

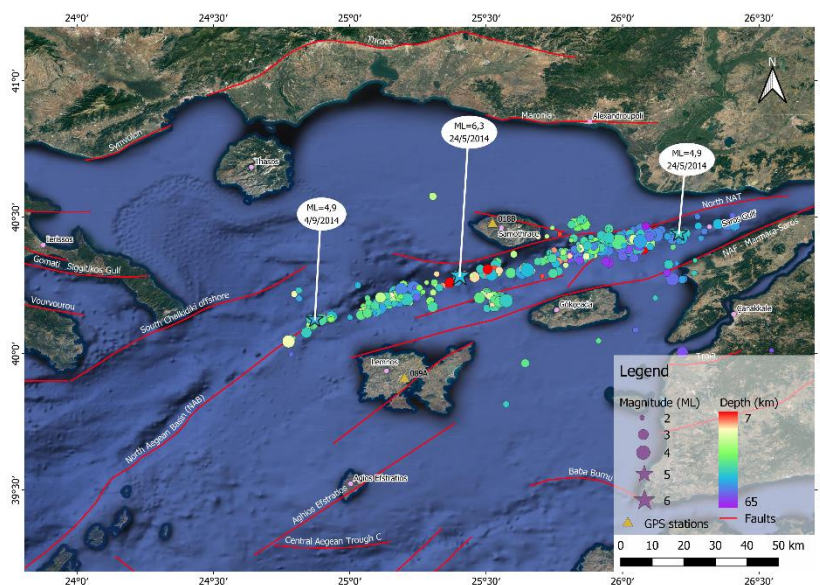
## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### «Μελέτη κινητικότητας του γήινου φλοιού στο Βόρειο Αιγαίο λόγω τεκτονικής και σεισμικής δραστηριότητας με χρήση απόλυτου εντοπισμού ακριβείας GNSS»

Συγγραφέας

ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΤΑΤΙΑΝΗ ΜΥΡΟΠΗ

ΑΜ: 16064



Επιβλέπων καθηγητής:

ΜΙΧΑΗΛ ΓΙΑΝΝΙΟΥ

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ

Αθήνα, Μάρτιος 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF SURVEYING AND**  
**GEOINFORMATICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

**“Assessment of crustal movements in North Aegean Sea due  
to tectonic and seismic activity using GNSS Precise Point  
Positioning”**

Student:

PRASINOU TATIANI MYROPI

Registration Number: 16064

Supervisor:

GIANNIOU MICHAIL

Assoc. Professor, University of West Attica

Athens, March 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**«Μελέτη κινητικότητας του γήινου φλοιού στο Βόρειο Αιγαίο λόγω τεκτονικής και σεισμικής δραστηριότητας με χρήση απόλυτου εντοπισμού ακριβείας GNSS»**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>Α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	ΓΙΑΝΝΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΠΑΓΟΥΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΑΝΔΡΙΤΣΑΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

## **Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Πρασίνου Τατιανή Μυρόπη του Χαριλάου, με αριθμό μητρώου 509160640227, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΤΑΤΙΑΝΗ ΜΥΡΟΠΗ



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια της ολοκλήρωσης της διπλωματικής μου εργασίας που σημαίνει και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο προπτυχιακό επίπεδο είναι σημαντικό να αναφέρω παρακάτω τη στήριξη ορισμένων ατόμων που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κύριο Γιαννίου Μιχαήλ για την πολύτιμη καθοδήγηση και την άριστη συνεργασία που είχαμε, καθώς και την ενθάρρυνση του κατά τη πορεία της συγγραφής και έρευνας, η οποία έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην ολοκλήρωσης της.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς το ν.π.δ.δ. «Ελληνικό Κτηματολόγιο» για τη δωρεάν χορήγηση δεδομένων του σταθμού Σαμοθράκης του Ελληνικού Συστήματος Εντοπισμού ΗΕΡΟΣ τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό προσωπικό του τμήματος για όλη τη γνώση και τις συμβουλές που μας μετέδωσαν όλα τα χρόνια της ακαδημαϊκής μας πορείας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τη μητέρα και τον αδερφό μου, την υπόλοιπη οικογένειά μου αλλά και τις φίλες μου για τη στήριξη και την ενθάρρυνσή τους όλα τα χρόνια της φοίτησης μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη κινητικότητας του γήινου φλοιού στο Βόρειο Αιγαίο λόγω τεκτονικής και σεισμικής δραστηριότητας με χρήση απόλυτου εντοπισμού ακριβείας GNSS» εξετάστηκε η σεισμική δόνηση της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014 μεγέθους 6,9  $M_w$  στην περιοχή της Σαμοθράκης. Ως σημείο παρατήρησης ορίστηκε ο σταθμός της Σαμοθράκης 018B του μόνιμου δικτύου σταθμών αναφοράς GPS HEPOS.

Οι παρατηρήσεις GPS αντλήθηκαν από το σταθμό για διάστημα δέκα ετών σε δύο συχνότητες 30 και 300 sec και επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο απόλυτου εντοπισμού ακριβείας PPP στο πρόγραμμα GipsyX. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν χρονοσειρές που αποτυπώνουν τη διαφοροποίηση των παρατηρήσεων GPS για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπου και διαπιστώθηκε η ύπαρξη του φαινομένου της μετασεισμικής παραμόρφωσης.

Σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση του φαινομένου της μετασεισμικής παραμόρφωσης και ο βαθμός στον οποίο επηρέασε την περιοχή, καθώς και η ανάλυση της εξέλιξης της μετατόπισης.

*Λέξεις κλειδιά: Τάφρος Βορείου Αιγαίου, σεισμός  $M_w$  6.9 24ης Μαΐου 2014, μέθοδος GPS PPP, μετασεισμική παραμόρφωση, ανάλυση χρονοσειρών*

## ABSTRACT

In this Master's thesis titled "Assessment of crustal movements in North Aegean Sea due to tectonic and seismic activity using GNSS Precise Point Positioning", the earthquake of 24 May 2014 with a magnitude of 6.9 Mw in the area of Samothrace was studied, using the Samothrace 018B station of the permanent HEPOS network as the observation point.

GPS observations were extracted from the station over a period of ten years at both 30 and 300 sec frequencies and processed using the Precision Point Positioning (PPP) tracking method in the GipsyX program. Time series were then generated to capture the differentiation of the GPS observations for the given time period where the existence of the post seismic deformation phenomenon was founded.

The study aimed to investigate the phenomenon of post seismic deformation and the extent to which it affected the area, as well as to analyse the evolution of the displacement.

*Key words: North Aegean Trough, 24th May 2014 Mw 6.9 earthquake, GPS PPP method, post seismic deformation, time series analysis*

**Acknowledgment:** This research has been benefited by use of Hellenic Positioning System's (HEPOS) data that were provided free of charge by the Hellenic Cadastre.

## Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1. ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ – ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	11
1.1. Θεωρία λιθοσφαιρικών πλακών .....	11
1.2. Ρήγματα.....	13
1.3. Συν-σεισμικές και μετασεισμικές παραμορφώσεις.....	14
1.3.1. Συν-σεισμική παραμόρφωση (coseismic deformation).....	15
1.3.2. Μετασεισμική παραμόρφωση (post – seismic deformation).....	15
1.3.3. Παραδείγματα μόνιμων μετατοπίσεων .....	16
1.4. Περιοχή Βορείου Αιγαίου – Τοπικά ρήγματα .....	18
1.5. Ιστορικό σεισμών στο Βόρειο Αιγαίο .....	20
1.6. Σεισμός 24 <sup>ης</sup> Μαΐου 2014 .....	21
2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ.....	25
2.1. Εξέλιξη και συστήματα GNSS .....	25
2.2. Μέθοδοι δορυφορικού εντοπισμού .....	26
2.3. Δίκτυα σταθμών GNSS .....	27
2.4. Χρήση GNSS στη Σεισμική Γεωδαισία .....	32
2.5. Μέθοδος Precise Point Positioning (PPP) .....	32
2.5.1. Εξισώσεις παρατηρήσεων .....	33
2.5.2. Διορθώσεις – σφάλματα .....	33
2.5.3. Λογισμικά – εφαρμογές που υλοποιούν PPP .....	37
3. ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GipsyX.....	40
3.1. Διαθέσιμα δεδομένα.....	40
3.2. Παραμετροποίηση λογισμικού επεξεργασίας.....	40
3.3. Παραγόμενα αρχεία (outputs).....	42
3.4. Scripts αυτοματοποίησης επεξεργασίας .....	45
3.5. Σύγκριση συχνοτήτων 30 και 300 second .....	47
3.6. Μετασεισμική παραμόρφωση και χρονοσειρές (Post seismic deformation) .....	53
3.7. Ταχύτητες .....	57
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	63



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Οι κύριες λιθοσφαιρικές πλάκες της Γης .....	11
Εικόνα 2: Κινήσεις και ταχύτητες λιθοσφαιρικών πλακών.....	12
Εικόνα 3: Το ελληνικό τόξο και η μικροπλάκα του Αιγαίου .....	12
Εικόνα 4: Είδη σεισμικών ρηγμάτων.....	13
Εικόνα 5: Ελληνικά ρήγματα .....	14
Εικόνα 6: Παραμόρφωση σιδηροδρομικών γραμμών που βρίσκονται πάνω στο διερχόμενο ρήγμα.....	15
Εικόνα 7: Επίδραση φαινομένου PSD στις συντεταγμένες.....	16
Εικόνα 8: Επίκεντρα και χαρακτηριστικά μελετώμενων σεισμών.....	17
Εικόνα 9: Συν-σεισμικές μετατοπίσεις βάση ημερήσιων παρατηρήσεων σε 14 σταθμούς GNSS .....	18
Εικόνα 10: Ταχύτητες GPS πλάκας της Ανατολίας .....	19
Εικόνα 11: Χωροθέτηση τάφρου Βορείου Αιγαίου .....	19
Εικόνα 12: Απεικόνιση επικέντρων σεισμών από 1970 έως 2022.....	21
Εικόνα 13: Σεισμική δραστηριότητα 22 <sup>ας</sup> και 23 <sup>ης</sup> Μαΐου 2014.....	21
Εικόνα 14: Απεικόνιση κύριου σεισμού και των δύο πρώτων μετασεισμών.....	22
Εικόνα 15: Ζημιές που προκλήθηκαν από το σεισμό σε 3 περιοχές .....	22
Εικόνα 16: Γραμμικές μετατοπίσεις μοντέλου πρόβλεψης και μετρήσεων GPS μετά το σεισμό .....	23
Εικόνα 17: Επίκεντρα σεισμών στο Βόρειο Αιγαίο (03/2014 - 10/2014).....	24
Εικόνα 18: Δίκτυο μόνιμων σταθμών HEPOS.....	28
Εικόνα 19: Δίκτυο μόνιμων σταθμών Αστεροσκοπείου Αθηνών .....	29
Εικόνα 20: Διαθεσιμότητα δεδομένων GPS των σταθμών του EPN.....	31
Εικόνα 21: Διαθεσιμότητα δεδομένων GLONASS των σταθμών του EPN.....	32
Εικόνα 22: Διαφορά κέντρου φάσης κεραίας και κέντρου μάζας δορυφόρου.....	34
Εικόνα 23: Απόσπασμα αρχείου atx. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι το offset (N,E,U) του μέσου κέντρου φάσης τους.....	34
Εικόνα 24: Interface APPS της JPL.....	38
Εικόνα 25: Interface CSRS-PPP της NRC.....	39
Εικόνα 26: Παραμετροποίηση της εντολής εκτέλεσης του προγράμματος GipsyX .....	40
Εικόνα 27: Στιγμιότυπο αρχείου ambres.stats με επεξήγηση των στατιστικών.....	43
Εικόνα 28: Στιγμιότυπο αρχείου ambres.stats για τα ιστογράμματα.....	44
Εικόνα 29: Στιγμιότυπο αρχείου gdcov.....	44
Εικόνα 30: Στιγμιότυπο αρχείου Summary .....	45
Εικόνα 31: Στιγμιότυπο αρχείου ReadDataSummary (MATLAB) .....	46
Εικόνα 32: Στιγμιότυπο αρχείου XYZ2ENU (MATLAB) .....	47
Εικόνα 33: Συν-σεισμική και μετασεισμική παραμόρφωση στο σταθμό της Σαμοθράκης ...	56

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σεισμοί αποτελούν φυσικά φαινόμενα, τα οποία έχουν καταστροφικές συνέπειες με ανείπωτες υλικές ζημιές, ανθρώπινες απώλειες και ψυχολογικό αντίκτυπο. Από τους αρχαιότερους χρόνους είναι γνωστό ότι εκατομμύρια σεισμοί κατακλύζουν τον πλανήτη και αρκετοί από αυτούς δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο. Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολυάριθμων σεισμικών φαινομένων, τα οποία έχουν αποτελέσει αντικείμενο έντονης επιστημονικής μελέτης και συζήτησης. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται ο σεισμός της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014 στην ευρύτερη περιοχή της Σαμοθράκης.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται οι τεκτονικές κινήσεις και σεισμικά φαινόμενα. Αρχικά, αναλύονται βασικές θεωρίες και ορισμοί γύρω από τους σεισμούς, καθώς και πιο σύνθετες έννοιες όπως η συν-σεισμική και μετασεισμική παραμόρφωση. Ακόμη, παρατίθενται στοιχεία για τους σεισμούς στην περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, όπως η «ανατομία» των τοπικών ρηγμάτων και ιστορικό των σεισμικών δονήσεων. Τέλος, γίνεται ξεχωριστή αναφορά στο μελετώμενο σεισμό της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται η εξέλιξη των συστημάτων GNSS καθώς και οι μέθοδοι δορυφορικού εντοπισμού. Επιπλέον, γίνεται σύνδεση της δορυφορικής και της σεισμικής γεωδαισίας αλλά και ανάλυση της μεθόδου απόλυτου εντοπισμού ακριβείας.

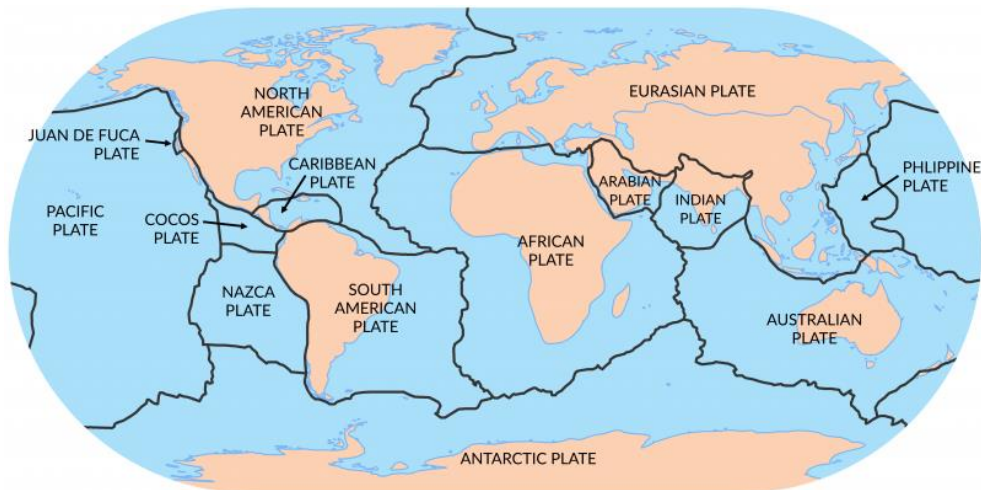
Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία της μελέτης με παράθεση των παραμέτρων που εισήχθησαν στο λογισμικό επεξεργασίας GipsyX, αλλά και τα αποτελέσματα που παράχθηκαν, όπως χρονοσειρές και πίνακες που δείχνουν την εξέλιξη της μετατόπισης και της συμπεριφοράς των παρατηρήσεων GPS μετά το σεισμό.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

# 1. ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ – ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

## 1.1. Θεωρία λιθοσφαιρικών πλακών

Η έρευνα της σύστασης και της συμπεριφοράς του πλανήτη ήταν ανέκαθεν ένα βασικό ζήτημα που απασχολούσε τους ερευνητές σε όλο τον κόσμο. Οι επιστήμονες προσπαθούσαν από αρχαιοτάτων χρόνων να εξηγήσουν πώς προέκυψε το σχήμα των ηπείρων και αν αυτές είναι ακίνητες, αγκιστρωμένες σε μία συγκεκριμένη θέση στη Γη. Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα από τον Γερμανό επιστήμονα Alfred Wegener, ο οποίος διατύπωσε την ιδέα πως ο πλανήτης αποτελείται από μεγάλες «πλάκες» που έχουν συνεχή κίνηση πάνω στο ρευστό μανδύα της Γης και αλληλοεπιδρούν συγκλίνοντας, αποκλίνοντας ή ολισθαίνοντας μεταξύ τους.

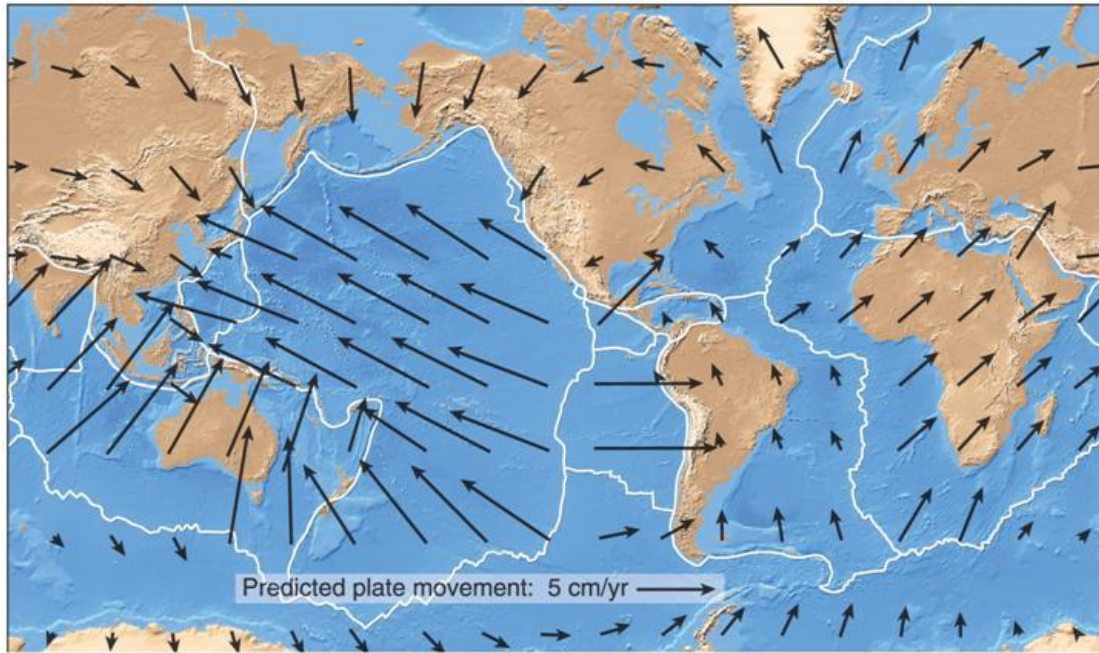


Εικόνα 1: Οι κύριες λιθοσφαιρικές πλάκες της Γης (Πηγή: <https://earthhow.com/7-major-tectonic-plates/>)

Ο πλανήτης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, αποτελείται από επτά κύριες πλάκες και άλλες πιο μικρές. Οι επτά που καλύπτουν τη μεγαλύτερη επιφάνειά του είναι:

- ✚ Η Ευρασιατική
- ✚ Η πλάκα της Βόρειας Αμερικής
- ✚ Η πλάκα της Νότιας Αμερικής
- ✚ Η Αφρικανική
- ✚ Η πλάκα της Ανταρκτικής
- ✚ Η Ινδοαυστραλιανή
- ✚ Η πλάκα του Ειρηνικού

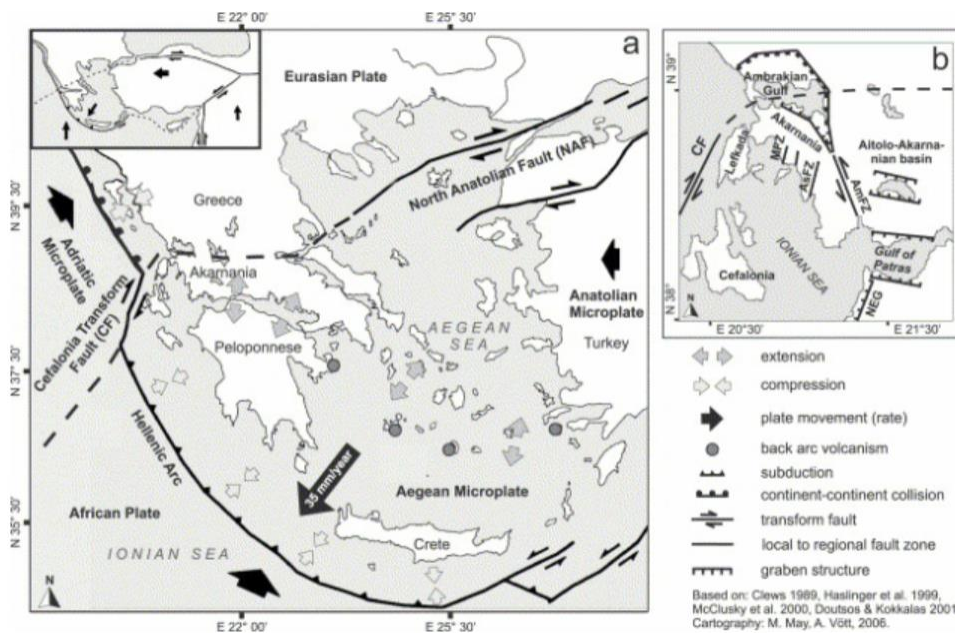
Οι κινήσεις που κάνουν οι πλάκες ποικίλουν, δημιουργώντας έτσι ενέργεια η οποία εκτονώνεται με διάφορους τρόπους όπως είναι οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και σε μακροχρόνια κλίμακα με ορογενέσεις. Η ταχύτητα μετακίνησης των πλακών δεν είναι ενιαία, ούτε έχει τον ίδιο προσανατολισμό, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2. Το εύρος της ταχύτητας μετακίνησης ποικίλει από μερικά mm έως αρκετά cm το χρόνο.



Εικόνα 2: Κινήσεις και ταχύτητες λιθοσφαιρικών πλακών (Πηγή: <https://spotlight.unavco.org/how-gps-works/gps-and-tectonics/gps-and-tectonics.html>)

Στα όρια των τεκτονικών πλακών που αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχουν συχνά κάποιες μικρές, άκαμπτες περιοχές της λιθόσφαιρας που συμπεριφέρονται και κινούνται ανεξάρτητα. Λόγω της μικρής έκτασής τους ονομάζονται μικροπλάκες (microplates) και μπορεί να συναντηθούν σε διάφορα τεκτονικά περιβάλλοντα. (L' Annunziata & Kessler, 2003)

Στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, όπου είναι η ευρύτερη περιοχή μελέτης, υπάρχουν οι μικροπλάκες της Ανατολίας, του Αιγαίου και της Αδριατικής. Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι μικροπλάκες με τον προσανατολισμό της κίνησής τους, καθώς και το Ελληνικό τόξο αλλά και τα ρήγματα που σχηματίζονται στα όρια επαφής τους.



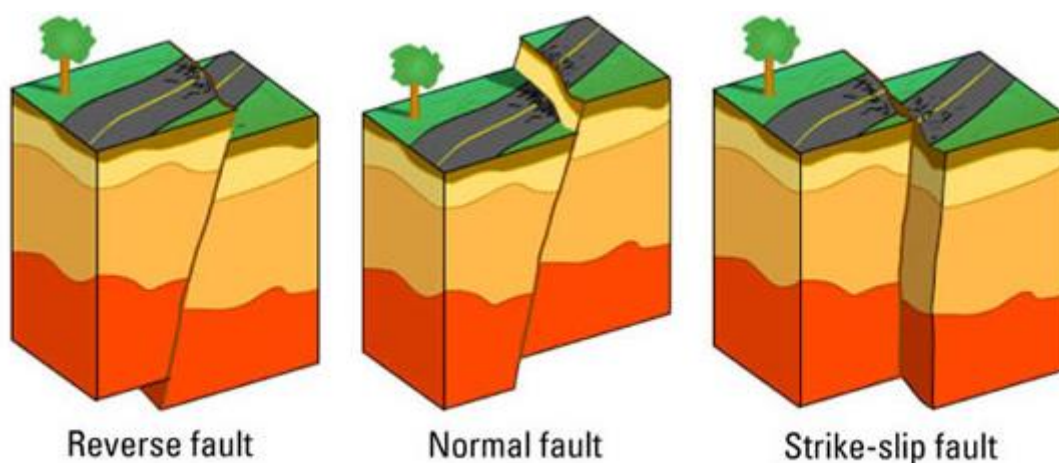
Εικόνα 3: Το ελληνικό τόξο και η μικροπλάκα του Αιγαίου (Πηγή: [weebly.com](http://weebly.com))

## 1.2. Ρήγματα

«Ρήγμα ονομάζεται κάθε τεκτονική επιφάνεια θραυσιγενούς χαρακτήρα, που διακόπτει τη συνέχεια των πετρωμάτων και συνοδεύεται από σχετική μετατόπιση των εκατέρωθεν αυτής τεμαχών» (Παπανικολάου & Σιδέρης, 2014). Ένα ρήγμα θεωρείται ενεργό όταν συνδέεται με σεισμό που έχει εκδηλωθεί τα τελευταία 10.000 χρόνια.

Στα όρια των τεκτονικών πλακών, εκεί που η μία πλάκα συναντά την όμορή της, εντοπίζεται και η μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα. Με βάση τις κινήσεις, που αναφέρθηκαν παραπάνω, διακρίνουμε τρία είδη ρηγμάτων τα οποία δημιουργεί αυτή η επαφή και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.

- Ρήγματα μετάπτωσης ή κανονικά ρήγματα (normal faults)
- Ρήγματα εφίπλευσης/επώθησης ή ανάστροφα ρήγματα (thrust faults)
- Ρήγματα ολίσθησης ή οριζόντιας μετατόπισης (strike slip faults)

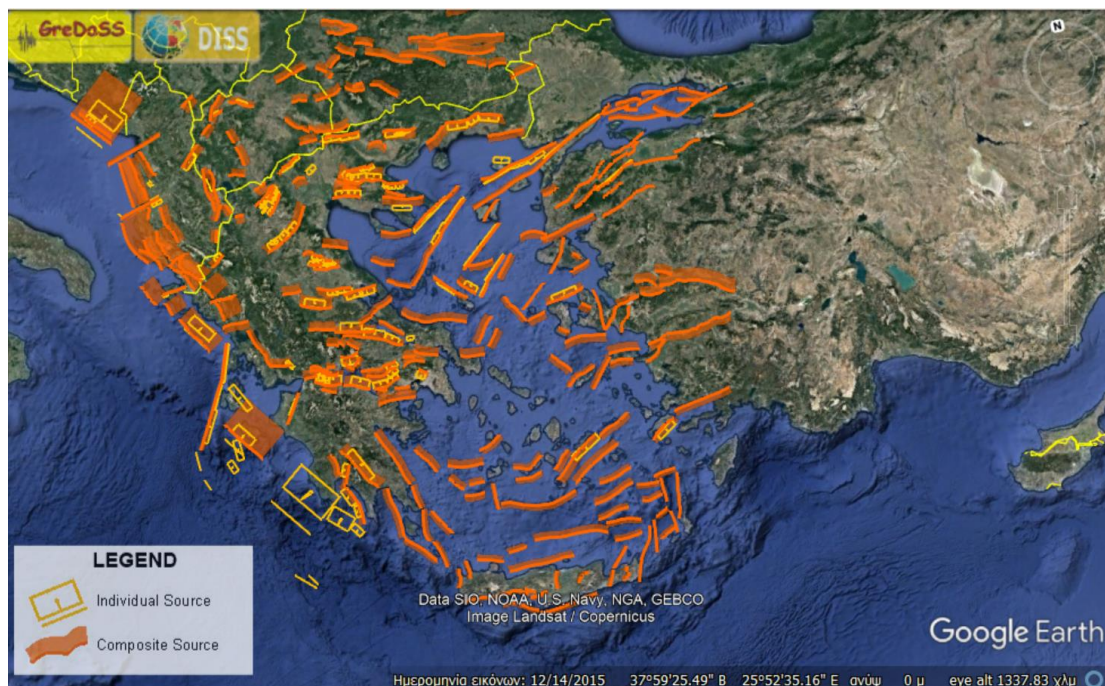


Εικόνα 4: Είδη σεισμικών ρηγμάτων (Πηγή: [Earthquake | Fault lines and plates interactions \(sms-tsunami-warning.com\)](https://www.sms-tsunami-warning.com))

Σε ένα κανονικό ρήγμα το άνω τέμαχος υποχωρεί, δηλαδή βυθίζεται σε σχέση με το άλλο, ενώ σε ένα ανάστροφο ρήγμα το άνω τέμαχος κινείται προς τα πάνω σε σχέση με το κάτω. «Στην περίπτωση που θα κινηθεί μόνο το πάνω τμήμα ή και τα δυο συγχρόνως, σύμφωνα με τις κινήσεις που περιγράψαμε, τότε μιλάμε γενικά για φαινόμενα εφίπλευσης ή επώθησης, ανάλογα αν η γωνία κλίσης της ρηξιγενούς επιφάνειας έχει κλίση  $> 45^\circ$  ή  $< 45^\circ$ , αντίστοιχα» (Κίλιας, 2021). Κανονικά ρήγματα συναντώνται πολύ συχνά στην Ελλάδα, ενώ ανάστροφα ρήγματα εντοπίζονται ιδιαίτερα στις περιοχές όπου συγκλίνουν οι πλάκες και υπάρχει ορογένεση (π.χ. οροσειρά Ιμαλαΐων). Το ρήγμα ολίσθησης δημιουργείται όταν τα δύο τεμάχη κινούνται παράλληλα μεταξύ τους, αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα. Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου ρήγματος.

Η Ελλάδα, μαζί με την Ιταλία, χαρακτηρίζονται ως οι πιο σειсмоγενείς χώρες της Ευρώπης ενώ η Ελλάδα κρίνοντας από τη σεισμική δραστηριότητά της, βρίσκεται στην έκτη θέση παγκοσμίως. Πιο συγκεκριμένα, η σεισμική υπηρεσία της Ελβετίας αναφέρει τον ελλαδικό χώρο ως αυτόν με το μεγαλύτερο σεισμικό κίνδυνο στην Ευρώπη. Ο χαρακτηρισμός αυτός δεν είναι τυχαίος αφού στα νότια της χώρας, ανοικτά της Κρήτης, η Ευρασιατική με την Αφρικανική πλάκα έρχονται σε επαφή δημιουργώντας κίνηση εφίπλευσης, αφού η Αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική. (Swiss Service Seismological, 2023)

Εξαιτίας της επαφής των πλακών, η οποία αναφέρθηκε παραπάνω, η ελληνική επικράτεια έχει σε όλο της το μήκος και πλάτος ρήγματα που κατά καιρούς πυροδοτούν μικρούς ή μεγάλους σεισμούς.



Εικόνα 5: Ελληνικά ρήγματα (Πηγή: <http://gredass.unife.it/>)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, η Ελλάδα έχει μεγάλο πλήθος σεισμογενετικών πηγών, των οποίων η προέκταση μπορεί να συνδέεται με αρκετά μεγάλα ρήγματα, όπως γίνεται για παράδειγμα, στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, όπου το ρήγμα αποτελεί συνέχεια του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας.

### 1.3. Συν-σεισμικές και μετασεισμικές παραμορφώσεις

Βασικό χαρακτηριστικό της εκδήλωσης ενός σεισμού είναι η αισθητή κίνηση του εδάφους. Όσο μεγαλύτερος σε μέγεθος είναι ο σεισμός τόσο πιο έντονη είναι και η αίσθηση της κίνησης, ειδικά σε περιοχές κοντά στο επίκεντρο. Ένας παρατηρητής κοντά στο επίκεντρο του σεισμού ξεκινάει να αισθάνεται την κίνηση άμεσα, η οποία μπορεί να διαρκέσει έως και μερικά λεπτά. Κάποιος άλλος παρατηρητής που βρίσκεται πιο μακριά από το επίκεντρο θα ξεκινήσει να αντιλαμβάνεται την κίνηση λίγο αργότερα, όταν φτάσουν στην περιοχή του τα σεισμικά κύματα, τα οποία όμως θα είναι ασθενέστερα και η ένταση του σεισμού θα είναι μικρότερη. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.1 οι ήπειροι δεν είναι αγκιστρωμένοι πάνω στον πλανήτη αλλά «επιπλέουν» πάνω στο ρευστό μανδύα. Η κίνηση αυτή ονομάζεται τεκτονική και είναι αέναη, ενώ σε βάθος χρόνου προκαλεί αλλαγές στο σχήμα των ηπείρων.

Ένα σεισμικό γεγονός μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση και παραμόρφωση στην περιοχή κοντά στο επίκεντρο, ενώ ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού και τη γεωλογία της ευρύτερης περιοχής οι επιδράσεις ενός σεισμικού γεγονότος μπορεί να επηρεάσουν και περιοχές αρκετά μακριά από το επίκεντρο. Ο χρόνος στον οποίο θα ολοκληρωθεί η παραμόρφωση σε ένα σεισμό καθορίζει και το είδος της. Διακρίνονται δύο είδη, η συν-σεισμική και η μετασεισμική παραμόρφωση που αναλύονται παρακάτω.

### 1.3.1. Συν-σεισμική παραμόρφωση (coseismic deformation)

Στην περίπτωση στιγμιαίας ρήξης των πετρωμάτων της περιοχής προκαλείται πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή ένα ρήγμα διαρρηγνύεται και υπάρχει μόνιμη μετατόπιση και παραμόρφωση της περιοχής που διασχίζει, η οποία ολοκληρώνεται σχετικά άμεσα.

Συν-σεισμικές παραμορφώσεις παρατηρούνται συνήθως σε ισχυρούς σεισμούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πολύ έντονης συν-σεισμικής παραμόρφωσης, είναι ο σεισμός  $M_w$  7.4 που εκδηλώθηκε το 1999 στην Τουρκία και συγκεκριμένα στην πόλη Izmit, 100 χιλιόμετρα ανατολικά της Κωνσταντινούπολης. Ο σεισμός, εκτός από αρκετές ανθρώπινες απώλειες και υλικές ζημιές στα κτήρια προκάλεσε και αλλοίωση στο σιδηροδρομικό δίκτυο της περιοχής. Το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, όπου διέρχεται από την περιοχή, είναι ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, οπότε και η μετατόπιση που προκλήθηκε από το σεισμό είναι οριζόντια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Το σημείο που περνάει ακριβώς το ρήγμα που διαρρήχθηκε έχει μετακινηθεί περίπου 2,5 με 3 m, λυγίζοντας τις γραμμές του σιδηροδρομικού δικτύου, καθιστώντας το μη διαθέσιμο μέχρι την επιδιόρθωσή του. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, δεν υπάρχει διάρρηξη στην επιφάνεια του εδάφους και η κίνηση ήταν όλη εσωτερική, όμως οι χαλύβδινες σιδηροδρομικές γραμμές ακολούθησαν αυτή την κίνηση λόγω της ελαστικότητάς τους.



Εικόνα 6: Παραμόρφωση σιδηροδρομικών γραμμών που βρίσκονται πάνω στο διερχόμενο ρήγμα (Πηγή: [Variations in Creep Along One of Earth's Most Active Faults - Eos](#))

### 1.3.2. Μετασεισμική παραμόρφωση (post – seismic deformation)

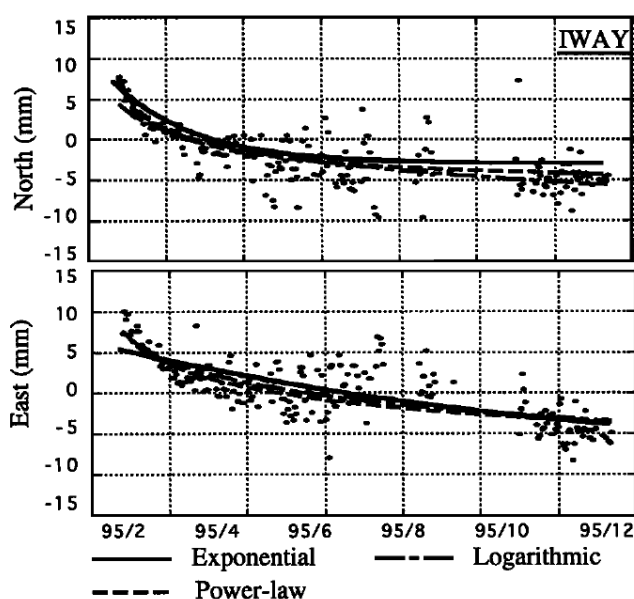
Η μετασεισμική παραμόρφωση (post – seismic deformation) είναι ένα σπάνιο φαινόμενο που παρατηρείται μετά από έναν μεγάλο σε μέγεθος σεισμό και διαρκεί για αρκετό χρονικό διάστημα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο φαίνεται πως επηρεάζει την περιοχή και αλλάζει τη συμπεριφορά της κίνησης μακροπρόθεσμα μέχρι να μπορέσει ξανά να ισοροπήσει σε μία

σταθερή κίνηση. Η ύπαρξή του εξαρτάται από την περιοχή και τα σεισμοτεκτονικά της στοιχεία.

Ο Altamimi σε μία έρευνα που έκανε κατά τη θεώρηση του ITRF 2008 παρατήρησε τους σταθμούς και περιγράφει το φαινόμενο της μετασεισμικής παραμόρφωσης ως εξής: «Μετά την κυκλοφορία του ITRF2008 το 2010, έγινε όλο και πιο προφανές ότι οι σταθμοί που επηρεάστηκαν από μεγάλους σεισμούς, και ιδιαίτερα τους πιο καταστροφικούς στη Σουμάτρα (2004), στη Χιλή (2010) και στην Ιαπωνία (2011), έχουν μη γραμμικές τροχιές μετά από αυτά τα τραγικά γεγονότα. Η μοντελοποίηση της μετασεισμικής παραμόρφωσης (PSD) με τμηματικές γραμμικές συναρτήσεις όπως στις προηγούμενες εκδόσεις ITRF δεν είναι πλέον κατάλληλη προσέγγιση, τουλάχιστον επειδή οι εκτιμώμενες γραμμικές ταχύτητες της τμηματικής χρονοσειράς του σταθμού είναι ανακριβείς και δεν περιγράφουν επαρκώς τις πραγματικές μετασεισμικές τροχιές του» (Altamimi, et al., 2016).

Από γεωλογικής και σεισμολογικής άποψης η μετασεισμική παραμόρφωση είναι μια σύνθετη διαδικασία και σχετίζεται με φαινόμενα όπως α) viscoelastic relaxation του ανώτερου μανδύα, β) afterslip στο επίπεδο του ρήγματος συμπεριλαμβανομένου και του frictional afterslip και γ) poroelastic rebound (Golriz, et al., 2021).

Στην Εικόνα 7 φαίνεται η επίδραση του φαινομένου της μετασεισμικής παραμόρφωσης στις συντεταγμένες μετά την εκδήλωση ενός σεισμού. Είναι ξεκάθαρο από τη μορφή των παρατηρήσεων ότι η εφαρμογή μίας γραμμικής εξίσωσης δεν θα μπορούσε να τις περιγράψει, γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε εκθετική, λογαριθμική και συνάρτηση νόμου δύναμης.



Εικόνα 7: Επίδραση φαινομένου PSD στις συντεταγμένες (Πηγή: (Takehide & Kazuro, 1997))

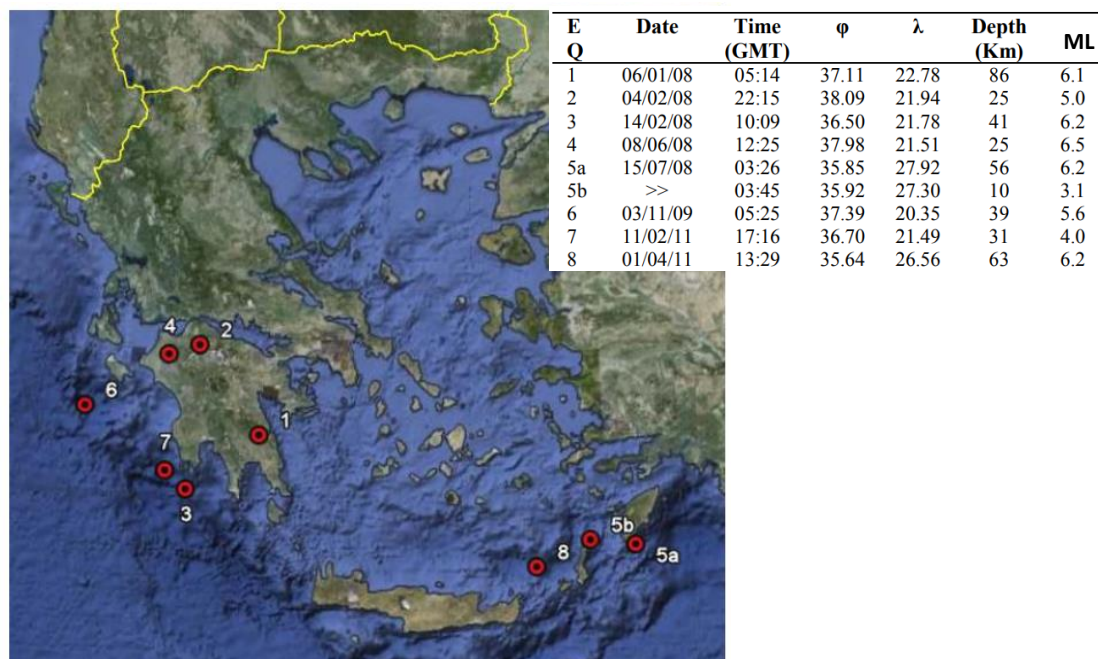
### 1.3.3. Παραδείγματα μόνιμων μετατοπίσεων

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μόνιμης μετατόπισης είναι τα αποτελέσματα του σεισμού μεγέθους 9  $M_w$  στην περιοχή Tohoku της Ιαπωνίας στις 11 Μαρτίου 2011. Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του ίδιου έτους, η συν-σεισμική οριζόντια μετατόπιση που υπολογίστηκε στην περιοχή της Honshu της Ιαπωνίας, η οποία πλήχθηκε σε μεγάλο βαθμό από το σεισμό και το τσουνάμι που ακολούθησε, άγγιξε μέχρι και τα 5,3 m με καθίζηση στην ανατολική ακτή της χώρα περίπου 1 m. Στην περιοχή της Βόρειας και



Βορειοανατολικής Κίνας, περιοχές αρκετά μακριά από το επίκεντρο, η μετατόπιση που υπολογίστηκε ήταν μεταξύ mm και cm με μέγιστη μετατόπιση τα 35 mm (Wang, et al., 2011).

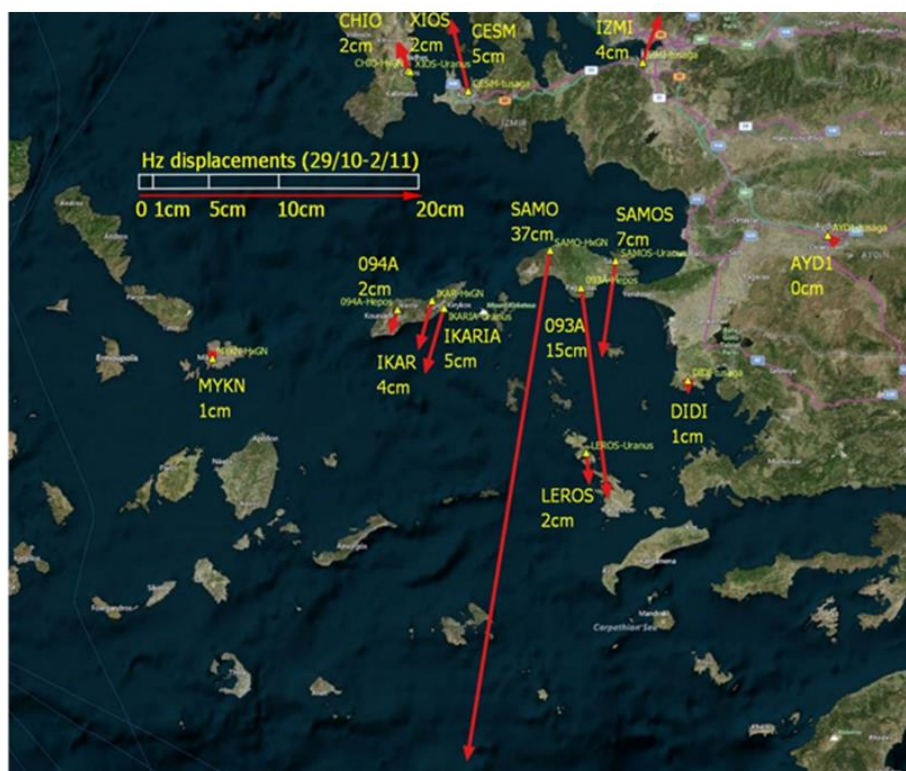
Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2, η περιοχή της Ελλάδας έχει έντονη σεισμικότητα και για το λόγο αυτό έχουν γίνει αρκετές μελέτες τόσο για τη γένεση των σεισμών όσο και για τις επιδράσεις τους στην περιοχή. Σε συνέδριο του EUREF το 2011 έγινε παρουσιάστηκε μια μελέτη εντοπισμού μόνιμων μετατοπίσεων λόγω σεισμών στον Ελλαδικό χώρο με δεδομένα από το δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς HEPOS (Gianniou, 2011). Στη συγκεκριμένη μελέτη αναλύθηκαν οκτώ σεισμοί που συνέβησαν μεταξύ 2008 και 2011, των οποίων τα επίκεντρα και τα χαρακτηριστικά φαίνονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Επίκεντρα και χαρακτηριστικά μελετώμενων σεισμών (Πηγή: (Gianniou, 2011))

Αναλύοντας τις εκτιμώμενες ημερήσιες συντεταγμένες των αντίστοιχων σταθμών εντοπίστηκαν μόνιμες μετατοπίσεις σε δύο από τους οκτώ σεισμούς. Πιο αναλυτικά, αναφορικά με το σεισμό 3 της Εικόνα 8 υπολογίστηκε μετατόπιση μεγαλύτερη των 2 cm προς Νότο και περίπου 1 cm προς τα δυτικά, ενώ για το σεισμό 4 η μετατόπιση που εντοπίστηκε είναι μεγαλύτερη από 1 cm με κατεύθυνση ανατολικά. Αντίθετα, οι σεισμοί 1,2,5a,5b,6,7,8 δεν έδειξαν κάποια μόνιμη μετατόπιση κατά την εκδήλωσή τους.

Από το 2011 που πραγματοποιήθηκε η παραπάνω μελέτη έχουν εκδηλωθεί και άλλοι σεισμοί ακόμα μεγαλύτερου μεγέθους, όπως ο σεισμός της Σάμου ( $M_w$  7.0) στις 30 Οκτωβρίου 2020. Σε άρθρο που δημοσίευσε με μία μεγάλη ομάδα ερευνητών, οι Fountelis et al. (2021) παρέθεσαν αναλυτικά τις μεθόδους με τις οποίες εξετάστηκε η συγκεκριμένη σεισμική δόνηση αμέσως μετά την εκδήλωσή της. Ένας από τους τρόπους εκτίμησης του μεγέθους των πιθανών μετατοπίσεων ήταν ο υπολογισμών των βέλτιστων λύσεων GNSS. Στη συγκεκριμένη μέθοδο συγκρίθηκαν οι συντεταγμένες 14 σταθμών την ημέρα πριν το σεισμό (29 Οκτωβρίου) και τριών ημερών μετά (2 Νοεμβρίου). Οι οριζόντιες μετατοπίσεις που προέκυψαν από τις διαφορές των συντεταγμένων φαίνονται στην Εικόνα 9.



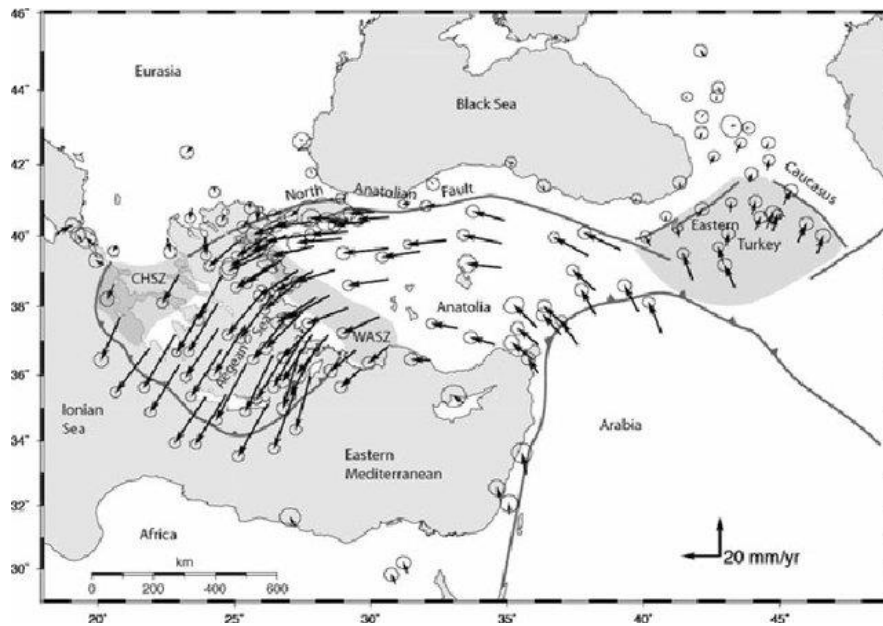
Εικόνα 9: Συν-σεισμικές μετατοπίσεις βάση ημερήσιων παρατηρήσεων σε 14 σταθμούς GNSS (Πηγή: (Foumelis, et al., 2021))

Η μεγαλύτερη οριζόντια μετατόπιση παρατηρήθηκε σε σταθμό της Σάμου (SAMO) και είναι ίση με 37 cm προς Νότο. Αντίστοιχα, παρατηρήθηκαν αρκετά υψηλές μετατοπίσεις στον ίδιο σταθμό και στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζοντας αύξηση μέχρι και 9 cm. Σε άλλες περιοχές γύρω από το επίκεντρο, αλλά σε μεγαλύτερη απόσταση, όπως το Τσεσμέ (Cesme) και η Σμύρνη (Izmir), εντοπίστηκαν μικρότερες οριζόντιες μετατοπίσεις της τάξης των 3-5 cm, ενώ άλλα Ελληνικά νησιά (Λέρος, Ικαρία, Χίος και Μύκονος) επηρεάστηκαν ακόμα λιγότερο με τις μετατοπίσεις να υπολογίζονται μεταξύ 1-5 cm. (Foumelis, et al., 2021)

#### 1.4. Περιοχή Βορείου Αιγαίου – Τοπικά ρήγματα

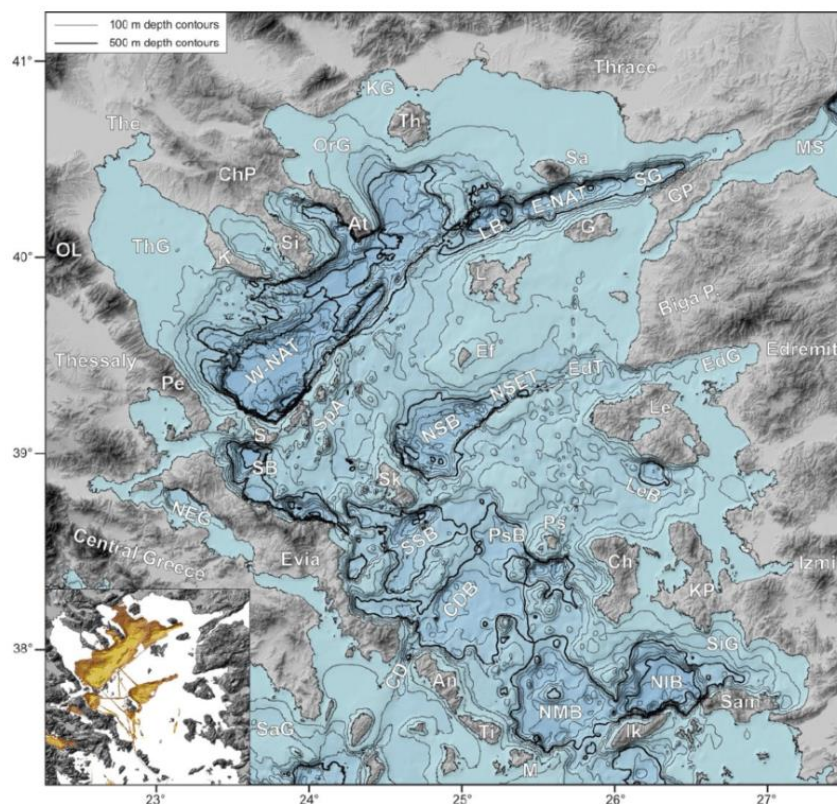
Ως περιοχή μελέτης της εργασίας ορίστηκε το Βόρειο Αιγαίο, το οποίο αποτελείται από δύο τεκτονικές δομές μεγάλης κλίμακας: την Λεκάνη του Βορείου Αιγαίου (**North Aegean Basin**) και την Τάφρο του Βορείου Αιγαίου (**North Aegean Trough**), οι οποίες είναι αλληλένδετες και αντιπροσωπεύουν συνέχειας του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας προς τη Δύση σχηματίζοντας έτσι το Ρήγμα του Βορείου Αιγαίου (**North Aegean Fault**) (Caputo, et al., 2013; Lazos, et al., 2021).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, η πλάκα της Ανατολίας περιστρέφεται αριστερόστροφα σε σχέση με την πλάκα της Ευρασίας, ενώ το ρήγμα του Βορείου Αιγαίου έχει δεξιόστροφη σχετική κίνηση περίπου 25mm/yr. Στην περιοχή της δυτικής Ανατολίας καθώς και στην περιοχή της τάφρου του Βορείου Αιγαίου δρουν εφελκυστικές δυνάμεις, ενώ στην κεντρική Ανατολία, παρόλο που πρόκειται για την ίδια πλάκα, δρουν δυνάμεις συμπίεσης. Εφελκυστικές ονομάζονται οι δυνάμεις οι οποίες είναι αντίρροπες και απομακρύνουν τις γειτονικές πλάκες, δημιουργώντας έτσι νέο ανάγλυφο (ΜΠΑΡΑΚΟΥ, 2000). Τέτοιες δυνάμεις δρουν και στη μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού ωκεανού δημιουργώντας νέο ανάγλυφο στον πυθμένα.



Εικόνα 10: Ταχύτητες GPS πλάκας της Ανατολίας (Πηγή: (Suckale, et al., 2007))

Το συγκεκριμένο ρήγμα με μήκος 300 km έχει δώσει κατά καιρούς αρκετά ισχυρούς σεισμούς, ενώ περιέχει ωκεάνιες λεκάνες βάθους έως 1500 m. Η έκτασή του ξεκινάει από τα παράλια της Τουρκίας (περιοχή Υενικιόγ) έως την περιοχή των Σποράδων και τον νομό Μαγνησίας και όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 η τάφρος διαχωρίζεται σε δυτική (W-NAT) και ανατολική (E-NAT).



Εικόνα 11: Χωροθέτηση τάφρου Βορείου Αιγαίου (Πηγή: (Sakellariou & Tsamprouraki-Kraounaki, 2018))

Γενικότερα στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, η τάφρος του Βορείου Αιγαίου είναι παράλληλη με το βόρειο όριο της μικροπλάκας του Αιγαίου και την τάφρο της Σκύρου, που βρίσκεται σε

κοντινή απόσταση, όπου σύμφωνα με έρευνες υπάρχουν 19 ενεργά ρήγματα με μήκος μεγαλύτερο των 7 km τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ισχυρούς σεισμούς άνω των 6 R. Οκτώ από αυτά τα ρήγματα έχουν δυναμικό να δώσουν και σεισμούς άνω των 7 R. Τα περισσότερα ρήγματα χαρτογραφήθηκαν πρόσφατα, καθώς στους ιστορικούς σεισμικούς καταλόγους ήταν καταχωρημένα μόνο τρία από αυτά, γεγονός που έκανε τους σεισμολόγους να αναθεωρήσουν τον σεισμικό κίνδυνο της ευρύτερης περιοχής (Papanikolaou, et al., 2019).

### 1.5. Ιστορικό σεισμών στο Βόρειο Αιγαίο

Η περιοχή λόγω της συνάντησης των δύο πλακών (Πλάκα Αιγαίου, Ευρασιατική) έχει έντονη σεισμική δραστηριότητα καθιστώντας τη έτσι μία από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της χώρας. Οι ισχυρές σεισμικές δονήσεις την καθιστούν εξαιρετική ως περιοχή μελέτης της κινητικότητας του γήινου φλοιού. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες σεισμικές δονήσεις που έχουν πλήξει την περιοχή τα τελευταία 120 χρόνια.

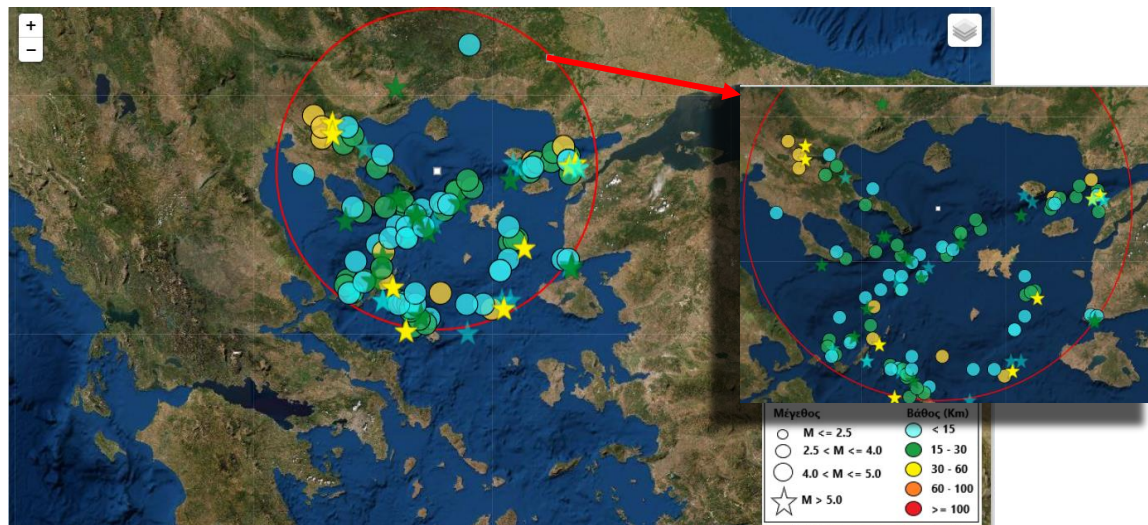
Το μέγεθος του σεισμού στο οποίο αναφέρεται ο Πίνακας 1 αφορά το τοπικό μέγεθος ( $M_L$ ) και μετριέται σε Richter (R). Μπορεί στο ευρύ κοινό να είναι η πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης σεισμών, αλλά σε σεισμολογικές μελέτες και μελέτες κινήσεων του φλοιού δεν είναι το βέλτιστο. Προκειμένου να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το μέγεθος ενός μεγάλου σεισμικού γεγονότος υπάρχει το μέγεθος της σεισμικής ροπής ( $M_w$ ), το οποίο είναι ανεξάρτητο από την απόσταση του σταθμού από το επίκεντρο και την περίοδο των σεισμικών κυμάτων.

Πίνακας 1: Ιστορικό μεγάλων σεισμικών δονήσεων στην περιοχή της ΤΒΑ (Πηγή: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, (Pavlidis & Tranos, 1991))

Έτος	Περιοχή	Βαθμοί Richter
<b>1902</b>	Δεν αναφέρεται ακριβής τοποθεσία	6,5-7,5
<b>1905</b>	Δεν αναφέρεται ακριβής τοποθεσία	6,5-7,5
<b>1931</b>	Δεν αναφέρεται ακριβής τοποθεσία	6,5-7,5
<b>1932</b>	Ιερισσός (40.50°N, 23.9°E))	7
<b>1968</b>	Άγιος Ευστράτιος	7,1
<b>1978</b>	34.9 km ΑΒΑ της Θεσσαλονίκης	6,5
<b>1983</b>	41.6 km ΔΒΔ της Λήμνου	6,6
<b>1992</b>	50.2 km ΝΝΑ των Καρυών	5
<b>2003</b>	48.6 km Α της Σαμοθράκης	5,4
<b>2013</b>	38.1 km ΝΑ της Λήμνου	5,8
<b>2014</b>	22.9 km ΝΝΔ της Σαμοθράκης	6,3
<b>2017</b>	37.8 km ΒΒΔ της Μυτιλήνης	5,2
<b>2020</b>	33.2 km Ν των Καρυών	5,2
<b>2022</b>	29.7 km Ν των Καρυών	5,4

Από το 1970 έως και σήμερα έχουν εκδηλωθεί στην ευρύτερη περιοχή του Βόρειου Αιγαίου 120 σεισμικές δονήσεις μεγέθους από 4,5 έως 6,6 Richter. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι με κάθε νέο σεισμό υπάρχουν αλλαγές τόσο στην επιφάνεια της Γης (κατολισθήσεις βράχων, υποχώρηση εδάφους) όσο και στο υπέδαφος προκαλώντας διαφορές και στη συμπεριφορά των τοπικών ρηγμάτων. Στην Εικόνα 12 φαίνεται αναλυτικά η θέση και το μέγεθος αυτών των 120 σεισμικών δονήσεων όπως καταγράφηκαν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ερευνηθούν αν οι μετατοπίσεις που προκλήθηκαν από το σεισμό της 24ης Μαΐου 2014 με επίκεντρο 23 km νότια, νοτιοδυτικά της Σαμοθράκης,

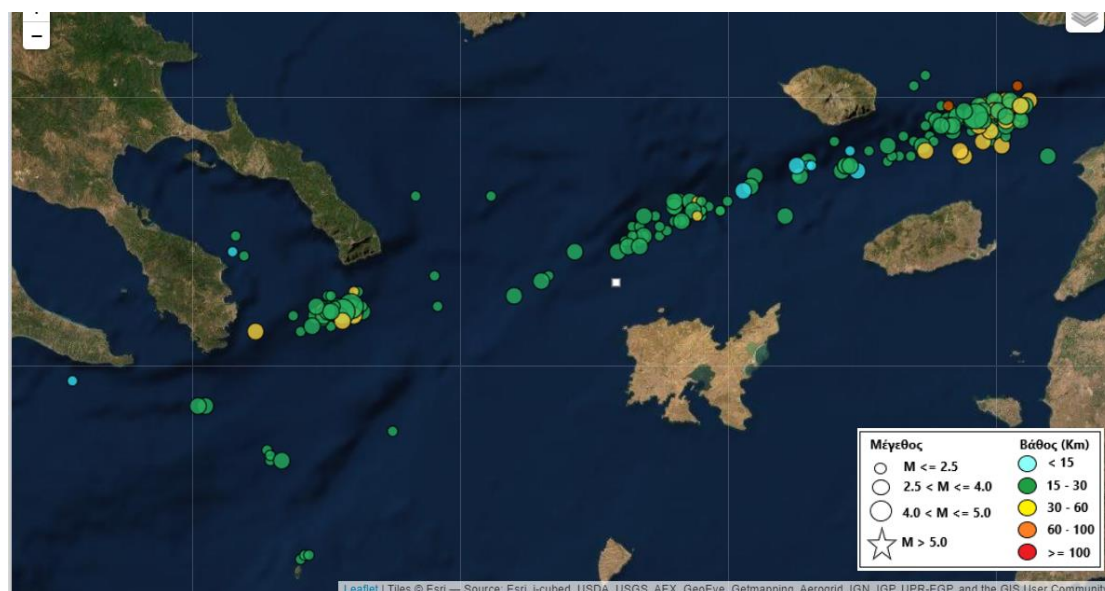
μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Richter (6,9 Mw) και εστιακού βάθους 20 km είναι στατικές ή εξελίχθηκαν στο χρόνο.



Εικόνα 12: Απεικόνιση επικέντρων σεισμών από 1970 έως 2022 (Πηγή: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών)

#### 1.6. Σεισμός 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014

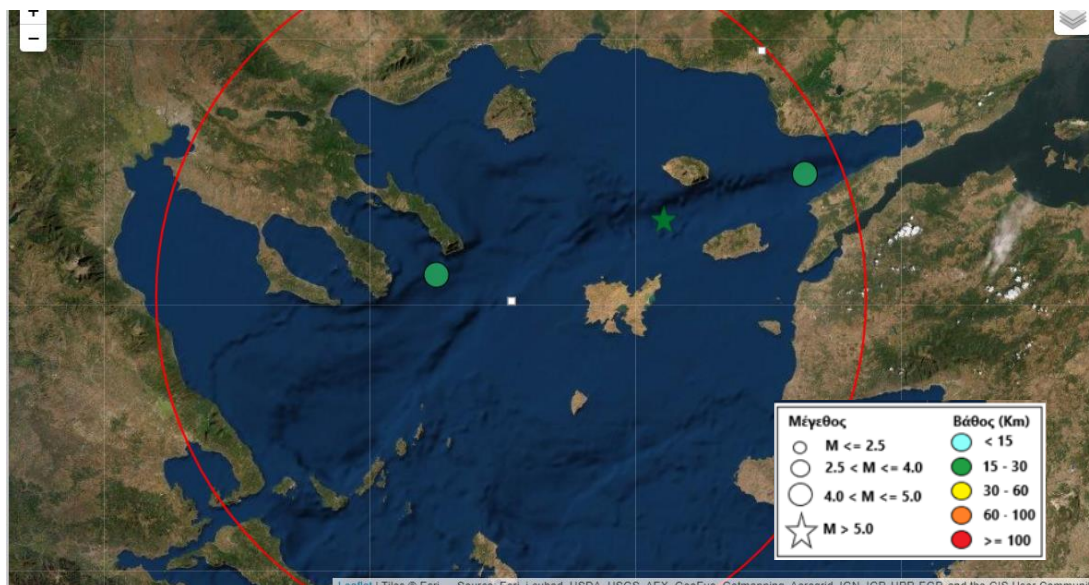
Το μεσημέρι της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014 στις 12:25:01 μμ. (τοπική ώρα) ανοικτά της Σαμοθράκης ένας σεισμός 6,9 Mw και εστιακού βάθους 20 km ταρακούνησε τη γύρω περιοχή (Σαμοθράκη, Λήμνο, Ίμβρο, Ζακκάλει). Ερευνώντας τους σεισμικούς καταλόγους του Αστεροσκοπείου Αθηνών φαίνεται πως υπήρχε μια μικρή δραστηριότητα τις δύο προηγούμενες μέρες της τάξης των 1,5 έως 2,5R (Εικόνα 13) έως το μεσημέρι του Σαββάτου (24 Μαΐου) όταν εκδηλώθηκε ο πρώτος μεγάλος σεισμός που θα οδηγούσε με τη σειρά του σε αρκετούς ισχυρούς μετασεισμούς.



Εικόνα 13: Σεισμική δραστηριότητα 22<sup>ας</sup> και 23<sup>ης</sup> Μαΐου 2014 (Πηγή: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών)

Ο κύριος σεισμός σύμφωνα με τις μαρτυρίες είχε διάρκεια, ενώ 6 min αργότερα (12:31:18 μ.μ.) συνέβη ο πρώτος μετασεισμός μεγέθους 4,9R στην περιοχή 53,4 km νότια – νοτιοδυτικά της Αλεξανδρούπολης, δηλαδή βορειοανατολικά (ENE) του επικέντρου του κύριου σεισμού.

Μόλις 3 min αργότερα (12:34:14 μ.μ.) ο δεύτερος ισχυρός μετασεισμός συμβαίνει δυτικά – νοτιοδυτικά (WSW) του epicέντρου, στην περιοχή 24,5 km νότια των Καρυών της Χαλκιδικής και έχει μέγεθος 4,6R. Η θέση τους απεικονίζεται παρακάτω στην Εικόνα 14.



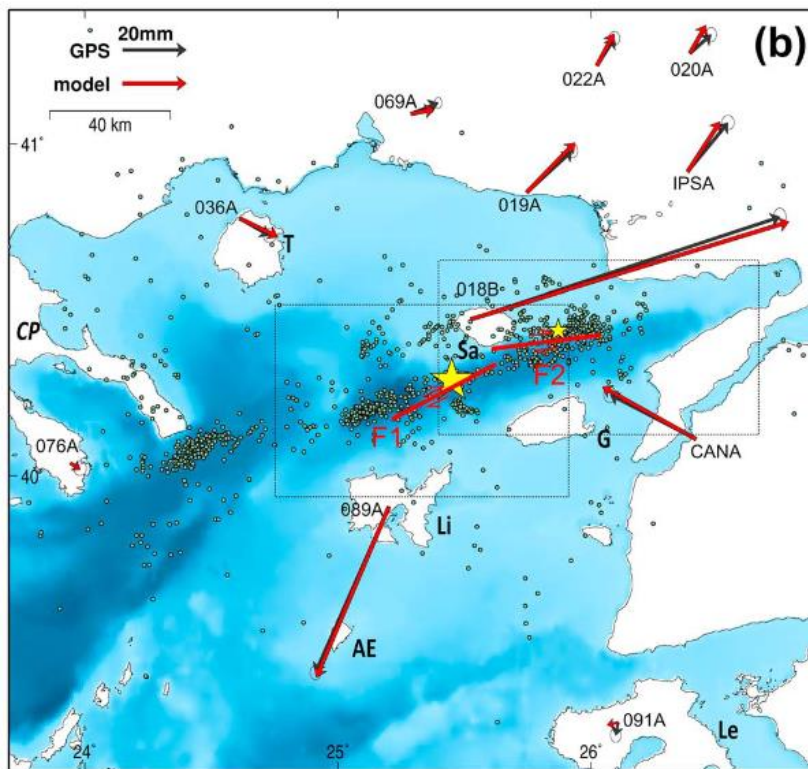
Εικόνα 14: Απεικόνιση κύριου σεισμού και των δύο πρώτων μετασεισμών (Πηγή: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών)

Μέχρι το απόγευμα της ίδιας μέρας συνέβησαν επτά ισχυροί μετασεισμοί άνω των 4 Richter, ενώ μέχρι την επόμενη μέρα οι σεισμικές δονήσεις είχαν ξεπεράσει τις διακόσιες. Από τον κύριο σεισμό αλλά και από τους ισχυρούς μετασεισμούς που ακολούθησαν, προκλήθηκαν υλικές ζημιές στο νησί της Λήμνου και σε περιοχές της Τουρκίας, ενώ στη Σαμοθράκη δεν αναφέρθηκαν προβλήματα (ΟΑΣΠ, 2014). Όσον αφορά στους κατοίκους, παρόλο που υπήρξε ανησυχία για τραυματίες λόγω της σφοδρότητας της δόνησης αναφέρθηκαν μόνο κάποιοι μικροτραυματισμοί λόγω του πανικού. Στην Εικόνα 15 διακρίνονται οι ζημιές που προκλήθηκαν στις περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από το σεισμό.



Εικόνα 15: Ζημιές που προκλήθηκαν από το σεισμό σε 3 περιοχές (Πηγή φωτογραφιών: [KANDiLi Observatory & Earthquake Research Institute \(Earthquake Report\)](#))

Το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός αλλά και οι επιδράσεις που είχε στην περιοχή και στις ταχύτητές της έχουν μελετηθεί από διάφορες ομάδες ερευνητών. Οι Saltogianni et al. (2015) αναλύοντας γεωδαιτικά και σεισμικά δεδομένα κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμό αποτελείται από δύο υπορήγματα οριζόντια ολίσθησης τα οποία ενεργοποιήθηκαν με μικρή χρονική διαφορά (14 δευτερόλεπτα) και έδωσαν αυτό το μέγεθος του σεισμού. Από τα δεδομένα GPS που υπήρχαν στη διάθεση των μελετητών κατά την έρευνα για τους σταθμούς 018B (Σαμοθράκη) και 089A (Λήμνος) προέκυψαν οι μετατοπίσεις που φαίνονται στην Εικόνα 16. Πιο συγκεκριμένα, με μαύρο βέλος φαίνονται οι μετατοπίσεις που υπολόγισε το μοντέλο πρόβλεψης το οποίο όμως περιέχει αρκετά μεγάλες γενικεύσεις. Θεωρώντας, λοιπόν, το γεγονός του σεισμού ως αποτέλεσμα της ρήξης δύο ξεχωριστών ρηγμάτων οι υπολογισμοί του μοντέλου είναι σχεδόν σε απόλυτη ταύτιση με τις πραγματικές μετρήσεις GPS που απεικονίζονται με κόκκινο βέλος. (Saltogianni, et al., 2015)



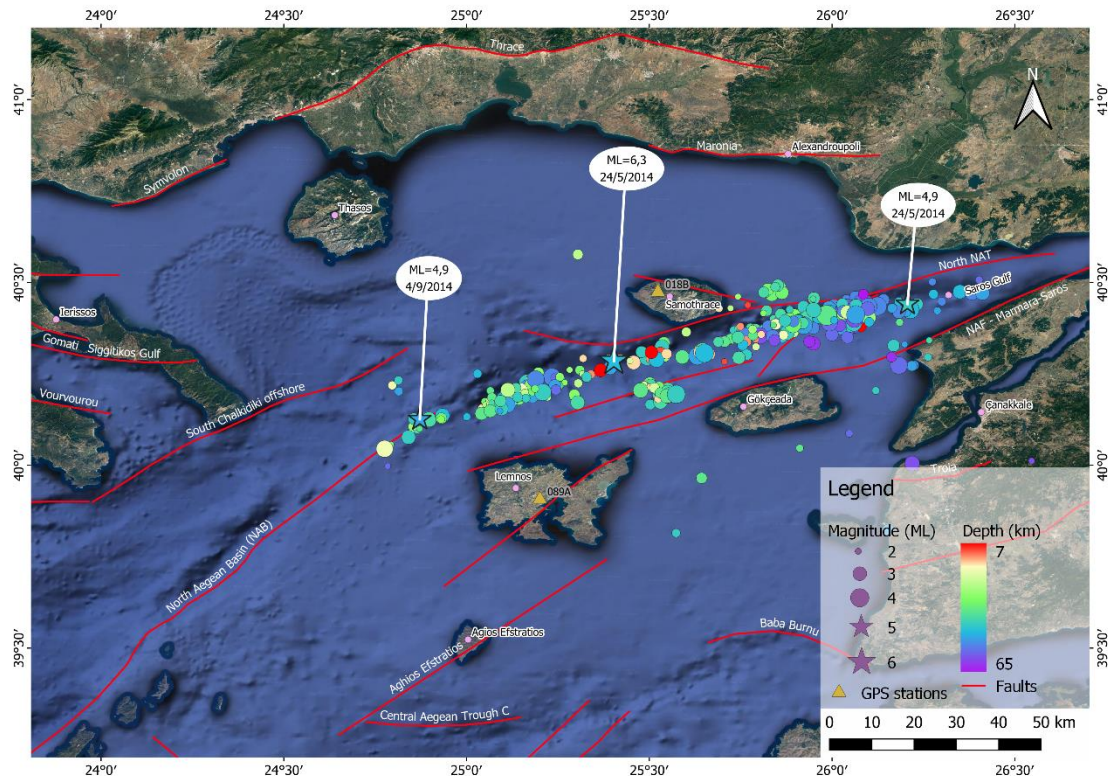
Εικόνα 16: Γραμμικές μετατοπίσεις μοντέλου πρόβλεψης (κόκκινο βέλος) και μετρήσεων GPS (μαύρο βέλος) μετά το σεισμό (Πηγή: (Saltogianni, et al., 2015))

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 οι μετατοπίσεις του σεισμού για τον σταθμό της Σαμοθράκης (018B) είναι κατά East 9,7cm και κατά North 3,2cm, ενώ για το σταθμό της Λήμνου (089A) παρατηρήθηκαν μετατοπίσεις 2,3cm στην συνιστώσα East και 5,2cm στη συνιστώσα North.

Πίνακας 2: Γραμμικές μετατοπίσεις σταθμών (Πηγή: (Saltogianni, et al., 2015))

Site	Longitude (°)	Latitude (°)	dE (mm)	dN (mm)	σE (mm)	σN (mm)
018B	25.524	40.474	96.9	32.0	0.7	1.0
089A	25.201	39.908	-23.0	-52.0	0.6	0.8

Στην Εικόνα 17 απεικονίζονται τα επίκεντρα των σεισμών από το Μάρτιο 2014 έως και τον Οκτώβριο 2014. Ο χάρτης δημιουργήθηκε στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών QGIS και τα δεδομένα για τους σεισμούς αντλήθηκαν από το NOA (National Observatory of Athens). Οι τρεις μεγαλύτεροι σεισμοί αποδίδονται με διαφορετικό σύμβολο από τους υπόλοιπους και είναι παρόμοιου εστιακού βάρους. Επιπλέον, στον χάρτη τοποθετήθηκαν και οι μόνιμοι σταθμοί GNSS που υπάρχουν στα νησιά της Σαμοθράκης και της Λήμνου, οι οποίοι είναι οι πλησιέστεροι στο επίκεντρο του μελετώμενου σεισμού. Από τη συγκεκριμένη χαρτογραφική απεικόνιση μπορεί κανείς να αντλήσει πληροφορίες σχετικά με το βάθος και την ένταση (τοπικό μέγεθος ML) κάθε σεισμικής δόνησης. Στο χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται ο παρακάτω χάρτης υπήρξαν συνολικά 456 σεισμικές δονήσεις.



Εικόνα 17: Επίκεντρα σεισμών στο Βόρειο Αιγαίο (03/2014 - 10/2014)



## 2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ

Από την αρχή της ήδη γνωστής ιστορίας του ανθρώπου έχει τονιστεί η μετακίνησή του από μέρος σε μέρος για διάφορους σκοπούς. Οι πρωτόγονοι άνθρωποι δηλαδή άλλαζαν τόπο για την εύρεση φαγητού, στη συνέχεια με την εγκατάστασή τους σε οικισμούς μετακινούνταν για εκστρατείες και μάχες ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε και το εμπόριο κυρίως μέσω της ναυτιλίας. Παρόλο που δεν είχαν την σημερινή τεχνολογία κατάφερναν να πλοηγούνται σε θάλασσα και ξηρά και να φτάνουν στον σωστό προορισμό. Στην αρχή μέσω της αστρονομίας και έπειτα με την βοήθεια της πυξίδας και του χάρτη η πλοήγηση γινόταν όλο και πιο ακριβής. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, ανά τα χρόνια, έφερε μεγάλες αλλαγές και στον τομέα της τοπογραφίας παρέχοντας νέες μεθόδους υπολογισμού των συντεταγμένων και αποτύπωσης της γης εξοικονομώντας έτσι χρόνο και εξοπλισμό. Ένας από τους πιο διαδεδομένους σύγχρονους τρόπους εντοπισμού της γεωγραφικής θέσης είναι μέσω των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS).

### 2.1. Εξέλιξη και συστήματα GNSS

Το δορυφορικό σύστημα, το οποίο είναι ευρέως γνωστό είναι το *Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (Global Positioning System)*. Το GPS αναπτύχθηκε στην Αμερική και έχει παγκόσμια κάλυψη σε εικοσιτετράωρη βάση με 31 επιχειρησιακούς δορυφόρους (03/2022). Δομείται σε έξι τροχιακά επίπεδα MEO (Medium Earth Orbit) κλίσης 55° και το ύψος πτήσης των δορυφόρων είναι 20.200 km. Η περίοδος περιφοράς κάθε δορυφόρου είναι 12 ώρες αστρικού χρόνου, δηλαδή 11h 58' 2,05" ηλιακού χρόνου. Αρχικά, είχε μόνο στρατιωτική λειτουργία, προκειμένου να βοηθήσει την οργάνωση του αμερικάνικου στρατού, και τη διαχείρισή του την είχε το Αμερικάνικο Υπουργείο Εθνικής Άμυνας. Η πολιτική χρήση του συστήματος ξεκίνησε περίπου το 1983 χωρίς όμως να έχει την ίδια ακρίβεια που είχε το σύστημα για στρατιωτική χρήση, αυτή η διαφορά ονομάστηκε επιλεκτική διαθεσιμότητα. Το σφάλμα που εισαγόταν σκόπιμα στους απλούς χρήστες με την επιλεκτική διαθεσιμότητα ήταν της τάξης των δεκάδων μέτρων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα όχι μόνο στην πλοήγηση αλλά και σε τοπογραφικές εργασίες οι οποίες απαιτούν ακρίβεια το πολύ μερικών cm. Η επιλεκτική διαθεσιμότητα τερματίστηκε στις 2 Μαΐου 2000 δίνοντας τέλος στις διαφορές της ακρίβειας και δημιούργησε τη βάση ώστε οι τοπογραφικές και γενικά οι τεχνικές εργασίες να γίνονται γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το GPS έγινε πλήρως λειτουργικό φτάνοντας τους 24 δορυφόρους το 1993, δηλαδή κατάφερε να καλύπτει τη Γη 24 ώρες το 24ωρο, 7 ημέρες την εβδομάδα, χωρίς κενά.

Άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται σε παγκόσμια κλίμακα φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά GPS και άλλων παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης

	Χώρα ανάπτυξης	Ονομαστικοί δορυφόροι	Επιχειρησιακοί δορυφόροι (03/2022)	Τροχιακά επίπεδα	Τροχιές	Χρήση
<b>GPS</b>	Αμερική	24	31	6	MEO	Στρατιωτική Πολιτική
<b>GALILEO</b>	Ευρωπαϊκή Ένωση	27	22	3	MEO	Πολιτική Εμπορική
<b>GLONASS</b>	Ρωσία	24	24	3	MEO	Στρατιωτική Πολιτική
<b>BeiDou</b>	Κίνα	35	46	3-1-3	MEO GEO IGSO	Στρατιωτική Πολιτική Εμπορική

Όσον αφορά στα τροχιακά επίπεδα του συστήματος BeiDou διαθέτει 3 επίπεδα MEO (Medium Earth Orbit), 1 επίπεδο GEO (Geosynchronous Equatorial Orbit) και 3 επίπεδα IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit).

## 2.2. Μέθοδοι δορυφορικού εντοπισμού

Οι μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στον δορυφορικό εντοπισμό μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες. Αρχικά, η κυριότερη διαφοροποίηση γίνεται μεταξύ **απόλυτου (ή αυτόνομου)** και **σχετικού** εντοπισμού.

Με τον όρο του απόλυτου εντοπισμού θέσης εννοούμε τον προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων (X,Y,Z) ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις. Οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μετρήσεις ψευδοαποστάσεων από κώδικες ενώ δεν χρησιμοποιούνται μόνες τους, γιατί σε περίπτωση απώλειας σήματος η λύση μπορεί να κριθεί αναξιόπιστη. Για να μπορέσει να υλοποιηθεί η μέθοδος του απόλυτου εντοπισμού χρειάζεται σήμα από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους με καλή γεωμετρία. Από την άλλη, με την έννοια «σχετικός εντοπισμός θέσης» αναφερόμαστε στον προσδιορισμό των συντεταγμένων ενός σημείου ως προς ένα άλλο, γνωστό σημείο που είτε δίνεται ως δεδομένο, για παράδειγμα οι συντεταγμένες ενός τριγωνομετρικού ή έχει προσδιοριστεί με απόλυτο εντοπισμό. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίζεται το διάνυσμα μεταξύ των δύο σημείων που ονομάζεται διάνυσμα βάσης ή βάση (baseline) και είναι απαραίτητοι δύο δέκτες που πραγματοποιούν ταυτόχρονες παρατηρήσεις (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των μεθόδων εντοπισμού γίνεται με βάση τη συλλογή των δεδομένων στο πεδίο. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε πάλι δύο κατηγορίες, τον κινηματικό **εντοπισμό** (kinematic) και το **στατικό** (static). Στον κινηματικό εντοπισμό απαιτούνται δύο δέκτες από τους οποίους ο ένας θα είναι τοποθετημένος στο γνωστό σημείο (base), αφού πρώτα θα έχει επιλύσει τις ασάφειες φάσης, και ο άλλος δέκτης θα κινείται μετρώντας σημεία, αλλά είναι απαραίτητη η συνεχής λήψη σήματος από δορυφόρους. Ο στατικός εντοπισμός απαιτεί και οι δύο δέκτες να είναι σταθεροί σε δύο σημεία καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων με σκοπό τη συλλογή αρκετών δεδομένων από διάφορους δορυφόρους. Σε

αυτήν την περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η συνεχόμενη λήψη σήματος καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος μετρήσεων.

Μια τελευταία κατηγοριοποίηση βασίζεται στον προσδιορισμό της θέσης, αν γίνεται σε **πραγματικό χρόνο** (real time) ή προκύπτει μετά από επεξεργασία στο **γραφείο** (post – processing). Όταν μετράμε real time, τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα εκείνη τη στιγμή, ενώ με τη μέθοδο post processing τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα μετά από την ολοκλήρωση των μετρήσεων.

Επιπλέον, μπορεί να υπάρξει και συνδυασμός μεθόδων όπως είναι ο κινηματικός προσδιορισμός πραγματικού χρόνου (RTK) ή ο σχετικός στατικός εντοπισμός. Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι ακρίβειες που έχει κάθε μέθοδος δορυφορικού εντοπισμού.

Πίνακας 4: Ακρίβειες μεθόδων δορυφορικού εντοπισμού

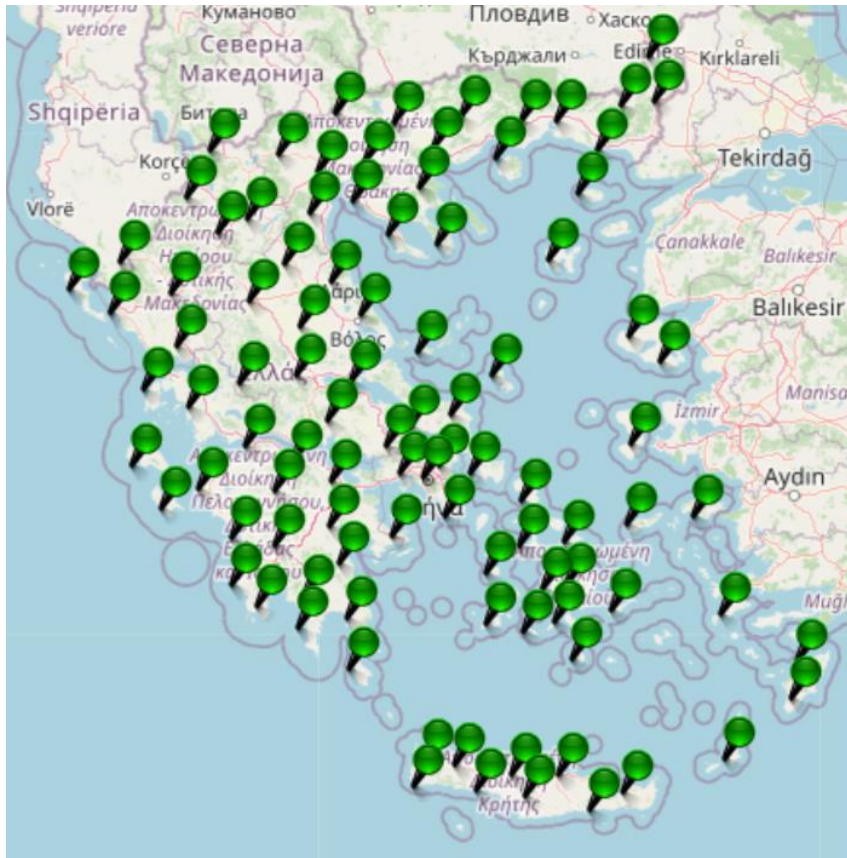
Μέθοδος εντοπισμού	Ακρίβεια
<b>Απόλυτος (αυτόνομος)</b>	Λίγα μέτρα
<b>Κινηματικός</b>	Εκατοστά
<b>Real time</b>	Εκατοστά
<b>Post processing</b>	Χιλιοστά

### 2.3. Δίκτυα σταθμών GNSS

Σήμερα, χρησιμοποιούνται εντατικά και τα δίκτυα μόνιμων σταθμών που έχουν εγκατασταθεί σε όλη τη χώρα από διάφορους οργανισμούς ή εταιρίες όπως είναι το HEPOS, το Αστεροσκοπείο, αλλά και από ευρωπαϊκούς οργανισμούς, όπως η υποεπιτροπή περιφερειακού πλαισίου αναφοράς για την Ευρώπη (EUREF). Οι μόνιμοι σταθμοί αναφοράς είναι εγκατεστημένοι σε κάποια συγκεκριμένα σημεία και με εικοσιτετράωρη καθημερινή λειτουργία. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την υλοποίηση γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς, την παροχή υπηρεσιών εντοπισμού και την επιστημονική έρευνα. Γενικότερα, ένα δίκτυο μόνιμων σταθμών είναι ένα σύνολο σταθμών που λειτουργούν σε μία περιοχή, οι συντεταγμένες τους αναφέρονται στο ίδιο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς και οι παρατηρήσεις τους συγκεντρώνονται σε ένα κοινό κέντρο για επεξεργασία και έλεγχο αξιοπιστίας.

#### 2.3.1. Δίκτυο HEPOS

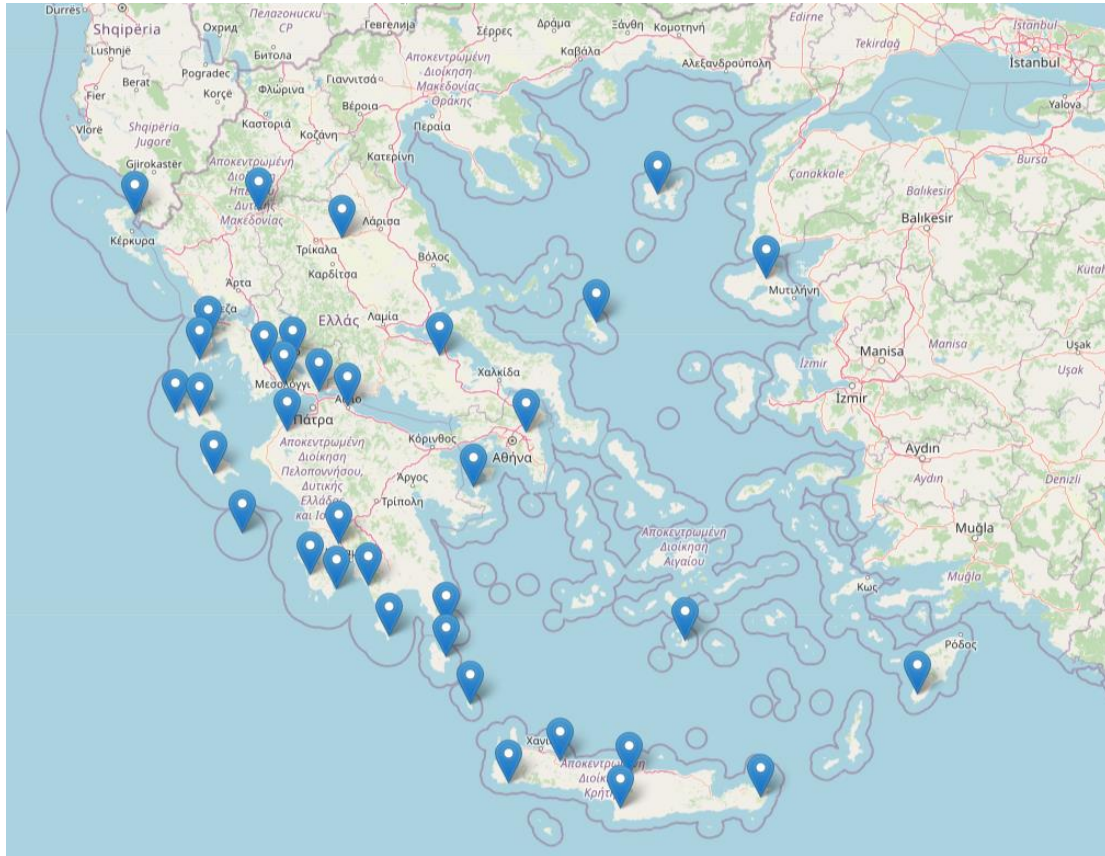
Στην Εικόνα 18, φαίνεται το μόνιμο δίκτυο σταθμών του HEPOS. «Το HEPOS αποτελείται από ένα δίκτυο 98 μόνιμων δορυφορικών σταθμών αναφοράς και ένα Κέντρο Ελέγχου που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κτηματολογίου. Οι μετρήσεις των σταθμών συγκεντρώνονται, σε πραγματικό χρόνο, στο Κέντρο Ελέγχου, όπου γίνεται η επεξεργασία, αρχειοθέτηση, διάθεση και αποστολή των δεδομένων προς τους χρήστες. Οι χρήστες του συστήματος μπορούν να λαμβάνουν τα δεδομένα είτε σε πραγματικό χρόνο, είτε σε μεταγενέστερο χρόνο, μέσω του δικτυακού τύπου του HEPOS» (Ελληνικό Κτηματολόγιο, 2022).



Εικόνα 18: Δίκτυο μόνιμων σταθμών HEPOS (Πηγή: <https://www.hepos.gr/Map/SensorMap.aspx>)

### 2.3.2. Δίκτυο Αστεροσκοπείου Αθηνών

Το Αστεροσκοπείο Αθηνών έχει εγκαταστήσει συνολικά 32 σταθμούς GPS (NOANET) σε ολόκληρη την επικράτεια. Όπως φαίνεται και στο χάρτη της Εικόνα 19 οι περισσότεροι σταθμοί του δικτύου είναι εγκατεστημένοι σε περιοχές με υψηλή σεισμική δραστηριότητα όπως είναι το Ιόνιο πέλαγος, η περιοχή της Κρήτης και ο Κορινθιακός κόλπος. Το δίκτυο του αστεροσκοπείου καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό της χώρας, ωστόσο δεν υπάρχει κάποιος σταθμός εγκατεστημένος στην Μακεδονία και τη Θράκη. «Ο πρωταρχικός επιστημονικός ρόλος του δικτύου είναι να υποστηρίζει γεωδαιτικές μετρήσεις υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση παρατηρήσεων GNSS, προκειμένου να μετρηθούν και να ποσοτικοποιηθούν η σεισμική, μετασεισμική και διασεισμική παραμόρφωση σε μεγάλες ζώνες ρηγμάτων, η διαδικασία παραμόρφωσης του φλοιού και η τεκτονική παραμόρφωση στις ζώνες ορίων πλακών της ανατολικής Μεσογείου, καθώς και να υποστηρίξει τη σεισμολογία GPS και άλλες εφαρμογές της επιστήμης της γης. Το δίκτυο NOANET λειτουργεί από το 2006, ακολουθώντας τα πρότυπα του Μόνιμου Δικτύου GNSS (EPN) της EUREF» (National Observatory of Athens, 2018).



Εικόνα 19: Δίκτυο μόνιμων σταθμών Αστεροσκοπείου Αθηνών (Πηγή: [NOANET](http://www.noanet.org))

Πιο αναλυτικά παρακάτω φαίνονται οι κωδικοί των σταθμών, οι θέσεις που είναι τοποθετημένοι αλλά και η ημερομηνία εγκατάστασης με την τωρινή κατάστασή του (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Δίκτυο Αστεροσκοπείου Αθηνών (Πηγή: [NOANET](http://www.noanet.org))

Κωδικός σταθμού	Θέση	Ημερομηνία εγκατάστασης	Κατάσταση
<a href="#">anik 12666M001</a>	Άγιος Νικόλαος, Μεσσηνία	4/7/2016	Σε λειτουργία
<a href="#">anky 18594M001</a>	Αντικύθηρα, Νότιο Αιγαίο	14/7/2017	Σε λειτουργία
<a href="#">atal 12630M001</a>	Αταλάντη, Φθιώτιδα	27/3/2009	Σε λειτουργία
<a href="#">egio 12658M001</a>	Αίγιο, Αχαΐα	1/1/2019	Σε λειτουργία
<a href="#">idio 12667M001</a>	Ανώγια, Ρέθυμνο	18/5/2014	Σε λειτουργία
<a href="#">kasi 12627M001</a>	Κασσιόπη, Κέρκυρα	13/3/2006	Εκτός λειτουργίας
<a href="#">kate 12615M002</a>	Κατταβιά, Ρόδος	31/8/2012	Τηλεμετρία εκτός λειτουργίας
<a href="#">kipo 12631M001</a>	Κηπουριά, Κεφαλονιά	13/3/2006	Τηλεμετρία εκτός λειτουργίας
<a href="#">klok 12632M001</a>	Κλοκοτός, Θεσσαλία	17/7/2008	Σε λειτουργία

<a href="#">koro 12668M001</a>	Κορώνη, Μεσσηνία	20/4/2018	Σε λειτουργία
<a href="#">ktha 18414M001</a>	Κύθηρα, Νότιο Αιγαίο	14/7/2017	Εκτός λειτουργίας
<a href="#">lemn 12633M001</a>	Λήμιος, Βόρειο Αιγαίο	16/6/2007	Σε λειτουργία
<a href="#">mtna 12673M001</a>	Μέθανα, Πελοπόννησος	24/7/2019	Σε λειτουργία
<a href="#">mtsv 12669M001</a>	Μέτσοβο, Ήπειρος	6/12/2018	Σε λειτουργία
<a href="#">nafp 12634M001</a>	Ναύπακτος, Αιτωλοακαρνανία	1/1/2018	Σε λειτουργία
<a href="#">neab 12635M001</a>	Νεάπολη, Λακωνία	14/8/2012	Σε λειτουργία
<a href="#">noa1 12620M001</a>	Αθήνα, Αττική	13/3/2006	Σε λειτουργία
<a href="#">palh 12675M001</a>	Παλιοχώρα, Χανιά	29/8/2021	Σε λειτουργία
<a href="#">pont 12626M001</a>	Πόντη, Λευκάδα	15/2/2007	Σε λειτουργία
<a href="#">prkv 12636M001</a>	Αγία Παρασκευή, Λέσβος	30/6/2007	Σε λειτουργία
<a href="#">ptkg 12664M001</a>	Πόρτο Κάγιο, Λακωνία	27/6/2018	Σε λειτουργία
<a href="#">pylo 12637M001</a>	Πύλος, Μεσσηνία	24/8/2011	Σε λειτουργία
<a href="#">rlso 12629M001</a>	Κάτω Ρετσίνα, Αιτωλοακαρνανία	29/7/2006	Σε λειτουργία
<a href="#">siva 12670M001</a>	Σίβα, Ηράκλειο	18/5/2014	Σε λειτουργία
<a href="#">skyr 12638M001</a>	Σκύρος, Σκύρος	28/11/2012	Σε λειτουργία
<a href="#">span 12628M001</a>	Σπανοχώρι, Λευκάδα	22/5/2007	Σε λειτουργία
<a href="#">strf 18452M001</a>	Στροφάδες, Ιόνιο Πέλαγος	1/10/2016	Τηλεμετρία εκτός λειτουργίας
<a href="#">thir 12640M001</a>	Πύργος Καλλίστης, Θήρα	28/12/2012	Εκτός λειτουργίας
<a href="#">vamo 12671M001</a>	Βάμος, Χανιά	18/5/2014	Σε λειτουργία
<a href="#">vlsm 12625M001</a>	Βαλσαμάτα, Κεφαλονιά	15/2/2006	Σε λειτουργία
<a href="#">zkro 12672M001</a>	Ζάκρος, Λασιθί	18/5/2014	Σε λειτουργία
<a href="#">znte 12674M001</a>	Κορακονήσι, Ζάκυνθος	23/11/2018	Σε λειτουργία

### 2.3.3. Δίκτυο EUREF

Το δίκτυο EPN (European Permanent Network) λειτουργεί υπό την αιγίδα της περιφερειακής υποεπιτροπής πλαισίου αναφοράς της IAG (Διεθνής Ένωση Γεωδαισίας) για την Ευρώπη (EUREF) και καλύπτει ολόκληρη την ήπειρο με συνεχή λειτουργία. Η δομή του αποτελείται από (Royal Observatory of Belgium, 2023):

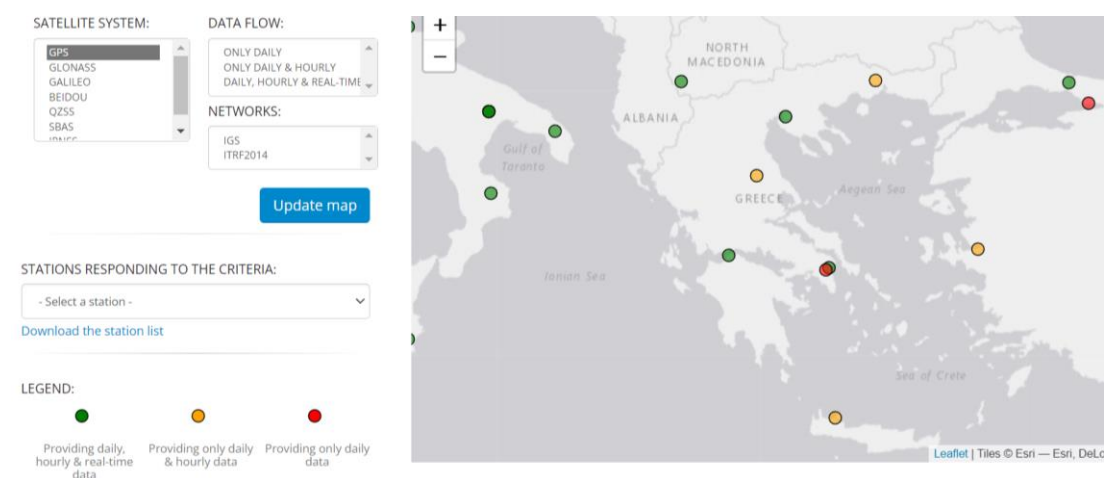
- το δίκτυο των σταθμών GNSS,
- τα κέντρα δεδομένων που παρέχουν πρόσβαση στα δεδομένα του σταθμού,
- τα κέντρα ανάλυσης που αναλύουν τα δεδομένα του GNSS,
- τα κέντρα προϊόντων που παράγουν τα προϊόντα EPN,
- ένα κεντρικό γραφείο παρακολούθησης και διαχείρισης του δικτύου.

Το συγκεκριμένο δίκτυο λειτουργεί με συντεταγμένες στο ETRS89 και για την υλοποίηση και τη συντήρησή του συνεργάζονται παραπάνω από 100 ευρωπαϊκοί οργανισμοί και πανεπιστήμια. «Τα προϊόντα που προκύπτουν από το EPN είναι οι θέσεις και οι ταχύτητες των σταθμών σε ITRS και ETRS89, η ανάλυση των χρονοσειρών θέσης του σταθμού και τροποσφαιρικές παράμετροι» (EUREF, 2011; Royal Observatory of Belgium, χ.χ.). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) δίνονται οι σταθμοί EPN που είναι εγκατεστημένοι στην ελληνική επικράτεια.

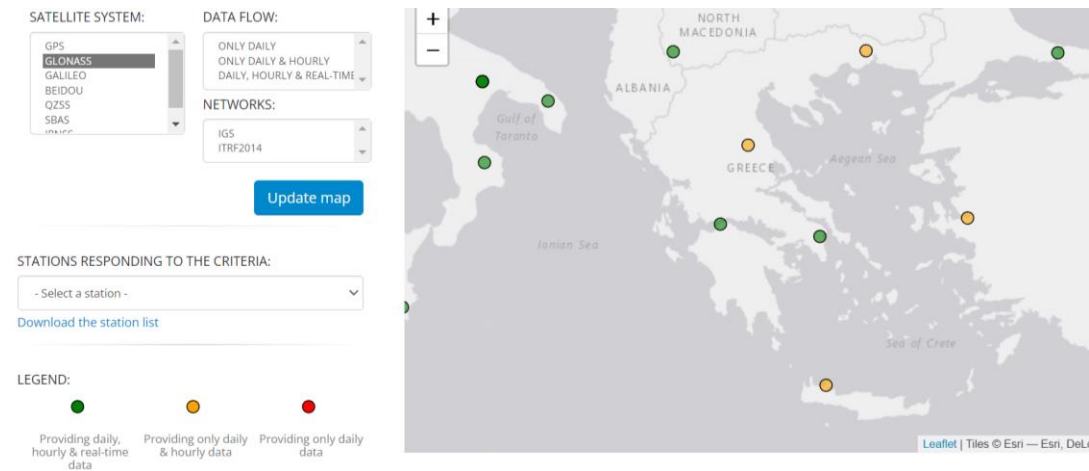
Πίνακας 6: Δίκτυο μόνιμων σταθμών EUREF (EPN) (Πηγή: [EUREF Permanent GNSS Network](#))

Name	City	Country	Domes	Status	EPN Inclusion	Operational Centre	Tectonic Plate	Latitude	Longitude	Elevation	X	Y	Z	IGS	ITRF2014
AUT100GRC	Thessaloniki	GRC	12619M002	A	2005-04-24	DGS	EURASIAN	40.5668	23.0037	150	4466283.50	1896166.75	4126096.68		ITRF2014
DUTH00GRC	Xanthi	GRC	12621M001	A	2009-02-22	DGS	EURASIAN	41.1402	24.9168	109.2	4362689.88	2026647.97	4174234.22		
DYNG00GRC	DIONYSOS	GRC	12602M006	A	2013-10-20	CNES	EURASIAN	38.0786	23.9324	510.6	4595220.02	2039434.08	3912626.01	IGS	ITRF2014
LARM00GRC	Larisa	GRC	12610M002	A	2011-05-01	DGS	EURASIAN	39.6141	22.3879	151.3	4549397.17	1874003.14	4045167.61		
NOA100GRC	Athens	GRC	12620M001	A	2006-05-07	NOA	EURASIAN	38.0471	23.864	537.8	4599641.95	2034827.31	3909890.60		
PAT000GRC	Patras	GRC	12622M001	A	2009-06-14	INSU	EURASIAN	38.2837	21.7868	121	4655002.72	1860619.67	3930281.84		ITRF2014
TUC200GRC	Chania	GRC	12617M003	A	2004-10-24	TUC	EURASIAN	35.5332	24.0706	161	4744543.85	2119411.87	3686258.94		ITRF2014

Στη συνέχεια (Εικόνα 20 - Εικόνα 21) παρουσιάζονται οι χάρτες με τη χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων για τα συστήματα GPS και GLONASS. Όπως παρατηρούμε ενώ σύμφωνα με τον Πίνακα 6 όλοι οι σταθμοί είναι σε ενεργή κατάσταση (Status A - Active) δεν παρέχουν όλοι με την ίδια συχνότητα δεδομένα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις ανάγκες κάθε οργανισμού που έχει εγκαταστήσει τον εξοπλισμό ή στο χρόνο επεξεργασίας που χρειάζονται τα ίδια τα δεδομένα.



Εικόνα 20: Διαθεσιμότητα δεδομένων GPS των σταθμών του EPN (Πηγή: [EUREF Permanent GNSS Network](#))



Εικόνα 21: Διαθεσιμότητα δεδομένων GLONASS των σταθμών του EPN (Πηγή: [EUREF Permanent GNSS Network](#))

#### 2.4. Χρήση GNSS στη Σεισμική Γεωδαισία

Η χρήση των μεθόδων GNSS είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην παρατήρηση της κινητικότητας του γήινου φλοιού, αλλά και στη μελέτη σεισμικών παραμορφώσεων. Η κίνηση των πλακών είναι αρκετά μικρή και δεν μπορεί να υπολογιστεί με όργανα όπως οι σειсмоγράφοι. Αντίθετα, τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού μπορούν, μετά από ανάλυση χρονοσειρών συντεταγμένων, να υπολογίζουν την ταχύτητα και τον προσανατολισμό της κίνησης των πλακών. Με τη βοήθεια των δικτύων μόνιμων σταθμών διευκολύνεται η παρατήρηση της κίνησης αφού υπάρχουν γνωστά σημεία αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό, παρακολουθείται η αλλαγή των συντεταγμένων του σταθμού και συναρτήσει του χρονικού διαστήματος παρατήρησης προκύπτει η ταχύτητα μετακίνησης, η οποία είναι της τάξης μερικών mm ή μερικές φορές και cm το χρόνο. Η συσσώρευση τέτοιων δεδομένων σε βάθος χρόνου δημιουργεί μία χρονοσειρά για κάθε συνιστώσα στην οποία παρουσιάζεται η πορεία των συντεταγμένων στο χρόνο.

#### 2.5. Μέθοδος Precise Point Positioning (PPP)

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας όλοι οι επιστημονικοί τομείς βοηθήθηκαν σημαντικά. Ένας από αυτούς είναι και ο δορυφορικός εντοπισμός, ένας κλάδος με συνεχή εξέλιξη σε ό,τι αφορά τις μεθόδους και τις τεχνικές εντοπισμού. Οι μέθοδοι για ακριβή προσδιορισμό θέσης πλέον είναι ποικίλες και μία από αυτές είναι η μέθοδος ακριβούς απόλυτου προσδιορισμού θέσης (PPP). Η τεχνική αυτή υλοποιείται με ένα μόνο δέκτη μειώνοντας αρκετά το κόστος εξοπλισμού. Για να μπορέσει να υλοποιηθεί απαιτεί τη χρήση τροχιακών δεδομένων υψηλής ακριβείας και πληροφορίες σχετικές με τα χρονόμετρα των δορυφόρων. Αρχικά η συγκεκριμένη τεχνική υποστηριζόταν μόνο για το GPS, ενώ σήμερα υποστηρίζεται για όλα τα GNSS. Παρέχει ακρίβεια cm ενώ σε περιπτώσεις στατικών μετρήσεων η ακρίβεια μπορεί να αγγίξει και το 1 cm. Παράλληλα η μέθοδος απαιτεί σύνθετους υπολογισμούς για την αντιμετώπιση γεωφυσικών και γεωδαιτικών θεμάτων, κάτι που στον απλό αυτόνομο εντοπισμό και το σχετικό εντοπισμό δεν απαιτείται.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος PPP απαιτεί μόνο ένα δέκτη με αποτέλεσμα οι διπλές και τριπλές διαφορές που εξαλείφουν το ιονοσφαιρικό και το τροποσφαιρικό σφάλμα, αλλά και διάφορα σφάλματα των χρονομέτρων να μη μπορούν να εφαρμοστούν. Για το σκοπό αυτό διάφορες υπηρεσίες εκδίδουν προϊόντα υψηλής ακριβείας με



πληροφορίες για τους δορυφόρους. Από τα γνωστότερα είναι τα προϊόντα της IGS (International GNSS Service) μιας υπηρεσίας που ιδρύθηκε από τη Διεθνή Ένωση Γεωδαισίας. Τα προϊόντα που παρέχει η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι ελεύθερα και άμεσα διαθέσιμα και αφορούν υψηλής ακρίβειας εφημερίδες με πληροφορίες για τα χρονόμετρα των σταθμών και των δορυφόρων και πληροφορίες της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας.

### 2.5.1. Εξισώσεις παρατηρήσεων

Ο απαλλαγμένος από την επίδραση της ιονόσφαιρας (iono free) συνδυασμός για τις παρατηρήσεις διπλής συχνότητας GPS ψευδοαπόστασης και φέρουσας φάσης, σχετίζεται με την θέση, το χρονόμετρο, την επίδραση της τροπόσφαιρας και τις παραμέτρους ασάφειας φάσης, και δίνεται από τους παρακάτω τύπους (Kouba & Héroux, 2001):

$$l_p = \rho + c * (dt - dT) + T_r + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$l_\phi = \rho + c * (dt - dT) + N * \lambda + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

Όπου:

- $l_p$  είναι ο ionospheric-free συνδυασμός των L1 και L2 ψευδοαποστάσεων,
- $l_\phi$  είναι ο ionospheric-free συνδυασμός των L1 και L2 μετρήσεων φάσεων,
- $dt$  είναι το offset του χρονομέτρου του σταθμού από το χρόνο GPS,
- $dT$  είναι το offset του χρονομέτρου του δορυφόρου από το χρόνο GPS,
- $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό,
- $T_r$  είναι η καθυστέρηση στη διάδοση του σήματος λόγω της επίδρασης της τροπόσφαιρας,
- $\lambda$  είναι το μήκος του φέροντος κύματος,
- $N$  είναι η ασάφεια φάσης της φέρουσας συχνότητας,
- $\varepsilon_{p\phi}$  είναι ο θόρυβος στις μετρήσεις, συμπεριλαμβανομένου και του multipath.

### 2.5.2. Διορθώσεις – σφάλματα

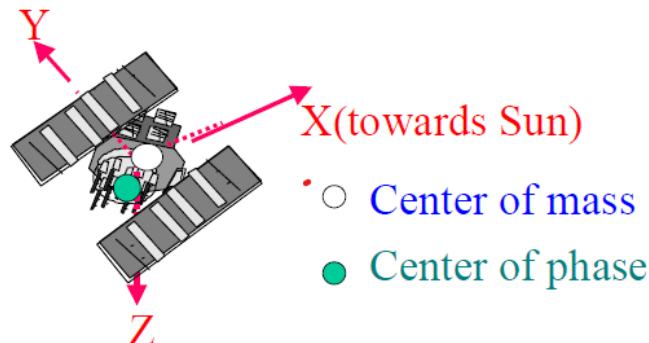
Στη συγκεκριμένη μέθοδο δορυφορικού εντοπισμού πρέπει να ληφθούν υπόψη και σφάλματα και να γίνουν διορθώσεις που σε πιο απλές μεθόδους θεωρούνται αμελητέα ή απαλείφονται (π.χ. μέσω των διπλών διαφορών στο σχετικό εντοπισμό) ώστε να επιτύχουμε την απαιτούμενη ακρίβεια. Τα σφάλματα χωρίζονται σε σφάλματα που οφείλονται στο δορυφόρο (satellite attitude effects) και σε γεωδαιτικές - γεωφυσικές διορθώσεις (site displacements effects).

#### Σφάλματα δορυφόρου

##### a. Offset κεραίας δορυφόρου

Το σφάλμα αυτό προέρχεται από τη διαφορά που έχει το κέντρο μάζας του δορυφόρου και το κέντρο φάσης της κεραίας του. Τα δυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιηθούν οι τροχιές αναφέρονται στο κέντρο μάζας του δορυφόρου, όπως επίσης και οι ακριβείς δορυφορικές συντεταγμένες και τα προϊόντα των ρολογιών του IGS GPS. Αντίθετα, οι πληροφορίες για τις τροχιές των δορυφόρων στο μήνυμα ναυσιπλοΐας του GPS έχουν ως αναφορά το κέντρο φάσης

της κεραίας του. Οι μετρήσεις παρόλα αυτά λαμβάνονται με σημείο αναφοράς το κέντρο φάσης της κεραίας του δορυφόρου. Η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο σημείων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Διαφορά κέντρου φάσης κεραίας και κέντρου μάζας δορυφόρου (Πηγή: (Κουβα, 2003))

Στην Εικόνα 23 φαίνεται ένα απόσπασμα από το αρχείο atx, το οποίο είναι αναγκαίο για τη διαδικασία PPP που ακολουθήσαμε στην παρούσα εργασία. Το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει πληροφορίες για τις κεραίες και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το «αρχείο rinex των κεραιών». Περιέχει στοιχεία για τη βαθμονόμηση των κεραιών των δορυφόρων καθώς και για κάθε μοντέλο ξεχωριστά (πχ TRM 41249.00). Ο διαχωρισμός τους γίνεται σε Blocks. Παρακάτω φαίνεται μόνο ένα μικρό απόσπασμα του αρχείου με τις πληροφορίες των δύο block καθώς και το offset του μέσου κέντρου φάσης σε North, East, Up.

GLONASS-K1	R27	R802	2014-075A	TYPE / SERIAL NO	START OF ANTENNA
0.0	COD/ESA	0	29-JAN-17	METH / BY / # / DATE	DAZI
0.0	15.0	1.0			ZEN1 / ZEN2 / DZEN
2					# OF FREQUENCIES
2014	11	30	0	0	0.0000000
2016	1	26	23	59	59.9999999
IGS14_2163					SINEX CODE
R01					START OF FREQUENCY
0.00	0.00	2083.00			NORTH / EAST / UP
NOAZI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R01					END OF FREQUENCY
R02					START OF FREQUENCY
0.00	0.00	2083.00			NORTH / EAST / UP
NOAZI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R02					END OF FREQUENCY
					END OF ANTENNA
GLONASS-M	R27	R716	2006-062A	TYPE / SERIAL NO	START OF ANTENNA
0.0	COD/ESA	0	29-JAN-17	METH / BY / # / DATE	DAZI
0.0	15.0	1.0			ZEN1 / ZEN2 / DZEN
2					# OF FREQUENCIES
2019	8	3	0	0	0.0000000
IGS14_2163					SINEX CODE
R01					START OF FREQUENCY
-545.00	0.00	2451.20			NORTH / EAST / UP
NOAZI	1.90	1.50	1.10	0.80	0.20
R01					-0.60 -1.10
R02					END OF FREQUENCY
-545.00	0.00	2451.20			NORTH / EAST / UP
NOAZI	1.90	1.50	1.10	0.80	0.20
R02					-0.60 -1.10
					END OF FREQUENCY
					END OF ANTENNA

Εικόνα 23: Απόσπασμα αρχείου atx. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι το offset (N,E,U) του μέσου κέντρου φάσης τους.

## b. Phase wind-up

Οι δορυφόροι εκπέμπουν δεξιόστροφα πολωμένα κυκλικά ραδιοκύματα, οπότε και η παρατηρούμενη φέρουσα συχνότητα βασίζεται στον κοινό προσανατολισμό δορυφόρου και κεραίας δέκτη. Οι ηλιακοί συλλέκτες του δορυφόρου είναι πάντοτε προσανατολισμένοι προς τον ήλιο, οπότε κατά τη διάρκεια της κίνησής του αυτοί αλλάζουν προσανατολισμό, ώστε να μη χαθεί η επαφή. Λόγω αυτής της αλλαγής στους ηλιακούς συλλέκτες είναι απαραίτητο να γίνει μία διόρθωση στη φέρουσα φάση για να επανέλθει στον κοινό προσανατολισμό με την κεραία του δορυφόρου. Η περιστροφή αυτή μπορεί να φτάσει ως και τον ένα κύκλο (ένα μήκος κύματος), η οποία αντιστοιχεί σε μία ολόκληρη περιστροφή της κεραίας. Το σφάλμα αυτό μοντελοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Kouba & Héroux, 2001):

$$\delta\varphi = \text{sign}(\zeta) * \cos^{-1}\left(\vec{D}' \cdot \frac{\vec{D}}{|\vec{D}'|} * |\vec{D}|\right) \quad (3)$$

όπου:

$$\zeta = \hat{k} \cdot (\vec{D}' \times \vec{D})$$

$$\vec{D}' = \hat{x}' - \hat{k} * (\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}'$$

$$\vec{D} = \hat{x}' - \hat{k} * (\hat{k} \cdot \hat{x}') + \hat{k} \times \hat{y}'$$

Το  $\hat{k}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα από τον δορυφόρο προς τον δέκτη και τα  $\vec{D}'$ ,  $\vec{D}$  είναι τα δίπολα διανύσματα του δορυφόρου και του δέκτη που υπολογίζονται από τις συντεταγμένες  $(x, y, z)$  και  $(x', y', z')$  του δέκτη και του δορυφόρου αντίστοιχα. Το σφάλμα wind up μπορεί να παραληφθεί σε προγράμματα που επιλύουν βάσεις με διπλές διαφορές και είναι μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων, αλλά αν αγνοηθεί στις τροχιές IGS και στα χρονόμετρα μπορεί να προκαλέσει σφάλμα χρονόμετρου και θέσης της τάξης των cm.

#### Γεωδαιτικές - γεωφυσικές διορθώσεις

##### a. Παλίρροιες στερεού φλοιού (Solid Earth Tides)

Επειδή η Γη δεν είναι συμπαγής, το σχήμα της επηρεάζεται από οποιαδήποτε ισχυρή βαρυτική δύναμη της ασκείται. Έτσι όπως προκαλούνται οι παλίρροιες στη θάλασσα, κατά τον ίδιο τρόπο, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό, υπάρχουν και παλίρροιες στον στερεό φλοιό που μεταβάλλουν το σχήμα της γης κατά μερικά cm. Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να φτάσει κατά τόπους τα 30 cm σε ακτινική και τα 5 cm σε οριζόντια κατεύθυνση, η οποία εξαρτάται από την τοποθεσία του δέκτη, τη θέση της Σελήνης και του Ήλιου και την ώρα της ημέρας. Το μοντέλο που διορθώνει το συγκεκριμένο σφάλμα αποτυπώνεται στην παρακάτω συνάρτηση (Kouba & Héroux, 2001):

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} * \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ [3 * l_2 * (\hat{R}_j \cdot \hat{r})] * \hat{R}_j + 3 * \left(\frac{h_2}{2} - l_2 * \right) * (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right\} * \hat{r} + [-0.0025 * \sin \varphi \cos \varphi \sin(\theta_g + \lambda)] * \hat{r} \quad (4)$$

όπου:

$\Delta\vec{r} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]$  είναι η τρισδιάστατη διόρθωση του διανύσματος για τις συντεταγμένες του δέκτη

GM βαρυτική παράμετρος της Γης

$GM_j$  βαρυτική παράμετρος για τη Σελήνη ( $j=2$ ) και τον Ήλιο ( $j=3$ )

$r$  γεωκεντρική απόσταση δέκτη

$R_j$  γεωκεντρική απόσταση της Σελήνης και του Ήλιου

$\hat{r}$  μοναδιαίο διάνυσμα για το  $r$

$\hat{R}_j$  μοναδιαία διανύσματα για το  $R_j$

$I_2, h_2$  ονομαστικές δευτέρου βαθμού Love και Shida αδιάστατες τιμές (0,609 και 0,085)

$\phi, \lambda$  γεωγραφικό πλάτος και μήκος (θετικό ανατολικά)

$\theta_g$  μέσος αστρικός χρόνος Greenwich

*b. Ocean Loading*

Το φαινόμενο ocean loading μοιάζει αρκετά με τις παλίρροιες στερεού φλοιού καθώς έχει και αυτό περιοδικό χαρακτήρα αλλά σχετίζεται με τις παλίρροιες των ωκεανών. Είναι μια παράμετρος που δεν λαμβάνεται πάντοτε υπόψη αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που δεν μπορεί να παραλειφθεί. Για μετρήσεις μίας εποχής με ακρίβεια 5cm ή για στατικές μετρήσεις με ακρίβεια mm που η διάρκεια τους είναι πάνω από 24 ώρες το σφάλμα μπορεί να παραληφθεί χωρίς να επηρεάζεται η λύση. Ακόμη, μπορεί να παραλειφθεί και σε μετρήσεις από σταθμούς όπου είναι αρκετά μακριά από τη θάλασσα. Αντίθετα, στον κινηματικό εντοπισμό με απαίτηση ακρίβειας της τάξης του cm ή σε στατικές μετρήσεις κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές που η διάρκειά τους είναι μικρότερη από 24 ώρες το ocean loading πρέπει να ληφθεί υπόψη. (Kouba & Héroux, 2001) Το φαινόμενο του ocean loading μοντελοποιείται ως εξής:

$$\Delta c = \sum_j f_j * A_{cj} * \cos(\omega_j * t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (5)$$

όπου:

$f_j, u_j$  βασίζονται στο γεωγραφικό μήκος του σεληνιακού κόμβου (για ακρίβεια 1-3mm ισχύει  $f_j=1$  και  $u_j=0$ )

$j$  αντιπροσωπεύει 11 παλιρροιακές συνιστώσες:  $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_F, M_m, S_{sa}$ .

$\omega_j$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της παλιρροιακής συνιστώσας  $j$  σε χρόνο  $t=0h$ .

$\chi_j$  είναι το αστρονομικό όρισμα της παλιρροιακής συνιστώσας σε χρόνο  $t=0h$ .

$A_{cj}$  είναι το συγκεκριμένο πλάτος για τον σταθμό, στην ακτινική, νότια (θετική) και δυτική (θετική) κατεύθυνση

$\Phi_{cj}$  είναι η συγκεκριμένη φάση για τον σταθμό, στην ακτινική, νότια (θετική) και δυτική (θετική) κατεύθυνση

*c. Παράμετροι περιστροφής της Γης (Earth Rotation Parameters - ERP)*

Οι παράμετροι περιστροφής της Γης μαζί με τις συμβάσεις (conventions) για τον αστρικό χρόνο, τη μετάπτωση και κλόνιση του άξονα της γης είναι απαραίτητα στοιχεία για τον ακριβή μετασχηματισμό μεταξύ των γήινων και των αδρανειακών συστημάτων αναφοράς στην επεξεργασία των παρατηρήσεων του GPS. Οι τροχιές που προκύπτουν στο κλασικό γήινο σύστημα αναφοράς (ITRF), όπως τα προϊόντα τροχιών της IGS, περιέχουν τις παραμέτρους ERP. Οπότε οι χρήστες των προϊόντων της IGS που δουλεύουν απευθείας με τροχιές σε ITRF δεν χρειάζεται να προσθέτουν

τις παραμέτρους ERP, εφόσον περιλαμβάνονται. Αντίθετα, αν ένα πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα αδρανειακό σύστημα, οι παράμετροι ERP για τις τροχιές είναι απαραίτητες. Αυτή η επίδραση μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως και οι παλιρροιακές επιδράσεις, θεωρώντας τις  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  διορθώσεις των συντεταγμένων  $x$ ,  $y$ ,  $z$  του σταθμού. Μπορεί να υπολογιστεί από τις στιγμιαίες υποημερήσιες (sub-daily) διορθώσεις ERP ( $\delta X_p$ ,  $\delta Y_p$ ,  $\delta UT1$ ) και ο τυπικός μετασχηματισμός συντεταγμένων (χρησιμοποιώντας τη σύμβαση IERS και τις παραμέτρους περιστροφής  $R_x = \delta Y_p$ ,  $R_y = \delta X_p$ ,  $R_z = -\delta UT1$ ) (Kouba & Héroux, 2001).

$$\Delta x = +y \cdot \delta UT1 + z \cdot \delta X_p \quad (6)$$

$$\Delta y = -x \cdot \delta UT1 - z \cdot \delta Y_p \quad (7)$$

$$\Delta z = -x \cdot \delta X_p + y \cdot \delta Y_p \quad (8)$$

Οι υποημερήσιες ERP διορθώσεις ( $\delta X_p$ ,  $\delta Y_p$ ,  $\delta UT1$ ) προκύπτουν από τον παρακάτω τύπο:

$$\delta X_p = \sum_{j=1}^8 F_j * \sin \xi_j + G_j * \cos \xi_j \quad (9)$$

όπου:

$\xi_j$  είναι το αστρονομικό όρισμα για τη συγκεκριμένη εποχή για τη συνιστώσα του παλιρροιακού κύματος  $j$  των οκτώ ημερήσιων παλιρροιακών κυμάτων που έχουν υπολογιστεί ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ) επαυξημένη με  $n \cdot \pi/2$  ( $n=0, 1, -1$ )  
 $F_j$ ,  $G_j$  είναι συντελεστές παλιρροιακών κυμάτων

d. *Περιστροφική παραμόρφωση λόγω των πολικών παλιρροιών (Polar Tides)*

«Όπως οι παραμορφώσεις λόγω των έλξεων Ήλιου και Σελήνης προκαλούν περιοδικές παραμορφώσεις της θέσης των σταθμών, έτσι και οι αλλαγές του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με τον φλοιό της, δηλαδή η πολική κίνηση, προκαλεί περιοδικές παραμορφώσεις λόγω αλλαγών στο φυγόκεντρο δυναμικό της Γης» (Kouba, 2003). Η διόρθωση του συγκεκριμένου σφάλματος δίνεται κατά γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και ύψος σε mm μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$\Delta \varphi = -9 * \cos 2\varphi * (X_p * \cos \lambda - Y_p * \sin \lambda) \quad (10)$$

$$\Delta \lambda = 9 * \cos \varphi * (X_p * \sin \lambda + Y_p * \cos \lambda) \quad (11)$$

$$\Delta h = -32 * \sin 2\varphi * (X_p * \cos \lambda - Y_p * \sin \lambda) \quad (12)$$

Όπου το  $X_p$ ,  $Y_p$  είναι οι συντεταγμένες θέσης του πόλου σε δευτερόλεπτα του τόξου. Η πολική κίνηση μπορεί να φτάσει έως και 0,8 δευτ. τόξου, οι μέγιστες μετατοπίσεις της πολικής παλίρροιας μπορούν να φτάσουν περίπου τα 25 mm στο υψόμετρο και περίπου τα 7 mm στις οριζόντιες διευθύνσεις.

2.5.3. Λογισμικά – εφαρμογές που υλοποιούν PPP

Η μέθοδος ακριβούς απόλυτου προσδιορισμού θέσης μπορεί να μην έχει κυριαρχήσει προς το παρόν αλλά κερδίζει σημαντικό έδαφος λόγω της αξιοπιστίας και της ταχύτητας των αποτελεσμάτων. Προς το παρόν υπάρχουν δύο διαδικτυακές εφαρμογές που λύνουν με την τεχνική PPP, η μία είναι η APPS (Automatic Precise Positioning Service) του JPL (Jet Propulsion Laboratory) της NASA και η CSRS (Canadian Spatial Reference System) PPP της NRC (Natural Resources Canada). Ο χρήστης μπορεί να υποβάλλει τις μετρήσεις του σε κάποια υπηρεσία

που υποστηρίζει PPP και μέσα σε λίγα το πολύ λεπτά να λάβει τη λύση μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου συνοδευόμενη και από διάφορα γραφήματα.

Η υπηρεσία APPS (Εικόνα 24) δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ανεβάσει το αρχείο του είτε είναι εγγεγραμμένος είτε όχι, με τη διαφορά όμως ότι οι εγγεγραμμένοι χρήστες μπορούν να παραμετροποιήσουν την επίλυση. Μπορούν να επιλέξουν αν οι μετρήσεις έχουν γίνει με κινηματικό ή στατικό τρόπο, αν ο δέκτης είναι μονής ή διπλής συχνότητας, να ορίσουν τη γωνία αποκοπής και να ορίσουν βάρη στα δεδομένα με βάση τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου. Επιπλέον, υπάρχει ο περιορισμός στους μη εγγεγραμμένους χρήστες του όγκου του αρχείου μέχρι τα 5 MB.

APPS Options	
Processing Mode	<input checked="" type="radio"/> Static <input type="radio"/> Kinematic
Measurement Type	<input type="radio"/> Single Frequency <input checked="" type="radio"/> Dual Frequency
Orbits/Clocks used	JPL Final: Data prior to 2022-03-12 JPL Rapid: Data from 2022-03-12 to 2022-03-16 JPL Ultra R/T: Data from 2022-03-16 to present
L1 Code	<input type="radio"/> CA Code <input checked="" type="radio"/> P Code
Model Pressure Data?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Elevation Dependent Data Weighting	<input checked="" type="radio"/> Flat <input type="radio"/> Sin <input type="radio"/> Sqrt(sin)
Advanced Options	7.5 Elevation Angle Cutoff 300 Solution Output Rate (seconds)

Επιλογή αρχείου Δεν έχει επιλεγεί αρχείο

Reset Upload

Εικόνα 24: Interface APPS της JPL (Πηγή: [https://apps.gdaps.net/apps\\_file\\_upload.php](https://apps.gdaps.net/apps_file_upload.php))

Η υπηρεσία CSRS-PPP είναι μία διαδικτυακή εφαρμογή που, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρέχεται από την Natural Resources Canada (Εικόνα 25). Η υπηρεσία είναι φιλική καθώς ο χρήστης με μια απλή εγγραφή μπορεί να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες της. Η υπηρεσία υπολογίζει βάσει του αρχείου και των παραμέτρων που ορίζει ο χρήστης τις συντεταγμένες με απόλυτη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις εφημερίδες ακριβείας των δορυφόρων. Πρώτα από όλα ο χρήστης επιλέγει αν οι μετρήσεις τους προέρχονται από στατικό ή κινηματικό εντοπισμό. Στη συνέχεια επιλέγεται η εποχή (epoch) και το κατακόρυφο datum. Αν είναι αναγκαίο για τη λύση υπάρχει και η επιλογή φόρτωσης αρχείου με διορθώσεις ocean loading. Το αρχείο πρέπει να έχει μέγιστο μέγεθος τα 300MB και μπορεί να περιέχει μετρήσεις από δέκτη μονής ή διπλής συχνότητας. Τα αποτελέσματα που θα λάβει ο χρήστης μέσω email θα είναι ή στο παγκόσμιο σύστημα ITRF ή στο σύστημα NAD83 (North American Datum of 1983).

## Processing mode

Static  Kinematic

NAD83 ITRF

Epoch (Adopted)

CGVD2013

Contribute to passive control maintenance? ([What is this?](#))  Authorize the Canadian Geodetic Survey to archive and publish CSRS-PPP submission and solution

Official Canadian federal or provincial geodetic marker number

More options

OTL File ([Who should use this file?](#))

Επιλογή αρχείου Δεν έχει επιλεγεί αρχείο

RINEX observation file(s), 300 MB max (.zip, .gz, .Z, .tar, .?O)

Note: You may submit multiple RINEX files in a single .zip or .tar archive

Επιλογή αρχείου Δεν έχει επιλεγεί αρχείο

Remove plots from CSRS-PPP solution PDF report ([Why?](#))

Submit to PPP

Εικόνα 25: Interface CSRS-PPP της NRC (Πηγή: [Precise Point Positioning \(nrcan-rncan.gc.ca\)](http://Precise Point Positioning (nrcan-rncan.gc.ca)))

Το JPL (Jet Propulsion Laboratory) της NASA πέραν της online υπηρεσίας APPS διαθέτει και το λογισμικό γραφείου GipsyX το οποίο ανέπτυξε προκειμένου να αντικαταστήσει το παλαιότερο λογισμικό GIPSY-OASIS. Το GipsyX έχει δυνατότητα επίλυσης πολλών γεωδαιτικών προβλημάτων, όπως επεξεργασία μετρήσεων DORIS και SLR, μοντελοποίηση τροχίων χαμηλών δορυφόρων (LEO) κ.α. Επίσης θεωρείται το πλέον καταξιωμένο λογισμικό για επιλύσεις PPP, παρέχοντας ακρίβεια cm σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό της θέσης. Ενσωματώνει τη δυνατότητα επίλυσης ασαφειών φάσης κατά την επίλυση PPP χρησιμοποιώντας τα προϊόντα τροχιάς GPS και ρολογιού της JPL. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό θέσης σε γεωφυσικές εργασίες όπως είναι η μελέτη παραμόρφωσης του γήινου φλοιού, της κίνησης των τεκτονικών πλακών, του λωσίματος των πάγων καθώς και τις κλιματικές μελέτες μέσω παρατήρησης της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. (NASA, 2022)

### 3. ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GipsyX

Η έρευνα της παρούσας εργασίας εστιάζει στη μελέτη των κινήσεων του γήινου φλοιού στην περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, μία από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της Ελλάδας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι εκείνη του ακριβούς απόλυτου προσδιορισμού θέσης (Precise Point Positioning - PPP). Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε μέσω του προγράμματος GipsyX έκδοσης 2.0.

#### 3.1. Διαθέσιμα δεδομένα

Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής αντλήθηκαν δεδομένα σε μορφή RINEX από το Εθνικό Κτηματολόγιο και αφορούν, όπως έχει ήδη ειπωθεί, το σταθμό 018B που βρίσκεται στη Σαμοθράκη. Τα δεδομένα αναφέρονται στην περίοδο 05/2010 – 04/2020, αλλά δεν είναι καθημερινά. Η συχνότητα λήψης των δεδομένων είναι μία μέτρηση ανά οκτώ περίπου ημέρες για το προαναφερόμενο διάστημα. Οι συνολικές ημερομηνίες που προέκυψαν είναι 345.

#### 3.2. Παραμετροποίηση λογισμικού επεξεργασίας

Το GipsyX είναι ένα λογισμικό το οποίο εγκαθίσταται στον υπολογιστή και εκτελείται σε λειτουργικό σύστημα Linux μέσω γραμμής εντολών (Command Window). Για να προκύψουν τα κατάλληλα δεδομένα για τη μελέτη της κινητικότητας το πρόγραμμα λαμβάνει ως δεδομένα τις παραμέτρους που χρειάζονται για τη διαδικασία PPP (τροχιές ακριβείας, διορθώσεις χρονομέτρων δορυφόρων, ocean loading parameters κλπ) και τα αρχεία RINEX από τους σταθμούς μέτρησης. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η παραμετροποίηση της εντολής εκτέλεσης του προγράμματος, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 26.

```
1 gd2e.py \  
2     -treeSequenceDir /home/mg/MG/Trees/220712_018B_2012upto2020/ \  
3     -runType PPP \  
4     -gdCov \  
5     -recList 018B \  
6     -dataEditor "rnxEditGde.py -d 018B1210.20d -o dataRecordFile.gz" \  
7     -staDb /home/mg/MG/StaDb/rinexStaDb_081B_NetRS \  
8     >gd2e.log 2>gd2e.err
```

Εικόνα 26: Παραμετροποίηση της εντολής εκτέλεσης του προγράμματος GipsyX

Για να ξεκινήσει το πρόγραμμα τη διαδικασία επίλυσης χρειάζεται να δοθεί η εντολή “gd2e.py” (geodetic data to estimate). Η χρήση της είναι απαραίτητη αφού μόνο έτσι μπορεί να παραμετροποιηθεί η μέθοδος που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε.

Κάτω από την αρχική εντολή που αναφέρθηκε παραπάνω, δίνονται τα switches, δηλαδή οι παράμετροι που περνάνε μέσα σε αυτή, οι οποίες εισάγουν στοιχεία όπως ο σταθμός που χρησιμοποιείται ή αρχεία που είναι απαραίτητα για την ορθότητα των υπολογισμών (πχ. ocean loading parameters). Το πρώτο switch που απαιτείται είναι το “treeSequenceDir”, «Ένας κατάλογος που περιέχει μια ακολουθία αρχείων εισόδου με επιτρεπόμενες μεταβλητές. Οι προεπιλογές ορίζονται από το κατάλληλο runType για LEO, PPP κλπ.» (JPL, 2022). Πιο συγκεκριμένα, ένα αρχείο tree περιλαμβάνει όλες τις ρυθμίσεις και τις παραμέτρους που είναι αναγκαίες για να τρέξει η επίλυση. Για να μπορέσει να φορτωθεί το κατάλληλο αρχείο tree, πρέπει δίπλα στο switch να ακολουθήσει η ακριβής διαδρομή που



βρίσκεται το αρχείο. Το συγκεκριμένο αρχείο παραμένει το ίδιο εφόσον δεν αλλάζει ο δέκτης με τον οποίο γίνονται οι μετρήσεις.

Έπειτα, ακολουθεί ο προσδιορισμός της μεθόδου επίλυσης. Το switch “runType” παίρνει τρεις τιμές (LEO, PPP, GNSSPRTL) και καθορίζει τον τρόπο επίλυσης που θα ακολουθηθεί σε όλη την υπόλοιπη διαδικασία.

Ως τρίτη παράμετρος δίνεται το “gdCon”, το οποίο δημιουργεί ένα εξαγόμενο αρχείο που περιέχει τις ECEF συντεταγμένες της επίλυσης μαζί με τα στοιχεία του πίνακα μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων. Ο χρόνος που αναφέρεται εντός του αρχείου αφορά τα δευτερόλεπτα που έχουν περάσει από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2000 11:59:47 UTC.

Από την λίστα δεκτών (recList) επιλέγεται ο κωδικός του σταθμού που χρησιμοποιήθηκε (O18B – σταθμός Σαμοθράκης), ώστε να ληφθεί υπόψη στην επίλυση η σωστή βαθμονόμηση (calibration) του εξοπλισμού του σταθμού και πιθανές τοπικές τροποποιήσεις.

Στο Βόρειο Αιγαίο, όπου είναι η περιοχή μελέτης μας, η επίδραση του ocean loading και των παλιρροιών είναι υπολογίσιμη, καθώς πρόκειται για νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές, για το λόγο αυτό η εφαρμογή του κρίνεται απαραίτητη. Στο GipsyX το αρχείο RINEX με τις μετρήσεις των δορυφόρων δεν μπορεί να «τρέξει» μαζί με το ocean loading αρχείο, διότι δεν υπάρχει συμβατότητα. Το switch “dataEditor” επιλύει το συγκεκριμένο ζήτημα, καθώς μετατρέπει το αρχείο RINEX σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι συμβατό με το αρχείο ocean loading. Το αρχείο που έχει υποστεί επεξεργασία φέρει ως προεπιλογή το όνομα «dataRecordFile.gz».

Ως τελικό switch δίνεται το “staDb”, το οποίο προσδιορίζει τη βάση δεδομένων του σταθμού. Το switch δηλώνεται με συγκεκριμένη διαδρομή στην οποία βρίσκεται το αρχείο της βάσης. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του GipsyX το “staDb” είναι «ένα αρχείο βάσης δεδομένων σταθμού με σκοπό τον ορισμό της ονομαστικής θέσης, της ταχύτητας, τον τύπο κεραίας και τον κωδικό IGS. Καλές επιλογές είναι οι βάσεις δεδομένων πλαισίου (IGb08\_sta\_db, IGS14\_sta\_db) ή \$GOA VAR/sta\_info/sta\_db\_qflinn, που περιέχει πάνω από 1000 σταθμούς» (JPL, 2022). Στη συγκεκριμένη περίπτωση επεξεργασίας ως προεπιλογή έχει θεωρηθεί το IGS14\_sta\_db.

### 3.3. Παραγόμενα αρχεία (outputs)

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ημέρα μετρήσεων με ακριβώς τον ίδιο τρόπο. Το μόνο δεδομένο που διαφοροποιείται, και εφόσον ο σταθμός μετρήσεων παραμένει ο ίδιος, είναι το αρχείο compact rinex που μπαίνει στο dataEditor. Η παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας έχει ως αποτέλεσμα να παραχθούν ορισμένα αρχεία αποτελεσμάτων. Τα αρχεία που προκύπτουν ως εξαγόμενα από ένα μόνο τρέξιμο στο πρόγραμμα είναι ονομαστικά τα εξής:

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. allStations.xyz       | 12. preamb_final.pos                       |
| 2. constraints.txt       | 13. preamb_finalResiduals.out              |
| 3. debug.tree            | 14. preamb_smooth0_0.tdp                   |
| 4. filter.tdp            | 15. preamb_smoothFinal.cov                 |
| 5. final.pos             | 16. prefitResiduals.out                    |
| 6. finalResiduals.out    | 17. rtgx_ppp_0.tree.err0_0                 |
| 7. gd2e.err              | 18. 2020-01-01.018B.ambres.stats           |
| 8. gd2e.log              | 19. 2020-01-01.018B.AmbResSummary          |
| 9. gde.tree              | 20. 2020-01-01.018B.gdcov                  |
| 10. gnssList.txt         | 21. 2020-01-01.018B.rtgx_ppp_0.tree.log0_0 |
| 11. postfitResiduals.out | 22. 2020-01-01.018B.Summary                |

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα τέσσερα σημαντικότερα και πιο χρήσιμα αρχεία για την παρούσα εργασία.

#### **Αρχείο ambres.stats**

Το αρχείο περιλαμβάνει τα στατιστικά στοιχεία που αφορούν την επίλυση ασαφειών, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 27. Περιέχει επίσης ακριβή στατιστικά για τους γραμμικούς συνδυασμούς τεχνικών επίλυσης widelane και narrowlane. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις στις 01.01.2020. Στη σειρά 2 αναγράφονται σε δευτερόλεπτα ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει μεταξύ των δύο ημερομηνιών, 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2000 και 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2020.

```

1 *****
2 Printing stats covering from 631108800.000000 ( 2020-01-01 00:00:00.000000 ) to end
3 *****
4
5 Double difference preliminary quality check
6   Undefined check status : 0
7   More than 1 platform is being decoupled in the DD : 0
8   Overlap OK, but missing common epoch measurements : 0
9   Overlap OK, but number of measurements is too low : 0
10  At least one DD leg with missing PB estimate : 0
11  Wavelengths among the legs of the DD differ : 0
12  Double differences already constrained (rejected) : 0
13
14 DURATION related statistics
15   Double difference too short : 5363
16
17 WIDELANE related statistics
18   Bad DD widelane best guess : 82
19   DD widelane average has large sigma : 0
20   DD widelane has low confidence : 0
21
22 NARROWLANE related statistics
23   Bad DD narrowlane best guess : 6
24   DD narrowlane has large sigma (from overlap) : 0
25   DD narrowlane has large sigma : 0
26   DD narrowlane has low confidence : 200
27
28 Double differences that PASSED all tests : 3115

```

Εικόνα 27: Στιγμιότυπο αρχείου ambres.stats με επεξήγηση των στατιστικών.

Επιπλέον, στο αρχείο παρουσιάζονται έτοιμα δεδομένα για τη δημιουργία ιστογραμμάτων. Η κατασκευή του γραφήματος δεν είναι απαραίτητη, ωστόσο τα στοιχεία δίνουν αρκετή ποιοτική πληροφορία για τη συμπεριφορά τόσο των δορυφόρων όσο και των παρατηρήσεων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην Εικόνα 28 είναι παρουσίαση τριών ιστογραμμάτων. Το πρώτο ιστόγραμμα έχει μια φυσιολογική συμπεριφορά, διότι όπως είναι λογικό σε ένα τέτοιο ιστόγραμμα όσο αυξάνεται η απόσταση το πλήθος των παρατηρήσεων πρέπει να φθίνει. Στα άλλα δύο ιστογράμματα εντοπίζονται προβλήματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης και ίσως χρειαστεί να ελεγχθούν ξανά οι παρατηρήσεις. Τα προβλήματα που παρατηρούνται είναι, στο δεύτερο διάγραμμα η παρουσία δύο παρατηρήσεων οι οποίες απέχουν αρκετά από τον κοντινότερο ακέραιο, ενώ στο τρίτο διάγραμμα εντοπίζεται κενό μεταξύ των παρατηρήσεων.

Type of histogram	Formal sigma [centicycle]	Distance to nearest int [centicycle]	Number of samples [count]	Proportion	
WL	2	0.00000	413	0.34189	*****
WL	2	5.00000	357	0.29553	*****
WL	2	10.00000	210	0.17384	*****
WL	2	15.00000	112	0.09272	*****
WL	2	20.00000	54	0.04470	***
WL	2	25.00000	34	0.02815	**
WL	2	30.00000	17	0.01407	*
WL	2	35.00000	10	0.00828	
WL	2	40.00000	1	0.00083	
WL	2	45.00000	0	0.00000	
WL	6	0.00000	18	0.26866	*****
WL	6	5.00000	20	0.29851	*****
WL	6	10.00000	13	0.19403	*****
WL	6	15.00000	5	0.07463	*****
WL	6	20.00000	7	0.10448	*****
WL	6	25.00000	2	0.02985	**
WL	6	30.00000	0	0.00000	
WL	6	35.00000	1	0.01493	*
WL	6	40.00000	1	0.01493	*
WL	6	45.00000	0	0.00000	
WL	7	0.00000	2	0.33333	*****
WL	7	5.00000	0	0.00000	
WL	7	10.00000	0	0.00000	
WL	7	15.00000	0	0.00000	
WL	7	20.00000	3	0.50000	*****
WL	7	25.00000	1	0.16667	*****
WL	7	30.00000	0	0.00000	
WL	7	35.00000	0	0.00000	
WL	7	40.00000	0	0.00000	
WL	7	45.00000	0	0.00000	

Εικόνα 28: Στιγμιότυπο αρχείου ambres.stats για τα ιστογράμματα

### Αρχείο gdcov

Από το αρχείο gdcov, στιγμιότυπο του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 29, μπορούμε να αντλήσουμε τις αβεβαιότητες (σίγμα) και τις συμμεταβλητότητες που προέκυψαν κατά την επίλυση. Οι αβεβαιότητες δίνονται στις σειρές 2-3-4 στην τελευταία στήλη για X,Y,Z αντίστοιχα, ενώ οι συμμεταβλητότητες δίνονται με αντίστοιχο τρόπο στις σειρές 5-6-7.

```

1 3 PARAMETERS
2 1 018B.STA.X 631151850 4.384712280726473e+06 3.007447192155547e-03
3 2 018B.STA.Y 631151850 2.093636971873227e+06 1.662284525885334e-03
4 3 018B.STA.Z 631151850 4.118344271621936e+06 2.882819384317610e-03
5 2 1 7.871020197869550e-01
6 3 1 8.691841963434258e-01
7 3 2 7.589540712316439e-01

```

Εικόνα 29: Στιγμιότυπο αρχείου gdcov

### Αρχείο rtgx\_ppp\_0.tree.log0\_0

Το αρχείο log παρουσιάζει όλη τη διαδικασία εκτέλεσης μέχρι το πρόγραμμα να βγάλει τα τελικά προϊόντα. Μέσα σε αυτό μπορούν να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα (errors) και προειδοποιήσεις (warnings) αλλά είναι εύκολο να ανατρέξει κανείς και σε συγκεκριμένα σημεία της διαδικασίας που πιθανόν να επιθυμεί.

### Αρχείο Summary

Το αρχείο Summary παρουσιάζει ότι δηλώνει και το όνομά του, δηλαδή μία σύνοψη των στατιστικών στοιχείων των υπολοίπων της συνόρθωσης (residuals) αλλά και των τελικών συντεταγμένων PPP (Εικόνα 30). Τα residuals της τελευταίας επανάληψης του τρεξίματος παρουσιάζονται σε έναν πίνακα, όπως αυτός που φαίνεται παρακάτω στις σειρές 5-10. Στις σειρές 13 και 14 παρουσιάζονται οι τελικές λύσεις X,Y,Z για το σταθμό 018B. Για να μπορέσει όμως να υπολογίσει τις τελικές συντεταγμένες το πρόγραμμα χρειάζεται μια προσεγγιστική θέση (ονομαστική), η οποία δίνεται από το αρχείο staDb. Μαζί με τα αποτελέσματα, λοιπόν, δίνεται επιπλέον και η διαφορά των τελικών συντεταγμένων από την ονομαστική (nominal) θέση (**Solution - Nominal**) σε μορφή ΔX, ΔY, ΔZ και ΔE,ΔN,ΔV σε μέτρα (m). Από το συγκεκριμένο αρχείο θα αντληθούν οι συντεταγμένες που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή των χρονοσειρών. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συντεταγμένες που προκύπτουν είναι στο σύστημα IGS14 το οποίο δεν εξυπηρετεί για την περιοχή μελέτης, οπότε και πρέπει να βρεθεί κάποιος τρόπος μετατροπής ή προσέγγισης σε επιθυμητό σύστημα αναφοράς, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

```
1 --- Residual Summary:
2 -----
3 --- included residuals :      4086 ( 99.1% )
4 --- deleted residuals  :       36 (  0.9% )
5 ---
6 ---   DataType      Status      RMS (m)      Max (m)      Min (m)      number (%)
7 --- IonoFreeC_1W_2W included  4.365895e-01  1.763748e+00 -1.765635e+00  2060 ( 100.0% )
8 --- IonoFreeC_1W_2W deleted   2.789802e+00 -2.789802e+00 -2.789802e+00    1 (  0.0% )
9 ---
10 --- IonoFreeE_1W_2W included  7.248081e-03  2.752512e-02 -2.927228e-02  2026 ( 98.3% )
11 --- IonoFreeE_1W_2W deleted   3.969745e-02  5.276206e-02 -7.527791e-02   35 (  1.7% )
12 -----
13 ---
14 --- PPP Solution: XYZ                      DeltaXYZ(Sol-Nom)                      DeltaENV (meters)
15 018B 4384712.280726473 2093636.971873227 4118344.271621936 -6.558E-01  5.851E-01  3.537E-01  8.105E-01  4.896E-01 -2.879E-02
```

Εικόνα 30: Στιγμιότυπο αρχείου Summary

### 3.4. Scripts αυτοματοποίησης επεξεργασίας

Ενώ η προεπιλεγμένη συχνότητα λήψης παρατηρήσεων είναι 300 second, αποφασίστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας να αξιοποιηθεί και η δυνατότητα επίλυσης των παρατηρήσεων με συχνότητα λήψης 30 second. Κατ' αυτό τον τρόπο θα προκύψουν ποσοτικές και ποιοτικές διαφορές μέσω των οποίων μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το ποια συχνότητα δίνει τη μέγιστη ακρίβεια και αν η βελτίωση είναι σημαντική. Για το λόγο αυτό, οι παρατηρήσεις λύθηκαν με την παρακάτω μέθοδο και για τις δύο συχνότητες, 30 και 300 second.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι τελικές συντεταγμένες χρειάζεται να μετατραπούν σε ένα γνωστό και διαχειρίσιμο σύστημα αναφοράς. Αν χρησιμοποιήσουμε την προβολή TM87 οι συντεταγμένες θα μοιάζουν αρκετά με αυτές που θα προκύπταν σε ΕΓΣΑ '87 αλλά δεν θα είναι πραγματικά ίδιες λόγω της μετάθεσης του ΕΓΣΑ87 ως προς το γεώκεντρο. Για το λόγο αυτό, η πιο ενδεδειγμένη λύση είναι να μετατραπούν σε ένα τοποκεντρικό σύστημα με αρχή των αξόνων (0,0,0) στο σταθμό των μετρήσεων (σταθμός Σαμοθράκης).

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί γρήγορα και ορθά η μετατροπή των συντεταγμένων από ένα σύστημα στο άλλο, υλοποιήθηκαν δύο σενάρια εκτέλεσης εντολών (script) στο MATLAB τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχικά, αντλήθηκαν από τους φακέλους με τη βοήθεια της γραμμής εντολών (command window) τα ονόματα των αρχείων που προέκυψαν από την επεξεργασία στο πρόγραμμα GipsyX. Κάθε ομάδα αρχείων, που αφορούσε ημερήσια δεδομένα είχε την ίδια ονομασία,

την ημερομηνία και το σταθμό, με διαφορετική κατάληξη (τύπο αρχείου πχ. .Summary, .AmbResSummary κλπ.). Οι συντεταγμένες που χρειάζοντουσαν ώστε να προχωρήσει η μετατροπή βρίσκονται στα αρχεία με κατάληξη .Summary, οπότε και εξάχθηκε μία λίστα των συγκεκριμένων αρχείων που λειτούργησε σαν λίστα όλων των ημερομηνιών για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα.

Το πρώτο script που εκτελέστηκε ήταν αυτό της σάρωσης και εξαγωγής των συντεταγμένων X,Y,Z και του μέσου σε αρχεία κειμένου (Εικόνα 31). Δηλαδή, δομήθηκε ένα πρόγραμμα το οποίο διαβάζει όλα τα αρχεία που βρίσκονται στον ίδιο φάκελο και αποσπά από αυτά τις συντεταγμένες X,Y,Z τοποθετώντας τις σε πίνακα διαστάσεων 435×3. Ακόμη, υπολογίζει τον μέσο όρο κάθε συνιστώσας, εγγράφοντας επίσης το αποτέλεσμα σε πίνακα διαστάσεων 1×3. Το πρόγραμμα έχει ως παραγόμενα τα αρχεία Summaries και Mean, τα οποία περιέχουν τους πίνακες που αναφέρθηκαν αντίστοιχα. Ο μέσος όρος όλων των ετών υπολογίστηκε διότι το κέντρο του τοποκεντρικού συστήματος (0,0,0) που ορίστηκε είναι στις μέσες τιμές των X,Y,Z. Λόγω της μικρής διαφοράς μεταξύ των συντεταγμένων στα 30 και 300 second τα αποτελέσματα εξάχθηκαν με ακρίβεια 9 δεκαδικών.

```
files = dir('*Summary');

for i=1:length(files)
u(i)=importdata(files(i).name);
MyMatrix = vertcat(u(i).data);
end

format longE

MyMatrix = vertcat(u.data);

X=MyMatrix(:,1);
Y=MyMatrix(:,2);
Z=MyMatrix(:,3);

X_mean=mean(X);
Y_mean=mean(Y);
Z_mean=mean(Z);

data=[X,Y,Z];
XYZmean=[X_mean,Y_mean,Z_mean];

dlmwrite('Summaries.txt', data, 'delimiter', ',', 'precision', '%.9f');

dlmwrite('Mean.txt', XYZmean, 'delimiter', ',', 'precision', '%.9f');
```

Εικόνα 31: Στιγμιότυπο αρχείου ReadDataSummary (MATLAB)

Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της μετατροπής των συντεταγμένων σε East, North, Up δημιουργήθηκε ένα δεύτερο script που αναλύεται στην Εικόνα 32. Στο πρόγραμμα εισάγονται τα αρχεία Summaries και Mean για τα οποία κάθε στήλη θέτεται σε μία μεταβλητή X,Y,Z και Xo,Yo,Zo αντίστοιχα. Έπειτα, απαραίτητο μέρος της διαδικασίας ήταν ο ορισμός του ελλειψοειδούς το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το WGS '84. Μέσω της συνάρτησης ecef2geodetic μετατράπηκαν οι συντεταγμένες X,Y,Z του μέσου σε φ,λ,η και ορίστηκαν ως συντεταγμένες του κέντρου. Η τελική μετατροπή των συντεταγμένων έγινε με τη συνάρτηση ecef2enu όπου ως ορίσματα παίρνει τις συντεταγμένες X,Y,Z των παρατηρήσεων, τις συντεταγμένες φ,λ,η του κέντρου και το ελλειψοειδές και ως παραγόμενο έχει έναν πίνακα συντεταγμένων E,N,U. Ο πίνακας αυτός, περιέχει τις τελικές συντεταγμένες για τις επιλεγμένες εποχές και εξάχθηκε σε αρχείο κειμένου txt με ακρίβεια 9 δεκαδικών.

```

data00=importdata('Mean.txt');
data=importdata('Summaries.txt');

Xo=data00(1,1);
Yo=data00(1,2);
Zo=data00(1,3);

X=data(:,1);
Y=data(:,2);
Z=data(:,3);

spheroid = referenceEllipsoid('wgs84');

format longE

[lat,lon,h] = ecef2geodetic(spheroid,Xo,Yo,Zo);

lat0=lat
lon0=lon;
h0=h;

format longE

[xEast,yNorth,zUp] = ecef2enu(X,Y,Z,lat0,lon0,h0,spheroid)

exportENU=[xEast,yNorth,zUp];

dlmwrite('ENU.txt', exportENU, 'delimiter', ',', 'precision', '%.9f');

```

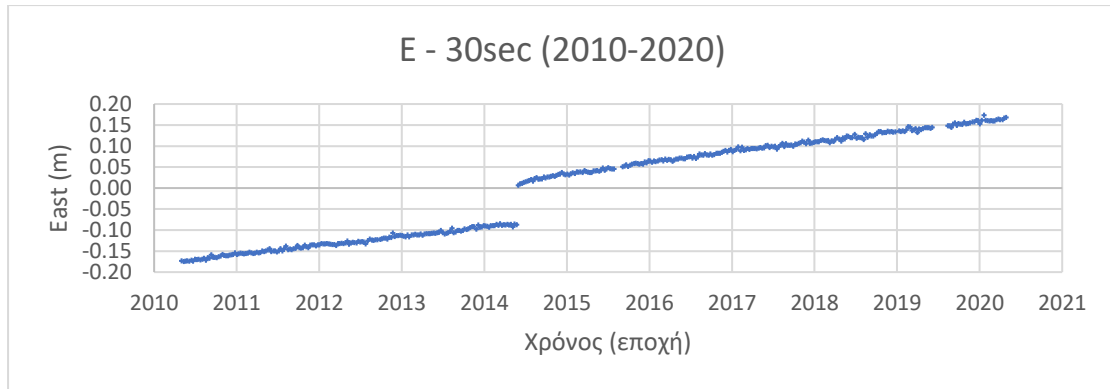
Εικόνα 32: Στιγμιότυπο αρχείου XYZ2ENU (MATLAB)

### 3.5. Σύγκριση συχνοτήτων 30 και 300 second

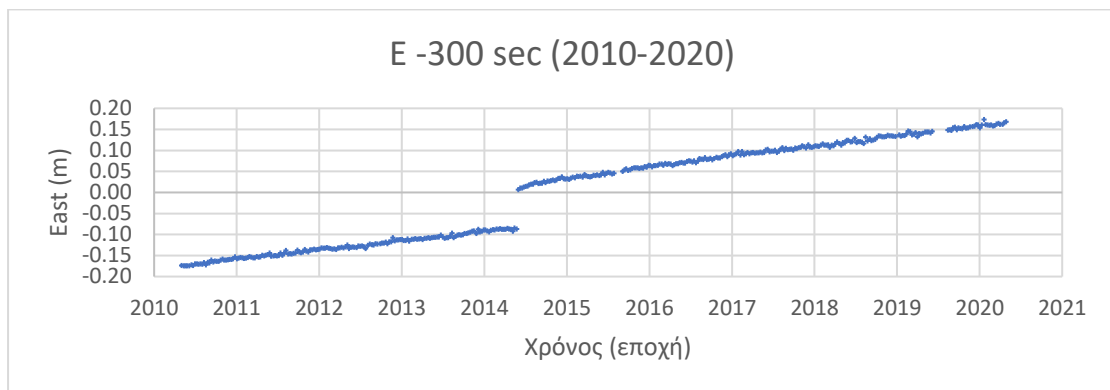
Μία χρονοσειρά εξετάζει την εξέλιξη ενός φαινομένου, στη συγκεκριμένη περίπτωση τη μεταβολή των συντεταγμένων ενός σταθμού, συναρτήσει του χρόνου. Εφόσον υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες E,N,U των παρατηρήσεων μπορούν να απεικονιστούν οι χρονοσειρές για 30 και 300 second, ώστε να φανεί η εξέλιξη του φαινομένου σε βάθος δεκαετίας. Για να είναι όμως πιο διαχειρίσιμα τα δεδομένα, η ημερομηνία μετατράπηκε σε αριθμό (εποχή) και υπολογίστηκαν οι διαφορές μεταξύ κάθε δύο διαδοχικών εποχών ( $DAYS_{DIFF}$ ). Με αρχική παρατήρηση την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2010 η αντίστοιχη εποχή είναι 2010,331. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίστηκαν οι υπόλοιπες εποχές είναι ο εξής:

$$Epoch = 2010,331 + DAYS_{DIFF} * \left(\frac{1}{365}\right) \quad (13)$$

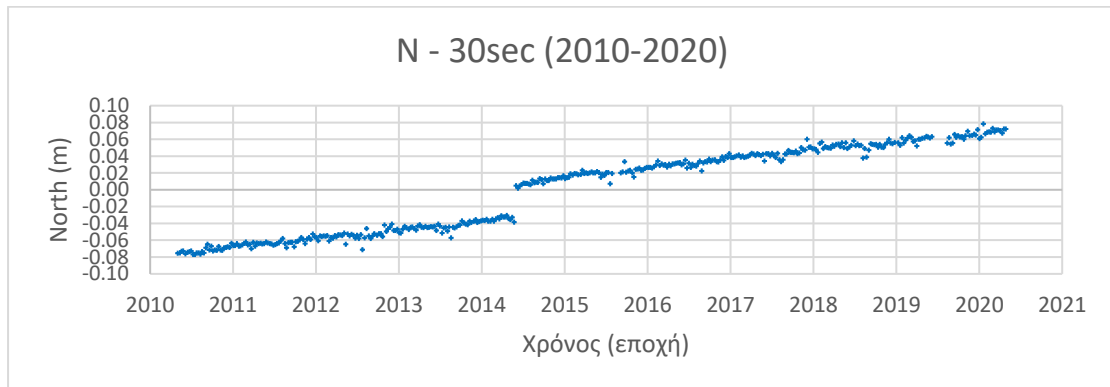
Έχοντας πλέον τις συντεταγμένες και τις αντίστοιχες εποχές οι χρονοσειρές που προέκυψαν με μορφή διαγράμματος διασποράς φαίνονται παρακάτω, Διάγραμμα 1-Διάγραμμα 6, για E,N,U 30 και 300 second αντίστοιχα. Λόγω της μεγάλης κλίμακας χρόνου που χρησιμοποιείται δεν θα υπάρξουν οπτικά μεγάλες διαφορές στα διαγράμματα. Όμως είναι ευδιάκριτη η διαφορά πριν και μετά τον σεισμό αναφοράς (24/05/2014) διότι παρατηρείται ένα άλμα τόσο στο East όσο και στο North. Ακόμη, πολύ χαρακτηριστικά διακρίνονται και τα μεγάλα διαστήματα όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων.



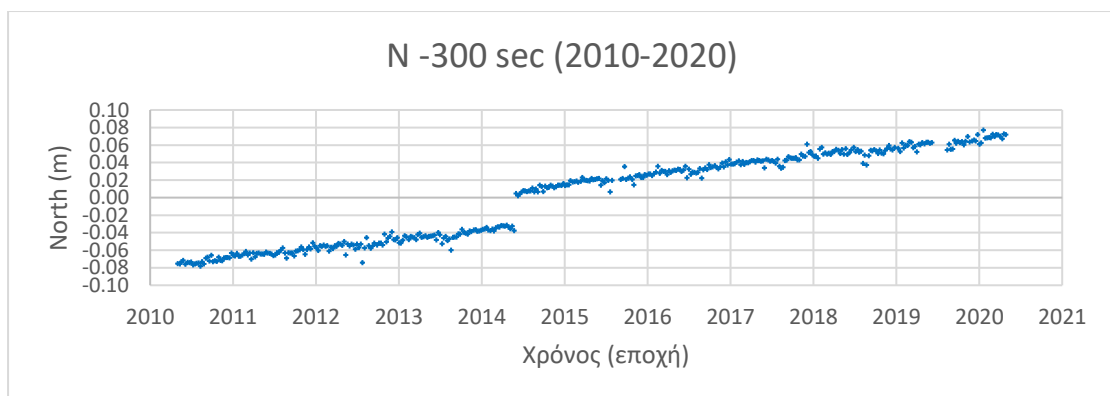
Διάγραμμα 1: Χρονοσειρά East για 30 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)



Διάγραμμα 2: Χρονοσειρά East για 300 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)

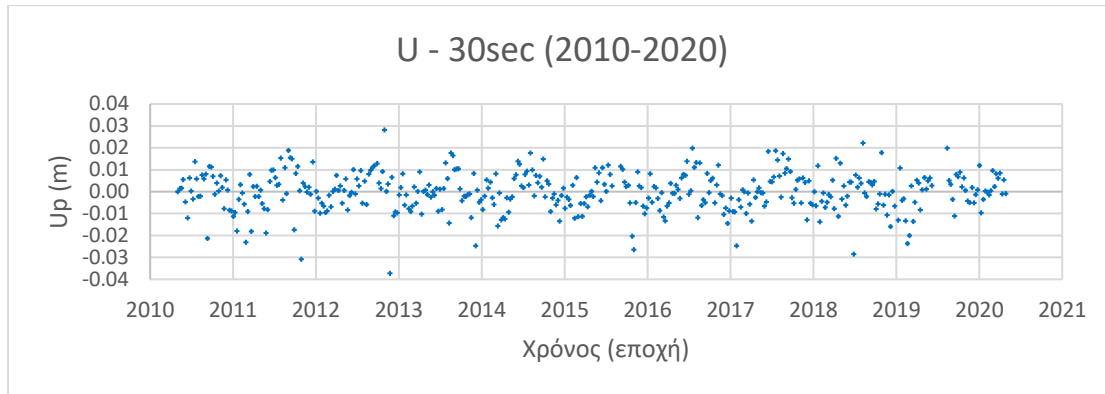


Διάγραμμα 3: Χρονοσειρά North για 30 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)

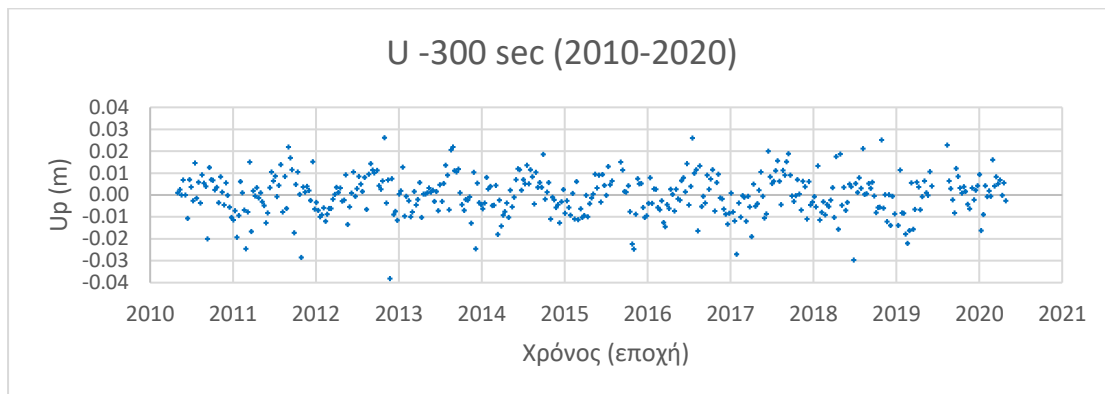


Διάγραμμα 4: Χρονοσειρά North για 300 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)





Διάγραμμα 5: Χρονοσειρά  $U_p$  για 30 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)



Διάγραμμα 6: Χρονοσειρά  $U_p$  για 300 sec για όλο το διάστημα παρατήρησης (2010-2020)

Στα διαγράμματα 1-4, που αφορούν τις συνιστώσες East και North, παρατηρείται ένα άλμα στις παρατηρήσεις το οποίο συμβαίνει κατά την εκδήλωση του σεισμού. Ακόμη, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, πριν το σεισμό η συμπεριφορά των παρατηρήσεων είναι γραμμική, η οποία όμως δεν διατηρείται μετά το γεγονός και αλλάζει σε λογαριθμική. Απομακρυνόμενοι χρονικά από το συγκεκριμένο γεγονός οι παρατηρήσεις σταθεροποιούνται και επιστρέφουν πάλι στη γραμμική τους μορφή. Εξαιτίας της ύπαρξης του άλματος στις παρατηρήσεις δεν δύναται να εξεταστεί η χρονοσειρά ενιαία και κρίθηκε απαραίτητη η διάκριση της σε δύο περιόδους, πριν και μετά τον εξεταζόμενο σεισμό (01/05/2010-23/05/2014 & 24/05/2014-24/04/2020).

Επιπλέον, η ύπαρξη του φαινομένου της μετασεισμικής παραμόρφωσης (post seismic deformation), το οποίο παρουσιάζεται για διάστημα δύο ετών από το γεγονός του σεισμού, οι αλλαγές στη συμπεριφορά των παρατηρήσεων αλλά και οι διαφοροποιήσεις στις ταχύτητες, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια, επιβάλλουν τη διάκριση της δεκαετίας και των χρονοσειρών, τελικά σε τρεις περιόδους:

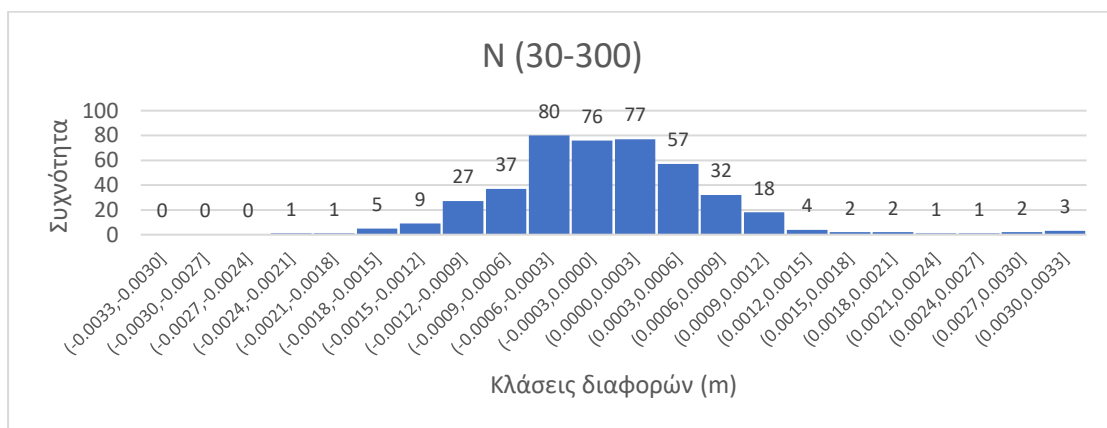
1. Περίοδος πριν τον αναφερόμενο σεισμό (01/05/2010-23/05/2014)
2. Περίοδος επηρεαζόμενη από μετασεισμική παραμόρφωση (24/05/2014-28/05/2016)
3. Περίοδος μετά το τέλος της μετασεισμικής παραμόρφωσης (29/05/2016-24/04/2020)

Η σύγκριση μεταξύ των δύο συχνοτήτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων δεν είναι δυνατή και ασφαλής συγκρίνοντας οπτικά τις δύο χρονοσειρές (30 sec, 300 sec) που απεικονίζουν τη δεκαετία. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκαν οι διαφορές τους ώστε να προκύψουν γραφήματα που να αποτυπώνουν την κατανομή τους. Για κάθε ημερήσια λύση αφαιρέθηκε

η κάθε συνιστώσα των 300 second από την αντίστοιχη των 30 second. Μέσω των διαφορών παράχθηκαν ιστογράμματα για κάθε συνιστώσα East, North, Up τα οποία παρουσιάζονται στα Διάγραμμα 7 - Διάγραμμα 9. Το διάστημα που αναφέρονται είναι σε βάθος δεκαετίας.



Διάγραμμα 7: Ιστόγραμμα συνιστώσας East



Διάγραμμα 8: Ιστόγραμμα συνιστώσας North



Διάγραμμα 9: Ιστόγραμμα συνιστώσας Up

Όπως φαίνεται και παραπάνω τα ιστογράμματα ακολουθούν μία σχεδόν κανονική συμμετρική κατανομή. Οι κλάσεις που απεικονίζονται αφορούν τις διαφορές των δύο συχνοτήτων, το μεγαλύτερο πλήθος των οποίων είναι της τάξης του δέκατου του mm. Το μεγαλύτερο εύρος διαφοράς εντοπίζεται στο ιστογράμμα της συνιστώσας Up, ενώ διαφορές mm εντοπίζονται και στις συνιστώσες East και North σε πολύ μικρότερο ποσοστό.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το ιστόγραμμα της συνιστώσας East το μεγαλύτερο πλήθος συχνοτήτων βρίσκεται σε κλάσεις της τάξης του δέκατου του mm, συνεπώς είναι άνευ σημασίας οι διαφορές. Υπάρχει ένα μικρό πλήθος συχνοτήτων, που φτάνει σε διαφορές 1,5 με 2,5 mm, οι οποίες θεωρητικά θα ήταν αξιόλογες, αλλά είναι πολύ μικρό. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν περίπου το 3% των συνολικών διαφορών και είναι στο σύνολο δέκα τρεις.

Στο ιστόγραμμα της συνιστώσας North οι περισσότερες συχνότητες βρίσκονται σε ένα εύρος που δεν ξεπερνά το 1 mm. Ωστόσο, οι διαφορές που ξεπερνάνε το mm και φτάνουν σχεδόν μέχρι και τα 3,5 mm αποτελούν περίπου το 7% του συνολικού δείγματος.

Το ιστόγραμμα της συνιστώσας Ur παρουσιάζει την πιο ομοιόμορφη και συμμετρική κατανομή. Όμως, επειδή πρόκειται για συνιστώσα υψομέτρου οι διαφορές μεταξύ των δύο συχνοτήτων 30 και 300 second είναι μεγαλύτερες. Το ποσοστό των συχνοτήτων που βρίσκεται κάτω από 1 mm αποτελεί το 31% του συνόλου, ενώ το 74,5% των παρατηρήσεων διαφέρουν το πολύ μέχρι 3 mm.

Με τον παραπάνω έλεγχο πραγματοποιήθηκε μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ τους χωρίς να μπορεί να προκύψει κάποιο συμπέρασμα σχετικά με το ποια συχνότητα είναι η καλύτερη και ακριβέστερη. Εφόσον υπάρχουν πλέον τρεις περίοδοι εξέτασης της χρονοσειράς, προσαρμόστηκε ευθεία (γραμμή τάσης) στις χρονοσειρές των περιόδων 2010-2014 και 2016-2020, οι οποίες συμπεριφέρονται γραμμικά και μπορούν να εξεταστούν με τον ίδιο τρόπο και παρουσιάζονται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας. Στα διαγράμματα εφαρμόστηκε η γραμμή τάσης, μαζί με την εξίσωση που τη χαρακτηρίζει και το δείκτη  $R^2$ , ο οποίος δηλώνει πόσο αξιόπιστη είναι η γραμμή τάσης που έχει εφαρμοστεί. Για να είναι αποδεκτή μία γραμμή τάσης πρέπει η τιμή το  $R^2$  να είναι ίση ή κοντά στο 1. Ταυτόχρονα, υπολογίστηκαν και στατιστικοί δείκτες για τις προαναφερθείσες περιόδους που αφορούν τα residuals (Πίνακας 7 - Πίνακας 8). Για την καλύτερη σύγκριση των συχνοτήτων υπολογίστηκαν οι εξής δείκτες:

- $R^2$
- Τυπική απόκλιση (St. Dev.)
- Ελάχιστο (Min)
- Μέγιστο (Max)
- Εύρος (Range)

Πίνακας 7: Στατιστικά πριν το σεισμό (2010-2014)

	E		N		U	
	30	300	30	300	30	300
$R^2$	0.9898	0.9894	0.9240	0.9113	0.0029	0.0019
Τυπ. Αποκ. (m)	0.00261	0.00268	0.00340	0.00370	0.00911	0.00926
Εύρος (m)	0.0188	0.0185	0.0268	0.0316	0.0654	0.0643

Πίνακας 8: Στατιστικοί δείκτες μετά το σεισμό (2016-2020)

	E		N		U	
	30	300	30	300	30	300
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9895	0.9892	0.9141	0.9092	0.0011	0.0020
<b>Τυπ. Αποκ. (m)</b>	0.00316	0.00319	0.00405	0.00405	0.00869	0.00952
<b>Εύρος (m)</b>	0.02320	0.02315	0.03080	0.03081	0.0506	0.0555

Το  $R^2$  προέκυψε από τις ευθείες που προσαρμόστηκαν στις χρονοσειρές των επιμέρους περιόδων 2010-2014 και 2016-2020. Όπως φαίνεται και από τα αριθμητικά δεδομένα, και στους δύο πίνακες ο δείκτης  $R^2$  είναι πιο βελτιωμένος στη συχνότητα των 30 second. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στη διαφορά των δύο δεικτών στη συνιστώσα N (Πίνακας 7), η οποία είναι 13 mm. Οι υπόλοιπες διαφορές που προέκυψαν στο συγκεκριμένο δείκτη είναι της τάξης του δέκατου του mm, άρα είναι άνευ σημασίας. Όσον αφορά το  $R^2$  στη συνιστώσα  $U_p$  και στις δύο περιόδους, είναι πολύ κοντά στο μηδέν ώστε να αξιολογηθεί. Για να θεωρηθεί ότι υπάρχει εφαρμογή της γραμμής τάσης στα δεδομένα πρέπει το  $R^2$  να είναι μεγαλύτερο του 0.7.

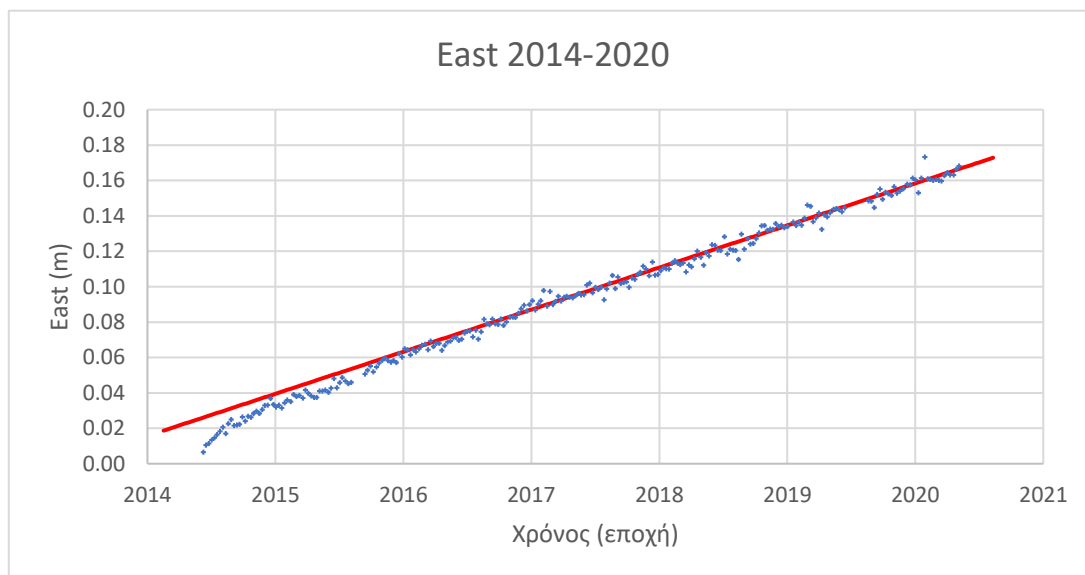
Ο δείκτης της τυπικής απόκλισης (Standard deviation) είναι ένα μέτρο διασποράς που εκφράζεται με την ίδια μονάδα όπως η μεταβλητή, στην προκειμένη περίπτωση σε m και υπολογίζει το ποσό της μεταβολής ή της διασποράς ενός συνόλου τιμών. Μία χαμηλή τιμή τυπικής απόκλισης δηλώνει πως οι τιμές είναι κοντά στο μέσο όρο, ενώ αντίθετα η μεγάλη τυπική απόκλιση δηλώνει πως οι τιμές εκτείνονται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών. Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση και στις δύο περιόδους παρουσιάζεται στη συνιστώσα  $U_p$  των 300 second. Η διαφορά που υπάρχει με τις άλλες δύο συνιστώσες είναι μεγάλη, γεγονός που δικαιολογείται και από τη συμπεριφορά της χρονοσειράς στο Διάγραμμα 5 και Διάγραμμα 6, καθώς η μορφή τους δεν είναι ομοιόμορφη.

Άλλος ένας δείκτης που τονίζει διαφορές είναι ο δείκτης του εύρους. Και στους δύο πίνακες δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στο εύρος, δεδομένο που συμφωνεί με τα παραπάνω στατιστικά. Η μεγαλύτερη διαφορά που προκύπτει μεταξύ 30 και 300 second είναι στη συνιστώσα N της περιόδου 2010-2014 και είναι της τάξης των 5 mm.

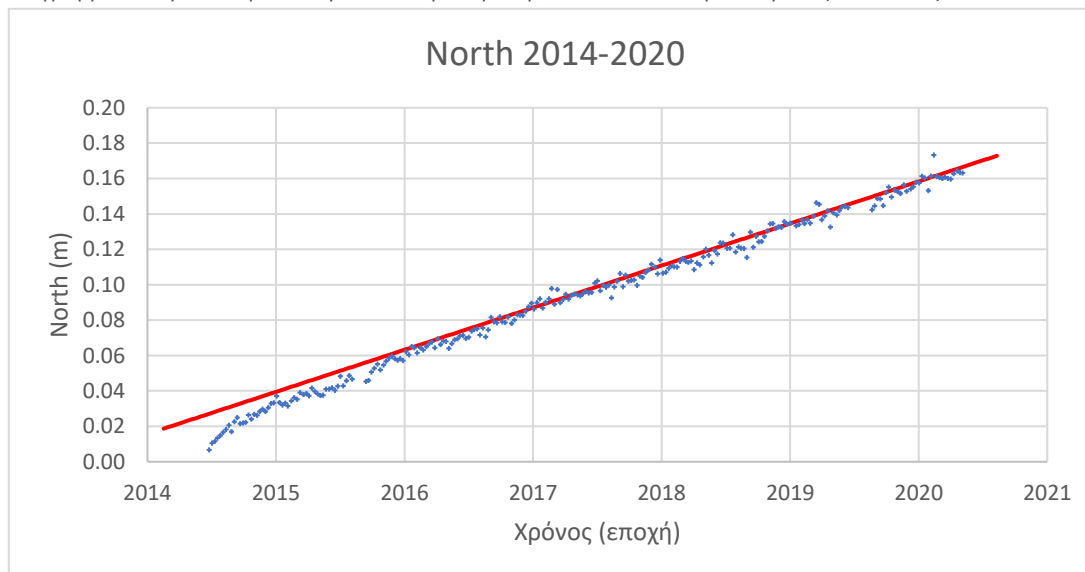
Συμπερασματικά, από τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο συχνοτήτων, 30 και 300 second, διαπιστώνεται πως δεν είναι κρίσιμη η βελτίωση που προσφέρει η πρώτη. Παρόλα αυτά, επειδή υπάρχει και αποζητούνταν η μέγιστη ακρίβεια, η μελέτη συνεχίζεται με τις παρατηρήσεις των 30 second και στο εξής όλα τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα αναφέρονται σε αυτές. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο πως ο χρόνος επίλυσης και ο υπολογιστικός φόρτος των 30 second είναι ο διπλάσιος σε σχέση με τα 300. Πιο συγκεκριμένα, σε υπολογιστή με επεξεργαστή i5 και RAM 16GB, όπου έγινε η επεξεργασία, η επίλυση μίας ημέρας διαρκούσε 40 δευτερόλεπτα για τα 30 second και το μισό χρόνο για τα 300 second, δηλαδή 20 δευτερόλεπτα.

3.6. Μετασεισμική παραμόρφωση και χρονοσειρές (Post seismic deformation)  
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά το διάστημα 05/2014 – 05/2016 παρατηρείται στην περιοχή το φαινόμενο της μετασεισμικής παραμόρφωσης (post seismic deformation) το οποίο επηρεάζει τις παρατηρήσεις. Εξαιτίας του φαινομένου η συγκεκριμένη περίοδος πρέπει να μελετηθεί και να αξιολογηθεί διαφορετικά.

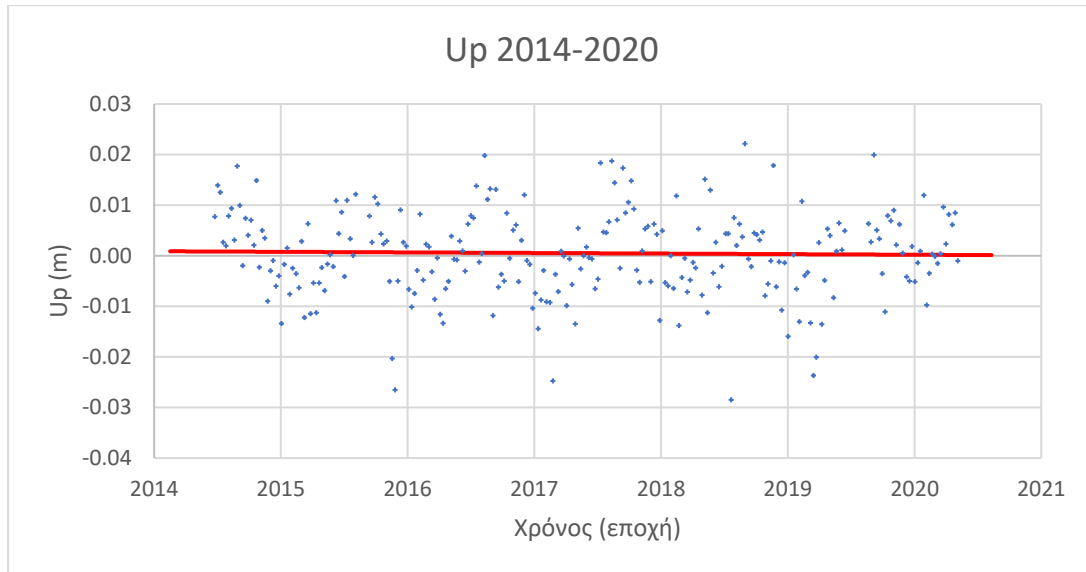
Στα Διάγραμμα 11 – Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η χρονοσειρά μετά το σεισμό 05/2014 – 04/2020 και η γραμμή τάσης που είχε προκύψει από την περίοδο 2016-2020.



Διάγραμμα 11: Χρονοσειρά East για 30 sec για την περίοδο από το σεισμό και μετά (2014-2020)



Διάγραμμα 10: Χρονοσειρά North για 30 sec για την περίοδο από το σεισμό και μετά (2014-2020)



Διάγραμμα 12: Χρονοσειρά  $U_p$  για 30 sec για την περίοδο από το σεισμό και μετά (2014-2020)

Η εφαρμογή της ευθείας και στα διαγράμματα East και North είναι αρκετά καλή την περίοδο μετά το 2016, ενώ αρχίζει να αποκλίνει σημαντικά όσο πλησιάζει τον μελετώμενο σεισμό (05/2014). Η συγκεκριμένη απόκλιση παρατηρείται καθώς στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο οι παρατηρήσεις έχουν λογαριθμική συμπεριφορά, οπότε πρέπει να εκφραστούν με μία λογαριθμική συνάρτηση. Όσον αφορά το διάγραμμα  $U_p$ , επειδή το ρήγμα που μελετάται είναι οριζόντια ολίσθησης (strike slip) δεν αναμένεται κατακόρυφη μετατόπιση στην περιοχή. Για το λόγο αυτό η γραμμή τάσης δεν υπάρχει διαφορά μετά το σεισμό στη συγκεκριμένη συνιστώσα.

Προκειμένου να εφαρμοστεί η καταλληλότερη λογαριθμική γραμμή οι μετρήσεις για την περίοδο που επηρεάζεται από το σεισμό εισήχθησαν στο λογισμικό MATLAB και την εφαρμογή curve fitting tool. Μέσω προσεγγιστικών τιμών υπολογίστηκε η βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής στα δεδομένα, η οποία περιγράφεται από τον παρακάτω γενικό τύπο (Kreemer, et al., 2006):

$$u(t) = c + a * \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_{ln}}\right) \quad (14)$$

Όπου,

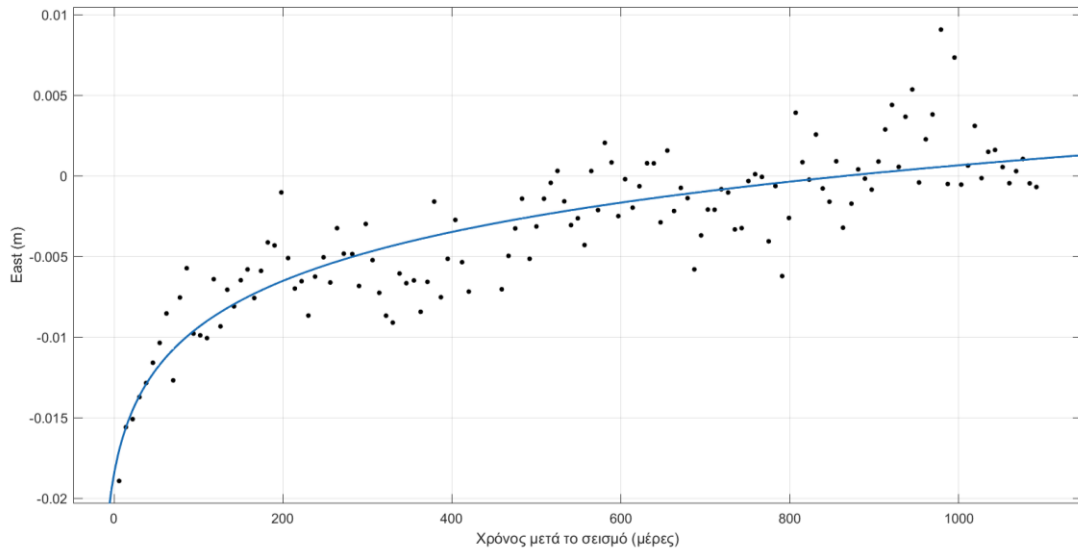
$t$  = χρόνος από το συμβάν

$u(t)$  = συνιστώσα East/North

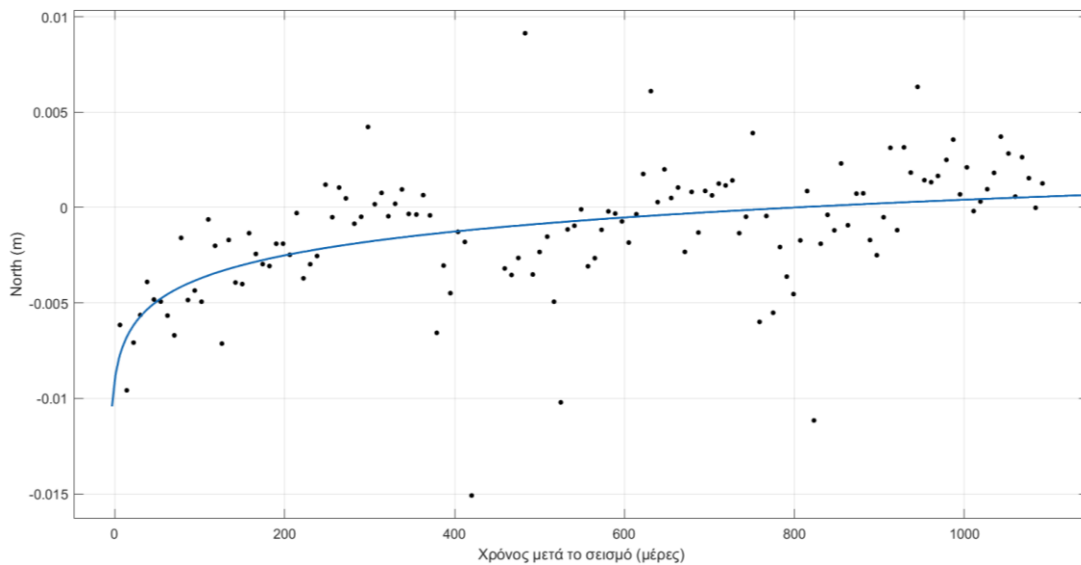
$c$  = συν-σεισμική μετατόπιση

$a$  = το πλάτος που σχετίζεται με τη ρήξη (decay)

$\tau_{ln}$  = λογαριθμικός χρόνος ρήξης (logarithmic decay time)



Διάγραμμα 13: Χρονοσειρά East για 30 sec για την περίοδο που επηρεάζονται οι παρατηρήσεις από το σεισμό (2014-2017)



Διάγραμμα 14: Χρονοσειρά North για 30 sec για την περίοδο που επηρεάζονται οι παρατηρήσεις από το σεισμό (2014-2017)

Στα Διάγραμμα 13 - Διάγραμμα 14 φαίνεται η εξέλιξη της μετατόπισης στις συνιστώσες East και North, αντίστοιχα. Στις μέρες αμέσως μετά την εκδήλωση του σεισμού παρατηρείται μία έντονη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ενώ με την πάροδο του χρόνου το χρονικό διάστημα για να πραγματοποιηθεί μία μετατόπιση αντίστοιχου μήκους αυξάνεται. Συγκεκριμένα, με βάση την καμπύλη εφαρμογής, στη συνιστώσα East τις πρώτες 200 μέρες μετά το σεισμό υπάρχει μετατόπιση 13 mm, ενώ στο επόμενο διάστημα η μετατόπιση κατά East φαίνεται να φθίνει σε ρυθμό. Αντίστοιχα, στη συνιστώσα North τις πρώτες 200 μέρες η συνολική μετατόπιση είναι 7 mm. Η εξέλιξη της μετατόπισης φαίνεται και αριθμητικά στον Πίνακας 9.

Πίνακας 9: Εξέλιξη μετατόπισης μετά την εκδήλωση του σεισμού

	<b>Μέρα 0</b>	<b>Μέρα 200</b>
<b>East (m)</b>	-0.02	-0.007
<b>North (m)</b>	-0.01	-0.003

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες που εμφανίζονται στα διαγράμματα είναι οι παρακάτω με διάστημα εμπιστοσύνης 95% και  $\sigma \approx 2.5$  mm :

$$East = -0.01847 + 0.004632 * \ln\left(1 + \frac{t}{16.39}\right) \quad (15)$$

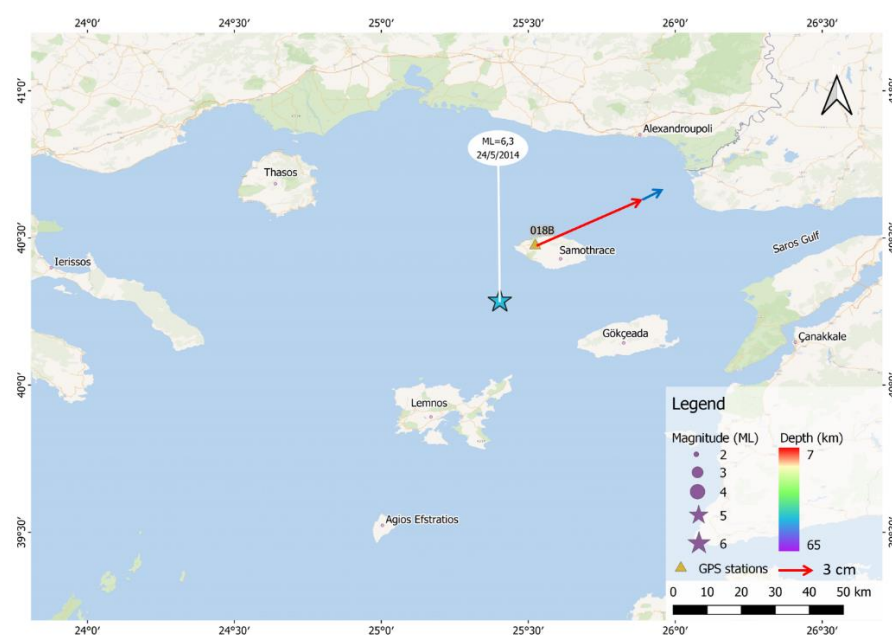
$$North = -0.008981 + 0.001839 * \ln\left(1 + \frac{t}{6.095}\right) \quad (16)$$

Από τις εξισώσεις 15 και 16 και τον όρο  $c$  προκύπτει ότι η συνολική μετατόπιση λόγω μετασεισμικής παραμόρφωσης είναι 1,8 cm στη συνιστώσα East και σχεδόν 1 cm στη συνιστώσα North. Τα στατιστικά εφαρμογής των καμπυλών παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Στην συνιστώσα North παρατηρείται αρκετά μικρότερο  $R^2$  και μεγαλύτερο RMSE, διότι η μετασεισμική παραμόρφωση επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη συνιστώσα East, ενώ περιέχει και περισσότερο θόρυβο.

Πίνακας 10: Στατιστικά εφαρμογής λογαριθμικών καμπυλών

	<b><math>R^2</math></b>	<b>RMSE (m/y)</b>
<b>East</b>	0.7443	0.00236
<b>North</b>	0.2562	0.002922

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται γραφικά η συν-σεισμική και η μετασεισμική παραμόρφωση του σταθμού 018B της Σαμοθράκης. Η συν-σεισμική παραμόρφωση που υπολογίστηκε και διακρίνεται στο χάρτη με κόκκινο βέλος είναι 9 cm κατά East και 4 cm κατά North. Αντίστοιχα, με μπλε βέλος φαίνεται η μετασεισμική παραμόρφωση υπολογίστηκε σε 2 cm κατά East και 1 cm κατά North.



Εικόνα 33: Συν-σεισμική (κόκκινο) και μετασεισμική (μπλε) παραμόρφωση στο σταθμό της Σαμοθράκης



### 3.7. Ταχύτητες

Πέραν του προσδιορισμού της μετασεισμικής παραμόρφωσης ένας άλλος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η εξέταση των ταχυτήτων πριν και μετά το σεισμό της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014. Για το λόγο αυτό οι χρονοσειρές των παρατηρήσεων διακρίθηκαν σε δύο περιόδους με βάση την ημερομηνία της κύριας σεισμικής δόνησης. Έτσι τα διαστήματα που προκύψανε είναι:

- α) 01/05/2010 - 22/05/2014
- β) 23/05/2014 - 24/4/2020

Το διάστημα α μελετήθηκε σε παραπάνω ενότητες και φάνηκε πως η ταχύτητά του κατά East, North, Up είναι γραμμική, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις των διαγραμμάτων Διάγραμμα 15 - Διάγραμμα 26 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ για τις δύο συχνότητες. Συγκρίνοντάς τις εντοπίστηκε ταύτιση σε επίπεδο της τάξης δέκατου του mm το χρόνο ( $10^{-4}$  m/year) επομένως δεν υπάρχει ανάγκη ξεχωριστής εξέτασης των δύο συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων 30 και 300 sec εντοπίζεται στη συνιστώσα Up και είναι ίση με  $1 \times 10^{-4}$ .

Κατά την εξέταση του διαστήματος β διαπιστώθηκε ύπαρξη φαινομένου μετασεισμικής παραμόρφωσης (PSD) και λόγω αυτού, το χρονικό διάστημα το οποίο επηρεάζεται από το φαινόμενο εξαιρείται της γραμμικής μελέτης. Κατά την περίοδο 2016-2020 φαίνεται πως η ταχύτητα έχει σταθεροποιηθεί και επιστρέφει σε γραμμική κίνηση. Τα διαστήματα προς εξέταση μετά τις αλλαγές που έγιναν στη μετασεισμική περίοδο είναι τα εξής:

- α) 01/05/2010 - 22/05/2014
- β) 24/05/2014 - 28/05/2016
- γ) 29/05/2016 - 24/04/2020

Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει τις γραμμικές ταχύτητες πριν και μετά το σεισμό, όπως αυτές έχουν προκύψει από τις σχετικές χρονοσειρές (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ). Εφόσον οι χρονοσειρές περιγράφονται από γραμμική εξίσωση η ταχύτητα των παρατηρήσεων είναι σταθερή τόσο πριν το σεισμό, αλλά και μετά το διάστημα της μετασεισμικής μετατόπισης, όπου η περιοχή ισορροπεί και η ταχύτητα σταθεροποιείται ξανά, όχι όμως στα ίδια επίπεδα με πριν. Όσον αφορά τη συνιστώσα East παρατηρείται μία αύξηση στην ταχύτητα μεταξύ των δύο περιόδων της τάξης των 2 mm/y, ενώ αντίθετα στη συνιστώσα North υπάρχει επιβράδυνση ενός δέκατου του mm αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες διαφορές στις συνιστώσες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη διαφοροποίηση της κίνησης της περιοχής μετά την εκδήλωση του μελετώμενου σεισμού. Λόγω της μεταβαλλόμενης ταχύτητας δεν είναι εφικτό να παρουσιαστούν αποτελέσματα ταχύτητας για την περίοδο 2014-2016, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Γραμμικές ταχύτητες EN για τις περιόδους πριν και μετά την 24η Μαΐου 2014

	<b>E (m/y)</b>	<b>N (m/y)</b>
<b>2010-2014</b>	0,0218	0,0101
<b>2016-2020</b>	0,0238	0,0100
<b>Μεταβολή</b>	9,2%	-0,1%

Ένας αξιόπιστος δείκτης κατανόησης της διαφοράς της ταχύτητας και της εξέλιξης της μετατόπισης για τα δύο διαστήματα είναι αυτός της μεταβολής της ταχύτητας. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίστηκε είναι ο παρακάτω:

$$\text{Μεταβολή (\%)} = \frac{\text{Ταχύτητα (2016 - 2020)} - \text{Ταχύτητα (2014 - 2016)}}{\text{Ταχύτητα (2014 - 2016)}} * 100 \quad (17)$$

Υπολογίζοντας τη μεταβολή της ταχύτητας μετά το σεισμό εντοπίζονται αλλαγές σε όλες τις συνιστώσες. Η μεταβολή που παρατηρείται στη συνιστώσα East ως ποσοστό είναι μικρή αλλά στην πραγματικότητα είναι αρκετά αισθητή. Το ποσοστό της που πλησιάζει το 10% είναι λογικό, διότι η κατεύθυνση της τάφρου, και συνεπώς των ρηγμάτων που προκάλεσαν τον σεισμό, είναι στη διεύθυνση Ανατολή – Δύση. Αντίθετα, στη συνιστώσα North παρατηρείται σχεδόν μηδενική μεταβολή καθώς επηρεάζεται λιγότερο από τη σεισμική δόνηση. Αναφορικά με τη συνιστώσα Up δεν απεικονίζεται στον πίνακα, καθώς η διαφορά πριν (-0,0004 m/y) και μετά το σεισμό (-0,0001 m/y) είναι εντός του διαστήματος αβεβαιότητας εκτίμησης της ταχύτητας και ουσιαστικά θεωρείται σταθερή.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

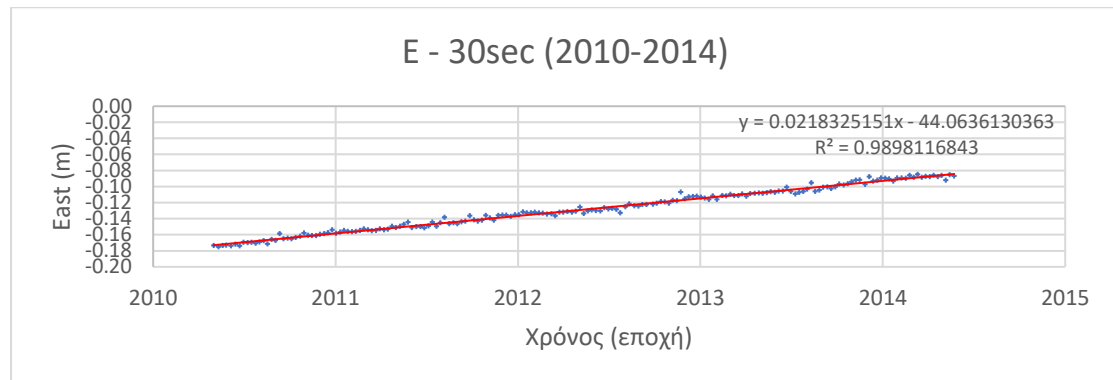
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η κίνηση και η εξέλιξη της μετατόπισης του μόνιμου σταθμού της Σαμοθράκης έπειτα από το μεγάλο σεισμό της 24<sup>ης</sup> Μαΐου 2014 με χρήση της μεθόδου PPP. Κατά την μελέτη των παρατηρήσεων GPS σε βάθος δεκαετίας διαπιστώθηκε στην περιοχή μετά το συγκεκριμένο σεισμό η ύπαρξη φαινομένου μετασεισμικής παραμόρφωσης. Γενικότερα, η μετασεισμική παραμόρφωση είναι ένα σπάνιο φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε μεγάλους σεισμούς και έχει εντοπιστεί λίγες φορές στον Ελλαδικό χώρο. Η ύπαρξη του συγκεκριμένου φαινομένου καθιστά ακόμα πιο ενδιαφέρουσα τη μελέτη της συγκεκριμένης σεισμικής δόνησης στο Βόρειο Αιγαίο.

Το ρήγμα του Βόρειου Αιγαίου όντας οριζόντιας ολίσθησης προκάλεσε αισθητές αλλαγές στις συνιστώσες East και North. Η συνιστώσα Ur είχε τόσο μικρή μεταβολή που πρακτικά η ταχύτητά της θεωρείται ότι παρέμεινε σταθερή. Η κίνηση πριν το σεισμό ήταν γραμμική με ταχύτητα μετατόπισης στο ITRF2014 ίση με 0,0218 m/y κατά East και 0,0101 κατά North. Ο σεισμός εκδηλώθηκε στις 24 Μαΐου 2014, όπου και ξεκίνησε διαφοροποίηση στο ρυθμό της μετατόπισης και στην ταχύτητα. Το φαινόμενο της μετασεισμικής παραμόρφωσης φαίνεται πως είχε επίδραση για περίπου δύο χρόνια μετά το σεισμό ενώ η συνολική μετατόπιση που φαίνεται να υπάρχει στο συγκεκριμένο διάστημα είναι 21mm κατά East και 11mm κατά North. Διαπιστώνεται λοιπόν πως στο ίδιο χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκε σχεδόν διπλάσια μετατόπιση στη συνιστώσα East συγκριτικά με τη North. Όπως αναφέρθηκε, η μετασεισμική παραμόρφωση διήρκεσε περίπου δύο χρόνια και μετά η περιοχή φαίνεται να ξεκίνησε να ισορροπεί και να αποκτά πρακτικά ξανά γραμμική ταχύτητα. Με τη μελέτη και σύγκριση των ταχυτήτων που πραγματοποιήθηκε φάνηκε πως παρόλο που η περιοχή έχει επιστρέψει στην προηγούμενη κίνησή της οι ταχύτητες δεν είναι ίσες με αυτές που είχε πριν το σεισμό. Πιο αναλυτικά, οι νέες ταχύτητες που προσδιορίστηκαν είναι 0,0238 m/y κατά East και 0,0100 κατά North m/y που αντιστοιχούν σε αύξηση της ταχύτητας κατά 2mm/y κατά East. Η μεταβολή της ταχύτητας κατά North είναι στατιστικά μη σημαντική (μείωση 0,1mm/yr).

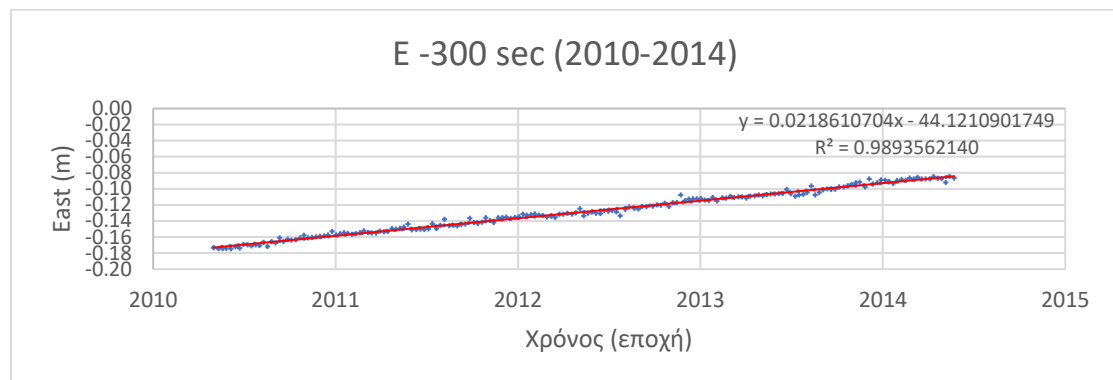
Επομένως, φαίνεται πως ο συγκεκριμένος μεγάλος σεισμός δεν μετέβαλλε απλά για κάποιο διάστημα την ταχύτητα μετατόπισης της περιοχής, αλλά άλλαξε και την ταχύτητα μετατόπισης μετά την εξασθένιση του φαινομένου.

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας εργασίας θα είχε ενδιαφέρον να ερευνηθούν και άλλοι κοντινοί σταθμοί του δικτύου GPS, όπως της Λήμνου και της Αλεξανδρούπολης, προκειμένου να ερευνηθεί αν και πόσο επηρεάστηκαν από το σεισμό της 24<sup>ης</sup> Μαΐου και το φαινόμενο της μετασεισμικής παραμόρφωσης. Ακόμη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η επανάληψη της ανάλυσης με άλλα προγράμματα που υλοποιούν PPP, προκειμένου να γίνει σύγκριση και να εντοπιστεί αν υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα.

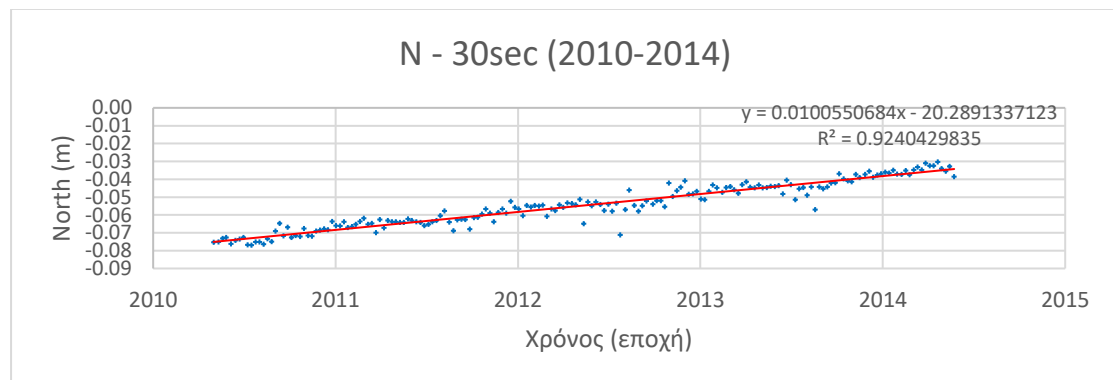
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



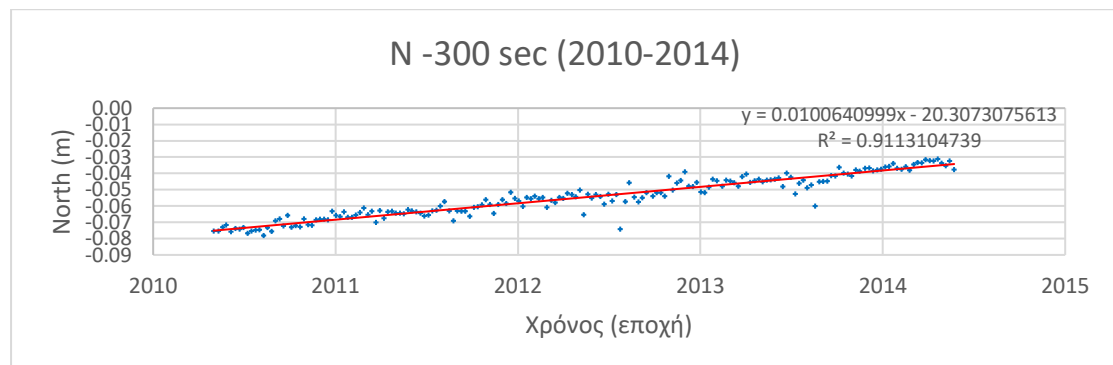
Διάγραμμα 15: Χρονοσειρά East για 30 sec για την περίοδο πριν το σεισμό (2010-2014)



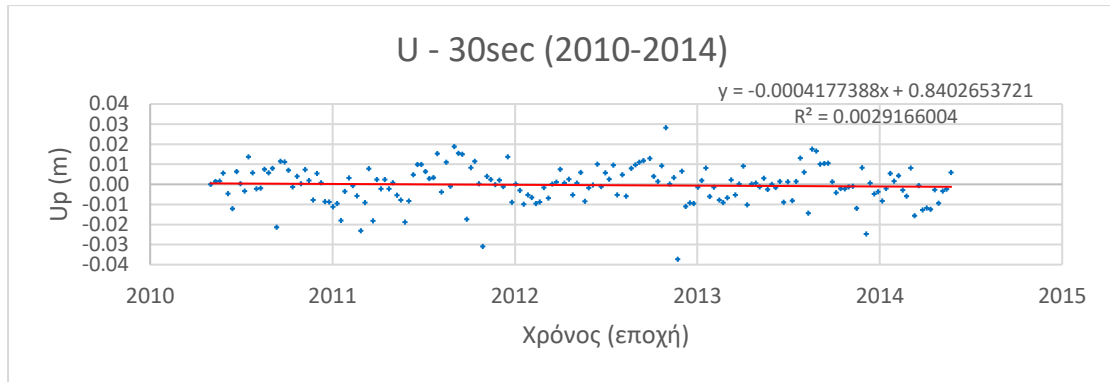
Διάγραμμα 16: Χρονοσειρά East για 300 sec για την περίοδο πριν το σεισμό (2010-2014)



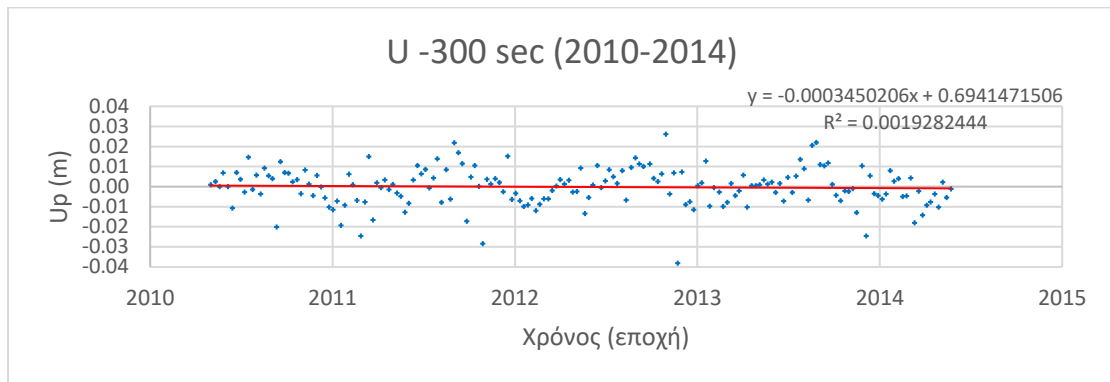
Διάγραμμα 17: Χρονοσειρά North για 30 sec για την περίοδο πριν το σεισμό (2010-2014)



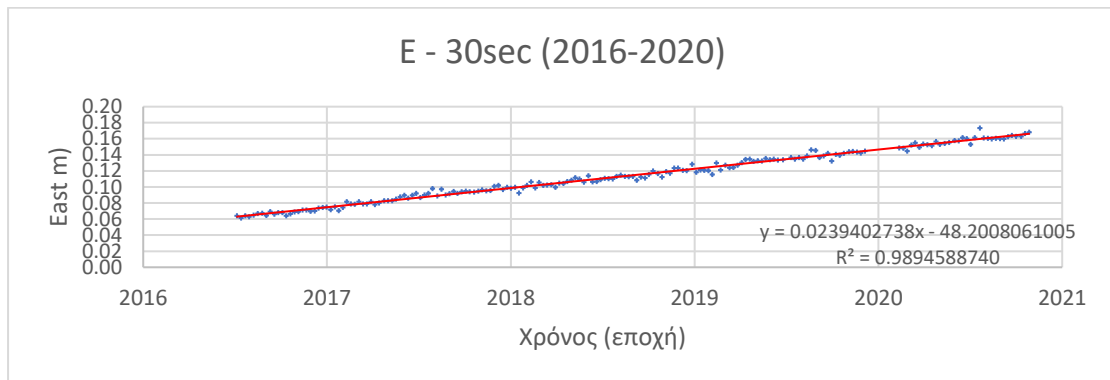
Διάγραμμα 18: Χρονοσειρά North για 300 sec για 300 sec για την περίοδο πριν το σεισμό (2010-2014)



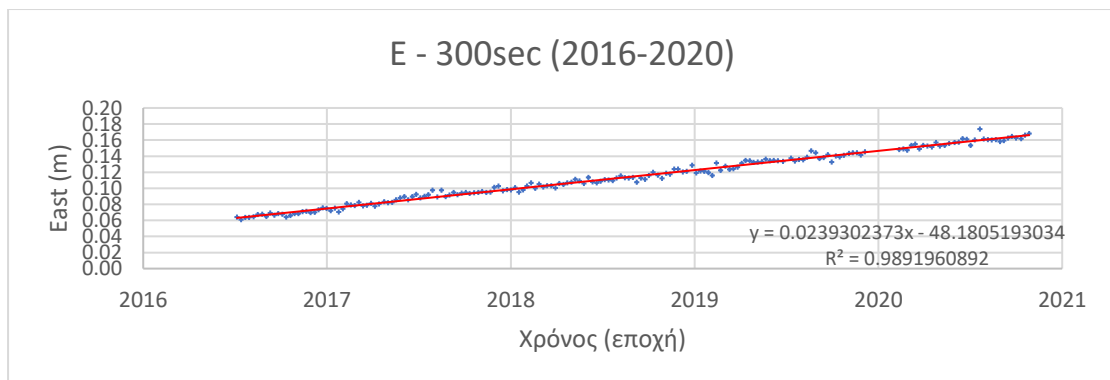
Διάγραμμα 19: Χρονοσειρά  $U_p$  για 30 sec για το διάστημα πριν το σεισμό (2010-2014)



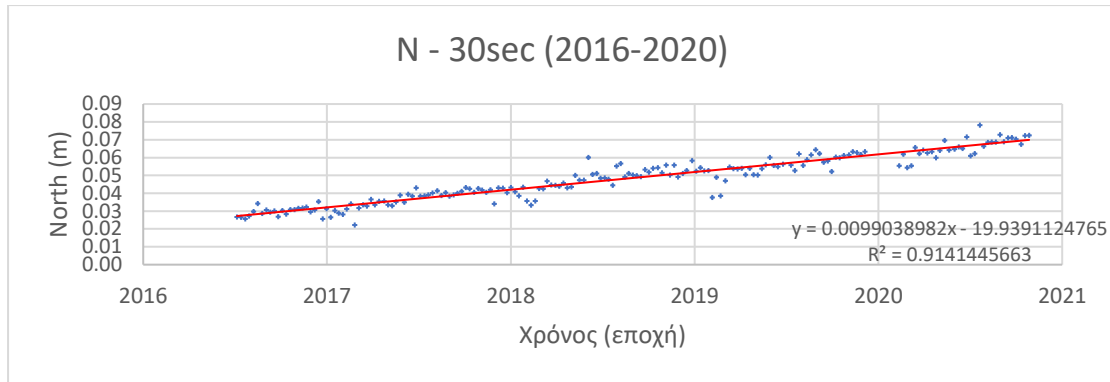
Διάγραμμα 20: Χρονοσειρά  $U_p$  για 300 sec για το διάστημα πριν το σεισμό (2010-2014)



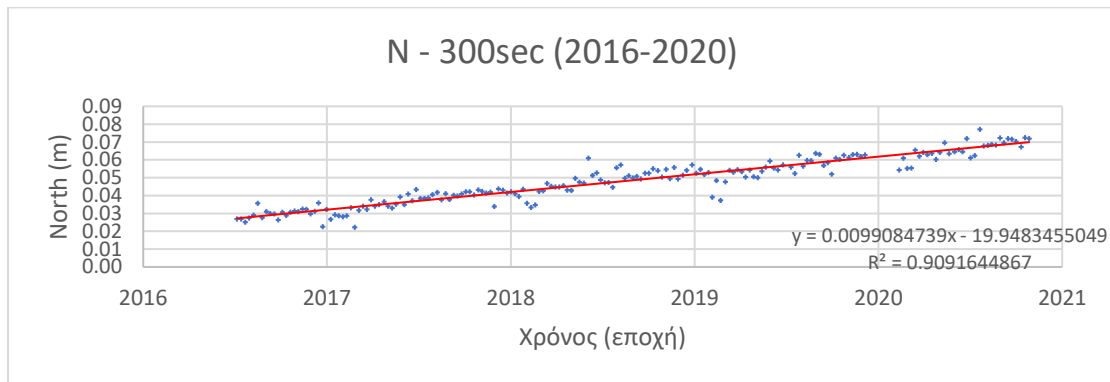
Διάγραμμα 21: Χρονοσειρά East για 30 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)



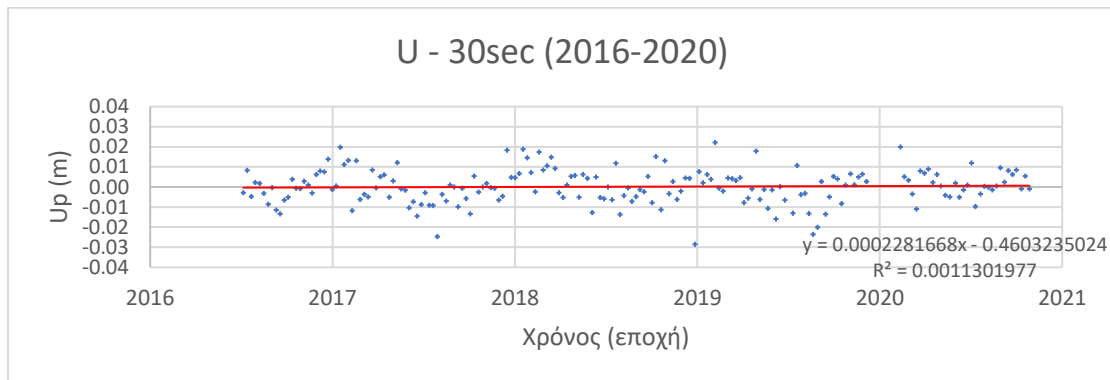
Διάγραμμα 22: Χρονοσειρά East για 300 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)



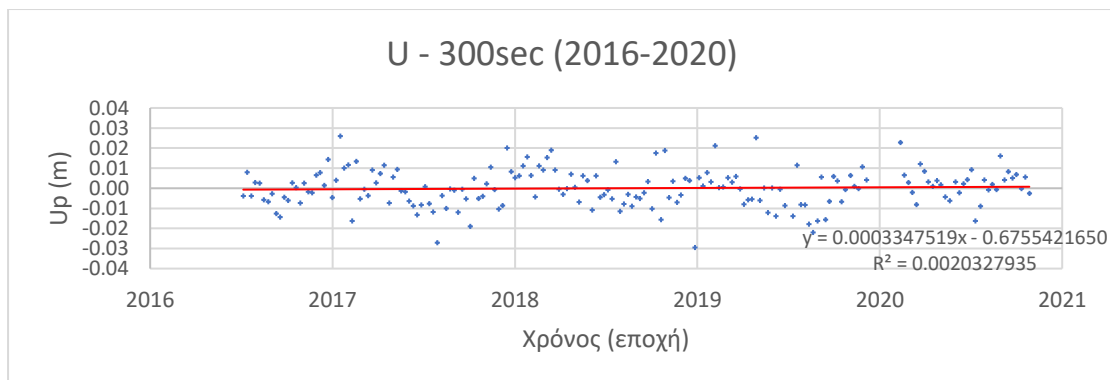
Διάγραμμα 23: Χρονοσειρά North για 30 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)



Διάγραμμα 24: Χρονοσειρά North για 300 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)



Διάγραμμα 25: Χρονοσειρά Up για 30 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)



Διάγραμμα 26: Χρονοσειρά Up για 300 sec για την περίοδο μετά το σεισμό (2016-2020)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Altamimi, Z., Reischung, P., Métivier, L. & Collilieux, X., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 4 Αυγούστου, Issue 121, p. 6109–6131.
- Caputo, R., Chatzipetros, A., Pavlides, S. & Sboras, S., 2013. The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece.. *Annals of Geophysics*, 19 Ιανουαρίου, Issue 55, pp. 859-894.
- Cook, T., 2019. Variations in Creep Along One of Earth’s Most Active Faults. *Eos*, 6 June, Τόμος 100.
- EUREF, 2011. *EUREF Permanent Network*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [http://www.euref.eu/euref\\_epn.html](http://www.euref.eu/euref_epn.html)  
[Πρόσβαση 7 10 2022].
- Foumelis, M. και συν., 2021. On rapid multidisciplinary response aspects for Samos 2020 M7.0 earthquake. *Acta Geophysica*, 28 Μαρτίου, Issue 69, p. 1025–1048.
- Gianniou, M., 2011. *Detecting permanent displacements caused by earthquakes using data from the HEPOS network*. s.l., Conference: EUREF Symposium 2011.
- Golriz, D., Bock, Y. & Xu, X., 2021. Defining the coseismic phase of the crustal deformation cycle with seismogeodesy.. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 24 Σεπτεμβρίου.
- JPL, 2022. *gd2e Help*. USA: NASA Jet Propulsion Laboratory .
- Keep Talking Greece, 2018. *Northern Aegean seabed conceals 19 active seismic faults, scientists say*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.keeptalkinggreece.com/2018/11/09/aegean-fault-lines-earthquakes-greece/>  
[Πρόσβαση 2 5 2022].
- Kouba, J., 2003. *A GUIDE TO USING INTERNATIONAL GPS SERVICE (IGS) PRODUCTS*, Ottawa: Natural Resources Canada.
- Kouba, J. & Héroux, P., 2001. Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, pp. 12-28.
- Kreemer, C., Blewitt, G. & Maerten, F., 2006. Co- and postseismic deformation of the 28 March 2005 Nias Mw 8.7 earthquake. *Geophysical Research Letters*, 6 April.
- L' Annunziata, M. F. & Kessler, M. J., 2003. LIQUID SCINTILLATION ANALYSIS: PRINCIPLES AND PRACTICE. In: *Handbook of Radioactivity Analysis (Second Edition)*. s.l.:Academic Press, pp. 347-535.
- Lazos, I. και συν., 2021. Geodetic analysis of the tectonic crustal deformation pattern in the North Aegean Sea, Greece. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 13 Φεβρουαρίου.
- Mai, T., 2017. *NASA*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
[https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS\\_History.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html)  
[Πρόσβαση 12 3 2022].

- NASA, 2022. *GipsyX*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>  
[Πρόσβαση 4 6 2022].
- National Observatory of Athens, 2018. *NOANET*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <http://geodesy.gein.noa.gr:8000/nginfo/intro/>  
[Πρόσβαση 9 10 2022].
- Papanikolaou, D. και συν., 2019. Active tectonics and seismic hazard in Skyros Basin, North Aegean Sea, Greece. *Marine Geology*, Issue 407, pp. 94-110.
- Pavlidis, S. B. & Tranos, M. D., 1991. Structural characteristics of two strong earthquakes in the North Aegean: ierissos (1932) and Agios Efstratios (1968). *Journal of Structural Geology*, pp. 205-214.
- Pikridas, C. και συν., 2016. *MONITORING SEISMIC DISPLACEMENTS USING GNSS DATA WITH PPP METHOD*. Thessaloniki, Bulletin of the Geological Society of Greece, pp. 1563-1569.
- Royal Observatory of Belgium, 2023. *EUREF Permanent GNSS Network*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <http://epncb.oma.be/>  
[Πρόσβαση 7 10 2022].
- Sakellariou, D. & Tsampouraki-Kraounaki, K., 2018. *Plio-Quaternary extension and strike-slip tectonics in the Aegean..* [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://www.researchgate.net/publication/325180475\\_Plio-Quaternary\\_extension\\_and\\_strike-slip\\_tectonics\\_in\\_the\\_Aegean](https://www.researchgate.net/publication/325180475_Plio-Quaternary_extension_and_strike-slip_tectonics_in_the_Aegean)  
[Πρόσβαση 30 1 2022].
- Saltogianni, V. και συν., 2015. Fault slip source models for the 2014 Mw 6.9 Samothraki-Gökçeada earthquake (North Aegean Trough) combining geodetic and seismological observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), p. 8610– 8622.
- Suckale, J. και συν., 2007. Imaging the Southern Hellenic Subduction Zone Through Migration of Scattered Teleseismic Body Waves. *AGU Fall Meeting Abstracts*, Ιανουάριος.
- Swiss Service Seismological, 2023. *Causes of Earthquakes In Europe*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/things-to-know/causes-of-earthquakes/europe/>  
[Πρόσβαση 30 4 2022].
- Takehide , N. & Kazuro, H., 1997. GPS observations of postseismic deformation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*,, 1 Μαρτίου, Τόμος 24, pp. 503-506.
- USGS, 2014. *Understanding plate motions*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://pubs.usgs.gov/publications/text/understanding.html>  
[Πρόσβαση 30 4 2022].
- USGS, 2022. *What is a fault and what are the different types?*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.usgs.gov/faqs/what-fault-and-what-are-different-types#faq>  
[Πρόσβαση 30 1 2022].
- Wang, M. et al., 2011. *Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System*, s.l.: s.n.



Βήγα, Μ., 2021. *ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: "Σεισμικά ρήγματα του βορειοελλαδικού χώρου και ο ρόλος τους στην εκπαίδευση"*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://hellanicus.lib.aegean.gr/handle/11610/22751>

[Πρόσβαση 18 2 2023].

Δεσποτάκης, Β., 2010. *ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TD103/2.%20%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%98%CE%95%CE%A4%CE%91%20%CE%92%CE%9F%CE%97%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91/GPS/4.pdf>

[Πρόσβαση 17 3 2022].

Ελληνικό Κτηματολόγιο, 2022. *Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού - HEPOS*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ktimatologio.gr/el/e-services/elliniko-systima-entopismou-hepos>

[Πρόσβαση 17 3 2022].

Κίλιας, Α., 2021. *Εισαγωγή στην τεκτονική γεωλογία*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.geo.auth.gr/537/index.htm>

[Πρόσβαση 30 1 2022].

ΜΠΑΡΑΚΟΥ, Θ. Α., 2000. *ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ*. ΑΘΗΝΑ: ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΕΚΠΑ.

ΟΑΣΠ, 2014. *Λήμνος, 24/5/2014*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.oasp.gr/node/2815>

[Πρόσβαση 11 2 2023].

Παπανικολάου, Δ. Ι. & Σιδέρης, Χ. Ι., 2014. *ΓΕΩΛΟΓΙΑ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΓΗΣ*. 7η επιμ. Αθήνα: Πατάκη.

Φωτίου, Α. & Πικριδάς, Χ., 2012. *GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές*. 2η Έκδοση επιμ.

Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.