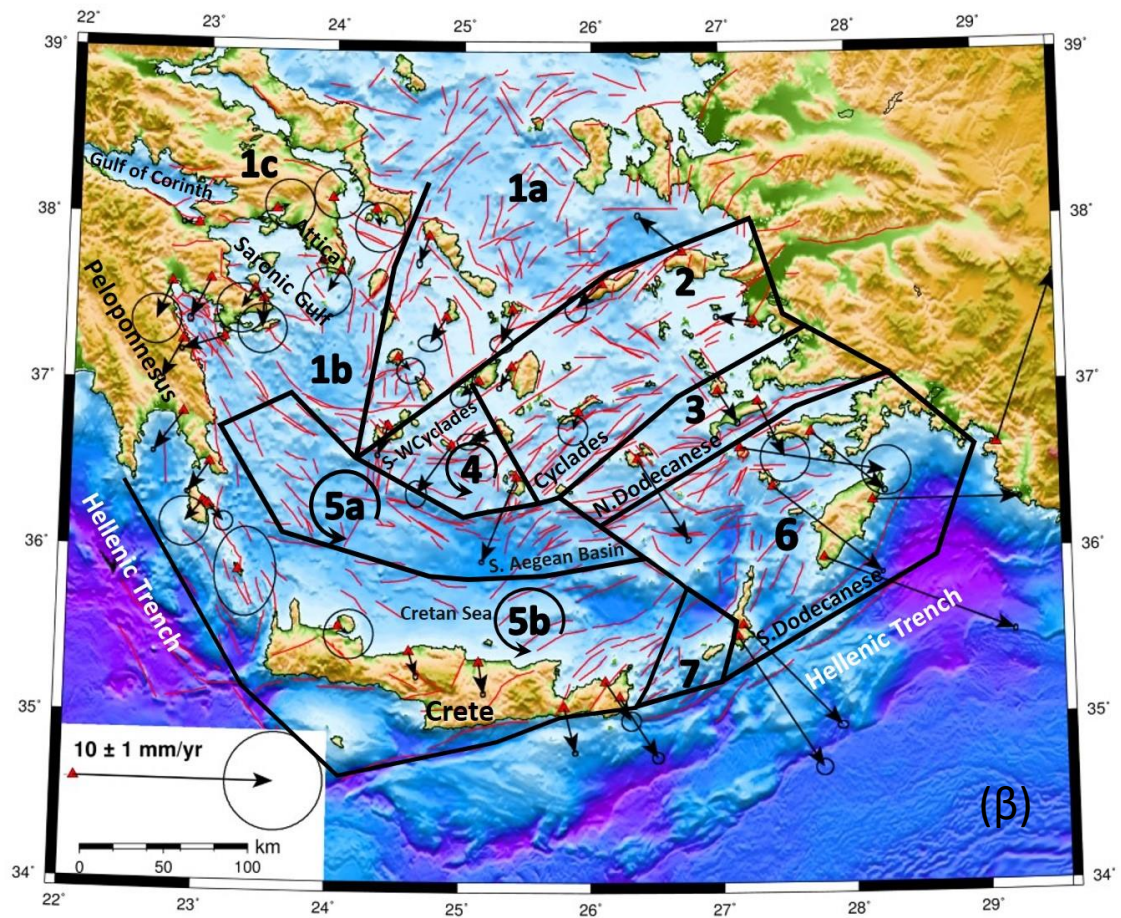
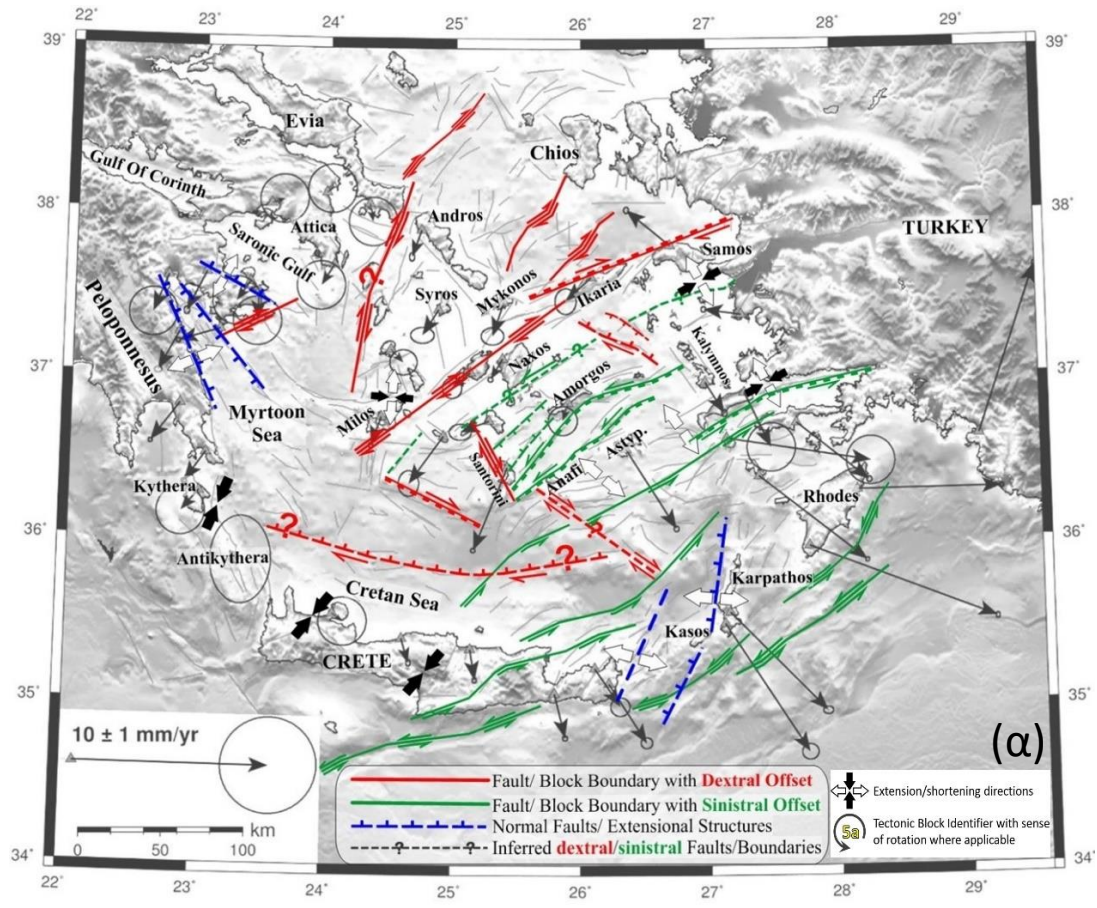
Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η κατάτμηση του νοτίου Αιγαίου σε ένα μοντέλο 5 έως 7 ηπειρωτικών τεμαχών με ζώνες δεξιόστροφης και αριστερόστροφης οριζόντιας διάτμησης δύναται να περιγράψει σαφέστερα και την κινηματική συμπεριφορά της περιοχής. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στην εικόνα 31, αναδεικνύει και οριοθετεί περιοχές λέπτυνσης (εφελκυστικό πεδίο τάσεων) και βράχυνσης (συμπιεστικό πεδίο) του φλοιού. Τα κύρια σημεία του συγκεκριμένου μοντέλου ερμηνεύουν την κάτωθι κινηματική συμπεριφορά:

- Δεξιόστροφη ολίσθηση μεταξύ των ηπειρωτικών Τεμαχών 1α και 2(Ικαρία-Νάξος-Πάρος-Μήλος), διευθύνσεως ΒΑ-ΝΔ.
- Αριστερόστροφη διάτμηση μεταξύ των Τεμαχών 2 και 3 (Κάλυμνος -Αμοργός-Σαντορίνη-Χριστιανά), διευθύνσεως ΒΑ-ΝΔ. Συγκεκριμένα πρόκειται για εφελκυστικό καθεστώς σε ζώνη πλάγιο-κανονικών ρηγμάτων με διάνοιξη σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ .
- Αριστερόστροφη διάτμηση μεταξύ των Τεμαχών 3 και 6 (Κως- Αστυπάλαια-Ανάφη), διευθύνσεως ΒΑ-ΝΔ.
- Διάνοιξη καθόλη την έκταση του Τεμάχου 6 (ΝΑ Δωδεκάνησος) και εντονότατη λέπτυνση φλοιού.
- Εκτατική ζώνη διάνοιξης διεύθυνσης Α-Δ, στο Τέμαχος 7 μεταξύ Κρήτης και Καρπάθου.
- Διάνοιξη κατά μήκος ζωνών κανονικών ρηγμάτων στον Αργολικό κόλπο. Η διεύθυνση διάνοιξης ξεκινάει σχεδόν Α-ΒΑ στον Αργολικό κόλπο και στρέφεται προς ΒΑ στον Σαρωνικό. Το Τέμαχος 1α αποτελεί μέρος του Βόρειου Αιγαίου και το Τέμαχος 1b εκτείνεται στο Μυρτώο πέλαγος – το όριο μεταξύ των 1α και 1b κατά μήκος της ζώνης Ευβοίας/Ανδρου – Κέας, Σερίφου – Μήλου πιθανώς αποτελεί τεκτονικό όριο. Το Τέμαχος 1c την προέκταση από την τάφρο της Κορίνθου.
- Αριστερόστροφη περιστροφή υφίσταται το Τέμαχος 4 στις ΝΔ Κυκλάδες. Η παρατήρηση αυτή εξάγεται από την γεωμετρία της τεκτονική της περιοχής (η ΒΑ πλευρά του Τεμάχου 4 αποτελεί το όριο δεξιόστροφης ολίσθησης ενώ η ΝΔ πλευρά αντιθέτως αποτελεί το όριο αριστερόστροφης ολίσθησης). Παρομοίως σε αριστερόστροφη περιστροφή υπόκειται και το ηπειρωτικό τέμαχος 5α και 5b, παρατήρηση που εξάγεται από την κινηματική της περιοχής (περιστροφή των ανυσμάτων των ταχυτήτων, εικόνα 30α)
- Δεξιόστροφη διάτμηση μεταξύ των ηπειρωτικών Τεμαχών 3,5 και 6 σύμφωνα με τους Tzanis et al,2020.

Τέλος, θα ήταν ωφέλιμη η συνεργασία θαλάσσιας γεωλογίας-γεωφυσικής για τον εντοπισμό περιοχών πιθανών θαλάσσιων κατολισθήσεων καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμόρφωσης μέσω δορυφορικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παραμόρφωσης μέσω σεισμικών μετρήσεων, με σκοπό την διερεύνηση της έκλυσης της τάσης μέσω σεισμικών δραστηριοτήτων.

Συμπεράσματα



Εικόνα 31. Κινηματικό μοντέλο νοτίου Αιγαίου

BIBΛIOΓPAΦIA

- Agostini S., Doglioni C., Innocenti F., Manetti P., Tonarini S. «On the geodynamics of the Aegean rift.» *Tectonophysics*, 2009.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L. «ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame.» *Journal of Geodesy*, 2011.
- Armijo R., Flerit F., G. King, and B. Meyer. «Linear elastic fracture mechanics explains the past and present evolution of the Aegean.» *Earth Planetetary Science*, 2004.
- Armijo, R., Meyer, B., King., G. C. P., Rigo, A. and Papanastassiou, D. «Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean.» *Geophysical Journal International*, 1996.
- Ashby, N. «Relativity in the Global Positioning System.» *Living Reviews in Relativity*, 2003.
- Bomford, G. *Geodesy*. Oxford: Clarendon Press, 1980.
- Brun, J.-P., and D. Sokoutis. «45 m.y. of Aegean crust and mantle flow driven by trench retreat.» 2010.
- Chailas, S., Tzanis, A., Kranis, H., Karmis, P. «COMPILATION OF A UNIFIED AND HOMOGENEOUS AEROMAGNETIC MAP OF THE GREEK MAINLAND.» *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 2010.
- Chaumillon E, and Mascle J. «From foreland to forearc do-mains: new multichannel seismic reflection survey of the Medi-teranean Ridge accretionary complex.» *Marine Geology*, 1997.
- Chaumillon E, and Mascle J. «Variations late´ rales des fronts dede´ formation de la Ride Me´ diterrane´ enne.» *Bulletin de la Socie´ te´ Ge´ ologique de France*, 1995.
- Chousianitis K., Ganas A. And Gianniou, M., «Kinematic interpretation of present-day crustal deformation in central Greece from continuous GPS measurements.» *J. Geodyn.*, 71, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.06.004>, 2013.
- D. Papanikolaou, H. Bargathi, C. Dabovski, R. Dimitriu, A. El-Hawat, D. Ioane, H. «Geological and Geophysical Framework of the Mediterranean and the Surrounding Areas.» *A publication of the Mediterranean Consortium*, 2004.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M.,. *Bernese GPS Software Version 5.0*. Bern: University of Bern, Astronomical Institute, 2007.
- Dawoud, S. *GNSS principles and comparison*. Potsdam Germany: Potsdam University, 2012.
- Dercourt, J., Zonenshain, L. P., Ricov, L. E., Kazmin, V. G., Le Pichon, X., Knipper, A. L., Grandjacquet, «Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. In Evolution of the Tethys.» *Tectonophysics, Special Issue*, 1986.
- Dewey, J. F., Helman, M., Turco, E., Hutton, D. and Knott, S. «Kinematics of the Western Mediterranean.» *Special Publications of the Geological Society of London*, 1989.
- EMODnet Bathymetry Consortium (2016): EMODnet Digital Bathymetry (DTM)*. n.d. <https://doi.org/10.12770/c7b53704-999d-4721-b1a3-04ec60c87238>.
- F. Masson, M. Lehujeur, Y. Ziegler and C. Doubre. «Strain rate tensor in Iran from a new GPS velocity field.» *Geophysical Journal International*, 2014.
- Faccena, C., O. Bellier, J. Martinod, C. Piromallo, and V. Regard. «Slab detachment beneath eastern Anatolia.» *Earth Planet. Sci.*, 2006.
- Faccena, C., Jolivet, L., Piromallo, C. and Morelli, A. «Subduction and the depth of convection in the Mediterranean mantle.» *Journal of Geophysical Research*, 2003.
- Floyd, M. A., Billiris, H., D. Paradissis, G. Veis, A. Avallone, P. Briole, S. McClusky, J.-M. Nocquet, K. Palamartchouk, B. Parsons, P. C. England, «A new velocity field for Greece: Implications for the kinematics and dynamics of the Aegean.» *Journal of Geophysical Research*, 2010.
- Frank, F.C. «Deduction of earth strains from Survey data .» *Bullettin Seismological Society*, 1967.
- Haines, A., Jackson, J., Holt, W. & Agnew, D.,. «Representing distributed deformation by continuous velocity fields.» Wellington, New Zealand, 1998. Institute of Geological and Nuclear Sciences.
- Hecimovic, Z.,. «Relativistic effects on satellite navigation.» *Tehnički vjesnik*, 2013.

- Hollenstein, C., Müller, M.D., Geiger, A., Kahle, H. «Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003.» *Tectonophysics*, 2008.
- IGME (Institute of Geology and Mining Exploration). *Seismotectonic map of Greece, 1:500,000 scale*. 1989.
- International Global Positioning System (GPS) Service website*. 2003.
<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- Jackson, J. and McKenzie, D.P. «The Relationship between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle East.» *Geophysical Journal*, 93, 45-73., 1988.
- Jolivet, L. and Faccenna, C. «Mediterranean extension and the Africa–Eurasia collision.» *Tectonics*, 2000.
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse L., Pourhiet, L., Lacombe, L., Lecomte, E., Burov, E., Denèle, Y., Brun, J.B., Philippon, M., Paul A., Salaün, G., Karabulut, H., Piromallo, C., Monié, P., Gueydan, F., Okay, A.I., Oberhänsli, R., Pourteau, A., Augier, J. *Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat*. Tectonophysics, 2013.
- Kahle, H.-K. and Mueller. «Structure and dynamics of the Eurasian-African/Arabian plate boundary system.» *Journal of Geodynamics*, 1998.
- Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A. «GNSS Error Sources.» *intechopen*, 2018: DOI: 10.5772/intechopen.75493.
- Kokkalas S. and Aydin, A.,. «Is there a link between faulting and magmatism in the south-central Aegean Sea? .» *Geological Magazine*, 2013: <https://doi.org/10.1017/S0016756812000453>.
- Kokkalas, S., Doutsos, T. «Stress and deformation in the Aegean region.» *Journal of Structural Geology*, 2001.
- Kreemer, C., Chamot-Rooke, N. «Contemporary kinematics of the southern Aegean and the Mediterranean Ridge.» *Geophysical Journal International*, 2004.
- Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Belloti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., Dietrich, V. «SqueeSAR and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992-2012): Tectonic implications.» *Tectonophysics* 594, 2013.
- Le Pichon X., Chamot-Rooke, N., Lallemand, S., Noomen, R. and Veis, G. «Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe. Implications for eastern Mediterranean tectonics.» *Journal of Geophysical Research*, 1995.
- Le Pichon, X. and Angelier, J. n.d.
- Le Pichon, X. and Angelier, J. «The Hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area.» *Tectonophysics*, 1979.
- LEICA Geo Office*. Heerbrugg, Switzerland.: LEICA Geosystems AG., , 2004.
- Masclé, J., and L. Martin. «Shallow structure and recent evolution of the Aegean Sea: A synthesis based on continuous reflection profiles.» *Marine Geology*, 1990.
- Masclé, J., and L. Martin. «Shallow structure and recent evolution of the Aegean Sea: A synthesis based on continuous reflection profiles.» *Marine Geology*, 1990.
- McClusky S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, J. «Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*.» *Journal of Geophysical Research*, 2000.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O.,. «Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus.» *Journal of Geophysical Research*, 2000.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, J. «Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*.» *Journal of Geophysical Research*, 2000.
- Means, W. D. «Kinematics, stress, deformation and material behavior.» *Journal of Structural Geology*, 12, 1990.

- Mueller, St. and Kahle. «Crust/mantle structure and dynamics in the Mediterranean-Alpine.» *American Geophysical Union*, 1993.
- Müller, M.D., Geiger, A., Kahle, H.-G., Veis, G., Billiris, H., Paradisis, D., Felekis, S. «Velocity and deformation fields in the North Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993-2009.» *Tectonophysics*, 2013.
- Nyst, M., Thatcher, W.,. «New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean.» (Tectonophysics) 2004.
- Papazachos, B. C., E. E. Papadimitriou, a. a. Kiratzi, C. B. Papazachos, and E. K. Louvari. «Fault plane solutions in the Aegean Sea and the surrounding area and their tectonic implication.» *Tectonophysics*, 1998.
- Papazachos, B. C., Karakostas, B. G., Kiratzi, A. A., Papadimitriou, E. E. and Papazachos, C. B. «A model for the 1995 Kozani-Grevena seismic sequence.» *Journal of Geodynamics*, 1998.
- Papazachos, B.C., Karakostas, V.G., Papazachos, C.B., Skordilis, E.M. «The geometry of the Wadati Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic Arc.» *Tectonophysics*, 2000.
- Pratap Misra, Per Enge. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Ganga-Jamuna Press, 2011.
- Rontogianni, Sofia. «Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994-2000.» *Journal of Geodynamics*, 2010.
- Sakellariou D., Tsampouraki-Kraounaki K. «Plio-Quaternary Extension and Strike-Slip Tectonics in the Aegean.» 2019: Transform Plate Boundaries and Fracture Zones, 339-374.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812064-4.00014-1>.
- Sakkas, V., Doxa, C., Tzanis, A., Kranis, H. «Contemporary Kinematics of the South Contemporary Kinematics of the South Continuous GNSS Measurements.» 2020.
- Spakman, W. & Nyst, M. «Inversion of relative motion data for estimates of the velocity gradient field and fault slip.» *Earth planet. Sci. Lett*, 2002.
- Tape, C., Muse, P., Simons, M., Dong, D. & Webb, F.,. «Multiscale estimation of GPS velocity fields.» *Geophys. J. Int*, 2009.
- Taymaz, T., Jackson, J. and McKenzie, D. «Active tectonics of the north and central Aegean Sea .» *Geophysical Journal International*, 1991.
- Tzanis, A, Efstathiou, A., Chailas, S., Stamatakis, M. «Evidence of recent plutonic magmatism beneath Northeast Peloponnesus (Greece) and its relationship to regional tectonics.» *Geophysical Journal International*, 2018.
- Tzanis, A., Chailas, S., Sakkas, V., Lagios, E. «Tectonic deformation in the Santorini volcanic complex (Greece) as inferred by joint analysis of gravity, magnetotelluric and DGPS observations.» *Geophysical Journal International*, 2020: <https://doi.org/10.1093/gji/ggz461>.
- Αναστασίου, Δ. *Ανάλυση επίγειων και δορυφορικών γεωδαιτικών παρατηρήσεων για την εκτίμηση επιφανειακών παραμορφώσεων*. Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, Εθνικο Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
- Αντωνοπούλου, Α. *Οι μεταβολές της παραμέτρου «χρόνος» λόγω Σχετικότητας και εφαρμογές στη Γεωδαισία*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική εργασία, 2017.
- Βέης Γ., Χ. Μπιλήρης, and Κ. Παπαζήση. *Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- Βέης, Γ., Μπιλήρης, Χ, Παπαζήση, Κ., Παραδείσης, Δ. και Μαρίνου. «Τεκτονικές μετακινήσεις κατά μήκος του Αιγαίου και στο Τρίγωνο Αλκυονίδες νήσοι - Πάρνηθα - Αταλάντη.» 2007.
- Γκέκας, Α.,. *Ανάλυση μικρομετακινήσεων στην περιοχή του νοτιου αιγαίου πελάγους με συνδυασμο ιστορικών γεωδαιτικών, γεωφυσικών και συγχρονων δορυφορικών μετρήσεων*. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Εθνικο Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.
- Δερμάνης, Α.,. *Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική – GPS*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 1999.
- Μαρίνου, Α.,. *Μελέτη παραμορφώσεων σε περιοχή της κεντρικής Ελλάδας από μετρήσεις GPS εικοσαετίας*. Αθήνα: Εθνικο Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διαδακτορική Διατριβή, 2014.

- Παπαγεωργίου, Ε. *Μελέτη εδαφικής παραμόρφωσης στην εκτίμηση της ηφαιστειακής επικινδυνότητας τη χρήση διαστημικών και γεωφυσικών τεχνικών: Η περίπτωση του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου. Διδακτορική Διατριβή.* Αθήνα: Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011.
- Φουμέλης, Μ. *Μελέτη επιφανειακής παραμόρφωσης ευρύτερης περιοχής Αθηνών βάσει διαφορικών μετρήσεων GPS και συμβολομετρίας Ραντάρ, Διδακτορική διατριβή.* Αθήνα: Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών, 2009.
- Φωτίου, Α., Πικριδάς, Χ. *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2006.
- Χατζηνίκος, Μ. *Μελέτη των μετακινήσεων του γήινου φλοιού στον Ελλαδικό χώρο με ανάλυση δορυφορικών δεδομένων GNSS.* Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διαδακτορική διατριβή, 2013.

Παράρτημα

Πίνακας 6. Ταχύτητες και οι τυπικές αποκλίσεις ως προς Ανάβυσσο

| AA | Station | $\lambda(^{\circ})$ | $\Phi(^{\circ})$ | Veast (mm/yr) | Vnorth (mm/yr) | SDeast (mm) | SDnorth (mm) |
|----|---------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1 | ANAV | 23,91 | 37,74 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | ANDR | 24,74 | 37,89 | -0,49 | -1,35 | 0,052 | 0,085 |
| 3 | ASTY | 26,36 | 36,55 | 2,56 | -4,03 | 0,051 | 0,056 |
| 4 | ATRS | 22,84 | 37,24 | -1,06 | -2,00 | 0,078 | 0,060 |
| 5 | DATC | 27,69 | 36,71 | 3,67 | -2,96 | 0,053 | 0,060 |
| 6 | DIDI | 27,27 | 37,37 | -1,90 | 0,28 | 0,050 | 0,057 |
| 7 | FETH | 29,12 | 36,63 | 3,02 | 8,46 | 0,041 | 0,049 |
| 8 | HERA | 25,14 | 35,32 | 0,26 | -1,57 | 0,045 | 0,053 |
| 9 | IERA | 25,80 | 35,05 | 0,56 | -2,25 | 0,051 | 0,052 |
| 10 | KALY | 26,98 | 36,96 | 0,98 | -1,58 | 0,054 | 0,068 |
| 11 | KATC | 27,78 | 35,95 | 9,50 | -3,73 | 0,041 | 0,060 |
| 12 | KORI | 22,93 | 37,94 | -0,76 | 0,05 | 0,501 | 0,502 |
| 13 | KOSA | 27,29 | 36,90 | 1,34 | -2,80 | 0,049 | 0,053 |
| 14 | KRP1 | 27,12 | 35,48 | 4,25 | -6,56 | 0,501 | 0,502 |
| 15 | KRPS | 27,16 | 35,55 | 4,91 | -5,02 | 0,169 | 0,163 |
| 16 | LYGO | 23,04 | 37,62 | -1,00 | -2,03 | 0,103 | 0,077 |
| 17 | METH | 23,39 | 37,56 | -0,69 | -1,01 | 0,059 | 0,077 |
| 18 | MILO | 24,43 | 36,74 | -0,51 | -1,47 | 0,501 | 0,502 |
| 19 | MOLA | 22,85 | 36,81 | -1,46 | -1,97 | 0,044 | 0,054 |
| 20 | NAXO | 25,38 | 37,10 | -0,60 | -1,03 | 0,040 | 0,045 |
| 21 | NEAB | 23,06 | 36,51 | -1,06 | -1,52 | 0,050 | 0,051 |
| 22 | NISA | 27,14 | 36,62 | 7,31 | -1,19 | 0,054 | 0,048 |
| 23 | RETH | 24,61 | 35,39 | 0,37 | -1,24 | 0,501 | 0,502 |
| 24 | RODO | 28,16 | 36,30 | 7,32 | 0,02 | 0,046 | 0,065 |
| 25 | SAMO | 26,71 | 37,80 | -2,19 | 1,82 | 0,041 | 0,048 |
| 26 | SANT | 25,42 | 36,44 | -1,71 | -4,19 | 0,050 | 0,064 |
| 27 | SITI | 26,11 | 35,21 | 1,31 | -1,94 | 0,047 | 0,046 |
| 28 | SPET | 23,16 | 37,27 | -2,13 | -0,66 | 0,199 | 0,193 |
| 29 | TILO | 27,40 | 36,38 | 5,46 | -4,32 | 0,043 | 0,051 |
| 30 | TUC2 | 24,07 | 35,54 | 0,54 | -0,40 | 0,041 | 0,044 |
| 31 | ZKRO | 26,22 | 35,12 | 1,93 | -3,01 | 0,501 | 0,502 |
| 32 | ARGO | 22,74 | 37,59 | -0,76 | -1,90 | 0,118 | 0,114 |
| 33 | SOYN | 24,05 | 37,67 | -0,65 | -1,06 | 0,501 | 0,502 |
| 34 | ELSN | 23,54 | 38,04 | 0,63 | 0,22 | 0,501 | 0,502 |
| 35 | NMKR | 23,98 | 38,11 | 0,26 | 0,19 | 0,501 | 0,502 |
| 36 | PORO | 23,45 | 37,50 | -0,05 | -1,51 | 0,501 | 0,502 |
| 37 | CHLK | 24,32 | 38,05 | 0,17 | -0,91 | 0,501 | 0,502 |
| 38 | MYKO | 25,39 | 37,45 | -0,56 | -1,70 | 0,501 | 0,502 |
| 39 | AMOR | 25,90 | 36,83 | -0,27 | -0,90 | 0,235 | 0,179 |
| 40 | IOS | 25,28 | 36,72 | -1,45 | -0,55 | 0,301 | 0,297 |
| 41 | SERI | 24,50 | 37,16 | 0,63 | -0,67 | 0,231 | 0,165 |
| 42 | SYRO | 24,88 | 37,40 | -0,82 | -1,29 | 0,283 | 0,262 |
| 43 | PARO | 25,13 | 37,02 | -0,93 | -0,77 | 0,243 | 0,164 |
| 44 | IKAR | 26,08 | 37,60 | -1,29 | -1,19 | 0,201 | 0,212 |
| 45 | FOLE | 24,92 | 36,63 | -1,74 | -2,41 | 0,220 | 0,266 |
| 46 | ANKY | 23,30 | 35,87 | 0,35 | -0,10 | 0,211 | 0,267 |
| 47 | KTHA | 23,06 | 36,26 | 0,76 | -0,85 | 0,630 | 0,908 |

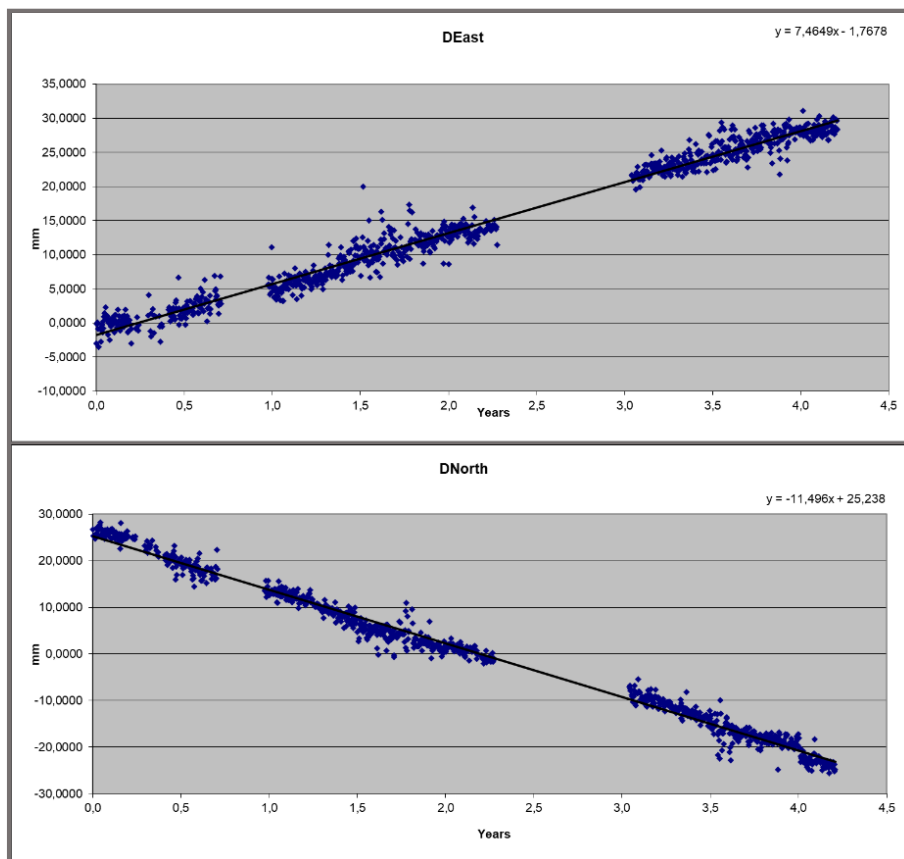
Πίνακας 7. Ταχύτητες και οι τυπικές αποκλίσεις ως προς Νάξο

| AA | Station | $\lambda(^{\circ})$ | $\phi(^{\circ})$ | Veast (mm/yr) | Vnorth (mm/yr) | SDeast (mm) | SDnorth (mm) |
|----|---------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1 | ANAV | 23,91 | 37,74 | 0,60 | 1,03 | 0,050 | 0,051 |
| 2 | ANDR | 24,74 | 37,89 | 0,11 | -0,32 | 0,055 | 0,083 |
| 3 | ASTY | 26,36 | 36,55 | 3,16 | -3,00 | 0,054 | 0,052 |
| 4 | ATRS | 22,84 | 37,24 | -0,46 | -0,97 | 0,079 | 0,056 |
| 5 | DATC | 27,69 | 36,71 | 4,27 | -1,93 | 0,055 | 0,056 |
| 6 | DIDI | 27,27 | 37,37 | -1,30 | 1,31 | 0,053 | 0,053 |
| 7 | FETH | 29,12 | 36,63 | 3,62 | 9,49 | 0,044 | 0,045 |
| 8 | HERA | 25,14 | 35,32 | 0,86 | -0,54 | 0,048 | 0,049 |
| 9 | IERA | 25,80 | 35,05 | 1,16 | -1,22 | 0,054 | 0,048 |
| 10 | KALY | 26,98 | 36,96 | 1,58 | -0,55 | 0,056 | 0,065 |
| 11 | KATC | 27,78 | 35,95 | 10,10 | -2,70 | 0,044 | 0,057 |
| 12 | KORI | 22,93 | 37,94 | -0,16 | 1,08 | 0,052 | 0,049 |
| 13 | KOSA | 27,29 | 36,90 | 1,94 | -1,77 | 0,501 | 0,501 |
| 14 | KRP1 | 27,12 | 35,48 | 4,85 | -5,53 | 0,170 | 0,162 |
| 15 | KRPS | 27,16 | 35,55 | 5,51 | -3,99 | 0,104 | 0,074 |
| 16 | LYGO | 23,04 | 37,62 | -0,40 | -1,00 | 0,061 | 0,074 |
| 17 | METH | 23,39 | 37,56 | -0,09 | 0,02 | 0,501 | 0,501 |
| 18 | MILO | 24,43 | 36,74 | 0,09 | -0,44 | 0,047 | 0,050 |
| 19 | MOLA | 22,85 | 36,81 | -0,86 | -0,94 | 0,043 | 0,040 |
| 20 | NAXO | 25,38 | 37,10 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 |
| 21 | NEAB | 23,06 | 36,51 | -0,46 | -0,49 | 0,057 | 0,043 |
| 22 | NISA | 27,14 | 36,62 | 7,91 | -0,16 | 0,501 | 0,501 |
| 23 | RETH | 24,61 | 35,39 | 0,97 | -0,21 | 0,049 | 0,062 |
| 24 | RODO | 28,16 | 36,30 | 7,92 | 1,05 | 0,044 | 0,044 |
| 25 | SAMO | 26,71 | 37,80 | -1,59 | 2,85 | 0,053 | 0,061 |
| 26 | SANT | 25,42 | 36,44 | -1,11 | -3,16 | 0,050 | 0,041 |
| 27 | SITI | 26,11 | 35,21 | 1,91 | -0,91 | 0,200 | 0,191 |
| 28 | SPET | 23,16 | 37,27 | -1,53 | 0,37 | 0,046 | 0,046 |
| 29 | TILO | 27,40 | 36,38 | 6,06 | -3,29 | 0,044 | 0,038 |
| 30 | TUC2 | 24,07 | 35,54 | 1,14 | 0,63 | 0,501 | 0,501 |
| 31 | ZKRO | 26,22 | 35,12 | 2,53 | -1,98 | 0,119 | 0,112 |
| 32 | ARGO | 22,74 | 37,59 | -0,16 | -0,87 | 0,501 | 0,501 |
| 33 | SOYN | 24,05 | 37,67 | -0,05 | -0,03 | 0,501 | 0,501 |
| 34 | ELSN | 23,54 | 38,04 | 1,23 | 1,25 | 0,501 | 0,501 |
| 35 | NMKR | 23,98 | 38,11 | 0,86 | 1,22 | 0,501 | 0,501 |
| 36 | PORO | 23,45 | 37,50 | 0,55 | -0,48 | 0,501 | 0,501 |
| 37 | CHLK | 24,32 | 38,05 | 0,77 | 0,12 | 0,501 | 0,501 |
| 38 | MYKO | 25,39 | 37,45 | 0,04 | -0,67 | 0,236 | 0,178 |
| 39 | AMOR | 25,90 | 36,83 | 0,33 | 0,13 | 0,301 | 0,296 |
| 40 | IOS | 25,28 | 36,72 | -0,85 | 0,48 | 0,232 | 0,164 |
| 41 | SERI | 24,50 | 37,16 | 1,23 | 0,36 | 0,284 | 0,261 |
| 42 | SYRO | 24,88 | 37,40 | -0,22 | -0,26 | 0,244 | 0,162 |
| 43 | PARO | 25,13 | 37,02 | -0,33 | 0,26 | 0,202 | 0,211 |
| 44 | IKAR | 26,08 | 37,60 | -0,69 | -0,16 | 0,221 | 0,265 |
| 45 | FOLE | 24,92 | 36,63 | -1,14 | -1,38 | 0,211 | 0,266 |
| 46 | ANKY | 23,30 | 35,87 | 0,95 | 0,93 | 0,630 | 0,908 |
| 47 | KTHA | 23,06 | 36,26 | 1,36 | 0,18 | 0,192 | 0,194 |

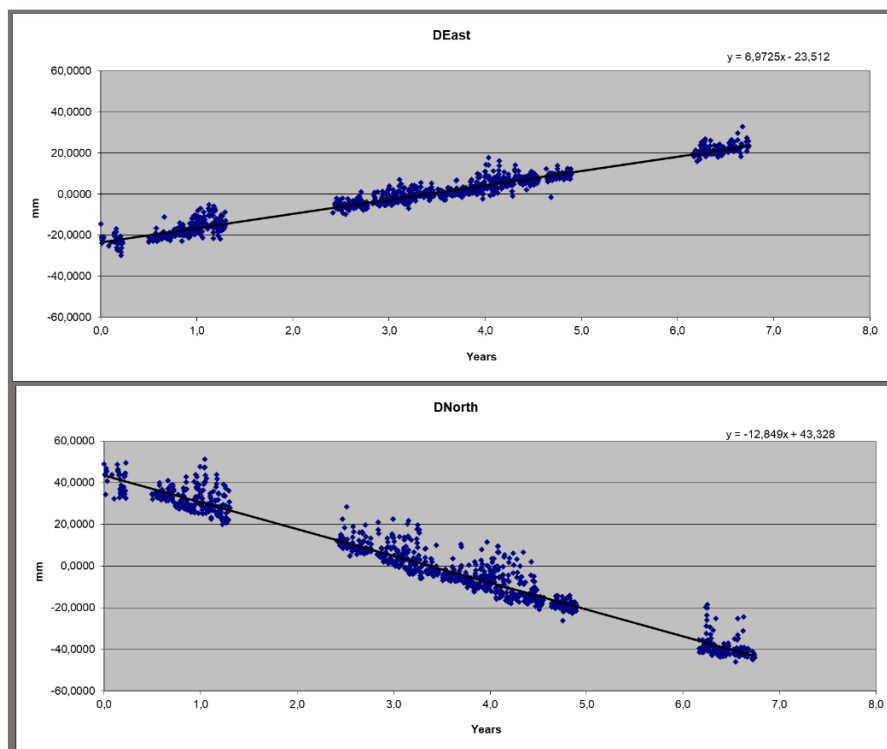
Πίνακας 8. Ταχύτητες και οι τυπικές αποκλίσεις ως προς Αστυπάλαια

| AA | Station | $\lambda(^{\circ})$ | $\Phi(^{\circ})$ | Veast (mm/yr) | Vnorth (mm/yr) | SDeast (mm) | SDnorth (mm) |
|----|---------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1 | ANAV | 23,91 | 37,74 | -2,56 | 4,03 | 0,051 | 0,056 |
| 2 | ANDR | 24,74 | 37,89 | -3,05 | 2,68 | 0,056 | 0,086 |
| 3 | ASTY | 26,36 | 36,55 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 |
| 4 | ATRS | 22,84 | 37,24 | -3,62 | 2,03 | 0,080 | 0,060 |
| 5 | DATC | 27,69 | 36,71 | 1,11 | 1,07 | 0,057 | 0,061 |
| 6 | DIDI | 27,27 | 37,37 | -4,46 | 4,31 | 0,054 | 0,058 |
| 7 | FETH | 29,12 | 36,63 | 0,46 | 12,49 | 0,046 | 0,050 |
| 8 | HERA | 25,14 | 35,32 | -2,30 | 2,46 | 0,050 | 0,054 |
| 9 | IERA | 25,80 | 35,05 | -2,00 | 1,78 | 0,055 | 0,053 |
| 10 | KALY | 26,98 | 36,96 | -1,58 | 2,45 | 0,058 | 0,069 |
| 11 | KATC | 27,78 | 35,95 | 6,94 | 0,30 | 0,046 | 0,061 |
| 12 | KORI | 22,93 | 37,94 | -3,32 | 4,08 | 0,053 | 0,054 |
| 13 | KOSA | 27,29 | 36,90 | -1,22 | 1,23 | 0,502 | 0,502 |
| 14 | KRP1 | 27,12 | 35,48 | 1,69 | -2,53 | 0,170 | 0,164 |
| 15 | KRPS | 27,16 | 35,55 | 2,35 | -0,99 | 0,105 | 0,078 |
| 16 | LYGO | 23,04 | 37,62 | -3,56 | 2,00 | 0,062 | 0,078 |
| 17 | METH | 23,39 | 37,56 | -3,25 | 3,02 | 0,502 | 0,502 |
| 18 | MILO | 24,43 | 36,74 | -3,07 | 2,56 | 0,049 | 0,055 |
| 19 | MOLA | 22,85 | 36,81 | -4,02 | 2,06 | 0,045 | 0,046 |
| 20 | NAXO | 25,38 | 37,10 | -3,16 | 3,00 | 0,054 | 0,052 |
| 21 | NEAB | 23,06 | 36,51 | -3,62 | 2,51 | 0,058 | 0,049 |
| 22 | NISA | 27,14 | 36,62 | 4,75 | 2,84 | 0,502 | 0,502 |
| 23 | RETH | 24,61 | 35,39 | -2,19 | 2,79 | 0,050 | 0,066 |
| 24 | RODO | 28,16 | 36,30 | 4,76 | 4,05 | 0,045 | 0,050 |
| 25 | SAMO | 26,71 | 37,80 | -4,75 | 5,85 | 0,054 | 0,065 |
| 26 | SANT | 25,42 | 36,44 | -4,27 | -0,16 | 0,051 | 0,047 |
| 27 | SITI | 26,11 | 35,21 | -1,25 | 2,09 | 0,200 | 0,193 |
| 28 | SPET | 23,16 | 37,27 | -4,69 | 3,37 | 0,047 | 0,052 |
| 29 | TILO | 27,40 | 36,38 | 2,90 | -0,29 | 0,046 | 0,045 |
| 30 | TUC2 | 24,07 | 35,54 | -2,02 | 3,63 | 0,502 | 0,502 |
| 31 | ZKRO | 26,22 | 35,12 | -0,63 | 1,02 | 0,120 | 0,114 |
| 32 | ARGO | 22,74 | 37,59 | -3,32 | 2,13 | 0,502 | 0,502 |
| 33 | SOYN | 24,05 | 37,67 | -3,21 | 2,97 | 0,502 | 0,502 |
| 34 | ELSN | 23,54 | 38,04 | -1,93 | 4,25 | 0,502 | 0,502 |
| 35 | NMKR | 23,98 | 38,11 | -2,30 | 4,22 | 0,502 | 0,502 |
| 36 | PORO | 23,45 | 37,50 | -2,61 | 2,52 | 0,502 | 0,502 |
| 37 | CHLK | 24,32 | 38,05 | -2,39 | 3,12 | 0,502 | 0,502 |
| 38 | MYKO | 25,39 | 37,45 | -3,12 | 2,33 | 0,236 | 0,180 |
| 39 | AMOR | 25,90 | 36,83 | -2,83 | 3,13 | 0,302 | 0,297 |
| 40 | IOS | 25,28 | 36,72 | -4,01 | 3,48 | 0,232 | 0,166 |
| 41 | SERI | 24,50 | 37,16 | -1,93 | 3,36 | 0,284 | 0,262 |
| 42 | SYRO | 24,88 | 37,40 | -3,38 | 2,74 | 0,244 | 0,164 |
| 43 | PARO | 25,13 | 37,02 | -3,49 | 3,26 | 0,202 | 0,212 |
| 44 | IKAR | 26,08 | 37,60 | -3,85 | 2,84 | 0,221 | 0,266 |
| 45 | FOLE | 24,92 | 36,63 | -4,30 | 1,62 | 0,212 | 0,267 |
| 46 | ANKY | 23,30 | 35,87 | -2,21 | 3,93 | 0,630 | 0,908 |
| 47 | KTHA | 23,06 | 36,26 | -1,80 | 3,18 | 0,192 | 0,195 |

Παράρτημα

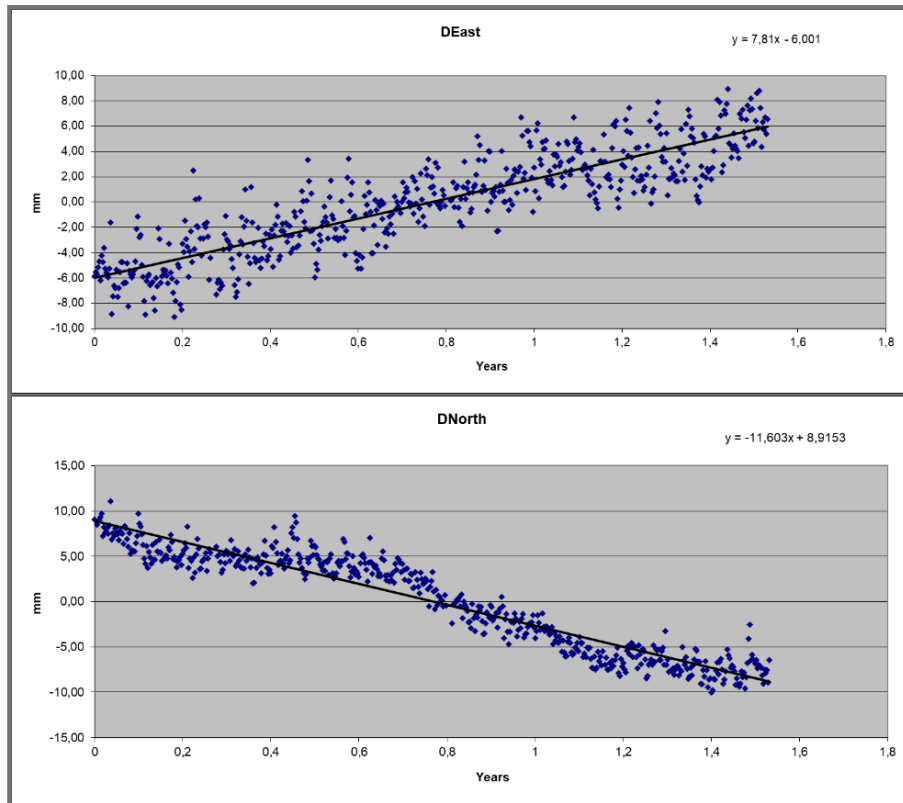


Εικόνα 31. Οι χρονοσειρές του σταθμού ANAV από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

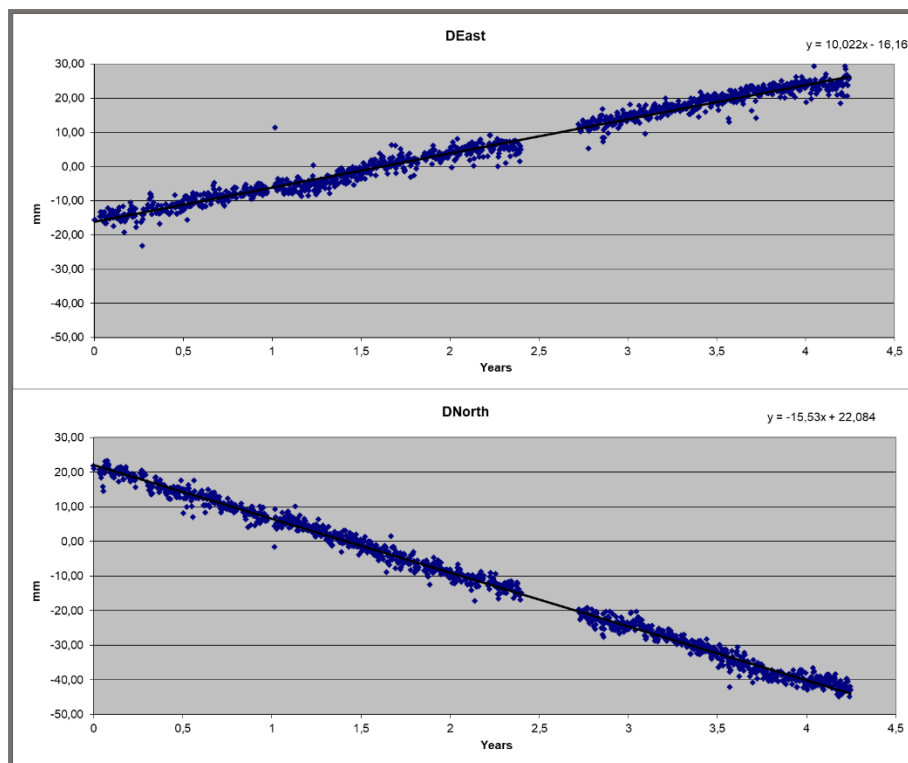


Εικόνα 32. Οι χρονοσειρές του σταθμού ANDR από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

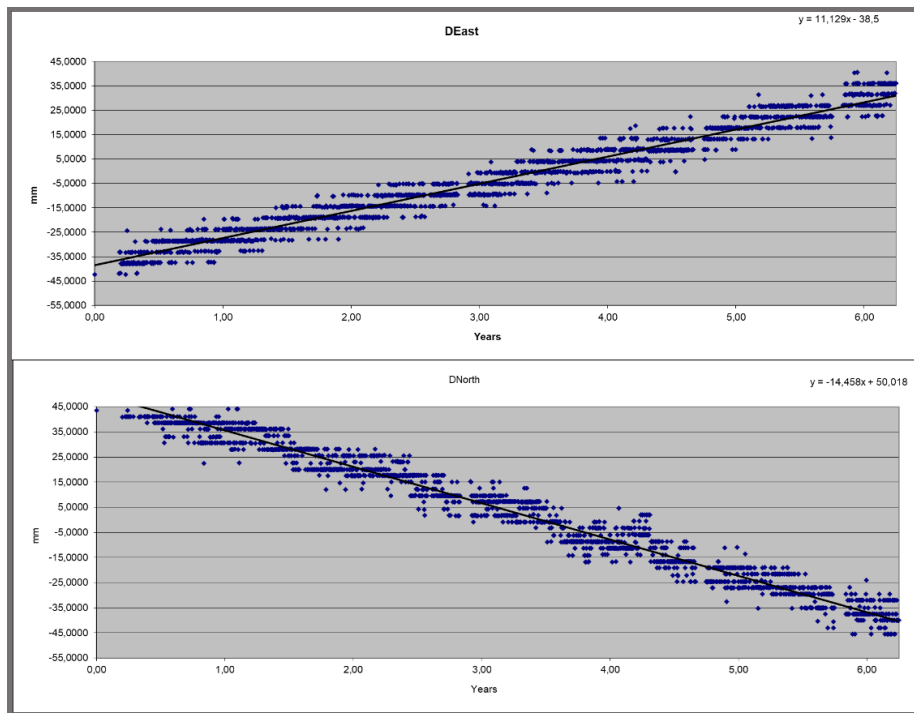


Εικόνα 33. Οι χρονοσειρές του σταθμού ANKY από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

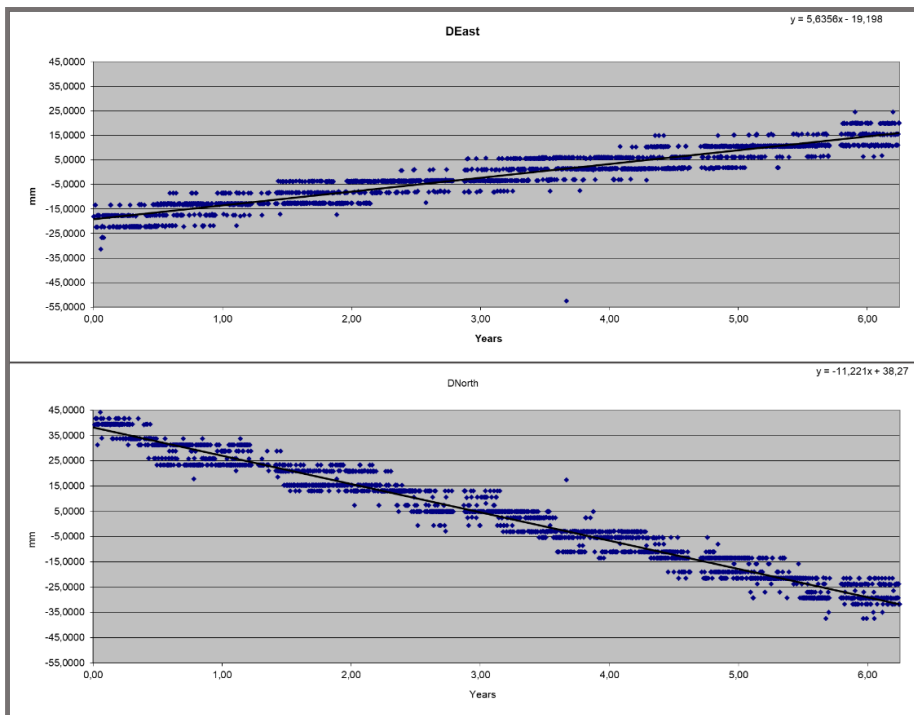


Εικόνα 34. Οι χρονοσειρές του σταθμού ASTY από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

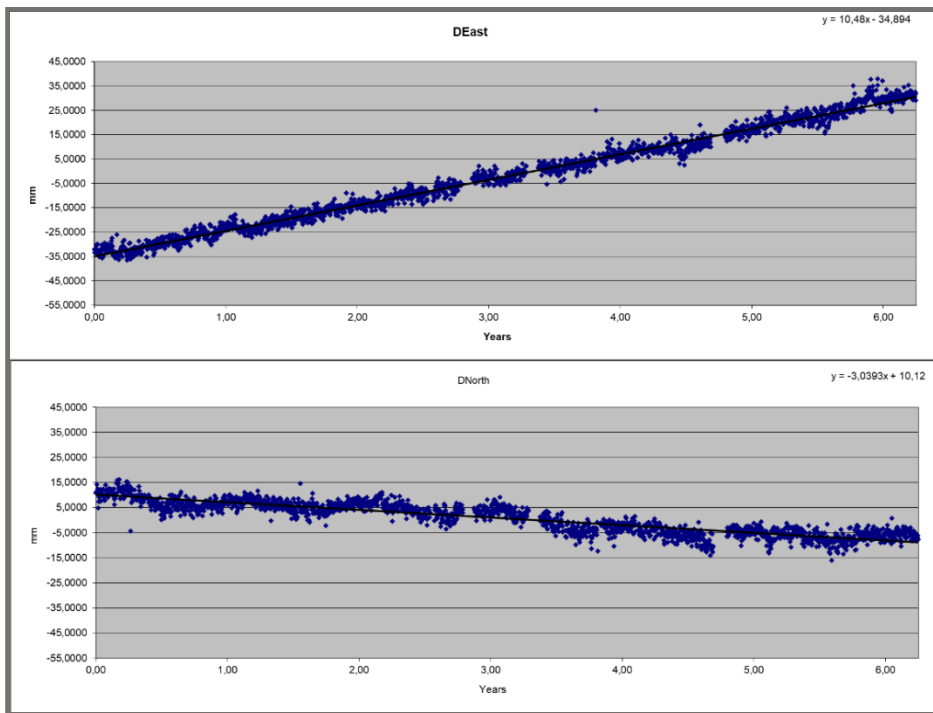


Εικόνα 35. Οι χρονοσειρές του σταθμού DATC από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

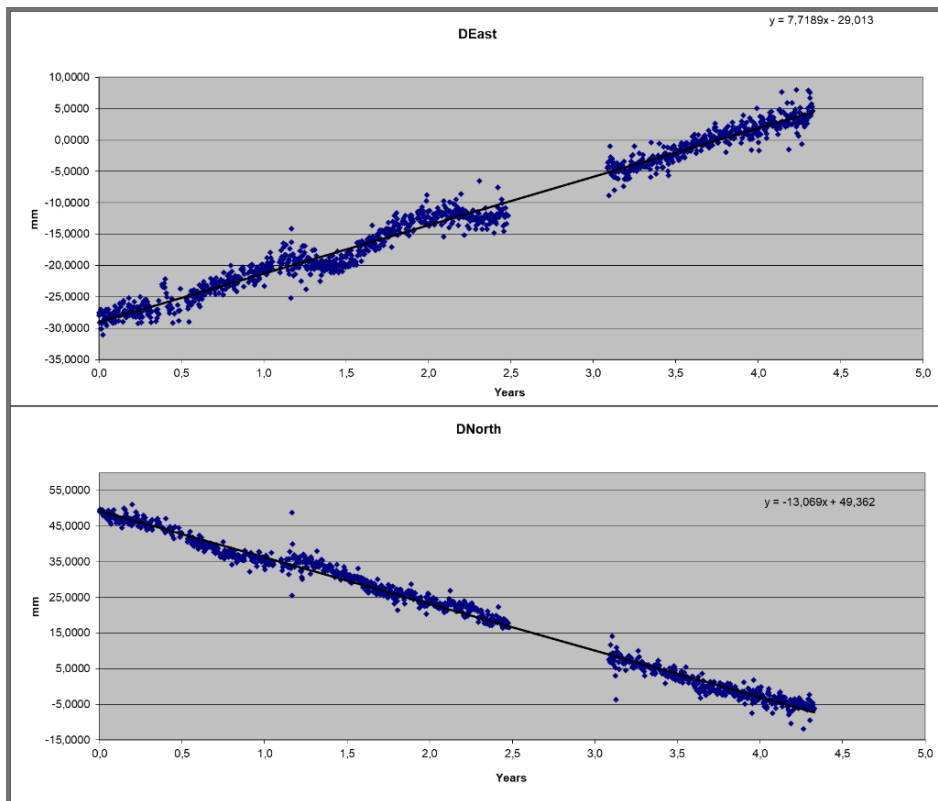


Εικόνα 36. Οι χρονοσειρές του σταθμού DIDI από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

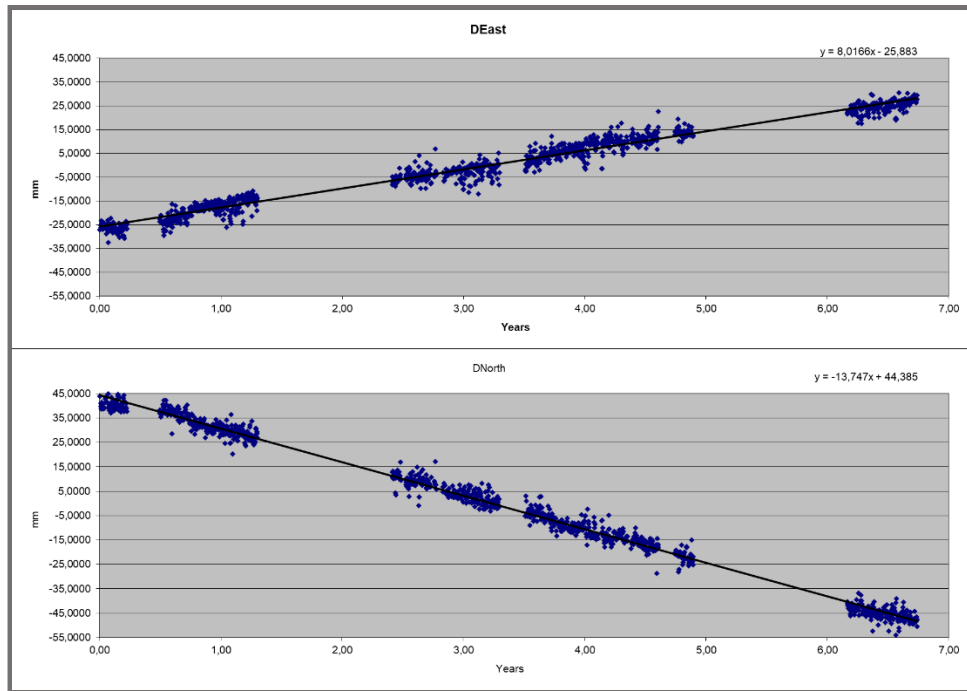


Εικόνα 32. Οι χρονοσειρές του σταθμού FETH από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

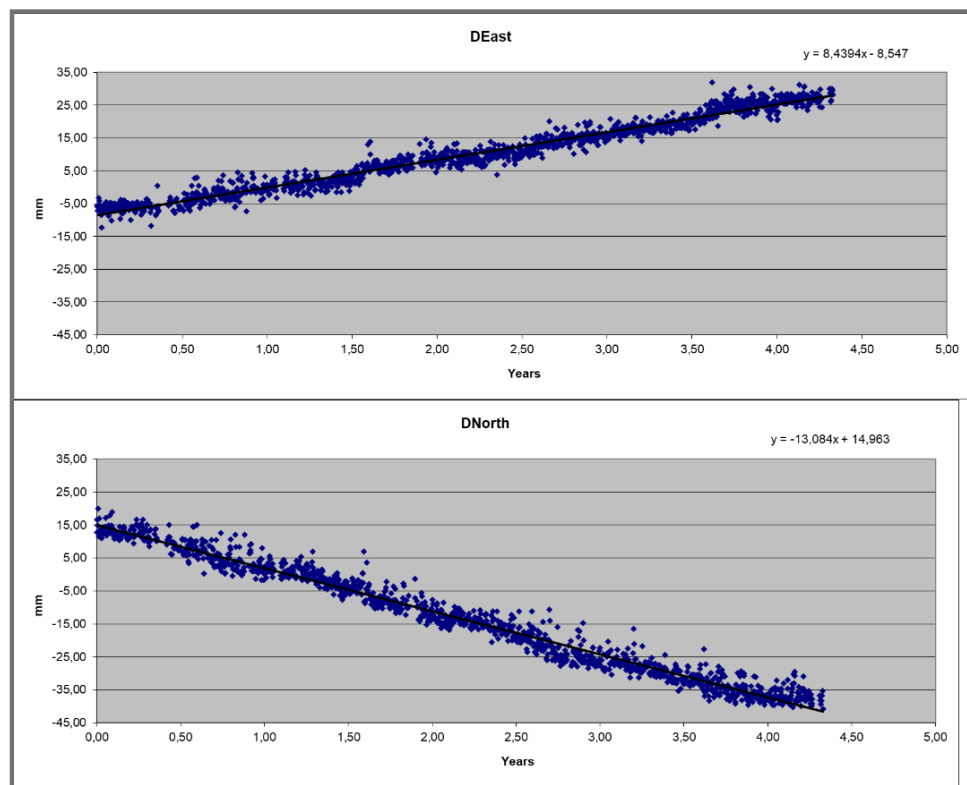


Εικόνα 33. Οι χρονοσειρές του σταθμού HERA από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

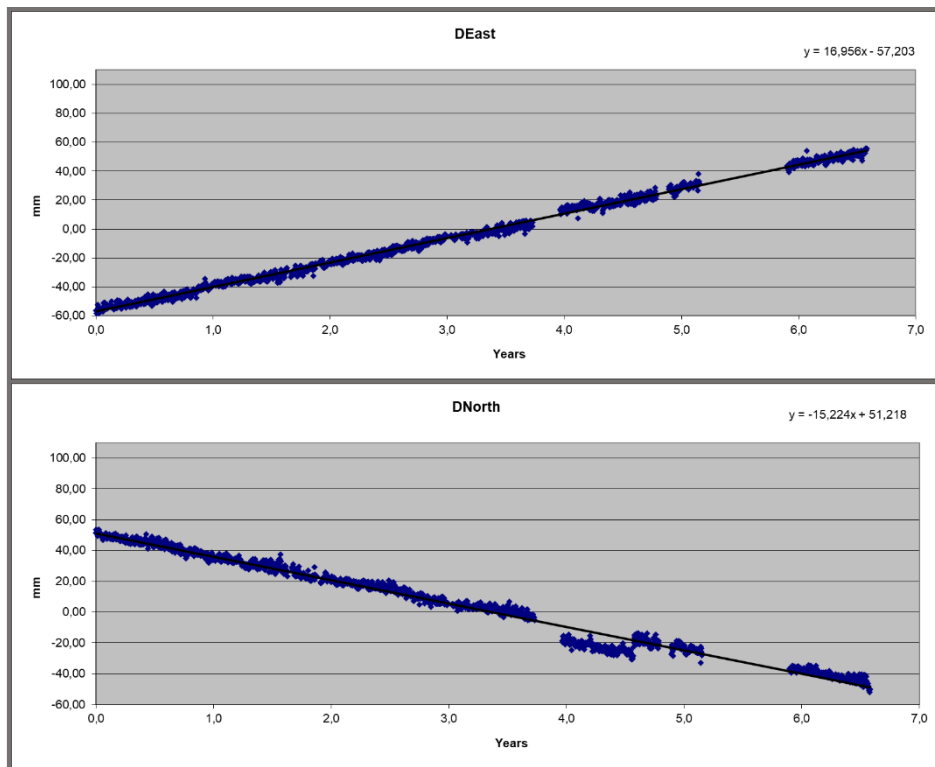


Εικόνα 39. Οι χρονοσειρές του σταθμού IERA από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

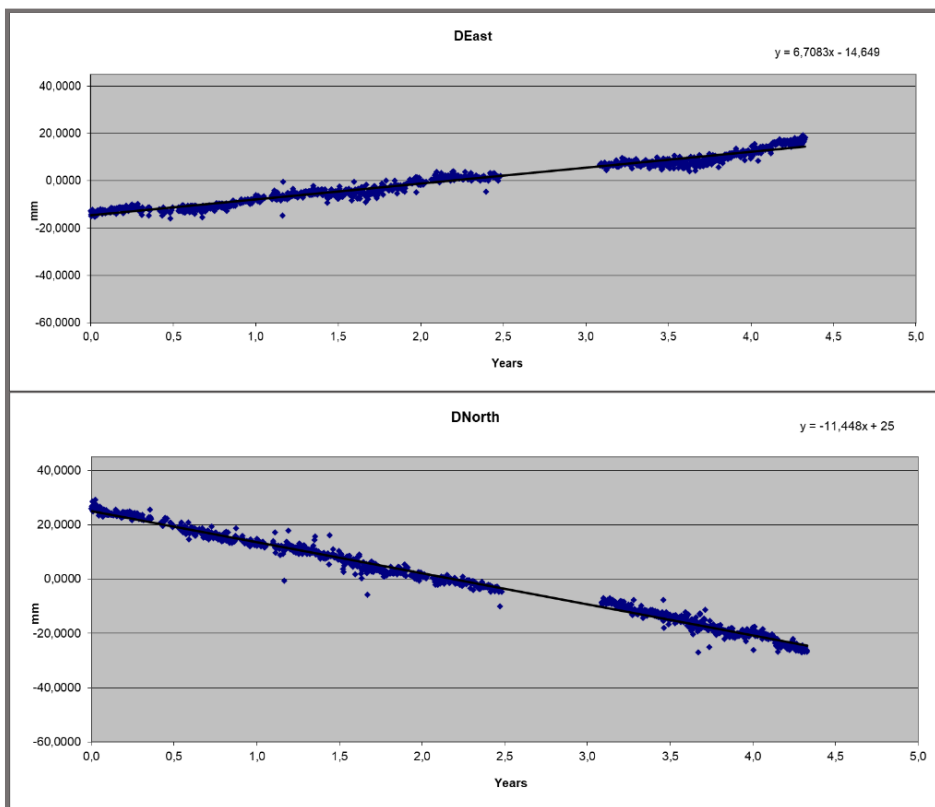


Εικόνα 40. Οι χρονοσειρές του σταθμού KALY από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

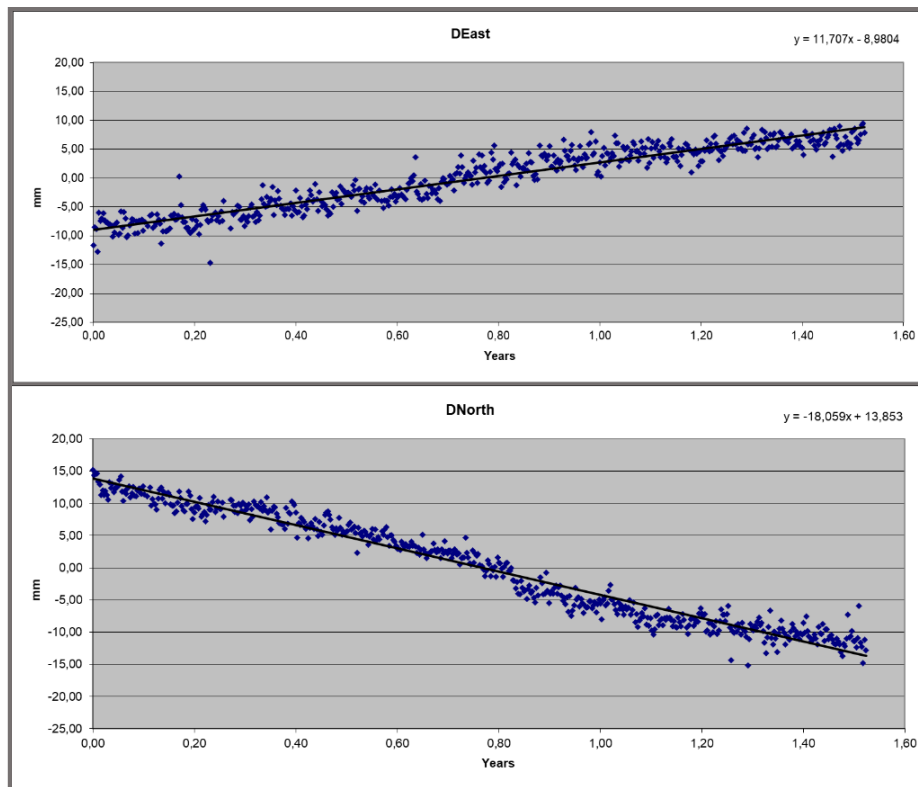


Εικόνα 34. Οι χρονοσειρές του σταθμού KATC από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

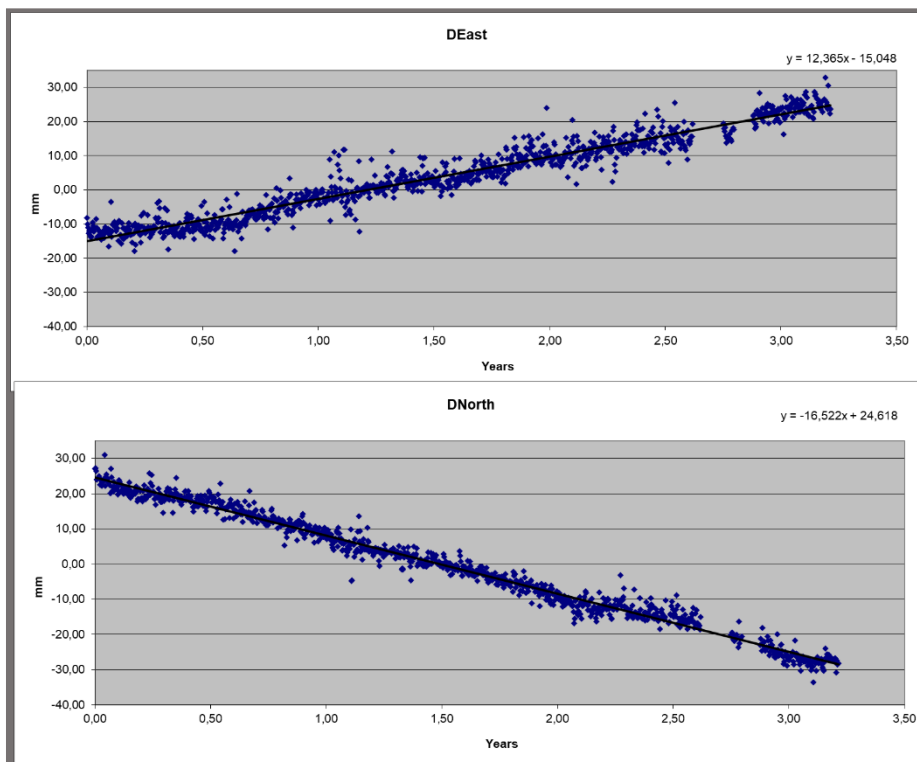


Εικόνα 35. Οι χρονοσειρές του σταθμού KORI από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

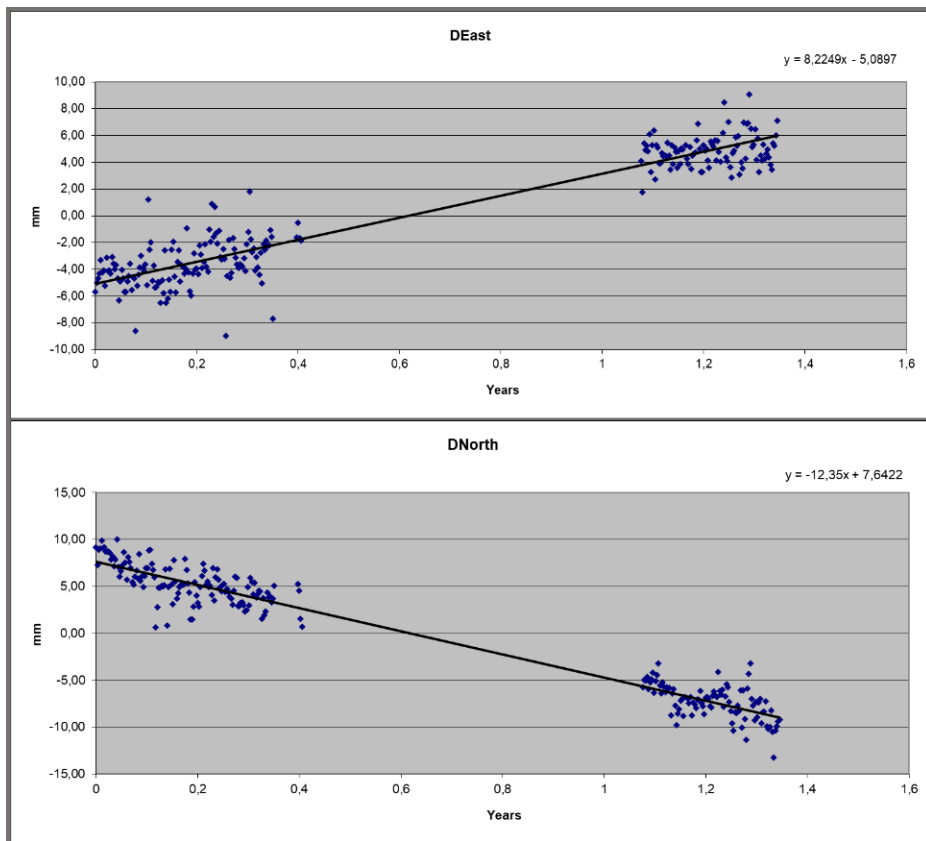


Εικόνα 36. Οι χρονοσειρές του σταθμού KRP1 από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης.

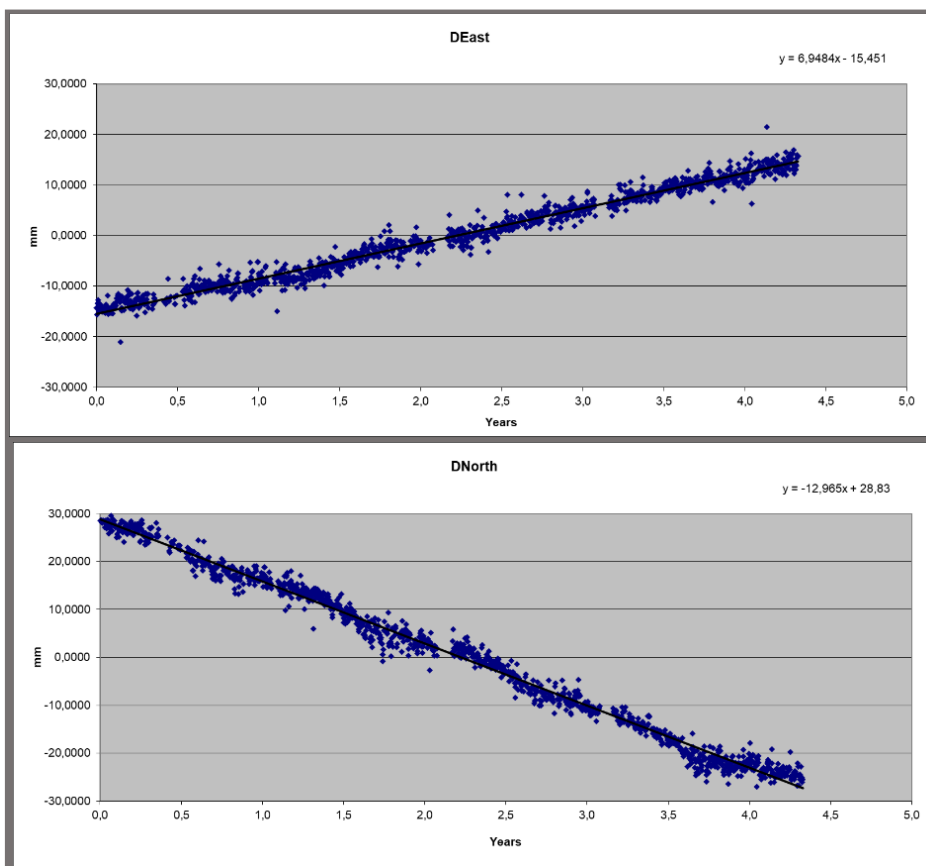


Εικόνα 37. Οι χρονοσειρές του σταθμού KRPS από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

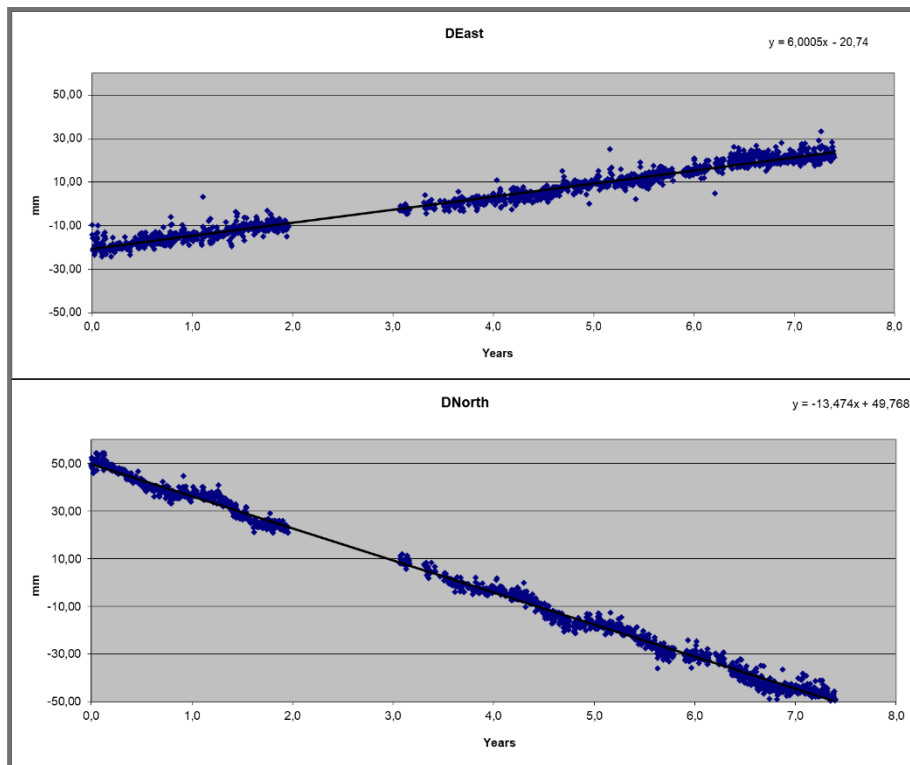


Εικόνα 38. Οι χρονοσειρές του σταθμού ΚΤΗΑ από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

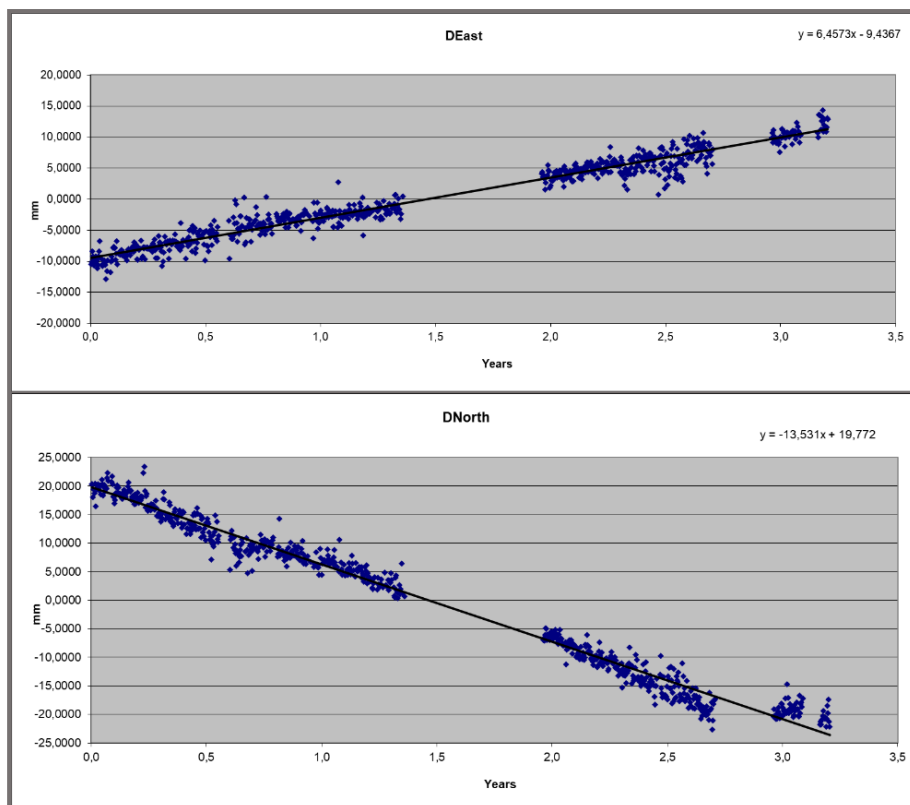


Εικόνα 39. Οι χρονοσειρές του σταθμού ΜΙΛΟ από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

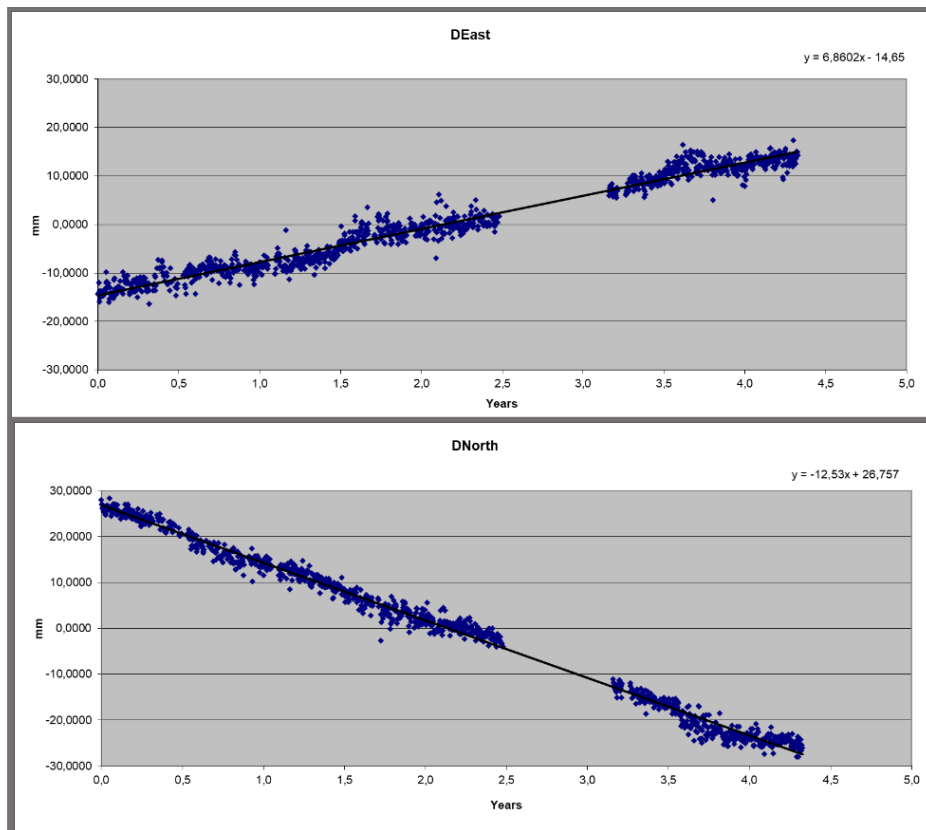


Εικόνα 40. Οι χρονοσειρές του σταθμού MOLA από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

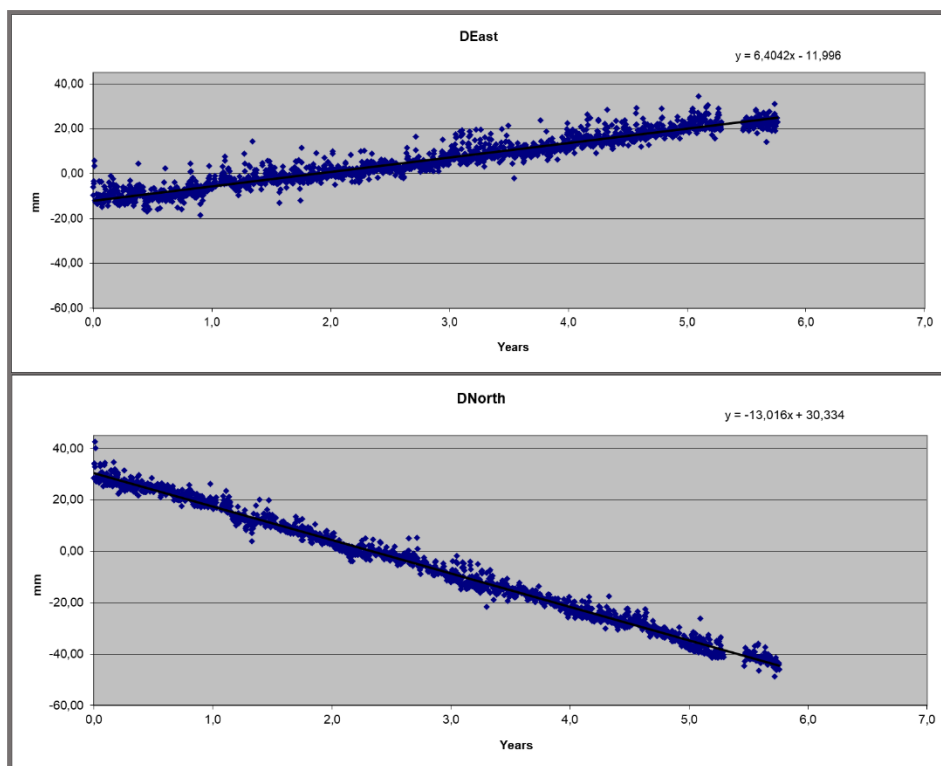


Εικόνα 41. Οι χρονοσειρές του σταθμού LYGO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

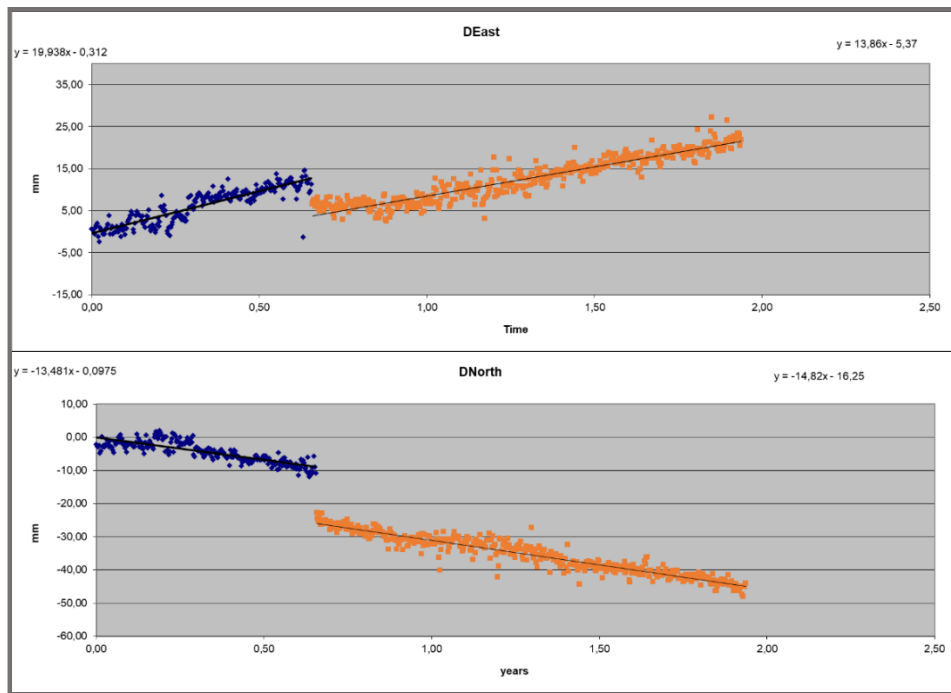


Εικόνα 42. Οι χρονοσειρές του σταθμού NAXO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

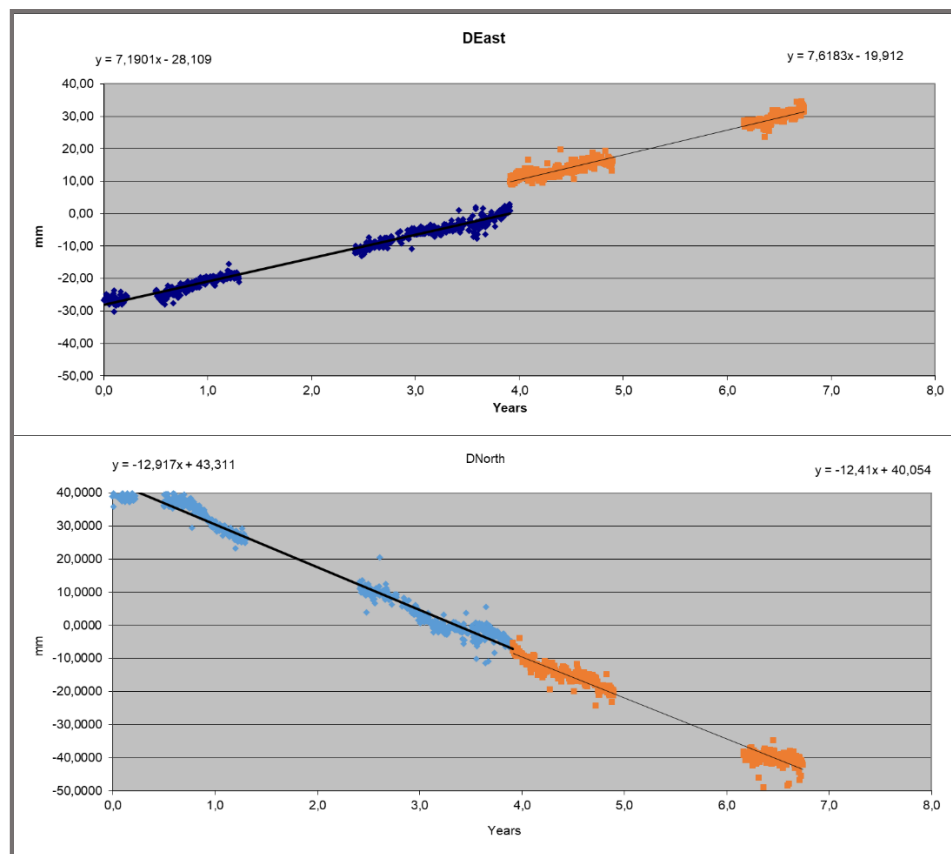


Εικόνα 43. Οι χρονοσειρές του σταθμού NEAB από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

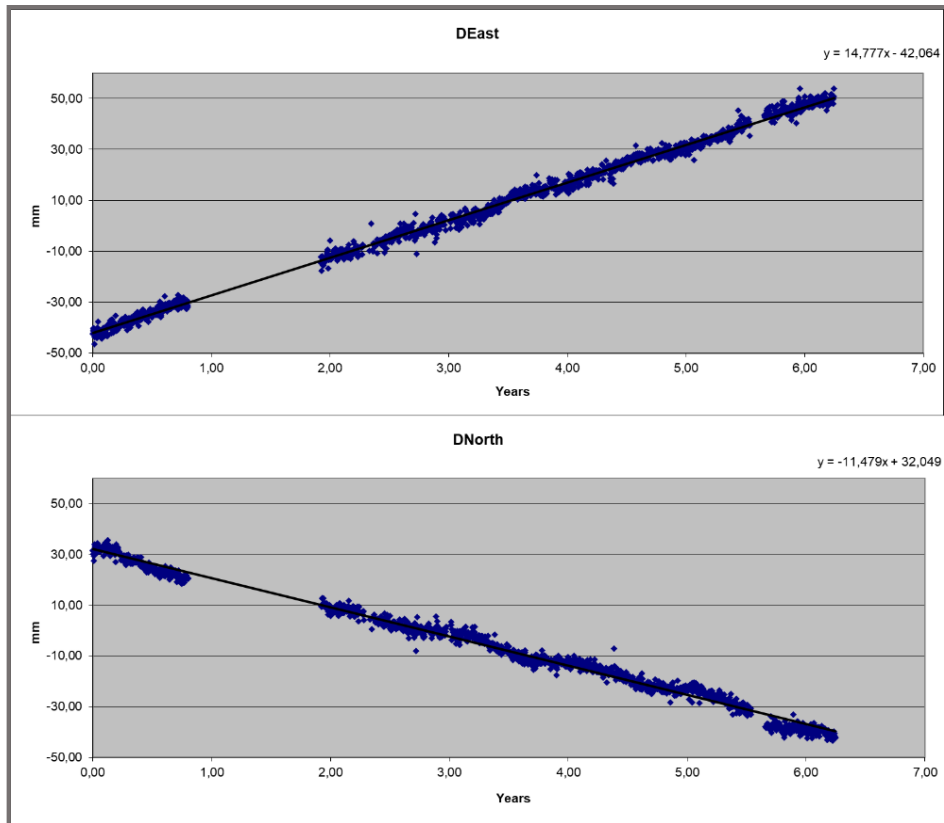


Εικόνα 44. Οι χρονοσειρές του σταθμού NISY από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

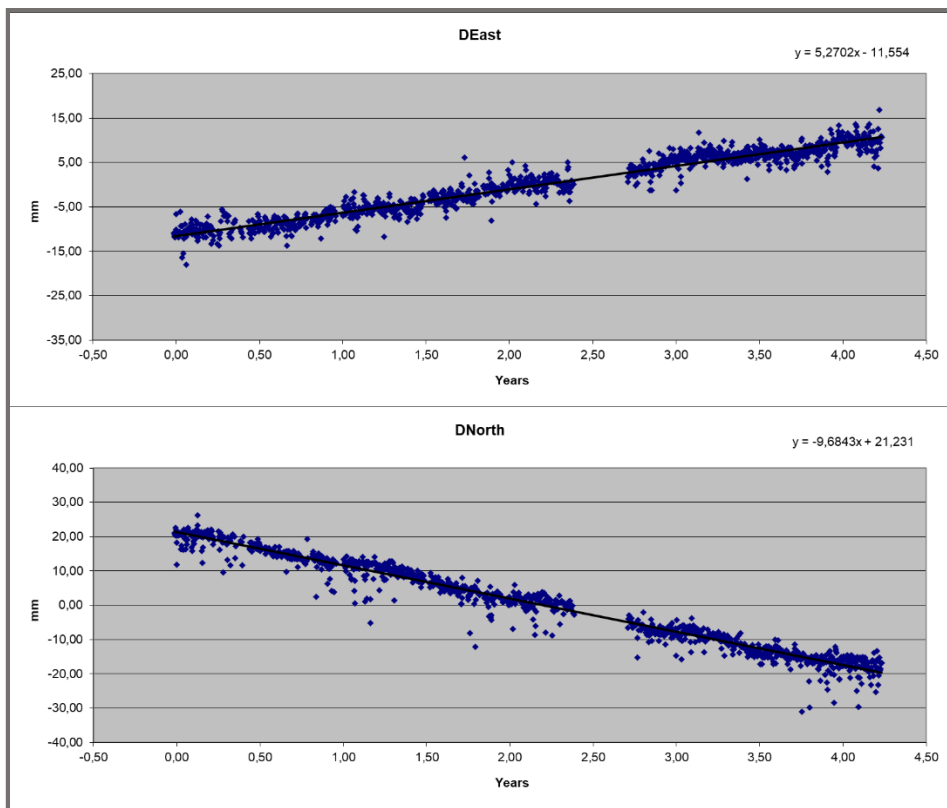


Εικόνα 45. Οι χρονοσειρές του σταθμού RETH από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

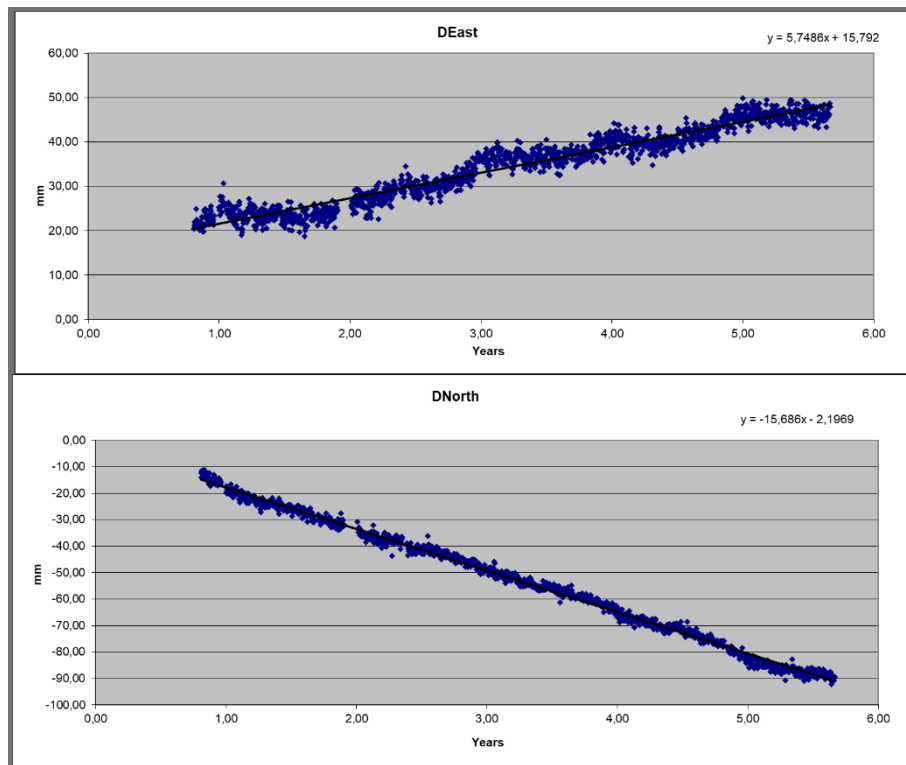


Εικόνα 46. Οι χρονοσειρές του σταθμού RODO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

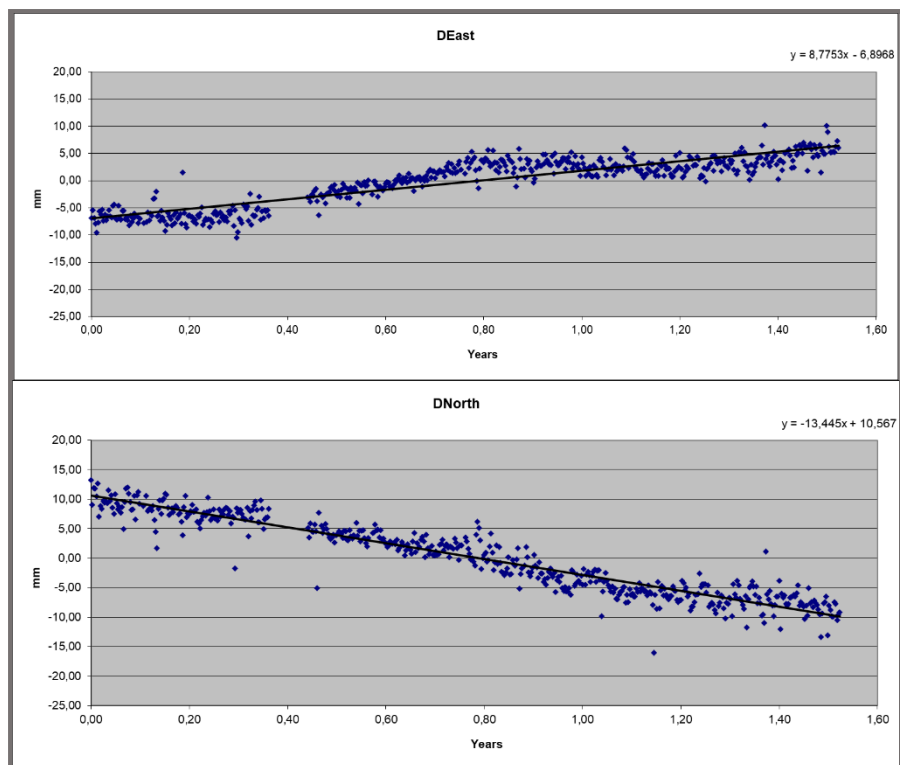


Εικόνα 47. Οι χρονοσειρές του σταθμού SAMO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

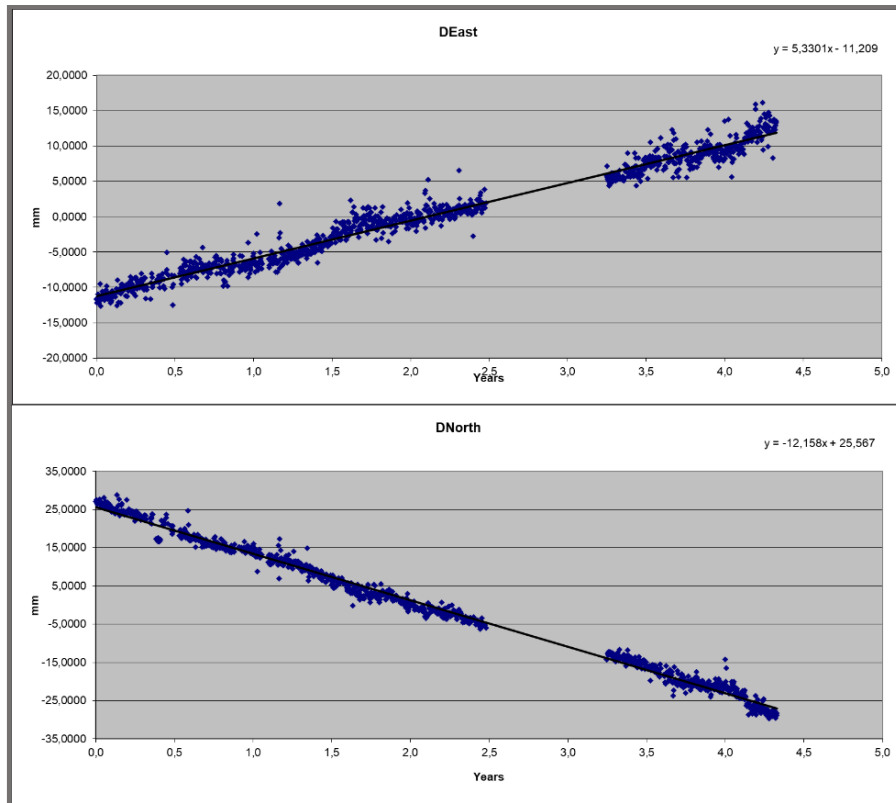


Εικόνα 48. Οι χρονοσειρές του σταθμού SANT από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

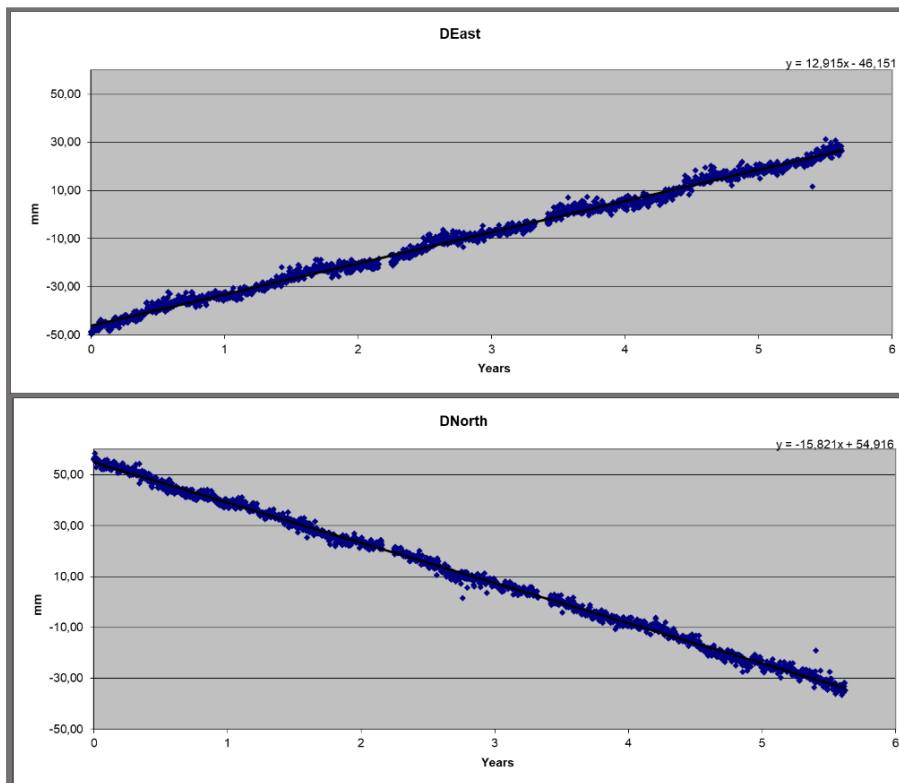


Εικόνα 49. Οι χρονοσειρές του σταθμού SITI από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

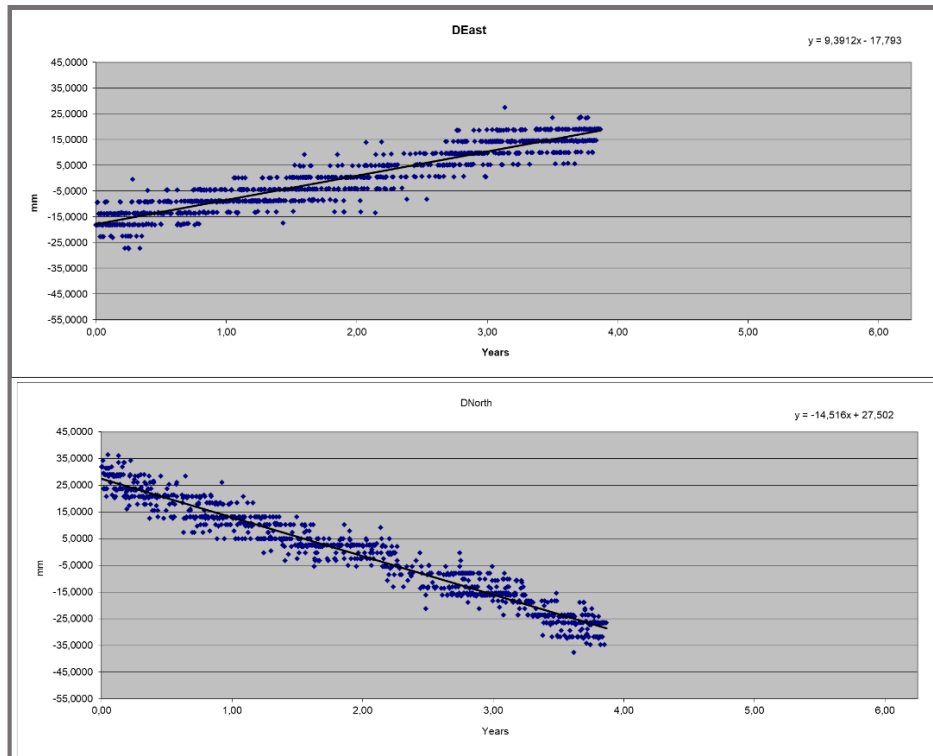


Εικόνα 50. Οι χρονοσειρές του σταθμού SPET από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

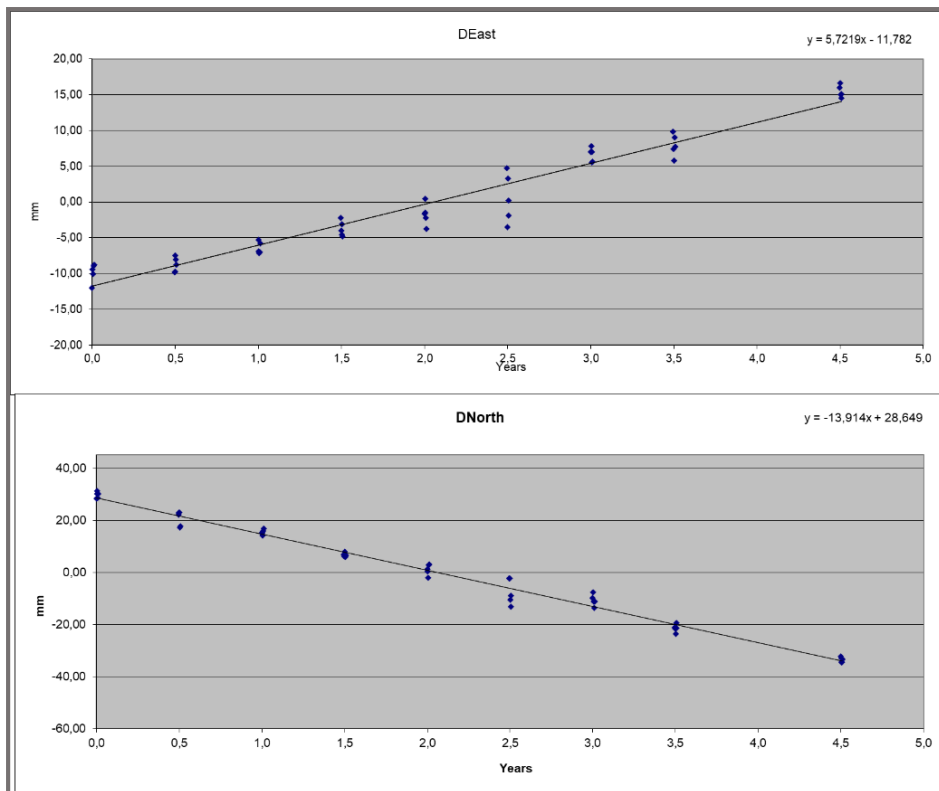


Εικόνα 51. Οι χρονοσειρές του σταθμού TILO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

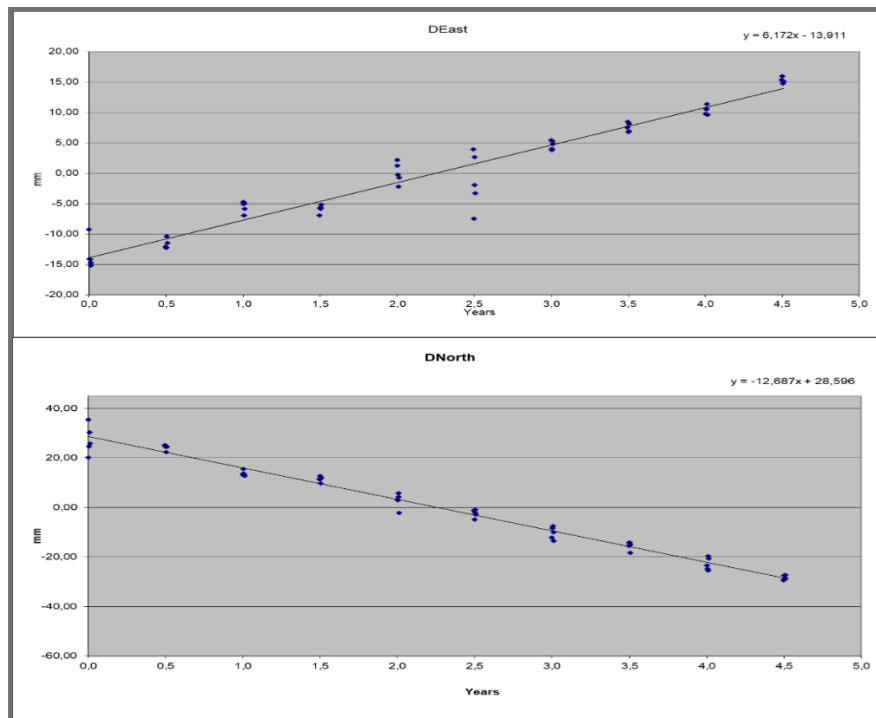


Εικόνα 52. Οι χρονοσειρές του σταθμού ZKRO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

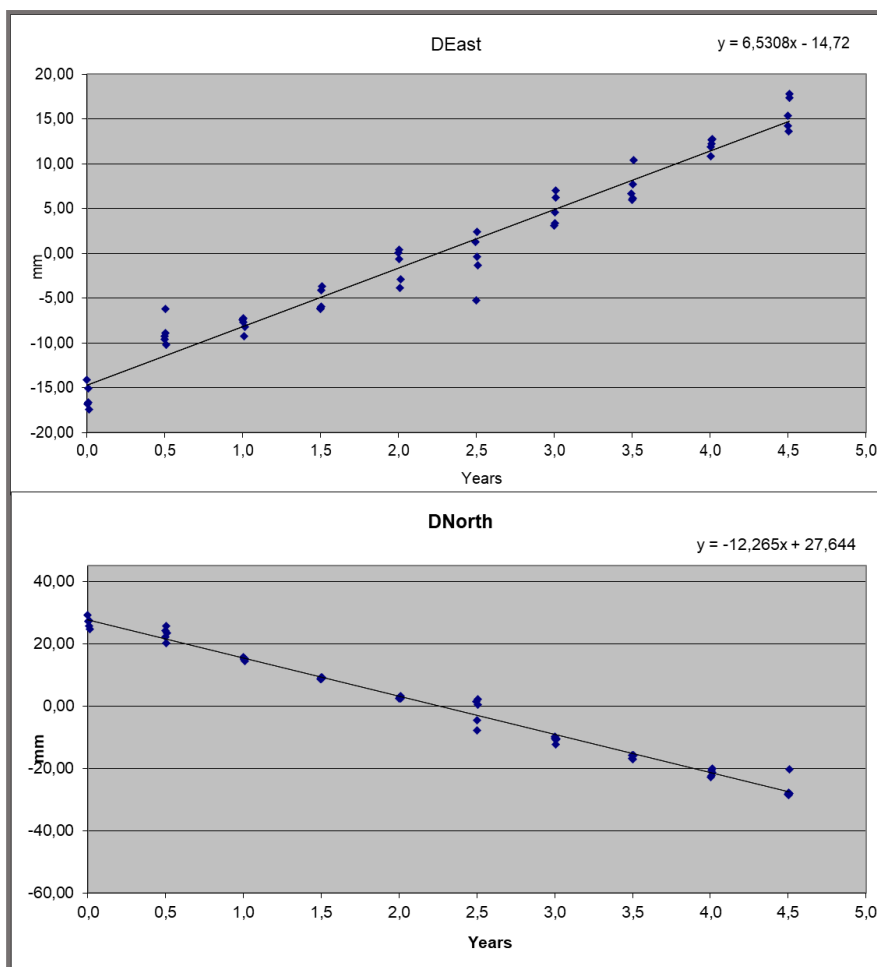


Εικόνα 53. Οι χρονοσειρές του σταθμού FOLE από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

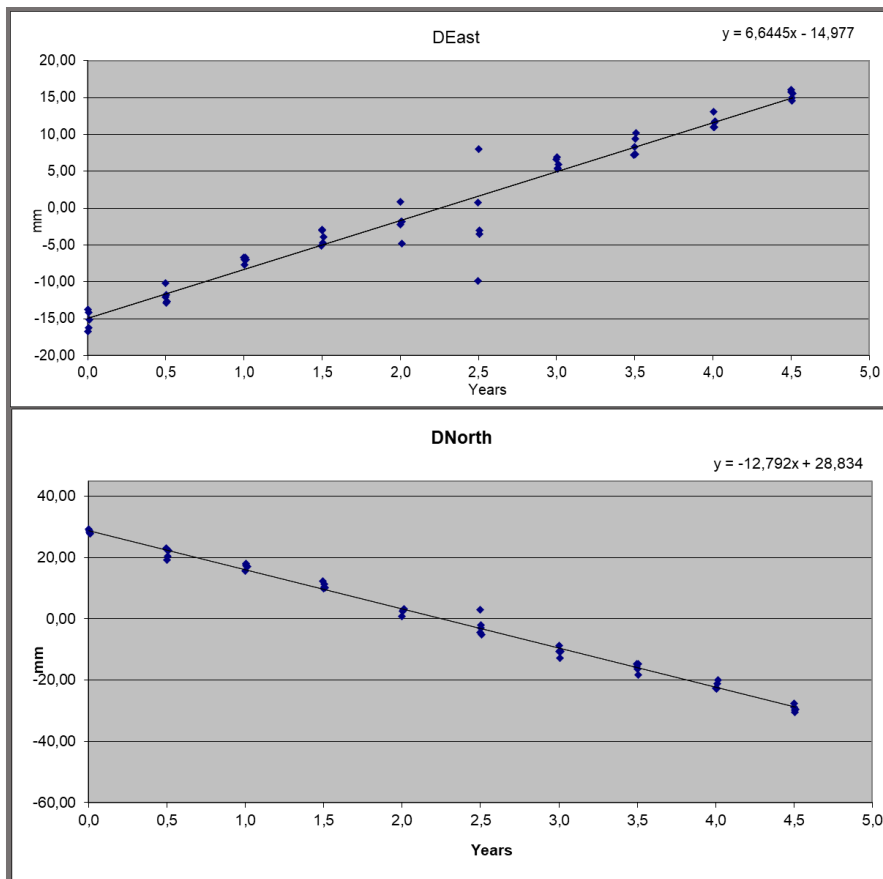


Εικόνα 54. Οι χρονοσειρές του σταθμού ΙΚΑΡ από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

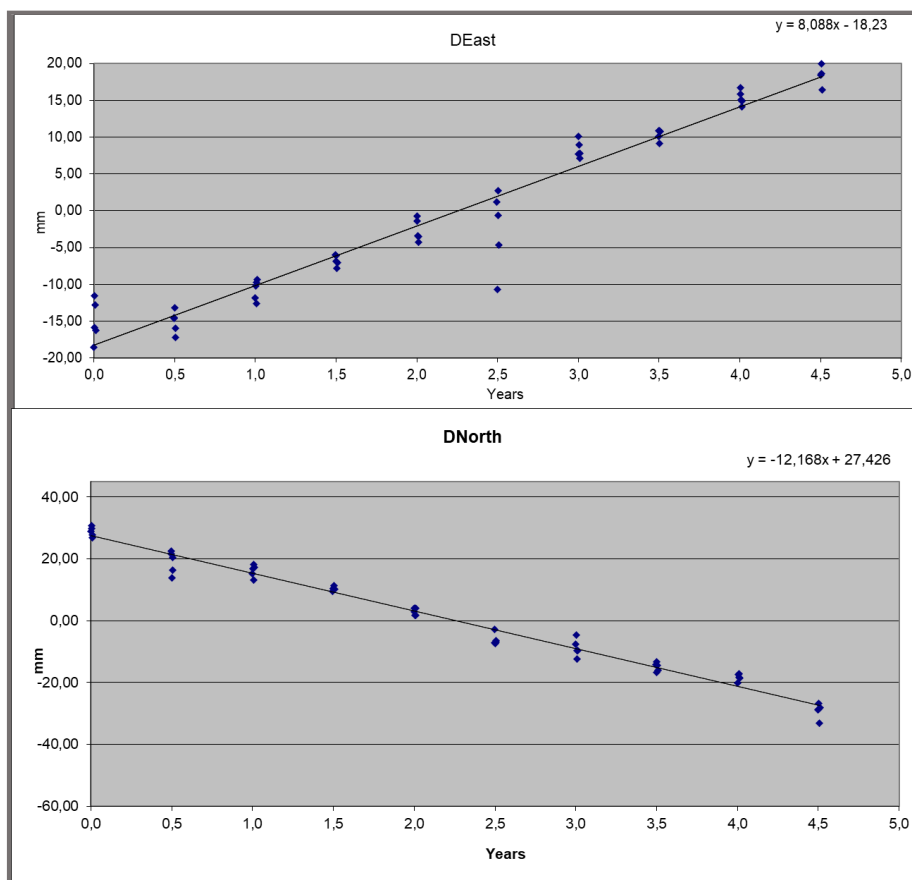


Εικόνα 55. Οι χρονοσειρές του σταθμού ΡΑΡΟ από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

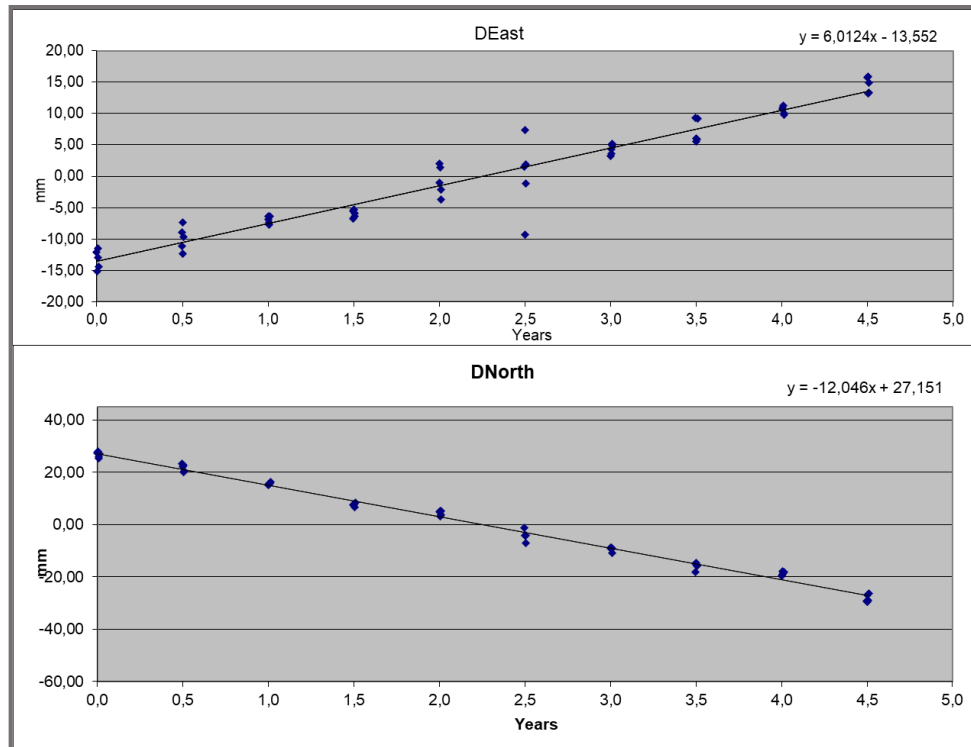


Εικόνα 56. Οι χρονοσειρές του σταθμού SYRO από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

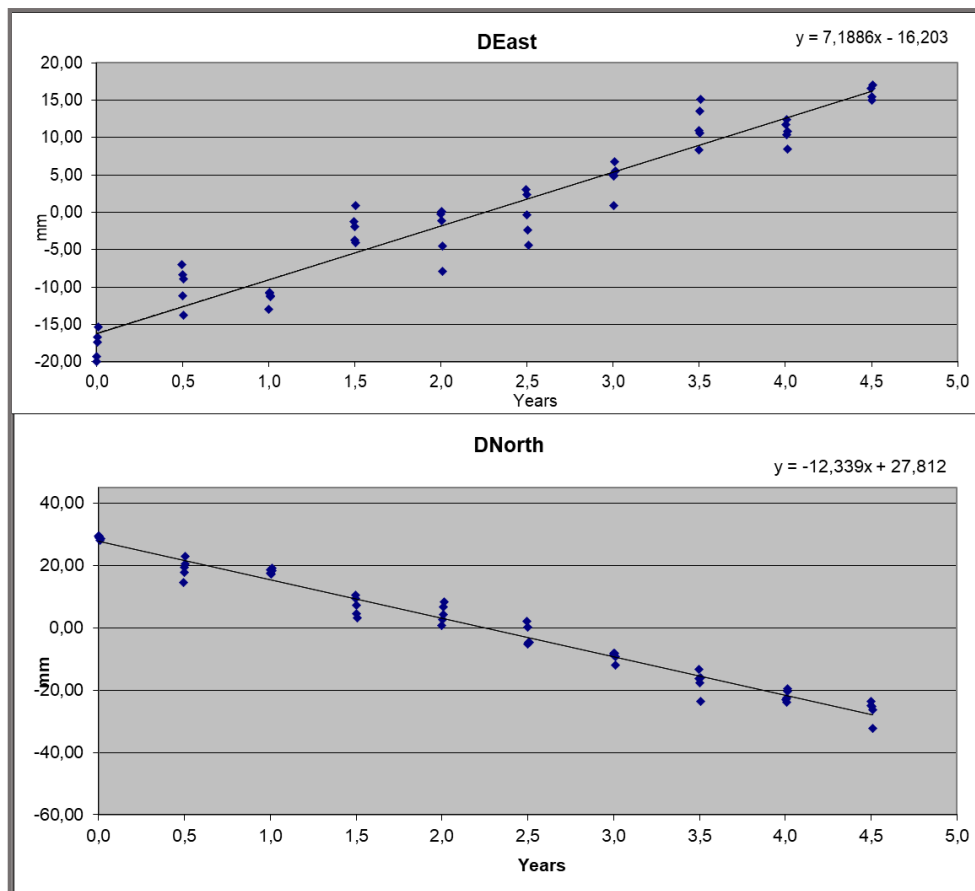


Εικόνα 57. Οι χρονοσειρές του σταθμού SERI από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

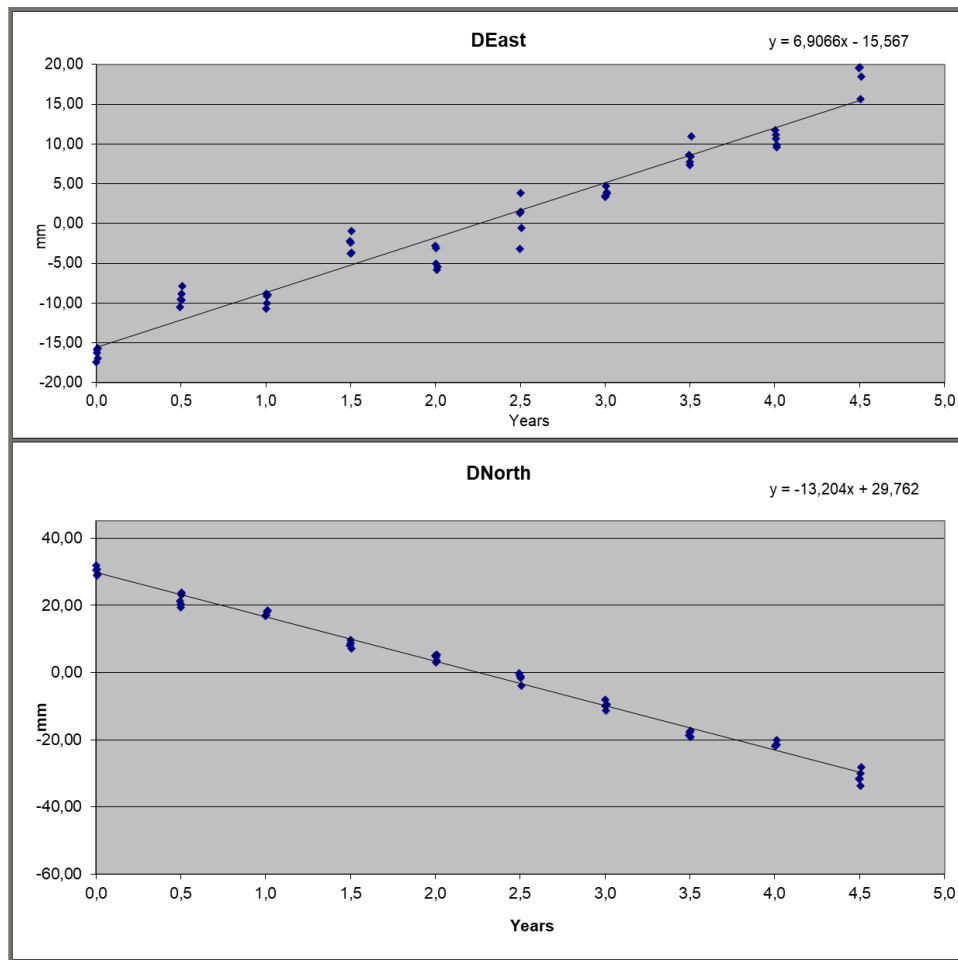


Εικόνα 58. Οι χρονοσειρές του σταθμού IOS από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης



Εικόνα 59. Οι χρονοσειρές του σταθμού AMRG από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Εικόνα 60. Οι χρονοσειρές του σταθμού ΜΥΚΟ από τις οριζόντιες συνιστώσες κίνησης