



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Σχολή Μηχανικής και
Τεχνολογίας

Πτυχιακή εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ GNSS
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΧΟΙΡΟΚΟΙΤΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΔΟ 2017-2019**

Τουλούπης Γιώργος

Λεμεσός, Μάιος 2019

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ GNSS ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΧΟΙΡΟΚΟΙΤΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2017-2019

Γιώργος Τουλούπης

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Δανέζης Χριστόδουλος

Λεμεσός, Μάιος 2019

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Γιώργος Τουλούπης, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, που ήταν συνοδοιπόροι καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Χριστόδουλο Δανέζη για την επίβλεψη και την καθοδήγηση της πτυχιακής εργασίας καθώς και τον κύριο Ευάγγελο Μενδωνίδα για την άψογη συνεργασία που είχαμε στο πεδίο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει την μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του εδάφους του Αρχαιολογικού Χώρου της Χοιροκοιτίας, ο οποίος εντάσσεται στα μνημεία Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της UNESCO. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην συνέχιση της έρευνας για τον εντοπισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων, στον Αρχαιολογικό χώρο της Χοιροκοιτίας με δορυφορικές παρατηρήσεις GNSS. Ως κορυφές του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σημεία, τα οποία τοποθετήθηκαν με την έναρξη της έρευνας (2017) σε πλαγιές που εντοπίζονται ενεργά ρήγματα καθώς και σε βραχομάζες εντός και εκτός του αρχαιολογικού χώρου, οι οποίες σε περίπτωση κατολίσθησης είναι πολύ πιθανόν να έχουν μεγάλο κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Οι μετρήσεις βάσεων έγιναν με την μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού. Το δίκτυο επιλύθηκε με σταθερή κορυφή το CHR3 και η επίλυση έγινε με το λογισμικό Trimble Business Center. Στο διάστημα ενός χρόνου πραγματοποιήθηκαν δυο καμπάνιες μετρήσεων, οι οποίες συγκρίθηκαν μεταξύ τους, καθώς και με τις παρελθοντικές καμπάνιες, και προσδιορίστηκαν οι απόλυτες και σχετικές μετακινήσεις για διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές μετακινήσεις στο δίκτυο για την χρονική περίοδο 19/05/2017 – 04/04/2019. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η καθίζηση της τάξης των 1.56 cm η οποία είχε εντοπιστεί στην κορυφή PILR από παρελθοντικές μετρήσεις έχει επανέλθει στην προγενέστερη κατάσταση, ωστόσο η προηγούμενη μετακίνηση της κορυφής δυτικά κατά 1.23 cm φαίνεται να αυξήθηκε κατά 3.6 mm. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η περιοχή χαίρει περεταίρω διερεύνησης σε βάθος χρόνου.

Λέξεις κλειδιά: Δορυφορικές παρατηρήσεις, Οριζόντιες μετακινήσεις, Κατακόρυφες μετακινήσεις, Κορυφές δικτύου, Διάστημα εμπιστοσύνης.

ABSTRACT

This article presents the study of the kinematic behavior of the soil of the Archaeological Site of Choirokoitia, which is part of the UNESCO World Heritage Sites. This diploma thesis aims to continue research on the identification of horizontal and vertical movements to Archbishop of Choirokoitia with satellite observations GNSS. There were 4 points used as tops at the beginning of the survey (2017) on slopes delineated by active faults as well as in rock masses inside and outside the archaeological site, which in case of landslide are very likely to have a large social and economic cost. Baselines measurements were made using the static localization method. The network was resolved by a fixed peak CHR3 and the solution was achieved by using the Trimble Business Center software. Over one year, two measurement campaigns were compared, in comparison to the previous campaigns, and absolute and relative shifts were determined for a 95% confidence interval.

The results showed that there were no statistically significant movements in the network for the period 19/05/2017 - 04/04/2019. It was also observed that the 1.56 cm sedimentation which had been detected for the PILR peak by past measurements, has returned to the previous state, however the previous displacement of the peak westwards by 1.23 cm seems to increase by 3.6 mm. The results show that the region needs further research over time.

Keywords: Satellite observations, Horizontal movements, Vertical movements, Network peaks, Confidence interval

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	x
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	1
2. Παγκόσμια συστήματα Εντοπισμού GNSS.....	3
2.1.1 GPS	3
2.1.2 GLONASS	4
2.1.3 GALILEO.....	4
2.1.4 COMPASS/BEIDOU.....	4
2.2 Παρατηρήσεις στο σύστημα GNSS.....	4
2.3 Μεταβολές του Κέντρου Φάσης των Κεραιών GNSS	7
2.4 Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης.....	8
2.4.1 Απόλυτος Εντοπισμός.....	8
2.4.2 Σχετικός Εντοπισμός.....	9
2.4.2.1 Απλές διαφορές.....	9
2.4.2.2 Διπλές διαφορές.....	10
2.4.2.3 Τριπλές διαφορές	11
2.5 Σφάλματα Μετρήσεων GNSS	12
3. Συστήματα Αναφοράς.....	15

3.1 Γήινο Σύστημα Αναφοράς.....	16
3.2 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς.....	16
3.3 Πλαίσια Αναφοράς	17
4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	18
4.1 Ανίχνευση - Εντοπισμός Οριζόντιων Μετακινήσεων στο Λεκανοπέδιο Αττικής με Δορυφορικές Μεθόδους.....	18
4.2 Μελέτη μικρομετακινήσεων με συνδυασμό μετρήσεων βαρύτητας και GNSS... 18	
4.3 Μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων στην περιοχή της Λίμνης Κάρλας	19
4.4 Μελέτη Μικρομετακινήσεων Εδάφους στην Δυτική Κρήτη με χρήση Διαφορικής Συμβολομετρίας.....	19
4.5 Ακριβής Γεωδαιτικός Εντοπισμός για την Παρακολούθηση των Μικρομετακινήσεων του Φράγματος Βαλσαμιώτη στη Δυτική Κρήτη.....	20
5. Μεθοδολογία Έρευνας.....	21
5.1 Πύκνωση Δικτύου.....	21
5.2 Επιλογή χρονικού διαστήματος των μετρήσεων	22
5.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων	23
5.3.1 Όργανα και Παρελκόμενα	24
5.4 Επεξεργασία Μετρήσεων	25
5.5 Μετατροπή Συστήματος Αναφοράς.....	32
6. Αποτελέσματα.....	34
7. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	38
8. Συμπεράσματα	39
8.1 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.....	40
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Οριζοντιογραφικό και κατακόρυφο σφάλμα βάσεων για την πρώτη καμπάνια μετρήσεων	27
Πίνακας 2: Οριζοντιογραφικό και κατακόρυφο σφάλμα βάσεων για την δεύτερη καμπάνια μετρήσεων	28
Πίνακας 3: Συντεταγμένες από την πρώτη καμπάνια μετρήσεων στο WGS84	30
Πίνακας 4: Συντεταγμένες από την δεύτερη καμπάνια μετρήσεων στο WGS84.....	31
Πίνακας 5: Μετρούμενο μήκος για κάθε βάση	32
Πίνακας 6: Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/2017 – 26/10/2017	34
Πίνακας 7: Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/17-15/12/2019	35
Πίνακας 8: Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/2017 – 04/04/2019 ...	35

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 : Ασάφεια Φάσης.	6
Διάγραμμα 2 : Διαφορά μεταξύ μηχανικού και ηλεκτρικού κέντρου.	8
Διάγραμμα 3 : Απλή Διαφορά μεταξύ δεκτών.	10
Διάγραμμα 4 : Απλή διαφορά μεταξύ δορυφόρων.	10
Διάγραμμα 5 : Διπλή διαφορά μεταξύ δεκτών-δορυφόρων.	11
Διάγραμμα 6 : Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών – εποχών.	11
Διάγραμμα 7 : Μεταβολή δείκτη Dop λόγω γεωμετρίας δορυφόρων.	14
Διάγραμμα 8 : Διακυμάνσεις δείκτη Dop στο πρώτο σετ μετρήσεων.	23
Διάγραμμα 9 : Διαθεσιμότητα Δορυφόρων.	23
Διάγραμμα 10 : Κεραία Zephyr Geodetic 3.	25
Διάγραμμα 11 : Μετρούμενο Δίκτυο στο περιβάλλον του λογισμικού	26
Διάγραμμα 12 : Μικρομετακινήσεις κατά Easting	36
Διάγραμμα 13 : Μικρομετακινήσεις κατά Northing	36
Διάγραμμα 14 : Μικρομετακινήσεις κατά UP	37

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι σημαντικές συντομογραφίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο κείμενο της πτυχιακής και χρειάζονται επεξήγηση π.χ.:

ΤΕΠΙΑΚ.:	Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
GNSS:	Global Navigation Satellite System
GPS:	Global Positioning System
GLONASS:	Russian Global Satellite Navigation System
GALILEO:	European Global Satellite Navigation System
BEIDOU:	Chinese Global Satellite Navigation System
APC:	Antenna phase center
ARP:	Antenna Reference Point
PCV:	Phase Centre Variations
ITRF:	International Terrestrial Reference Fram
ITRS:	International Terrestrial Reference System
IGS:	International GNSS service
DOP:	Dilution of Precision
HDOP:	Horizontal Dilution of Precision
VDOP:	Vertical Dilution of Precision
GDOP:	Geometric Dilution of Precision
TDOP:	Time Dilution of Precision
WGS 84:	World Geodetic system 1984

1. Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας κατά τον εικοστό αιώνα οδήγησε στη βελτίωση των γεωδαιτικών οργάνων, με αποτέλεσμα η επιστήμη της γεωδαισίας να μπορεί σήμερα να ανταποκριθεί με μεγάλη ακρίβεια στις εφαρμογές μικρομετακινήσεων. Ο εντοπισμός και ο προσδιορισμός των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων παρέχει πληροφορίες για την κινηματική συμπεριφορά του εδάφους και των εξειδικευμένων κτιρίων. Ο προσδιορισμός των μικρομετακινήσεων είναι υψίστης σημασίας λόγω του ότι έγκειται σε αυτόν η δυνατότητα πρόβλεψης φυσικών καταστροφών, που πολύ πιθανόν να έχουν κοινωνικό κόστος στερώντας ανθρώπινες ζωές αλλά και η δυνατότητα αντιμετώπισης αστοχιών με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Οι περιοχές που έχουν μεγαλύτερη σημαντικότητα για την διεξαγωγή έρευνας μικρομετακινήσεων βρίσκονται είτε σε τοποθεσίες με επαναλαμβανόμενη παρουσία φυσικών διεγέρσεων (π.χ. ενεργά ρήγματα που πολύ πιθανόν να προκαλέσουν σεισμική διέγερση, έντονες βροχοπτώσεις κ.τ.λ.), είτε τοποθεσίες που δέχονται σφοδρή επίδραση ανθρωπογενών δράσεων (π.χ. δημιουργία σηράγγων, κτίρια τεράστιων φορτίων κ.τ.λ.).

Η επιστήμη της γεωδαισίας εκτός από την υψηλή ακρίβεια (μερικά mm) στον προσδιορισμό μικρομετακινήσεων με τη μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού, παρέχει τη δυνατότητα συσχέτισης των μικρομετακινήσεων σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς, διαδικασία, η οποία απαιτείται για την άμεση διερεύνηση του μηχανισμού κίνησης της περιοχής.

1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Η τοπογραφία του αρχαιολογικού χώρου της Χοιροκοιτίας τον καθιστά επιρρεπή σε κατολισθήσεις, λόγω της ύπαρξης ενεργών ρηγμάτων σύμφωνα με την αρχαιολογική υπηρεσία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να τίθεται σε κίνδυνο ο αρχαιολογικός χώρος και να υπάρχει η απειλή τεράστιου κοινωνικού κόστους, κυρίως σε ανθρώπινες ζωές. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συνέχιση της έρευνας για εντοπισμό και προσδιορισμό των μικρομετακινήσεων στον αρχαιολογικό χώρο της Χοιροκοιτίας, χρησιμοποιώντας συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS. Κύριος στόχος είναι η επαλήθευση των μικρομετακινήσεων που έχουν παρατηρηθεί από παρελθοντικές μετρήσεις στο σημείο PILR, συγκρίνοντας την πρώτη καμπάνια μετρήσεων που

πραγματοποιήθηκε στην περιοχή στις 19/05/2017 με την τρίτη καμπάνια μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στις 15/12/2018.

2. Παγκόσμια συστήματα Εντοπισμού GNSS

Τα δορυφορικά σύστημα παρέχουν 24ωρη πληροφόρηση 3D θέσης, ταχύτητας και χρόνου κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στην επιφάνεια της γης σε χρήστες που βρίσκονται στον αέρα ή στο διάστημα. Παρά τα τεράστια οφέλη που προσφέρει η χρήση τους, εμφανίζουν και διάφορα προβλήματα, όπως η απώλεια σήματος σε αστικά περιβάλλοντα, λόγω περιορισμένης ορατότητας των απαιτούμενων δορυφόρων από το δέκτη, καθώς και μειωμένη υψομετρική ακρίβεια, η οποία οφείλεται στο ότι οι δορυφόροι βρίσκονται πάνω από τον ορίζοντα του δέκτη.

Η αρχή λειτουργίας του δορυφορικού εντοπισμού είναι παρόμοια με την γεωδαιτική οπισθοτομία, δηλαδή, ο προσδιορισμός της θέσης επιτυγχάνεται με την επεξεργασία μετρήσεων αποστάσεων από τον δέκτη προς τέσσερις ή περισσότερους δορυφόρους, οι οποίοι βρίσκονται σε γνωστές θέσεις. Οι δορυφόροι εκπέμπουν κωδικοποιημένες πληροφορίες, οι οποίες λαμβάνονται και αποκωδικοποιούνται από τους δέκτες GPS, και έτσι γνωρίζουν τη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του δορυφόρου. (Αριστείδης Ι. Φωτίου, Χρήστος Κ. Πικριδάς (2012))

2.1.1 GPS

Η σύλληψη της ιδέας για τη δημιουργία του GPS έγινε το 1973 ενώ η υλοποίηση της ξεκίνησε το 1978. Το GPS δημιουργήθηκε από την κυβέρνηση της Αμερικής για στρατιωτικούς σκοπούς και κυρίως για την κατασκοπία άλλων χωρών. Το 1983 η κυβέρνηση των Η.Π.Α επέτρεψε στους πολίτες τη χρήση του GPS για γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, καθώς και για εφαρμογές πλοήγησης. Το GPS αποτελείται από το τμήμα διαστήματος, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρηστών. Το τμήμα διαστήματος περιλαμβάνει τριάντα δύο δορυφόρους, εκ των οποίων οι οκτώ είναι εφεδρικοί και οι υπόλοιποι είκοσι τέσσερις βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία, προσφέροντας παγκόσμια κάλυψη σε έξι τροχιακά επίπεδα, δηλαδή, τέσσερις δορυφόροι ανά τροχιακό επίπεδο. Οι τροχιές αυτές έχουν κλίση 55 μοίρες από το γήινο ισημερινό

και έχουν ως κέντρο τους το κέντρο της γης. Η μέση ακτίνα τροχιάς είναι 26500 km ενώ η μέση κλίση τροχιάς 20200 km.

2.1.2 GLONASS

Το GLONASS κατασκευάστηκε το 1976 στην Ρωσία. Αποτελείται από είκοσι τέσσερις δορυφόρους, από τους οποίους οι τρεις είναι εφεδρικοί και οι υπόλοιποι βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία, παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη μέσω τριών τροχιακών επιπέδων από οκτώ δορυφόρους. Οι τροχίες αυτές έχουν κλίση 64.8 από το γήινο ισημερινό με μέσο υψόμετρο τροχιάς 19100km. Από το 2011 παρέχει παγκόσμια κάλυψη και κάθε δορυφόρος εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα τον ίδιο κώδικα.

2.1.3 GALILLO

Το GALILLO είναι το ευρωπαϊκό σύστημα δορυφορικού εντοπισμού, το οποίο υπολογίζετε ότι θα είναι σε πλήρη λειτουργία το 2020 μέσω τριάντα δορυφόρων, από τους οποίους οι τρεις θα είναι εφεδρικοί. Οι δορυφόροι εκτιμάται ότι θα είναι σε θέση να λαμβάνουν τα σήματα κινδύνου από τους πομπούς του χρήστη στο κέντρο διάσωσης. Αυτή είναι μια καινοτόμα τεχνολογία που τα υπόλοιπα δορυφορικά συστήματα δεν την περιλαμβάνουν. Οι δορυφόροι θα εκπέμπουν σήμα σε τρεις συχνότητες και το μέσο ύψος τροχιάς τους υπολογίζεται ότι θα είναι στα 23600km.

2.1.4 COMPASS/BEIDOU

Το σύστημα COMPASS δημιουργήθηκε από την Κίνα για τον ίδιο λόγο που κατασκευάστηκε το GLONASS, δηλαδή για την ανεξάρτησή τους από το GPS σε περιπτώσεις πολέμου. Το COMPASS σήμερα καλύπτει την Κίνα και τις γειτονικές χώρες, ενώ μέχρι το 2020 υπολογίζεται ότι και αυτό θα παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Οι δορυφόροι του COMPASS επικαλύπτονται με αυτούς του GALILLO και εκπέμπουν τέσσερις συχνότητες.

2.2 Παρατηρήσεις στο σύστημα GNSS

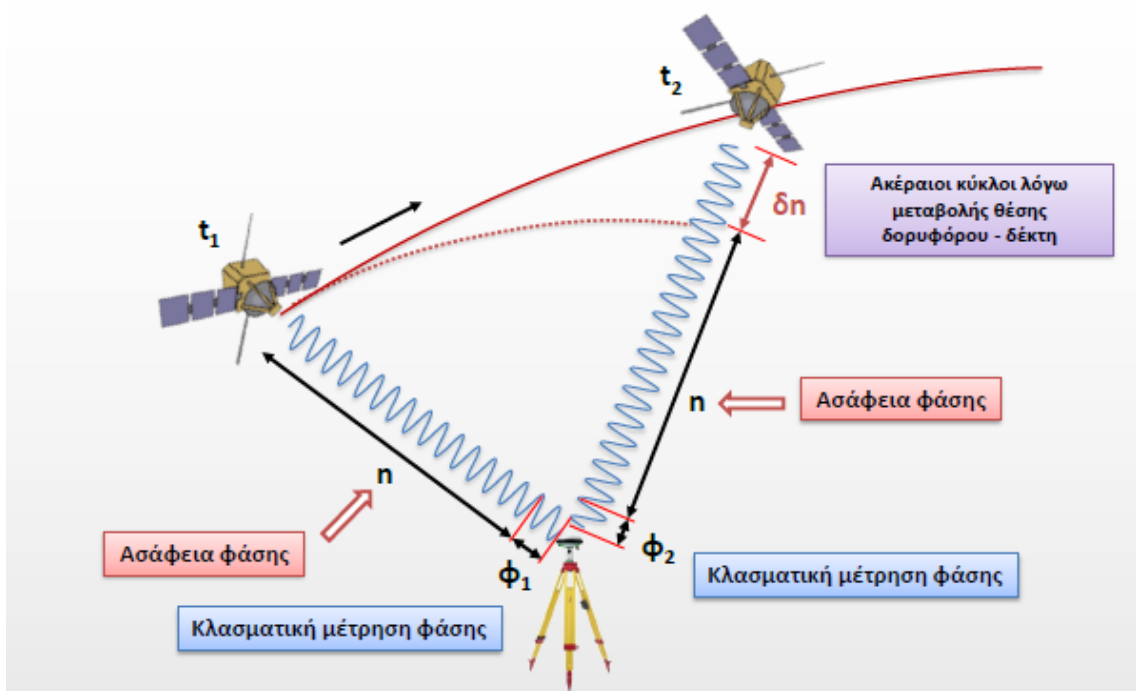
Τα παρατηρούμενα μεγέθη για τον εντοπισμό θέσης, ταχύτητας και χρόνου είναι οι ψευδοαποστάσεις και οι φάσεις του φέροντος κύματος.(Αριστείδης Ι. Φωτίου, Χρήστος

Κ.Πικριδάς (2012)). Στη γεωδαισία το παρατηρούμενο μέγεθος που χρησιμοποιείται τις πλείστες φορές είναι οι παρατηρήσεις φάσεις, οι οποίες είναι πολύ πιο ακριβείς (σχετικός εντοπισμός).

Το ατομικό ρολόι του δορυφόρου παράγει μια θεμελιώδη συχνότητα $f_0=10.23$ MHz, από την οποία προκύπτουν οι δυο βασικές φέρουσες συχνότητες: η συχνότητα $L1=1575.42$ MHz και το μήκος κύματος $\lambda \cong 19.03$ cm. Η συχνότητα $L2=10.23$ MHz και μήκος κύματος $\lambda \cong 24.42$ cm. Ο προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο απαιτεί τη μέτρηση αποστάσεων μεταξύ δεκτών και δορυφόρων. Επειδή οι μετρήσεις είναι μιας κατεύθυνσης, δηλαδή τα σήματα εκπέμπονται μόνο κατά τη φορά δορυφόροι > δέκτης, χρησιμοποιούνται δυο εκπεμπόμενοι κώδικες, ο C/A και P(Y), που δεν είναι παρά δυαδικές ακολουθίες από κάποιους αλγόριθμους. Οι κώδικες αυτοί δεν μπορούν όμως να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και για αυτό το λόγο προστίθενται πάνω στις δυο φέρουσες συχνότητες, την L1 (διαμόρφωση από C/A και P(Y)) και την L2 (διαμόρφωση μόνο από P(Y)). Η διαμόρφωση είναι τέτοια, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση του χρόνου διάδοσης ή του χρόνου ταξιδιού του σήματος από το δορυφόρο στο δέκτη.

Όλοι οι δέκτες αποτελούνται από την κεραία και τον κυρίως δέκτη. Η κεραία μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική και μπορεί να λάβει τη συχνότητα που εκπέμπεται από το δορυφόρο, για το λόγο ότι πριν την εκτόξευση των δορυφόρων στο διάστημα γίνεται διόρθωση της θεμελιώδους συχνότητας (f_0) για τις σχετιστικές επιδράσεις. Επίσης, ο δέκτης είναι ρυθμισμένος να λαμβάνει τις συχνότητες $L1, L2, L5 \pm 4.5$ khz λόγω του φαινομένου Doppler. Ο δέκτης αφού λάβει το εξασθενημένο σήμα από την κεραία, το ενισχύει μέσω του προενισχυτή και το στέλνει στον κυρίως δέκτη για την ανάκτηση της πληροφορίας. Αρχικά, το σήμα μεταφέρεται στο βρόγχο DII, όπου ο δέκτης προσπαθεί να ταυτίσει τους κώδικες που έχει στη μνήμη του (κάθε δορυφόρος εκπέμπει διαφορετικό κώδικα C/A) με τους κώδικες που είναι τοποθετημένοι πάνω στο εισερχόμενο σήμα. Με την επίτευξη της συσχέτισης ανακτάται η ψευδοαπόσταση και αφαιρείται από το εισερχόμενο σήμα. Στη συνέχεια, το εισερχόμενο σήμα μεταφέρεται στο βρόγχο PII, όπου συγκρίνεται με ένα αντίγραφο του δέκτη και ανακτάται το μήνυμα πλοήγησης (παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις τροχιές, τα χρονόμετρα των δορυφόρων καθώς και συντελεστές διόρθωσης της ιονόσφαιρας), το οποίο αφαιρείται και αυτό από το εισερχόμενο σήμα. Αφού απαλείφει και το μήνυμα πλοήγησης πάνω στο καθαρό ημιτονοειδή φορέα, γίνονται οι μετρήσεις φάσης και ο δέκτης παράγει μια νέα

ημιτονοειδή ρέμπλικα, την οποία προσπαθεί να ταυτίσει με την εισερχόμενη προς την φάση. Η μετατόπιση της ρέμπλικας για την επίτευξη της ταύτισης είναι ένα κλάσμα του κύκλου, το οποίο ο δέκτης το γνωρίζει, αλλά δεν μπορεί να γνωρίζει τον ακέραιο αριθμό κύκλων που μεσολάβησαν μέχρι το σήμα να φτάσει στο δέκτη. Ωστόσο, από τη στιγμή του κλειδώματος και μετέπειτα, ο δέκτης μπορεί να αναγνωρίσει τον ακέραιο αριθμό κύκλων λόγω αλλαγής της απόστασης δέκτη-δορυφόρου. Ο ακέραιος αριθμός κύκλων που αντιστοιχούν στην πρώτη εποχή ονομάζεται ασάφεια φάσης και προστίθεται σαν άγνωστη παράμετρος κατά την επίλυση. Η ασάφεια φάσης παραμένει σταθερή για κάθε δέκτη δορυφόρου αν δεν υπάρξει διακοπή λήψης του σήματος.



Διάγραμμα 1 : Ασάφεια Φάσης.

Για κάθε απώλεια σήματος ένας αριθμός από τους ακέραιους κύκλους χάνεται. Οι χαμένοι κύκλοι ονομάζονται κύκλοι ολίσθησης. Οι παρατηρήσεις που είναι επηρεασμένες από κύκλους ολίσθησης μπορούν να εντοπιστούν μέσω των γραμμικών συνδυασμών και αφού εντοπιστούν μπορούν είτε να διορθωθούν, είτε να απομακρυνθούν. (Leick, A. (2004))

$$\varphi = \rho * (f / c) + (\delta\tau - \delta T) * f + n - \delta ion + \delta trop + e \quad (1)$$

Όπου:

φ είναι η παρατήρηση φάσης,

ρ : γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη

f : η συχνότητα του φέροντος κύματος

c : η ταχύτητα φωτός

δt : η απόκλιση του χρονομέτρου του δορυφόρου από τον χρόνο GPST

δT : η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από το χρόνο GPST

n : ο άγνωστος αριθμός ακέραιων κύκλων που αντιστοιχεί στην πρώτη εποχή

δi_{ion} : επιτάχυνση του σήματος λόγω ιονόσφαιρας

δi_{trop} : καθυστέρηση του σήματος λόγω τροπόσφαιρας

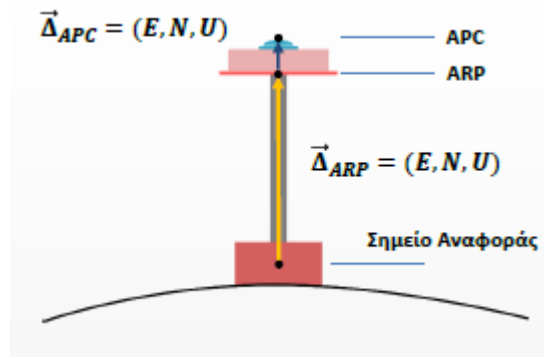
e : θόρυβος

Αφού υπολογιστεί η φάση (ακέραιοι + κλασματικοί κύκλοι), υπολογίζετε η απόσταση δέκτη-δορυφόρου πολλαπλασιάζοντας το μήκος κύματος του φέροντος κύματος με την φάση.

2.3 Μεταβολές του Κέντρου Φάσης των Κεραιών GNSS

Το μηχανικό κέντρο (ARP) μιας κεραίας που χρησιμοποιείται σε γεωδαιτικές μετρήσεις δεν ταυτίζεται με το σημείο στο οποίο γίνεται η μέτρηση του δορυφορικού σήματος για μια δεδομένη χρονική στιγμή. Το σημείο αυτό ονομάζεται ηλεκτρικό κέντρο (APC) και εξαρτάται από την διεύθυνση και την συχνότητα του δορυφορικού σήματος, το είδος της κεραίας και τον τρόπο κατασκευής της. Δηλαδή, το σήμα καταγράφεται σε διαφορετικό σημείο για κάθε δορυφόρο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μεταβολή του κέντρου φάσης της κεραίας (PCV) και μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων αν δεν πραγματοποιηθεί η κατάλληλη βαθμονόμηση (Δεληκαράγλου, Δ. (2005)). Το μηχανικό κέντρο είναι το σημείο ως προς το οποίο μετρείται το ύψος της κεραίας και το ηλεκτρικό κέντρο το σημείο όπου λαμβάνεται το δορυφορικό σήμα. Έτσι, είναι απαραίτητη η γνώση των αποκλίσεων του κέντρου φάσης της κεραίας ώστε να γίνει ορθά η αναγωγή των μετρήσεων στο σημείο αναφοράς. Σήμερα, σε εξειδικευμένες

εφαρμογές π.χ. μικρομετακινήσεις, απαιτείται επεξεργασία μετρήσεων για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας, αρκεί να εισάγουμε την κεραία που χρησιμοποιήθηκε και να γνωρίζουμε τις γωνίες λήψης του σήματος και έπειτα τα λογισμικά υπολογίζουν από μόνα τους τις αποκλίσεις του κέντρου φάσης με την χρήση ειδικών αλγορίθμων.



Διάγραμμα 2 : Διαφορά μεταξύ μηχανικού και ηλεκτρικού κέντρου.

2.4 Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης

Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι εντοπισμού θέσης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Καταλληλότερη μέθοδος είναι αυτή που τηρεί τις προδιαγραφές που απαιτούνται με το λιγότερο κόστος.

2.4.1 Απόλυτος Εντοπισμός

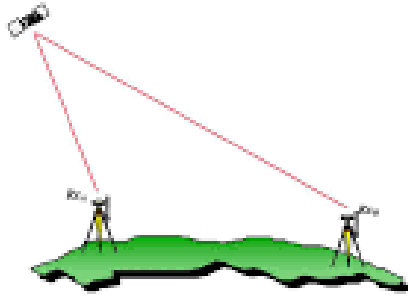
Ένας δέκτης χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη δική του απόλυτη θέση λαμβάνοντας παρατηρήσεις από τουλάχιστον 4 δορυφόρους. Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι 9m οριζοντιογραφικά και 15m κατακόρυφα, όταν οι τροχιές, οι διορθώσεις από τα χρονοόμετρα των δορυφόρων και η διόρθωση της ιονόσφαιρας γίνουν από την εκπεμπόμενη εφημερίδα, την οποία λαμβάνει ο δέκτης από τον δορυφόρο μέσω του μηνύματος πλοήγησης. Ο απόλυτος εντοπισμός μπορεί να φτάσει την ακρίβεια των μερικών εκατοστών όταν οι διορθώσεις των τροχιών και των χρονομέτρων δεν γίνουν από τα δεδομένα του μηνύματος πλοήγησης, αλλά από τα δεδομένα της IGS.

2.4.2 Σχετικός Εντοπισμός

Για τη μέθοδο αυτή απαιτούνται δυο δέκτες: ο ένας βρίσκεται τοποθετημένος σε γνωστό σημείο (base) του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές και ο άλλος δέκτης (rover) τοποθετείται κάθε φορά σε σημείο όπου οι συντεταγμένες είναι άγνωστες. Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζεται το διάνυσμα μεταξύ των σημείων (ΔX , ΔY , ΔZ) και στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντεταγμένες του επιθυμητού σημείου με την σχέση: $[Xr] = [Xb] + [\Delta xb - r]$. (Sickle, J. V. (2001)) Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι δυο δέκτες να μετράνε τις ίδιες χρονικές περιόδους και η βάση (απόσταση μεταξύ base και rover) να μην είναι μεγαλύτερη από 10-15km, ώστε οι δύο δέκτες να λαμβάνουν σήμα από αρκετούς κοινούς δορυφόρους. Αφού οι δυο δέκτες παρατηρούν αρκετούς κοινούς δορυφόρους δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν γραμμικοί συνδυασμοί ώστε να απαλειφθούν ατμοσφαιρικά σφάλματα και άγνωστοι παράμετροι όπως το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου και του δέκτη.

2.4.2.1 Απλές διαφορές

Απλή διαφορά ονομάζεται η διαφορά ταυτόχρονων μετρήσεων ανάμεσα σε δυο δέκτες και ένα δορυφόρο. Με τη διαφορά αυτή επιτυγχάνεται η εξάλειψη του σφάλματος του χρονομέτρου του δορυφόρου γνωστή και ως απλή διαφορά μεταξύ δεκτών. Πρακτικά για να εξαλειφθεί το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου πρέπει η βάση να είναι μικρή (απόσταση base, rover). Για να είναι ίδιο το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου, θα πρέπει η απόσταση του δορυφόρου από τους δύο δέκτες να είναι σχεδόν ίδια. Η διαφορά αυτή, με την ίδια λογική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάμεσα σε δυο μετρήσεις από ένα δέκτη προς διαφορετικούς δορυφόρους. Με τη διάφορα αυτή, επιτυγχάνεται η εξάλειψη του χρονομέτρου του δέκτη, γνωστή και ως απλή διαφορά μεταξύ δορυφόρων.



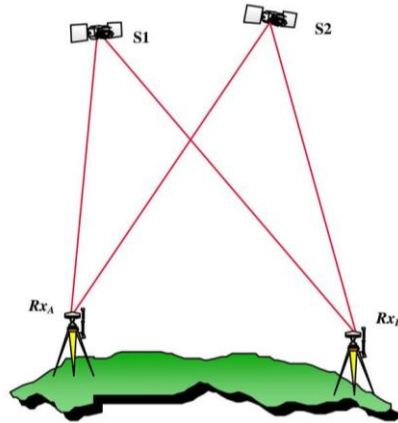
Διάγραμμα 3: Απλή Διαφορά μεταξύ δεκτών.



Διάγραμμα 4 : Απλή διαφορά μεταξύ δορυφόρων.

2.4.2.2 Διπλές διαφορές

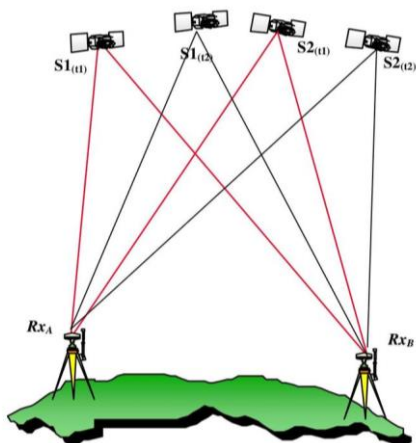
Διπλή διαφορά ορίζεται η διαφορά δύο ταυτόχρονων απλών διαφορών ανάμεσα σε δύο δέκτες και δυο δορυφόρους ή η διαφορά μιας απλής διαφοράς ως προς δύο δορυφόρους και μιας απλής διαφοράς ως προς δύο δέκτες. Με τις διπλές διαφορές απαλείφεται το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου, το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη και οι αρχικές ασάφειες βάσης των παρατηρήσεων. Το πρόβλημα στις διπλές διαφορές είναι η εκτίμηση των ασαφειών φάσης στο σωστό ακέραιο αριθμό, πρόβλημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη διαδικασία που ονομάζεται τριπλή διαφορά.



Διάγραμμα 5 : Διπλή διαφορά μεταξύ δεκτών-δορυφόρων.

2.4.2.3 Τριπλές διαφορές

Ως τριπλή διαφορά ορίζεται η διαφορά δύο διπλών διαφορών σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στις τριπλές διαφορές εκτός από τα σφάλματα που απαλείφονται από τις προηγούμενες διαφορές, απαλείφεται και η ασάφεια φάσης μεταξύ των διαφορών. Πρακτικά, οι τριπλές διαφορές χρησιμοποιούνται στην προ επεξεργασία των μετρήσεων, όπου εντοπίζονται οι κύκλοι ολίσθησης, οι οποίοι διορθώνονται ή αφαιρούνται, και στην συνέχεια ο εντοπισμός επιτυγχάνεται μέσω των διπλών διαφορών. (Κύκλοι ολίσθησης: ο χαμένος αριθμός ακέραιων κύκλων που αντιστοιχεί στην πρώτη εποχή λόγω απώλειας και επανάκτησης του σήματος από το όργανο)



Διάγραμμα 6 : Τριπλές διαφορές μεταξύ δορυφόρων – δεκτών – εποχών.

Οι τεχνικές με τις οποίες διακρίνεται ο σχετικός εντοπισμός είναι:

- Ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός, όπου ο δέκτης rover μετακινείται κάθε φορά σε άγνωστο σημείο και εντοπίζει την θέση του. Η διάρκεια καταγραφής των μετρήσεων είναι 1 – 2 sec. Η αβεβαιότητα της θέσης με αυτή την τεχνική είναι 2-5cm.
- Ο σχετικός ημικινηματικός εντοπισμός, όπου ο δέκτης rover παραμένει στην ίδια θέση για το χρονικό διάστημα των 10-30 δευτερολέπτων. Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί για όλα τα σημεία που απαιτούνται, ο δέκτης επανατοποθετείται στα σημεία αυτά για το ίδιο χρονικό διάστημα, ώστε να καταγραφούν μετρήσεις με διαφορετική γεωμετρία δορυφόρων. Η αβεβαιότητα της θέσης με αυτή την τεχνική είναι μερικά cm.
- Ο σχετικός γρήγορος στατικός εντοπισμός, όπου ο δέκτης rover παραμένει σταθερός στο ίδιο σημείο για το χρονικό διάστημα των 8-10 λεπτών. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό σημείων που θα χρησιμοποιηθούν ως στάσεις για το γεωδαιτικό σταθμό. Η αβεβαιότητα της θέσης είναι μερικά cm
- Ο σχετικός στατικός εντοπισμός, όπου ο δέκτης rover παραμένει στο ίδιο σημείο για το χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 2 ώρες – μέρες. Το χρονικό διάστημα όπου θα παραμένει σταθερός ο δέκτης στο ίδιο σημείο εξαρτάται από το μέγεθος της βάσης, όσο μεγαλύτερη η βάση τόσο περισσότερο θα πρέπει να παραμένει σταθερός. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για πυκνώσεις δικτύων, για γεωδυναμικές μελέτες και για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων. Η αβεβαιότητα της θέσης είναι της τάξης των μερικών mm, υπό την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τη θέση του δέκτη (base) με ακρίβεια μερικών μέτρων. (Παραδείσης Δ. (2000))

2.5 Σφάλματα Μετρήσεων GNSS

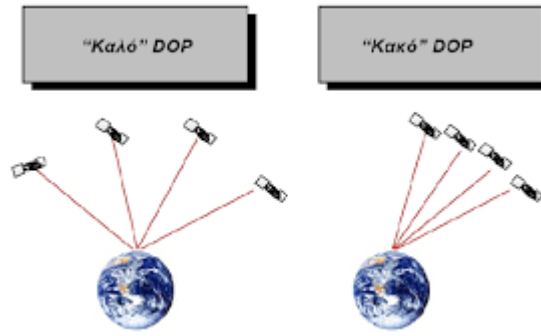
Τα είδη σφαλμάτων που επηρεάζουν κυρίως τις μετρήσεις GNSS είναι τα συστηματικά σφάλματα και τα τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά εμφανίζονται κυρίως λόγω των συνθηκών παρατήρησης, ωστόσο μπορούν να μοντελοποιηθούν και κατά συνέπεια να απαλειφθούν, ενώ τα τυχαία σφάλματα είναι απρόβλεπτα και μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω τις στατιστικής.

Τα σφάλματα των GNSS μπορούν να χωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες:

- Σφάλματα σχετικά με τους δορυφόρους:
 - Σφάλμα δορυφορικής τροχιάς
 - Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου
 - Σφάλμα επιλεκτικής διαθεσιμότητας
- Σφάλματα σχετικά με τους δέκτες:
 - Σφάλμα χρονομέτρου δέκτη
 - Σφάλμα λόγω μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας
 - Θόρυβος
 - Αβεβαιότητα γνωστού σημείου βάσης
- Σφάλματα σχετικά με την διάδοση του σήματος
 - Ατμοσφαιρικά σφάλματα
 - Σφάλματα πολυανάκλασης
 - Ολίσθηση κύκλων

Επίσης, ένα πολύ σημαντικό σφάλμα το οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται σε καμία από τις πιο πάνω κατηγορίες είναι η γεωμετρία των δορυφόρων. Οι δορυφόροι πρέπει να είναι ομοιόμορφα γεωμετρικά κατανεμημένοι πάνω από τον ορίζοντα του δέκτη. (Μερτίκας Σ., Π. (2016)). Ο δείκτης ο οποίος αναφέρεται στην επίδραση της γεωμετρίας των δορυφόρων και δέκτη, είναι ο δείκτης DOP ο οποίος μεγαλώνει όσο μικραίνει η γωνιά μεταξύ δέκτη και δορυφόρου και μικραίνει όσο μεγαλώνει η γωνιά μεταξύ δέκτη και δορυφόρου. Ο δείκτης DOP διακρίνεται σε τέσσερεις όρους, ανάλογα με το είδος του σφάλματος που εκφράζει σε:

- HDOP σφάλμα εκτίμησης οριζόντιας θέσης
- VDOP σφάλμα εκτίμησης κατακόρυφης θέσης
- PDOP σφάλμα εκτίμησης 3Δ θέσης
- TDOP σφάλμα εκτίμησης 3Δ θέσης και χρόνου



Διάγραμμα 7: Μεταβολή δείκτη DOP λόγω γεωμετρίας δορυφόρων

3. Συστήματα Αναφοράς

Ως σύστημα αναφοράς ορίζεται η επιλογή μιας επιφάνειας αναφοράς σε συνδυασμό με ένα σύστημα συντεταγμένων. Συνήθως, όταν κάποιος αναφέρει ότι γνωρίζει τη θέση του, εννοεί ότι γνωρίζει το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος. Το μηδενικό σημείο του γεωγραφικού μήκους για όλα τα συστήματα αναφοράς είναι στον μεσημβρινό του Greenwich και ο άξονας Z διέρχεται πάντα από τον βόρειο πόλο, όπου πρόκειται για συμβάσεις που έχουν καθοριστεί από την επιστήμη της γεωδαισίας.

Οι επιφάνειες αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην Γεωδαισία για να περιγράψουν το φυσικό και γεωμετρικό μοντέλο της γης είναι το γεωειδές, ελλειψοειδές, σφαίρα και το οριζόντιο επίπεδο για πολύ μικρές εκτάσεις (10km*10km), που η επίδραση της καμπυλότητας της γης δεν είναι σημαντική. Η επιφάνεια αναφοράς που πλησιάζει όσο το δυνατό καλύτερα το σχήμα της γης είναι το γεωειδές, το οποίο ορίζεται ως η ισοδυναμική επιφάνεια έλξης και περιστροφής της γης που προσεγγίζει τη μέση στάθμη της θάλασσας, διορθωμένη από τις επιδράσεις των μεταβολών των κυμάτων, της πυκνότητας του νερού, των ρευμάτων και των παλιρροιών. Αποτελεί ένα μοντέλο της γης σε κάθε σημείου του οποίου το διάνυσμα της βαρύτητας είναι κάθετο. Το γεωειδές, λόγω της πολυπλοκότητας του δεν μπορεί να περιγραφεί από απλές μαθηματικές σχέσεις, συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη επιφάνεια για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου, ωστόσο αποτελεί την επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέτρων (H). Η επιφάνεια αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής, το οποίο διαμορφώνεται με την περιστροφή μιας έλλειψης γύρω από τον μικρό της ημιάξονα. Το ελλειψοειδές ορίζεται γεωμετρικά συνήθως με το μεγάλο ημιάξονα (a) σε συνδυασμό με το αντίστροφο της επιπλάτυνσης ($1/f$).

Ως σύστημα συντεταγμένων ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία μέσω ενός συνόλου παραμέτρων, προσδιορίζεται η θέση οποιουδήποτε σημείου. Στην επιστήμη της Γεωδαισίας έχουν επιλεγεί οι καρτεσιανές και πολικές συντεταγμένες για το επίπεδο, ενώ για το τρισδιάστατο χώρο οι καρτεσιανές τρισσορθογώνιες και οι ελλειψοειδές συντεταγμένες.

Τα συστήματα αναφοράς διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: τα γήινα συστήματα, τα γεωδαιτικά συστήματα και τα αστρονομικά συστήματα αναφοράς.

3.1 Γήινο Σύστημα Αναφοράς

Ένα γήινο σύστημα αναφοράς ορίζεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες της Γης, το μέσο άξονα περιστροφής της, το μέσο μεσημβρινό του Greenwich και το κέντρο μάζας της. Ο άξονας X ορίζεται από το γεώκεντρο και το σημείο τομής του Ισημερινού με το μέσο μεσημβρινό του Greenwich. Ο άξονας Z συμπίπτει με το μέσο άξονα περιστροφή της Γης και ο τρίτος άξονας είναι κάθετος στο επίπεδο των δύο άλλων. Ένα γήινο σύστημα αναφοράς υλοποιείται με τις συντεταγμένες των σταθμών παρακολούθησης, (επίγειες ή δορυφορικές μετρήσεις) καθώς και με τις παραμέτρους που ορίζουν το προσανατολισμό της Γης. Η θέση των σημείων προσδιορίζεται με ελλειψοειδές ή καρτεσιανές συντεταγμένες. Το πιο δημοφιλές γήινο σύστημα αναφοράς είναι το WGS84 στο οποίο αναφέρονται και οι μετρήσεις από δέκτες GNSS. Χρησιμοποιεί ως ελλειψοειδές αναφοράς το WGS1984 και υλοποιείται μέσω των εκπεμπόμενων τροχιών των δορυφόρων και των επίγειων σταθμών που το υποστηρίζουν.

3.2 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς

Ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ορίζεται με την επιλογή ενός 3D καρτεσιανό συστήματος συντεταγμένων και ενός γεωδαιτικού Datum (συσχέτιση ελλειψοειδούς με γεωειδές), το οποίο ορίζει το ελλειψοειδές, το θεμελιώδες σημείο, δηλαδή το σημείο που αρχικά η αποχή του γεωειδούς είναι μηδενική και το κύριο μεσημβρινό δηλαδή την αρχή μέτρησης των γεωδαιτικών μηκών. Ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς υλοποιείται με την ίδρυση και μέτρηση ενός γεωδαιτικού δικτύου σε δεδομένη χρονική στιγμή (t) και εφαρμόζεται με την απεικόνιση τμημάτων του ελλειψοειδούς στο επίπεδο, μέσω κατάλληλης προβολής.

Το Κυπριακό Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ονομάζεται ΚΓΣΑ93 το οποίο χρησιμοποιεί ως ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84 και με θεμελιώδες σημείο την Χιονίστρα. Η χαρτογραφική προβολή που χρησιμοποιήθηκε είναι εγκάρσια μερκατορική σε μια ζώνη με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Συντελεστής Κλίμακας (κ) = 0.9995
- Γεωγραφικό μήκος κεντρικού μεσημβρινού (λ_0) = 33° E
- Γεωγραφικό πλάτος κεντρικού μεσημβρινού (φ_0) = 0°
- Προσθετική σταθερά στις τετμημένες (ΔE) = 200000 m

- Προσθετική σταθερά στις τεταγμένες (ΔN) = -3500000 m

3.3 Πλαίσια Αναφοράς

Ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου επιτυγχάνεται με τέσσερις συντεταγμένες: τις τρεις χωρικές (X Y Z) ώστε να οριστεί η γεωμετρική θέση του σημείου και μια χρονική συντεταγμένη για να προσδιορίσει τον χρόνο που υπολογίστηκαν οι τρεις χωρικές συντεταγμένες. Η διαδικασία αυτή, δηλαδή ο προσδιορισμός των τριών συντεταγμένων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς συναρτήσει του χρόνου, ονομάζεται πλαίσιο αναφοράς και είναι η υλοποίηση του συστήματος αναφοράς.

Το πλαίσιο αναφοράς ITRF είναι η υλοποίηση του Γήινου συστήματος αναφοράς (ITRS) το οποίο είναι ένα δυναμικό γήινο σύστημα αναφοράς, αντίθετα με το WGS84 το οποίο είναι ένα παγωμένο σύστημα αναφοράς. Το ITRF είναι απαραίτητο σε τέτοιου είδους μελέτες, όπως είναι οι μελέτες μικρομετακινήσεων για το λόγο ότι τα δυναμικά συστήματα μας δίνουν πληροφορίες για τις ταχύτητες στους τρεις άξονες (v_x, v_y, v_z). Το ITRS υλοποιείται μέσω του ITRF με τον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων X,Y,Z και των τεκτονικών ταχυτήτων, περίπου 1500 σημείων πάνω στη γη, ως προς κάποια εποχή αναφοράς. Ο προσδιορισμός των σημείων αυτών γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. (Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ., Παπαζήση Κ.,(2005), Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας)

4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται άλλες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με θέμα την μελέτη μικρομετακινήσεων χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους.

4.1 Ανίχνευση - Εντοπισμός Οριζόντιων Μετακινήσεων στο Λεκανοπέδιο Αττικής με Δορυφορικές Μεθόδους

Η διπλωματική αυτή πραγματοποιήθηκε από το Μιχάλη Κρικέλη με σκοπό των εντοπισμό μικρομετακινήσεων στην περιοχή λεκανοπέδιου Αττικής με δορυφορικές παρατηρήσεις. Για την ανίχνευση των οριζόντιων μετακινήσεων ιδρύθηκε ένα δίκτυο ελέγχου το οποίο αποτελείται από 14 σημεία, η θέση των οποίων ήταν συσχετισμένη με τα ενεργά ρήγματα που επηρέαζαν την περιοχή. Η επίλυση του δικτύου πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Trimble Business Center και με σταθερή κορυφή το σημείο αφετηρίας του ΕΣΓΑ'87. Οι οριζόντιες μετακινήσεις προσδιορίστηκαν με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% συγκρίνοντας τις συντεταγμένες που προέκυψαν με τις αρχικές. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διπλωματική αυτή είναι ότι τα 13 από τα 14 σημεία παρουσίαζαν μετακινήσεις αλλά με διαφορετικό ρυθμό και προσανατολισμό.

4.2 Μελέτη μικρομετακινήσεων με συνδυασμό μετρήσεων βαρύτητας και GNSS

Η μεταπτυχιακή διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκε το 2016 με σκοπό την μελέτη μικρομετακινήσεων με συνδυασμό μετρήσεων GNSS και βαρύτητας λόγω του ενεργού ρήγματος Ανθεμούντα. Για τον εντοπισμό των μικρομετακινήσεων πραγματοποιήθηκαν τέσσερις εποχές παρατήρησης βαρύτητας και GNSS, στην περιοχή που επηρεαζόταν από το ενεργό ρήγμα. Οι παρατηρήσεις GNSS και βαρύτητας πραγματοποιήθηκαν σε 17 βάθρα στην περιοχή Περαίας καθώς και σε 9 τριγωνομετρικά σημεία του κρατικού συστήματος, ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν παρατηρήσεις βαρύτητας σε 14 γεωτρήσεις ύδατος στην περιοχή μελέτης. Για την επίλυση των παρατηρήσεων GNSS χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό επίλυσης βάσεων GNSS Magnet Tools v.4.1. Για τα 17 βάθρα της περιοχής Περαίας επιλύθηκαν και 4 ιστορικές εποχές μέτρησης από το έτος 2006-2008. Οι μετρήσεις βαρύτητας επιλύθηκαν

ως προς το σφάλμα ολίσθησης του βαρυμέτρου με σκοπό τον υπολογισμό των υψομετρικών διαφορών των σημείων ανά εποχή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μετακινήσεις των σημείων στις τρεις διαστάσεις, οι οποίες προέκυψαν από τις παρατηρήσεις βαρύτητας σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις GNSS. Με το πέρας των πιο πάνω παρατηρήθηκαν οριζόντιες μετακινήσεις με μέσο όρο 35mm προς τον Νότο καθώς και καθίζηση όλων των σημείων της περιοχής με μέσο όρο 3.9mm.

4.3 Μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων στην περιοχή της Λίμνης

Κάρλας

Η έρευνα είχε στόχο την μελέτη των μικρομετακινήσεων στην περιοχή της Λίμνης Κάρλας. Η μελέτη των μικρομετακινήσεων πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα 2009-2011 και για την υλοποίηση της εγκαταστάθηκαν 18 σημεία περιμετρικά της περιοχής. Η επίλυση των βάσεων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Bernese GPS Software v5. Για τα 18 σημεία επιλύθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων με χρονική διαφορά έξι μηνών. Στη συνέχεια, αφού προέκυψαν οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν οι μικρομετακινήσεις συγκρίνοντας τις τέσσερις σειρές μετρήσεων μεταξύ τους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι η περιοχή κινείται βορειοδυτικά σε σχέση με την Ευρώπη. Όσο για την υψομετρική μετακίνηση δεν προέκυψε κανένα συμπέρασμα, είτε επειδή ότι δεν αναλύθηκε είτε λόγω λανθασμένων δεδομένων στα ύψη τρίποδα ή στα ύψη κεραίας.

4.4 Μελέτη Μικρομετακινήσεων Εδάφους στην Δυτική Κρήτη με χρήση Διαφορικής Συμβολομετρίας

Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε από τον Ιωάννη Κουτσογιαννόπουλο με στόχο την μελέτη μικρομετακινήσεων στην περιοχή της δυτικής Κρήτης. Για την υλοποίηση του στόχου χρησιμοποιήθηκαν 17 εικόνες SAR-Radar του δορυφόρου Envisat για την δημιουργία συμβολογραφημάτων. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν την χρονική περίοδο 2002-2008. Η επεξεργασία των εικόνων υλοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Diapason. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από επίγειους σταθμούς GPS. Έπειτα, υπολογίστηκαν οι μικρομετακινήσεις από τα συμβολογραφήματα που προέκυψαν και

θεωρήθηκαν μη αξιόπιστες λόγω της μεγάλης επίδρασης της ατμόσφαιρας. Επίσης, η Κρήτη θεωρείται πολύ δύσκολη περιοχή για την εφαρμογή της συμβολομετρίας λόγω της έντονης τοπογραφίας της.

4.5 Ακριβής Γεωδαιτικός Εντοπισμός για την Παρακολούθηση των Μικρομετακινήσεων του Φράγματος Βαλσαμιώτη στη Δυτική Κρήτη.

Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε από τον Χαρδαλούπας Διονύσιο με σκοπό τον εντοπισμό μικρομετακινήσεων στο φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανιά της Κρήτης. Για την υλοποίηση του σκοπού, ιδρύθηκε δίκτυο με τέσσερα σημεία περιμετρικά από το φράγμα. Οι παρατηρήσεις είχαν διάρκεια 2 ωρών και προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων ως προς παγκόσμια θεμελιώδη σημεία αναφοράς και στη συνέχεια μετασχηματίστηκαν σε διάφορα συστήματα αναφοράς όπως το WGS84 και το ΕΣΓΑ87. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι η περιοχή μετακινείται ελάχιστα, της τάξης 0.35mm στον άξονα X, και 0.85mm στον άξονα Ψ, ενώ στον άξονα Z παρουσιάζεται μετακίνηση της τάξης των 2mm.

5. Μεθοδολογία Έρευνας

5.1 Πύκνωση Δικτύου

Η πρώτη καμπάνια των μετρήσεων διεξάχθηκε στις 15/12/2018 με βάση το υπάρχον δίκτυο αφού στον αρχαιολογικό χώρο της Χοιροκοιτίας έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις (19/05/2017 & 26/10/2017) με απώτερο στόχο τον εντοπισμό των μικρομετακινήσεων. Οι κορυφές του δικτύου επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε να βρίσκονται σε πλαγιές που οριοθετούνται ενεργά ρήγματα και σε βραχομάζες εντός και εκτός του αρχαιολογικού χώρου, οι οποίες σε περίπτωση κατολίσθησης θα μπορούσαν να προκαλέσουν απώλεια ζωής. Ωστόσο, στο δίκτυο αυτό όλα τα σημεία ήταν πολύ πιθανό να ήταν εντός της ζώνης των μικρομετακινήσεων, έτσι στις 04/04/2019 όταν πραγματοποιήθηκε η δεύτερη καμπάνια των μετρήσεων, έγινε η τοποθέτηση ενός σημείου εκτός της επηρεαζόμενης περιοχής καθώς και ένα σημείο στο απέναντι ύψωμα του υπάρχοντος δικτύου που πιθανόν να υπάρχει ενεργό ρήγμα σύμφωνα με την αρχαιολογική υπηρεσία. Τα βασικά κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη για την τοποθέτηση των κορυφών ήταν:

1. Όχι σε βράχο που δημιουργήθηκε μετά από έκρηξη.
2. Όχι σε βράχο που προέκυψε μετά από υπόθεση.
3. Όχι σε πρανή με κλίση.
4. Όχι σε τμήματα που φυτεύτηκαν (ελιές) γιατί υπάρχει πιθανότητα να υπήρξαν εκσκαφές και επιχωματώσεις.
5. Ο ορίζοντας να είναι καθαρός προς το νότο λόγω του ότι το νησί βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο και οι περισσότεροι δορυφόροι βρίσκονται προς το νότο.
6. Το σημείο να βρίσκεται σε σχετικά οριζόντιο τμήμα του εδάφους.
7. Ο βράχος να έχει σχετικά οριζόντια άνω επιφάνεια για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η διάτρηση.

Επίσης, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την τοποθέτηση των κορυφών είναι το να τοποθετούνται σε θέσεις όπου οι βάσεις που θα προκύψουν θα δημιουργούν κλειστά γεωμετρικά σχήματα (τρίγωνα) ώστε να μπορούμε να έχουμε έλεγχο των σφαλμάτων μας. Στην περίπτωση που δεν έχουμε κλειστά γεωμετρικά σχήματα δεν θα μπορούμε να

έχουμε έλεγχο του σφάλματος μας, ελπίζοντας ότι θα έχουμε το σφάλμα που δίνει ο κατασκευαστής.

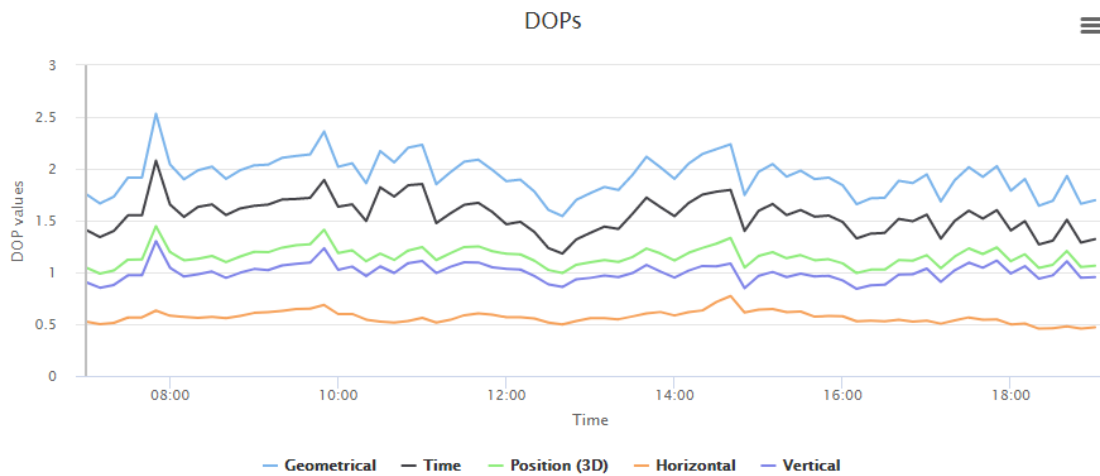
Στη συνέχεια, αφού εντοπίστηκαν τα σημεία που τηρούν τα περισσότερα από τα ανωτέρω κριτήρια, ιδρύθηκε το δίκτυο των σημείων. Η ίδρυση πραγματοποιήθηκε με χρήση κρουστικού εργαλείου, το οποίο διατηρήθηκε κατά το δυνατό σε κατακόρυφη θέση. Μετά την διάτρηση τοποθετήθηκαν κατάλληλης διατομής μπουλόνια με χρήση εποξειδικής ρητίνης. Τα σημεία αυτά θα περιλαμβάνονταν στην τρίτη καμπάνια των μετρήσεων. Η τελευταία καμπάνια δεν πραγματοποιήθηκε εξαιτίας της μικρής χρονικής διάρκειας που υπήρχε ανάμεσα στην δεύτερη και τρίτη επίσκεψη στο τοπικό δίκτυο της περιοχής, αλλά και λόγω της απουσίας βροχοπτώσεων και σεισμικής δραστηριότητας.

5.2 Επιλογή χρονικού διαστήματος των μετρήσεων

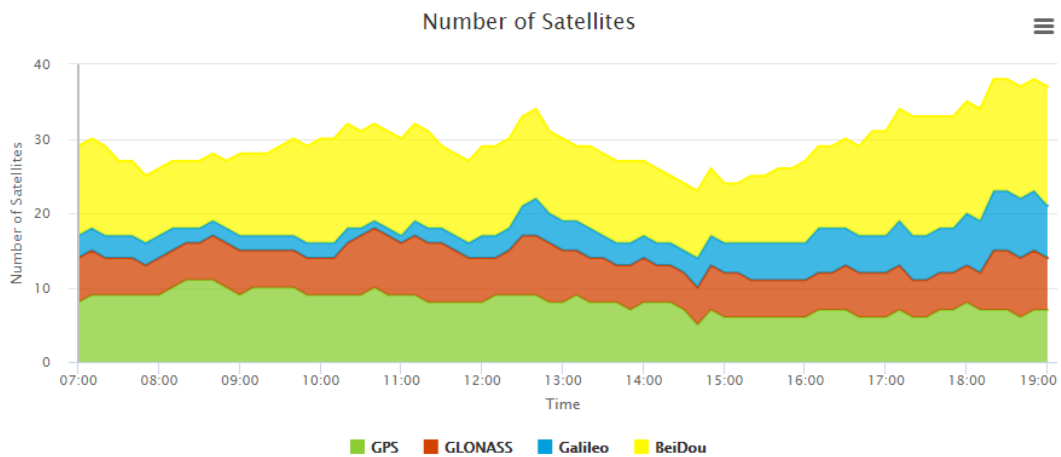
Οι μετρήσεις για όλες τις καμπάνιες πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένες ώρες όταν η παράμετρος GDOP ήταν η μικρότερη δυνατή. Ακόμη ένας πολύ σημαντικός παράγοντας όπως προαναφέρθηκε, είναι η διαθεσιμότητα των δορυφόρων, ωστόσο σήμερα όπου τα GPS/GNSS υποστηρίζονται από πολλά δορυφορικά συστήματα, η διαθεσιμότητα σε διάφορες περιοχές, όπως η Χοιροκοιτία, που δεν χαρακτηρίζεται από δασοκάλυψη, έχει ικανοποιητική διαθεσιμότητα σχεδόν καθ' όλη την διάρκεια της μέρας. Τα δύο αυτά κριτήρια είναι απαραίτητα να πληρούνται προκειμένου τα διανύσματα βάσης, (ΔX , ΔY , ΔZ) να μετρηθούν με την βέλτιστη ακρίβεια.

Ο εντοπισμός της καταλληλότερης ώρας των μετρήσεων έγινε από την διαδικτυακή υπηρεσία Trimble GNSS Planning Online με την οποία ο χρήστης εισάγει χρήσιμες παραμέτρους όπως, τις συντεταγμένες (φ , λ , h) της περιοχής ενδιαφέροντος, την ημερομηνία μετρήσεων αλλά και την γωνία αποκοπής, δηλαδή την γωνία που ο δέκτης δεν λαμβάνει παρατηρήσεις από δορυφόρους που βρίσκονται χαμηλότερα από την οριζόμενη γωνία. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αποκοπής τόσο μικρότερα είναι τα σφάλματα λόγω των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και λόγω της πολυανάκλασης του σήματος, μειώνοντας ταυτόχρονα την διαθεσιμότητα δορυφόρων. Από τα ανωτέρω κρίθηκε ως ιδανικότερη η γωνία αποκοπής των 15 μοιρών. Αφού εισήχθησαν τα πιο πάνω στοιχεία στο λογισμικό καθορίστηκε από αυτό, η διαθεσιμότητα των δορυφόρων και των παραμέτρων DOP για την ημέρα των μετρήσεων.

Στα διαγράμματα 8 και 9 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις DOP και η διαθεσιμότητα δορυφόρων για την πρώτη καμπάνια μετρήσεων. Με γαλάζιο χρώμα παρουσιάζεται ο δείκτης GDOP ο οποίος αποφασίστηκε να μην ξεπερνά την τιμή 3.



Διάγραμμα 8 : Διακυμάνσεις δείκτη DOP στο πρώτο σετ μετρήσεων.



Διάγραμμα 9 : Διαθεσιμότητα Δορυφόρων.

5.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Για την μέτρηση των βάσεων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού, η οποία είναι και η μόνη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό

μικρομετακινήσεων. Ο συνολικός αριθμός βάσεων ήταν 6 , $(N*(N-1))/2$ όπου N ο αριθμός των κορυφών.

Οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν με δέκτες GPS/GNSS Trimble R9s. Αρχικά, οι στυλεοί τοποθετήθηκαν στα μπουλόνια, οι οποίοι περιστρέφονταν μέχρι να ακινητοποιηθούν. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι πεταλούδες πάνω στην κεραία οι οποίες με την σειρά τους σταθεροποιήθηκαν πάνω στους στυλεούς. Με την ολοκλήρωση των ανωτέρω βεβαιωθήκαμε πως το όλο σύστημα (στυλεοί- πεταλούδες-κεραίες) δεν μετακινούνταν. Έπειτα, μετρήθηκαν τα ύψη των δεκτών τρεις φορές με μεταλλική μετροταινία και υπολογίστηκε ο μέσος όρος. Ως ύψος κεραίας ορίζεται η απόσταση από την αρχή του στυλεού, αφού έχει σταθεροποιηθεί στο μπουλόνι, μέχρι το μηχανικό κέντρο της κεραίας. Μετέπειτα μέσω ενός android τηλεφώνου και του λογισμικού trimble 1d ενεργοποιήθηκαν οι δέκτες για να ξεκινήσουν να καταγράφουν, αφού πρώτα εισήχθησαν κάποιες βασικές παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί ήταν: το ύψος κεραίας που μετρήθηκε με την μετροταινία, η γωνιά αποκοπής η οποία ορίστηκε 0 μοίρες επειδή καθορίστηκε η επιθυμητή από το λογισμικό επεξεργασίας (15 μοίρες), ο δείκτης Dop, η συχνότητα καταγραφής των δεκτών που ορίστηκε σε 1 sec ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι θα έχουμε επαρκή όγκο κοινών παρατηρήσεων για το χρονικό διάστημα που λαμβάναν μετρήσεις οι δέκτες. Το χρονικό διάστημα παρατήρησης από τους δέκτες επιλέχτηκε με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να έχουμε 5 ώρες κοινής παρατήρησης.

5.3.1 Όργανα και Παρελκόμενα

Για την επίτευξη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δέκτες Trimble R9s με τρεις κεραίες τύπου Zephyr Geodetic 2 καθώς και μια κεραία Zephyr Geodetic 3. Ο δέκτης έχει διαστάσεις 24cm * 12cm * 5cm και βάρος 1.65 kg +(1,55 kg). Η ακρίβεια με τέτοιου είδους δέκτες μπορεί να φτάσει τα 3mm +0.1ppm οριζόντια ενώ κατακόρυφα 3.5mm +0.4 ppm.

Οι δύο τύποι κεραίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι ειδικές γεωδαιτικές κεραίες οι οποίες διαθέτουν βάση σπειροειδών δακτυλίων. Οι κεραίες αυτές είναι απαραίτητες σε τέτοιου είδους εφαρμογές λόγω της ικανότητας τους να μην επηρεάζονται από ανακλώμενα σήματα τα οποία μπλοκάρονται από τους σπειροειδείς δακτυλίους.

Οι δύο κεραίες είναι σχεδόν πανομοιότυπες, έχουν φυσικές διαστάσεις 34.3cm διάμετρο * 7.9 cm ύψος, 1.36 kg βάρος και είναι συμβατικές με τα δορυφορικά συστήματα GPS ,

GLONNAS, BeiDou , GALLILEO σε όλες τις συχνότητες. Η μόνη διαφορά των δυο κεραιών είναι ότι η κεραία Zephyr Geodetic 3 είναι συμβατική και στα δορυφορικά συστήματα QZSS, IRNSS. Ωστόσο, για τον σκοπό της παρούσας πτυχιακής μπορούν να θεωρηθούν εντελώς πανομοιότυπες αφού όπως έχει προαναφερθεί απαραίτητη προϋπόθεση στο σχετικό εντοπισμό είναι οι δέκτες να λαμβάνουν παρατηρήσεις τις ίδιες χρονικές στιγμές από κοινούς δορυφόρους.



Διάγραμμα 10 : Κεραία Zephyr Geodetic 3.

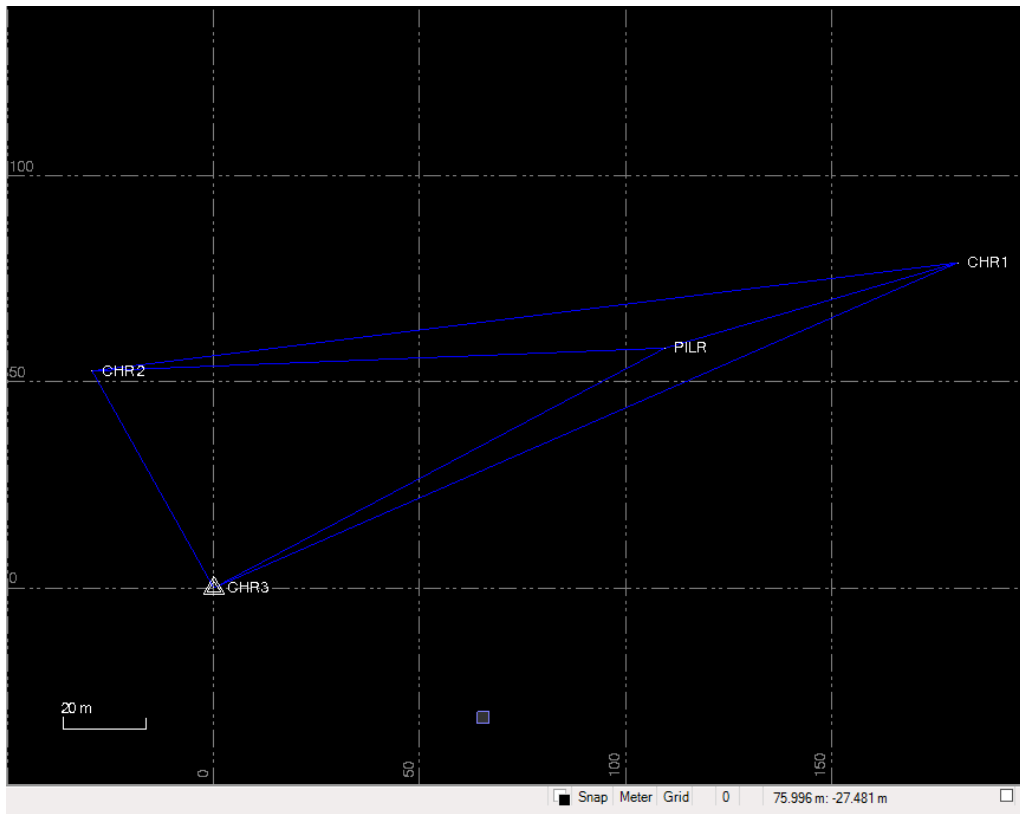
Τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις ήταν:

- 4 στυλεοί για την τοποθέτηση των κεραιών
- 1 μεταλλική μετροταινία
- 4 μπαταρίες και φορτιστές για τους δέκτες
- 1 android τηλέφωνο με την εφαρμογή Trimble Id για την ενεργοποίηση των δεκτών.

5.4 Επεξεργασία Μετρήσεων

Για την επίλυση των βάσεων του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Trimble Business Center. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα project και στην συνέχεια εισάχθηκαν οι μετρήσεις. Πρώτα εισάχθηκαν οι μετρήσεις από την κορυφή CHR3 (base) η οποία χρησιμοποιήθηκε ως το σταθερό μας σημείο, και μετέπειτα οι μετρήσεις από τις υπόλοιπες κορυφές έτσι ώστε το πρόγραμμα να ορίσει ως αρχή του συστήματος το

σημείο CHR3 και να εκφράσει τα υπόλοιπα με βάση αυτό. Πιο κάτω, παρουσιάζεται το δίκτυο μετρήσεων στο περιβάλλον του λογισμικού.



Διάγραμμα 11 : Μετρούμενο Δίκτυο στο περιβάλλον του λογισμικού

Σε πρώτο στάδιο έγινε έλεγχος των μετρήσεων σε διάφορα επίπεδα. Το σημαντικότερο επίπεδο είναι ο καθορισμός της κεραίας καθώς και το ύψος, όπου στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε μια αντένα Zephyr 3 geodetic και μια Zephyr 2. Ο καθορισμός της κεραίας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για το λόγο ότι κατά την διαδικασία της επίλυσης το πρόγραμμα κατεβάζει κάποια ειδικά αρχεία από την IGS που έχουν να κάνουν με την γωνία λήψης του σήματος, η οποία χρησιμοποιείται από ένα μοντέλο διορθώσεων για τον υπολογισμό του κέντρου φάσης της κεραίας, το οποίο όπως έχει προαναφερθεί μεταβάλλεται. Η παράλειψη καθορισμού του τύπου κεραίας μπορεί να μας επιστρέψει σφάλμα κάποιων χιλιοστών όπου για τις εφαρμογές μικρομετακινήσεων οφείλουμε να το λαμβάνουμε υπόψη. Σε δεύτερο στάδιο καθορίστηκε ο τρόπος επίλυσης και εισάχθηκαν οι ‘πραγματικές’ συντεταγμένες του CHR3 οι οποίες ορίστηκαν σαν control point δηλαδή, οι συντεταγμένες αυτές δεν αλλάξαν κατά την επίλυση. Σε τρίτο στάδιο καθορίστηκαν οι παράμετροι όπως η γωνία αποκοπής (15 μοίρες), οι ασάφειες φάσης που ορίστηκαν ως fixed, ο καθορισμός των δευτερολέπτων που θα γίνει η επίλυση

και τέλος οι τροχιές των δορυφόρων, δηλαδή αν θα χρησιμοποιηθούν οι εφημερίδες που καταγράφηκαν από τους δέκτες ή οι εφημερίδες από την υπηρεσία IGS. Στην παρούσα πτυχιακή χρησιμοποιήθηκαν οι εφημερίδες που καταγράφηκαν λόγω πολύ μικρού δικτύου. Τέλος, για κάθε βάση απομακρύνθηκαν χειροκίνητα οι κύκλοι ολίσθησης αποφεύγοντας το σφάλμα της μη σωστής αντιμετώπισης από το πρόγραμμα. Ωστόσο, η απομάκρυνση έγινε πολύ προσεχτικά επειδή ταυτόχρονα επηρεάζεται η γεωμετρία και η διαθεσιμότητα δορυφόρων. Με το πέρας της διαδικασίας, για όλες τις βάσεις πραγματοποιήθηκε η επίλυση με την οποία εκτιμήθηκε το σφάλμα οριζοντιογραφικά καθώς και στην κατακόρυφη συνιστώσα με επίπεδο εμπιστοσύνης 2σ.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το σφάλμα που επιστράφηκε για κάθε βάση για τις δυο καμπάνιες μετρήσεων.

Βάση	Από	Προς	Επίλυση	H. Prec. (m)	V. Prec. (m)	RMS
CHR3 --- CHR1 (B1)	CHR3	CHR1	Fixed	0,003	0,005	0,012
CHR2 --- CHR1 (B2)	CHR2	CHR1	Fixed	0,001	0,008	0,008
CHR3 --- CHR2 (B3)	CHR3	CHR2	Fixed	0,002	0,004	0,004
CHR2 --- PILR (B4)	CHR2	PILR	Fixed	0,001	0,003	0,006
PILR --- CHR1 (B5)	PILR	CHR1	Fixed	0,002	0,004	0,008
CHR3 --- PILR (B6)	CHR3	PILR	Fixed	0,002	0,004	0,011

Πίνακας 1 : Οριζοντιογραφικό και κατακόρυφο σφάλμα βάσεων για την πρώτη καμπάνια μετρήσεων

Βάση	Από	Προς	Επίλυση	H. Prec. (m)	V. Prec. (m)	RMS
CHR3 --- CHR1 (B1)	CHR3	CHR1	Fixed	0,002	0,004	0,009
CHR2 --- CHR1 (B2)	CHR2	CHR1	Fixed	0,001	0,007	0,008
CHR3 --- CHR2 (B3)	CHR3	CHR2	Fixed	0,002	0,003	0,006
CHR2 --- PILR (B4)	CHR2	PILR	Fixed	0,001	0,002	0,005
PILR --- CHR1 (B5)	PILR	CHR1	Fixed	0,002	0,004	0,008
CHR3 --- PILR (B6)	CHR3	PILR	Fixed	0,001	0,002	0,07

Πίνακας 2: Οριζοντιογραφικό και κατακόρυφο σφάλμα βάσεων για την δεύτερη καμπάνια μετρήσεων

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το σφάλμα κλεισίματος των τριγώνων του δικτύου. Ο έλεγχος κλεισίματος των τριγώνων επιλέχτηκε να γίνει για διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Στις μετρητικές διαδικασίες δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την αληθή τιμή λόγω των τυχαίων σφαλμάτων, αλλά να εκτιμούμε την τιμή που πλησιάζει όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική τιμή μέσω στατιστικών διαδικασιών. Το διάστημα εμπιστοσύνης 95% υποδεικνύει την πιθανότητα η πραγματική τιμή να βρίσκεται στο διάστημα αυτό ή ότι η απαλοιφή των τυχαίων σφαλμάτων επιτεύχθηκε κατά 95%. Το πρόγραμμα υπολογίζοντας τις βάσεις δηλαδή το διάνυσμα $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ υπολογίζει το σφάλμα κλεισίματος με το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων για κάθε τρίγωνο.

Πρακτικά το σφάλμα κλεισίματος του τριγώνου υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Sigma = \Sigma \Delta X + \Sigma \Delta Y + \Sigma \Delta Z \quad (2)$$

Όπου: $\Sigma \Delta X = \Delta X1 + \Delta X2 + \Delta X3 \quad (3)$

$$\Sigma \Delta Y = \Delta Y1 + \Delta Y2 + \Delta Y3 \quad (4)$$

$$\Sigma \Delta Z = \Delta Z1 + \Delta Z2 + \Delta Z3 \quad (5)$$

Θεωρώντας $\sigma\Delta X = \sigma\Delta Y = \sigma\Delta Z$ και πραγματοποιώντας τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση υπολογισμού του μήκους κάθε βάσης

$$S = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (6)$$

Προκύπτει:

$$\sigma_s = \sigma\Delta X = \sigma\Delta Y = \sigma\Delta Z \quad (7)$$

Το σφάλμα του μήκους κάθε βάσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_s = \pm \sqrt{\sigma\alpha^2 + \sigma\delta_1^2 + \sigma\delta_2^2} = \pm 3mm \quad (8)$$

Όπου:

$\sigma\delta_1 = \sigma\delta_2 = \pm 0mm$, το σφάλμα κέντρωσης του δέκτη και
 $\sigma\alpha = \pm \sqrt{a^2 + (b * S * 10^{-3})^2} = \pm 3mm$, όπου α , β η αβεβαιότητα του δέκτη δηλαδή $3mm + 0.1ppm$ και $S = 135$ m μέσο μήκος βάσης.

Εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις (3), (4) και (5)

Προκύπτει:

$$\sigma \Sigma\Delta X = \sigma \Sigma\Delta Y = \sigma \Sigma\Delta Z = \sqrt{3} * \sigma_s \quad (9)$$

Τέλος πραγματοποιώντας το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση (2) και αντικαθιστώντας σε αυτή την σχέση (9) μας υπολογίζεται το σφάλμα κλεισίματος για κάθε τρίγωνο το οποίο είναι

$$\sigma\Sigma = 3 * \sigma_s = \pm 9mm \quad (10)$$

Το σφάλμα κλεισίματος για διάστημα εμπιστοσύνης 95% προκύπτει από την σχέση

$$\sigma\Sigma' = \sigma\Sigma * Z_{95} = 17.64mm \quad (11)$$

Όπου $Z_{95} = 1.96$

Τέλος, γνωρίζοντας τα διανύσματα (ΔX , ΔY , ΔZ) καθώς και τις συντεταγμένες του σταθερού σημείου, υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των άγνωστων κορυφών. Το οριζοντιογραφικό και υψομετρικό σφάλμα κάθε κορυφής υπολογίζεται αφού γνωρίζουμε

το σφάλμα του σταθερού μας σημείου. Οι συντεταγμένες του σημείου CHR3 υπολογίστηκαν με την βοήθεια του σχετικού στατικού εντοπισμού που όπως προαναφέρθηκε, η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι 3mm στο οριζόντιο επίπεδο και 3,5mm στο κατακόρυφο επίπεδο. Ωστόσο, για να είμαστε πιο κοντά στην πραγματικότητα επιλέχθηκε οριζοντιογραφική αβεβαιότητα του σημείου CHR3 3mm και υψομετρική 5mm αφού πρώτα έγιναν διάφορες δοκιμές σχετικά με το πόσο επηρεάζονταν οι υπόλοιπες κορυφές από την αβεβαιότητα του CHR3. Καταχωρώντας αυτές τις τιμές το πρόγραμμα μας επέστρεψε το σφάλμα των κορυφών.

Στο πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες και τα σφάλματα των κορυφών για τις δύο καμπάνιες μετρήσεων.

Σημείο	X (m)	X Error (m)	Y (m)	Y Error (m)	Z (m)	Z Error (m)
CHR1	4380292,146	0,022	2882182,490	0,018	3619586,304	0,020
CHR2	4380433,900	0,021	2882024,137	0,018	3619576,126	0,020
CHR3	4380432,421		2882058,509		3619524,278	
PILR	4380352,154	0,021	2882136,858	0,018	3619578,456	0,020

Πίνακας 3: Συντεταγμένες από την πρώτη καμπάνια μετρήσεων στο WGS84

Σημείο	X (m)	X Error (m)	Y (m)	Y Error (m)	Z (m)	Z Error (m)
CHR1	4380292,140	0,021	2882182,487	0,018	3619586,301	0,019
CHR2	4380433,898	0,020	2882024,138	0,017	3619576,126	0,019
CHR3	4380432,421		2882058,509		3619524,278	
PILR	4380352,150	0,020	2882136,854	0,017	3619578,456	0,019

Πίνακας 4: Συντεταγμένες από την δεύτερη καμπάνια μετρήσεων στο WGS84

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε δίκτυα με διαφορετικά μεγέθη βάσεων είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν βάρη για τον τελικό υπολογισμό των συντεταγμένων των κορυφών, ώστε να έχουν λιγότερη επίδραση σημεία με μεγάλη απόσταση από το σταθερό σημείο καθώς με την μεθοδολογία αυτή (στατικό εντοπισμό) η ακρίβεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της βάσης. Ωστόσο, στην παρούσα πτυχιακή εργασία που όλες οι βάσεις ήταν πολύ μικρές και σχεδόν ίσες θεωρήθηκαν όλες ισοβαρείς.

Στο πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βάσεις που μετρήθηκαν από την πρώτη καμπάνια μετρήσεων και πιο συγκεκριμένα το μήκος τους, το οποίο προσδιορίστηκε μέσω του λογισμικού Trimble Business Center.

Βάση	Από	Προς	Απόσταση στο Ελλειψοειδές (m)
CHR3 --- CHR1 (B1)	CHR3	CHR1	197,153
CHR2 --- CHR1 (B2)	CHR2	CHR1	211,830
CHR3 --- CHR2 (B3)	CHR3	CHR2	60,364
CHR2 --- PILR (B4)	CHR2	PILR	139,202
PILR --- CHR1 (B5)	PILR	CHR1	74,066
CHR3 --- PILR (B6)	CHR3	PILR	124,055

Πίνακας 5: Μετρούμενο μήκος για κάθε βάση

5.5 Μετατροπή Συστήματος Αναφοράς

Οι συντεταγμένες των κορυφών που υπολογίστηκαν ήταν εκφρασμένες στο γήινο σύστημα αναφοράς WGS84 (σύστημα αναφοράς του GPS) όπου ο άξονας X ορίζεται από το γεώκεντρο και το σημείο τομής του Ισημερινού με το μέσο μεσημβρινό του Greenwich. Ο άξονας Z συμπίπτει με το μέσο άξονα περιστροφή της Γης και ο Y άξονας είναι κάθετος στο επίπεδο των δύο άλλων. Το μειονέκτημα των συστημάτων αυτών έγκειται στο ότι δεν είναι αντιληπτή η φυσική σημασία τους, δηλαδή δεν έχουν την δυνατότητα περιγραφής των ταχυτήτων στο κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό των μικρομετακινήσεων. Έτσι, απαραίτητη διαδικασία είναι η μετατροπή των συντεταγμένων σε ένα γεωδαιτικό τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς της κάθε κορυφής ώστε, να είναι άμεσα αντιληπτές οι ταχύτητες και ταυτόχρονα οι μικρομετακινήσεις. Σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς ο ένας άξονας εφάπτεται επί του τοπικού μεσημβρινού (N), ο δεύτερος έχει διεύθυνση αντίθετη με αυτή της καθέτου στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς (U) και ο τρίτος συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα (E)

Αφού υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των κορυφών από τις δύο καμπάνιες μετρήσεων, υπολογίστηκε η διαφορά τους ως προς του τρεις άξονες (ΔX , ΔY , ΔZ) αφαιρώντας την

κάθε εποχή με την πιο παλιά εποχή (05/09/2017), και στη συνέχεια η μετάβαση τους από το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς στο τοπικό μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta \Psi \\ \Delta Z \end{bmatrix} = R^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (12)$$

Όπου:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\varphi * \cos\lambda & -\sin\varphi * \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi * \cos\lambda & \cos\varphi * \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

6. Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μικρομετακινήσεων με τις τοποκεντρικές συντεταγμένες με σκοπό την καλύτερη κατανόηση τους.

Στις στήλες DE τα θετικά πρόσημα υποδεικνύουν ότι η διεύθυνση του διανύσματος έχει φορά προς την Ανατολή ενώ όταν η τιμή είναι αρνητική έχει φορά προς την Δύση. Αντίστοιχα, στις στήλες DN οι θετικές τιμές υποδεικνύουν ότι η διεύθυνση του διανύσματος έχει φορά προς το Βορρά και οι αρνητικές προς τον Νότο. Τέλος, στις στήλες DU οι θετικές τιμές υποδεικνύουν ανύψωση του σημείου ενώ οι αρνητικές καθίζηση του σημείου.

T1-T2

ID	DE	DN	DU
CHR1	+0.0024	+0.0031	+0.0019
CHR2	-0.007	+0.0010	+0.0025
CHR3	+0.0000	+0.0000	+0.0000
PILR	-0.0123	-0.0048	-0.0156

Πίνακας 6:Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/2017 – 26/10/2017

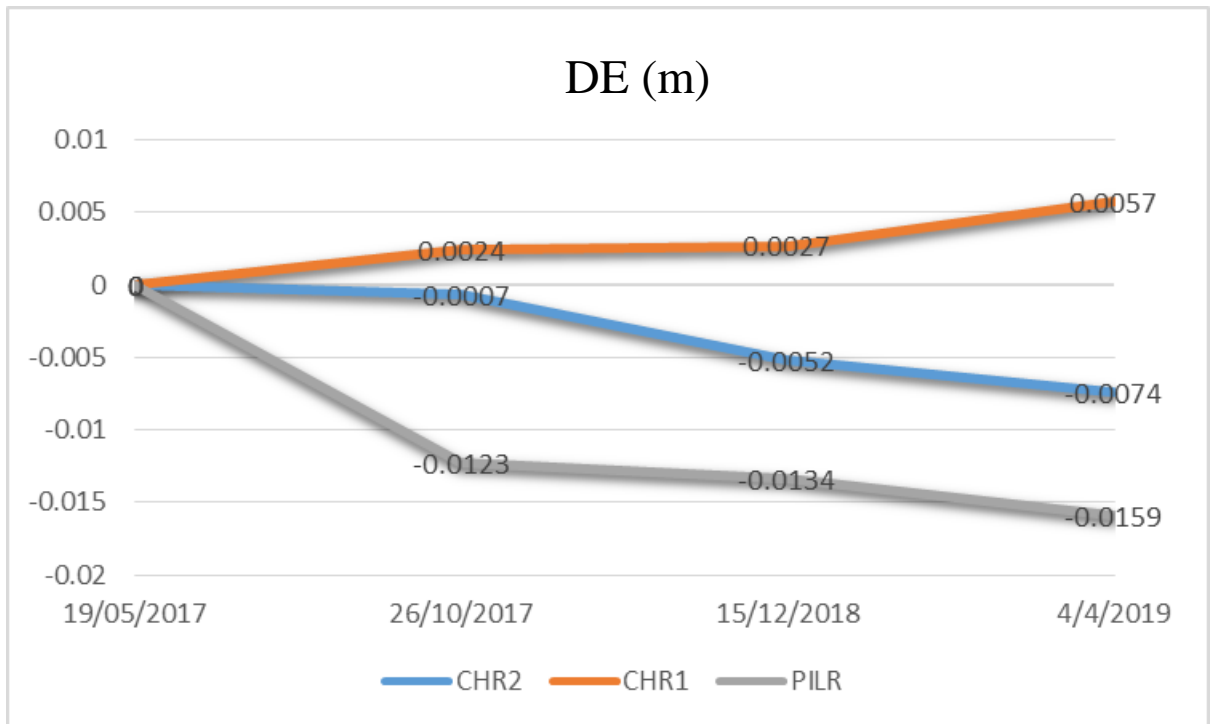
T1-T3

ID	DE	DN	DU
CHR1	+0.0027	-0.0036	-0.0125
CHR2	-0.0052	-0.0028	+0.0044
CHR3	+0.0000	+0.0000	+0.0000
PILR	-0.0134	-0.0043	-0.0042

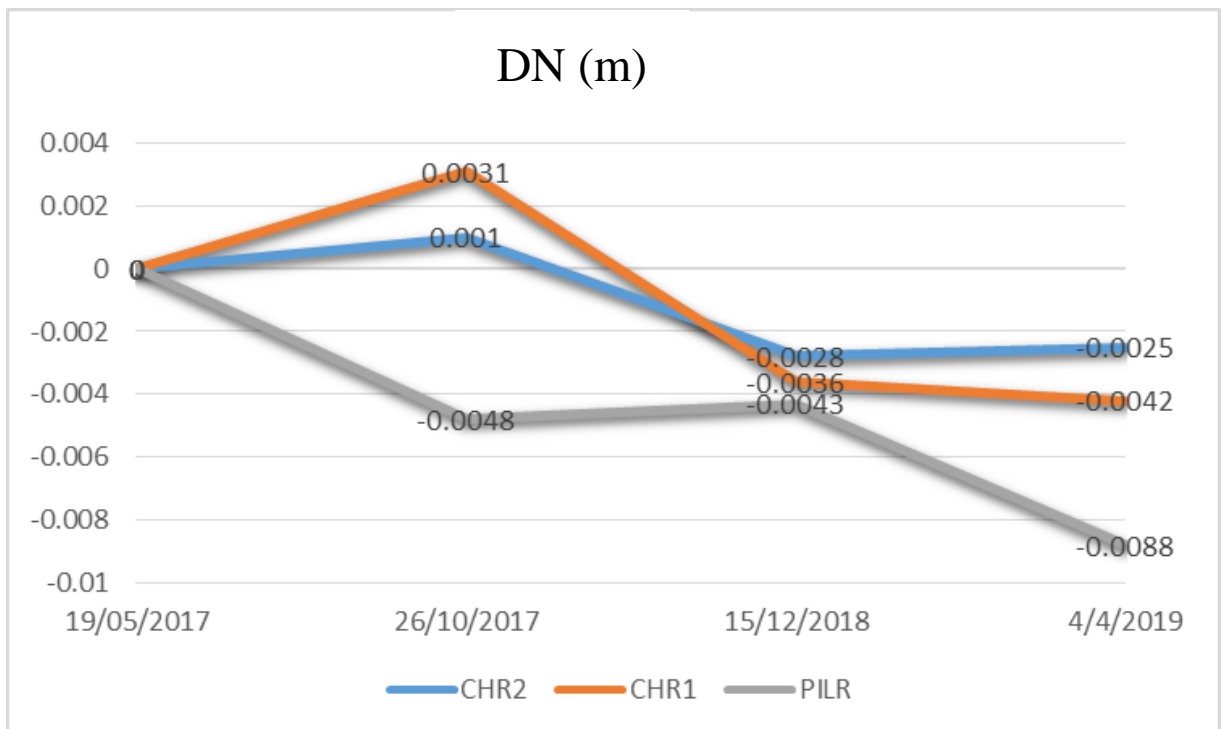
Πίνακας 7:Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/17-15/12/2019**T1-T4**

ID	DE	DN	DU
CHR1	+0.0057	-0.0042	-0.0058
CHR2	-0.0074	-0.0025	+0.0048
CHR3	+0.0000	+0.0000	+0.0000
PILR	-0.0159	-0.0088	-0.0066

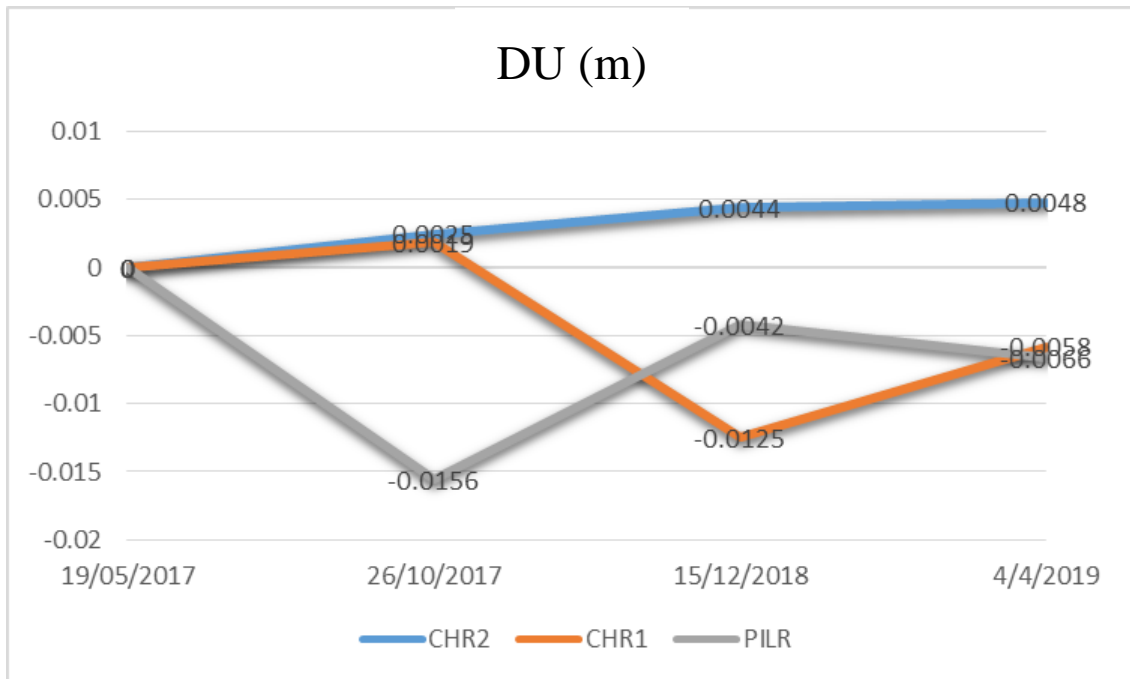
Πίνακας 8: Μικρομετακινήσεις για το χρονικό διάστημα 19/05/2017 – 04/04/2019



Διάγραμμα 12: Μικρομετακινήσεις κατά Easting



Διάγραμμα 13: Μικρομετακινήσεις κατά Northing



Διάγραμμα 14: Μικρομετακινήσεις κατά UP

7. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η συνέχιση της έρευνας για τον εντοπισμό και τον προσδιορισμό μικρομετακινήσεων στην περιοχή της Χοιροκοιτίας χρησιμοποιώντας συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, με κύριο στόχο την επαλήθευση της καθίζησης 1.56cm που έχει παρατηρηθεί από παρελθοντικές μετρήσεις στο σημείο PILR

Μεταξύ της πρώτης (19/05/2017) και δεύτερης καμπάνιας (26/10/2017) εντοπίστηκε μετακίνηση με φορά προς την δύση της τάξης των 1.23 cm και καθίζηση της τάξης των 1,56cm στην κορυφή PILR, αποτέλεσμα απολύτως λογικό από την στιγμή που υπάρχει ενεργό ρήγμα στην περιοχή, σύμφωνα με την αρχαιολογική υπηρεσία. Το παράξενο έγκειται στο ότι σε ένα μικρό δίκτυο με μέση βάση 135m παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική μετακίνηση σε μόνο μια κορυφή. Έτσι, θεωρήθηκε απαραίτητο ο έλεγχος της ορθότητας του αποτελέσματος πραγματοποιώντας μια τρίτη καμπάνια μετρήσεων (15/12/2018). Η σύγκριση των δύο μετρήσεων αυτών θα μας επέστρεφε αυτόματα αν όντως υφίσταται μικρομετακινήσεις στη κορυφή PILR. Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα (πίνακας 6, πίνακας 7) συμπεράνουμε ότι η καθίζηση στο σημείο PILR δεν υφίσταται , ενώ η μετακίνηση του σημείου δυτικά κατά 1,23 cm πράγματι υφίσταται.

Ωστόσο, μια λογική και πιθανή απάντηση στο ερώτημα γιατί παρουσιάζεται μετακίνηση στατιστικά σημαντική μόνο στο σημείο PILR, είναι ότι το σημείο CHR3 ενδέχεται να βρίσκεται εντός της επηρεαζόμενης ζώνης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε περίπτωση που το σημείο CHR3 παρουσιάζει μια μη στατιστικά σημαντική μετακίνηση με διεύθυνση του διανύσματος ανατολικά και το σημείο PILR μια μη στατικά σημαντική μετακίνηση δυτικά, λόγω της αντίθετης κατεύθυνσης το σημείο PILR να εμφανίζει στατιστικά συστηματική μετακίνηση δυτικά. Επίσης, με την ίδια λογική μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι μπορεί να υπάρχουν και στις υπόλοιπες κορυφές μικρομετακινήσεις λόγω της συστηματικής κίνησης των σημείων (CHR3,CHR1,CHR2) προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην γίνει ποτέ αντιληπτή η μετακίνηση των κορυφών αφού κάθε φορά θα καταγράφονται τα ίδια διανύσματα βάσης (ΔX , ΔY , ΔZ).

8. Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Σε γενικές γραμμές δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές μετακινήσεις στις κορυφές του δικτύου, αφού η αβεβαιότητα του σχετικού στατικού εντοπισμού είναι της τάξης των $\pm 3\text{mm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 3.5\text{mm}$ κατακόρυφα.
2. Η μόνη στατικά σημαντική μετακίνηση στο δίκτυο εμφανίζεται στην κορυφή PILR, στην οποία παρατηρείται μικρομετακίνηση της τάξης των 1.59cm με διεύθυνση δυτικά, 8.8mm νότια και μια καθίζηση κατά 6.6mm .
3. Ομαδοποιώντας τα διανύσματα μετακίνησης ανάλογα με την διεύθυνση τους, μπορούμε να διακρίνουμε δυο ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τις κορυφές CHR2 και PILR με διεύθυνση διανυσμάτων νοτιοδυτικά. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από την κορυφή CHR1 με διεύθυνση διανύσματος νοτιοανατολικά. Επομένως, διαπιστώνουμε ότι οι κορυφές του δικτύου μετακινούνται με διαφορετικό τρόπο αλλά όλες προς τον Νότο.
4. Ομαδοποιώντας τις κορυφές ως προς το εύρος του μεγέθους της μετακίνησης οριζοντιογραφικά, παρουσιάζονται δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τις κορυφές CHR1 και CHR2 με μέτρο 7mm και 7.8mm ενώ η δεύτερη αποτελείται από την κορυφή PILR με μέτρο 1.81cm .
5. Στο κατακόρυφο επίπεδο οι κορυφές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο κατηγορίες: η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τις κορυφές CHR1 και PILR οι οποίες παρουσιάζουν καθίζηση της τάξης των 5.8mm και 6.6mm αντίστοιχα ενώ η πρώτη κατηγορία περιέχει την κορυφή CHR2 η οποία παρουσιάζει ανύψωση της τάξης των 4.8mm . Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές μικρομετακινήσεις από την στιγμή που έχουμε ένα σφάλμα της μεθόδου της τάξης των $\pm 3.5\text{mm}$ και ένα σφάλμα στην μέτρηση του ύψους κεραίας της τάξης του $\pm 1\text{mm}$.

8.1 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προτάσεις.

1. Προτείνεται η συστηματική επαναμέτρηση του δικτύου κάθε χρόνο. Στο διάστημα ενάμιση χρόνου δεν μπορεί κανείς να αναφέρει ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική κινηματική συμπεριφορά στη περιοχή παρά μόνο τα αποτελέσματα των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων του δικτύου.
2. Προτείνεται στις μελλοντικές επαναμετρήσεις να χρησιμοποιηθεί ως σταθερό σημείο (base) το σημείο που τοποθετήθηκε νότια της Χοιροκοιτίας, το οποίο βρίσκεται εκτός της επηρεαζόμενης περιοχής. Το σταθερό σημείο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία δεν είναι βέβαιο ότι δεν μετακινείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε περίπτωση που το CHR3 μετακινείται με το ίδιο εύρος μεγέθους και στην ίδια διεύθυνση με όλα τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου, δηλαδή νότια, να μην γίνει ποτέ αντιληπτή η κινηματική συμπεριφορά τους, αφού κάθε φορά θα καταγράφονται τα ίδια διανύσματα βάσης ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$).

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας διαπιστώνεται ότι η στατιστικά σημαντική καθίζηση που είχε εντοπιστεί στην κορυφή PILR από παρελθοντική έρευνα δεν υφίσταται πλέον, ωστόσο, η νοτιοδυτική μετακίνηση που είχε παρατηρηθεί στην ίδια κορυφή επαληθεύεται, και με το τέλος της παρούσας έρευνας δείχνει να είναι συστηματική. Σε γενικές γραμμές, το δίκτυο δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντικές μικρομετακινήσεις για την περίοδο μελέτης, ωστόσο τα αποτελέσματα της μελέτης σε συνδυασμό με το ιστορικό της περιοχής αποτελούν ισχυρό κίνητρο για την συνέχιση της συστηματικής επαναμέτρησης αλλά και πύκνωσης του δικτύου ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Leick, A. (2004). GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons.

Sickle, J. V. (2001). GPS for Land Surveyors, Fourth Edition. CRC Press.

Παραδείσης Δ. (2000) Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας. Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου

Μερτίκας Σ., Π. (2016), Εισαγωγή στη Γεωδαισία τον Δορυφορικό Εντοπισμό και την Αλτιμετρία, Εκδόσεις Κλειδάριθμος,

Πανταζής Γ., Ευαγγελία Λάμπρου (2010), Εφαρμοσμένη γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη

Α. Δερμάνης, Δ. Ρωσσικόπουλος και Α. Φωτίου, 1994. «Τοπογραφικοί υπολογισμοί και συνορθώσεις δικτύων». Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

Δεληκαράγλου, Δ. (2005). Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας. Αθήνα.

Γ.Βέης, Χ.Μπιλλήρης, & Κ.Παπαζήση. (2005). Συστήματα Αναφοράς. Στο Γ.Βέης, Χ.Μπιλλήρης, & Κ.Παπαζήση, Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας. Αθήνα: ΕΜΠ.

Αγατζά-Μπαλοδήμου, Α. (2004). Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι. Αθήνα: ΕΜΠ.

Διπλωματικές

Ακριβής Γεωδαιτικός Εντοπισμός για την Παρακολούθηση των Μικρομετακινήσεων του Φράγματος Βαλσαμιώτη στη Δυτική Κρήτη

<http://purl.tuc.gr/dl/dias/8EA96FEA-0F3E-4411-9ED6-E1168B09B3C3>

Κουτσογιαννόπουλος Ιωάννης Μελέτη Μικρομετακινήσεων Εδάφους στην Δυτική Κρήτη με χρήση Διαφορικής Συμβολομετρίας 2011

<https://dias.library.tuc.gr/view/12615>

Ανίχνευση - Εντοπισμός Οριζόντιων Μετακινήσεων στο Λεκανοπέδιο Αττικής με Δορυφορικές Μεθόδους

<http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/8203>

Χριστοδούλου Κωνσταντίνος Χρήστου (2017) Μελέτη μικρομετακινήσεων με συνδυασμό μετρήσεων βαρύτητας και GNSS

<http://ikee.lib.auth.gr/record/288929>

Μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων στην περιοχή της Λίμνης Κάρλας

<http://www.hdl.handle.net/123456789/4940>

Ιστοσελίδες

<http://itrf.ensg.ign.fr/>

<http://www.igs.org>

<https://www.trimble.com>

<https://www.gnssplanning.com/#/settings>

<http://www.scopus.com>

<https://docplayer.gr/3874260-Eisagogikes-simeioseis-sto-pagkosmio-systima-entopismoy-global-positioning-system-gps.html>