



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την
ανίχνευση δευτερευόντων
σεισμικών κυμάτων σε δεδομένα
μονίμων σταθμών GNSS.

Κρέη Βασιλική



Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ανίχνευση δευτερευόντων
σεισμικών κυμάτων σε δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS.**

Κρέη Βασιλική

**Αθήνα,
Φεβρουάριος 2022**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Μαρία Τσακίρη για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε καθώς και τους κ. κ. Βαγγέλη Ζαχαρή και Ιορδάνη Γαλάνη για την συνεχή βοήθεια και στήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα δεδομένα υψηλής συχνότητας GNSS έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο μέσο κατά την επεξεργασία εκ των υστέρων και σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση μετακινήσεων. Στην εργασία αυτή προτείνεται μία μεθοδολογία για την ανάλυση χρονοσειρών θέσης μονίμων σταθμών GNSS που βρίσκονται γύρω από το επίκεντρο ενός σεισμού, με σκοπό την ανίχνευση των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων που διέρχονται από αυτούς.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υψηλής συχνότητας 5Hz από 14 σταθμούς της UNAVCO που βρίσκονται στις περιοχές της ανατολικής Καλιφόρνια και της Αλάσκας κατά την διάρκεια δύο σεισμικών γεγονότων μεγέθους 7.1 M. Η επεξεργασία των δεδομένων των σταθμών περιλαμβάνει την επίλυση με την μέθοδο Ακριβούς Προσδιορισμού Θέσης (PPP) για την εξαγωγή των χρονοσειρών θέσης των σταθμών και την μετατροπή των υπολογισμένων γεωδαιτικών συντεταγμένων τους σε γραμμικά μεγέθη. Η ανάλυση αποτελείται σε πρώτο στάδιο από την στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών και έπειτα από την στροφή αυτών, την εφαρμογή δύο προσεγγίσεων του φίλτρου Kalman και τέλος την επιβολή ενός κινητού μέσου όρου με διαφορετικά μεγέθη παραθύρων. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τον υπολογισμό των διαφορών των υπολοίπων μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων.

Στο αντίστοιχο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων για όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και για κάθε βήμα της ανάλυσης, καθώς και σε σχέση με την απόσταση από το επίκεντρο. Τα αποτελέσματα αυτά παρέχουν πληροφορίες και στοιχεία για την κίνηση των σταθμών λόγω της διέλευσης των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων, ενώ παράλληλα η αναπτυχθείσα μεθοδολογία υποδεικνύει την επίδραση ενός σεισμικού γεγονότος στις χρονοσειρές θέσης και την χρονική στιγμή που αυτό συνέβη.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της μετακίνησης μονίμων σταθμών από τις δονήσεις ενός σεισμού καθώς και να παράγει συμπεράσματα για την ταχύτητα και κατεύθυνση των σεισμικών του κυμάτων. Η εργασία αυτή προστίθεται στις εφαρμογές της χρήσης των δεδομένων GNSS στην ανάλυση και παρατήρηση μετακινήσεων, και ειδικότερα δυναμικών, και δύναται να αναπτυχθεί περαιτέρω για την αξιοποίησή της σε δεδομένα πραγματικού χρόνου.

ABSTRACT

The intrinsic high accuracy of the GNSS has been proved a significant resource in post-processing and real-time deformation monitoring research. This study proposes a method developed to analyze the position timeseries of continuously operated GNSS stations located in the area around the epicenter of an earthquake, aiming at the detection of secondary (S) seismic waves.

Specifically, 5hz positioning data from 14 permanent UNAVCO stations were used, located in the areas of Eastern California and Alaska, for two distinct earthquake events of a 7.1 M magnitude each. The stations' data processing consists of the computation of the position timeseries using Precise Point Positioning (PPP) and the conversion of the computed geodetic coordinates into linear values. The analysis included a statistical analysis of the timeseries, the rotation and filtering using two approaches of Kalman's filter and the use of a moving average with a moving window of different sizes. The results derive from the computation of the differences of the residuals using consecutive observations, indicating the point of time in which the secondary wave induce the dynamic displacement of the station.

Herein, results are provided based on the different parameters used for each step, as well as the distance from the epicenter. These results provide insight into the motion of the stations according to the direction of the S-wave propagation. This method statistically indicates the motion generated from a geohazard in a position timeseries of permanent station(s) of interest and, in addition, it indicates the exact time of the incident.

The method can be employed in testing for displacement of continuously operated GNSS stations in areas affected by an earthquake, as well as for generating conclusions on the velocity and direction of seismic waves' propagation. This study adds to the various implementations of GNSS timeseries analysis for deformation monitoring (specializing in dynamic displacements), and can be further developed for use with real-time data in future studies.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
Ευρετήριο Χαρτών	7
Ευρετήριο Πινάκων.....	7
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	7
Ευρετήριο Εικόνων	8
Πίνακας Συντμήσεων	9
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	10
1.1 Εισαγωγικά.....	10
1.2 Ο προβληματισμός	10
1.3 Σκοπός και επιμέρους στόχοι	11
1.4 Αναμενόμενα αποτελέσματα	11
1.5 Υποθέσεις.....	12
1.6 Δομή.....	12
Κεφάλαιο 2 ^ο : Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Σεισμικά Φαινόμενα	13
2.2.1 Κινήσεις Λιθοσφαιρικών Πλακών.....	14
2.2.2 Σεισμικά Κύματα.....	15
2.2.1 Προσδιορισμός θέσης με την χρήση δορυφορικού εντοπισμού	17
2.2.2 Ακριβής απόλυτος προσδιορισμός θέσης	17
2.2.3 Εφαρμογές του δορυφορικού εντοπισμού	18
2.3 Μελέτη Σεισμών με την χρήση GNSS	18
Κεφάλαιο 3 ^ο : Δεδομένα.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Οι σεισμοί	21
3.2.1 Anchorage Αλάσκα.....	21
3.2.2 Ridgecrest Καλιφόρνια	24
3.3 Μόνιμοι Σταθμοί.....	26
3.4 Αρχεία	28
Κεφάλαιο 4 ^ο : Μεθοδολογία	29
4.1 Εισαγωγή.....	29
4.2 Επίλυση - BKG Ntrip Client.....	29
4.3 Μορφοποίηση αποτελεσμάτων επίλυσης	30

4.4 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων	31
4.4.1 Ιστογράμματα	31
4.4.2 Στασιμότητα.....	33
4.4.3 Αυτοσυσχέτιση.....	34
4.5 Ανάλυση.....	35
4.5.1 Στροφή	35
4.5.2 Φίλτρο Kalman.....	38
4.5.3 Κινητός μέσος όρος.....	41
4.5.4 Υπολογισμός Διαφορών.....	42
Κεφάλαιο 5 ^ο : Αποτελέσματα	44
5.1 Εισαγωγή.....	44
5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης	44
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	46
5.4 Επιλογή μεθοδολογίας	48
5.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας	49
5.5.1 Παράθεση αποτελεσμάτων της μεθόδου	51
5.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας με δεδομένα από την υπηρεσία UNAVCO	55
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις	57
6.1 Συμπεράσματα.....	57
6.1.1 Δεδομένα	57
6.1.2 Επεξεργασία.....	58
6.1.3 Προτεινόμενη Μεθοδολογία.....	58
6.2 Βελτιώσεις και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	58
6.3 Κατακλείδα	59
Βιβλιογραφία	60
Παράρτημα	63

Ευρετήριο Χαρτών

Χάρτης 2.1: Παγκόσμιος χάρτης της θέσης των σεισμών σε σχέση με ένταση και το εστιακό βάθος τους. (ISC, 2021).....	14
Χάρτης 2.2: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου και του Αιγαίου Πελάγους. Πηγή: (Sakellariou, 2006)	15
Χάρτης 3.1: Χάρτης έντασης του σεισμικού γεγονότος στην περιοχή Anchorage την 30-11-2018. Πηγή: USGS, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ak018fcnsk91/shakemap/intensity	23
Χάρτης 3.5: Χάρτης μόνιμων σταθμών GNSS στην περιοχή Ridgecrest της Καλιφόρνια, γύρω από το επίκεντρο του σεισμού.	27
Χάρτης 3.6: Χάρτης μόνιμων σταθμών GNSS στην περιοχή Anchorage της Αλάσκα, γύρω από το επίκεντρο του σεισμού.	28

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Πίνακας ταχυτήτων πρωτεύοντων και δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε διάφορα υλικά.	16
Πίνακας 3.1: Οι σταθμοί GNSS στην περιοχή του Ridgecrest και η απόστασή τους από το επίκεντρο.	27
Πίνακας 3.2: Οι σταθμοί GNSS στην περιοχή του Anchorage και η απόστασή τους από το επίκεντρο.	27
Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού p595.....	44
Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού CCCC.....	45
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού p580.....	45
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού p569.....	45
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού p592.....	45
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού AC44.....	46
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού AC53.....	46

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Ιστογράμματα των συνιστωσών dM και L των σταθμών RAMT και AC44.....	32
Διάγραμμα 4.2: Ιστογράμματα των συνιστωσών dM και L των σταθμών p580 και p592.....	33
Διάγραμμα 4.3: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης της συνιστώσας dM για τους σταθμούς CCCC, p596, p569 και p093.	35
Διάγραμμα 4.4 : Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού CCCC.....	37

Διάγραμμα 4.5: Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού p569.	37
Διάγραμμα 4.6: Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού RAMT.	38
Διάγραμμα 5.1 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού AC44 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	51
Διάγραμμα 5.2 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού AC53 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	52
Διάγραμμα 5.3 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p594 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	52
Διάγραμμα 5.4 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p595 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	53
Διάγραμμα 5.5 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού CCCC στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	53
Διάγραμμα 5.6 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p580 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	54
Διάγραμμα 5.7 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p463 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.	54
Διάγραμμα 5.8: Αναφορά της υπηρεσίας GAGE για το σεισμικό συμβάν της 06/07/2019 στην περιοχή του Ridgecrest, CA. Πηγή: (Phillips & Bartel, 2019).....	55
Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα μετακινήσεων του σταθμού AC53 από την αναφορά της υπηρεσίας GAGE για το σεισμικό συμβάν της 30/11/2018. Πηγή: (Phillips, et al., 2018)	56

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 3.1 & 3.2: Φωτογραφίες των σταθμών p093 (αριστερά) και p463 (δεξιά). Πηγή: https://www.ngs.noaa.gov/CORS/SitePhotos/	26
---	----

Πίνακας Συντμήσεων

ADF : Augmented Dickey-Fuller Test

BNC : BKG Ntrip Client

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales (National Centre for Space Studies)

CODE : Center of Orbit Determination

DGNSS : Differential Global Navigation Satellite System

DInSAR : Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry

EKF : Extended Kalman Filter

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

IGS : International GNSS Service

ITRF : International Terrestrial Reference System

MMI : Modified Mercalli Intensity

NEHRP : National Earthquake Hazard Reduction Program

NMEA : National Marine Electronics Association

NOTA : Network of the Americas

PGA : Peak Ground Acceleration

PGV : Peak Ground Velocity

PPP : Precise Point Positioning

SAR : Synthetic Aperture Radar

SLR : Satellite Laser Range

USGS : United States Geological Survey

VLBI : Very-long-baseline interferometry

MA : Moving Average

KMO : Κινητός Μέσος Όρος

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά

Οι σεισμοί αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο άμεσα συνδεδεμένο με την μορφή και την δομή του πλανήτη μας. Οι σεισμοί συνηθέστερα προκαλούνται από την διάρρηξη του φλοιού της Γης κατά μήκος ρηγμάτων αλλά μπορούν να προκληθούν και από ηφαιστειακές εκρήξεις και εγκατακρημνίσεις. Τα φαινόμενα αυτά διαφέρουν σε μέγεθος και ένταση και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, ενδέχεται να έχουν αμελητέα ή καταστροφικά αποτελέσματά στις γύρω περιοχές.

Η ενέργεια που συσσωρεύεται κατά μήκος των ρηγμάτων λόγω της κίνησης των τεκτονικών πλακών απελευθερώνεται κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Οι τεκτονικοί σεισμοί συνηθέστερα προκαλούνται/συμβαίνουν σε περιοχές γύρω από τα όρια των τεκτονικών πλακών, κατά μήκος ρηγμάτων και ζωνών καταβύθισης. Η συσσωρευμένη ενέργεια απελευθερώνεται σε μορφή κυμάτων που διαδίδονται από το επίκεντρο του σεισμού προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα σεισμικά κύματα αποτελούν ελαστικά κύματα και διαδίδονται μεταβάλλοντας την πυκνότητα ή παραμορφώνοντας το μέσο στο οποίο κινούνται. Τα κύματα που δημιουργούνται στην εστία του σεισμού και διαδίδονται στο εσωτερικό της γης ονομάζονται κύματα χώρου, και ανάλογα με την μορφή τους διαχωρίζονται σε επιμήκη και εγκάρσια. Τα επιμήκη κύματα διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στα υλικά και ονομάζονται πρωτεύοντα (primary waves) και τα εγκάρσια ονομάζονται δευτερεύοντα (secondary waves) λόγω της μικρότερής ταχύτητάς τους. Εκτός από τα κύματα χώρου, κατά την διάρκεια ενός σεισμικού φαινομένου, στην επιφάνεια της γης δημιουργούνται επιφανειακά σεισμικά κύματα. Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων προκαλεί δονήσεις στην επιφάνεια της Γης και δυναμικές μετακινήσεις του εδάφους.

Τα σεισμικά κύματα μεγάλων σε μέγεθος σεισμών προκαλούν σεισμικές (coseismic) και μετασεισμικές (postseismic) παραμορφώσεις στο στερεό φλοιό της Γης που ενδέχεται να έχουν ισχυρές επιπτώσεις στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον (κατολισθήσεις, υποχώρηση εδάφους, κατάρρευση έργων υποδομής) και να οδηγήσουν σε απώλειες ζωών. Περιοχές που βρίσκονται στα όρια των λιθοσθαιρικών πλακών και ρηγμάτων τείνουν να έχουν υψηλό κίνδυνο σεισμικότητας.

Η μελέτη των φαινομένων αυτών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την κατανόηση τους, την ενημέρωση του πληθυσμού και την προετοιμασία του για την αποφυγή καταστροφών. Με σκοπό τα παραπάνω, ειδικές υπηρεσίες, ακαδημαϊκά εργαστήρια, και ερευνητικά ινστιτούτα μελετούν και καταγράφουν τα σεισμικά φαινόμενα ενώ υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα. Η μελέτη και παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας στην Ελλάδα γίνεται από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου, το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), τον Οργανισμό Αντισεισμικής Προστασίας (ΟΑΣΠ) καθώς και από τα εργαστήρια των σχολών γεωλογίας του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, του Πανεπιστημίου Πατρών και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

1.2 Ο προβληματισμός

Οι σεισμοί καταγράφονται και μελετώνται από τους επιστήμονες με την χρήση σεισμολογικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από επίγεια όργανα, ειδικά για την καταγραφή σεισμικών κυμάτων και κινήσεων του εδάφους όπως οι σειсмоγράφοι, τα σεισμόμετρα και τα επιταχυνσιόμετρα. Τα δύο πρώτα αυτά όργανα επιτυγχάνουν την αναγραφή της σεισμικής κίνησης.

Για την πληρέστερη κατανόηση της κίνησης χρησιμοποιούνται τρία σεισμόμετρα ή σειсмоγράφοι, για την καταγραφή της κίνησης σε τρεις συνιστώσες. Εκτός από τα επίγεια όργανα που χρησιμοποιούνται στην μελέτη των σεισμών φαινομένων, η μελέτη των δονήσεων γίνεται και με υποθαλάσσια όργανα όπως τα υδρόφωνα ενώ οι μετακινήσεις του εδάφους μπορούν να μελετηθούν από δορυφορικές εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR).

Επίγεια όργανα που επιτρέπουν τον υπολογισμό της θέσης τους καθώς και της μετακίνησης αυτής σε σχέση με τον χρόνο, αποτελούν και οι δέκτες GNSS. Συγκεκριμένα, μόνιμοι σταθμοί που βρίσκονται τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις, καταγράφουν τις παρατηρήσεις τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό των συντεταγμένων της θέσης τους αλλά ταυτόχρονα επιτρέποντας την παρατήρηση της μετακίνησής τους μέσα στον χρόνο. Δίκτυα μονίμων σταθμών GNSS χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες για την καταγραφή της κίνησης μίας περιοχής που οφείλεται σε φαινόμενα όπως οι καθιζήσεις και οι κατολισθήσεις (Lacroix, et al., 2014) αλλά και μετακινήσεις του φλοιού της Γης (Clarke, et al., 1998).

Την τελευταία δεκαετία τα δίκτυα GNSS εμπλουτίζονται με δεδομένα υψηλής συχνότητας τα οποία επιτρέπουν την καταγραφή μετακινήσεων του εδάφους κατά την διάρκεια ενός φαινομένου. Επιπλέον, τα υψηλής συχνότητας δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή κυματομορφών σε πειραματικές διατάξεις (Xu, et al., 2013) αλλά και για μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων (Hohensinn & Geiger, 2018) και της άφιξης πρωτεύοντων σεισμικών κυμάτων (Fuchs, et al., 2022) στους σταθμούς.

Με την γνώση για τις δυνατότητες που προσφέρει η ανάλυση υψηλής συχνότητας δεδομένων σταθμών GNSS στην μελέτη των σεισμικών μετακινήσεων και την καταγραφή σεισμικών κυμάτων, στην εργασία αυτή γίνεται η προσπάθεια για την ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε δεδομένα που προέρχονται από σταθμούς GNSS. Στην μελέτη αυτή, επιχειρείται η ανάπτυξη μίας απλής μεθοδολογίας για την ανάλυση των δεδομένων με στόχο την ανίχνευση της διέλευσης των κυμάτων από τους σταθμούς.

1.3 Σκοπός και επιμέρους στόχοι

Σκοπός της εργασίας αυτής αποτέλεσε η ανάπτυξη μεθοδολογίας, χαμηλής σε υπολογιστική πολυπλοκότητα και μικρού αριθμού βημάτων, για την ανίχνευση σεισμικών κυμάτων από υψηλής συχνότητας δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS. Για την πειραματική μελέτη της προτεινόμενης μεθοδολογίας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μόνιμων σταθμών GNSS οι οποίοι βρίσκονται σε σειсмоγενείς περιοχές που επλήγησαν από σεισμούς μεγάλης έντασης (>7 της κλίμακας Ρίχτερ).

Επιμέρους στόχοι της εργασίας συνιστούν:

- Η επίλυση των δεδομένων των σταθμών GNSS για την παραγωγή χρονοσειρών θέσης με τεχνικές PPP
- Η ανάλυση των χρονοσειρών για την επίτευξη της ανίχνευσης των σεισμικών κυμάτων με την προτεινόμενη μεθοδολογία
- Η επιλογή της ακολουθίας βημάτων που επιτρέπει την ανίχνευση των κυμάτων με βέλτιστο τρόπο
- Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

1.4 Αναμενόμενα αποτελέσματα

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι στόχοι της παρούσας εργασίας θεωρούνται πραγματοποιήσιμοι και είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα αυτής. Πιο

συγκεκριμένα, από την ανάλυση των δεδομένων αναμένεται ο εντοπισμός της δυναμικής μετατόπισης των σταθμών λόγω της διέλευσης των σεισμικών κυμάτων από αυτούς. Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας στις χρονοσειρές θέσης θεωρείται εφικτή η ανίχνευση της μετακίνησης των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων, λόγω της μεγαλύτερης έντασης και της κατεύθυνσης των κινήσεων που αυτά προκαλούν.

Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας στα δεδομένα μελέτης, και τα αποτελέσματά αυτής, η εργασία καλείται να απαντήσει τα παρακάτω ερωτήματα:

1. Είναι εφικτή η ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS;
2. Είναι δυνατός ο αυτόματος εντοπισμός της χρονικής στιγμής κατά την οποία το δευτερεύον σεισμικό κύμα διέρχεται από έναν σταθμό;
3. Μέχρι ποια απόσταση από το επίκεντρο ενός σεισμού είναι δυνατός ο παραπάνω εντοπισμός;

1.5 Υποθέσεις

Στην ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία δεν συνυπολογίζονται οι επιδράσεις των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων και θεωρείτο πως αυτά διέρχονται από τους σταθμούς με τέτοια χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα κύματα ώστε να μην επιδρούν στην ανίχνευση αυτών. Δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι ανακλάσεις, διαθλάσεις και μετασχηματισμοί των κυμάτων.

Το γεωλογικό υπόβαθρο των περιοχών μελέτης θεωρείται άγνωστο και δεν λαμβάνεται ως παράμετρος στην ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθοδολογίας.

1.6 Δομή

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής:

- 1^ο κεφάλαιο: Εισαγωγικό κεφάλαιο στο οποίο θέτονται ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας και καθορίζονται οι υποθέσεις που γίνονται σε αυτήν.
- 2^ο κεφάλαιο: Γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω σε εργασίες και μελέτες που έχουν ως θέμα την χρήση δεδομένων GNSS σε εφαρμογές της σεισμολογίας.
- 3^ο κεφάλαιο: Παρατίθενται τα δεδομένα και στοιχεία αυτών, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.
- 4^ο κεφάλαιο: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επίλυση των δεδομένων των σταθμών, η μορφοποίησή τους και η ανάλυση που γίνεται σε αυτά για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας.
- 5^ο κεφάλαιο: Παράθεση και σχολιασμός αποτελεσμάτων. Επιλογή και αξιολόγηση της μεθοδολογίας που οδήγησε στα βέλτιστα αποτελέσματα.
- 6^ο κεφάλαιο: Παρουσίαση συμπερασμάτων που προέκυψαν τόσο από την ανάλυση των δεδομένων όσο και από τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας.

Κεφάλαιο 2^ο: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

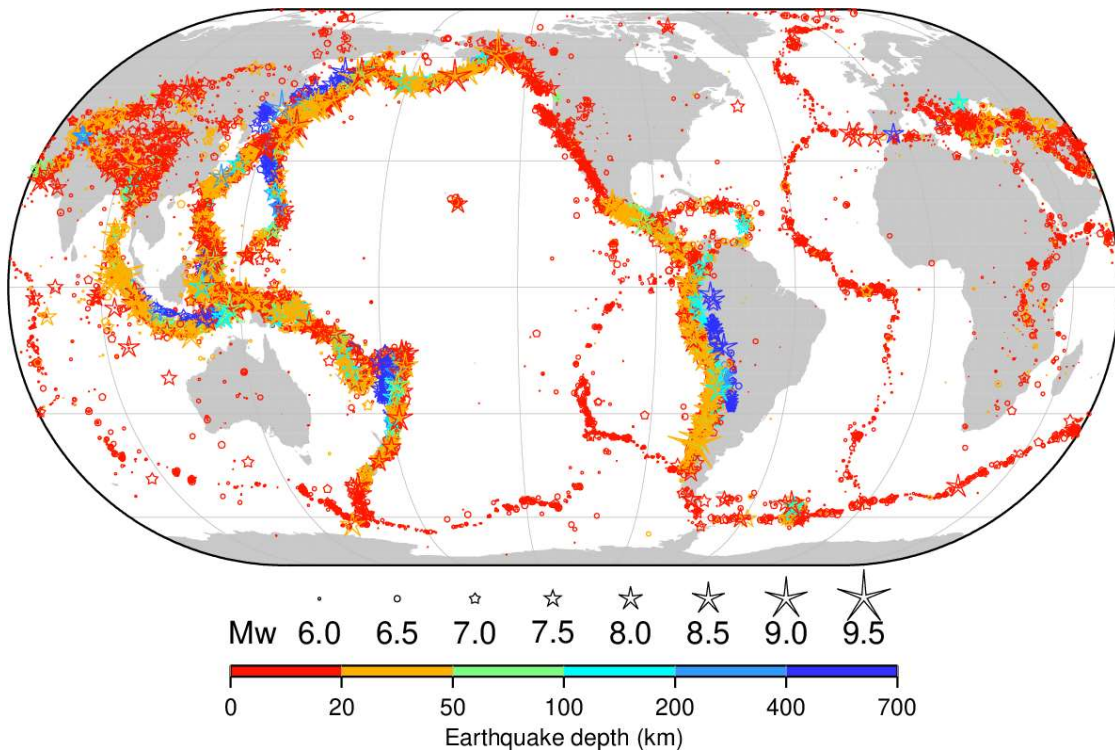
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση της αξιοποίησης δεδομένων GNSS στην μελέτη σεισμικών φαινομένων. Για την πληρέστερη πλαισίωση της εργασίας αναφέρονται εν συντομία βασικές πληροφορίες που αφορούν τα σεισμικά φαινόμενα και τα σεισμικά κύματα, καθώς επίσης παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και εφαρμογές του δορυφορικού εντοπισμού.

2.2 Σεισμικά Φαινόμενα

Οι σεισμοί αποτελούν δονήσεις του εδάφους που προκαλούνται από την διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων λόγω της συσσώρευσης ελαστικής ενέργειας από την μακροχρόνια επίδραση των τεκτονικών δυνάμεων που δρουν στα πετρώματα. Η εκτόνωση προκαλεί διάρρηξη των πετρωμάτων στο σημείο που ονομάζεται εστία του σεισμού και ενέργεια απελευθερώνεται στα πλαίσια της ελαστικής επαναφοράς των πετρωμάτων δημιουργώντας σεισμικά κύματα.

Ανάλογα με το εστιακό βάθος τους οι σεισμοί διακρίνονται σε επιφανειακούς (βάθος έως 60km), ενδιάμεσους (εστιακό βάθος 60-300km) και μεγάλου βάθους (βάθος > 300km) (Παπαζάχος, et al., 2005). Οι περισσότεροι επιφανειακοί σεισμοί που παρατηρούνται (80% του συνόλου), αποτελούν τεκτονικούς σεισμούς. Οι τεκτονικοί σεισμοί προκύπτουν από την εκτόνωση δυνάμεων που προέρχονται από τάσεις λόγω της μετακίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών κατά μήκος ρηγμάτων. Άλλο είδος σεισμών αποτελούν οι ηφαιστειογενείς και οι εγκατακρημνείς, ενώ σεισμοί μπορούν να προκληθούν και από ανθρωπογενή αίτια (πχ. φράγματα, μεταλλουργικές εργασίες, εκρήξεις).

Τα σεισμικά φαινόμενα κατανέμονται χωρικά στις περιοχές κατά μήκος του παγκοσμίου συστήματος διάρρηξης και τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Τα περιθώρια τα οποία δεν βρίσκονται κοντά σε ηπείρους και στα οποία συναντώνται μεγάλος αριθμός σεισμών και ενεργά ηφαίστεια καλούνται ωκεάνια τόξα (Δούτσος, 2014). Η κατακόρυφη κατανομή των σεισμών στα ηπειρωτικά περιθώρια και τα ωκεάνια τόξα δίνει πληροφορίες για τις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή. Στον χάρτη 2.1 του καταλόγου του κέντρου ISC-GEM (ISC, 2021) φαίνεται η τόσο η χωρική όσο και η κατανομή του βάθους των καταγεγραμμένων σεισμών καθώς και το μέγεθος του φαινομένου.



Χάρτης 2.1: Παγκόσμιος χάρτης της θέσης των σεισμών σε σχέση με ένταση και το εστιακό βάθος τους. (ISC, 2021)

Πιο συγκεκριμένα, τα σεισμικά φαινόμενα συναντώνται στον φλοιό και τον άνω μανδύα, με βάρη που κυμαίνονται από την επιφάνεια έως περίπου τα 800 km. Η κατακόρυφη κατανομή τους δεν είναι ομοιόμορφη και ελαττώνεται με το βάθος, και κατά συνέπεια ο μεγαλύτερος αριθμός σεισμών να παρατηρείται στα επιφανειακά στρώματα. Εκτός από χωρική κατανομή τα σεισμικά φαινόμενα παρουσιάζουν και χρονική κατανομή (Παπαζάχος, et al., 2005). Οι σεισμοί στα μεγαλύτερα βάθη συναντώνται στις ζώνες σύγκλισης και κατάδυσης, εκεί όπου η βυθιζόμενη λιθοσφαιρική πλάκα βυθίζεται στον μανδύα. Η ένταση των δονήσεων που δημιουργούν οι σεισμοί εξασθενεί ανάλογα με το εστιακό βάθος με αποτέλεσμα οι επιφανειακοί σεισμοί να είναι πιο καταστροφικοί από τους σεισμούς με μεγαλύτερο εστιακό βάθος.

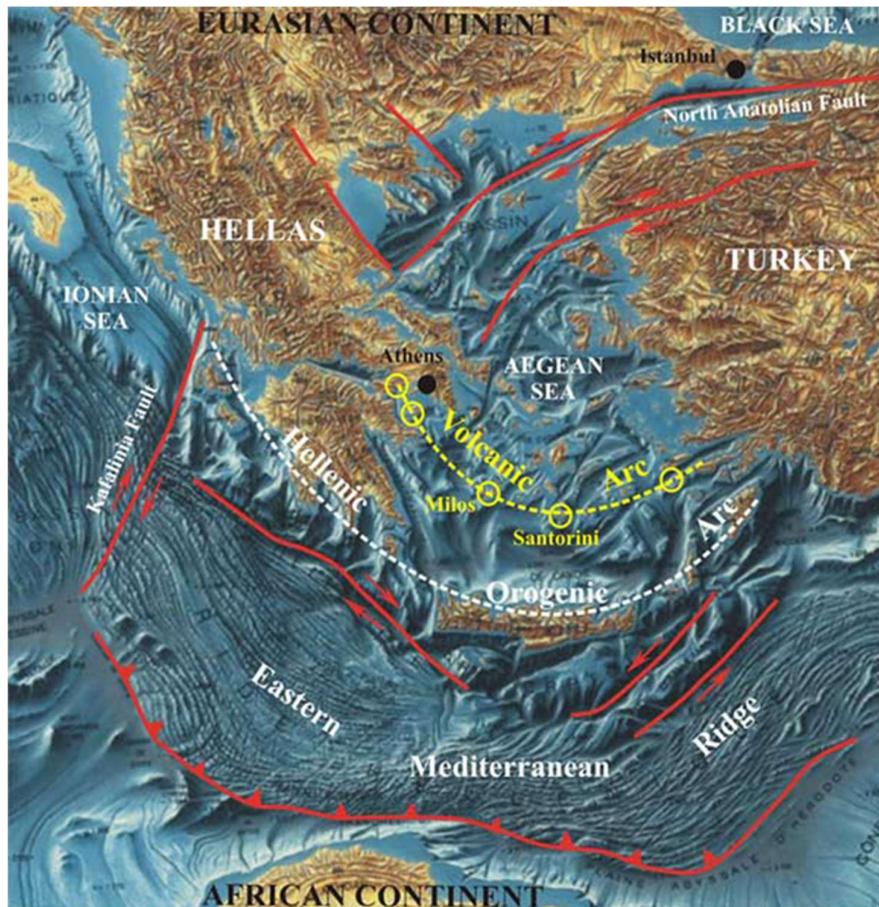
2.1.1 Κινήσεις Λιθοσφαιρικών Πλακών

Όπως προαναφέρθηκε, η πλειοψηφία των σεισμών συμβαίνει στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Τα όρια των πλακών ανάλογα με την μεταξύ τους κίνηση, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: Τις ζώνες απόκλισης, τις ζώνες καταβύθισης και τα ρήγματα μετασχηματισμού (Δούτσος, 2014).

Οι ζώνες απόκλισης απαντώνται κατά πλειοψηφία στους ωκεανούς, και ως αποτέλεσμα της κίνησης τους, το υλικό που αναδύεται από τα εσωτερικά στρώματα της γης κατά την απόκλιση των πλακών, δημιουργεί τις μεσοωκεάνιες ράχες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού ωκεανού που δημιουργείται από την αποκλίνουσα κίνηση της Ευρασιατικής και Βορειο-Αμερικανικής πλάκας. Οι σεισμοί στις ζώνες αυτές έχουν συνήθως μικρό εστιακό βάθος.

Οι ζώνες καταβύθισης είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών, κατά την οποία η μία πλάκα βυθίζεται κάτω από την άλλη. Χαρακτηριστικά των ζωνών κατάδυσης αποτελούν οι ωκεάνιες τάφροι, οι οροσειρές με ενεργά ηφαίστεια και οι επιφανειακοί σεισμοί. Παράδειγμα ζώνης καταβύθισης στον Ελλαδικό χώρο αποτελεί το όριο της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα νοτίως της Κρήτης, όπου η Αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική, δημιουργώντας

την ελληνική τάφρο. Στο σημείο όπου η ηπειρωτική πλάκα ανυψώνεται λόγω της πίεσης που δέχεται από την καταβυθιζόμενη πλάκα δημιουργείται το νησιωτικό τόξο, και στην περίπτωση αυτή, το ελληνικό νησιωτικό τόξο. Στον χάρτη 2.2 παρουσιάζεται το γεωτεκτονικό υπόβαθρο της Ανατολικής Μεσογείου στο οποίο διακρίνεται το ελληνικό νησιωτικό τόξο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ζώνης κατάδυσης αποτελεί το όριο που εκτείνεται μεταξύ της βορειοδυτικής ακτής των Ηνωμένων Πολιτειών, του δυτικού Καναδά και της νότιας ακτής της Αλάσκα, συμπεριλαμβανομένου των Αλεούτιων νήσων, που δημιουργούν αντίστοιχα το Ηφαιστιακό τόξο της Αλάσκα.



Χάρτης 2.2: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου και του Αιγαίου Πελάγους. (Sakellariou, 2006)

Τα ρήγματα μετασχηματισμού σχηματίζονται στις περιοχές όπου οι λιθοσφαιρικές πλάκες ολισθαίνουν οριζόντια η μία σε σχέση με την άλλη. Η κίνηση αυτή προκαλεί επιφανειακούς σεισμούς στην περιοχή. Παραδείγματα τέτοιων ρηγμάτων αποτελούν το ρήγμα του Άγιου Ανδρέα στο τεκτονικό όριο της πλάκας του Ειρηνικού με την Βορειο-Αμερικανική πλάκα, καθώς και το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας κατά μήκος του ορίου της Ευρασιατικής και της πλάκας της Ανατολίας, που διακρίνεται επίσης στον χάρτη 2.1.

2.1.2 Σεισμικά Κύματα

Η δυναμική ενέργεια που εκτονώνεται από την διαδικασία του σεισμού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια που μεταδίδεται στο χώρο, με μορφή κυμάτων. Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε ελαστικά κύματα χώρου, που παράγονται στην εστία του σεισμού και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και επιφανειακά κύματα που σχηματίζονται στην επιφάνεια της Γης (Δούτσος, 2014). Με την σειρά τους τα κύματα χώρου διακρίνονται σε διαμήκη και εγκάρσια κύματα. Στα

διαμήκη κύματα η ταλάντωση του υλικού γίνεται παράλληλα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος μεταβάλλοντας την πυκνότητα του μέσου διάδοσης. Στα εγκάρσια κύματα η ταλάντωση των πετρωμάτων γίνεται κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος με αποτέλεσμα την παραμόρφωση των πετρωμάτων κατά την διεύθυνση αυτή. Λόγω της κίνησής τους τα επιμήκη κύματα διαδίδονται σε όλα τα μέσα ενώ τα διαμήκη μόνο στα στερεά. Τα επιμήκη κύματα που παράγονται στην εστία του σεισμού έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από τα εγκάρσια και καταγράφονται πρώτα από τους σειсмоγράφους. Για τον λόγο αυτό τα διαμήκη κύματα ονομάζονται πρωτεύοντα κύματα P (Primary waves) και τα εγκάρσια κύματα, που καταγράφονται δεύτερα λόγω της μικρότερης ταχύτητάς τους, δευτερεύοντα κύματα S (Secondary waves) (Παπαζάχος, et al., 2005). Η ταχύτητα των κυμάτων του χώρου ελαττώνεται με το βάθος και αυτή διαφέρει ανάλογα με το μέσο διάδοσης. Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι ταχύτητες των πρωτεύοντων και δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε διαφορετικά υλικά (Tendürüs, et al., 2010).

Material	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)
Steel	6100	3500
Concrete	3600	2000
Granite	5500–5900	2800–3000
Basalt	6400	3200
Sandstone	1400–4300	700–2800
Limestone	5900–6100	2800–3000
Sand (unsaturated)	200–1000	80–400
Sand (saturated)	800–2200	320–880

Πίνακας 2.1: Πίνακας ταχυτήτων πρωτεύοντων και δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε διάφορα υλικά (Tendürüs, et al., 2010).

Στην επιφάνεια της γης σχηματίζονται τα επιφανειακά κύματα. Τα κύματα αυτά είναι αποτέλεσμα της συμβολής των P και S κυμάτων και ακολουθούν το σχήμα του φλοιού της γης. Διακρίνονται σε κύματα Rayleigh και Love και καταγράφονται τελευταία από τους σειсмоγράφους (Δούτσος, 2014). Λόγω της πολυπλοκότερης φύσης τους, η ένταση των επιφανειακών κυμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η απόσταση από το επίκεντρο και το εστιακό βάθος, ο μηχανισμός και ο προσανατολισμός θραύσης του σεισμού και η γεωλογική δομή του στερεού φλοιού δια μέσου του οποίου ταξιδεύει το κύμα. Άλλα είδη σεισμικών κυμάτων αποτελούν τα διαυλικά κύματα, τα κύματα ουράς και τα στάσιμα κύματα (Παπαζάχος, et al., 2005).

Η μορφή των σεισμικών κυμάτων καθώς και η διεύθυνση διάδοσης τους επηρεάζονται από το υλικό μέσο στο οποίο διαδίδονται. Κατά την διάδοση τους στα διαφορετικά υλικά του υπεδάφους τα κύματα υφίστανται φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης, περίθλασης, σκέδασης και απόσβεσης. Η μεταβολή των πλατών των σεισμικών κυμάτων ενδέχεται να οφείλεται στην πρόσπτωση επιφάνειας διαχωρισμού δύο διαφορετικών ελαστικών μέσων, την απώλεια ενέργειας λόγω της εσωτερικής τριβής του μέσου διάδοσης, την ανελαστική απόσβεση και την διασπορά (Παπαζάχος, et al., 2005).

Η καταγραφή και μελέτη του πλάτους των σεισμικών κυμάτων γίνεται παραδοσιακά με σεισμολογικά όργανα όπως οι σειсмоγράφοι και τα σεισμόμετρα, ενώ καταγράφεται και η επιτάχυνση που αυτά προκαλούν στο έδαφος με επιταχυνσιόμετρα.

2.2 GNSS – Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η δωρεάν πρόσβαση σε δεδομένα GNSS καθώς και η βελτίωση στην ακρίβεια της μεθόδου του δορυφορικού εντοπισμού και των προϊόντων της, έχει καταστήσει την μέθοδο ευρέως διαδεδομένη. Η πληθώρα συστημάτων (GPS, Galileo, GLONASS κ.α.) και η μείωση του κόστους των επίγειων δεκτών έχει συντελέσει στην χρήση της μεθόδου σε πληθώρα εφαρμογών. Τα συστήματα GNSS χρησιμοποιούνται σε επιστημονικούς, πολιτικούς, βιομηχανικούς και στρατιωτικούς τομείς και ποικίλουν από εφαρμογές αυξημένων απαιτήσεων ακρίβειας έως καθημερινές εφαρμογές.

2.2.1 Προσδιορισμός θέσης με την χρήση δορυφορικού εντοπισμού

Τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού αποτελούνται από δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη οι οποίοι εκπέμπουν δορυφορικά σήματα και από επίγειους δέκτες που λαμβάνουν τα σήματα αυτά. Τα δορυφορικά σήματα αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα (φέρουσες συχνότητες) που φέρουν μετρητικούς κώδικες και μηνύματα δεδομένων. Η λήψη των σημάτων γίνεται από επίγειους δέκτες και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης τους, με τον υπολογισμό της απόστασής τους από τους δορυφόρους. Ο προσδιορισμός τη θέσης γίνεται με παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων ή μετρήσεις φάσης οι οποίες γίνονται πάνω σε μετρητικά σήματα και σε ημιτονοειδή κύματα αντίστοιχα. Ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη γίνεται σε σχέση με την γεωμετρία των δορυφόρων ή την θέση άλλων δεκτών.

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός δέκτη διακρίνεται ανάλογα με την κίνηση του δέκτη και τον τρόπο προσδιορισμό της θέσης του. Στην περίπτωση που ο δέκτης είναι στάσιμος, πρόκειται για στατικό εντοπισμό. Οι μετρήσεις στην περίπτωση αυτή διαρκούν εκτεταμένη χρονική περίοδο, από μερικά λεπτά έως και έτη. Στην περίπτωση που ο δέκτης βρίσκεται σε κίνηση ο εντοπισμός ονομάζεται κινηματικός και οι μετρήσεις που γίνονται για την εκάστοτε θέση του έχουν μικρή διάρκεια. Απόλυτος προσδιορισμός ονομάζεται η μέθοδος κατά την οποία γίνεται ο υπολογισμός της θέσης με την χρήση των μετρήσεων μόνο του ίδιου του δέκτη και οι συντεταγμένες αναφέρονται πάνω σε γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Ο προσδιορισμός της θέσης ενός δέκτη μπορεί να γίνει σε σχέση με την θέση ενός άλλου δέκτη του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές σε κάποιο σύστημα αναφοράς και στην περίπτωση αυτή πρόκειται για σχετικό εντοπισμό.

Ο υπολογισμός της θέσης του δέκτη μπορεί να γίνει μετά το πέρας των μετρήσεων (εκ των υστέρων) ή κατά την διάρκεια των μετρήσεων (σε πραγματικό χρόνο). Κατά την εκ των υστέρων επίλυση των μετρήσεων του δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρατηρήσεις όλων των εποχών και ο συνδυασμός μετρήσεων ψευδοαποστάσεων και φάσης καθώς υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης αρχείων διορθώσεων για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.

2.2.2 Ακριβής απόλυτος προσδιορισμός θέσης

Ο ακριβής απόλυτος προσδιορισμός θέσης (Precise Point Positioning - PPP) αποτελεί μία μέθοδο εντοπισμού θέσης που κάνει χρήση διαθέσιμων διορθώσεων χρονομέτρων και τροχιάς για τον εντοπισμό της θέσης ενός δέκτη GNSS. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται ιδανική για την επεξεργασία μετρήσεων από μοναδικό δέκτη GNSS με υψηλή ακρίβεια χωρίς την χρήση διαφορικών τεχνικών μεταξύ πολλαπλών δεκτών. Κατά την εκ των υστέρων επεξεργασία η μέθοδος επιτυγχάνει ακρίβειες της τάξης του ενός εκατοστού (Ginter & Jansen, 2012) και η ακρίβεια αυτή μπορεί να επιτευχθεί απευθείας στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς (ITRF) όταν χρησιμοποιηθούν διορθώσεις ακριβείας χρονομέτρων και τροχιών από τα κέντρα ανάλυσης της υπηρεσίας IGS (Kouba & Héroux, 2001).

Επιπλέον από τις διορθώσεις αυτές, η μέθοδος απαιτεί αρχεία προσδιορισμού της απόκλισης του κέντρου φάσης της κεραίας (ANTEX), διορθώσεις στις μετρήσεις φάσεων των δεκτών και δορυφόρων (Carrier Phase Wind-up), καθώς και παραμέτρους για τις παλίρροιες του στερεού φλοιού της γης και των ωκεάνιων παλιρροιών. Συγκρινόμενη με την μέθοδο του διαφορικού εντοπισμού, η συμβατική χρήση της μεθόδου απαιτεί περισσότερο χρόνο για την επίλυση της ασάφειας φάσης και την σύγκλιση της λύσης για επίπεδα ακρίβειας εκατοστού αν και πολλές μελέτες έχουν εξελίξει νέες τεχνικές για την ταχύτερη επίλυση καθώς και τη βελτίωση στο σφάλμα θέσης (Collins, et al., 2010).

2.2.3 Εφαρμογές του δορυφορικού εντοπισμού

Η μέθοδος δορυφορικού εντοπισμού έχει ευρεία χρήση σε γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και την μελέτη γεωδυναμικών φαινομένων. Η υψηλή ακρίβεια της μεθόδου αξιοποιείται και στην παρακολούθηση μικρό-μετακινήσεων σε έργα υποδομών όπως φράγματα και γέφυρες, αλλά και μνημεία. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε τοπογραφικές εργασίες καθώς και στην χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

Μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ο δορυφορικός εντοπισμός αξιοποιείται σε εφαρμογές όπως η γεωργία, η δασολογία και η ωκεανογραφία, για την μελέτη και προστασία του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Ο δορυφορικός εντοπισμός βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην πλοήγηση, σε πεδία όπως η ναυσιπλοΐα και υδρογραφικές εφαρμογές, η ιχνηλάτηση βαρέων οχημάτων και μεταλλουργικών εργασιών καθώς και στην αεροπορία. Επιπροσθέτως, τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού χρησιμοποιούνται και σε διαστημικές εφαρμογές, για την πλοήγηση δορυφόρων και τον ακριβή προσδιορισμό των τροχιών τους.

Τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού, εκτός από τον υπολογισμό συντεταγμένων, επιτρέπουν τον χρονικό προσδιορισμό ενώ παρέχουν και ατμοσφαιρικά προϊόντα. Ο χρονικός προσδιορισμός και η χρονοσήμανση χρησιμοποιείται για την υλοποίηση ενός συστήματος αναφοράς χρόνου με εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες και τις χρηματοοικονομικές υπηρεσίες παγκοσμίως.

Ο δορυφορικός εντοπισμός καθίσταται ακόμα πιο χρηστικός χάρη στα δίκτυα μόνιμων σταθμών που έχουν υλοποιηθεί παγκοσμίως καθώς και στην εύκολη και δωρεάν πρόσβαση σε δεδομένα αυτών. Προϊόντα και διορθώσεις από υπηρεσίες και κέντρα επεξεργασίας (IGS, CNES, CODE) επιτρέπουν την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας για την χρήση των δεδομένων σε ερευνητικές και πολιτικές χρήσεις. Επιπλέον, η κυκλοφορία επιστημονικών λογισμικών για την εκ των υστέρων επεξεργασία των δεδομένων (BERNESE, BNC-BKG, GIPSY) αποτελεί σημαντικό εργαλείο για όλους τους τύπους εργασιών, ενώ παράλληλα η ακρίβεια των λύσεων σε πραγματικό χρόνο έχει αυξηθεί σημαντικά. Τέλος, ο δορυφορικός εντοπισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με άλλες μεθόδους όπως Satellite Laser Range (SLR) και η Very-long-baseline interferometry (VLBI) για την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης ακρίβειας.

2.3 Μελέτη Σεισμών με την χρήση GNSS

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται η μεγάλη ακρίβεια των συστημάτων GNSS και της μεθόδου του δορυφορικού εντοπισμού για την μελέτη σεισμικών κυμάτων, με χρήση δεδομένων από μόνιμους σταθμούς GNSS. Η μελέτη των σεισμικών φαινομένων με χρήση δεδομένων GNSS, δεν αποτελεί καινοτομία αλλά την συνέχεια μεγάλου αριθμού μελετών πάνω στον τομέα.

Πιο συγκεκριμένα, η αξιοποίηση δεδομένων μόνιμων σταθμών GNSS και δικτύων παρακολούθησης για την καταγραφή και μοντελοποίηση κινήσεων του στερεού φλοιού της γης γίνεται από τα πρώτα χρόνια της χρήσης τους. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η μελέτη της παραμόρφωση του φλοιού στον Κορινθιακό Κόλπο και της σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής στο χρονικό διάστημα 1989-

1997 (Clarke, et al., 1998) καθώς και η εκτίμηση της κίνησης του φλοιού για μικρές τιμές παραμόρφωσης στη περιοχή των δυτικών Άλπεων την περίοδο 1996-1998 (Calais, 1999). Σε πιο πρόσφατες έρευνες, δίκτυα μονίμων σταθμών έχουν χρησιμοποιηθεί και για την μελέτη των παραμορφώσεων που ακολούθησαν την σεισμική δραστηριότητα (Serpelloni, et al., 2012), καθώς επίσης παρατηρήθηκε πως οι μόνιμοι σταθμοί GNSS μπορούν να υποστούν μετακινήσεις λόγω ισχυρής σεισμικής δραστηριότητας ακόμα και αν αυτοί βρίσκονται εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από το επίκεντρο (Tregoning, et al., 2013). Πολύ συχνά τα δεδομένα των σταθμών χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με δεδομένα διαφορικής συμβολομετρίας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (DInSAR), για την δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών στους οποίους απεικονίζονται οι παραμορφώσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό (Guglielmino, et al., 2013).

Την τελευταία δεκαετία δεδομένα υψηλής συχνότητας (μεγαλύτερης ή ίσης του ενός Hz) από δίκτυα GNSS χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μετακινήσεων του εδάφους κατά την διάρκεια της σεισμικής δραστηριότητας (coseismic). Τέτοια παραδείγματα αποτελούν μελέτη κατολισθήσεων που ενεργοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του σεισμικού φαινομένου (Lacroix, et al., 2014) και η μοντελοποίηση των μετακινήσεων τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά τον σεισμό, και την μελέτη τυχόν αλλαγών στις τάσεις που ασκούνται στην λιθόσφαιρα (Houlié, et al., 2018). Με την χρήση υψηλής συχνότητας δεδομένων και το κατάλληλο ιονοσφαιρικό μοντέλο, έγινε δυνατή με χρήση δέκτη GPS μονής συχνότητας, η ανάλυση των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν κατά την διάρκεια σεισμικού φαινομένου με ακρίβεια εκατοστών, από τους (Guo, et al., 2015)

Με χρήση υψηλής συχνότητας δεδομένων (1Hz, 5Hz) μετακινήσεις καταγράφονται και σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων μπορεί να δώσει πληροφορίες για στατικές μετατοπίσεις και χαρακτηρισμό του μεγέθους του σεισμού σε μικρό χρονικό διάστημα (Allen & Ziv, 2011). Επιπλέον, τα υψηλής συχνότητας δεδομένα σε συνδυασμό με την μέθοδο επίλυσης PPP, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο (Geng, et al., 2016).

Τέλος, η χρήση υψηλής συχνότητας δεδομένων σταθμών GNSS έχει γίνει και σε άλλες εφαρμογές με υψηλή ακρίβεια. Από τους (Paziewski, et al., 2020) έγινε η ανάλυση των μετατοπίσεων που προκλήθηκαν από διαδικασίες εξόρυξης καθώς και του χαρακτηρισμού των σεισμικών φαινομένων με ακρίβεια χιλιοστού στις δυναμικές μετακινήσεις. Η χρήση των συστημάτων GNSS σε παγκόσμια κλίμακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την υλοποίηση ενός παγκόσμιου συστήματος παρακολούθησης σεισμών που συμπληρώνουν τα διαδεδομένα/κλασικά μέσα παρακολούθησης σεισμών καθώς επιτρέπουν τον ταχύ χαρακτηρισμό σεισμικών φαινομένων ή τσουνάμι (Melbourne, et al., 2021).

Η χρήση δεδομένων υψηλής συχνότητας (High-rate) από σταθμούς GNSS σε συνδυασμό με την μέθοδο PPP επιτρέπουν την λεπτομερέστερη και περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων χρονικά, με ακρίβεια της τάξης του διαφορικού εντοπισμού DGNSS (Moschas, et al., 2014). Με την χρήση high-rate δεδομένων η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλο εύρος τομέων όπως η σεισμολογία (Avallone, et al., 2011), τα συστήματα έγκυρης προειδοποίησης σεισμικών φαινομένων, ο κινηματικός προσδιορισμός θέσης, σε υδρογραφικές εφαρμογές και την παρακολούθηση έργων υποδομής (Yigit & Gurlek, 2017).

Στις εφαρμογές της σεισμολογίας, τα υψηλής συχνότητας δεδομένα χρησιμοποιούνται σε πολλές μελέτες της βιβλιογραφίας για την μελέτη των σεισμικών κυμάτων και των μετακινήσεων με μεγάλη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα των Emore, et al. (2007) έδειξε πως ο εντοπισμός σεισμικών κυμάτων με δεδομένα 1Hz συμφωνεί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από σεισμολογικές παρατηρήσεις. Επιπλέον η χρήση δεδομένων GPS συχνότητας 1Hz επιτρέπει την διάκριση μεταξύ της

σεισμικής και μετασεισμικής μετακίνησης (Emore, et al., 2007). Σύμφωνα με τους Moschas, et al. (2014) με την χρήση δεδομένων 10Hz, η μέθοδος δύναται να καταγράψει τις κυματομορφές των δυναμικών μετατοπίσεων του εδάφους και κτηρίων κατά την έντονη σεισμική δόνηση, με ακρίβεια της τάξης των 5mm. Τέλος, σταθμοί GPS με υψηλές συχνότητες καταγραφής είναι ικανοί να καταγράψουν την έλευση των σεισμικών δονήσεων ακόμα και για σεισμούς μέτριας έντασης (Avallone, et al., 2011).

Από τα παραπάνω είναι φανερό η ευρεία χρήση και το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την χρήση δικτύων σταθμών GNSS στην παρακολούθηση, ανάλυση και μοντελοποίηση τόσο των ίδιων των σεισμικών φαινομένων όσο και των επιπτώσεων τους. Επιπλέον διαφαίνεται η σημασία της χρήσης υψηλής συχνότητας δεδομένων για την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και της ευαισθησίας των μεθόδων που αναπτύσσονται καθώς και η δυνατότητα της μεθόδου PPP να παράγει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας στην μελέτη των σεισμικών κυμάτων.

Κεφάλαιο 3^ο: Δεδομένα

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία. Τα δεδομένα αφορούν τα δύο σεισμικά φαινόμενα τα οποία μελετήθηκαν και τους μόνιμους σταθμούς GNSS που βρίσκονται γύρω από τα επίκεντρα, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση. Οι σεισμοί και οι σταθμοί μελέτης έχουν κοινά χαρακτηριστικά αλλά και διαφορές, με αποτέλεσμα τα δεδομένα τους να αποτελούν ικανοποιητικό δείγμα με απαραίτητη ποικιλομορφία με σκοπό την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ανίχνευση των σεισμικών κυμάτων. Τα σεισμικά φαινόμενα που επιλέχθηκαν έχουν επίκεντρο σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη ώστε η αναπτυχθείσα μεθοδολογία να είναι ανεξάρτητη από παραμέτρους όπως το γεωλογικό υπόβαθρο και η τεκτονική συμπεριφορά της περιοχής.

3.2 Οι σεισμοί

Τα σεισμικά γεγονότα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη αυτή, αποτελούν δύο σεισμοί μεγέθους 7.1 Μ της κλίμακας Ρίχτερ. Συγκεκριμένα πρόκειται για τον σεισμό της 30^{ης} Νοεμβρίου του 2018 στην περιοχή του Anchorage στην Αλάσκα, και τον σεισμό της 6^{ης} Ιουλίου του 2019 στην περιοχή του Ridgecrest στην Ανατολική Καλιφόρνια. Οι σεισμοί αυτοί έχουν την ίδια τιμή έντασης, αλλά ως φυσικά φαινόμενα διαφέρουν ως προς άλλα χαρακτηριστικά τους, όπως το εστιακό βάθος, το μηχανισμό γέννησης και τους τανυστές ροπής. Οι δύο αυτοί σεισμοί έλαβαν χώρα σε δύο περιοχές με διαφορετικό γεωλογικό και τεκτονικό υπόβαθρο και τοπογραφία.

Τα στοιχεία και οι πληροφορίες που παρουσιάζονται παρακάτω για τους δύο σεισμούς προέρχονται από την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Geological Survey, USGS). Μία από τις περιοχές μελέτης και έρευνας της υπηρεσίας αποτελεί και η παρακολούθηση και καταγραφή σεισμικών γεγονότων. Σε συνεργασία με άλλες τρεις υπηρεσίες που υπάγονται στο National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), γίνεται η εκτίμηση των επιπτώσεων και της επικινδυνότητας των σεισμικών φαινομένων καθώς και διεξάγονται έρευνες για τα αίτια δημιουργίας και τις επιδράσεις τους. Η υπηρεσία παρέχει εκτενείς αναφορές για τα γεγονότα, όπως μεταξύ άλλων, πληροφορίες και τεχνικά χαρακτηριστικά, δεδομένα και προϊόντα από την επεξεργασία τους. Παρατίθενται στην συνέχεια βασικές πληροφορίες για τα σεισμικά γεγονότα που μελετήθηκαν και τις περιοχές που αυτά έλαβαν χώρα.

3.2.1 Anchorage Αλάσκα

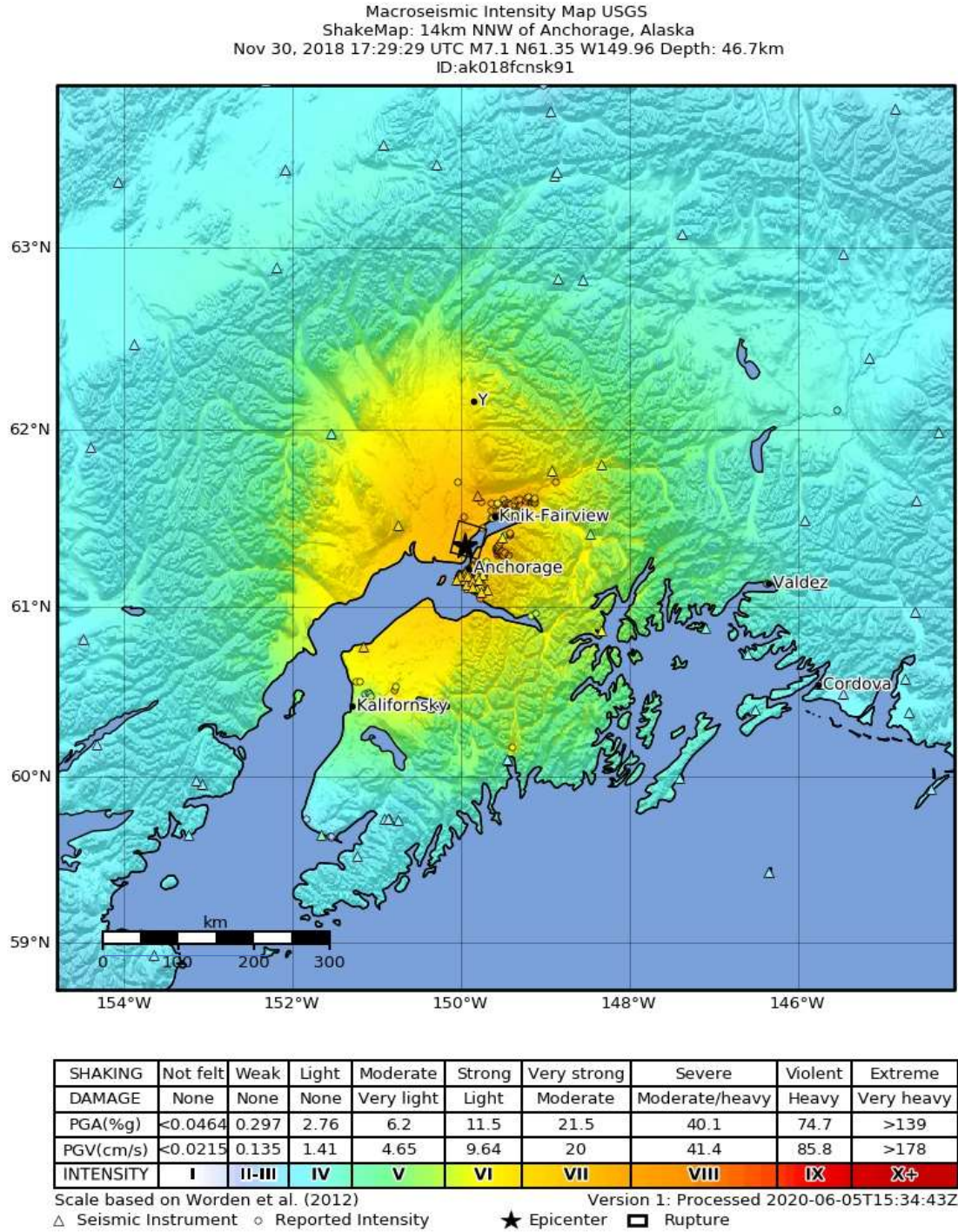
Ο σεισμός που έλαβε χώρα στις 30 Νοεμβρίου του 2018 και ώρα 17:29:29 (UTC) στην περιοχή του Anchorage της Αλάσκας, είχε εστιακό βάθος περίπου 40km και προκλήθηκε από κανονικό ρήγμα. Οι ακριβείς συντεταγμένες του επικέντρου δίνονται ως 61.346°N, 149.955°W από την USGS και το εστιακό βάθος του σεισμού 46.7 km. Σύμφωνα με την αναφορά της υπηρεσίας πρόκειται για ολίσθηση σε ρήγμα μετάπτωσης με διεύθυνση Βορρά – Νότου.

Η περιοχή του κόλπου της Αλάσκας πρόκειται για σεισμογενή περιοχή, λόγω της κίνησης της πλάκας του Ειρηνικού με ΒΔ κατεύθυνση σε σχέση με την πλάκα της Β. Αμερικής, με ταχύτητα περίπου 57mm/yr. Η πλάκα του Ειρηνικού καταβυθίζεται κάτω από την πλάκα της Αλάσκας στην περιοχή της τάφρου της Αλάσκα και των Αλεούτιων νήσων (Holbrook, et al., 1999). Η περιοχή αυτή είναι μόλις 150 km νοτιοανατολικά του επικέντρου του σεισμού που μελετάται.

Ο κόλπος της Αλάσκας βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του Αλεούτιου νησιωτικού τόξου που δημιουργείται από τις προαναφερθείσες τεκτονικές κινήσεις. Στην περιοχή αυτή, επιφανειακοί σεισμοί προκύπτουν ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης και της τάσης από την βορειο-δυτική σύγκλιση της πλάκας του Ειρηνικού και σύγκρουσής της με την Βόρειο Αμερικανική πλάκα. Σε ακτίνα 150Km από το επίκεντρο του σεισμού, τον τελευταίο αιώνα έχουν καταγραφεί πάνω από 14 σεισμοί με ένταση μεγαλύτερη των 6M από την USGS. Δύο από αυτούς, έντασης 6.6 και 6.4, σημειώθηκαν σε αντίστοιχο εστιακό βάθος. Ο μεγάλος σεισμός της Αλάσκας τον Μάρτιο 1964 με μέγεθος 9.4 M ήταν αποτέλεσμα ρήγματος επώθησης, η ρήξη του οποίου σημειώθηκε σε μήκος εκατοντάδων χιλιομέτρων ανάμεσα στην πόλη Anchorage και την τάφρο των Αλεούτιων νήσων.

Στην αναφορά της USGS (USGS, 2018) εκτιμάται πως σημαντική περιοχή επηρεάστηκε από κατολισθήσεις (> 10km²) και ρευστοποίηση του εδάφους (> 100km²) ως αποτέλεσμα των κινήσεων του εδάφους που προκλήθηκαν από τον σεισμό. Οκτώ πόλεις της περιοχής επηρεάστηκαν από το φαινόμενο σε κλίμακα VII της τροποποιημένης κλίμακας έντασης Μερκάλλι (Modified Mercalli Intensity scale, MMI), ενώ υπολογίζεται πως πληθυσμός χιλίων κατοίκων επηρεάστηκε σε επίπεδο VIII και 272 χιλιάδων σε επίπεδο VII.

Παρακάτω δίνεται ο χάρτης έντασης, ShakeMap του σεισμού (Χάρτης 3.1). Ο χάρτης αυτός αποτελεί προϊόν του προγράμματος σεισμικής επικινδυνότητας της USGS σε συνεργασία με τα τοπικά σεισμικά δίκτυα. Στον χάρτη παρέχονται πληροφορίες για τις κινήσεις του εδάφους και την ένταση των δονήσεων. Πιο συγκεκριμένα στην κλίμακα έντασης MMI που δίνεται στο υπόμνημα, αντιστοιχούνται η μέγιστη τιμή της ταχύτητας (Peak Ground Velocity, PGV) και επιτάχυνσης (Peak Ground Acceleration, PGA) του εδάφους και εκτιμήσεις των δονήσεων και των καταστροφών. Στον χάρτη σημειώνεται η θέση του επίκεντρου, της περιοχής διάρρηξης και των οργάνων μέτρησης της περιοχής.



Χάρτης 3.1: Χάρτης έντασης του σεισμικού γεγονότος στην περιοχή Anchorage την 30-11-2018. (USGS, 2018)

Στον χάρτη της περιοχής παρατηρείται πως η ένταση του σεισμού ήταν υψηλή (VII MMI) με πολύ δυνατές δονήσεις σε απόσταση μεγαλύτερη των 50km από το επίκεντρο. Στον άξονα βορρά-νότου, υψηλή ένταση καταγράφηκε σε μεγαλύτερη ακόμα απόσταση από το επίκεντρο (>100km). Οι πόλεις Anchorage και Knik-Fairview βρίσκονται εντός της ζώνης αυτής. Στις περιοχές αυτές η ταχύτητα του εδάφους έφτασε έως και 20cm/s. Ο σεισμός έγινε αισθητός με μικρότερη ένταση (IV MMI) σε περιοχές εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά του επικέντρου, γεγονός που οφείλεται στο μέγεθος του φαινομένου.

3.2.2 Ridgecrest Καλιφόρνια

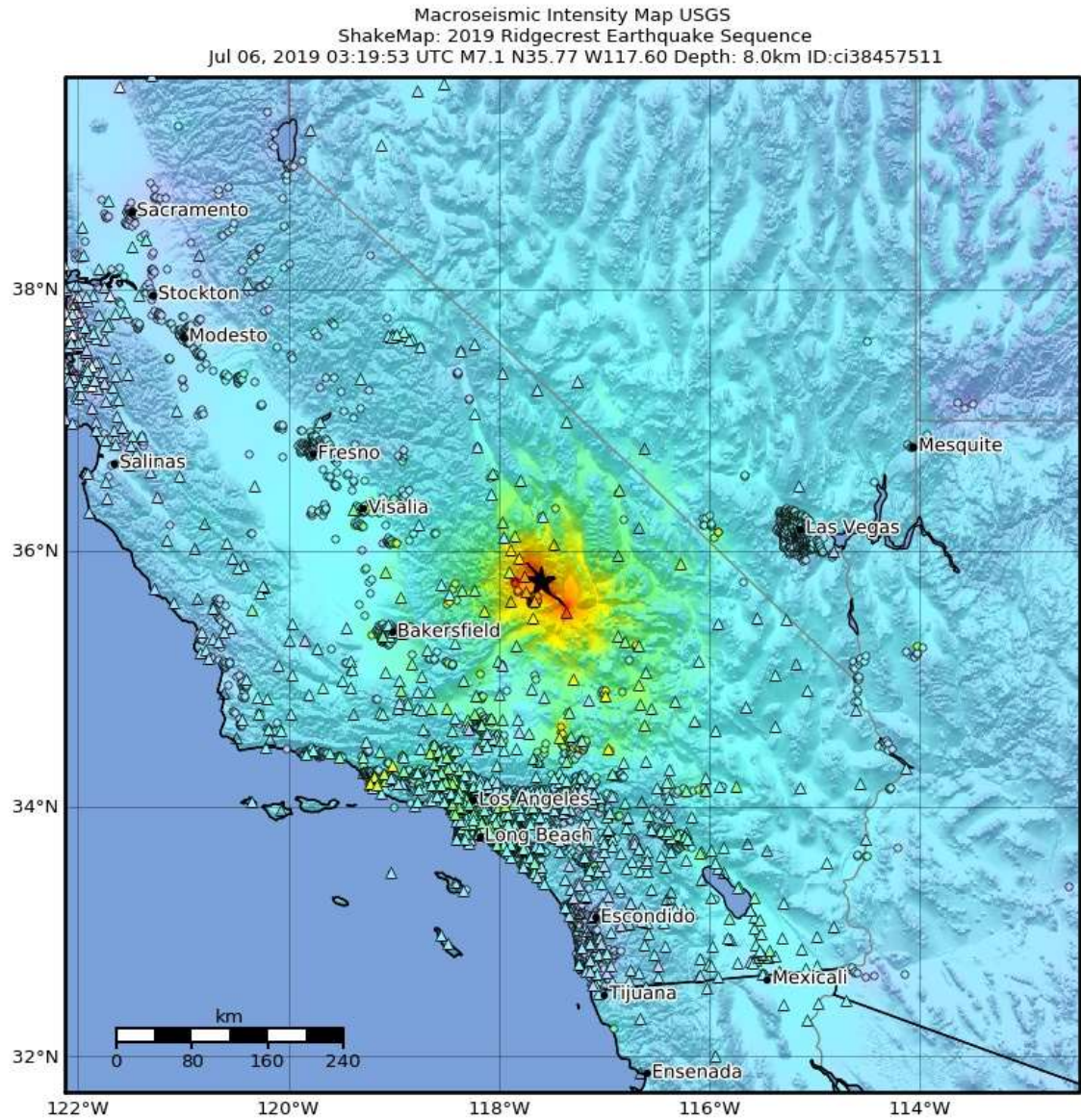
Την 6^η Ιουλίου του 2019 και ώρα 03:19:53 (UTC) καταγράφηκε σεισμός με μέγεθος 7.1 M στην περιοχή του Ridgecrest της Καλιφόρνια. Το επίκεντρο εντοπίζεται στην ανατολική Καλιφόρνια και συγκεκριμένα 35.770°N, 117.599°W και σε βάθος 8km. Ο σεισμός υπήρξε αποτέλεσμα ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης ή μετασχηματισμού στον φλοιό την Βόρειο Αμερικάνικης τεκτονικής πλάκας.

Σε απόσταση 150km περίπου νοτιοανατολικά από το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Πιο συγκεκριμένα το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα είναι ένα ηπειρωτικό ρήγμα μετατόπισης με οριζόντια κίνηση που εκτείνεται σε μήκος μεγαλύτερο των 1000km κατά μήκος της ακτής της Καλιφόρνιας και του Μεξικού. Το ρήγμα αυτό αποτελεί το όριο μεταξύ της πλάκας του Ειρηνικού με την Βορειο-Αμερικανική πλάκα. Η Ειρηνική πλάκα κινείται βορειοδυτικά σε σχέση με την δεύτερη με ταχύτητα περίπου 48mm/yr. Το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται στην ζώνη διάτμησης λόγω της κίνησης των δύο πλακών. Σημειώνεται πως σεισμοί τέτοιας έντασης σε ρήγματα μετάπτωσης δεν αποτελούν σημειακά μεγέθη αλλά πρόκειται για φαινόμενα πολλών χιλιομέτρων σε μήκος.

Ο σεισμός αυτός έλαβε χώρα 34 ώρες μετά από ένα συμβάν μεγέθους 6.4 M, μόλις 11km νοτιοδυτικά, την 4^η Ιουλίου. Ο σεισμός της 4^η Ιουλίου προηγήθηκε από μικρότερης έντασης και διάρκειας προσεισμούς (εκ των οποίων ένας με ένταση 4M) και πολλούς μετασεισμούς, σχεδόν 250 μεγαλύτερους του 2.5M και δύο μεγαλύτερους από 5M μέχρι και τον σεισμό της 6^{ης} Ιουλίου.

Σύμφωνα με την αναφορά της USGS (USGS, 2019) η εκτιμώμενη επιφάνεια που επηρεάστηκε από κατολισθήσεις λόγω του συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος ήταν περιορισμένη (1-10km²) όπως και περιορισμένη ήταν η επιφάνεια που επηρεάστηκε από την ρευστοποίηση του εδάφους (10-100km²). Σε τρεις πόλεις και οικισμούς καταγράφηκε ένταση στην τροποποιημένη ύψους VII της κλίμακας MMI και υπολογίζεται ότι συνολικά 47χιλιάδες κάτοικοι της περιοχής επηρεάστηκαν από ένταση VI-VII.

Δίνεται παρακάτω ο χάρτης έντασης της υπηρεσίας USGS (Χάρτης 3.2). Σε αυτόν δίνεται η θέση του επικέντρου και της διάρρηξης που προκλήθηκε. Παρατηρείται πως στην περιοχή που βρίσκεται σε ζώνη 80km από το επίκεντρο η ένταση του σεισμού ήταν ύψους μεγαλύτερης από VI της κλίμακας MMI. Μεγαλύτερη τιμή έντασης καταγράφηκε κατά μήκος της διάρρηξης που σε σημεία φτάνει την βαθμίδα VIII της κλίμακας MMI. Στα σημεία αυτά οι δονήσεις ήταν ισχυρές και η ταχύτητα του εδάφους έφτασε τα 40cm/s. Δυνατές δονήσεις κατέγραψαν και όργανα μέτρησης που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση (>150km) και οι δονήσεις του σεισμού έγιναν αισθητές σε επίπεδο II- III MMI σε απόσταση πολλών εκατοντάδων χιλιομέτρων.



SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy
PGA(%g)	<0.0464	0.297	2.76	6.2	11.5	21.5	40.1	74.7	>139
PGV(cm/s)	<0.0215	0.135	1.41	4.65	9.64	20	41.4	85.8	>178
INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based on Worden et al. (2012)

△ Seismic Instrument ○ Reported Intensity

★ Epicenter □ Rupture

Version 1: Processed 2020-06-03T01:17:33Z

Χάρτης 3.2: Χάρτης έντασης του σεισμικού γεγονότος στην περιοχή του Ridgecrest την 06-07-2019. (USGS, 2019)

3.3 Μόνιμοι Σταθμοί

Όπως γίνεται φανερό από τα στοιχεία των δύο σεισμών, πρόκειται για μεγάλης έντασης σεισμικά φαινόμενα που είχαν ως αποτέλεσμα έντονες κινήσεις του εδάφους. Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα ανίχνευσης των κινήσεων αυτών σε δεδομένα που προέρχονται από μετρήσεις μόνιμων σταθμών GNSS στις δύο περιοχές.

Τα δεδομένα για την μελέτη προέρχονται από 14 μόνιμους σταθμούς GNSS, εκ των οποίων οι 12 χωροθετούνται στην Ανατολική Καλιφόρνια και οι 2 στην Αλάσκα (Εικόνες 3.1 και 3.2). Πρόκειται για μόνιμους σταθμούς με συχνότητα καταγραφής έως και 5Hz.

Οι σταθμοί αυτοί ανήκουν στο δίκτυο NOTA (Network of the Americas), το οποίο αποτελεί έργο της παγκόσμιας κοινότητας γεωεπιστημόνων για την έρευνα σε τομείς όπως ο προσδιορισμός της κίνησης των τεκτονικών πλακών, δυναμικές μετακινήσεις που οφείλονται σε σεισμούς και ηφαιστειακές εκρήξεις καθώς και τη τηλεπισκοπική παρακολούθηση της τροπόσφαιρας και ιονόσφαιρας. Το δίκτυο NOTA περιλαμβάνει τα δίκτυα EarthScope Plate Boundary Observatory με σταθμούς στην Αλάσκα τις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες και το Πουέρτο Ρίκο, το δίκτυο TIALOCNet στο Μεξικό και το δίκτυο COCONet στην Καραϊβική. Το δίκτυο NOTA λειτουργεί η υπηρεσία GAGE (National Science Foundation Geodetic Facility for the Advancement of Geoscience) υπό την διαχείριση της UNAVCO.



Εικόνα 3.1 & 3.2: Φωτογραφίες των σταθμών r093 (αριστερά) και r463 (δεξιά). Πηγή: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/SitePhotos/>

Οι 14 σταθμοί που μελετήθηκαν βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 100km από τα επίκεντρα των σεισμών και επιλέχθηκαν με βάση την διαθεσιμότητα των δεδομένων τους και την υψηλή συχνότητα καταγραφής τους (5Hz). Οι πίνακες που ακολουθούν (Πίνακες 3.1 και 3.2) περιλαμβάνουν τον τετραψήφιο κωδικό των σταθμών που μελετήθηκαν και την απόστασή τους από το επίκεντρο του εκάστοτε σεισμού.

Ridgecrest CA	
Station Code	Distance from epicenter (km)
P595	20
P594	24
CCCC	24
P580	40
P463	48
RAMT	49
P570	60
P569	64
P597	64
P592	65
P596	69
P093	99

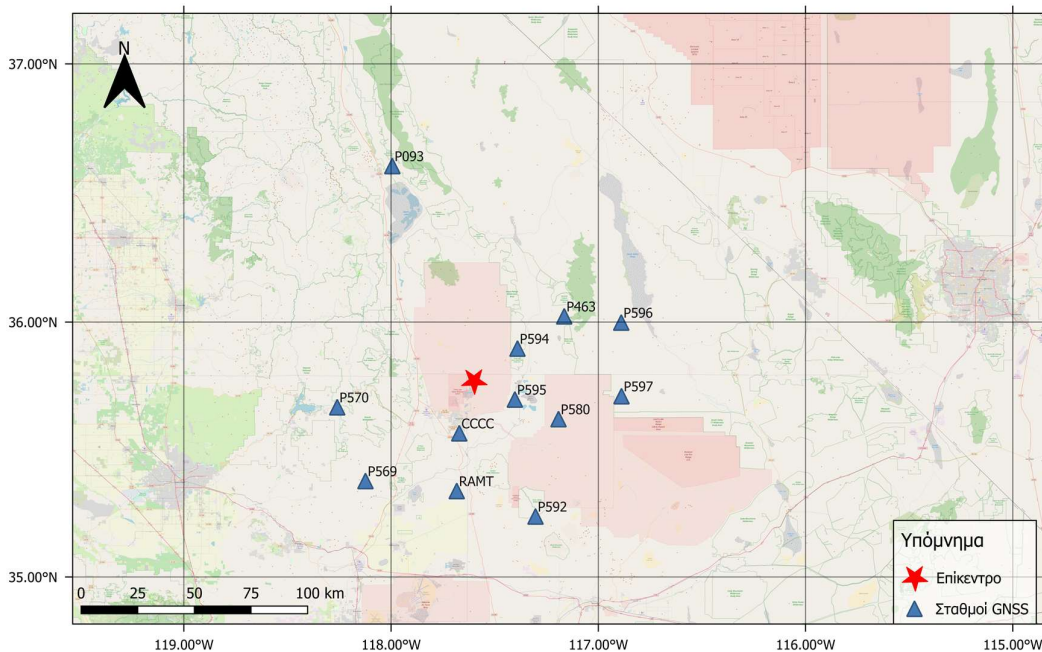
Πίνακας 3.3: Οι σταθμοί GNSS στην περιοχή του Ridgecrest και η απόστασή τους από το επίκεντρο.

Anchorage AK	
Station Code	Distance from epicenter (km)
AC44	24
AC53	47

Πίνακας 3.2: Οι σταθμοί GNSS στην περιοχή του Anchorage και η απόστασή τους από το επίκεντρο.

Οι σταθμοί αυτοί είναι χωροθετημένοι γύρω από το επίκεντρο του σεισμού. Η διασπορά τους ήταν θεμιτή για την μελέτη των κινήσεων του εδάφους σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και αποστάσεις από το επίκεντρο. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική διασπορά των 12 σταθμών που βρίσκονται στην περιοχή της Ανατολικής Καλιφόρνιας των σταθμών δίνεται γραφικά στον Χάρτη 3.3.

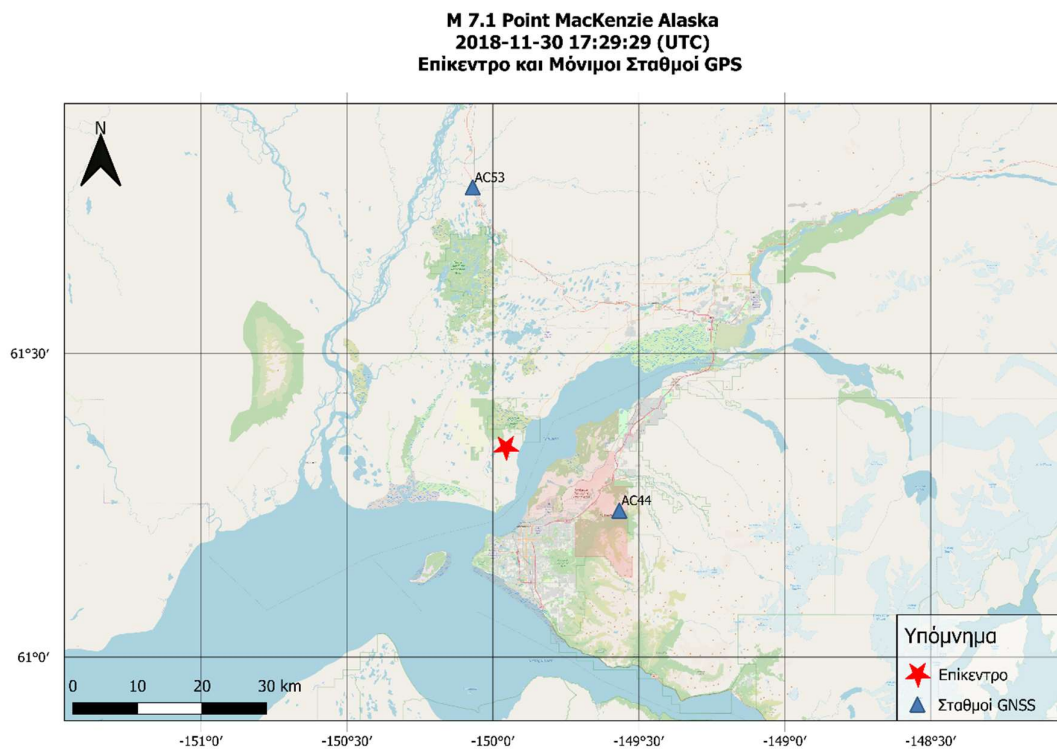
M 7.1 - 2019 Ridgecrest Earthquake
2019-07-06 03:19:53 (UTC)
Επίκεντρο και Μόνιμοι Σταθμοί



Χάρτης 3.4: Χάρτης μόνιμων σταθμών GNSS στην περιοχή Ridgecrest της Καλιφόρνια, γύρω από το επίκεντρο του σεισμού.

Οι σταθμοί της περιοχής είναι εξοπλισμένοι με τον ίδιο τύπο δέκτη (GPS-only Trimble NetRS) και κεραία (arrow-band GPS-only choke ring), διαφέρουν όμως ως προς την θεμελίωσή τους ανάλογα με το είδος του εδάφους της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένοι. Το υψόμετρο των σταθμών κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος, από τα 400m έως τα 1700m.

Οι δύο σταθμοί μελέτης στην περιοχή της Αλάσκας βρίσκονται σε απόσταση 24km και 47km από το επίκεντρο του σεισμού. Φέρουν δέκτες ίδιου τύπου (GPS-only Trimble NetRS) με τους σταθμούς υπόλοιπους σταθμούς μελέτης και βρίσκονται σε υψόμετρο μικρότερο των 850m. Η θέση τους σε σχέση με το επίκεντρο δίνεται παρακάτω στον Χάρτη 3.4.



Χάρτης 3.5: Χάρτης μόνιμων σταθμών GNSS στην περιοχή Anchorage της Αλάσκας, γύρω από το επίκεντρο του σεισμού.

3.4 Αρχεία

Η UNAVCO παρέχει μεταξύ άλλων GPS/GNSS, TLS, και SAR δεδομένα και προϊόντα αυτών, για την χρήση τους από την επιστημονική κοινότητα. Τα αρχεία των σταθμών λήφθηκαν από το κέντρο δεδομένων της UNAVCO/GAGE σε μορφή RINEX 3.0. Τα αρχεία RINEX αποτελούν το πρότυπο ανταλλαγής πρωτογενών δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού, και είναι κατάλληλα για την μετέπειτα επεξεργασία τους από χρήστες. Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση και τον υπολογισμό των χρονοσειρών θέσης των σταθμών, σε συνδυασμό με αρχεία διορθώσεων των υπηρεσιών IGS και CNES.

Τα αρχεία που λήφθηκαν αφορούν τους 14 σταθμούς μελέτης για παρατηρήσεις συχνότητας 5Hz. Τα αρχεία που αφορούν τους σταθμούς της Αλάσκας περιέχουν παρατηρήσεις διάρκειας 1 ώρας και τα αρχεία που αφορούν τους σταθμούς της Καλιφόρνια παρατηρήσεις 30 λεπτών.

Κεφάλαιο 4^ο: Μεθοδολογία

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία και ανάλυση των χρονοσειρών θέσης από τα δεδομένα GNSS. Η μεθοδολογία χωρίζεται σε 4 ενότητες: Την επίλυση των αρχείων των σταθμών με την μέθοδο PPP και την χρήση του λογισμικού BKG Ntrip Client, την μορφοποίηση των χρονοσειρών που παράχθηκαν από την επίλυση, την στατιστική τους ανάλυση και τέλος την ανάλυση τριών βημάτων για την παραγωγή αποτελεσμάτων. Τα τρία βήματα της ανάλυσης αποτελούν: η στροφή των χρονοσειρών, το φιλτράρισμά τους, και η εφαρμογή ενός κινητού μέσου όρου. Τα τελικά αποτελέσματα για την ανίχνευση των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων, δίνονται από τον υπολογισμό της μέγιστης διαφοράς διαδοχικών μετρήσεων. Η μεθοδολογία ακολουθήθηκε για τα δεδομένων των 14 σταθμών μελέτης που αφορούν και τα δύο σεισμικά γεγονότα.

4.2 Επίλυση - BKG Ntrip Client

Το λογισμικό BKG Ntrip Client (BNC) είναι ένα πρόγραμμα ταυτόχρονης αποκωδικοποίησης, μετατροπής και επεξεργασίας ροών δεδομένων GNSS σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Χαρτογραφίας και Γεωδαισίας (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG) της Γερμανίας στα πλαίσια της επιτροπής EUREF και της Παγκόσμιας Γεωδαιτικής Υπηρεσίας, IGS (Stürze, et al., 2016).

Το λογισμικό BNC μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου και για την εκ των υστέρων επεξεργασία δεδομένων. Κρίθηκε κατάλληλη η χρήση του στα πλαίσια της εργασίας αυτής διότι υποστηρίζει την επίλυση με την μέθοδο PPP (Precise Point Positioning) χρησιμοποιώντας μετρήσεις κώδικα και φάσης από σταθμούς GNSS, καθώς και συνδυασμούς αυτών απαλλαγμένους από επιδράσεις της ιονόσφαιρας. Κατά την επίλυση, το λογισμικό διενεργεί αυτόματα τις διορθώσεις που αφορούν τις παλίρροιες του γήινου φλοιού και τις αποκλίσεις του κέντρου φάσης των κεραιών των δεκτών.

Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα εισόδου – input:

- Τα αρχεία RINEX παρατηρήσεων και πλοήγησης των σταθμών για την ημέρα του συμβάντος από την υπηρεσία IGS.
- Ένα αρχείο μορφότυπου ANTEX της υπηρεσίας IGS που περιλαμβάνει τις διορθώσεις για τα σφάλματα κέντρου φάσης των κεραιών των δεκτών και δορυφόρων.
- Ένα αρχείο διορθώσεων CLK93 (της συγκεκριμένης ημέρας του έτους) της Γαλλικής Υπηρεσίας CNES.
- Ένα αρχείο ASCII με τις αργιόρι συντεταγμένες (X,Y,Z) [m] του εκάστοτε σταθμού και τις τρεις συνιστώσες (N,E,U) [m] για την εκκεντρότητα των κεραιών και τους κωδικούς των κεραιών όπως αυτοί αναγράφονται στο αρχείο ANTEX.

Το λογισμικό επιτρέπει την εισαγωγή σφαλμάτων για τις αργιόρι συντεταγμένες και την εισαγωγή θορύβου για την μεταβολή των τριών συνιστωσών (N,E,U). Σφάλματα μπορούν να προσδιοριστούν και για το εφαρμοζόμενο μοντέλο της τροπόσφαιρας και το θόρυβο αυτής. Συγκεκριμένα, ως σφάλμα για τις αργιόρι συντεταγμένες των σταθμών ορίστηκε στα 0.001m και ο θόρυβος των μετρήσεων στα 0.01m. Το σφάλμα για την εκτίμηση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης ορίστηκε στα 0.1 m και η μεταβολή (θόρυβος) του τροποσφαιρικού σφάλματος στα 0.01 m κατά την διάρκεια μίας ώρας, για δεδομένα συχνότητας 1Hz (0.054 ανά ώρα για 5Hz).

Επιπλέον, το συγκεκριμένο λογισμικό επιτρέπει την επιλογή παραμέτρων για επίλυση με την μέθοδο PPP. Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήσεις των δεκτών μόνο από το σύστημα GPS και επιλέχθηκε η χρήση παρατηρήσεων κώδικα και φάσης και συγκεκριμένα ο γραμμικός συνδυασμός αυτών, (P3&L3) απαλλαγμένος από τις επιδράσεις της ιονόσφαιρας. Προσδιορίστηκε η βαρύτητα των σφαλμάτων κώδικα και φάσης στα 50m και 0.01m αντίστοιχα. Επιπλέον, επιλέχθηκε ως μέγιστος αριθμός υπολοίπων για την επίλυση στις παρατηρήσεις κώδικα το 4.0 και στις παρατηρήσεις φάσης το 0.03. Τέλος, ορίστηκε η ελάχιστη γωνία ύψους των δορυφόρων από τον ορίζοντα οι 10° και ο ελάχιστος αριθμός παρατηρήσεων για την εκάστοτε μέτρηση οι τέσσερις (4).

Τα αποτελέσματα της επίλυσης δίνονται από το λογισμικό σε αρχείο μορφής NMEA (National Marine Electronics Association) (Version 0813). Το αρχείο αυτό αποτελείται από δύο προτάσεις για κάθε λύση, GPWGGA και GPRMC. Στην πρόταση GPWGGA περιέχονται το υπολογισμένο γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το υψόμετρο και άλλα στοιχεία της λύσης (αριθμός δορυφόρων, ποιότητα της λύσης, στοιχεία της κεραίας, μονάδες) ενώ στην πρόταση GPRMC περιέχονται πληροφορίες για την ημερομηνία και την ώρα.

4.3 Μορφοποίηση αποτελεσμάτων επίλυσης

Για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης στο πλαίσιο της εργασίας, έγινε μία αρχική επεξεργασία για την μορφοποίηση των δεδομένων. Η επεξεργασία αυτή αφορά στην μορφοποίηση του χρόνου και της ημερομηνίας που δίνεται στο αρχείο NMEA, για κάθε λύση σε μία εποχή (epoch), για την εκάστοτε λύση καθώς και στην μορφοποίηση των μονάδων του γεωγραφικού μήκους και πλάτους από εξηκονταδική σε δεκαδική μορφή. Λόγω της διαφορετικής διάρκειας των δεδομένων που ήταν διαθέσιμα, η χρονική διάρκεια των μετρήσεων για τους σταθμούς που αφορούν το σεισμικό συμβάν στην Αλάσκα είναι μία (1) ώρα και για τους σταθμούς που αφορούν το σεισμικό γεγονός στο Ridgecrest 30 λεπτά. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα στην περίπτωση της Αλάσκας έχουν διάρκεια από τις 17:00:00 έως τις 18:00:00 της 30/11/2018 και τα δεδομένα του Ridgecrest από τις 03:00:00 έως τις 03:30:00. Ο ορισμός ίσης χρονικής διάρκειας για όλα τα δεδομένα επιτρέπει την άμεση σύγκριση αυτών καθώς και των αποτελεσμάτων της μελέτης τους, στο προσδιορισμένο χρονικό πλαίσιο.

Τέλος, έγινε η μετατροπή του γεωγραφικού πλάτους και μήκους που υπολογίστηκαν από το λογισμικό BNC σε γραμμικά μεγέθη. Η επιλογή της μετατροπής σε γραμμικό μέγεθος και συγκεκριμένα σε μήκος τόξου μεσημβρινού και μήκος τόξου παραλλήλου έγινε με σκοπό την ευκολότερη παρατήρηση και μελέτη της κίνησης των σταθμών στο χρόνο. Η μετατροπή έγινε πάνω στο γήινο ελλειψοειδές εκ περιστροφής με παραμέτρους τον μικρό ημιάξονα a , και πρώτη εκκεντρότητα όπως αυτές ορίζονται στο ελλειψοειδές αναφοράς GRS80 (Moritz, 2000):

$$a = 6378137 \text{ m}$$

$$e^2 = 0.006\ 694\ 380\ 022\ 90$$

Με τα στοιχεία αυτά και λαμβάνοντας ως τιμή του γεωγραφικού πλάτους ϕ , την μέση τιμή των υπολογισμένων λύσεων του εκάστοτε σταθμού, υπολογίστηκαν η ακτίνα καμπυλότητας της μεσημβρινής τομής ρ και η ακτίνα του παράλληλου κύκλου (Βέης, et al., 2009):

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \quad [m]$$

$$r = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad [m]$$

Τέλος υπολογίστηκαν το μήκος τόξου του μεσημβρινού και παραλλήλου με την χρήση των παρακάτω τύπων. Ως $d\varphi$ και $d\lambda$ ορίστηκαν οι διαφορές του υπολογισμένου γεωγραφικού μήκους και πλάτους από τον αντίστοιχο μέσο όρο τους:

$$dM = \rho d\varphi \quad [m]$$

$$L = r d\lambda \quad [m]$$

Οι τιμές dM και L που υπολογίστηκαν για τις χρονικές στιγμές των μετρήσεων των σταθμών μελέτης αποθηκεύτηκαν ως ξεχωριστές συνιστώσες και στο εξής θα αναφέρονται ως *συνιστώσες* dM και L και το σύνολο των υπολογισμένων τιμών τους στο ορισμένο χρονικό πλαίσιο μελέτης σε σχέση με τον χρόνο, ως *χρονοσειρές* με μονάδες τα μέτρα (m).

4.4 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων

Σε αυτό το στάδιο έγινε η στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών για την κατανόηση του συστήματος που τις διέπει και των χαρακτηριστικών του. Κατά την ανάλυση αυτή, οι χρονοσειρές των δύο συνιστωσών του εκάστοτε σταθμού αναλύθηκαν ως προς την μορφή, την στασιμότητα και την αυτοσυσχέτιση τους. Η ανάλυση αυτή γίνεται για την κατανόηση των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν και ως προς περιορισμούς που αυτά ενδέχεται να θέσουν στην μελέτη τους και την μοντελοποίηση τους στα επόμενα βήματα της μελέτης. Η ανάλυση των χρονοσειρών γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν την στοχαστικότητα των δεδομένων του συστήματος (δυναμικό θόρυβο, dynamical or system noise) καθώς και της μέτρησης (θόρυβος παρατήρησης, observational noise).

4.4.1 Ιστογράμματα

Για την γραφική απεικόνιση της μορφής του δείγματος και της κατανομής των τιμών του, χρησιμοποιήθηκαν ιστογράμματα. Τα ιστογράμματα αποτελούν την γραφική αναπαράσταση των συχνοτήτων (σχετικών, αθροιστικών) εμφάνισης των τιμών του δείγματος που μελετάται. Με την χρήση των ιστογραμμάτων μπορεί να μελετηθεί η συμμετρία και η διασπορά του δείγματος από την μορφή του διαγράμματος, καθώς και να ξεχωρίσουν εύκολα οι ακραίες τιμές (outliers) που ενδέχεται να αποτελούν σφάλματα. Να σημειωθεί πως η τυχαία μεταβλητή που εξετάζεται είναι η τιμή της παρατήρησης που προέκυψε από την επίλυση για τις δύο συνιστώσες dM και L των σταθμών και πρόκειται για συνεχή μεταβλητή.

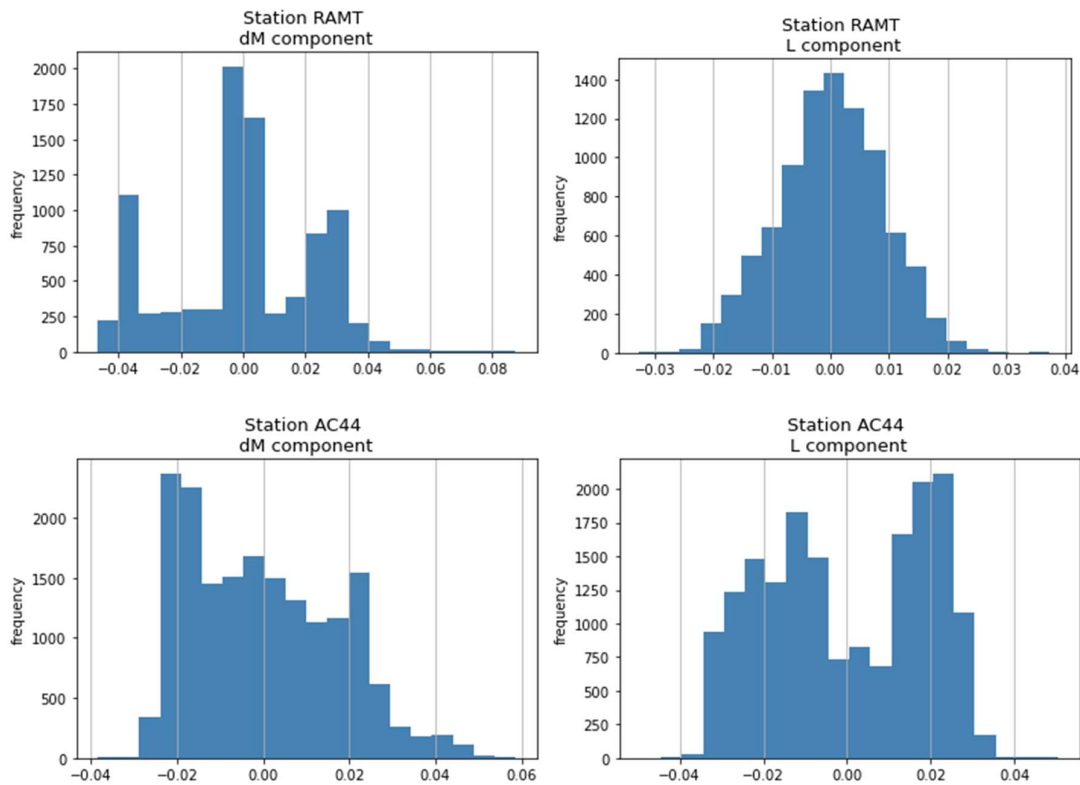
Τα ιστογράμματα χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση του σχήματος της κατανομής του δείγματος. Το σχήμα της κατανομής είναι σημαντικό χαρακτηριστικό του δείγματος και παρέχει πληροφορίες για την επικρατούσα τιμή, την κεντρική τάση και το εύρος του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί αν υπάρχουν παραπάνω από μία επικρατούσες τιμές, πράγμα το οποίο μπορεί να σημαίνει την ύπαρξη υποπληθυσμών στο δείγμα. Επιπλέον, τα ιστογράμματα είναι πολύ εύχρηστα για την σύγκριση μεταξύ δειγμάτων και στην συγκεκριμένη περίπτωση μεταξύ συνιστωσών του ίδιου σταθμού όπως και μεταξύ σταθμών. Τέλος, με βάση τη μορφή του δείγματος, τα ιστογράμματα μπορεί να αποτελέσουν μία εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής.

Ιστογράμματα δημιουργήθηκαν για τις συνιστώσες όλων των σταθμών στις δύο περιοχές μελέτης. Η διακύμανση των παρατηρήσεων των σταθμών στο χρονικό διάστημα της μίας ώρας, στο οποίο

συνέβησαν τα σεισμικά γεγονότα, είναι δυνατόν να υποδείξει την μεταβολή στην θέση του σταθμού και το μέγεθος αυτής. Επιπλέον, η μελέτη της μορφής των ιστογραμμάτων σε σχέση με την απόσταση τους από το επίκεντρο ενδέχεται να δώσει πληροφορίες για την ένταση της δυναμικής μετακίνησης στην οποία έχουν υποστεί οι σταθμοί ανάλογα με την θέση τους.

Στα ιστογράμματα που δημιουργήθηκαν, απεικονίζεται η συχνότητα εμφάνισης των τιμών των συνιστωσών dM και L, όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω, δηλαδή των υπολοίπων των παρατηρήσεων από το μέσο όρο της χρονοσειράς. Οι διακυμάνσεις της κλίμακας των εκατοστών είναι αναμενόμενη λόγω της ακρίβειας της μεθόδου εντοπισμού από την οποία προκύπτουν οι παρατηρήσεις. Ενδιαφέρον έγκειται στην μελέτη του μεγέθους της διακύμανσης και της εμφάνισης περισσότερων από μία κορυφών που υποδεικνύουν την μετακίνηση λόγω της έντασης του φαινομένου.

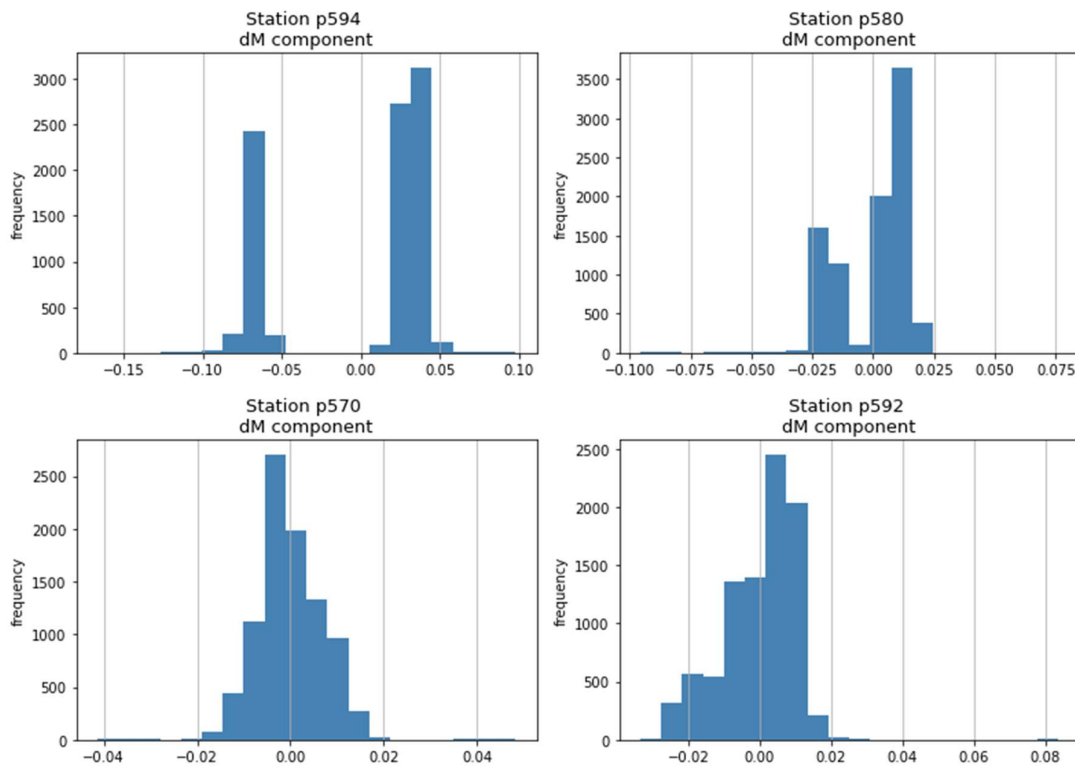
Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως τα ιστογράμματα των δύο συνιστωσών του εκάστοτε σταθμού διαφέρουν σημαντικά στην μορφή τους. Αυτό ενδέχεται να συμβαίνει λόγω της διαφορετικής φοράς ταλάντωσης του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κύματος, και της μεγαλύτερης έντασης του δευτέρου. Στα παρακάτω διαγράμματα των σταθμών RAMT και AC44, των δύο περιοχών μελέτης, η παραπάνω παρατήρηση γίνεται εύκολα αντιληπτή.



Διάγραμμα 4.1: Ιστογράμματα των συνιστωσών dM και L των σταθμών RAMT και AC44.

Επιπλέον, τα ιστογράμματα μελετήθηκαν σε σχέση με την απόσταση των σταθμών από το επίκεντρο. Οι σταθμοί p594, p580, p570 και p592, που παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα, απέχουν απόσταση 24km, 40km, 60km και 62km αντίστοιχα από το επίκεντρο του σεισμού στο Ridgecrest. Παρατηρείται, πως στους δύο πλησιέστερους σταθμούς, τα ιστογράμματα εμφανίζουν δύο διακριτές κορυφές με ελάχιστη ή λίγη διασπορά γύρω από τον μέσο τους. Οι κορυφές του πλησιέστερου σταθμού βρίσκονται σε μεγαλύτερη μεταξύ τους απόσταση, γεγονός που τονίζει την εντονότερη

μεταβολή της θέσης του. Οι σταθμοί που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το επίκεντρο εμφανίζουν μορφή πλησιέστερη στην αναμενόμενη, με μεγαλύτερη διασπορά τιμών που είναι κατανομημένη γύρω από την μέση τιμή της χρονοσειράς, υποδεικνύοντας μικρότερη μετακίνηση του σταθμού. Αξίζει να σημειωθεί, πως και στα δύο διαγράμματα των σταθμών p570 και p592 εμφανίζονται ακραίες τιμές, περίπου 2 εκατοστά από το εύρος της διακύμανσης του σταθμού, που ενδέχεται να οφείλονται στην δυναμική μετακίνηση του σταθμού από το σεισμικό γεγονός, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια απόδειξη για αυτό. Από την γενική εικόνα των τεσσάρων αυτών χρονοσειρών επιβεβαιώνεται η γενική παρατήρηση πως η ένταση των σεισμικών κυμάτων ελαττώνεται σε σχέση με την απόσταση από το επίκεντρο. Τέλος, από την μορφή των ιστογραμμάτων συμπεραίνεται πως τα δεδομένα δεν ακολουθούν κάποια γνωστή κατανομή.



Διάγραμμα 4.2: Ιστογράμματα των συνιστωσών dM και L των σταθμών p580 και p592.

4.4.2 Στασιμότητα

Για την μελέτη των στατιστικών ιδιοτήτων των δειγμάτων σε σχέση με τον χρόνο, έγινε μελέτη τους ως προς την στασιμότητα τους. Αν ιδιότητες όπως η μέση τιμή και η διασπορά παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της, τότε πρόκειται για μία (ασθενή) στάσιμη στοχαστική διαδικασία. Η μελέτη της στασιμότητας γίνεται με σκοπό την εύρεση τυχόν μεταβολών στην κατανομή πιθανότητας της διαδικασίας, τάσεων (trends), εποχιακών επιδράσεων, και μεταβολές του μέσου και της διασποράς.

Η μελέτη της στασιμότητας των χρονοσειρών έγινε με την χρήση του στατιστικού τεστ Augmented Dickey Fuller Test (ADF). Η μηδενική υπόθεση αυτού του τεστ υποδηλώνει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας (unit root) στην εξίσωση του δυναμικού μοντέλου που περιγράφει την διαδικασία, και η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας συνεπάγεται με την μη-στασιμότητα του δείγματος. Τα αποτελέσματα του τεστ και το p-value υπολογίστηκε μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή (0.05) για όλες τις χρονοσειρές, το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας και επομένως, τη μη-στασιμότητά τους.

Στους πίνακες 4.1 και 4.2, δίνονται επί παραδείγματι, τα αποτελέσματα του ADF τεστ για τους σταθμούς AC44 και p580, για τις δύο συνιστώσες dM και L. Συγκρίνοντας την τιμή του p-value με τις κρίσιμες τιμές για τις τέσσερις περιπτώσεις που παρουσιάζονται, φαίνεται πως αυτή είναι μεγαλύτερη και επομένως οι χρονοσειρές των συνιστωσών δεν είναι στάσιμες.

AC44	dM	L
	ADF Statistic: -1.695803 p-value: 0.433276 Critical Values: 1%: -3.431 5%: -2.862 10%: -2.567	ADF Statistic: -1.892321 p-value: 0.335682 Critical Values: 1%: -3.431 5%: -2.862 10%: -2.567

p580	dM	L
	ADF Statistic: -2.541598 p-value: 0.105678 Critical Values: 1%: -3.431 5%: -2.862 10%: -2.567	ADF Statistic: -0.990616 p-value: 0.756672 Critical Values: 1%: -3.431 5%: -2.862 10%: -2.567

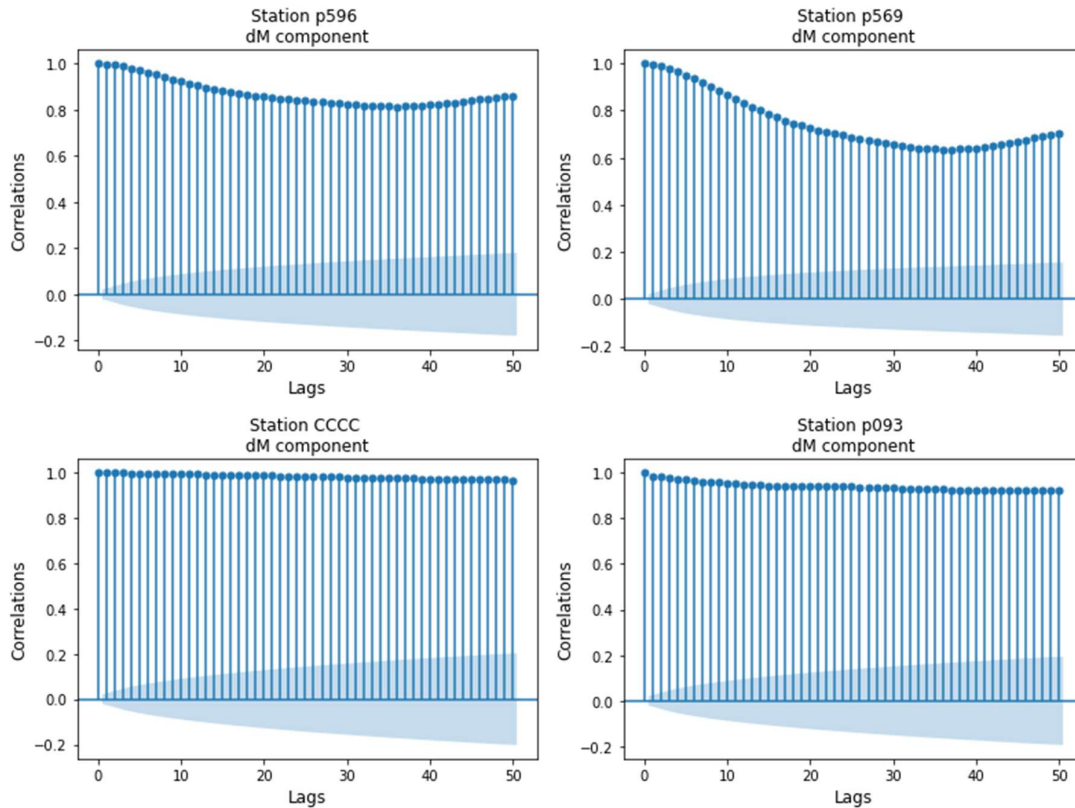
Πίνακας 4.1-4.2: Πίνακες αποτελεσμάτων του στατιστικού τεστ Augmented Dickey Fuller (ADF) για τις συνιστώσες των σταθμών AC44 και p580.

4.4.3 Αυτοσυσχέτιση

Για τον έλεγχο τυχαιότητας στο δείγμα και την συσχέτιση των παρατηρήσεων τους, οι χρονοσειρές μελετήθηκαν ως προς την αυτοσυσχέτισή τους. Η μελέτη αυτή κρίθηκε απαραίτητη και χρήσιμη εφόσον πολλά στατιστικά τεστ εξαρτώνται από την τυχαιότητα του δείγματος. Επιπρόσθετα, οι διαδοχικές τιμές παρατηρήσεων στις χρονοσειρές ενδέχεται συχνά να συσχετίζονται. Η μελέτη της αυτοσυσχέτισης μπορεί να φανεί χρήσιμη στον εντοπισμό εποχικότητας/περιοδικότητας και τάσεων του δείγματος.

Η ανάλυση της αυτοσυσχέτισης των παρατηρήσεων των χρονοσειρών έγινε με την χρήση διαγραμμάτων αυτοσυσχέτισης. Το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης δίνει την αυτοσυσχέτιση του δείγματος σε σχέση με τον εαυτό του σε διάφορες χρονικές καθυστερήσεις (lag). Αν δεν πρόκειται για τυχαίο δείγμα, μία ή παραπάνω αυτοσυσχετίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το 0. Η θετική αυτοσυσχέτιση είναι δείγμα πως το σύστημα τείνει να παραμένει σταθερό από την μία παρατήρηση στην άλλη.

Στην περίπτωση αυτή έγινε χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson για τον υπολογισμό της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών. Ο συντελεστής Pearson παίρνει τιμές από -1 έως 1. Οι μηδενικές τιμές του συντελεστή υποδηλώνουν τη μη συσχέτιση. Οι θετικές τιμές του συντελεστή υποδεικνύουν την θετική συσχέτιση των μεταβλητών και οι αρνητικές τιμές την αρνητική συσχέτιση. Το διάστημα εμπιστοσύνης που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 95%.



Διάγραμμα 4.3: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης της συνιστώσας dM για τους σταθμούς CCCC, p596, p569 και p093.

Στο διάγραμμα 4.3 απεικονίζονται τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των σταθμών CCCC, p596, p569 και p093, για την συνιστώσα dM. Από την μελέτη αυτών είναι φανερό η έντονη θετική αυτοσυσχέτιση των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης δίνονται στον κάθετο άξονα και οι τιμές των χρονικών καθυστερήσεων για τις οποίες υπολογίστηκε στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων. Το διάστημα εμπιστοσύνης 95% παρουσιάζεται με την σκιαγραφημένη περιοχή. Οι χρονοσειρές που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα είναι ενδεικτικές της θετικής αυτοσυσχέτισης όλων των δεδομένων που μελετήθηκαν. Όλες οι χρονοσειρές και των δύο συνιστωσών υπολογίστηκαν να έχουν θετική αυτοσυσχέτιση με τιμές του συντελεστή συσχέτισης που υπερβαίνουν το 0.6. Το αποτέλεσμα αυτό δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την απόσταση του σταθμού από το επίκεντρο. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως οι χρονοσειρές δεν αποτελούν λευκό θόρυβο και επιπλέον δεν υπάρχει περιοδικότητα στις παρατηρήσεις.

4.5 Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα τρία βήματα της ανάλυσης των χρονοσειρών που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων. Τα βήματα αυτά είναι η στροφή των χρονοσειρών, το φιλτράρισμα και η εφαρμογή κινητού μέσου όρου στα δεδομένα. Τα αποτελέσματα εξάγονται με τον υπολογισμό της μέγιστης διαφοράς μεταξύ δύο διαδοχικών παρατηρήσεων και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.5.1 Στροφή

Για την καλύτερη μελέτη της μετακίνησης που υπέστησαν οι σταθμοί λόγω των σεισμικών κυμάτων που διήλθαν σε αυτούς, έγινε στροφή των δεδομένων των χρονοσειρών. Επειδή η κίνηση των πρωτεύοντων κυμάτων γίνεται κατά την διεύθυνση διάδοσης και η κίνηση των δευτερευόντων

κυμάτων είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης, η μελέτη της μετακίνησης των σταθμών πρέπει να γίνει στις δύο αυτές διευθύνσεις. Αυτό θα επιτρέψει σε πρώτο στάδιο την διαφοροποίηση των κινήσεων που προκλήθηκαν από τα δύο κύματα. Σε δεύτερο στάδιο, επιτυγχάνεται η ανίχνευση της χρονικής στιγμής που το εκάστοτε κύμα διέρχεται από τον σταθμό και επιπλέον μελετάται η διαφορά στην ένταση της μετακίνησης σε κάθε διεύθυνση.

Για τον σκοπό αυτό, ως γωνία στροφής ορίστηκε το γεωδαιτικό αζιμούθιο του ευθυγράμμου τμήματος που ενώνει το επίκεντρο του σεισμού με τον εκάστοτε σταθμό. Η γωνία υπολογίστηκε με την χρήση των συντεταγμένων του επικέντρου που δίνονται από την υπηρεσία USGS και την μέση τιμή των χρονοσειρών των συνιστωσών κάθε σταθμού. Ένα νέο τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς καθορίστηκε γύρω από κάθε σταθμό, του οποίου ο άξονας x' ταυτίζεται με την διεύθυνση που ενώνει το επίκεντρο με τον σταθμό και ο άξονας y' είναι κάθετος στην διεύθυνση αυτή.

Τα δεδομένα όλων των χρονοσειρών στράφηκαν δεξιόστροφα προς την αντίστοιχη γωνία που ορίστηκε από την θέση του σταθμού που ανήκουν. Αυτό έγινε με χρήση ενός πίνακα στροφής, έτσι ώστε η διαμήκης συνιστώσα να ταυτιστεί με τον άξονα x' του συστήματος του σταθμού και συνεπώς η κάθετη συνιστώσα να ταυτιστεί με τον αντίστοιχο άξονα y' . Ο πίνακας στροφής που χρησιμοποιήθηκε έχει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

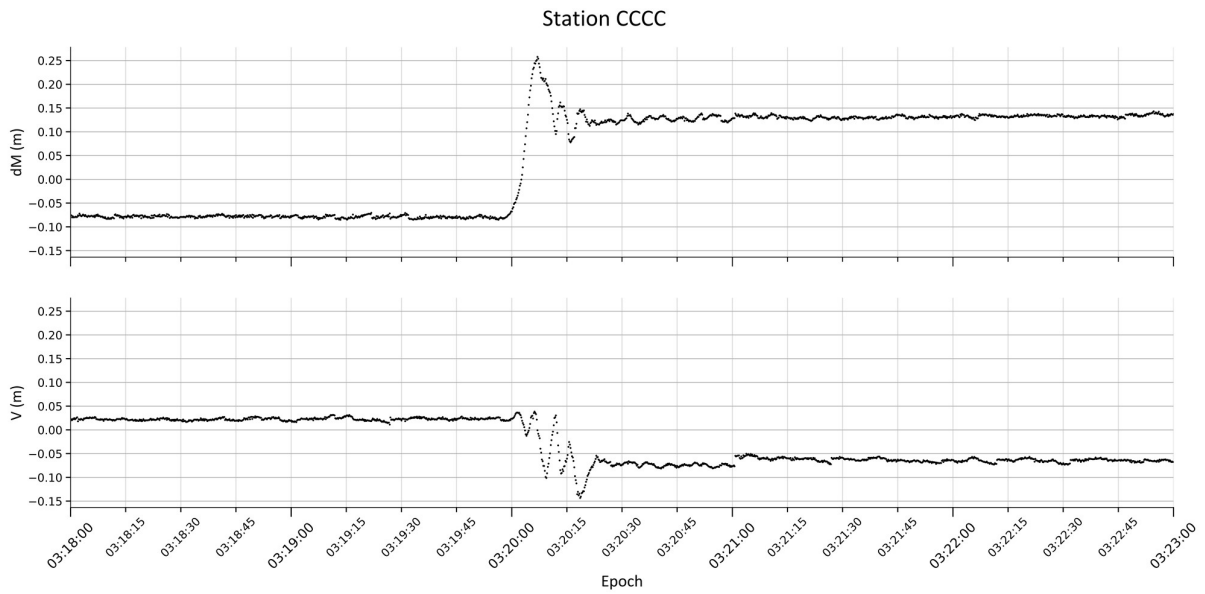
Όπου α , το αζιμούθιο που υπολογίστηκε για κάθε σταθμό.

Οι χρονοσειρές που προέκυψαν από την στροφή των dM και L θα αναφέρονται στο εξής ως *συνιστώσες* και U αντίστοιχα.

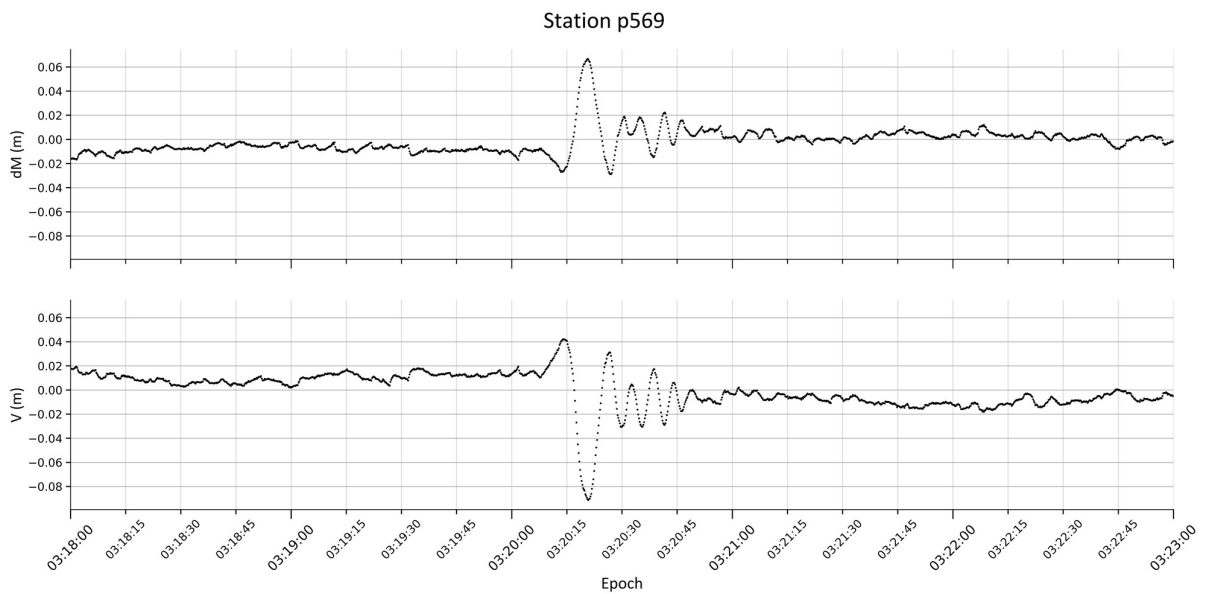
Στο διάγραμμα παρακάτω παρουσιάζονται οι κάθετες συνιστώσες dM των σταθμών CCCC, p569 και RAMT και οι συνιστώσες V , που προέκυψαν μετά την στροφή. Από την σύγκριση των χρονοσειρών είναι φανερό πως ενώ πρόκειται για την ίδια δυναμική μετακίνηση του σταθμού, η μετακίνηση δεν είναι ίδια σε όλες τις διευθύνσεις. Σε αντίθεση με τις συνιστώσες dM και L που περιείχαν κινήσεις του σταθμού σε άξονα αυθαίρετο σε σχέση με την διάδοση και ταλάντωση των σεισμικών κυμάτων, στις συνιστώσες U και V γίνεται ο διαχωρισμός των μετακινήσεων του σταθμού ανάλογα με την διεύθυνση. Η παρατήρηση της κάθετης προς την διάδοση των κυμάτων διεύθυνση (άξονας y'), που ταυτίζεται με την διεύθυνση ταλάντωσης των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων, παρέχει πληροφορίες για την μετακίνηση του σταθμού ως αποτέλεσμα των εν λόγω κυμάτων. Αντίστοιχα και οι μετακινήσεις που παρατηρούνται στην διεύθυνση x' , οφείλονται στις ταλαντώσεις των πρωτευόντων κυμάτων.

Οι παραπάνω θεωρήσεις πρόκειται για απλούστευση των κινήσεων που προκαλούν τα σεισμικά κύματα. Οι κινήσεις που προκαλούνται στα σωματίδια του φλοιού από την ενέργεια που μεταφέρουν τα σεισμικά κύματα είναι πιο περίπλοκες και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως το γεωλογικό υπόβαθρο, η τοπογραφία της περιοχής και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Να τονιστεί επίσης, πως στην μελέτη δεν έχουν ληφθεί υπόψιν τα επιφανειακά κύματα και οι κινήσεις που αυτά προκαλούν στους σταθμούς.

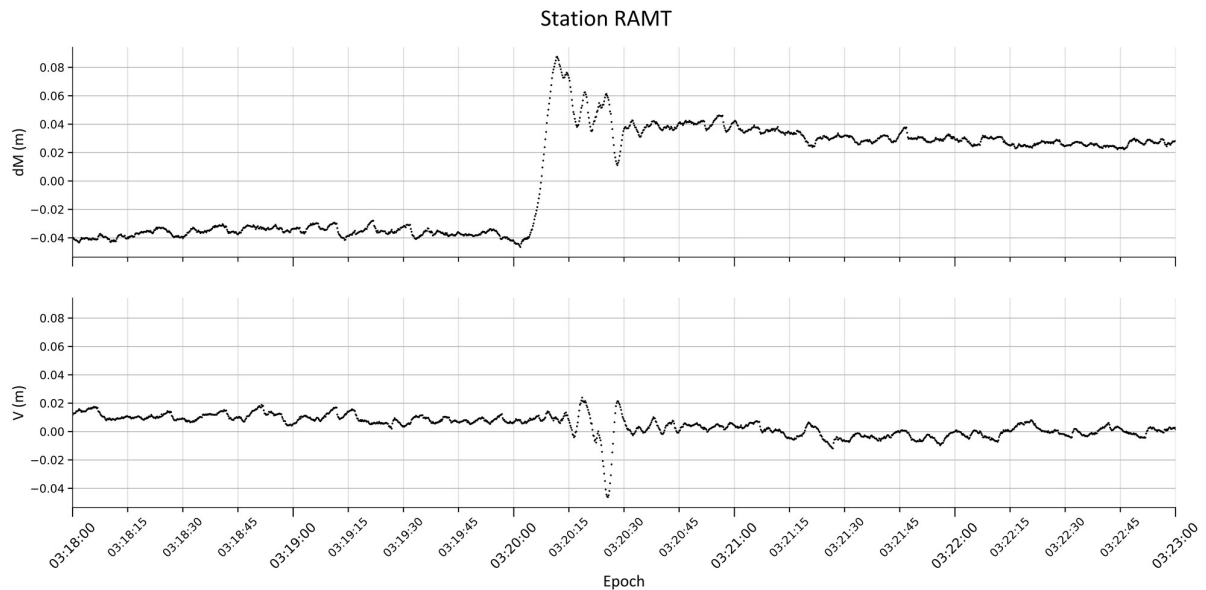
Η παρουσίαση των διαγραμμάτων 4.4 έως 4.6 παρακάτω, έχει σκοπό να τονίσει την σημασία της στροφής στην ανάλυση των χρονοσειρών.



Διάγραμμα 4.4 : Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού CCCC.



Διάγραμμα 4.5 : Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού p569.



Διάγραμμα 4.6: Χρονοσειρά της συνιστώσας dM (πριν την στροφή) και V (μετά την στροφή) του σταθμού RAMT.

4.5.2 Φίλτρο Kalman

Το επόμενο βήμα της ανάλυσης αποτέλεσε το φιλτράρισμα των χρονοσειρών θέσης U και V . Οι παρατηρήσεις κώδικα και φάσης που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση και τον υπολογισμό θέσεων των σταθμών, είναι επιρρεπείς σε θόρυβο. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητο βήμα στην ανάλυση το φιλτράρισμα των δεδομένων, με σκοπό την απομάκρυνση τυχόν ακραίων τιμών που ενδέχεται να οφείλονται στον θόρυβο των παρατηρήσεων. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η πιθανότητα για λανθασμένη ερμηνεία τους ως μετακινήσεις που οφείλονται στα σεισμικά κύματα ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η γενική μορφή και τάση των χρονοσειρών. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις: ένας αλγόριθμος εξομάλυνσης Kalman (Kalman Smoother) και ένα Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter).

Το φίλτρο Kalman αποτελεί μία σειρά εξισώσεων που συνδυάζουν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων καθώς και προηγούμενες γνώσεις για το σύστημα και τα όργανα μέτρησης, με σκοπό την παραγωγής μίας εκτίμησης της επιθυμητής μεταβλητής, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται στατιστικά το σφάλμα (Maybeck, 1979). Το φίλτρο αυτό είναι ιδιαίτερα ισχυρό για τον λόγο ότι μπορεί να υπολογίσει εκτιμήσεις καταστάσεων για παρελθοντικά, παροντικά και μελλοντικά δεδομένα, ακόμα και αν δεν είναι γνωστό με λεπτομέρεια το μοντέλο που περιγράφει το σύστημα (Welch & Bishop, 2001). Ο αλγόριθμος αυτός κρίθηκε κατάλληλος για την παρούσα μελέτη και το φιλτράρισμα των δεδομένων λόγω της ικανότητας του να ενσωματώνει τον θόρυβο των παρατηρήσεων αλλά και την δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων των δυναμικών μοντέλων που χρησιμοποιεί.

Έγινε χρήση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων για την εφαρμογή του φίλτρου στα δεδομένα των χρονοσειρών. Η μία προσέγγιση θεωρεί την μετάβαση από την μία παρατήρηση στην επόμενη ως γραμμική, ενώ στην δεύτερη προσέγγιση η μετάβαση θεωρείται πως δεν γίνεται γραμμικά. Οι παραγόμενες χρονοσειρές των δύο προσεγγίσεων διαφέρουν και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο για την παραγωγή αποτελεσμάτων.

1^η προσέγγιση

Ο αλγόριθμος εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί έναν αλγόριθμο χωρίς επίβλεψη για την παρακολούθηση ενός αντικειμένου σε ένα σύστημα χώρου καταστάσεων (state space). Ο αλγόριθμος αυτός επιτρέπει την ανάκτηση της «αληθινής» κατάστασης του αντικειμένου μέσα από θορυβώδη δεδομένα.

Ο αλγόριθμος καθορίζεται από τους αρχικοποιημένους όρους του μέσου και της συνδιασποράς της κατάστασης, τους πίνακες μετάβασης, απόκλισης και συνδιασποράς και τους αντίστοιχους πίνακες που αφορούν τις μετρήσεις (πίνακας μετρήσεων, απόκλισης και συνδιασποράς). Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό του πιθανολογικού δυναμικού μοντέλου που ακολουθούν τα μετρούμενα και εκτιμώμενα μεγέθη. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υποθέτει την ύπαρξη ενός γραμμικού – Γκαουσιανού μοντέλου (Linear Gaussian Model). Στο μοντέλο αυτό θεωρήθηκε πως η κατάσταση του συστήματος είναι διάνυσμα 2×1 και ορίζεται από την τιμή της εκάστοτε συνιστώσας (dM ή L) και την ταχύτητα της.

Το γραμμικό Γκαουσιανό μοντέλο θεωρεί πως για όλα τα χρονικά βήματα η μεταβλητή x_0 ακολουθεί την Γκαουσιανή (κανονική) κατανομή και η μεταβλητές x_{t+1} και το z_t αποτελούν αφινικούς μετασχηματισμούς της x_t με προσθήκη γκαουσιανού θορύβου. Το μοντέλο προσδιορίζεται από το διακριτό δυναμικό σύστημα με καταστατικές εξισώσεις που φαίνονται παρακάτω:

$$x_{t+1} = A_t x_t + w$$

$$z_t = C_t x_t + v$$

Όπου:

x , το διάνυσμα της κατάστασης

z , το διάνυσμα των μετρήσεων

A , ο πίνακας μετάβασης

C , ο πίνακας των μετρήσεων

$W \sim N(0, Q)$ και $v \sim N(0, R)$ διανύσματα που έχουν χαρακτηριστικά λευκού θορύβου, για Q την συνδιασπορά μετάβασης και R συνδιασπορά των μετρήσεων.

Το χρονικό βήμα (dt) ορίστηκε ως $0.2s$ (ίση με την συχνότητα των παρατηρήσεων) και έγινε αρχικοποίηση του μέσου μ_0 της κατάστασης με την τιμή της πρώτης μέτρησης της χρονοσειράς. Πίνακα μετρήσεων αποτέλεσε το διάνυσμα των δεδομένων για την εκάστοτε χρονοσειρά και ο πίνακας μετάβασης ορίστηκε ως εξής:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ο αλγόριθμος εξομάλυνσης κάνει την εκτίμηση της κατάστασης για χρόνο t , όπου $t=[0, n_{\text{χρονικά βήματα}} - 1]$, κάνοντας χρήση όλων των μετρήσεων $P(x_t | z_{0:T-1})$.

Αποτέλεσμα της χρήσης του αλγορίθμου στα δεδομένα των χρονοσειρών ήταν ο υπολογισμός της μέσης τιμής των καταστάσεων για τις τιμές της χρονοσειράς.

2^η προσέγγιση

Η δεύτερη προσέγγιση έκανε χρήση της εφαρμογής του Εκτεταμένου Φίλτρου Kalman (Extended Kalman Filter, EKF) στα δεδομένα των χρονοσειρών. Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκε κατά την πρώτη προσέγγιση, σε αυτή τη προσέγγιση το μοντέλο των μετρήσεων θεωρείται μη γραμμικό και η επιτάχυνση του συστήματος λαμβάνεται υπόψη κατά την διαμόρφωση του δυναμικού μοντέλου state-space.

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα δυναμικό μοντέλο όπως και παραπάνω, με την διαφορά πως οι εξισώσεις που το αποτελούν δεν είναι γραμμικές. Στην υλοποίηση του αλγορίθμου EKF γίνεται επιπλέον χρήση ενός μοντέλου μετρήσεων για τον υπολογισμό της συνδιακύμανσης των υπολοίπων που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του πίνακα κέρδους (Kalman Gain) για την ενημέρωση/επικαιροποίηση της συνδιακύμανσης της εκτίμησης της κατάστασης. Επιτρέπει δηλαδή την χρήση των μετρήσεων (θεωρώντας το σφάλμα τους) για την καλύτερη εκτίμηση των καταστάσεων του συστήματος.

Το μοντέλο state-space που χρησιμοποιήθηκε έχει την εξής μορφή:

$$x_t = Tx_{t-1} + H_{t-1}u_{t-1} + w$$

Όπου:

x_t , το διάνυσμα των καταστάσεων των μεταβλητών

T , ο πίνακας μετάβασης

H , ο πίνακας συντελεστών

u , το διάνυσμα ελέγχου

w , ο θόρυβος του συστήματος, όπως ορίστηκε στην προσέγγιση 1.

Αντικαθιστώντας την παραπάνω εξίσωση με τους πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}_{t-1} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(dt)^2 & 0 \\ dt & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \end{bmatrix}_{t-1} + w$$

Το μοντέλο των μετρήσεων παραμένει ίδιο με αυτό στην προσέγγιση 1:

$$z_t = H_t x_t + v$$

Όπου:

z_t , το διάνυσμα των μετρήσεων

H , ο πίνακας των μετρήσεων

V , ο θόρυβος του συστήματος όπως ορίστηκε στην προσέγγιση 1.

Όπως και στην πρώτη προσέγγιση το dt ορίστηκε 0.2s. Η ταχύτητα της πρώτης μέτρησης θεωρείται μηδενική.

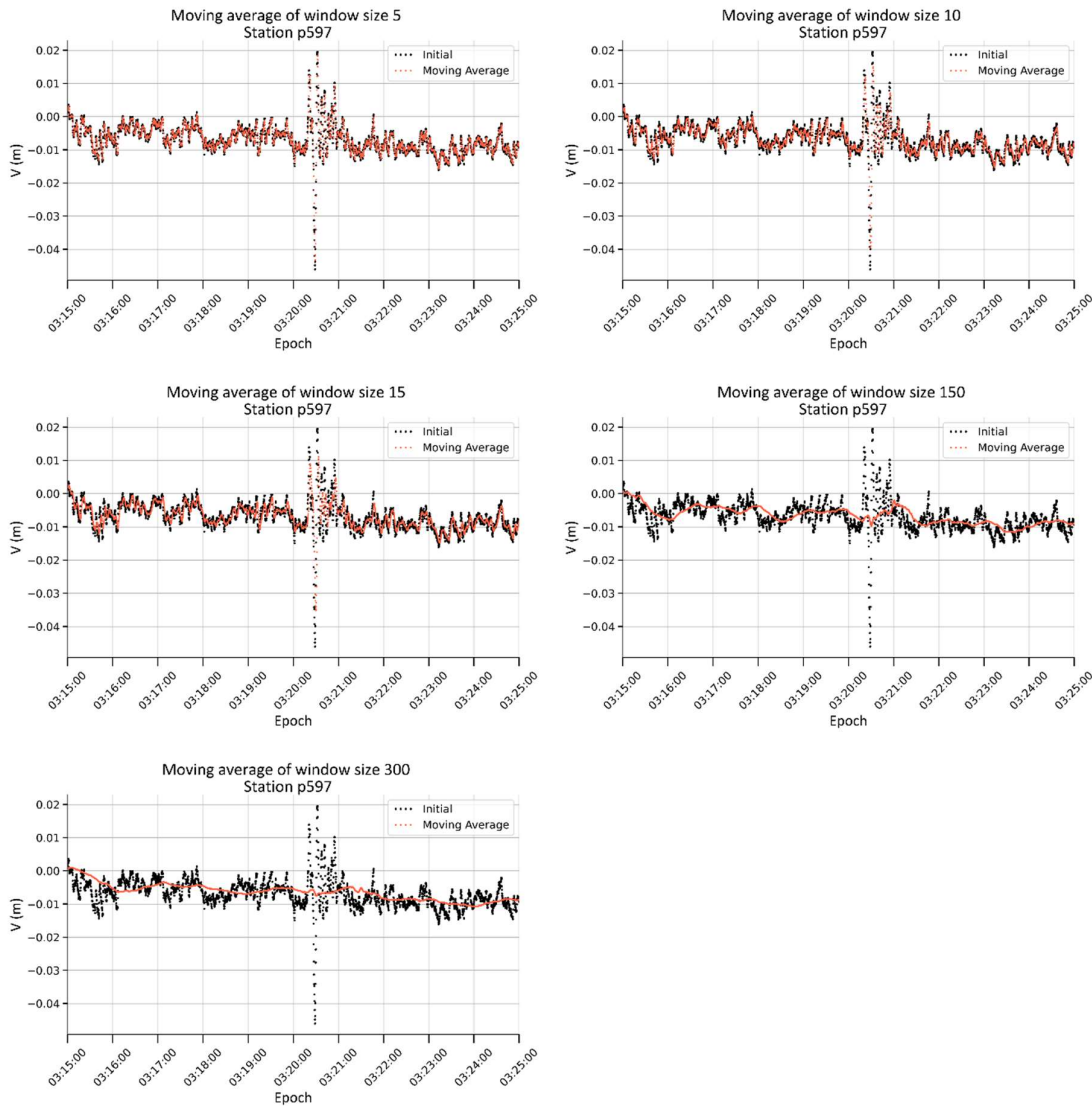
Το αποτέλεσμα την εφαρμογής αυτού του αλγορίθμου στις χρονοσειρές αποτέλεσε ο υπολογισμός των βέλτιστων εκτιμήσεων της κατάστασης της εκάστοτε μέτρησης, με την χρήση των προηγούμενων μετρήσεων.

4.5.3 Κινητός μέσος όρος

Για την περαιτέρω εξομάλυνση των χρονοσειρών από περιοδικές διακυμάνσεις και μικρές μεταβολές, στα δεδομένα εφαρμόστηκε ένας κινητός μέσος όρος. Ο κινητός μέσος όρος (ΚΜΟ) είναι ο υπολογισμός της μέσης τιμής ενός υποσυνόλου διαδοχικών τιμών με ορισμένο μέγεθος (παράθυρο). Το παράθυρο μετατοπίζεται κατά μία τιμή, και επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός για το επόμενο υποσύνολο μέχρι την τελευταία τιμή των δεδομένων, δημιουργώντας μία χρονοσειρά από μέσους. Ο ΚΜΟ αποτελεί ένα είδος φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response, FIR) που χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση χρονοσειρών για την ανάδειξη μακροχρόνιων τάσεων. Ο σκοπός του βήματος αυτού στην ανάλυση ήταν διασφάλιση στατιστικά σημαντικών υπολοίπων μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων για να γίνει χρήση τους στον υπολογισμό των διαφορών και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Στα δεδομένα των χρονοσειρών εφαρμόστηκε ένας απλός κινητός μέσος όρος (χωρίς την υποβολή συντελεστών βαρύτητας στις μετρήσεις), για πέντε διαφορετικά μεγέθη παραθύρου: 300, 150, 15, 10 και 5. Τα παράθυρα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό των μέσων τιμών των χρονοσειρών για τα χρονικά διαστήματα του 1 λεπτού, 30, 3, 2 και 1 δευτερολέπτου αντίστοιχα, ομαλοποιώντας με αντίστοιχο τρόπο τις διακυμάνσεις των χρονοσειρών. Όλες χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν από τις εφαρμογές του κινητού μέσου όρου με τα αντίστοιχα μεγέθη παραθύρων, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό αποτελεσμάτων.

Στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διαφόρων παραθύρων του κινητού μέσου όρου στην χρονοσειρά του σταθμού p597. Είναι φανερό πως για μικρές τιμές παραθύρου, ο κινητός μέσος όρος διατηρεί πιστά το σχήμα της αρχικής χρονοσειράς, με διαφορές που διακρίνονται στις πιο ακραίες τιμές, ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος του παραθύρου απαλείφονται οι έντονες διακυμάνσεις, διατηρώντας μόνο την γενική τάση των δεδομένων. Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν και τα 5 μεγέθη παραθύρου.



Διάγραμμα 4.7: Διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης του κινητού μέσου όρου στην συνιστώσα V του σταθμού p597 για διάφορα μεγέθη παραθύρου.

4.5.4 Υπολογισμός Διαφορών

Το τελευταίο βήμα στην ανάλυση αποτελεί ο εντοπισμός της κίνησης του σταθμού που οφείλεται στην διέλευση των σεισμικών κυμάτων από αυτόν. Αυτό έγινε με τον υπολογισμό διαφορών μεταξύ διαδοχικών τιμών στις χρονοσειρές των συνιστωσών V . Οι συνιστώσες V είναι κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος και θεωρείται πως οι μεταβολές στην διεύθυνση αυτή οφείλονται στην διέλευση του δευτερεύοντος σεισμικού κύματος, εφόσον η διεύθυνση ταλάντωσης τους συμπίπτει με την διεύθυνση της συνιστώσας V . Οι διαφορές αυτές υπολογίζονται μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων για όλο το μήκος της χρονοσειράς και εντοπίζεται η μεγαλύτερη, σε απόλυτη τιμή, εξ αυτών. Στην συνέχεια γίνεται η αντιστοίχιση της εποχής που λαμβάνει χώρα η μέγιστη διαφορά, και θεωρείται αυτή ως η χρονική στιγμή κατά την οποία το κύμα διέρχεται από τον σταθμό.

Ο υπολογισμός της μέγιστης διαφοράς έγινε στις χρονοσειρές όλων των σταθμών για 6 διαφορετικές περιπτώσεις και για τα 5 διαφορετικά μεγέθη παραθύρων του κινητού μέσου όρου. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά υπολογίστηκε για τις χρονοσειρές U και V, όπως αυτές προέκυψαν:

- α) μετά την στροφή
- β) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου εξομάλυνσης Kalman
- γ) μετά την εφαρμογή του κινητού μέσου όρου
- δ) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου εξομάλυνσης και του κινητού μέσου όρου
- ε) μετά την εφαρμογή του Εκτεταμένου Φίλτρου Kalman
- στ) μετά την εφαρμογή του Εκτεταμένου Φίλτρου Kalman και του κινητού μέσου όρου

Στις περιπτώσεις γ, δ και στ οι διαφορές υπολογίστηκαν και για τα 5 παράθυρα του κινητού μέσου όρου 5, 10, 15, 150 και 300 τιμών.

Ο υπολογισμός των μέγιστων διαφορών στις συνιστώσες U έγινε για την χρήση της εποχής που αντιστοιχεί σε αυτές ως κριτήριο για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 5^ο : Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διάφορων περιπτώσεων μεθοδολογίας για τις χρονοσειρές των συνιστωσών V όλων των σταθμών που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και αναλύονται ως προς την εγκυρότητά και αξιοπιστία τους. Με την χρήση κριτηρίων γίνεται η επιλογή της μεθοδολογίας με τα βέλτιστα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται και διαγραμματικά. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας και η σύγκριση τους με στοιχεία και δεδομένα από τους ίδιους σταθμούς βάσει αναφορών από την υπηρεσία της UNAVCO.

5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης

Τα αποτελέσματα των μέγιστων διαφορών που υπολογίστηκαν για τις συνιστώσες των σταθμών ενδιαφέροντος δίνονται παρακάτω. Για κάθε χρονοσειρά υπολογίστηκε η μέγιστη διαφορά δύο διαδοχικών παρατηρήσεων για 6 περιπτώσεις και 5 παράθυρα κινητού μέσου όρου, όπως δόθηκε αναλυτικά στο Κεφ 4. Στους παρακάτω πίνακες αναγράφονται η μέγιστη τιμή και η εποχή που αυτή έλαβε χώρα για τους σταθμούς p595 (Πιν. 5.1) , CCCC (Πιν. 5.1), p580 (Πιν. 5.2), p569 (Πιν. 5.3), p592 (Πιν. 5.4), AC44 (Πιν. 5.5) και AC53 (Πιν. 5.6).

Οι πίνακες αφορούν τόσο την διαμήκη συνιστώσα U, όσο και την εγκάρσια συνιστώσα V του εκάστοτε σταθμού που μελετήθηκε. Και για τις δύο συνιστώσες υπολογίστηκε οι τιμή της μέγιστης διαφοράς (diff) δύο διαδοχικών παρατηρήσεων ή παραθύρων παρατηρήσεων. Η τιμή αυτή ακολουθείται από την χρονική εποχή (epoch) κατά την οποία έλαβε χώρα. Οι περιπτώσεις για τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές αναφέρονται στα αριστερά του πίνακα και είναι κατά σειρά: Η μέγιστη διαφορά δύο διαδοχικών τιμών στα δεδομένα των χρονοσειρών όπως αυτά προέκυψαν μετά την στροφή τους (Max diff), μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου εξομάλυνσης Kalman (Max diff Kalman), μετά την επιβολή ΚΜΟ αντίστοιχου παραθύρου (Max diff MA), για την εφαρμογή του αλγορίθμου εξομάλυνση και ενός παραθύρου ΚΜΟ (Max diff MA after Kalman), για την εφαρμογή του εκτεταμένου φίλτρου Kalman (Max diff EKF) και τέλος της επιβολής ΚΜΟ αντίστοιχου παραθύρου σε δεδομένα που έχει εφαρμοστεί EKF (Max diff MA after EKF). Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των διαφορετικών παραθύρων του ΚΜΟ δίνονται στις αντίστοιχες στήλες (MA window) για την εύκολη μεταξύ τους σύγκριση. Οι τιμές των διαφορών δίνονται σε μέτρα και η εποχές σε μορφοποίηση ΩΩ:ΛΛ:ΔΔ.

Station p595													
U (longitudinal component)		diff(m) epoch		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
		diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.050335	03:20:14.600										
	Max diff Kalman	0.039596	03:20:04.600										
	Max diff MA			0.039289	03:20:04.600	0.036563	03:20:04.800	0.032406	03:20:05.400	0.004614	03:20:15.000	0.002271	03:20:15.000
	Max diff MA after Kalman			0.038228	03:20:04.600	0.035585	03:20:04.800	0.031356	03:20:05.400	0.004526	03:20:15.200	0.002239	03:20:15.200
	Max diff EKF	0.062168	03:20:14.600										
	Max diff MA after EKF			0.048526	03:20:04.600	0.045159	03:20:04.800	0.040025	03:20:05.400	0.005699	03:20:15.000	0.002805	03:20:15.000
V (transverse component)		diff(m) epoch		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
		diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.045804	03:20:05.800										
	Max diff Kalman	0.037580	03:20:05.800										
	Max diff MA			0.036502	03:20:06.200	0.029297	03:20:06.200	0.020948	03:20:07.400	0.001857	03:20:07.000	0.000918	03:20:08.200
	Max diff MA after Kalman			0.033397	03:20:06.000	0.027537	03:20:06.400	0.020183	03:20:07.200	0.001767	03:20:07.600	0.000884	03:20:07.600
	Max diff EKF	0.051923	03:20:05.800										
	Max diff MA after EKF			0.041378	03:20:06.200	0.033211	03:20:06.200	0.023746	03:20:07.400	0.002106	03:20:07.000	0.001041	03:20:08.200

Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού p595.

Station AC44													
U (longitudinal component)		diff(m)	epoch	MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
				diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.040681	17:29:50.600										
	Max diff Kalman	0.019066	17:29:47.200										
	Max diff MA			0.015905	17:29:47.400	0.007686	17:29:47.400	0.005066	17:29:47.400	0.000351	17:29:51.600	0.000164	17:30:46.200
	Max diff MA after Kalman			0.013016	17:29:47.400	0.006765	17:29:47.600	0.004465	17:29:48.600	0.000256	17:29:51.600	0.000151	17:30:45.800
	Max diff EKF	0.046091	17:29:50.600										
	Max diff MA after EKF			0.018020	17:29:47.400	0.0087086	17:29:47.400	0.005740	17:29:47.400	0.000279	17:29:46.200	0.000143	17:29:45.800
V (transverse component)		diff(m)	epoch	MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
				diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.021607	17:29:49.200										
	Max diff Kalman	0.009088	17:29:48.200										
	Max diff MA			0.007058	17:29:51.200	0.004044	17:29:51.800	0.002413	17:29:52.600	0.000194	17:08:46.800	0.000112	17:09:05.400
	Max diff MA after Kalman			0.004999	17:29:51.200	0.003269	17:29:51.800	0.001992	17:29:52.600	0.000165	17:08:46.400	0.000106	17:09:05.400
	Max diff EKF	0.024511	17:29:49.200										
	Max diff MA after EKF			0.008007	17:29:51.200	0.004587	17:29:51.800	0.002738	17:29:52.600	0.000464	17:30:21.800	0.00016	17:30:53.400

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού AC44.

Station AC53													
U (longitudinal component)		diff(m)	epoch	MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
				diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.042610	17:29:51.800										
	Max diff Kalman	0.027778	17:29:51.800										
	Max diff MA			0.020613	17:29:52.200	0.0065199	17:29:53.400	0.007751	17:29:52.200	0.000469	17:30:18.400	0.000202	17:30:48.200
	Max diff MA after Kalman			0.014988	17:29:52.200	0.0056773	17:29:50.400	0.006455	17:29:52.200	0.000452	17:30:18.600	0.000187	17:30:48.200
	Max diff EKF	0.048326	17:29:51.800										
	Max diff MA after EKF			0.023378	17:29:52.200	0.0073946	17:29:53.400	0.006347	17:29:52.200	0.000486	17:30:19.200	0.000229	17:30:48.200
V (transverse component)		diff(m)	epoch	MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
				diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.058484	17:29:53.000										
	Max diff Kalman	0.031945	17:29:53.000										
	Max diff MA			0.017600	17:29:53.200	0.0073543	17:29:54.800	0.005396	17:29:55.400	0.000493	17:30:22.600	0.00025	17:30:52.600
	Max diff MA after Kalman			0.013384	17:29:53.400	0.0057848	17:29:54.600	0.004808	17:29:55.400	0.000389	17:30:22.400	0.00021	17:30:52.400
	Max diff EKF	0.066331	17:29:53.000										
	Max diff MA after EKF			0.019962	17:29:53.200	0.0083410	17:29:54.800	0.006722	17:29:55.200	0.000550	17:30:22.600	0.00029	17:30:52.600

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων ανάλυσης για τις συνιστώσες του σταθμού AC53.

Οι πίνακες με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων σταθμών δίνονται στο παράρτημα.

5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή γίνεται ο σχολιασμός των τιμών που υπολογίστηκαν για τις διάφορες περιπτώσεις ανάλυσης των χρονοσειρών. Ο σχολιασμός αφορά κατά κύριο λόγο την σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων διαφορών και τον εντοπισμό μη έγκυρων εκτιμήσεων της εποχής διέλευσης του σεισμικού κύματος.

Συγκεκριμένα, οι τιμές της μέγιστης διαφοράς που προέκυψαν από τους υπολογισμούς είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερες σε σταθμούς πλησίον του epicέντρου και μειώνονται όσο μεγαλώνει η απόσταση. Για παράδειγμα, η υπολογισμένη τιμή για την συνιστώσα V στην οποία έχει εφαρμοστεί ο αλγόριθμος εξομάλυνσης και ένα παράθυρο κινητού μέσου όρου 10 παρατηρήσεων, είναι 0.027m για τον σταθμό r595 που βρίσκεται 20km από το epicέντρο, 0.014m για τον σταθμό r580 που βρίσκεται 40km και 0.006m για τον σταθμό r569 που βρίσκεται 64km από το epicέντρο. Η μείωση της έντασης των σεισμικών κυμάτων με την αύξηση της απόστασης από το epicέντρο είναι αναμενόμενη λόγω της απώλειας ενέργειας που οφείλεται στην εσωτερική τριβή του μέσου διάδοσης.

Όσον αφορά το μέγεθος των τιμών που υπολογίστηκαν, καμία τιμή δεν ξεπερνά τα 7 εκατοστά ως απόλυτη τιμή μετακίνησης. Οι μικρότερες τιμές της υπολογισμένης διαφοράς εμφανίζονται στους σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το epicέντρο και στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση μεγάλου παραθύρου KMO (300, 150). Τα μεγάλα παράθυρα KMO τείνουν να εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις των χρονοσειρών διατηρώντας μόνο την γενική τάση τους, επομένως η μείωση της τιμής των διαφορών είναι αναμενόμενη. Οι τιμές για τα παράθυρα αυτά (150, 300) σε σταθμούς που βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 40km υπολογίστηκαν σε τάξεις μεγέθους

μικρότερες του χιλιοστού, όπως φαίνεται πίνακες 5.4 και 5.5. Οι τιμές διαφορών μικρότερες των 5mm δεν θεωρούνται στατιστικά σημαντικές σε σχέση με την ακρίβεια της μεθόδου και θεωρούνται μηδενικές. Τα μεγέθη παραθύρων που δίνουν τιμές διαφορών πλησιέστερες σε εκείνες των περιπτώσεων χωρίς χρήση ΚΜΟ είναι τα μεγέθη 5 και 10 παρατηρήσεων. Τέλος, παρατηρείται πως οι τιμές των διαφορών που υπολογίζονται στην εγκάρσια συνιστώσα V είναι μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή από αυτές που υπολογίζονται στην διαμήκη συνιστώσα U για τους περισσότερους σταθμούς (Πιν. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.7). Η διαφορά μεταξύ των τιμών συνιστωσών είναι μεγαλύτερη για σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση (Πιν. 5.4, 5.5). Η παρατήρηση των μεγαλύτερων τιμών στις υπολογισμένες διαφορές της V συνιστώσας είναι θεμιτή διότι επιβεβαιώνει την σημασία της στροφής των χρονοσειρών.

Σε συνέχεια με τις παραπάνω παρατηρήσεις, έγινε έλεγχος ως προς την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Αυτός ο έλεγχος αφορούσε την σύγκριση της εποχής της μέγιστης διαφοράς με την χρονική στιγμή που συνέβησαν τα σεισμικά γεγονότα. Προφανώς η εποχή που υπολογίζεται από την παραπάνω μεθοδολογία θα πρέπει να παρατηρείται σε αργότερο χρόνο από την εποχή του σεισμού. Τα αποτελέσματα πληρούν τον έλεγχο αυτό κατά πλειοψηφία. Πιο συγκεκριμένα, ανίχνευση μεγάλης μετακίνησης πριν το γεγονός του σεισμού λάβει χώρα, εμφανίζεται σε 5 σταθμούς, στους 4 εκ των οποίων το σφάλμα αφορά την συνιστώσα U . Πιο συγκεκριμένα, οι εποχές που υπολογίστηκαν και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία αφορούν:

- όλες τις περιπτώσεις με χρήση ή μη ΚΜΟ παραθύρου 5 της συνιστώσας U , για τον σταθμό p093 (Πιν. 5.5)
- τα αποτελέσματα των περιπτώσεων της μέγιστης διαφοράς, του αλγόριθμου εξομάλυνσης Kalman και του EKF της συνιστώσας U , για τον σταθμό p569 (Πιν. 5.4)
- τα αποτελέσματα των περιπτώσεων της μέγιστης διαφοράς της συνιστώσας U και του αλγόριθμου εξομάλυνσης Kalman και του EKF των δύο συνιστωσών, για τον σταθμό p570
- το αποτέλεσμα του αλγόριθμου εξομάλυνσης Kalman της συνιστώσας U , για τον σταθμό p463
- τα αποτελέσματα του ΚΜΟ, και του αλγόριθμου Kalman μετά την εφαρμογή του ΚΜΟ για τα μεγέθη παραθύρου 150 και 300, της συνιστώσας V του σταθμού AC44. (Πιν. 5.6)

Τα σφάλματα αυτά αφορούν κυρίως σταθμούς που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση (p092, p569, p570) από το επίκεντρο και επομένως η ένταση των σεισμικών κυμάτων φτάνει σε αυτούς μειωμένη σε σχέση με σταθμούς που βρίσκονται πλησιέστερα. Άλλοι λόγοι που μπορεί να συνέβαλαν στον λάθος υπολογισμό είναι το γεωλογικό υπόβαθρο, η τοπογραφία της περιοχής, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του σταθμού, ή λάθη που αφορούν τις παρατηρήσεις. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν κατά κύριο λόγο τη συνιστώσα U , και επομένως δεν επηρεάζουν την συνέχεια της μελέτης αυτής.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως οι διαφορές που έχουν εντοπιστεί πριν το συμβάν του σεισμού, αφορούν περιπτώσεις στις οποίες δεν έχει εφαρμοστεί ΚΜΟ (diff, Kalman Smoother, EKF) για τους τρεις από τους πέντε σταθμούς (p463, p569, p570). Στον σταθμό που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από το επίκεντρο (AC44), τα λάθη αφορούσαν μόνο μεγάλα μεγέθη του παραθύρου (300, 150) του ΚΜΟ. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός πως για τα ίδια παράθυρα ΚΜΟ το αποτέλεσμα με την εφαρμογή του EKF δεν επηρεάστηκε. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η θετική επίδραση της χρήσης ΚΜΟ μικρών παραθύρων για τον υπολογισμό των διαφορών.

Τέλος, έγινε η σύγκριση της τιμής της υπολογισμένης μέγιστης διαφοράς για τις διάφορες περιπτώσεις υπολογισμών. Από τους πίνακες των αποτελεσμάτων παρατηρείται πως τις μεγαλύτερες τιμές δίνουν οι περιπτώσεις εφαρμογής του EKF (EKF), δεύτερες κατά τιμή οι διαφορές χωρίς κάποιο

φιλτράρισμα (Max diff) και ακολουθούν οι τιμές για τον αλγόριθμο εξομάλυνσης. Αυτό ήταν αναμενόμενο εφόσον στις υπόλοιπες περιπτώσεις γίνεται χρήση δύο μεθόδων φιλτραρίσματος των δεδομένων των χρονοσειρών με αποτέλεσμα την περαιτέρω εξομάλυνσή τους. Η εφαρμογή του ΚΜΟ φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος της διαφοράς που υπολογίζεται, και η τιμή μειώνεται αναλογικά με το μέγεθος του παραθύρου. Όπως σχολιάστηκε και παραπάνω, διαφορές που υπολογίστηκαν με μεγάλα παράθυρα ΚΜΟ (150 και 300) είναι της τάξης του χιλιοστού για όλους τους σταθμούς και ακόμα μικρότερες για τους σταθμούς σε μεγαλύτερη απόσταση. Η εφαρμογή του ΚΜΟ με παράθυρο μεγέθους 5 δίνει αποτελέσματα πλησίον του εκατοστού ακόμα και για τους πιο απομακρυσμένους σταθμούς. Τις μικρότερες διαφορές μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων φαίνεται να δίνει η εφαρμογή του ΚΜΟ που έχει προηγηθεί από τον αλγόριθμο εξομάλυνσης Kalman.

5.4 Επιλογή μεθοδολογίας

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η βέλτιστη μεθοδολογία για την ανίχνευση των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων. Η επιλογή έγινε με βάση τα αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων στα δεδομένα της εγκάρσιας συνιστώσας V , στην οποία αντιστοιχεί και η κίνηση που προκαλείται από τα δευτερεύοντα σεισμικά κύματα. Η επιλογή μεταξύ των περιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν έγινε με τα παρακάτω 3 βασικά κριτήρια:

- i. Οι τιμές των μεγίστων διαφορών να προκύπτουν για εποχές μετά το σεισμικό συμβάν
- ii. Οι τιμές των μεγίστων διαφορών της συνιστώσας V να είναι μεγαλύτερες από 1cm για όσο το δυνατό μεγαλύτερο αριθμό σταθμών
- iii. Οι εποχές των μεγίστων διαφορών που προκύπτουν να είναι ανάλογες με την απόσταση από το επίκεντρο

Το κριτήριο (i) έχει ως στόχο την κατά το δυνατόν απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας και τον υπολογισμό των εποχών διέλευσης του δευτερεύοντος κύματος με επιτυχία. Όπως σχολιάστηκε στην παραπάνω παράγραφο, το κριτήριο (i) δεν πληρούν οι περιπτώσεις εφαρμογής του αλγόριθμου εξομάλυνσης Kalman και του EKF για τον σταθμό p570 καθώς και οι περιπτώσεις ΚΜΟ και ΚΜΟ μαζί με τον αλγόριθμο εξομάλυνσης για τον σταθμό AC44. Οι χρονικές στιγμές που υπολογίστηκαν για τους υπόλοιπους σταθμούς πληρούν το κριτήριο αυτό.

Από την βιβλιογραφία είναι γνωστό πως η μέθοδος PPP που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των δεδομένων επιτυγχάνει ακρίβεια ενός εκατοστού στην κατά των υστέρων επεξεργασία (Grinter & Jansen, 2012). Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, οι υπολογισμένες διαφορές με τιμές μικρότερες του εκατοστού δεν θεωρούνται στατιστικά σημαντικές συγκρινόμενες με την ακρίβεια της μεθόδου. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή των περιπτώσεων με χρήση ΚΜΟ με παράθυρα μεγέθους 300 ή 150 τιμών απορρίπτεται. Παρατηρήθηκε πως οι μεγαλύτερες τιμές διαφορών εμφανίζονται στις περιπτώσεις του EKF, της απλής διαφοράς και του EKF με χρήση ΚΜΟ μεγέθους 5. Και οι τρεις περιπτώσεις δεν πληρούν το κριτήριο (ii) για τρεις συγκεκριμένους σταθμούς (RAMT, p569, p597). Οι τιμές όλων των περιπτώσεων για τους σταθμούς αυτούς είναι μικρότερες του ενός 1cm και για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα αυτών των σταθμών θεωρείται πως δεν παρέχουν στοιχεία για την επιλογή της μεθόδου. Οι μικρότερες μετακινήσεις αυτών των σταθμών μπορεί να οφείλονται στο γεωλογικό υπόβαθρο ή τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών.

Το κριτήριο (iii) έχει να κάνει με την έλεγχο των υπολογισμένων τιμών ως σύνολο, για τις διάφορες θέσεις των σταθμών. Τα σεισμικά κύματα μεταδίδονται στον χώρο με σταθερή ταχύτητα και επομένως η χρονική στιγμή που ανιχνεύονται στους σταθμούς θα πρέπει να είναι ανάλογη με την

απόστασή τους από το επίκεντρο. Προφανώς η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αλλάζει σε σχέση με το μέσο διάδοσης, στην περίπτωση αυτή το γεωλογικό υπόβαθρο. Εφόσον αυτό δεν είναι γνωστό στην παρούσα μελέτη, και δεν παρατηρείται συστηματική διαφοροποίηση των χρονικών διαφορών σε σχέση με την απόσταση ή την θέση των σταθμών, γίνεται η παραδοχή πως η ταχύτητα διάδοσης παραμένει σταθερή. Το κριτήριο (iii) πληρούται από την περίπτωση της εφαρμογής του EKF με χρήση ΚΜΟ με παράθυρο μεγέθους 5 τιμών. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων της απλής μέγιστης διαφοράς και του EKF είναι διαφορές των οποίων οι εποχές δεν μεγαλώνουν γραμμικά σε σχέση με την απόσταση από το επίκεντρο. Για τον λόγο αυτό θεωρείται πως δεν γίνεται ορθή ανίχνευση των σεισμικών κυμάτων με την χρήση των μεθόδων αυτών.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια και τα αποτελέσματα των διαφόρων περιπτώσεων που αναλύθηκαν, η μεθοδολογία που κρίνεται η βέλτιστη για την ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων από δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS είναι η μεθοδολογία που ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- 1) Στροφή των χρονοσειρών
- 2) Εφαρμογή του Εκτεταμένου Φίλτρου Kalman
- 3) Εφαρμογή του Κινητού Μέσου Όρου με μέγεθος παραθύρου 5 τιμών
- 4) Υπολογισμός μέγιστης διαφοράς μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων

Η εποχή που αντιστοιχεί στην μέγιστη αυτή διαφορά αφορά την χρονική στιγμή κατά την οποία δευτερεύον σεισμικό κύμα διέρχεται από τον μόνιμο σταθμό GNSS.

Στη συνέχεια της εργασίας αυτής, γίνεται αναφορά μόνο στη μεθοδολογία, που περιγράφηκε παραπάνω και επιλέχθηκε ως βέλτιστη, και στα αποτελέσματα αυτής.

5.5 Αξιολόγηση μεθοδολογίας

Η επιλογή της βέλτιστης μεθοδολογίας έγινε βάση κριτηρίων ανάμεσα σε περιπτώσεις διαφορετικών προσεγγίσεων σε ό,τι αφορά τα αριθμητικά τους αποτελέσματα (μέγιστη διαφορά και αντίστοιχη χρονική στιγμή). Στην παράγραφο αυτή γίνεται η επαλήθευση των τιμών της μεθοδολογίας σε σχέση με την μορφή των δεδομένων, τις χρονικές διαφορές μεταξύ σταθμών καθώς και τις χρονικές διαφορές που αφορούν την διέλευση των πρωτευόντων και δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να αξιολογηθεί η επιτυχία της μεθόδου για την ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων από τα δεδομένα των σταθμών.

Πρώτη εξέταση αποτέλεσε η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας με την μορφή των διαγραμμάτων των χρονοσειρών στις οποίες ανήκουν. Πιο συγκεκριμένα, η χρονική στιγμή που υπολογίστηκε από την μεθοδολογία πως διέρχεται το σεισμικό κύμα από τον σταθμό συμπίπτει με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο παρατηρείται έντονη κίνηση στη χρονοσειρά των δεδομένων. Η κίνηση στην χρονοσειρά είναι ενδεικτική της δυναμικής μετακίνησης του σταθμού κατά την διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Εφόσον η υπολογισμένη από την μεθοδολογία χρονική στιγμή συμπίπτει με το χρονικό διάστημα έντονης κίνησης της χρονοσειράς, το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας ως θεωρείται έγκυρο. Ο έλεγχος αυτός επαληθεύεται για την υπολογισμένη τιμή όλων των σταθμών. Ενδιαφέρον έχει να σημειωθεί πως για τους σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 40km (p594, p595, AC44, CCCC, p580) από το επίκεντρο, η υπολογισμένη τιμή της μέγιστης διαφοράς ανιχνεύεται στην αρχή του διαστήματος της έντονης κίνησης της χρονοσειράς (Διαγ. 5.3, 5.4, 5.1, 5.5 5.6). Αντίθετα, στους σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση η τιμή αυτή ανιχνεύεται αργότερα στο διάστημα κίνησης.

Στην συνέχεια, εξετάστηκαν οι μεταξύ των σταθμών χρονικές διαφορές των εποχών που υπολογίστηκαν μέσω της μεθοδολογίας. Για την αξιολόγηση των διαφορών αυτών

χρησιμοποιήθηκαν οι θεωρητικές τιμές ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων : 6km/s για το πρωτεύον κύμα και 3.5km/s για το δευτερεύον κύμα. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίστηκαν οι θεωρητικές χρονικές διαφορές που αναμένονται από την διέλευση του κύματος από έναν σταθμό στον αμέσως επόμενο σε απόσταση σταθμό. Οι υπολογισμένες από την μεθοδολογία χρονικές διαφορές επαληθεύονται από τις θεωρητικές για τους σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση έως και 48 km από το επίκεντρο. Μόνη εξαίρεση αποτελεί ο σταθμός p580, για τον οποίο η υπολογισμένη χρονική διαφορά είναι μικρότερη από την θεωρητικά αναμενόμενη. Ίσως αυτό οφείλεται στο μέγεθος της μετακίνησης που εντοπίζεται στον σταθμό αυτό (2cm), που είναι μεγαλύτερη από αυτές που εντοπίζονται σε σταθμούς που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση. Λόγω της μεγάλης τιμής της, η μέγιστη διαφορά ενδέχεται να ανιχνεύεται πολύ νωρίς στην κυματομορφή σε σύγκριση με τους άλλους σταθμούς (Διαγ. 5.6). Για τους σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τα 48km, επαληθεύονται οι τιμές για τις μεταξύ τους χρονικές διαφορές με εξαίρεση τους σταθμούς (RAMT, p597, p592 και p093). Σε αυτούς τους σταθμούς η διαφορά είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη.

Τέλος, έγινε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της διαμήκου (U) και εγκάρσιας (V) συνιστώσας των σταθμών. Γενικά, αναμένεται η συνιστώσα V να έχει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης διαφοράς και να διέρχεται από τον σταθμό μετά την U. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ένταση των δευτερευόντων κυμάτων και την μικρότερη ταχύτητά τους. Οι τιμές της μεθοδολογίας για τις συνιστώσες V είναι όντως μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες U για όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν. Η χρονική σχέση μεταξύ των διαφορών για τις δύο συνιστώσες πληρούται για τους σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 25km από το επίκεντρο. Για τους σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση, οι τιμές της συνιστώσας U εντοπίζονται αργότερα ή την ίδια χρονική στιγμή σε σχέση με τις τιμές της αντίστοιχης V. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις μικρές τιμές των διαφορών (μικρότερες από 5mm) και στο γεγονός ότι η ένταση του πρωτεύοντος σεισμικού κύματος είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των επιφανειακών κυμάτων και επομένως ενδέχεται η μετακίνηση που ανιχνεύεται να οφείλεται στα τελευταία.

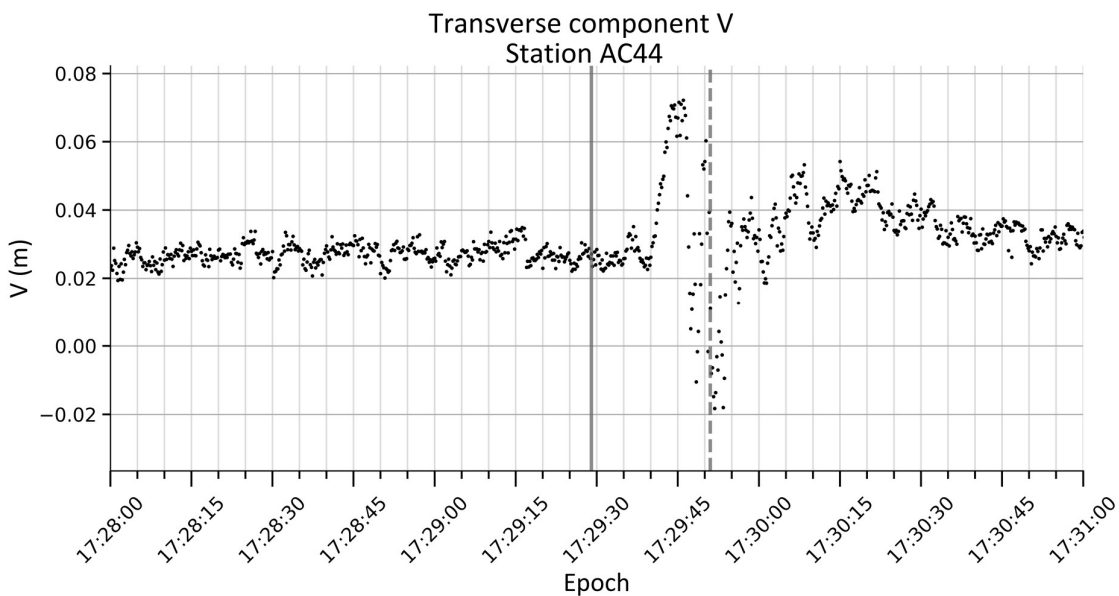
Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για την ανίχνευση της διέλευσης των σεισμικών κυμάτων από τους σταθμούς συμπεραίνονται τα παρακάτω:

- Για τους σταθμούς σε απόσταση έως και 25km από το επίκεντρο του σεισμού, ανιχνεύονται με επιτυχία τα δευτερεύοντα σεισμικά κύματα. Η μέθοδος για την απόσταση αυτή υπολογίζει τιμές για τις διαφορές μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων της τάξης των 2-5cm στην εγκάρσια συνιστώσα, επιτυγχάνει σωστές χρονικές διαφορές κατά την ανίχνευση των κυμάτων μεταξύ σταθμών ως προς τις θεωρητικές τιμές τους καθώς και χρονικές διαφορές ως προς τις μετακινήσεις στην διαμήκη συνιστώσα, οι οποίες θεωρείται πως οφείλονται στα πρωτεύοντα κύματα του σεισμού.
- Για δεδομένα σταθμών που βρίσκονται σε απόσταση 25-48km, η μέθοδος επιτυγχάνει την ανίχνευση της δυναμικής μετακίνησης που οφείλεται στα δευτερεύοντα σεισμικά κύματα, με τιμές διαφορών της τάξης του 1-2cm. Οι χρονικές διαφορές που υπολογίζονται από την διέλευση των κυμάτων μεταξύ σταθμών επαληθεύουν τις θεωρητικές τιμές τους. Δεν επιτυγχάνεται η ανίχνευση και χρονική σύγκριση από μετακινήσεις στην διαμήκη συνιστώσα.
- Για σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 48km, η μέθοδος αδυνατεί να ανιχνεύσει την διέλευση των δευτερευόντων κυμάτων από τους σταθμούς λόγω των μικρών διαφορών που υπολογίζει (<1cm), και οι οποίες δεν κρίνονται στατιστικά σημαντικές σε σχέση με την ακρίβεια της μεθόδου από την οποία προέκυψαν οι μετρήσεις.

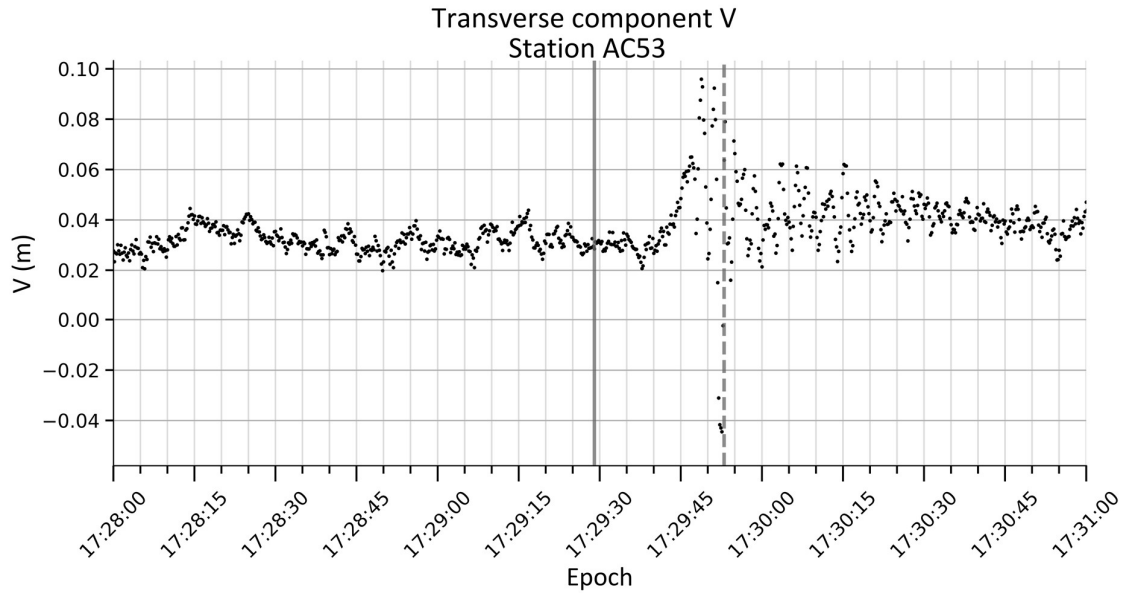
5.5.1 Παράθεση αποτελεσμάτων της μεθόδου

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου σε διαγραμματική μορφή. Τα αποτελέσματα αφορούν τους σταθμούς που βρίσκονται εντός ακτίνας 48km από τα επίκεντρα των σεισμών, απόσταση για την οποία η μέθοδος κρίθηκε αξιόπιστη. Τα αποτελέσματα αφορούν τους σταθμούς ACC44 (Διαγ. 5.1) και AC53 (Διαγ. 5.2) για τον σεισμό στην περιοχή Anchorage της Αλάσκας, οι οποίοι βρίσκονται απόσταση 24km και 47km από το επίκεντρο, και τους σταθμούς p595, p594, CCCC και p580 (Διαγ. 5.3 – 5.7) για τον σεισμό στην περιοχή του Ridgecrest στην Καλιφόρνια. Οι τελευταίοι απέχουν αποστάσεις 19, 24, 24 και 40km από το επίκεντρο.

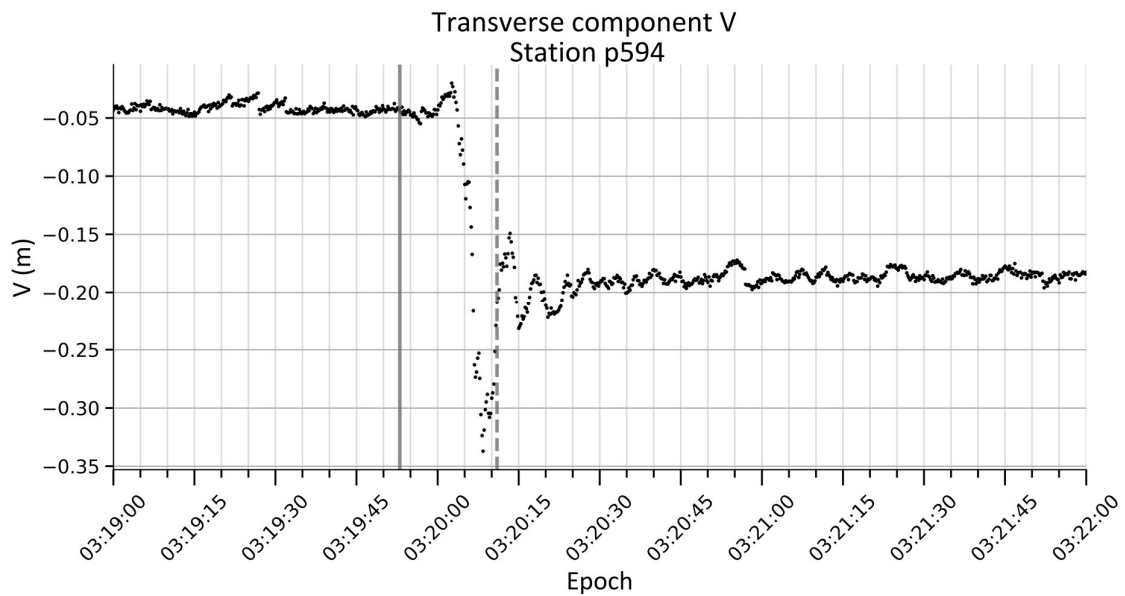
Στα διαγράμματα παρακάτω, δίνονται οι χρονοσειρές της εγκάρσιας συνιστώσας V όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας για τους 6 σταθμούς. Πάνω στα διαγράμματα με κάθετη γραμμή ορίζεται η χρονική στιγμή του σεισμικού γεγονότος και με κάθετη διακεκομμένη γραμμή η χρονική στιγμή που υπολογίστηκε από την μεθοδολογία. Η χρονική αυτή στιγμή αντιστοιχεί σε μετατόπιση του σταθμού που οφείλεται στην διέλευση δευτερεύοντος σεισμικού κύματος από αυτόν.



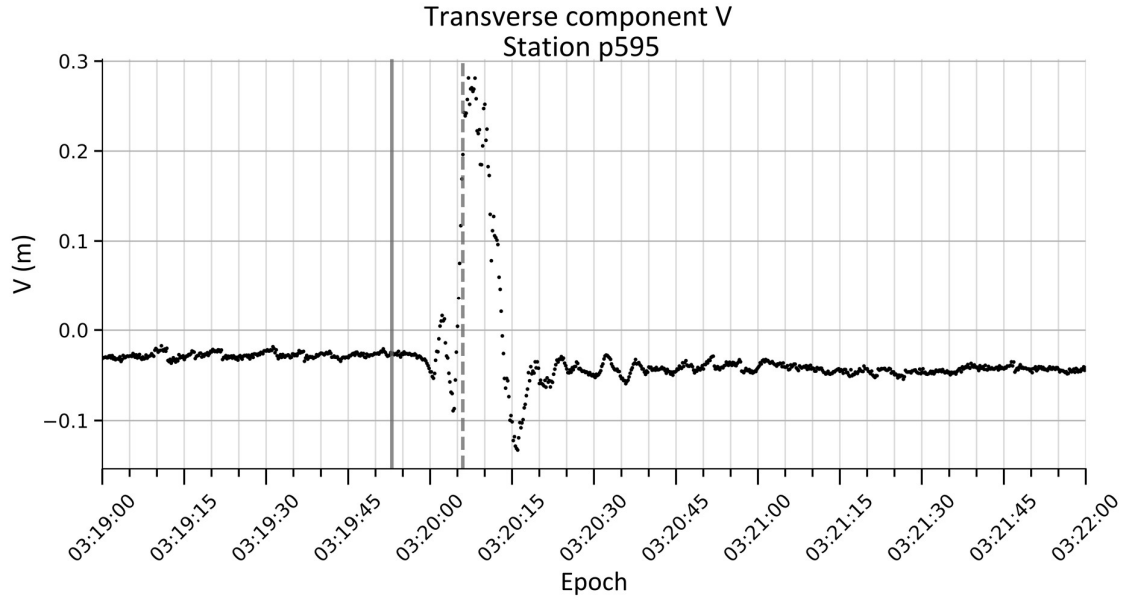
Διάγραμμα 5.7 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού AC44 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



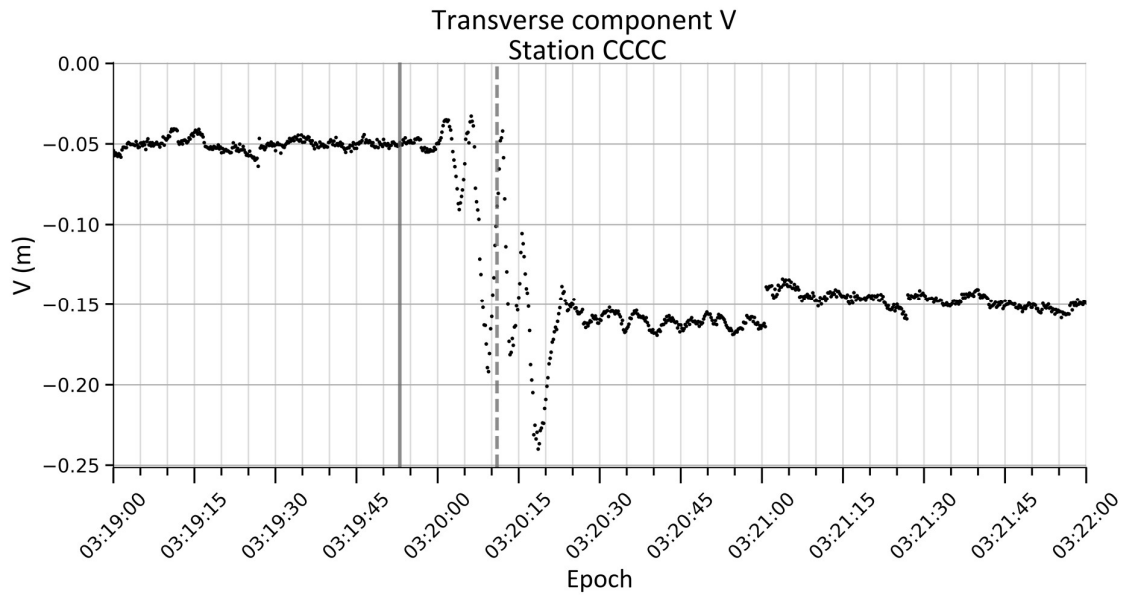
Διάγραμμα 5.8 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού AC53 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



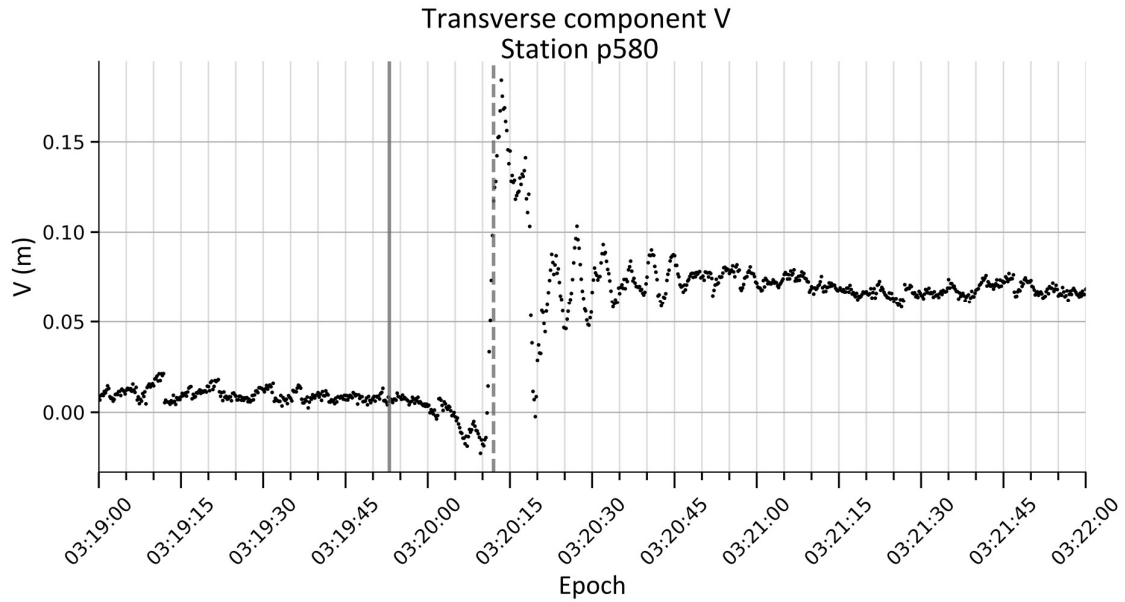
Διάγραμμα 5.9 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p594 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



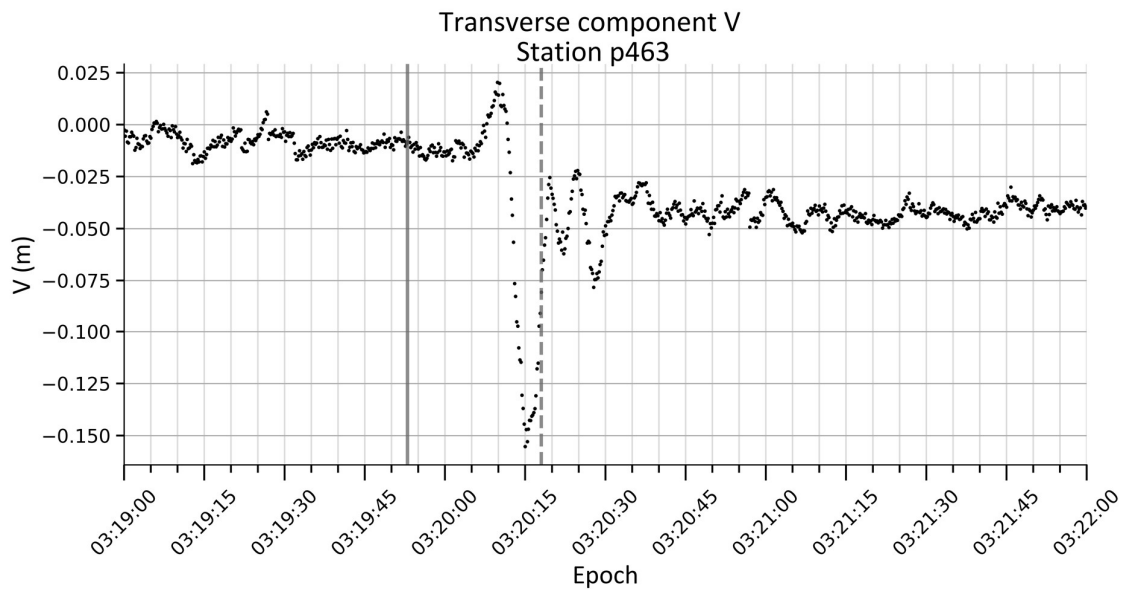
Διάγραμμα 5.10 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p595 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



Διάγραμμα 5.11 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού CCCC στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



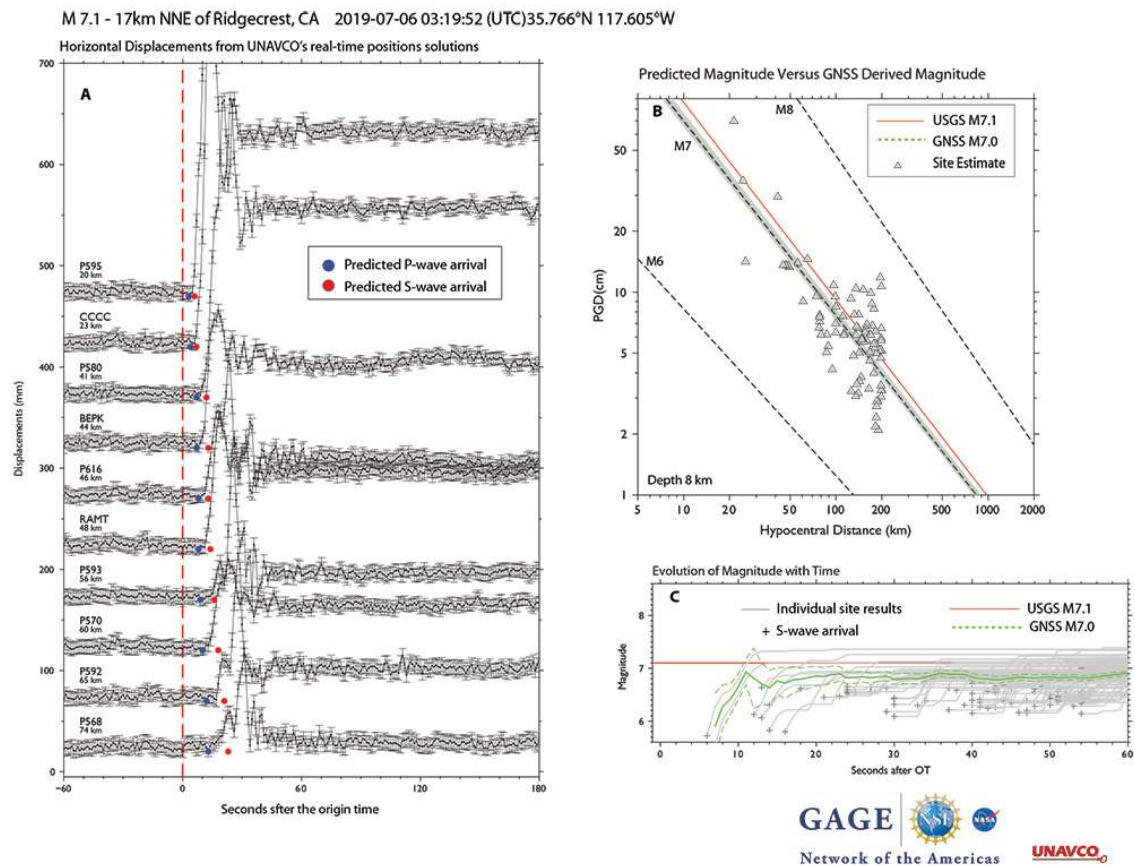
Διάγραμμα 5.12 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p580 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.



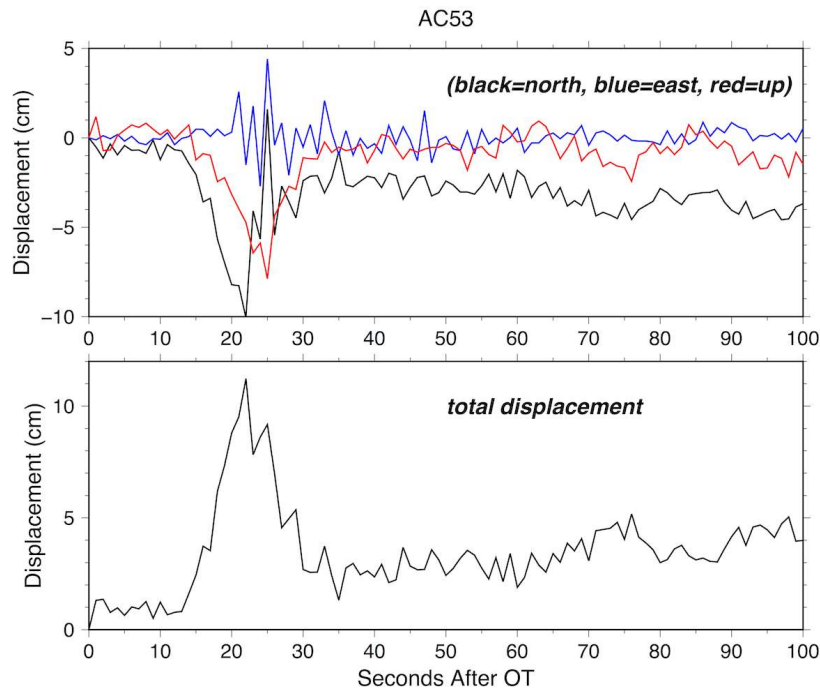
Διάγραμμα 5.13 : Χρονοσειρά της συνιστώσας V του σταθμού p463 στην οποία σημειώνεται η εποχή (διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

5.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας με δεδομένα από την υπηρεσία UNAVCO

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν από την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε με στοιχεία που δίνονται σε αναφορές της υπηρεσία GAGE (Phillips, et al., 2018) και (Phillips & Bartel, 2019), φορέας της οποίας είναι η UNAVCO. Οι αναφορές της υπηρεσίας για τα σεισμικά γεγονότα αφορούν τις δυναμικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν σε πραγματικό χρόνο (real-time) και τον προσδιορισμό από αυτές της έντασης των φαινομένων. Για τον σεισμό στην περιοχή του Anchorage η υπηρεσία παρέχει διαγράμματα μετακίνησης για σταθμούς της περιοχής που επηρεάστηκαν από το φαινόμενο, εκ των οποίων και για τον σταθμό μελέτης AC53. Για την περιοχή του Ridgecrest παρέχονται διαγράμματα μετακίνησης στα οποία σημειώνονται οι αναμενόμενες τιμές άφιξης των σεισμικών κυμάτων, μεταξύ άλλων, στους σταθμούς p595, CCCC, p580, RAMT, p570 και p592.



Διάγραμμα 5.14: Αναφορά της υπηρεσίας GAGE για το σεισμικό συμβάν της 06/07/2019 στην περιοχή του Ridgecrest, CA. Πηγή: (Phillips & Bartel, 2019)



Διάγραμμα 5.15: Διάγραμμα μετακινήσεων του σταθμού AC53 από την αναφορά της υπηρεσίας GAGE για το σεισμικό συμβάν της 30/11/2018. Πηγή: (Phillips, et al., 2018)

Για τον σταθμό AC53 του σεισμικού γεγονότος της 30/11/2018 στην περιοχή Anchorage της Αλάσκας, στο διάγραμμα που δίνεται στην ανάφορά της υπηρεσίας (Διαγ. 5.9), οι εντονότερες μετατοπίσεις εμφανίζονται κοντά στα 25 δευτερόλεπτα από το σεισμικό συμβάν. Η μετατόπιση αυτή αφορά την ανατολική (East) συνιστώσα των δεδομένων του σταθμού. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, δείχνουν πως για την εγκάρσια συνιστώσα του σταθμού (U), η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται 24 δευτερόλεπτα από την χρονική στιγμή του συμβάντος (Διαγ. 5.2).

Για το σεισμό της 06/07/2019 στην περιοχή του Ridgecrest στην Καλιφόρνια, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της αναφοράς της υπηρεσίας GAGE που αφορούν την άφιξη των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων στους σταθμούς p595, CCCC και p580, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναπτυχθείσα μεθοδολογία. Η σύγκριση αυτή γίνεται με την χρήση διαγραμμάτων οριζόντιας μετατόπισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, που δίνονται από την υπηρεσία (Διαγ. 5.8). Από την μελέτη των διαγραμμάτων, προκύπτει πως η άφιξη των κυμάτων για τους σταθμούς αυτούς δίνεται κατά μέσο όρο 5 δευτερόλεπτα νωρίτερα από την υπολογισμένη από την μεθοδολογία εποχή (Διαγ. 5.4, 5.5, 5.6). Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη διότι η εποχή που υπολογίστηκε από την μεθοδολογία δεν αφορά την άφιξη των κυμάτων αλλά την δυναμική μετατόπιση που προκαλεί η διέλευση τους. Επιπλέον, η σύγκριση των χρονικών στιγμών μέγιστης μετατόπισης από το μέσο όρο των δεδομένων πριν το σεισμικό γεγονός με τις χρονικές στιγμές που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία για τους τρεις σταθμούς διαφέρουν λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει πως οι υπολογισμένες από την μεθοδολογία τιμές αφορούν την μετατόπιση που προκλήθηκε στους σταθμούς από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων.

Από την παραπάνω μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπηρεσίας GAGE, συμπεραίνεται ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία έχει αποτελέσματα συγκρίσιμα με αναλύσεις των ίδιων δεδομένων από άλλους φορείς. Η σύγκριση έγινε για τους σταθμούς που αφορούν και τα δύο σεισμικά φαινόμενα με καλά αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό συνηγορεί υπέρ της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό επισημαίνονται τα κύρια τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής. Τα συμπεράσματα αφορούν τόσο την ανάλυση που προηγήθηκε όσο και τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, επισημαίνοντας θετικά στοιχεία και αδυναμίες της. Ακολούθως γίνονται προτάσεις για πρόσθετες βελτιώσεις και περαιτέρω έρευνα.

6.1 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της εργασία αυτής, που αποτέλεσε την ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την ανίχνευση σεισμικών κυμάτων, επιτεύχθηκε με τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων και την αξιολόγησή τους. Επιπλέον επιτευχθήκαν και οι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν στην αρχή της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Η παραγωγή των χρονοσειρών θέσης από τα δεδομένα των σταθμών GNSS με την μέθοδο PPP
- Ανιχνεύτηκαν οι μετακινήσεις που οφείλονται στην διέλευση σεισμικών κυμάτων με την χρήση της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας
- Τα βήματα που συνιστούν την μεθοδολογία οδηγούν στην βέλτιστη δυνατή ανίχνευση των δυναμικών μετακινήσεων των σεισμικών κυμάτων
- Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αξιολογήθηκαν ως προς την εγκυρότητά τους και συγκρίθηκαν με μελέτες τρίτων

6.1.1 Δεδομένα

Τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής αφορούν δεδομένα συχνότητας 5Hz, προερχόμενα από 14 μόνιμους σταθμούς GNSS, σε δύο περιοχές που πλήχθηκαν από σεισμούς μεγέθους 7.1M. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε ακτίνα 20-99km από το επίκεντρο των σεισμών.

Τα δεδομένα των 14 σταθμών ήταν επαρκή για την εκτέλεση πειραμάτων που οδήγησαν στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας λόγω της χωρικής διασποράς τους στο σύνολο της περιοχής γύρω από τα επίκεντρα. Επιπλέον η χρονική διάρκεια των δεδομένων ήταν επαρκής ώστε να συμπεριλαμβάνεται σε αυτήν το σύνολο της διάρκειας των σεισμικών γεγονότων που μελετήθηκε.

Κύριο συμπέρασμα από την χρήση των δεδομένων αυτών αποτελεί η δυνατότητα μελέτης των σεισμικών κυμάτων, και συγκεκριμένα των δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων με δεδομένα μονίμων σταθμών συχνότητας 5Hz. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα των διάφορων περιπτώσεων ανάλυσης, οι έντονες δυναμικές μετακινήσεις των σταθμών λαμβάνουν χώρα σε σύντομα χρονικά διαστήματα, έως 5 δευτερόλεπτα. Οι μετακινήσεις αυτές ενδέχεται να μην είχαν καταγραφεί αν η συχνότητα μετρήσεων των σταθμών ήταν μεγαλύτερη.

Τέλος, παρατηρείται στις τιμές των υπολογισμένων διαφορών των περιπτώσεων ανάλυσης, πως σφάλματα στην εκτίμηση της χρονικής εποχής διέλευσης των κυμάτων δεν εντοπίζονται σε κανέναν σταθμό για τις περιπτώσεις στις οποίες έχει εφαρμοστεί κάποιο είδος φιλτραρίσματος των δεδομένων (αλγόριθμος εξομάλυνσης, EKF, KMO). Η παρατήρηση αυτή υπονοεί την πιθανότητα ύπαρξης θορύβου στα δεδομένα των χρονοσειρών.

6.1.2 Επεξεργασία

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των χρονοσειρών είναι τα παρακάτω:

- Η στροφή των χρονοσειρών είχε ως αποτέλεσμα την έντονη διαφοροποίηση ως προς τα αρχικά δεδομένα
- Οι δύο προσεγγίσεις τους φίλτρου Kalman έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία όμως διατηρούν την γενική μορφή και τάση των χρονοσειρών
- Τα διαφορετικά μεγέθη παραθύρου ΚΜΟ επιτυγχάνουν διαφορετική εξομάλυνση των δεδομένων
- Και τα τρία παραπάνω βήματα της ανάλυσης αποδείχθηκαν κρίσιμα για την επεξεργασία και την ανάπτυξη της μεθοδολογίας.

6.1.3 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας προκύπτουν από τον υπολογισμό των μεγίστων διαφορών μεταξύ δύο διαδοχικών παρατηρήσεων, για 6 υποπεριπτώσεις και 5 μεγέθη παραθύρου ΚΜΟ. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις υποπεριπτώσεις διαφέρουν ως προς την τιμή τους. Πιο συγκεκριμένα από την μελέτη τους συμπεραίνεται πως:

- τα μεγάλα παράθυρα ΚΜΟ δίνουν πολύ μικρές τιμές διαφορών, μικρότερες από την ακρίβεια της μεθόδου και επομένως στατιστικά μη σημαντικές
- η χρήση ΚΜΟ συνδυαστικά με κάποια μέθοδο φιλτραρίσματος ελαχιστοποιεί την πιθανότητα υπολογισμού διαφοράς που δεν αφορά το σεισμικό γεγονός

Η βέλτιστη μεθοδολογία επιλέχθηκε βάσει κριτηρίων, και τα αποτελέσματα αυτής αξιολογήθηκαν σε σχέση με όλους τους σταθμούς μελέτης. Τα συμπεράσματα της αξιολόγησης είναι:

- Για όλους τους σταθμούς τα αποτελέσματα συμφωνούν με την μορφή των διαγραμμάτων των χρονοσειρών δεδομένων τους
- Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας κρίνονται στατιστικά σημαντικά για σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση έως και 48km από το επίκεντρο
- Για σταθμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση, η υπολογισμένη διαφοράς είναι μικρότερη του ενός εκατοστού
- Οι χρονικές στιγμές άφιξης των σεισμικών κυμάτων στους σταθμούς συμφωνούν με την απόστασή τους από το επίκεντρο
- Οι χρονικές διαφορές μεταξύ των σταθμών επαληθεύονται με την χρήση θεωρητικών τιμών ταχύτητας
- για τους σταθμούς σε απόσταση έως και 25km από το επίκεντρο, οι χρονικές διαφορές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος σεισμικού κύματος συμφωνούν με τις θεωρητικές τιμές τους

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που δίνονται σε αναφορά της υπηρεσία UNAVCO για τα συγκεκριμένα σεισμικά συμβάντα. Από την σύγκριση αυτή προέκυψε πως οι μέγιστες μετακινήσεις που φαίνονται στα διαγράμματα της υπηρεσίας έχουν μικρή απόκλιση (έως 5 δευτερόλεπτα) με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

6.2 Βελτιώσεις και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή υπόκειται σε πρακτικούς περιορισμούς. Τα σεισμικά γεγονότα διαφέρουν ως προς το μέγεθος, βάθος και τους μηχανισμούς από τους οποίους

παράγονται. Το γεωλογικό υπόβαθρο και η τοπογραφία διαφέρουν για κάθε περιοχή, και επιπλέον διαφέρουν και η χωρική κατανομή, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ο αριθμός των σταθμών γύρω από το επίκεντρο. Τέλος, το λογισμικό, η μέθοδος και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των δεδομένων των σταθμών επηρεάζουν τις παραγόμενες χρονοσειρές. Λόγω του περιορισμένου όγκου δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, τα παραπάνω χαρακτηριστικά ενδέχεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας.

Συνεπάγεται επομένως πως η αναπτυχθείσα μεθοδολογία έχει περιθώρια ανάπτυξης και βελτίωσης. Για την επίτευξη αυτής κρίνεται απαραίτητη η χρήση μεγαλύτερου αριθμού σεισμικών γεγονότων και δεδομένων μονίμων σταθμών. Με την χρήση μεγαλύτερου αριθμού δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί η πιο λεπτομερής αξιολόγηση της μεθόδου και να επισημανθούν τυχόν αδυναμίες που ενδεχομένως δεν παρουσιάστηκαν με την χρήση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή. Βελτιώσεις στα αποτελέσματα ενδέχεται να προκύψουν με την εφαρμογή διαφορετικής προσέγγισης για τον υπολογισμό των μεγίστων διαφορών, όπως επί παραδείγματι με τον υπολογισμό της τάσης ενός συνόλου παρατηρήσεων γύρω από τις μεγαλύτερες κατά τιμή διαφορές. Τέλος, η γνώση του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχή μελέτης κατά την ανάλυση των δεδομένων, επιτρέπει την καλύτερη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και της κατανόησης των μετακινήσεων των σταθμών και επομένως την ορθότερη επιλογή παραμέτρων κατά την χρήση της μεθοδολογίας. Βελτιώσεις στην μεθοδολογία ενδέχεται να εξαλείψουν τους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Η εργασία αυτή και τα αποτελέσματά της μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έναυσμα για περαιτέρω έρευνα. Η απλή γεωμετρική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε θα μπορούσε να τροποποιηθεί και να εφαρμοστεί σε δεδομένα πραγματικού χρόνου (real-time) για την μελέτη των δυναμικών μετακινήσεων και την διέλευση των σεισμικών κυμάτων από τους σταθμούς κατά τη διάρκεια σεισμικών φαινομένων. Επιπλέον, η χρήση της μεθόδου σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές καταγραφής σεισμικών κυμάτων (πχ σειсмоγράφους) ενδέχεται να δώσει επιπλέον στοιχεία και λεπτομερέστερα αποτελέσματα για την διάδοση τους σε μία περιοχή, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη και κατανόηση του φαινομένου. Η μεθοδολογία αυτή δύναται να εξελιχθεί περαιτέρω για την ανίχνευση πρωτευόντων και επιφανειακών σεισμικών κυμάτων, με σκοπό να επιτρέψει την συνολική μελέτη των κυμάτων και κινήσεων που προκλήθηκαν από ένα σεισμικό γεγονός. Τέλος, με δεδομένο την έντονη σεισμικότητα της χώρας μας, η μεθοδολογία αυτή θα αποτελούσε χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη δυναμικών μετακινήσεων και σεισμικών κυμάτων με την χρήση του υφιστάμενου δικτύου μονίμων σταθμών GNSS.

6.3 Κατακλείδα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σεισμών από δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS. Για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας έγινε χρήση 14 μονίμων σταθμών GNSS συχνότητας 5Hz, για δύο σεισμικά γεγονότα μεγέθους 7.1M. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί μία απλή γεωμετρική προσέγγιση των σεισμικών κυμάτων και επιτρέπει τον υπολογισμό της χρονική στιγμής κατά την οποία τα δευτερεύοντα σεισμικά κύματα διέρχονται από τους σταθμούς. Με σύγκρισή τους με θεωρητικές τιμές όσο και με δεδομένα από την υπηρεσία UNAVCO, τα αποτελέσματα της μεθόδου κρίθηκαν αξιόπιστα με την για τους σταθμούς που απέχουν απόσταση έως και 48km από το επίκεντρο των σεισμών. Η εργασία αυτή αποδεικνύει την χρησιμότητα και καταλληλότητα των δεδομένων GNSS σε εφαρμογές της σεισμολογίας και συγκεκριμένα στην ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων.

Βιβλιογραφία

- Allen, R. M. & Ziv, A., 2011. Application of real-time GPS to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, Τόμος 38.
- Avallone, A. et al., 2011. Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L'Aquila (central Italy) event. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2).
- Avallone, A. και συν., 2011. Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L'Aquila (central Italy) event. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2).
- Calais, E., 1999. Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996–1998. *Geophysical Journal International*, pp. 221-230.
- Clarke, P. J. και συν., 1998. Crustal Strain in Central Greece from Repeated GPS Measurements in the Interval 1989-1997. *Geophysical Journal International*, pp. 195-214.
- Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F. & Héroux, P., 2010. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, pp. 123-135.
- Emore, G. L. και συν., 2007. Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and strong-motion accelerometers.. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(No. 2), p. 357–378.
- Fuchs, M. J., Rexer, M. & Schaidler, F., 2022. Detection and analysis of seismic induced GNSS station motion in a North American network following the 2017 Chiapas earthquake. *Journal of Geodynamics*, Τόμος 149.
- Geng, T. και συν., 2016. Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw7.8 Nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*.
- Grinter, T. & Jansen, V., 2012. Post-processed Precise Point Positioning: A viable alternative?. *paper presented at the Proceedings of 17th Association of Public Authority Surveyors conference (APAS2012), 19-21 Mar 2012, Wollongong, Australia*.
- Guglielmino, F. και συν., 2013. 3D displacement maps of the 2009 L'Aquila earthquake (Italy) by applying the SISTEM method to GPS and DInSAR data. *Terra Nova*, pp. 79-85.
- Guo, B., Zhang, X., Ren, X. & Li, X., 2015. High-precision coseismic displacement estimation with a single-frequency GPS receiver. *Geophysical Journal International*, pp. 612-623.
- Hohensinn, R. & Geiger, A., 2018. Hohensinn, R., & Geiger, A. (2018). Stand-alone GNSS sensors as velocity seismometers: Real-time monitoring and earthquake detection. *Sensors*, 18(11).
- Holbrook, W. S. και συν., 1999. Holbrook, W. Steven, Daniel Lizarralde, Susan McGeary, Nathan L. BanStructure and composition of the Aleutian island arc and implications for continental crustal growth. *Geology*, Τόμος 27, pp. 31-34.
- Houlié, N., Woessner, J., Giardini, D. & Rothacher, M., 2018. Lithosphere strain rate and stress field orientations near the Alpine arc in Switzerland. *Scientific Reports*.

ISC, 2021. *Catalogue Overview, Version 8.0, 06 April 2021*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/overview.php>

[Πρόσβαση 02 2022].

Jiang, Z. και συν., 2018. Coseismic and postseismic deformation associated with the 2016 Mw 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand: fault movement investigation and seismic hazard analysis. *Earth, Planets and Space*, 70(1), pp. 1-14.

Jin, S. & Su, K., 2019. Co-seismic displacement and waveforms of the 2018 Alaska earthquake from high-rate GPS PPP velocity estimation. *Journal of Geodesy*, Τόμος 93, pp. 1559-1569.

Kouba, J. & Héroux, P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, pp. 12-28.

Lacroix, P., Perfettini, H., Taïpe, E. & Guillier, B., 2014. Coseismic and postseismic motion of a landslide: Observations, modeling, and analogy with tectonic faults. *Geophysical Research Letters*, pp. 6676-6680.

Maybeck, P. S., 1979. *Stochastic models, estimation, and control*. Ohio, USA: Academic Press.

Melbourne, T. I., Szeliga, W. M., Marcelo Santillan, V. & Scrivner, C. W., 2021. Global Navigational Satellite System Seismic Monitoring. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1248-1262.

Moritz, H., 2000. Geodetic reference system 1980. *Journal of Geodesy*, 74(1), pp. 128-133.

Moritz, H., 2000. Geodetic reference system 1980. *Journal of Geodesy*, 74(1), pp. 128-133.

Moschas, F., Avallone, A., Saltogianni, V. & Stiros, S. C., 2014. Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: An assessment based on free oscillation experiments. *Earthquake engineering & structural dynamics*, pp. 1853-1866.

Nikolaidis, R. M. και συν., 2001. Seismic wave observations with the Global Positioning System. *Journal Of Geophysical Research*, 106(B10), pp. 21,897-21,916.

Paziewski, J. και συν., 2020. Towards Galileo + GPS seismology: Validation of high-rate GNSS-based system for seismic events characterisation. *Measurement*, Τόμος 166.

Phillips, D. & Bartel, B., 2019. *Community Event Response to the July 4, 2019 M 6.4 and July 6, 2019 M 7.1 Earthquakes Near Ridgecrest, California*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.unavco.org/highlights/2019/ridgecrest.html>

[Πρόσβαση 02 2022].

Phillips, D., Ellis, A. & Olds, S., 2018. *Data Event Response to the November 30, 2018 M 7.0 Earthquake, 13km N of Anchorage, Alaska*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.unavco.org/highlights/2018/anchorage.html>

[Πρόσβαση 02 2022].

Sakellariou, D. D., 2006. *Geological Frame*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06greece/background/geology/geology.html>

[Πρόσβαση 02 2022].

- Serpelloni, E. και συν., 2012. GPS observations of coseismic deformation following the May 20 and 29, 2012, Emilia seismic events (northern Italy): data, analysis and preliminary models. *Annals Of Geophysics*.
- Stein, S. & Wysession, M., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. s.l.:Blackwell Publishing.
- Stürze, A. και συν., 2016. The new version 2.12 of BKG Ntrip Client (BNC). *Geophys. Res. Abstr*, Τόμος 18, p. 12012.
- Tendürüs, M. και συν., 2010. Long-term effect of seismic activities on archaeological remains: A test study from Zakynthos, Greece.. *Ancient Earthquakes*, Τόμος 471, pp. 145-156.
- Tregoning, P. και συν., 2013. A decade of horizontal deformation from great earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, pp. 2371-2381.
- USGS, 2018. *M 7.1 - 1 km SE of Point MacKenzie, Alaska*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ak018fcnsk91/executive>
[Πρόσβαση 02 2022].
- USGS, 2019. *M 7.1 - 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci38457511/executive>
[Πρόσβαση 02 2022].
- Welch, G. & Bishop, G., 2001. *An Introduction to the Kalman Filter*. s.l., s.n.
- Xu, P. και συν., 2013. High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units.. *Journal of Geodesy*, 87(4), pp. 361-372.
- Yigit, C. O. & Gurlek, E., 2017. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures.. *Geomatics, natural hazards and risk*, pp. 893-904.
- Βέης, Γ., Μπιλλήρης, Χ. & Παπαζήση, Κ., 2009. *Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δούτσος, Θ., 2014. *Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές*. 2 επιμ. Αθήνα: Liberal Books.
- Παπαζάχος, Β. Κ., Καρακαΐσης, Γ. Φ. & Χατζηδημητρίου, Π. Μ., 2005. *Εισαγωγή στην Σεισμολογία*. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ανίχνευση δευτερευόντων σεισμικών κυμάτων σε δεδομένα μονίμων σταθμών GNSS.

Station p597													
U (longitudinal component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.005649	03:20:19.400										
	Max diff Kalman	0.004270	03:20:38.600										
	Max diff MA			0.004380	03:20:39.000	0.0034338	03:20:11.600	0.003171	03:20:12.600				
	Max diff MA after Kalman			0.003973	03:20:38.800	0.0033660	03:20:11.600	0.003113	03:20:12.600				
	Max diff EKF	0.006410	03:20:19.400										
	Max diff MA after EKF			0.004970	03:20:39.000	0.0038963	03:20:11.600	0.003598	03:20:12.600				
V (transverse component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.007388	03:20:30.600										
	Max diff Kalman	0.006325	03:20:30.600										
	Max diff MA			0.005725	03:20:31.000	0.0052780	03:20:31.000	0.004345	03:20:31.800				
	Max diff MA after Kalman			0.005553	03:20:31.000	0.0051416	03:20:31.200	0.004209	03:20:31.800				
	Max diff EKF	0.008370	03:20:30.600										
	Max diff MA after EKF			0.006486	03:20:31.000	0.0059797	03:20:31.000	0.004923	03:20:31.800				

Station p596													
U (longitudinal component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.006689	03:20:24.400										
	Max diff Kalman	0.005503	03:20:24.400										
	Max diff MA			0.005004	03:20:25.000	0.0039302	03:20:25.200	0.002987	03:20:26.000				
	Max diff MA after Kalman			0.004705	03:20:25.000	0.0038582	03:20:25.400	0.002878	03:20:26.000				
	Max diff EKF	0.007578	03:20:24.400										
	Max diff MA after EKF			0.005669	03:20:25.000	0.0044523	03:20:25.200	0.003384	03:20:26.000				
V (transverse component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.010670	03:20:24.400										
	Max diff Kalman	0.010340	03:20:24.200										
	Max diff MA			0.010235	03:20:24.400	0.0089757	03:20:24.800	0.007412	03:20:25.400				
	Max diff MA after Kalman			0.010046	03:20:24.400	0.0088723	03:20:24.800	0.007258	03:20:25.400				
	Max diff EKF	0.012094	03:20:24.400										
	Max diff MA after EKF			0.011600	03:20:24.400	0.0101730	03:20:24.800	0.008400	03:20:25.400				

Station p093													
U (longitudinal component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.012552	03:05:32.000										
	Max diff Kalman	0.005302	03:15:47.000										
	Max diff MA			0.003015	03:15:47.600	0.001904	03:20:40.800	0.001601	03:20:24.200				
	Max diff MA after Kalman			0.002298	03:15:47.600	0.001644	03:20:23.600	0.001400	03:20:24.200				
	Max diff EKF	0.014223	03:05:32.000										
	Max diff MA after EKF			0.128843	03:15:47.600	0.002158	03:20:40.800						
V (transverse component)		diff(m)		MA window = 5		MA window = 10		MA window = 15		MA window = 150		MA window = 300	
			epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch	diff(m)	epoch
	Max diff	0.015790	03:19:12.000										
	Max diff Kalman	0.006495	03:19:12.000										
	Max diff MA			0.005433	03:20:27.000	0.004302	03:20:28.000	0.003494	03:20:27.400				
	Max diff MA after Kalman			0.004790	03:20:27.000	0.004017	03:20:27.800	0.003445	03:20:27.800				
	Max diff EKF	0.017887	03:19:12.000										
	Max diff MA after EKF			0.006155	03:20:27.000	0.004873	03:20:28.000						