ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πτυχιακή Εργασία

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΚΟΥΡΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ GNSS

Κώστας Κωνσταντίνου

Λεμεσός 2013

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΚΟΥΡΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ GNSS

Κώστας Κωνσταντίνου

Σύμβουλος καθηγητής
Δρ. Δημήτριος Σκαρλάτος,
Λέκτορας, ΠΟΜΗΓΕ, ΤΕΠΑΚ

Λεμεσός 2013

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Όνομα επίθετο φοιτητή, Κώστας Κωνσταντίνου, 2013

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 απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Αφιερώνω το παρόν πόνημα στην οικογένεια μου, ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για την κατανόηση και την υπομονή τους όλα αυτά τα δύσκολα χρόνια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στο Δρ. Δημήτριο Σκαρλάτο, Λέκτορα του Τμήματος ΠΟΜΗΓΕ του ΤΕΠΑΚ για την ανάθεση της παρούσας πτυχιακής εργασίας και τον Δρ. Γεώργιο Πανταζή, Επίκουρο Καθηγητή, της ΣΑΤΜ του Ε.Μ.Π, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής, επίσης τους ευχαριστώ για την καθοδήγηση τους, το καλό κλίμα συνεργασίας μας και για την υπομονή, κατανόηση και την συμπαράσταση τους που έδειξαν στους προβληματισμούς μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Λύσανδρο Παντελίδη, Λέκτορα του Τμήματος ΠΟΜΗΓΕ του ΤΕΠΑΚ για την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε σε εξειδικευμένες γνώσεις γεωτεχνικής μηχανικής της περιοχής μελέτης, ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Γεώργιο Σταύρου και Αθηνά Παντελίδου για την πολύτιμη βοήθεια τους στις μετρήσεις πεδίου .

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την παρακολούθηση των μετακινήσεων του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου έλεγχου στο φράγμα του Κούρη στην Κύπρο, με χρήση τεχνολογίας GNSS. Σκοπός είναι η μέτρηση του δικτύου και επίλυση σε δύο φάσεις μέτρησης, με σκοπό τον έλεγχο - προσδιορισμό των μετακινήσεων της ευρύτερης περιοχής του φράγματος.

Η πτυχιακή εργασία αναπτύσσεται στα ακόλουθα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια πλήρης περιγραφή του φράγματος του Κούρη. Επίσης αναλύονται όλα τα γεωλογικά, υδρολογικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος. Τέλος γίνεται μια αναφορά για το αντικείμενο της εργασίας που θα ακολουθήσει.
Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφεται διεξοδικά το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού και οι μέθοδοι δορυφορικών μετρήσεων. Γίνεται αναφορά για τις τεχνικές μετρήσεων και τα σφάλματα που προκύπτουν. Τέλος σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση μεθοδολογίας του προσδιορισμού μετακινήσεων με χρήση συστημάτων GNSS.

Το Κεφάλαιο 3, αναφέρεται στο γεωδαιτικό τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου στο φράγμα του Κούρη, στις μετρήσεις Ιης και ΙΙης φάσης που έγιναν κατά την περίοδο Αύγουστος - Δεκέμβριος 2006 και τέλος γίνεται αναφορά πως έγιναν οι επιλύσεις και έλεγχος μετακινήσεων για την περίοδο αυτή.

Το Κεφάλαιο 4, αναφέρεται στην επαναμέτρηση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου έλεγχου (ΙΙΙη φάση) στο φράγμα του Κούρη, στην επιλογή του γεωδαιτικού δέκτη και τέλος αναλύεται η μεθοδολογία των μετρήσεων, η επεξεργασία των παρατηρήσεων και οι επιλύσεις των βάσεων (baselines).

Στο Κεφάλαιο 5, περιγράφονται οι επιλύσεις του τριδιάστατου δικτύου, οι συγκρίσεις και οι υπολογισμοί των μετακινήσεων. Επίσης γίνεται ο υπολογισμός απολύτων μετακινήσεων και σχετικών μετακινήσεων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο μετακινήσεων για το δίκτυο τριδιάστατου ελέγχου. Ακολουθούν κάποιες προτάσεις που απορρέουν από την παρούσα εργασία

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ vii

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ viii

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ xi

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ xii

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ xiii

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ xv

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ xvi

ΕΙΣΑΓΩΓΗ xvii

1. Το φράγμα του Κούρη 1

1.1 Γενικά 1

1.2 Αντικείμενο της εργασίας 7

2. Μεθοδολογία μελέτης μετακινήσεων με συστήματα GNSS 9

2.1 Το σύστημα GPS 9

2.1.1 Γενικά 9

2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του δορυφορικού συστήματος GPS 10

2.1.3 Λειτουργία 11

2.1.4 Μέθοδοι μετρήσεων 13

2.1.5 Σχετικός προσδιορισμός θέσης 15

2.2 Τεχνικές μετρήσεων 15

2.2.1 Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης (static positioning) 16

2.2.2 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (kinematic positioning) 17

2.2.3 Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static) 19

2.3 Σφάλματα στο GPS 19

2.3.1 Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων 21

2.3.2 Σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου 21
2.3.3 Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη 22
2.3.4 Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας 22
2.3.5 Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου 23
2.3.6 Τα ατμοσφαιρικά σφάλματα 23
2.3.7 Το σφάλμα πολυανάκλασης 24
2.4 Ανάλυση μεθοδολογίας προσδιορισμού μετακινήσεων 29
3. Το γεωδαιτικό τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου στο φράγμα του Κούρη 31
3.1 Γενικά 31
3.2 Μετρήσεις Ιης και ΙΙης φάσης 34
3.3 Επιλύσεις και Έλεγχος μετακινήσεων για την περίοδο Αύγουστος - Δεκέμβριος 2006 35
4. Επαναμέτρηση γεωδαιτικού δικτύου έλεγχου (ΙΙΙ^{η} φάση) 38
4.1 Γενικά 38
4.2 Επιλογή δέκτη 38
4.3 Μεθοδολογία μετρήσεων 40
4.4 Επεξεργασία των παρατηρήσεων - Επιλύσεις βάσεων (baselines) 44
5. Συγκρίσεις - Υπολογισμός μετακινήσεων 50
5.1 Επιλύσεις τριδιάστατων δικτύων 50
5.2 Υπολογισμός απολύτων μετακινήσεων 54
5.3 Υπολογισμός σχετικών μετακινήσεων 63
6. Συμπεράσματα - Προτάσεις 70
6.1 Συμπεράσματα 70
6.2 Προτάσεις 76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 79

7.1 Επίλυση βάσεων τριδιάστατου δικτύου ελέγχου με τεχνολογία GNSS από το λογισμικό GNSS SOLUTIONS – ΦΑΣΗ III (Ιούνιος 2012) 79

7.2 Επίλυση και συνόρθωση βάσεων Ιουνίου 2012 με το λογισμικό ECXEL 86

7.3 Επίλυση και συνόρθωση βάσεων Δεκεμβρίου 2006 με το λογισμικό ECXEL .. 97

7.4 Μεταβολή των συντεταγμένων μεταξύ των δυο φάσεων μέτρησης..... 108

7.5 Πρόσθεση πινάκων μεταβλητότητας-συμεταβλητοτητας VΔX=VΔX(2006)+VΔX(2012) 109

7.6 Υπολογισμός απολύτων μετακινήσεων 111

7.7 Υπολογισμός σχετικών μετακινήσεων..... 116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το φράγμα του Κούρη 1

Εικόνα 2: Το φράγμα του Κούρη από δορυφορική εικόνα 3

Εικόνα 3: Το φράγμα Malpasset πριν (1959) και μετά την καταστροφή του (2000) 8

Εικόνα 4: Το σύστημα του GPS αποτελείται α) διαστημικό τμήμα, β) το επίγειο τμήμα ελέγχου και γ) το τμήμα των χρηστών 9

Εικόνα 5: Οι κινήσεις των δορυφόρων πέριξ της γης 11

Εικόνα 6: Λειτουργική αρχή Απολύτου Εντοπισμού (αριστερά) και Σχετικού Εντοπισμού (δεξιά) 14

Εικόνα 7: Κινηματικός προσδιορισμός θέσης σημείων 18

Εικόνα 8: Τυπικά σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις GPS 20

Εικόνα 9: Επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα του GPS 24

Εικόνα 10: Σύγκριση του GPS , GLONASS , Galileo και 27

Εικόνα 11:Τσιμεντένιο βάθρο 31

Εικόνα 12: Το σημείο τρισδιάστατου ελέγχου Τ6..... 32

Εικόνα 13: Το δίκτυο τριδιάστατου έλεγχου από δορυφορική εικόνα..... 34

Εικόνα 14: Γεωδαιτικός δέκτης Leica Viva GNSS GS15 39

Εικόνα 15: Γεωδαιτικός δέκτης Leica Viva GNSS GS15 προσαρμοσμένο στο ειδικό βάθρο τρισδιάστατου ελέγχου με το χειριστήριο χειρός 40

Εικόνα 16: Μέτρηση του ύψους από την ειδική ορειχάλκινη βάση μέχρι το ειδικό σημείο 43

Εικόνα 17:Απόλυτες οριζοντιογραφικές μετακινήσεις τριδιάστατου δικτύου ελέγχου.72

Εικόνα 18 : Απόλυτες κατακόρυφες μετακινήσεις τριδιάστατου δικτύου ελέγχου. 73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πίνακας χαρακτηριστικών στοιχείων φράγματος Κούρη [Τελεβάντο Μ., 2004] 6

Πίνακας 2: Σύγκριση των δορυφορικών συστημάτων GNSS 26

Πίνακας 3:Αποτελέσματα από την επίλυση βάσεων του Δεκεμβρίου με το λογισμικό GNSS Solutions [Κ. Τέμενος , 2007] 48

Πίνακας 4: Αποτελέσματα από την επίλυση βάσεων (Ιούνιος 2012 με το με το λογισμικό GNSS Solutions 49

Πίνακας 5: Οι συνορθωμένες συντεταγμένες του δικτύου τριδιάστατου ελέγχου..... 52

Πίνακας 6: Μεταβολή των συντεταγμένων μεταξύ των δύο φάσεων μέτρησης..... 53

Πίνακας 7: Πίνακας στροφής 54

Πίνακας 8: Ελλειψοειδείς συντεταγμένες στο WGS' 84..... 55

Πίνακας 9: Μεταβολές στις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου στο τοπικό σύστημα 56

Πίνακας 10: Σφάλματα των μεταβολών της απόλυτης θέσης των σημείων ελέγχου, στο τοπικό σύστημα 57

Πίνακας 11: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για μονοδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% 59

Πίνακας 12: Σύγκριση σε απόλυτες θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για δισδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% 60

Πίνακας 13:Μονοδιάστατος έλεγχος σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις..... 64

Πίνακας 14: Στοιχεία σχετικών ελλείψεων και σύγκριση σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%..... 65

Πίνακας 15: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% 68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Η λεκάνη απορροής του φράγματος του Κούρη [Τέμενος Κ . 2007]. 4

Σχήμα 2: Τα σημεία ελέγχου του γεωδαιτικού δικτύου τριδιάστατου ελέγχου 33

Σχήμα 3: Απόλυτες οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου. 36

Σχήμα 4: Σχετικές οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου. 36

Σχήμα 5: Απόλυτες κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου. 37

Σχήμα 6: Σχετικές κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου. 37

Σχήμα 7: Χρόνοι παραμονής των γεωδαιτικών δεκτών στις κορυφές του δικτύου την $1^{η}$ μέρα..... 41

Σχήμα 8: Χρόνοι παραμονής των γεωδαιτικών δεκτών στις κορυφές του δικτύου την $2^{η}$ μέρα..... 42

Σχήμα 9: Απόσπασμα από το έντυπο μετρήσεων για γεωδαιτικούς δέκτες..... 42

Σχήμα 10: Εισαγωγή των σημείων του δικτύου στο λογισμικό GNSS Solutions από Rinex αρχεία με σταθερό το σημειοΤ1..... 45

Σχήμα 11: Πίνακας που πρόεκυψε από το λογισμικό GNSS Solutions κατά την επίλυση του δικτύου 45

Σχήμα 12: Χάρτης του δικτύου που προέκυψε από το λογισμικό GNSS Solution αφού έγινε η επίλυση του δικτυού όπου εμφανίζονται και οι ελλείψεις των σφαλμάτων..... 46

Σχήμα 13: Στοιχεία της έλλειψης σφάλματος..... 58

Σχήμα 14: Σύγκριση σε απόλυτες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για δισδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%..... 61

Σχήμα 15: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% 62

Σχήμα 16: Σύγκριση σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%..... 66

Σχήμα 17: Σύγκριση σε σχετικές κατακόρυφες θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% 69

Σχήμα 18: Χρονική εξέλιξη των μετακινήσεων σημείου έλεγχου στην στέψη του φράγματος του Μόρνου..... 75

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ε.Κ.Μ:	Εκατομμύρια Κυβικών Μέτρων
ΕΜΠ:	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΜΕΤ:	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων
ΠΟΜΗΓΕ:	Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής
ΤΑΥ:	Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων
ΤΕΠΑΚ.:	Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

CDMA:	Code Division Multiple Access, Κώδικας Διαίρεσης Πολλαπλής Πρόσβασης
GIS:	Geographical Information System, Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών
GLONASS:	GLObal NAvigation Satellite System, Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης
GNSS:	Global Navigation Satellite Systems, Διαλειτουργικά συστήματα δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης ενισχυμένα με άλλες τεχνολογίες
GPS:	Global Positioning System, Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
PDOP:	Position Dilution of precision, Ανάλυση της εσωτερικής ακρίβειας
ppm:	Parts per million, Μέρη ανά εκατομμύριο
WGS:	World Geodetic System, Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φράγματα, έχουν ειδικές απαιτήσεις χάραξης στη φάση της κατασκευής, αλλά και παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας τους. Οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετακινήσεις τους μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα, μέχρι και την αστοχία τους, με συνέπεια τη διακινδύνευση ανθρώπινων ζωών, δημόσιας και ιδιωτικής περιουσίας.

Το φράγμα του Κούρη είναι το μεγαλύτερο φράγμα που κατασκευάστηκε μέχρι σήμερα στην Κύπρο και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1988. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στη διαδικασία ανίχνευσης των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων του συγκεκριμένου φράγματος στο χρονικό διάστημα Αύγουστος 2006 – Ιούνιος 2012 με την μέτρηση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από έξι (6) σημεία ελέγχου όπου τα πέντε (5) από τα αυτά είναι τσιμεντένια βάθρα εκ των οποίων τα τέσσερα (4) είναι τοποθετημένα περιμετρικά του φράγματος και το πέμπτο έξω από την περιοχή σε απόσταση περίπου 1700m από το φράγμα, ενώ το έκτο σημείο υλοποιείται από μια ορειχάλκινη βάση, πάνω σε τσιμεντένια κατασκευή, στην μέση περίπου της στέψης του φράγματος.

Η μέτρηση του δικτύου έγινε με γεωδαιτικό δέκτη υψηλής ακρίβειας. Η επίλυση του δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας γραμμικές εξισώσεις. Από την επίλυση προκύπτει το διάνυσμα των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου σε αυθαίρετο τοπικό σύστημα αναφοράς για τις δύο χρονικές στιγμές μέτρησης και οι αντίστοιχοι πίνακες μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι απόλυτες και σχετικές μετακινήσεις τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά για απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

1. Το φράγμα του Κούρη

1.1 Γενικά

Αναμφίβολα, το μεγαλύτερο φράγμα που κατασκευάστηκε μέχρι σήμερα στην Κύπρο είναι το φράγμα του Κούρη (εικόνα 1), το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του αρδευτικού έργου του Νοτίου Αγωγού. Βρίσκεται στην επαρχία Λεμεσού κοντά στο χωριό Άλασσα, τοποθεσία που προτάθηκε στην έκθεση του 1968 του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων (ΤΑΥ) σε συνεργασία με το Πρόγραμμα Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών.

Εικόνα 1: Το φράγμα του Κούρη [1]

Το ΤΑΥ διεξήγαγε εδαφοτεχνικές έρευνες μεταξύ 1970 και 1971. Οι Βρετανοί σύμβουλοι μηχανικοί Howard Humphreys and Partners διεξήγαγαν διάφορες μελέτες και συνέταξαν την προμελέτη του φράγματος το 1979. Τα τελικά σχέδια και η επίβλεψη ανατέθηκαν στους σύμβουλους Μηχανικούς SOGREAH Γαλλίας και

[1] *[Πηγή : http://www.moa.gov.cy/moa/wdd]*

Hydroconsult Κύπρου το 1981 ενώ τα Τμήματα Αναπτύξεως Υδάτων και Γεωλογικής Επισκόπησης ανέλαβαν επιπρόσθετες εδαφοτεχνικές έρευνες.

Στη συνεχεία, διορίσθηκε μια διεθνής ομάδα ανεξάρτητων εμπειρογνωμόνων ως σύμβουλος του ΤΑΥ και όλες οι σημαντικές αποφάσεις σε σχέση με τη μελέτη και ασφάλεια ήταν το αντικείμενο διαβουλεύσεων και συμφωνιών μεταξύ του κλιμακίου και των συμβούλων Μηχανικών. Το συμβόλαιο για την κατασκευή του φράγματος κατοχυρώθηκε τον Ιούλιο του 1984 στην Κοινοπραξία IMPREGILO S.p.A Ιταλίας και Ιωάννου και Παρασκευαίδη (J&P) Κύπρου και η διεξαγωγή των εργασιών άρχισε την $1^{η}$ Σεπτεμβρίου 1984.

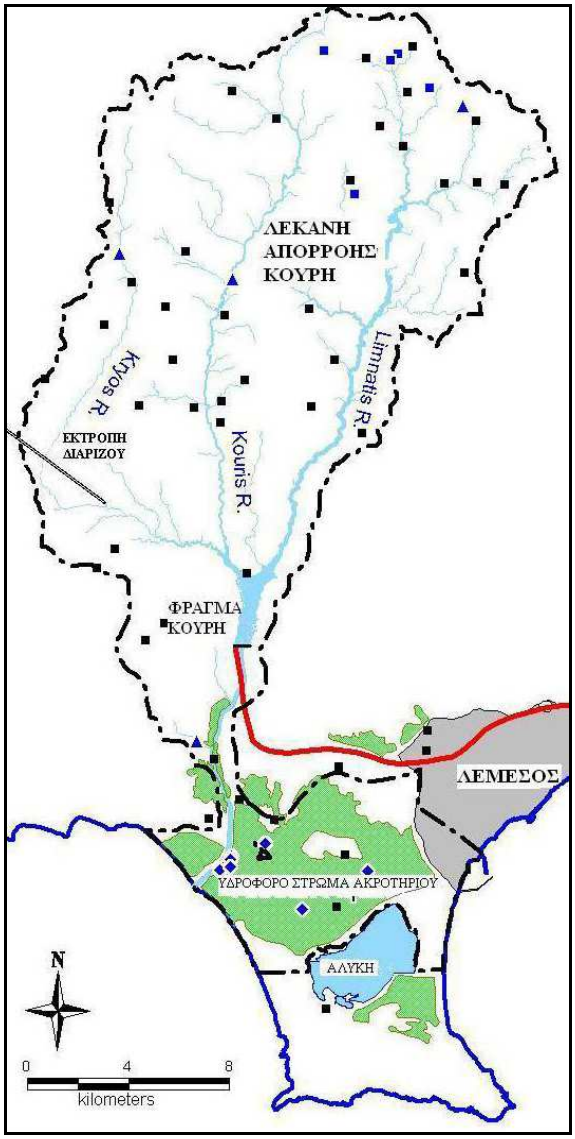
Λαμβάνοντας υπόψη τους τη σημασία της ταχείας περισυλλογής νερού οι εργασίες κατασκευής προγραμματίστηκαν, ώστε να αρχίσει η συλλογή νερού το χειμώνα 1987-88, 10 περίπου μήνες πριν την ολοκλήρωση του έργου. Παρά τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά τη θεμελίωση του φράγματος, και που είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου της εργασίας, ο στόχος για συλλογή νερού τον χειμώνα 1987-88 επιτεύχθηκε με χρήση επιπρόσθετων χωματουργικών μηχανημάτων.

Η συνολική δαπάνη για την κατασκευή του φράγματος του Κούρη ήταν περίπου 29 εκατομμύρια Λίρες Κύπρου. Το φράγμα έχει χωρητικότητα 115 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων (Ε.Κ.Μ), είναι χωμάτινης κατασκευής με κεντρικό αργιλικό πυρήνα και έχει ύψος 110m. Το μήκος του αναχώματος είναι 550m και ο όγκος κατασκευής του 9.400.000m^3. Η λίμνη του φράγματος σε υψόμετρο 247m από τη μέση στάθμη της θάλασσας, έχει επιφάνεια 3.6 Km^2 και εκτείνεται 5 Km βόρεια ενώ η λεκάνη απορροής έχει έκταση 308 Km^2. Το χωριό Άλασσα που βρισκόταν μέσα στην περιοχή της λίμνης του φράγματος μετακινήθηκε πιο πάνω μεταξύ των κοιλάδων του Κούρη και του Λιμνάτη. Ο υπερχειλιστής του φράγματος έχει μέγιστη παροχή 1.925 m^3/sec. Στην εικόνα 2 εμφανίζεται το φράγμα από δορυφορική λήψη.

Εικόνα 2: Το φράγμα του Κούρη από δορυφορική εικόνα [2]

Το 2004 ήταν η πρώτη χρονιά που το φράγμα του Κούρη υπερχείλισε, η μέγιστη ποσότητα νερού που αποθηκεύτηκε τότε ήταν 115 Ε.Κ.Μ. νερού. Το φράγμα Κούρη αποτελεί την κύρια υδαταποθήκη του έργου του Νοτίου Αγωγού και ο βασικός σκοπός του είναι η συσσώρευση και αποθήκευση νερού και η μεταφορά του με διαπεριφερειακό αγωγό στις περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη νερού. Από το Φεβρουάριο του 1988, άρχισε η παροχή νερού από το φράγμα Κούρη για αρδευτικούς σκοπούς στο φράγμα Άχνας, περιοχή Κοκκινοχωριών, στο φράγμα Κιτίου, στην περιοχή Ακρωτηρίου και για σκοπούς εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα στο δέλτα του Κούρη. [Τελεβάντο Μ., 2004]

[2] *[Πηγή: earth.google.com]*



Σχήμα 1: Η λεκάνη απορροής του φράγματος του Κούρη [Τέμενος Κ . 2007]

Η αποθήκευση νερού στο φράγμα του Κούρη (σχήμα 1) γίνεται από τους ποταμούς Λιμνάτι, Κρυό, τον ομώνυμο ποταμό Κούρη και έχει ενισχυθεί με την εκτροπή νερού από τον ποταμό Διαρίζο στη λίμνη του φράγματος με σήραγγα διαμέτρου 2.4 – 2.6m και μήκους 14.5 Km. Η εκτροπή του Διαρίζου αποτελεί μέρος της δεύτερης φάσης του Σχεδίου Νοτίου Αγωγού και η κατασκευή του άρχισε μέσα στο 1990 και τέθηκε σε λειτουργία αρχές του 1995. Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία που αφορούν στο φράγμα.

Γενικά	Διάρκεια κατασκευής		1984 – 1988
Υδρολογία	Λεκάνη απορροής		308 Km^2
	Μήκος λεκάνης απορροής		29 Km
	Μέγιστη καταγεγραμμένη παροχή		400 m^3/s
	Παροχή στη κορύφωση πλημμύρας		2 600 m^3/s
Λίμνη	Μέγιστη επιφάνεια λίμνης		3.60 Km^2
	Μέγιστη χωρητικότητα λίμνης		115 E.K.M
	Υψόμετρο λίμνης		247 m
Χαρακτηριστικά φράγματος	Τύπος		Χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα
	Υψόμετρο στέψης		253.50 m
	Μέγιστο ύψος πάνω από το χαμηλότερο σημείο		112.50 m
	Μέγιστο ύψος πάνω από τη στάθμη του ποταμού		102 m
	Μήκος στέψης		570 m
	Πλάτος στέψης		14 m
	Όγκος πυρήνα		880 000 m^3
	Όγκος αναχώματος		7 000 000 m^3
Χαρακτηριστικά υπερχειλιστή	Τύπος		Στο πλάι του καναλιού
	Υψόμετρο στέψης		247 m
	Μέγιστη παροχή		1 920 m^3/s
	Όγκος σκυροδέματος		60 000 m^3
Έργα Εκκένωσης – Υδροληψίας	Πύργος εκκένωσης	Ύψος	32 m
	Σήραγγα εκκένωσης	Διάμετρος	4.2 m
		Μήκος	633 m

	Πόρτες σήραγγες εκκένωσης (Δύο)	Διαστάσεις	1.8×2.3 m
		Δυναμικότητας	140 m^3/s
	Θυρόφραγμα υδροληψίας	Διάμετρος	1.2 m
		Παροχή	3.4 m^3/s
	Πύργος Ελέγχου	Διάμετρος	5.5 m
		Ύψος	111 m
	Όγκος Σκυροδέματος		16 000 m^3
Τσιμεντενέσεις	Συνολικό μήκος		40 km
	Υλικό		Τσιμέντο - μπεντονίτης
	Βάρος		1 550 000 Kg
Μελέτη	Sogreah, Γαλλίας σε συνεργασία με την Hydroconsult Κύπρου		
Επίβλεψη	Sogreah, Γαλλίας, σε συνεργασία με την Hydroconsult Κύπρου και το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων		
Κατασκευή	Κοινοπραξία Impregilo S.p.A Ιταλίας και J & P Κύπρου		
Λειτουργία και συντήρηση	Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων		
Άλλοι Εργοληπτικοί Οίκοι και Προμηθευτές	Τσιμεντενέσεις		Rodio, Ιταλίας
	Ηλεκτρομηχανολογικά		Matalna, Γιουγκοσλαβίας
	Συστήματα οργάνων		Soil Instruments, Ηνωμένου Βασίλειου
	Δικλίδες		Erhard, Δυτικής Γερμανίας
	Εκσκαφή σήραγγας		Voest Alpine, Αυστρίας
	Ανυψωτήρες		Stahll, Δυτικής Γερμανίας Dalmine, Ιταλίας

Πίνακας 1: Πίνακας χαρακτηριστικών στοιχείων φράγματος Κούρη [Τελεβάντο Μ., 2004]

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

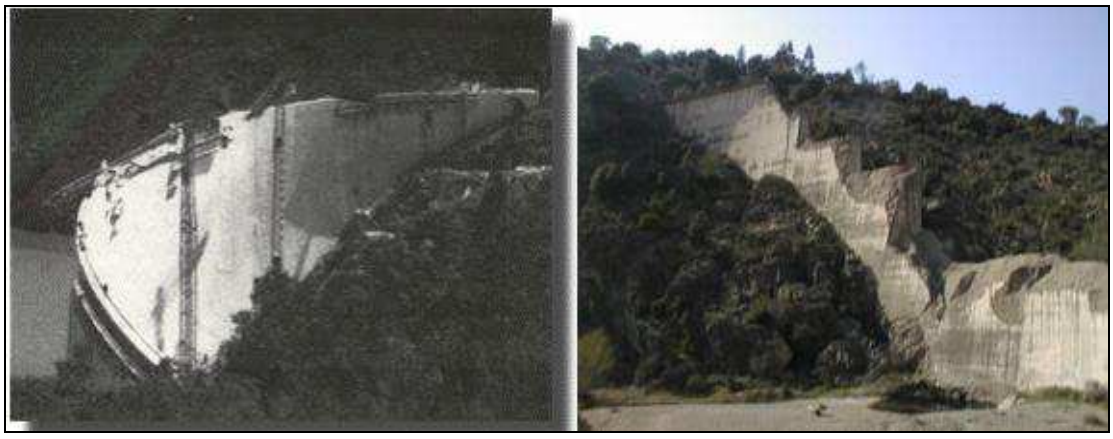
Η πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την παρακολούθηση μετακινήσεων του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου στο φράγμα του Κούρη στην Κύπρο, με χρήση τεχνολογίας GNSS. Επιλέχθηκε η περιοχή στο φράγμα του Κούρη γιατί έχει αποτελέσει ήδη αντικείμενο ελέγχου μετακινήσεων για την περίοδο Αύγουστος - Δεκέμβριος 2006 όταν το φράγμα είχε ποσότητα νερού 36% και 18.4% αντίστοιχα και είχαν εντοπιστεί μικρές μετακινήσεις, οι οποίες έδωσαν το έναυσμα για να αναληφθεί έλεγχος των μετακινήσεων τον Ιούνιο του 2012 όπου το φράγμα βρισκόταν σε όλη την πληρότητα του.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από έξι (6) σημεία ελέγχου όπου τα πέντε (5) από τα σημεία είναι τσιμεντένια βάθρα εκ των οποίων τα τέσσερα (4) είναι τοποθετημένα περιμετρικά του φράγματος και το πέμπτο έξω από την περιοχή σε απόσταση περίπου 1700m από το φράγμα. Το έκτο σημείο υλοποιείται από μια ορειχάλκινη βάση, πάνω σε τσιμεντένια κατασκευή, στην μέση περίπου της στέψης του φράγματος.

Η μελέτη των μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς περιοχών και των τεχνικών έργων που έχουν κατασκευαστεί σε αυτές με αποτέλεσμα την πρόληψη δυσμενών καταστάσεων και την έγκαιρη αντιμετώπιση σοβαρών αστοχιών που θα επιφέρουν κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Τα αποτελέσματα της διαχρονικής παρακολούθησης μπορούν να συσχετιστούν με θεωρητικά μοντέλα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την απόκριση της περιοχής.

Δυστυχώς, οι περιπτώσεις αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων που έχουν συμβεί στο παρελθόν δεν είναι λίγες. Βέβαια, οι αστοχίες των φραγμάτων από σκυρόδεμα είναι σημαντικά λιγότερες από αυτές των χωμάτινων φραγμάτων. Η γνωστότερη, στον Ευρωπαϊκό χώρο καταστροφή φράγματος από σκυρόδεμα, είναι αυτή του Malpasset στη Γαλλία (εικόνα 3). Παρόλο που η θέση του φράγματος είχε θεωρηθεί από ορισμένους ειδικούς ως ακατάλληλη, εντούτοις, η αρμόδια υπηρεσία βασιζόμενη σε γεωλογικές και υδρολογικές μελέτες ενέκρινε την κατασκευή του. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην κατάντη του φράγματος παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις οι οποίες, ωστόσο, δεν διερευνήθηκαν. Δύο εβδομάδες από τον εντοπισμό των ρηγματώσεων,

στις 2 Δεκεμβρίου 1959, το φράγμα κατέρρευσε προκαλώντας το θάνατο 500 ανθρώπων.[3]



Εικόνα 3: Το φράγμα Malpasset πριν (1959) και μετά την καταστροφή του (2000) [4]

Επομένως, η αναγκαιότητα για συστηματική παρακολούθηση των πιθανών παραμορφώσεων των φραγμάτων με την εφαρμογή γεωδαιτικών και μη γεωδαιτικών μεθόδων υψηλής ακρίβειας κρίνεται επιβεβλημένη.

Τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα προσδιορισμού θέσης GPS, GLONASS, GALILEO κ.α. βρίσκουν πολυάριθμες εφαρμογές υπολογισμού θέσης για πλοήγηση, τόσο τοπογραφικές όσο και απλές. Τα συστήματα αυτά παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία για τον προσδιορισμό θέσης με μεγάλη οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια, ωστόσο η ταχύτητα και η αξιοπιστία των δορυφορικών συστημάτων τα καθιστούν εξίσου σημαντικά, ανάλογα βέβαια και με την έκταση της περιοχής μελέτης. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τα πιο πάνω δορυφορικά σύστημα και τις μεθοδολογίες που απορρέουν από αυτά, ώστε να γίνει η παρακολούθηση μετακινήσεων του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου στο φράγμα του Κούρη.

[3] *[Πηγή:http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset. htm]*

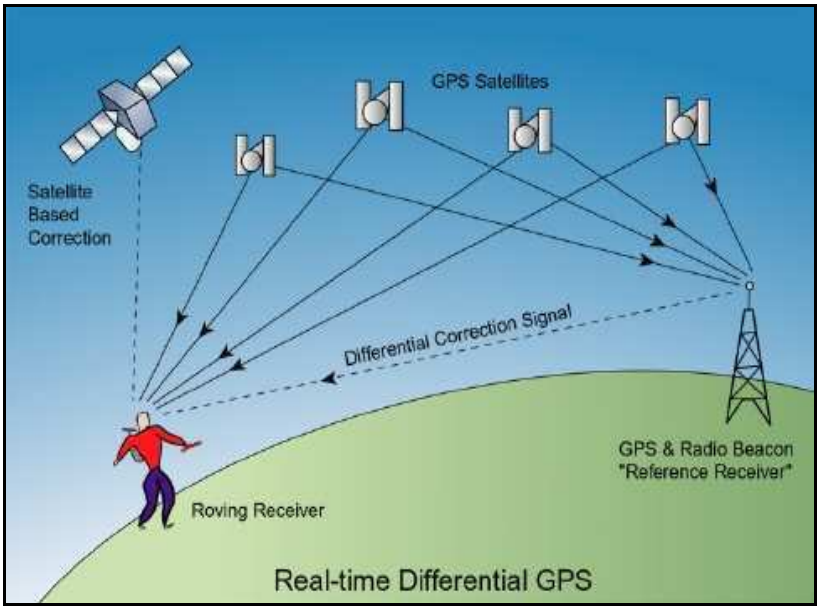
[4] *[Πηγή:http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset. htm]*

2. Μεθοδολογία μελέτης μετακινήσεων με συστήματα GNSS

2.1 Το σύστημα GPS

2.1.1 Γενικά

Το GPS (Global Positioning System, Παγκόσμιο Σύστημα Θέσεως) είναι ένα παγκόσμιο σύστημα, το οποίο αποτελείται από τρία τμήματα: α) το διαστημικό τμήμα, β) το επίγειο τμήμα ελέγχου και γ) το τμήμα των χρηστών με σκοπό τον εντοπισμό θέσεως του τελευταίου όπως διακρίνονται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4: Το σύστημα του GPS αποτελείται α) διαστημικό τμήμα, β) το επίγειο τμήμα ελέγχου και γ) το τμήμα των χρηστών [5]

Βασίζεται σε ένα πολυάριθμο δίκτυο δορυφόρων (32 σήμερα) που περιφέρονται γύρω από τη γη και οι οποίοι παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός

[5] *[Πηγή : http://www.directionsmag.com/articles/the-fundamentals-of-gps/124028]*

σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησής του (διαστημικό τμήμα). Ρυθμίζεται καθημερινά από τη βάση πολεμικής αεροπορίας του Schriever στο Colorado με τη βοήθεια επίγειων κεραιών λήψης και αποστολής σημάτων με τους δορυφόρους, έτσι ώστε να διορθώνονται και να ελέγχεται η σωστή λειτουργία τους (επίγειο τμήμα ελέγχου). Οι τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, οι απλοί τριγωνισμοί και τα δίκτυα πύκνωσης, τα εθνικά, ηπειρωτικά και παγκόσμια γεωδαιτικά δίκτυα, η μελέτη μικρομετακινήσεων κρίσιμων τεχνικών έργων καθώς επίσης και οι γεωδυναμικές εφαρμογές, όπως είναι η παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του φλοιού της γης, αποτελούν μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του GPS.

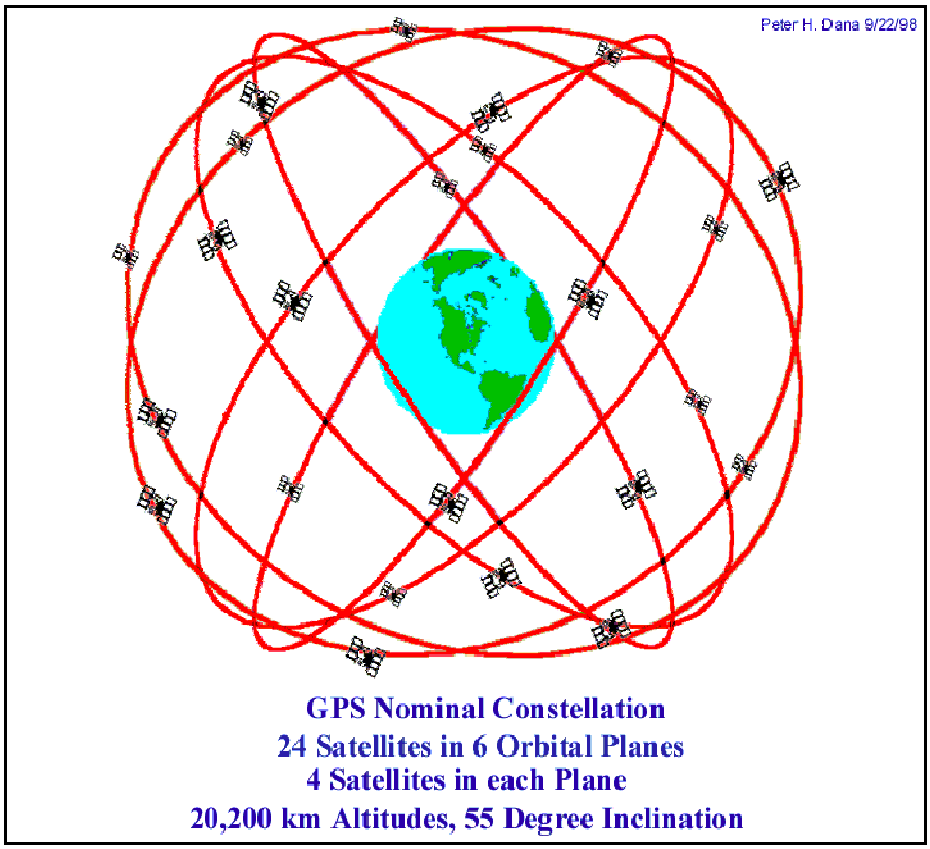
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του δορυφορικού συστήματος GPS

Το κυριότερο πλεονέκτημα του GPS έναντι παλαιότερων δορυφορικών και επίγειων μεθόδων μέτρησης είναι η ευκολία χρήσης του κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες και αυτό γιατί δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την ώρα και τα καιρικά φαινόμενα. Επιπλέον, για τον προσδιορισμό της θέσης δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των σημείων παρατήρησης π.χ. μετρήσεις με ένα Total Station, αρκεί να υπάρχει ορατότητα προς ικανοποιητικό αριθμό δορυφόρων στον ορίζοντα. Έπειτα, η θέση του σημείου παρέχεται απευθείας στην επιφάνεια της γης και έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε αμέσως τις καρτεσιανές συντεταγμένες με καλή ακρίβεια και σε μικρότερο χρόνο μέτρησης. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα συνεργασίας με άλλα συστήματα και εφαρμογές όπως GIS, φωτογραμμετρία κ.ά.

Τα δύο ίσως και μοναδικά μειονεκτήματα του συστήματος που το καθιστούν ικανό αλλά όχι αναγκαίο για τοπογραφικές εργασίες είναι η απαίτηση για "ανοιχτό" ουρανό ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με ικανό αριθμό δορυφόρων, γεγονός που δυσκολεύει τη χρήση σε πόλεις και κατοικημένες περιοχές με έντονη δόμηση. Παράλληλα, λόγω του στρατιωτικού χαρακτήρα του συστήματος η μείωση της ακρίβειας του συστήματος και η εισαγωγή σφαλμάτων από πλευρά των ΗΠΑ κατά χρονικά διαστήματα δεν εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του.

2.1.3 Λειτουργία

Το σύστημα GPS αποτελείται ουσιαστικά από "πομπούς σε τροχιά" που είναι οι δορυφόροι GPS (εικόνα 5) και από δέκτες GPS στη γήινη επιφάνεια. Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν σε αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 5: Οι κινήσεις των δορυφόρων πέριξ της γης[6]

Οι παρατηρήσεις και άλλες πληροφορίες καταγράφονται στη μνήμη του δέκτη και επεξεργάζονται είτε εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων, παρέχοντας τη θέση (συντεταγμένες), ή την ταχύτητα και τον χρόνο. Κάθε δορυφόρος διαθέτει τέσσερα ατομικά χρονόμετρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης "διαβάζει" και ένα μήνυμα δεδομένων - πλοήγησης που

[6] *[Πηγή : http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html]*

περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων, από τα οποία υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα. Το σήμα που αποστέλλουν οι δορυφόροι του GPS περιέχει όλη την απαιτούμενη πληροφορία για τον εντοπισμό θέσης. Κάθε δορυφόρος στέλνει ένα μοναδικό σήμα το οποίο διαμορφώνεται σε μία από τις δύο συχνότητες στην περιοχή του L φάσματος. Για να αποκωδικοποιήσει ο δέκτης τις συχνότητες αυτές χρησιμοποιεί δύο κωδικούς διαίρεσης πολλαπλής πρόσβασης (Code Division Multiple Access, CDMA). Αυτοί είναι, ο γενικός κωδικός C/A (Coarse Acquisition - χονδροειδούς απόκτησης) που είναι διαθέσιμος για πολιτική χρήση, και ο κωδικός ακριβείας P (precision), ο οποίος μπορεί να κρυπτογραφηθεί ως ένας P(Y) κωδικός διαθέσιμος μόνο για στρατιωτική χρήση. Η L1 συχνότητα διαμορφώνεται με τους C/A και P κωδικούς, ενώ η L2 χρησιμοποιούσε αρχικά μόνο τον P ενώ πλέον στους πιο σύγχρονους δορυφόρους από το 2005 και έπειτα προστέθηκε και ο L2C κωδικός για πολιτική χρήση.

Ένας δέκτης GPS στη γη υπολογίζει τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X,Y,Z) της θέσης του λαμβάνοντας σήματα από τους δορυφόρους. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει διαρκώς σήματα που περιέχουν την ώρα αποστολής του σήματος, ακριβείς συντεταγμένες της θέσης του, και γενικές πληροφορίες κατάστασης και χονδρικής τροχιάς όλου του συστήματος δορυφόρων GPS. Ο δέκτης υπολογίζει, μέσω του χρόνου που χρειάζεται το σήμα να φτάσει σε αυτόν, την απόστασή του από κάθε δορυφόρο. Έτσι, με γνωστές τις συντεταγμένες του κάθε δορυφόρου και τις αποστάσεις τους από τον δέκτη, είναι δυνατό να υπολογιστούν γεωμετρικά οι συντεταγμένες του δέκτη. Το πρόβλημα που προκύπτει εδώ αφορά στον αριθμό των δορυφόρων, γιατί ενώ θεωρητικά θα επαρκούσαν τρεις δορυφόροι για να προσδιορισθούν οι συντεταγμένες X, Y και Z ωστόσο, λόγω του ότι υπάρχουν μικρές διαφορές στο συγχρονισμό των ρολογιών του δέκτη και του δορυφόρου, χρειάζεται σήμα τουλάχιστον 4 δορυφόρων, ώστε ο δέκτης να επιλύσει ως προς X, Y, Z και ΔT. Έτσι με τη μέτρηση του χρόνου μετάδοσης μηνυμάτων από τέσσερις τουλάχιστον δορυφόρους, δημιουργείται ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων, όπως παρακάτω, με τέσσερις αγνώστους και προσδιορίζεται έτσι η θέση του δέκτη.

$$(X- X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z- Z_i)^2 = (R_i - c \cdot \Delta T)^2 \quad (2.1)$$

όπου,

X, Y, Z : καρτεσιανές συντεταγμένες ζητούμενης θέσης

X_i, Y_i, Z_i : καρτεσιανές συντεταγμένες δορυφόρου i

$R_i = c \cdot \Delta T$: ψευδοαπόσταση δορυφόρου-δέκτη

c : ταχύτητα φωτός

$\Delta t = t_R - t_S$: παρατηρημένη χρονική διαφορά μεταξύ εκπομπής και λήψης

t_R : παρατηρημένη χρονική στιγμή εκπομπής

t_S : παρατηρημένη χρονική διαφορά στιγμή λήψης

$\Delta T = \delta_R - \delta_S$: σχετικό σφάλμα συγχρονισμού ρολογιών δορυφόρου –δέκτη

δ_R : σχετικό σφάλμα ρολογιού δορυφόρου

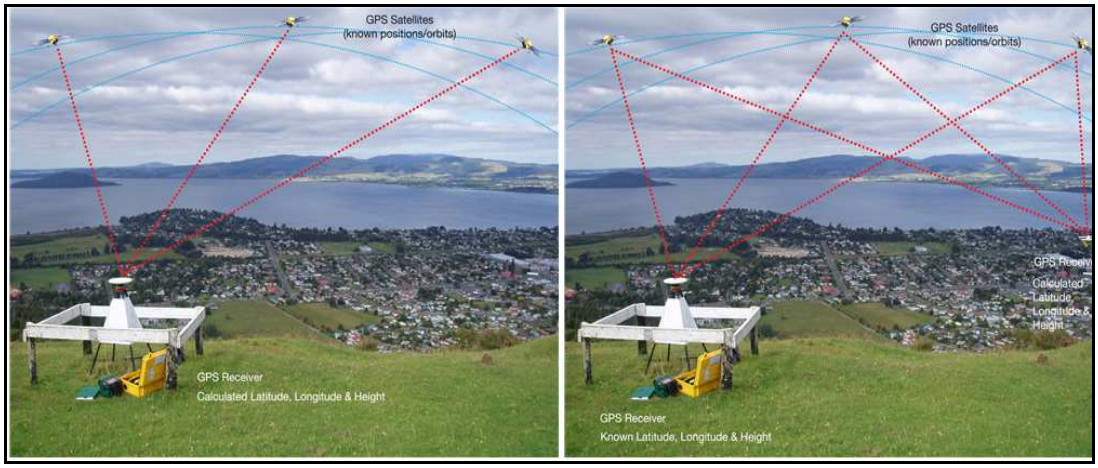
$\delta_R - \delta_S$: σχετικό σφάλμα ρολογιού δέκτη

Άγνωστοι στη σχέση 2.1 είναι οι συντεταγμένες X, Y, Z του δέκτη καθώς και το σφάλμα ΔT του χρονομέτρου του δέκτη, διότι η λειτουργία του συστήματος απαιτεί απόλυτο συγχρονισμό χρονομέτρων δέκτη - δορυφόρων.

2.1.4 Μέθοδοι μετρήσεων

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό θέσης με το σύστημα GPS εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια που απαιτείται σε κάθε εφαρμογή και από τον συνολικό χρόνο παρατήρησης. Γενικά στόχος είναι να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στον μικρότερο δυνατό χρόνο παρατήρησης. Γενικά οι τρόποι μέτρησης με το GPS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το αν ο δέκτης κινείται ή παραμένει ακίνητος στο σημείο μέτρησης, αν προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου απευθείας στο WGS΄84 ή έμμεσα ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο ή αν υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο οι συντεταγμένες του σημείου (κατά τη διάρκεια της μέτρησης) ή εκ των υστέρων στο γραφείο. Ανάλογα με το αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος ή όχι στο σημείο παρατήρησης, διακρίνονται

δυο βασικές κατηγορίες προσδιορισμού θέσης, ο στατικός [7] και τον κινηματικός [8] προσδιορισμός – εντοπισμός .



Εικόνα 6: Λειτουργική αρχή Απολύτου Εντοπισμού (αριστερά) και Σχετικού Εντοπισμού (δεξιά) [9]

Ανάλογα με το αν ο προσδιορισμός του σημείου γίνεται απευθείας στο σύστημα αναφοράς του GPS ή αν προσδιορίζεται η σχετική του θέση ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο, διακρίνονται δυο μέθοδοι προσδιορισμού, ο απόλυτος και ο σχετικός προσδιορισμός θέσης. Με τον όρο απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute positioning), ορίζεται ο προσδιορισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων (X,Y,Z) ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις. Αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος μπορούμε εκ των υστέρων να αξιοποιήσουμε όλες τις εποχές παρατήρησης και να οδηγηθούμε σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούνται συνήθως παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από κώδικες.

---

[7] Στον στατικό προσδιορισμό (Static Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS παραμένουν ακίνητοι στα προσδιοριζόμενα σημεία σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ο δέκτης δεν είναι απαραίτητο να έχει συνεχή επαφή με τους δορυφόρους όταν μεταφέρεται από σημείο σε σημείο.

[8] Στον κινηματικό προσδιορισμό (Kinematic Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS κινούνται κατά μήκος μιας διαδρομής και ο δέκτης υπολογίζει συντεταγμένες σε "τυχαία σημεία" της διαδρομής ανά τακτά χρονικά διαστήματα που έχουμε ορίσει εμείς. Στον κινηματικό προσδιορισμό η επαφή του δέκτη με τους δορυφόρους θα πρέπει να είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της κίνησης.

[9] [Πηγή : http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/4_issue_GSE.html#item1]

2.1.5 Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Με τον όρο σχετικό προσδιορισμό θέσης, ορίζεται ο προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ δυο σημείων, έστω Α και Β. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται βάση (baseline). Ουσιαστικά με τον σχετικό προσδιορισμό, υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός ή και περισσότερων σημείων ως προς κάποιο άλλο σημείο που θεωρείται γνωστό. Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις προς τους δορυφόρους από δυο τουλάχιστον δέκτες. Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται συνήθως γραμμικοί συνδυασμοί τους με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, εξαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν μαθηματικά πλήρως. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας όταν η κατάσταση αυτή είναι ενεργή. Οι ψευδοαποστάσεις από κώδικες μπορούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σχετικού προσδιορισμού χωρίς αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, της τάξης του 0.5m έως 1m, για παράδειγμα σε πολλές εφαρμογές GIS.[Φωτίου Α. , Πικριδά Χ. 2006]

2.2 Τεχνικές μετρήσεων

Οι διαφορετικές ανάγκες σε ακρίβεια και σε ταχύτητα που δημιουργούνται στις πρακτικές εφαρμογές οδήγησαν σε μια σειρά από τεχνικές μέτρησης που συνδυάζουν τις μεθόδους του διαφορικού GPS στον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Οι δυο κλασσικές τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι ο σχετικός στατικός προσδιορισμός και ο σχετικός κινηματικός προσδιορισμός. Εκτός όμως από τις δυο αυτές τεχνικές, δημιουργήθηκαν και κάποιες ενδιάμεσες τεχνικές (παραλλαγές) που σκοπό έχουν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του GPS στις τοπογραφικές εφαρμογές. Οι ενδιάμεσες αυτές τεχνικές αφορούν τις συνήθεις γεωδαιτικές εργασίες, που οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων δεν ξεπερνούν τα μερικά Km και ο χρόνος παρατήρησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους. Οι τεχνικές αυτές είναι ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός, ο ψευδο-κινηματικός και ο ημι-κινηματικός.

2.2.1 Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης (static positioning)

Με τον όρο στατικό προσδιορισμό θέσης ορίζεται ο προσδιορισμός όπου οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι στα σημεία σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Για να προσδιοριστούν σωστά οι συνιστώσες μιας βάσης, αρκεί οι συντεταγμένες του σημείου που θεωρείται γνωστό να είναι γνωστές με ακρίβεια μερικών μέτρων, ενδεικτικά της τάξης των 10m ως προς το WGS84. Στην ουσία, δηλαδή, η επίλυση μιας βάσης αναφέρεται σε ένα ″ψευδο-WGS΄84″. Όταν πρόκειται να επιλυθούν πολλές βάσεις, που αποτελούν ένα δίκτυο GPS, αρκεί να είναι γνωστό ένα μόνο σημείο. Τα λογισμικά GPS έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν τις βάσεις αυτόματα ή δίνουν και τη δυνατότητα να επιλέγει ο χρήστης ποιες βάσεις θα επιλύσει από το σύνολο των βάσεων σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Στις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εργασίες σχεδόν πάντα ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Έτσι, για να ελεγχθεί η ένταξη, κάποια από τα σημεία του δικτύου που πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία, πρέπει να είναι κοινά ώστε να χρησιμοποιηθούν για το μετασχηματισμό του δικτύου GPS στο τοπικό datum. Για την αξιοποίηση των σημαντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνική των διαφορών, οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ταυτόχρονες με ικανοποιητική ακρίβεια στα σημεία κάθε βάσης που επιλύεται. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο μέτρησης για δέκτη μιας συχνότητας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 20min για αποστάσεις μέχρι 5Km από το σημείο αναφοράς (Reference point), σημείο στο οποίο ο ένας από τους δυο δέκτες παραμένει σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων (συνήθως είναι κάποιο τριγωνομετρικό ή γενικά σημείο με γνωστές συντεταγμένες).

Η βέλτιστη απαιτούμενη χρονική διάρκεια συλλογής παρατηρήσεων εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων, από τον αριθμό και τη γεωμετρία των δορυφόρων, όπου δείκτης της ακρίβειας των μετρήσεων είναι η τιμή του GDOP η οποία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 8. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5Km και μέχρι 15Km, ο δέκτης είναι καλό να παραμείνει για τουλάχιστον μια ώρα. Ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων θα πρέπει να κυμαίνεται από 10sec μέχρι 20sec. Η γωνία αποκοπής (cut off angle) ορίζεται στις 15° μοίρες (είναι η γωνία κάτω από την οποία δεν καταγράφονται μετρήσεις). Συνήθως όταν απαιτείται μέγιστη ακρίβεια μετρούνται όσο το δυνατόν περισσότερες βάσεις (baselines) μεταξύ των σημείων, με την απαίτηση να

δημιουργούνται κλειστά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα με μια έστω διαγώνιο μετρημένη, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος των σφαλμάτων στις μετρήσεις. Για τη μέτρηση ενός δικτύου GPS στην πιο απλή περίπτωση που διατίθενται δυο δέκτες, αρκεί ο ένας να τοποθετηθεί σε ένα γνωστό σημείο, όπως στην εικόνα 6 και ο άλλος ο δέκτης να περιφέρεται στα υπόλοιπα σημεία (ακτινική διάταξη). Κάθε φορά, δηλαδή, μετράται στην ουσία μια βάση και στη συνέχεια συμπληρώνονται οι παρατηρήσεις στο δίκτυο, μετρώντας τις υπόλοιπες βάσεις.

Για τη μέτρηση δικτύων με αυτή τη μέθοδο είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται τρεις δέκτες έτσι ώστε να ″κλείνουν″ κάθε φορά τρίγωνα από βάσεις και να μειώνεται ο χρόνος μετακίνησης. Σε κάθε ομάδα μετρήσεων θα πρέπει στο σύνολο των σημείων που προσδιορίζονται να υπάρχουν τουλάχιστον δυο γνωστά σημεία (όσο περισσότερα τόσο καλύτερα), από τα οποία το ένα θα είναι σίγουρα το σημείο αναφοράς, ώστε να μπορεί να γίνει έπειτα από την επίλυση ο μετασχηματισμός ομοιότητας των προσδιορισθέντων σημείων από το σύστημα GPS στο ανάλογο προβολικό σύστημα. Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν με αυτή τη διαδικασία είναι της τάξης των 1-2cm ±1ppm της απόστασης μεταξύ των σημείων. Η διαδικασία αυτή είναι κατάλληλη για μετρήσεις δικτύων, μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων κλπ, και γενικά όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στις συντεταγμένες των σημείων μας.

2.2.2 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (kinematic positioning)

Ο σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (relative kinematic) αφορά σε εφαρμογές για τον υπολογισμό της τροχιάς οχημάτων (πλοίων, αεροπλάνων κτλ.) και κάποιες άλλες, όπως οι μηκοτομές αξόνων δρόμων με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τον αντίστοιχο απόλυτο κινηματικό. Στη διαδικασία αυτή, απαιτείται αρχικά να λυθεί το πρόβλημα της ασάφειας φάσης για όλους τους δορυφόρους με την έναρξη της διαδικασίας.

Εικόνα 7: Κινηματικός προσδιορισμός θέσης σημείων[10]

Ο ακίνητος δέκτης μένει συνεχώς στο γνωστό σημείο και ο κινητός, στην αρχή, μένει ακίνητος για λίγα λεπτά μέχρι να συλλεχθούν ικανές μετρήσεις για την επίλυση των ασαφειών. Η αρχική θέση του κινούμενου δέκτη μπορεί να είναι ένα άλλο γνωστό σημείο ή ένα τυχαίο σημείο κοντά στο μόνιμο σταθμό, ώστε να εφαρμοστεί η λεγόμενη τεχνική της εναλλαγής των κεραιών (antenna swapping) ή και ένα τυχαίο σημείο για εφαρμοστεί η τεχνική του στατικού σχετικού προσδιορισμού. Στη συνέχεια ο κινούμενος δέκτης (εικόνα 7) λαμβάνει μετρήσεις (καθώς κινείται) ανά κάποια χρονικά διαστήματα π.χ. ανά 5sec, και έτσι μπορούν να προσδιοριστούν οι σχετικές θέσεις του, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει απώλεια δορυφορικού σήματος. Αν υπάρξει απώλεια σήματος ή οι δορυφόροι είναι λιγότεροι από 4, η επίλυση της ασάφειας πρέπει να επαναληφθεί, όπως και στην αρχή της διαδικασίας. Ο κινούμενος δέκτης δεν χρειάζεται να επιστρέψει στο αρχικό σημείο, αλλά να

[10] *[Πηγή : http://users.ntua.gr/ddeli/gse/4_issue_gse.html#item1]*

παραμείνει ακίνητος σε μια θέση μέχρι τη συλλογή ικανού αριθμού μετρήσεων. Οι ακρίβειες με μετρήσεις φάσεων είναι και εδώ πολύ υψηλές, λίγο μικρότερες από αυτές του σχετικού προσδιορισμού, της τάξης του 1 έως 10 ppm και ανάλογα με τις δυνατότητες του δέκτη, της τάξης του 1m από μετρήσεις ψευδοαποστάσεων.

2.2.3 Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static)

Ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός, είναι μια κλασική στατική τεχνική και μοιάζει με τον σχετικό στατικό προσδιορισμό. Γενικά χρησιμοποιείται μεγαλύτερος ρυθμός λήψης των παρατηρήσεων συνήθως 5-10 sec, και η διαφορά του από τον κλασικό στατικό προσδιορισμό είναι ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις λίγων λεπτών για κάθε βάση, τόσες όσες να μπορεί να επιλυθεί ικανοποιητικά το πρόβλημα της ασάφειας φάσης. Στη μέθοδο αυτή ο ένας δέκτης παραμένει σταθερός σε γνωστό σημείο και ο άλλος περιφέρεται στα υπόλοιπα άγνωστα σημεία παραμένοντας σε αυτά 5 έως 20 λεπτά, ανάλογα με το μήκος της βάσης 5- 20Km, αν είναι μέρα ή νύχτα (τη νύχτα χρειαζόμαστε λιγότερο χρόνο γιατί η ιονόσφαιρα είναι πιο ήπια), και του αριθμού των δορυφόρων. Οι δέκτες πρέπει να είναι διπλής συχνότητας και με δυνατότητα μέτρησης κωδίκων. Κατά τη μετακίνηση των δεκτών από σημείο σε σημείο, δε χρειάζεται η λήψη του δορυφορικού σήματος και οι δέκτες μπορούν να είναι κλειστοί. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται εδώ είναι της τάξης του εκατοστού. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα κατώτερης τάξης, πυκνώσεις δικτύων, στη λήψη φωτοσταθερών και στην πολυγωνομετρία.

2.3 Σφάλματα στο GPS

Διακρίνονται μια σειρά σφαλμάτων, συστηματικού κυρίως χαρακτήρα (systematic errors), που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία σφάλματα (random errors), που προφανώς είναι αναπόφευκτα, κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, ονομάζονται συνήθως ως θόρυβος (noise). Τα σφάλματα GPS μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες (εικόνα 8):

- σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους: το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας ή τροχιάς, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας
- σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες: το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας, το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης ή ο θόρυβος, το σφάλμα εξαιτίας της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά την επίλυση μιας βάσης
- σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος: τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα), το σφάλμα πολυανάκλασης, το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων.

Εικόνα 8: Τυπικά σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις GPS [11]

Πραγματοποιήθηκε σημαντική προσπάθεια για τον έλεγχο και μοντελοποίηση των σφαλμάτων GPS. Η εκτίμησή τους πριν από τη συνόρθωση δεν μπορεί να γίνει πάντα με την ακρίβεια που απαιτείται για το σχετικό προσδιορισμό θέσης. Η μοντελοποίησή τους, αν και ικανοποιητική στις περισσότερες περιπτώσεις, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των άγνωστων παραμέτρων στα μοντέλα συνόρθωσης και τη μείωση της ισχύος της λύσης. Πέρα από τα παραπάνω σφάλματα, τον

[11] *[Πηγή : http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/4_issue_GSE.html#item1]*

προσδιορισμό θέσης και χρόνου επηρεάζει και η γεωμετρική μορφή του δορυφορικού σχηματισμού.

2.3.1 Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων

Η ποιότητα των παραμέτρων της τροχιάς των δορυφόρων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε εφαρμογή GPS. Το σφάλμα της τροχιάς είναι η συστηματική παρέκκλιση της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου από την πραγματική θέση, την θέση με βάση τις παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των τροχιών και των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Αν πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή PDOP δίνει την επίδραση στο σφάλμα θέσης του δέκτη. Όπως είναι φυσικό, μιας και δεν υπάρχει μέτρηση που να μην περιέχει σφάλματα, οι εκπεμπόμενες εφημερίδες των δορυφόρων για την τροχιά τους δεν παρέχουν την πραγματική θέση του δορυφόρου, αλλά κάποια διαφορετική που προσεγγίζει την αληθή με κάποιο σφάλμα. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, για παράδειγμα, αν μετράται μια βάση 20Km, τότε ένα σφάλμα της τάξης των 20m στην τροχιά ενός δορυφόρου (σύνηθες όταν η επιλεκτική διαθεσιμότητα δεν είναι ενεργοποιημένη) που βρίσκεται σε απόσταση 20.000Km, μεταφράζεται σε ένα σφάλμα 2 cm στη θέση του δέκτη. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα 1 ppm για κάθε 20 m σφάλματος στην τροχιά του δορυφόρου.

2.3.2 Σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου

Το σφάλμα αυτό οφείλεται στο μη συγχρονισμό του ατομικού ρολογιού του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS που αποτελεί την κλίμακα χρόνου του συστήματος. Αντί να γίνει διόρθωση του χρόνου στο ατομικό ρολόι του κάθε δορυφόρου, έγινε η επιλογή της ελεύθερης ροής χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των ονομαστικών κλιμάκων των δορυφόρων από την κλίμακα του GPS και τον υπολογισμό των αντίστοιχων σφαλμάτων με πρόγνωση για χρήση σε πραγματικό χρόνο. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, το σφάλμα αυτό απαλείφεται από τις παρατηρήσεις. Αυτό δεν σημαίνει ότι στη διαδικασία του σχετικού προσδιορισμού

θέσης δεν επηρεάζεται από αυτό. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο το σφάλμα μετά τη διόρθωση αγνοείται.

2.3.3 Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη

Για την παραγωγή των σημάτων-αντιγράφων και τη διατήρηση της ονομαστικής του κλίμακας χρόνου, ο δέκτης χρησιμοποιεί έναν συνηθισμένο ταλαντωτή ή ρολόι τύπου κρυστάλλου χαλαζία, προφανώς λιγότερο ακριβές από τα ατομικά χρονόμετρα, καθώς αυτό θα σήμαινε την κατακόρυφη αύξηση του κόστους τους. Αρκεί να αναφερθεί ότι τα ατομικά χρονόμετρα ακριβείας με τα οποία εξοπλίζονται οι δορυφόροι, ζυγίζουν περισσότερο από 20kgr και απαιτούν εκτεταμένη φροντίδα. Ο μη συγχρονισμός του ρολογιού του δέκτη με την κλίμακα χρόνου του GPS εκφράζεται από το αντίστοιχο σφάλμα που είναι σημαντικό και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Από την τυπική λύση πλοήγησης ο δέκτης υπολογίζει το σφάλμα του ρολογιού του με ακρίβεια καλύτερη από 1μs (δεκάδες μέτρα) και διορθώνει το χρόνο του ως προς το χρόνο GPS. Το σφάλμα αυτό είναι συνάρτηση του χρόνου, μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε εποχή παρατήρησης και σχεδόν απαλείφεται από τις παρατηρήσεις στο σχετικό προσδιορισμό θέσης. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται ταυτόχρονα με τη θέση.

2.3.4 Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας

Το μηχανικό ή γεωμετρικό ή φυσικό κέντρο της κεραίας ενός δέκτη GPS είναι το σημείο αναφοράς ως προς το οποίο προσδιορίζεται το ύψος της κεραίας από το σημείο εδάφους, συνήθως κατά την κατακόρυφο, παρόμοια με τη μέτρηση του ύψους οργάνου ή πρίσματος με τη μέτρηση με Total Station. Το ηλεκτρικό κέντρο της κεραίας ή αλλιώς το κέντρο φάσης είναι το σημείο όπου γίνεται η λήψη των δορυφορικών σημάτων και στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις GPS. Τα άκρα μιας βάσης GPS ορίζονται αρχικά από τα αντίστοιχα κέντρα φάσης των κεραιών. Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μια μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτούν κρίσιμο χαρακτήρα στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Αν δεν ληφθούν υπόψη, το σφάλμα μπορεί να φτάσει και τα 10cm στην υψομετρική

διαφορά, ανεξάρτητα από το μήκος της βάσης. Για τις συνήθεις εφαρμογές και για μικρές βάσεις η επίδραση της μεταβολής των κέντρων φάσης απαλείφεται αν χρησιμοποιηθούν ίδιες κεραίες στα άκρα της βάσης GPS και με τον ίδιο προσανατολισμό. Π.χ. με το ίδιο μαγνητικό αζιμούθιο με τη βοήθεια μιας πυξίδας (οι κεραίες φέρουν ενδεικτικό σημείο, ώστε η κεραία να στραφεί προς το Βορρά).

2.3.5 Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου

Οποιοδήποτε σφάλμα στη θέση του σημείου που διατηρείται σταθερό κατά την επίλυση μιας βάσης (σχετικός προσδιορισμός) επηρεάζει συστηματικά τις εκτιμήσεις των συνιστωσών (X,Y,Z). Γενικά, η ακρίβεια των προσεγγιστικών συντεταγμένων του σημείου αναφοράς (λαμβανόμενου ως σταθερού) δεν πρέπει να ξεπερνά τα περίπου 10m για τις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Στις εργασίες υψηλής ακρίβειας επιδιώκεται ακρίβεια των συντεταγμένων του σταθερού σημείου όσο γίνεται μεγαλύτερη. Η επίδραση του σφάλματος αυτού στη σχετική θέση είναι παρόμοια με την επίδραση του σφάλματος τροχιάς.

2.3.6 Τα ατμοσφαιρικά σφάλματα

Η γήινη ατμόσφαιρα διακρίνεται σε ομόκεντρα, σχεδόν σφαιρικά στρώματα τα οποία χωρίζονται από στενές ζώνες μεταβίβασης από το ένα στο άλλο. Διακρίνονται δυο είδη ατμοσφαιρικά σφάλματα, το ιονοσφαιρικό και το τροποσφαιρικό σφάλμα. Τα τμήματα αυτά της ατμόσφαιρας επηρεάζουν ουσιαστικά και κατά διαφορετικό τρόπο τη διαδρομή του δορυφορικού (ηλεκτρομαγνητικού) σήματος όπως στην εικόνα 9, με αποτέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις λόγω της επιβράδυνσης της ταχύτητας διάδοσης και την καμπυλότητα της τροχιάς λόγω αλλαγής κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό. Για τη μείωση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας λαμβάνουμε ή χρησιμοποιούμε κατά την επεξεργασία μετρήσεις προς δορυφόρους που έχουν γωνία ύψους πάνω από ένα όριο, συνήθως πάνω από 15°. Η γωνία αυτή, γνωστή και ως γωνία αποκοπής (cut off angle, elevation mask) είναι συνήθως 10° ή 15°.

Εικόνα 9: Επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα του GPS [12]

2.3.7 Το σφάλμα πολυανάκλασης

Πολυανάκλαση είναι το φαινόμενο, όπου το δορυφορικό σήμα λαμβάνεται και από άλλη ή άλλες έμμεσες διαδρομές εκτός από την κανονική του πορεία εξαιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες, π.χ. επιφάνειες κτιρίων. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική και η άφιξη του σήματος στην κεραία του δέκτη γίνεται ύστερα από πολλές ανακλάσεις. Η επίδραση αυτή ονομάζεται **σφάλμα πολυανάκλασης (multipath error)**. Είναι φανερό ότι το σφάλμα πολυανάκλασης του δέκτη είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος χώρου. Έτσι οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο θόρυβο και είναι συστηματικά επηρεασμένες από κάποιο σφάλμα. Το σφάλμα πολυανάκλασης εξαρτάται από τη γωνία ύψους του δορυφόρου. Όσο πιο μικρή η γωνία ύψους, τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα πολυανάκλασης. Τιμές της τάξης των μερικών εκατοστών για τις φάσεις, των μερικών μέτρων για τον κώδικα P και των μερικών δεκάδων μέτρων για τον κώδικα C/A είναι πολύ πιθανές. Κάτω από άσχημες συνθήκες η ανάκλαση μπορεί να επιφέρει μέχρι και χάσιμο του σήματος (loss of lock). Ο πιο ασφαλής τρόπος για την

[12] *[Πηγή : http://users.ntua.gr/ddeli/GSE/4_issue_GSE.html#item1]*

ελαχιστοποίηση του σφάλματος πολυανάκλασης είναι η κατάλληλη επιλογή της θέσης του δέκτη για τις στατικές εφαρμογές (όχι κοντά σε ψηλά γειτονικά κτίρια και γενικά κοντά σε εμπόδια). Η επίδραση του συγκεκριμένου σφάλματος στις κινηματικές εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από ότι στις εφαρμογές στατικού τύπου. Στις τελευταίες, οι επιδράσεις του σφάλματος πολυανάκλασης τείνουν να εξουδετερωθούν λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας δέκτη - δορυφόρου κατά τη διάρκεια μιας μετρητικής περιόδου που διαρκεί περισσότερο χρόνο, ενδεικτικά πάνω από μια ώρα.[Πικριδάς Χ.,2005]

2.4 Δορυφορικά συστήματα GNSS

Στα συστήματα των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης ανήκουν εκτός από το GPS, το παρόμοιο Ρωσικό σύστημα GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System), καθώς και το πολιτικό ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO. Αυτά τα παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης και χρόνου που περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερους δορυφορικούς σχηματισμούς (πίνακα 2 και εικόνα 10) (GPS, GLONASS, GALILEO, ComSats…) ονομάζονται Δορυφορικά συστήματα GNSS (Global Navigation Satellite Systems).

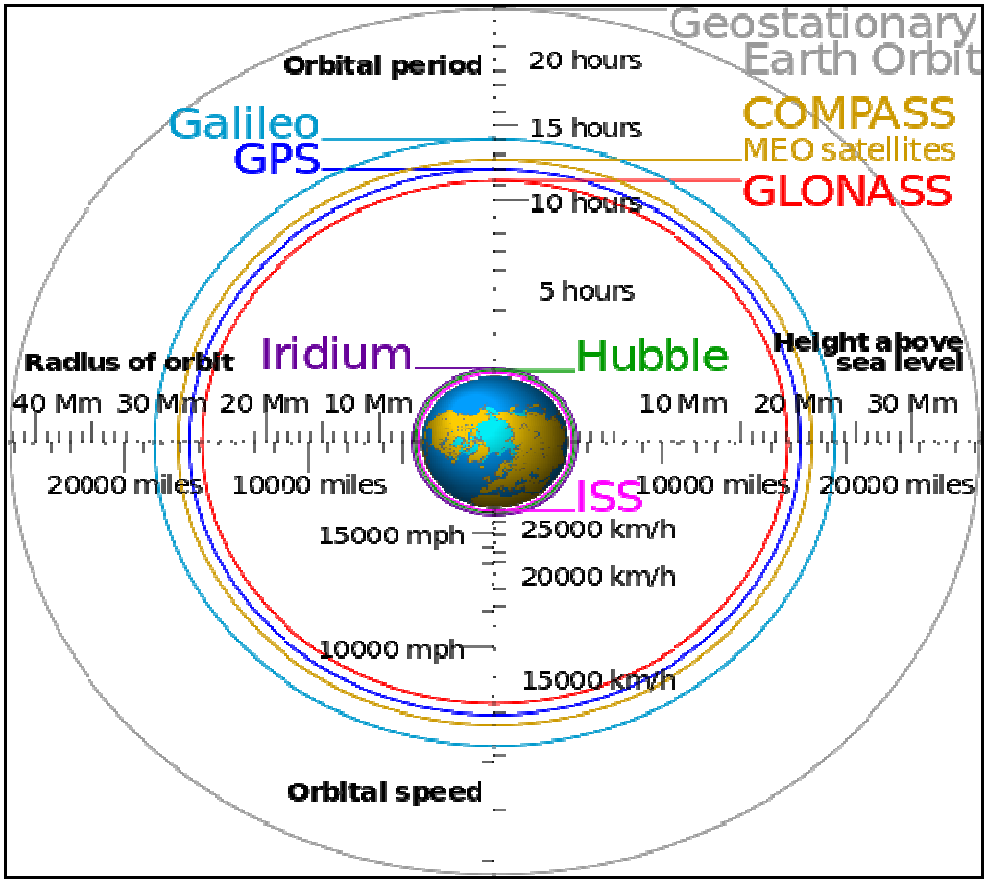
Τα GNSS είναι διαλειτουργικά συστήματα δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης ενισχυμένα με άλλες τεχνολογίες (π.χ. τηλεπικοινωνίες) ώστε να υποστηρίζουν απαιτητικές εφαρμογές εντοπισμού και αξιοποίησης της γεωγραφικής θέσης του χρήστη. [Δ. Δεληκαράογλου , Γ. Κατσιγιάννη, 2010]

Το GLONASS δεν έγινε μέχρι σήμερα πλήρως επιχειρησιακό και συνεπώς δεν έτυχε της ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως το GPS. Το GALILEO είναι τεχνολογικά περισσότερο προηγμένο, καλύτερων επιδόσεων, ασφαλέστερο και με μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών σε συνδυασμό με την κινητή τηλεφωνία και το διαδίκτυο. Πάντως υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ των τριών συστημάτων.

Σύστημα	GPS	GLONASS	COMPASS	GALILEO
Πολιτική Οντότητα	Ηνωμένες Πολιτείες	Ρωσία	Κίνα	Ευρωπαϊκή Ένωση
Τροχιακό Ύψος	20.180 χιλιόμετρα (12.540 μίλια)	19.130 χιλιόμετρα (11.890 μίλια)	21.150 χιλιόμετρα (13.140 μίλια)	23.220 χιλιόμετρα (14.430 μίλια)
Περίοδος	11,97 ώρες (11 h 58 m)	11,26 ώρες (11 h 16 m)	12,63 ώρες (12 ώρες 38 m)	14,08 ώρες (14 ώρες 5 m)
Εξέλιξη ανά Αστρική Ημέρα	2	17/8	36/19	17/10
Αριθμός Δορυφόρων	Τουλαχιστον 24	31,συμπεριλαμβανομένων 24 επιχειρησιακά 1 στην παρασκευή 2 για τη συντήρηση 3 αποθεματικοί 1 στις δοκιμές	5 γεωστατική τροχιά (GEO) δορυφόρους, 30 μεσαίου γήινη τροχιά (MEO)	4 δορυφόρους δοκιμών σε τροχιά, 22 επιχειρησιακούς δορυφόρους (προϋπολογισμό)
Συχνότητα	1,57542 GHz (L1 σήμα) 1,2276 GHz (L2 σήμα)	Περίπου 1,602 GHz (SP) Περίπου 1,246 GHz (SP)	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1,20714 GHz (B2) 1,26852 GHz (B3)	1,164 - 1,215 GHz (E5a και E5b) 1,260 έως 1,300 GHz (E6) 1,559 έως 1,592 GHz (E2-L1-E11)
Κατάσταση	Επιχειρησιακό	Επιχειρησιακά, CDMA στο πλαίσιο της προετοιμασίας	15 δορυφόροι σε λειτουργία, 20 επιπλέον δορυφόροι σχεδιάζονται	Στο πλαίσιο της προετοιμασίας

Πίνακας 2: Σύγκριση των δορυφορικών συστημάτων GNSS[13]

[13] *[Πηγή : http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation]*



Εικόνα 10: Σύγκριση του GPS , GLONASS , Galileo και Compass[14]

2.4.1 Το Ρωσικό σύστημα GLONASS

Παράλληλα με το GPS η πρώην Σοβιετική Ένωση προχώρησε στη δημιουργία ενός παρόμοιου συστήματος παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης σύμφωνα με το σχεδιασμό του, ο αστερισμός του θα περιλαμβάνει 24 δορυφόρους (21+3 εφεδρικούς) σε τροχιά, ισοκατανεμημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα με οκτώ δορυφόρους στο καθένα. Σε αντίθεση με το GPS, ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει τις δικές του συχνότητες βάσει του αριθμού PRN που έχει στο σύστημα. Όλες οι συχνότητες εκπομπής προκύπτουν από δυο βασικές συχνότητες L1 και L2 προσθέτοντας τον αριθμό PRN του κάθε δορυφόρου. Η κάλυψη που προσφέρει το GLONASS (όταν ο αστερισμός των

---

[14] *[Πηγή : http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation]*

δορυφόρων ολοκληρωθεί) είναι παγκόσμια και προσφέρει ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης μεταξύ 57-70m για οριζόντιες συντεταγμένες και 70m για την κάθετη. Επίσης, στο σύστημα GLONASS δεν έχει εφαρμοστεί και ούτε προβλέπεται να εφαρμοστεί η κατάσταση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Το σύστημα GLONASS ξεκίνησε με φιλόδοξους στόχους αντίστοιχους με αυτούς του GPS και κατάφερε να διατηρήσει υψηλά επίπεδα εξυπηρέτησης και διαθεσιμότητας δορυφόρων μέχρι και το 1995 περίπου οπότε και οι δορυφόροι που είχαν εκτοξευθεί μέχρι το 1991 άρχισαν να μην λειτουργούν. Από το σημείο αυτό μέχρι σήμερα, η δυσμενής οικονομική κατάσταση που επικρατεί στη Ρωσική Ομοσπονδία δεν επιτρέπει τη χρηματοδότηση τέτοιων προγραμμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σήμερα να βρίσκονται σε λειτουργία μόνο οκτώ δορυφόροι από τον αστερισμό του GLONASS. Στο πλαίσιο ενός πιλοτικού προγράμματος έγινε προσπάθεια για τον υπολογισμό ακριβέστερων τροχιών του συστήματος GLONASS και για τη σύνδεση του συστήματος με το GPS.

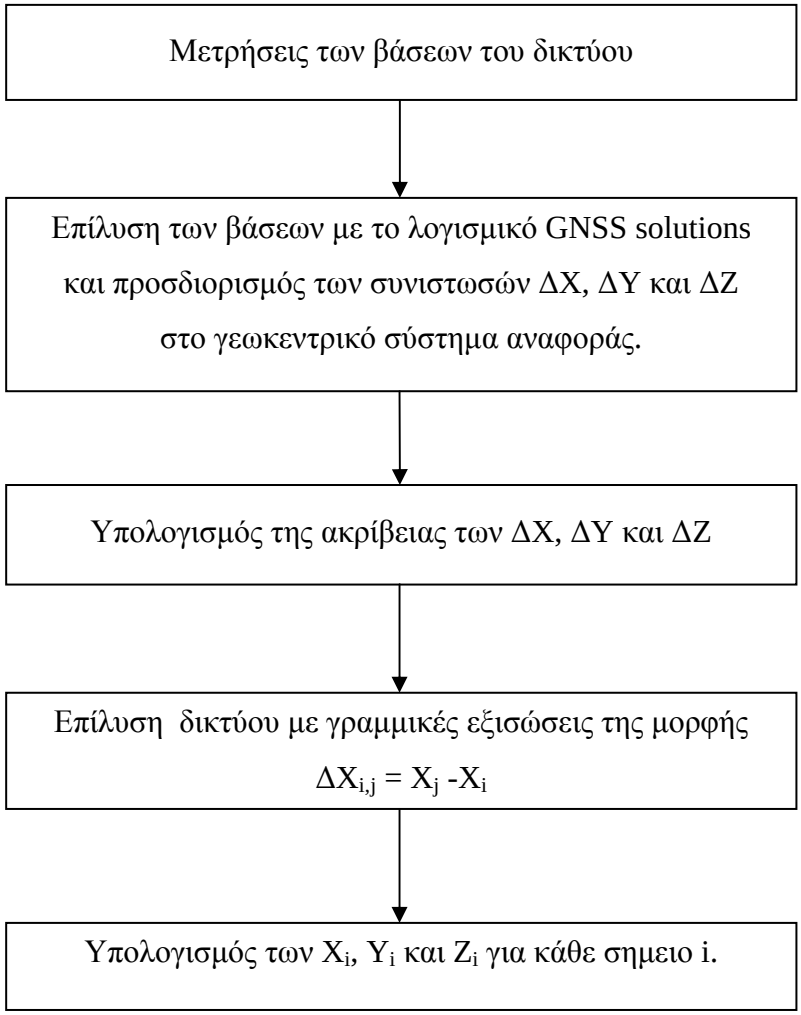
2.4.2 Το ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO

Το σημαντικότερο ίσως γεγονός στον τομέα των συστημάτων προσδιορισμού θέσης αποτελεί η προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προχωρήσει στη δημιουργία ενός νέου παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, του GALILEO. Το νέο σύστημα θα έχει πολιτικό χαρακτήρα και θα καλύπτει με ακρίβεια σχεδόν το 99% της γήινης επιφάνειας. Θα εγγυάται τη διαθεσιμότητα κάτω και από τις πιο ακραίες καταστάσεις παρατήρησης και θα μπορεί να στέλνει τις απαραίτητες πληροφορίες στους χρήστες μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Προβλέπεται ότι στις περισσότερες περιοχές θα είναι πάντοτε ορατοί τουλάχιστον έξι έως οκτώ δορυφόροι. Αναπτύσσεται λοιπόν από την Ε.Ε. και την ευρωπαϊκή διαστημική Υπηρεσία (ESA) το σύστημα GALILEO με στόχο την δημιουργία ενός πολιτικού παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας με πλήθος εφαρμογών: στην πλοήγηση κάθε οχήματος και πεζοπόρου, στον έλεγχο των μεταφορών, συγκοινωνιών και τη διαχείριση στόλου οχημάτων κ.ά. Το σύστημα θα αποτελείται συνολικά από 30 δορυφόρους (27+3 εφεδρικούς) τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα σε μέση γήινη τροχιά, ενώ το ύψος της τροχιάς των δορυφόρων θα είναι περίπου 23.600 km. Το σύστημα GALILEO, θα έχει το δικό του σύστημα ελέγχου

και το δικό του πλαίσιο αναφοράς (GTRF: Galileo Terrestrial Reference Frame) το οποίο θα είναι μια υλοποίηση του συστήματος ITRS της IERS. Η διαφορά από το WGS84 και τα άλλα ITRF πλαίσια θα είναι της τάξης των μερικών εκατοστών του μέτρου, πρακτικά αμελητέα για τις μαζικές εφαρμογές πλοήγησης.[15]

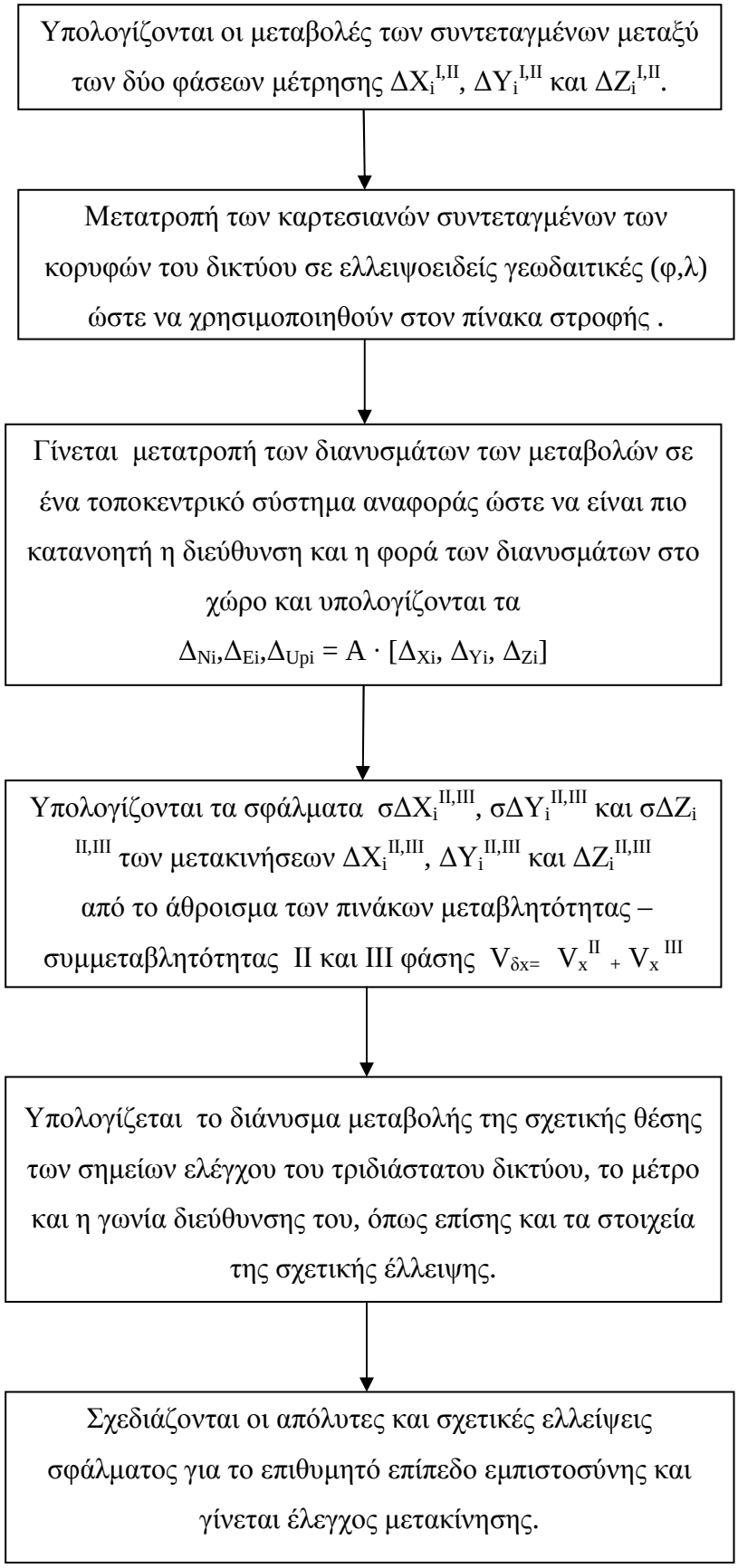
2.4 Ανάλυση μεθοδολογίας προσδιορισμού μετακινήσεων

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων των σημείων του δικτύου με τεχνολογία GNSS παρουσιάζεται συνοπτικά στο πιο κάτω διάγραμμα ροής.



[15] *[Πηγή : http://www.eurospace.org]*

Η πιο πάνω διαδικασία γίνεται 2 φορές μια για την φάση [Δεκέμβριος 2006] και μια για την φάση [Ιούνιος 2012].



3. Το γεωδαιτικό τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου στο φράγμα του Κούρη

3.1 Γενικά

Το υφιστάμενο τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου εγκαταστάθηκε το 2005 στο πλαίσιο εκπόνησης διπλωματικής εργασίας του Κ . Τέμενου από την Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. που είχε τίτλο *"ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΟΥΡΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ".* Το τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου αποτελείται από έξι (6) σημεία. Τα πέντε (5) από τα σημεία είναι τσιμεντένια βάθρα εκ των οποίων τα τέσσερα (4) τοποθετήθηκαν περιμετρικά του φράγματος και το πέμπτο έξω από την περιοχή σε απόσταση περίπου 1700m από το φράγμα. Το έκτο σημείο υλοποιείται από ορειχάλκινη βάση, πάνω σε τσιμεντένια κατασκευή, στην μέση περίπου της στέψης του φράγματος.

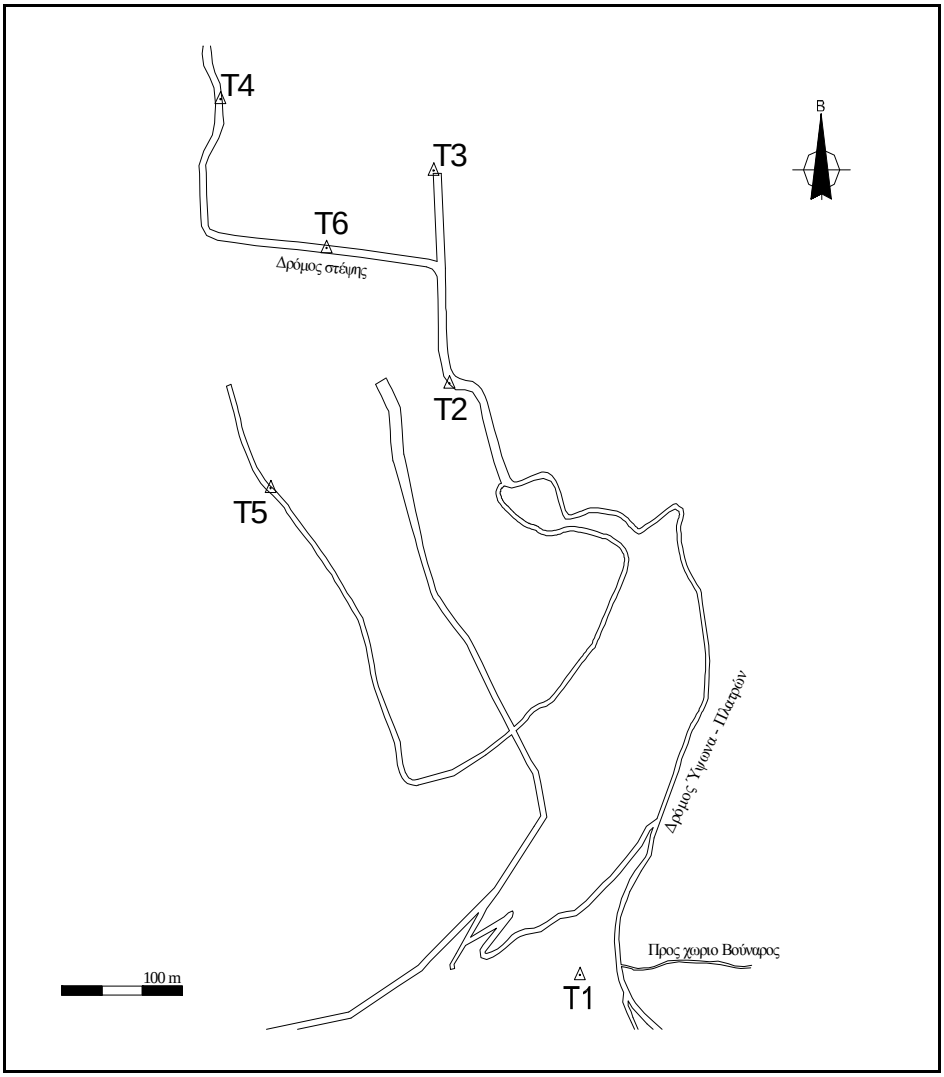
Εικόνα 11:Τσιμεντένιο βάθρο

Ο σκελετός των βάθρων αυτών είναι πλαστική σωλήνα ύψους 65cm και διαμέτρου 15cm. Η πλαστική σωλήνα γέμισε τσιμέντο και στο πάνω μέρος της τοποθετήθηκε ορειχάλκινη βάση διαμέτρου 14cm (εικόνα 11). Η ορειχάλκινη βάση στο κάτω μέρος

της έχει προεξοχή ώστε να μπορεί να σταθεροποιηθεί στο βάθρο. Στην επάνω επιφάνειά της υπήρχε προεξοχή με βίδα ¾ όπου επάνω μπορεί να προσαρμοστούν με εξαναγκασμένη κέντρωση τόσο οι δέκτες GPS όσο και οποιοσδήποτε γεωδαιτικός σταθμός. Τα βάθρα τοποθετήθηκαν στο έδαφος, στα προκαθορισμένα σημεία του δικτύου τριδιάστατου ελέγχου, σε βάθος περίπου 15cm. Το σημείο Τ6 (πάνω στη στέψη του φράγματος), η ορειχάλκινη βάση τοποθετήθηκε απευθείας πάνω στην τσιμεντένια κατασκευή. Η τσιμεντένια αυτή κατασκευή χρησιμοποιείται ως χώρος φύλαξης γεωτεχνικών οργάνων του φράγματος και βρίσκεται περίπου στη μέση της στέψης, στην κατάντη πλευρά του δρόμου (εικόνα 12).

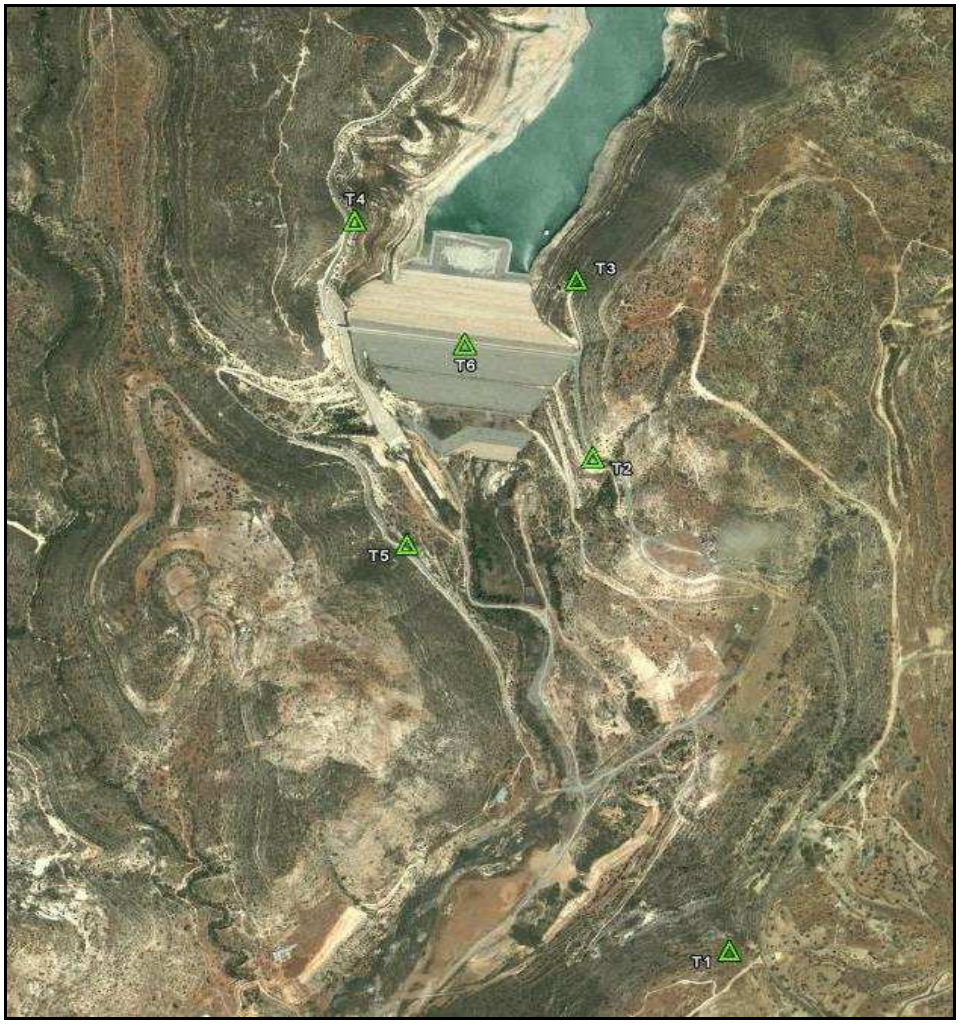
Εικόνα 12: Το σημείο τρισδιάστατου ελέγχου Τ6

Όπως προαναφέρθηκε το σημείο Τ6 τοποθετήθηκε πάνω στο φράγμα, ενώ τα σημεία Τ2, Τ3, Τ4 και Τ5 τοποθετήθηκαν περιμετρικά του φράγματος. Ο λόγος της περιμετρικής τοποθέτησης τους είναι η ανίχνευση μετακινήσεων όχι μόνο στο κυρίως σώμα του φράγματος αλλά και στην ευρύτερη περιοχή.



Σχήμα 2: Τα σημεία ελέγχου του γεωδαιτικού δικτύου τριδιάστατου ελέγχου

Ως σταθερό σημείο του δικτύου επιλέχθηκε το σημείο Τ1. Βρίσκεται έξω από την περιοχή του φράγματος και δεν επηρεάζεται από τις καταπονήσεις της λίμνης στο φράγμα. Βρίσκεται σε απόσταση περίπου 1700m σε ευθεία από το φράγμα, στη τοποθεσία Λάνιν του Πόρακου, σε απόσταση περίπου 90m από τον δρόμο Ύψωνα – Πλατρών, παρά το χωριό Βούναρος. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται το δίκτυο τριδιάστατου ελέγχου καθώς και το οδικό δίκτυο της περιοχής ενώ στην εικόνα 13 φαίνεται το δίκτυο τριδιάστατου έλεγχου από δορυφορική εικόνα.



Εικόνα 13: Το δίκτυο τριδιάστατου έλεγχου από δορυφορική εικόνα

3.2 Μετρήσεις Ιης και ΙΙης φάσης

Ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στο δίκτυο που ιδρύθηκε στην περιοχή του φράγματος ήταν ο Scorpio 6502 SP της Thales Navigation. Πρόκειται για γεωδαιτικό δέκτη διπλής συχνότητας (L1/L2), βάρους 2.42Kg (μαζί με τις εσωτερικές μπαταρίες) και κατανάλωσης ισχύος περίπου 8Watt. Με εξωτερικές μπαταρίες και την κάρτα μνήμης (χωρητικότητας 8 Mb), έχει την δυνατότητα καταγραφής μετρήσεων διάρκειας άνω των 9 ωρών.

Η πρώτη (Ι) φάση των μετρήσεων έγινε τον Αύγουστο του 2006 όταν το φράγμα είχε ποσότητα νερού 36%, ενώ η δεύτερη (ΙΙ) φάση των μετρήσεων έγινε το Δεκέμβριο του 2006 όταν το φράγμα είχε ποσότητα νερού 18.4% και εφαρμόστηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες που μετρούσαν ταυτόχρονα. Οι μεγάλες βάσεις (>1000m) μετρήθηκαν για χρονικό διάστημα μιας ώρας και ένα τέταρτο (01:15) και οι μικρές για μια ώρα (01:00). Συνολικά μετρήθηκαν δεκατρείς βάσεις σε συνολικό χρονικό διάστημα 2 ημερών και το βήμα μέτρησης ήταν ανά 5sec. Δεν έγινε χρονικός προγραμματισμός των μετρήσεων επειδή όλα τα βάθρα είχαν ανοικτό ορίζοντα και δεν υπήρχαν παρεμβολές στην περιοχή.

3.3 Επιλύσεις και Έλεγχος μετακινήσεων για την περίοδο Αύγουστος - Δεκέμβριος 2006

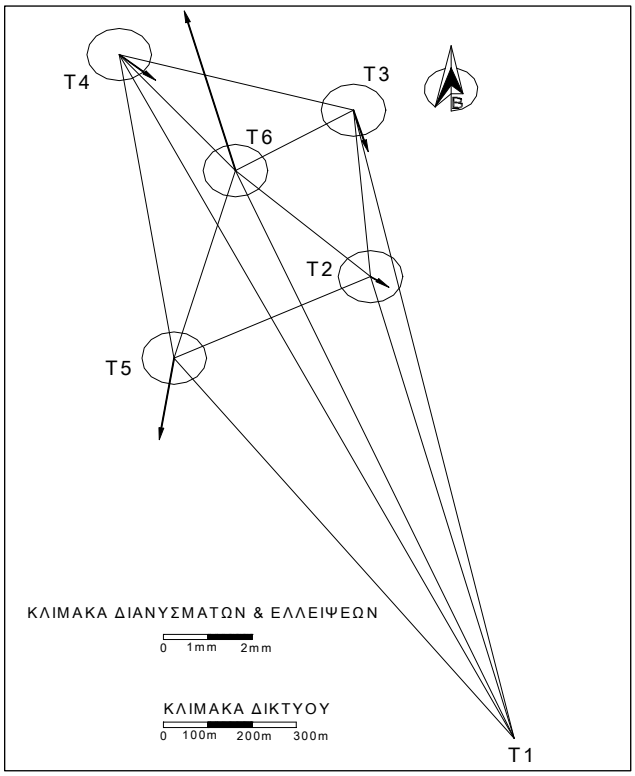
Έγιναν οι επιλύσεις των βάσεων, για τις δυο χρονικές στιγμές και προσδιοριστήκαν οι συνιστώσες ΔX, ΔY και ΔZ κάθε διανύσματος. Ακολούθως για κάθε φάση, επιλύθηκε ένα τριδιάστατο δίκτυο με εξισώσεις παρατήρησης της μορφής $\Delta X_{i,j} = X_j - X_i$, $\Delta Y_{i,j} = Y_j - Y_i$ και $\Delta Z_{i,j} = Z_j - Z_i$ και θεωρώντας ως σταθερή την κορυφή Τ1, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες X, Y και Z των υπολοίπων κορυφών στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων, με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τους.

Υπολογίστηκαν οι μεταβολές ΔX, ΔY και ΔZ της θέσης για κάθε κορυφή, μετατράπηκαν σε αντίστοιχες ΔE, ΔN και ΔUp σε ένα τοπικό σύστημα και έγινε έλεγχος απόλυτης και σχετικής μετακίνησης.

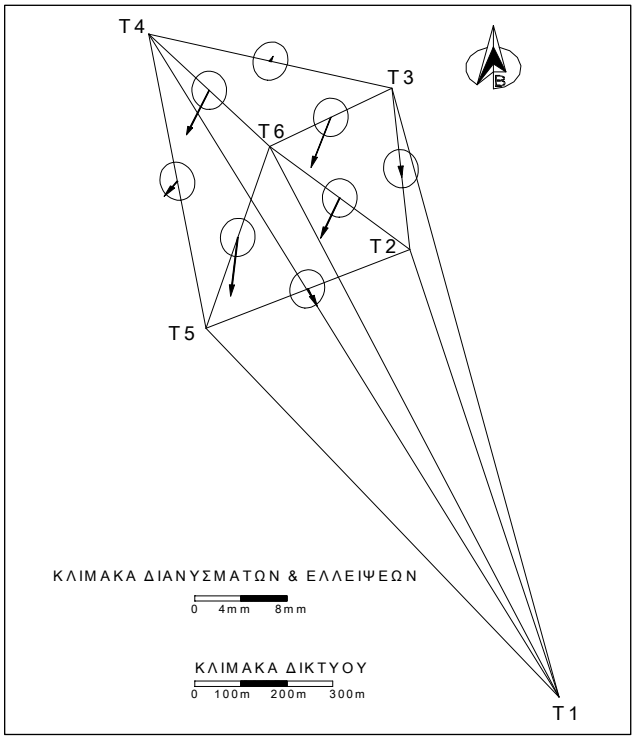
Διαπιστώθηκε ότι :

- Κανένα σημείο του δικτύου δεν εμφανίζει απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση για επίπεδο εμπιστοσύνη 95%.
- Τα σημεία Τ3, Τ4 και Τ5 εμφανίζουν οριζόντια μετακίνηση της τάξης των 5mm, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%..

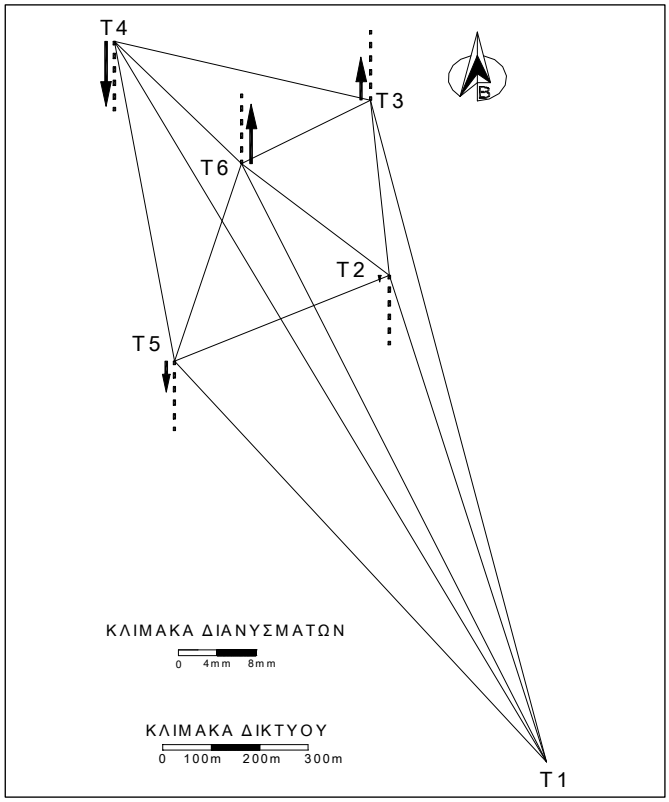
Στα σχήματα 3, 4, 5 και 6 παρουσιάζονται γραφικά, τα αντίστοιχα αποτελέσματα απόλυτης και σχετικής μετακίνησης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



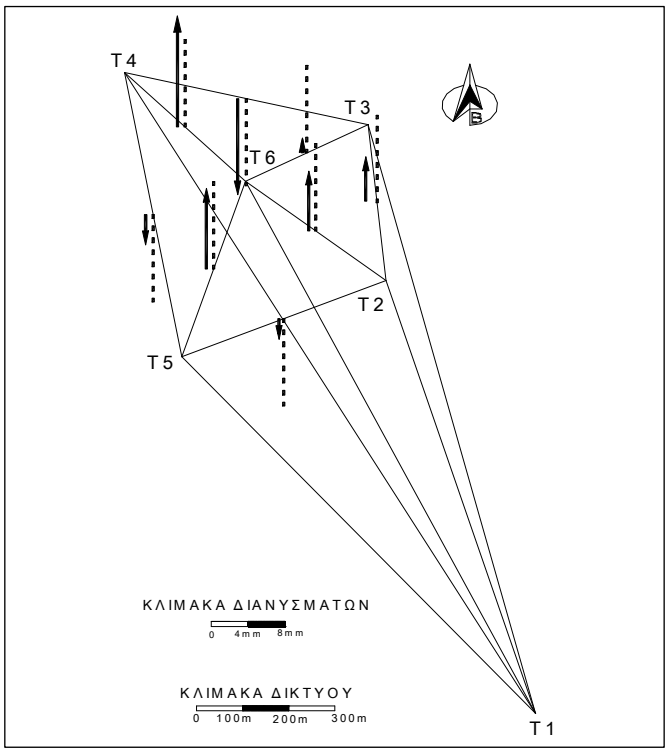
Σχήμα 3: Απόλυτες οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 4: Σχετικές οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 5: Απόλυτες κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 6: Σχετικές κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.

4. Επαναμέτρηση γεωδαιτικού δικτύου έλεγχου (ΙΙΙ^{η} φάση)

4.1 Γενικά

Η επαναμέτρηση του γεωδαιτικού δικτύου έγινε στις 4 και 6 Ιουνίου 2012 όταν το φράγμα βρισκόταν σε πληρότητά 100% (115 Ε.Κ.Μ), κάτι που αποτελεί αντικείμενο παρατήρησης. Η μελέτη των μετακινήσεων έχει σκοπό την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς τόσο του φράγματος όσο και της ευρύτερης περιοχής, με αποτέλεσμα την πρόληψη δυσμενών καταστάσεων και την έγκαιρη αντιμετώπιση σοβαρών αστοχιών που θα επιφέρουν κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Τα αποτελέσματα της διαχρονικής παρακολούθησης μπορούν να συσχετιστούν με θεωρητικά μοντέλα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την απόκριση της περιοχής.

4.2 Επιλογή δέκτη

Επιλέχτηκε ο δέκτης Leica Viva GNSS GS15 (εικόνα 15) για τις μετρήσεις του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου, γιατί υπήρχε η δυνατότητα να βρεθούν και να χρησιμοποιηθούν έξι δέκτες ταυτόχρονα για μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέθοδο των μετρήσεων του σχετικού στατικού εντοπισμού θέσης, εφόσον μας τους παρείχε το εργαστήριο της Γεωδαισίας του ΤΕΠΑΚ. Πρόκειται για ένα σύγχρονο γεωδαιτικό δέκτη διπλής συχνότητας (L1/L2), και κατανάλωσης ισχύος περίπου 8 Watt, όπου με τις εξωτερικές μπαταρίες και την κάρτα μνήμης, έχει τη δυνατότητα καταγραφής μετρήσεων διάρκειας άνω των 8 ωρών.

Ο δέκτης αυτός ενδείκνυται για εφαρμογές στην τοπογραφία, στα GIS και για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για στατικό, ταχέως στατικό και RTK εντοπισμό (L1/L2).

Οι ακρίβειες που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία για το δέκτη αυτό, για στατικό εντοπισμό, είναι :

- Οριζοντιογραφικά : ± 5 mm ± 0.5 ppm για βάσεις μήκους 50 Km

- Υψομετρικά : ± 10 mm ±1 ppm για βάσεις μήκους 50 Km

Εικόνα 14: Γεωδαιτικός δέκτης Leica Viva GNSS GS15

Ο δέκτης Leica GS15[16] έχουν επίσης τα πιο κάτω χαρακτηριστικά:

- Εντοπίζει τα δορυφορικά συστήματα GPS/GLONASS/GALILEO
- Δέχεται την καινούργια συχνότητα L5
- Εναλλάξιμες συσκευές επικοινωνίας για σταθμούς βάσης και RTK κινητούς δέκτες με αποσπώμενες removable SIM κάρτες (Built-in για τον GS15)
- Ενσωματωμένος web server για τη ρύθμιση της καταγραφής των Leica ή RINEX raw data
- Αποθήκευση σε CF, SD cards
- Πλήρως αναβαθμίσιμο σε SmartStation, SmartPole
- IP67 προστασία ενάντια στη σκόνη και την καταβύθιση έως 1m
- Κατασκευασμένοι για θερμοκρασίες από -40°C έως +65°C

[16] *[Πηγή:www.metrica.gr/topografikos-eksoplismos/diplosyxna-GPS/VIVA-GS10-GS15-GNSS]*

- Ενσωματωμένη intenna τεχνολογία για την αποφυγή καταστροφής, απώλειας ή παράλειψης της κεραίας (για τον GS15)]

Εκτός από τον δέκτη, χρησιμοποιήθηκε και ο παρακάτω εξοπλισμός :

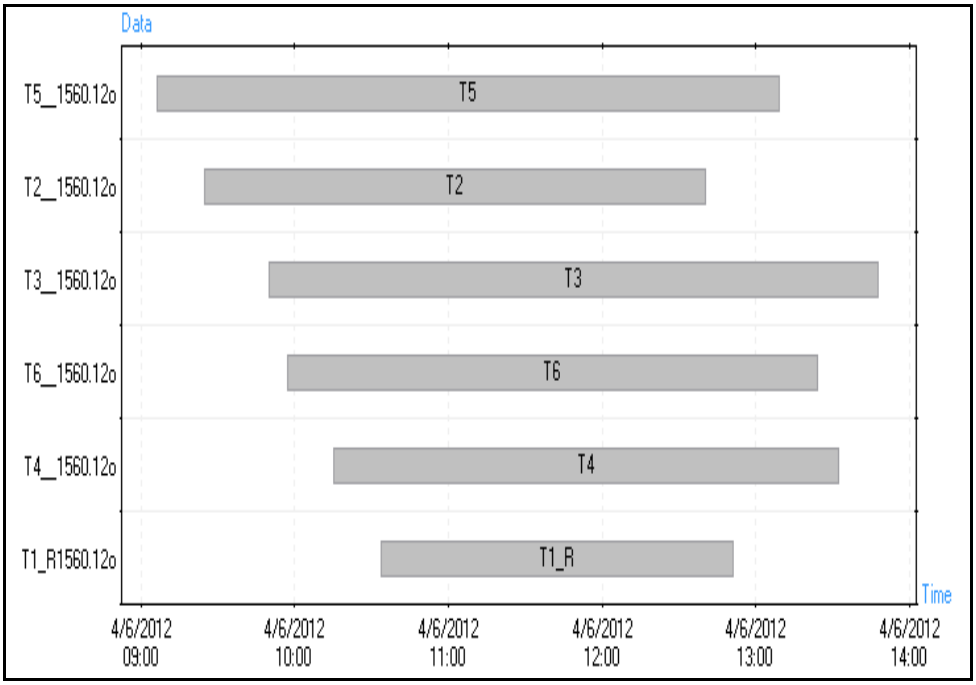
- 6 Χειριστήρια χειρός (εικόνα 16)
- 6 Τρικόχλια με τους ειδικούς στυλαιούς για την προσαρμογή της αντένας στο τρικόχλιο (antenna adapter)
- Μετροταινία
- Θήκη μεταφοράς
- 18 μπαταριές (αναγκαίες) + 6 έξτρα
- 6 SD cards
- Σύστημα επικοινωνίας VHF
- φωτογραφική μηχανή

Εικόνα 15: Γεωδαιτικός δέκτης Leica Viva GNSS GS15 προσαρμοσμένο στο ειδικό βάθρο τρισδιάστατου ελέγχου με το χειριστήριο χειρός

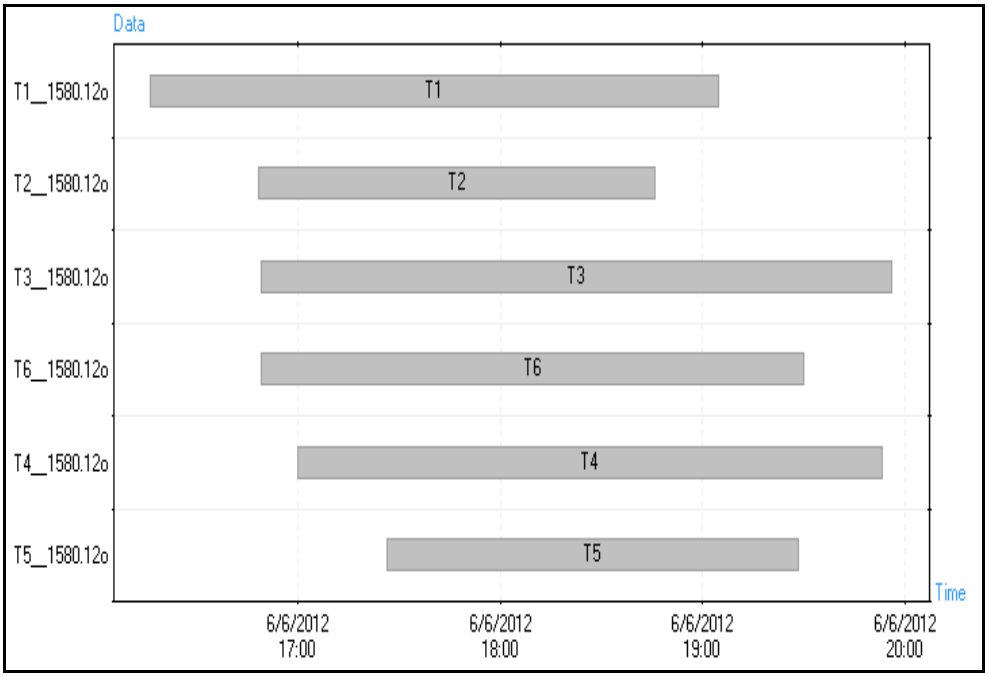
4.3 Μεθοδολογία μετρήσεων

Εφαρμόστηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού, όπου ενδείκνυται για μετρήσεις γεωδαιτικού τριδιάστατου δικτύου ελέγχου. Χρησιμοποιήθηκαν και οι 6 δέκτες που μετρούσαν ταυτόχρονα, ώστε να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ορθότητα

και συμβατότητα στις μετρήσεις και ταυτόχρονα μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι αντιμετωπίστηκαν καλύτερα τα σφάλματα που υπάρχουν στα σήματα των δορυφόρων, είτε από την ιονόσφαιρα, είτε από την τροπόσφαιρα κλπ. Με αυτό τον τρόπο προφανώς εξοικονομείται και αρκετός χρόνος αφού οι δέκτες μετρούσαν ταυτόχρονα. Συνολικά μετρήθηκαν 15 βάσεις και το βήμα καταγραφής ορίστηκε ανά 1sec. Δεν έγινε χρονικός προγραμματισμός των μετρήσεων επειδή όλα τα βάθρα είχαν ανοικτό ορίζοντα και δεν υπήρχαν παρεμβολές στην περιοχή. Ο ελάχιστος χρόνος ταυτόχρονης μέτρησης των βάσεων την πρώτη μέρα 4/6/2012 ήταν 2 ώρες και 15 λεπτά, ενώ για την δεύτερη μέρα 6/6/2012 ήταν 2 ώρες. Ο συνολικός χρόνος για την πρώτη μέρα ήταν 5 ώρες και αντίστοιχα 3.5ωρες για την δεύτερη μέρα. Οι χρόνοι που παρέμειναν οι γεωδαιτικοί δέκτες στις κορυφές του δικτύου κατά την πρώτη και δεύτερη μέρα των μετρήσεων φαίνονται αναλυτικά στα πιο κάτω διαγράμματα (σχήματα 7 και 8).



Σχήμα 7: Χρόνοι παραμονής των γεωδαιτικών δεκτών στις κορυφές του δικτύου την 1η μέρα



Σχήμα 8: Χρόνοι παραμονής των γεωδαιτικών δεκτών στις κορυφές του δικτύου την 2η μέρα

Αφού τοποθετήθηκε και οριζοντιώθηκε το κάθε σύστημα (τρικόχλιο - στυλαιός στήριξης – αντένα) σε κάθε βάθρο, ενεργοποιήθηκαν οι γεωδαιτικοί δέκτες και καταγράφηκαν σε ειδικό έντυπο (σχήμα 9) οι ακόλουθες πληροφορίες :

ΣΗΜΕΙΟ T3				Ημερομηνία:	
Υψος οργάνου	Τρόπος μέτρησης ΥΟ	Κωδικός δέκτη	Ώρα OPEN	Ώρα έναρξης καταγραφής	Ώρα λήξης καταγραφής
0,087	διμέτρο	Αρ. 5		GPS time 7:50 Prado 9:08	13:50
Η βάση που μετράται είναι			ΑΠΟ	-	ΠΡΟΣ

ΣΗΜΕΙΟ T6				Ημερομηνία:	
Υψος οργάνου	Τρόπος μέτρησης ΥΟ	Κωδικός δέκτη	Ώρα OPEN	Ώρα έναρξης καταγραφής	Ώρα λήξης καταγραφής
0,069	διμέτρο	Αρ. 6		GPS time: 9:58 Prado :9:56	13:24 Prado time
Η βάση που μετράται είναι			ΑΠΟ	-	ΠΡΟΣ

Σχήμα 9: Απόσπασμα από το έντυπο μετρήσεων για γεωδαιτικούς δέκτες

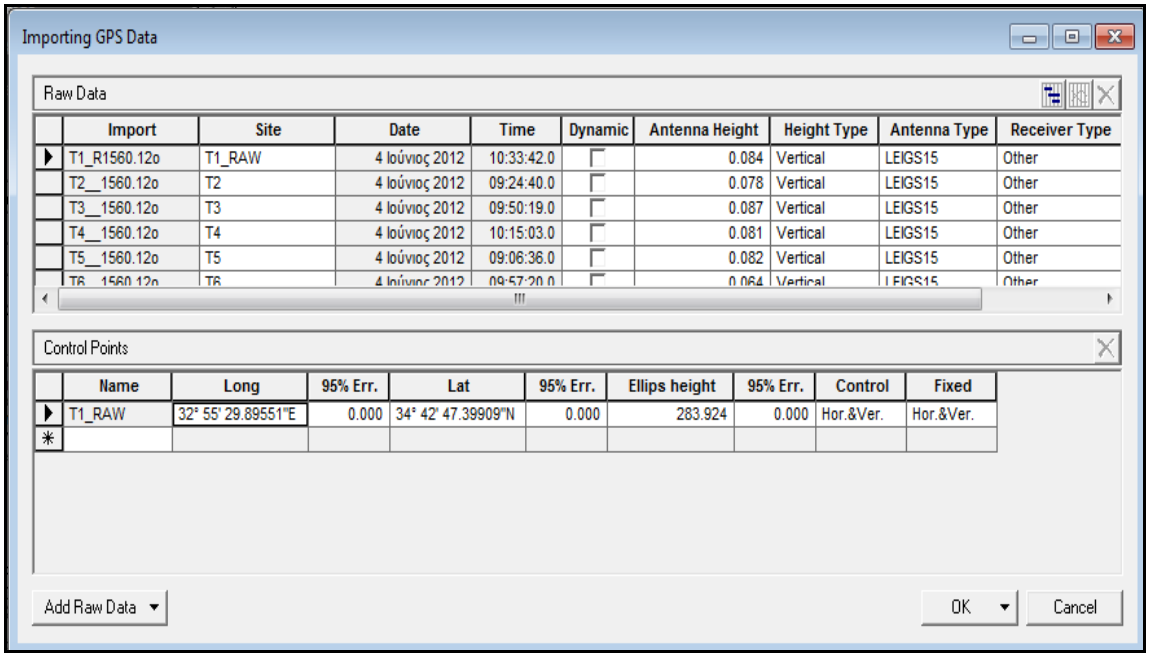
- ο κωδικός του σημείου
- η ημερομηνία
- το ύψος κεραίας του δέκτη, ο τρόπος μέτρησης του ύψους κεραίας καθώς και ένα μικρό σκαρίφημα. Για όλες τις βάσεις, η μέτρηση του ύψους κεραίας έγινε κατακόρυφα από την ειδική ορειχάλκινη βάση μέχρι το ειδικό σημείο (κέντρο του δέκτη) που είναι μεταξύ αντένας και στηλαίου (βλέπε εικόνα 16). Η απόσταση αυτή εισήχθηκε στο δέκτη με στόχο να λαμβάνεται υπόψη κατά τις μετρήσεις.
- ο κωδικός του αρχείου
- η ώρα έναρξης λειτουργίας του δέκτη
- η ώρα έναρξης καταγραφής
- η ώρα λήξης καταγραφής

Εικόνα 16: Μέτρηση του ύψους από την ειδική ορειχάλκινη βάση μέχρι το ειδικό σημείο

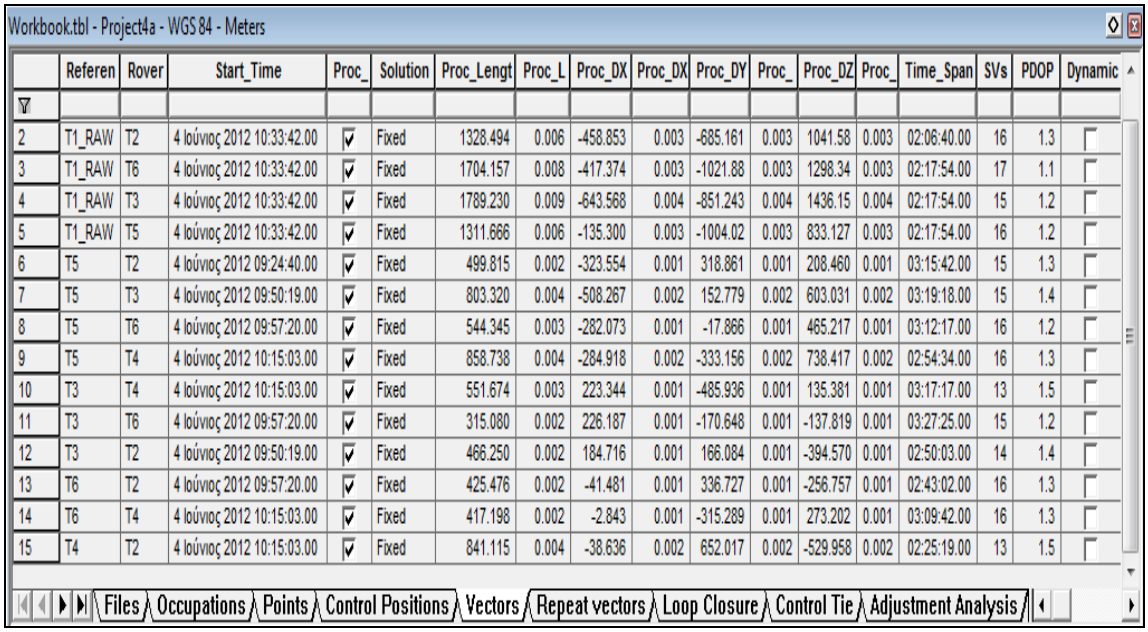
4.4 Επεξεργασία των παρατηρήσεων - Επιλύσεις βάσεων (baselines)

Η επίλυση των βάσεων, δηλαδή η επεξεργασία των μετρήσεων φάσης και κώδικα έτσι ώστε να προκύψουν τα τριδιάστατα διανύσματα των βάσεων, έγινε με το λογισμικό GNSS Solutions. Η διαδικασία που χρησιμοποιεί το λογισμικό για την επίλυση των βάσεων είναι :

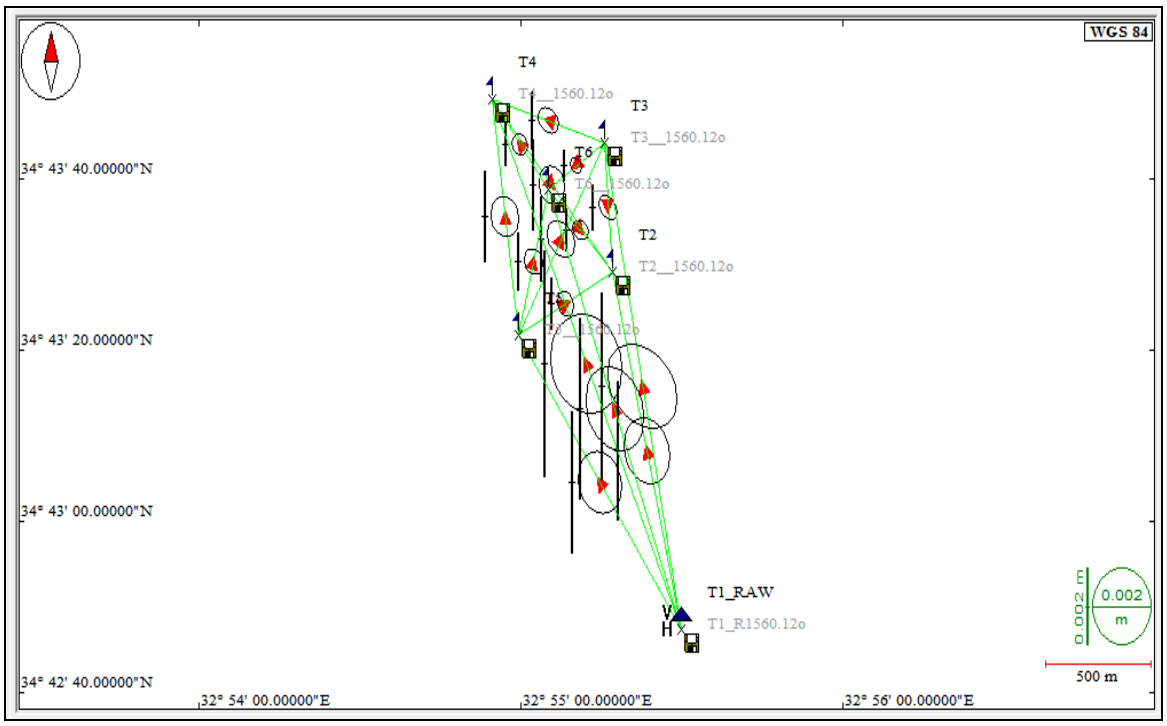
- Δημιουργείται ένα νέο φύλλο εργασίας (New Project) στο οποίο καθορίζονται οι παράμετροι εργασίας. Οι παράμετροι αυτοί είναι το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων, το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα, το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους κ.α.
- Γίνεται εισαγωγή των δεδομένων με τα αντίστοιχα data στο φύλλο εργασίας και αυτόματα εισάγονται τα ονόματα των κορυφών και τα ύψη κεραίας. Γίνεται έλεγχος για την ορθότητα των ονομάτων των κορυφών του δικτύου, των υψών κεραίας και για την χρονική επικάλυψη των μετρήσεων. Επίσης γίνεται επιλογή του σταθερού σημείου του δικτύου (σχήμα 10).
- Ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων (Process). Το λογισμικό GNSS Solutions σχηματίζει αυτόματα ένα σενάριο επεξεργασίας μετά την εισαγωγή των αρχείων "ακατέργαστων στοιχείων" στο πρόγραμμα (σχήμα 10). Οι λύσεις GNSS προσανατολίζουν κάθε βάση που περιγράφεται στο σενάριο κατά τέτοιο τρόπο ώστε το πρώτο σημείο που αναφέρεται να είναι πιθανότερο από άλλο να είναι το σημείο αναφοράς. Η διαδικασία αυτή περιγράφει τον τρόπο που μια βάση μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία για να παράγει ένα διάνυσμα. Το λογισμικό GNSS Solution σου δίνει και ένα χάρτη του δικτύου που προκύπτει από την επίλυση του δικτύου όπου εμφανίζονται και οι ελλείψεις των σφαλμάτων (σχήμα 11).



Σχήμα 10: Εισαγωγή των σημείων του δικτύου στο λογισμικό GNSS Solutions από Rinex αρχεία με σταθερό το σημειοT1



Σχήμα 11: Πίνακας που πρόεκυψε από το λογισμικό GNSS Solutions κατά την επίλυση του δικτύου



Σχήμα 12: Χάρτης του δικτύου που προέκυψε από το λογισμικό GNSS Solution αφού έγινε η επίλυση του δικτυού όπου εμφανίζονται και οι ελλείψεις των σφαλμάτων

- Από τη διαδικασία της επεξεργασίας των "ακατέργαστων αρχείων" (Process) εξάγονται το μήκος του διανύσματος της κάθε βάσης, οι συνιστώσες του (ΔX, ΔY, ΔZ), το PDOP [17] και ο τύπος της λύσης (Float ή Fixed)(σχήμα 11).
- Ο τύπος λύσης είναι μια ένδειξη της επιτυχίας του καθορισμού των ασαφειών των ακέραιων αριθμών για κάθε δορυφόρο στον υπολογισμό ενός διανύσματος. Εάν οι περισσότερες από τις ασάφειες των ακέραιων αριθμών καθορίστηκαν, η διανυσματική λύση θεωρείται Fixed λύση. Ένα διάνυσμα με τύπο λύσης Float δείχνει ότι δεν καθορίστηκαν όλες οι ασάφειες των ακέραιων αριθμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα διάνυσμα με τύπο

[17] *Το PDOP (Ανάλυση της εσωτερικής ακρίβειας) είναι μια περιγραφή της επίδρασης της δορυφορικής γεωμετρίας στους υπολογισμούς θέσης. Δίνεται από την έκφραση* $DOP=sqrt(trace(A^T \cdot A)^{-1})$*, όπου Α είναι ο πίνακας σχεδιασμού για τη στιγμιαία λύση (που εξαρτάται από τη γεωμετρία δορυφόρου - δέκτη).*
Το PDOP αναφέρεται στις τρεις συντεταγμένες και είναι αντιπροσωπευτικό της δορυφορικής διανομής του σήματος του GPS στο διάστημα που φαίνεται από την κεραία. Όσο χαμηλότερο είναι, τόσο καλύτερη η δορυφορική διανομή στο διάστημα και επομένως τόσο υψηλότερη η ποιότητα των σημείων, ανεξάρτητα από τον τρόπο υπολογισμού που χρησιμοποιείται. [Παραδείσης Δ., 2000]

λύσης Float θα είναι "φτωχό" σε ποιότητα και η μέτρηση πρέπει να επαναληφθεί.

Για τον προσδιορισμό της μεταβολής της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της ΙΙ φάσης των μετρήσεων, που έγιναν το Δεκέμβριο του 2006 και τα αποτελέσματα της ΙΙΙ φάσης των μετρήσεων που έγιναν τον Ιούνιο του 2012. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πρώτης και δεύτερης μέρας του Ιουνίου 2012 δεν είχαν καμιά διαφορά μεταξύ τους. Οι βάσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τις επιλύσεις θα είναι 13 δηλαδή όσες ήταν και το Δεκέμβριο του 2006, ώστε να υπάρχει συμβατότητα .

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Δεκεμβρίου 2006 με τη χρήση του λογισμικού GNSS Solutions παρατίθενται στον πίνακα 5, ενώ στον πίνακα 6, παρατίθεται τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις μετρήσεις τον Ιούνιο του 2012.

Βάση	Κεκλιμένο μήκος (m)	95% Error (mm)	Συνιστώσες (m)		95% Error (mm)	PDOP
T1 - T3	1789.23	±9	ΔX	-643.494	±4	1.6
			ΔY	-851.201	±4	
			ΔZ	1436.216	±4	
T1 - T5	1311.666	±6	ΔX	-135.231	±3	1.4
			ΔY	-1003.985	±3	
			ΔZ	833.183	±3	
T1 - T2	1328.502	±6	ΔX	-458.805	±3	1.4
			ΔY	-685.134	±3	
			ΔZ	1041.637	±1	
T1 - T4	2105.809	±10	ΔX	-420.146	±4	1.8
			ΔY	-1337.146	±4	
			ΔZ	1571.608	±4	
T1 - T6	1704.181	±8	ΔX	-417.293	±3	1.3
			ΔY	-1021.837	±3	
			ΔZ	1298.441	±3	
T3 - T4	551.685	±3	ΔX	223.349	± 1	2.3
			ΔY	-485.942	±1	
			ΔZ	135.395	± 1	
T2 - T3	466.248	±2	ΔX	-184.685	±1	2.6
			ΔY	-166.061	±1	
			ΔZ	394.591	±1	
T5 - T2	499.817	±3	ΔX	-323.576	±1	1.5
			ΔY	318.848	±1	
			ΔZ	208.451	±1	
T6 - T3	315.069	±2	ΔX	-226.207	±1	1.9
			ΔY	170.637	±1	
			ΔZ	137.774	±1	
T6 - T4	417.188	±2	ΔX	-2.859	±1	2.2
			ΔY	-315.305	±1	
			ΔZ	273.167	±1	
T5 - T6	544.37	±3	ΔX	-282.056	±1	1.4
			ΔY	-17.854	±1	
			ΔZ	465.258	±1	
T2 - T6	425.493	±2	ΔX	41.508	±1	3
			ΔY	-336.707	±1	
			ΔZ	256.807	±1	
T5 - T4	858.748	±4	ΔX	-284.912	±2	1.9
			ΔY	-333.162	±2	
			ΔZ	738.429	±2	

Πίνακας 3:Αποτελέσματα από την επίλυση βάσεων του Δεκεμβρίου με το λογισμικό GNSS Solutions[Κ. Τέμενος , 2007]

Βάση	Κεκλιμένο μήκος (m)	95% Error (mm)	Συνιστώσες (m)		95% Error (mm)	PDOP
T1 - T3	1789.238	±9	ΔX	-643.515	±4	1.2
			ΔY	-851.209	±4	
			ΔZ	1436.212	±4	
T1 - T5	1311.664	±6	ΔX	-135.255	±3	1.5
			ΔY	-1003.988	±3	
			ΔZ	833.172	±3	
T1 - T2	1328.495	±6	ΔX	-458.798	±3	1.2
			ΔY	-685.127	±3	
			ΔZ	1041.635	±3	
T1 - T4	2105.806	±10	ΔX	-420.167	±4	1.3
			ΔY	-1337.142	±4	
			ΔZ	1571.601	±4	
T1 - T6	1704.161	±8	ΔX	-417.334	±3	1.2
			ΔY	-1021.856	±3	
			ΔZ	1298.386	±3	
T3 - T4	551.676	±3	ΔX	223.348	±1	1.3
			ΔY	-485.934	±1	
			ΔZ	135.388	±1	
T3 - T2	466.251	±2	ΔX	184.715	±1	1.3
			ΔY	166.082	±1	
			ΔZ	-394.572	±1	
T2 - T5	499.816	±2	ΔX	323.558	±1	1.6
			ΔY	-318.86	±1	
			ΔZ	-208.457	±1	
T6 - T3	315.08	±2	ΔX	-226.185	±1	1.2
			ΔY	170.648	±1	
			ΔZ	137.824	±1	
T6 - T4	417.203	±2	ΔX	-2.838	±1	1.3
			ΔY	-315.285	±1	
			ΔZ	273.213	±1	
T6 - T5	544.342	±3	ΔX	282.086	±1	1.2
			ΔY	17.87	±1	
			ΔZ	-465.206	±1	
T6 - T2	425.475	±2	ΔX	-41.475	±1	1.2
			ΔY	336.73	±1	
			ΔZ	-256.752	±1	
T5 - T4	858.742	±4	ΔX	-284.923	±2	1.4
			ΔY	-333.155	±2	
			ΔZ	738.421	±2	

Πίνακας 4: Αποτελέσματα από την επίλυση βάσεων (Ιούνιος 2012 με το με το λογισμικό GNSS Solutions

5. Συγκρίσεις - Υπολογισμός μετακινήσεων

5.1 Επιλύσεις τριδιάστατων δικτύων

Η επίλυση των βάσεων και ο προσδιορισμός των ΔΧ, ΔΥ και ΔΖ στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού GNSS Solutions, όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η επίλυση του τριδιάστατου δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας γραμμικές εξισώσεις της μορφής $\Delta X_{i,j} = X_j - X_i$, $\Delta Y_{i,j} = Y_j - Y_i$ και $\Delta Z_{i,j} = Z_j - Z_i$. Το τριδιάστατο δίκτυο στο φράγμα του Κούρη αποτελείται από 6 σημεία ελέγχου και επιλύεται θεωρώντας την κορυφή **T_1 ως σταθερή** με αυθαίρετες συντεταγμένες στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς **X_{T1} = 4405794.718m, Y_{T1} = 2852961.908m και Z_{T1} = 3611921.352m** και τις παρατηρήσεις ισοβαρείς.

Η συνόρθωση του γεωδαιτικού τριδιάστατου δικτύου γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ΜΕΤ (μέθοδος εμμέσων παρατηρήσεων, με τις ελάχιστες δεσμεύσεις), χρησιμοποιώντας υπολογιστικά φύλλα του λογισμικού Excel. Η πλήρης επίλυση παρατίθεται στο Παράρτημα.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα βήματα της επίλυσης αναλυτικά :

- Από τις μετρήσεις του δικτύου πρόεκυψαν τα ακόλουθα στοιχεία :

  - ✓ ο **αριθμός των αγνώστων m** (5 κορυφές x 3 άγνωστοι) , όπου m = 15 και είναι οι καλλίτερες τιμές των συντεταγμένων X,Y,Z των αγνώστων κορυφών.
  - ✓ ο **αριθμός των γραμμικών εξισώσεων n** της μορφής $\Delta X_{i,j} = X_j - X_i$, $\Delta Y_{i,j} = Y_j - Y_i$ και $\Delta Z_{i,j} = Z_j - Z_i$, όπου n=39 (μια τριάδα για κάθε μετρούμενη βάση, δηλαδή 3x13).
  - ✓ **ο βαθμός ελευθερίας** r=n-m=39-15=24

- Δημιουργείται το σύστημα των κανονικών εξισώσεων

$$(A^T \cdot A) \cdot x = A^T \cdot \delta l \qquad (5.1)$$

  - ✓ A είναι ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων, διαστάσεων nxm
  - ✓ δl είναι ο πίνακας στήλη των σταθερών όρων, διαστάσεων nx1
  - ✓ x είναι ο πίνακας στήλη των αγνώστων, διαστάσεων nx1

- Επιλύεται το σύστημα των κανονικών εξισώσεων και υπολογίζονται οι διορθώσεις των συντεταγμένων X,Y,Z των αγνώστων κορυφών.

$$\hat{x} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot \delta l = N^{-1} \cdot \delta l \qquad (5.2)$$

- Ακολούθως γίνεται ο προσδιορισμός του a-posteriori τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους από τη σχέση

$$\hat{\sigma}_o = \pm\sqrt{\frac{[uu]}{n - m}} \qquad (5.3)$$

όπου $u=\delta l - A.x$ (5.4)

- Υπολογίζεται ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας mxm των αγνώστων, δηλαδή οι αβεβαιότητες των προσδιορισμένων καλλίτερων τιμών των αγνώστων συντεταγμένων των κορυφών από τη σχέση

$$V_x = \sigma_o^2 \cdot N^{-1} \qquad (5.5)$$

Από αυτά τα στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι συνορθωμένες τιμές των συντεταγμένων των σημείων και θα γίνει έλεγχος μετακίνησης μεταξύ των δύο φάσεων.

Μετά την επίλυση του δικτύου και για τις δύο φάσεις μέτρησης, προκύπτουν οι συνορθωμένες συντεταγμένες της κάθε κορυφής που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

ΦΑΣΗ ΙΙ (ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2006)			ΦΑΣΗ ΙΙΙ (ΙΟΥΝΙΟΣ 2012)		
ΣΗΜΕΙΟ	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (m)**		**ΣΗΜΕΙΟ**	**ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (m)**	
T_2	X	4405335.913	T_2	X	4405335.915
	Y	2852276.773		Y	2852276.781
	Z	3612962.985		Z	3612962.987
T_3	X	4405151.224	T_3	X	4405151.201
	Y	2852110.708		Y	2852110.699
	Z	3613357.57		Z	3613357.562
T_4	X	4405374.572	T_4	X	4405374.549
	Y	2851624.763		Y	2851624.766
	Z	3613492.962		Z	3613492.951
T_5	X	4405659.486	T_5	X	4405659.47
	Y	2851957.924		Y	2851957.921
	Z	3612754.534		Z	3612754.529
T_6	X	4405377.427	T_6	X	4405377.386
	Y	2851940.069		Y	2851940.051
	Z	3613219.794		Z	3613219.738

Πίνακας 5: Οι συνορθωμένες συντεταγμένες του δικτύου τριδιάστατου ελέγχου

Από την επίλυση του δικτύου στις δύο φάσεις υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες X, Y, Z και οι αβεβαιότητές τους, οι οποίες στη δεύτερη φάση ήταν $\sigma_X^{II} = \sigma_Y^{II} = \sigma_Z^{II} \approx \pm 1.9\text{mm}$, ενώ στην τρίτη φάση ήταν ίσες με $\pm 1.7\text{mm}$.

Κατόπιν υπολογίζονται οι μεταβολές των συντεταγμένων μεταξύ των φάσεων μέτρησης $\Delta X_i^{II,III}(\Delta X=X^{2012}-X^{2006})$, $\Delta Y_i^{II,III}(\Delta Y=Y^{2012}-Y^{2006})$ και $\Delta Z_i^{II,III}(\Delta Z=Z^{2012}-Z^{2006})$. Οι μεταβολές παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

ΣΗΜΕΙΟ	**ΜΕΤΑΒΟΛΗ III-II (mm)**	
T_2	ΔX	2
	ΔY	8
	ΔZ	2
T_3	ΔX	-22
	ΔY	-8
	ΔZ	-8
T_4	ΔX	-23
	ΔY	2
	ΔZ	-11
T_5	ΔX	-16
	ΔY	-3
	ΔZ	-6
T_6	ΔX	-41
	ΔY	-18
	ΔZ	-56

Πίνακας 6: Μεταβολή των συντεταγμένων μεταξύ των δύο φάσεων μέτρησης

5.2 Υπολογισμός απολύτων μετακινήσεων

Ακολουθεί η μετατροπή των διανυσμάτων των μεταβολών σε ένα τοποκεντρικό σύστημα συντεταγμένων ώστε να γίνουν πιο κατανοητές οι μετακινήσεις. Για την στροφή χρησιμοποιείται ο πίνακας στροφής (πίνακας 9). Στον πίνακα στροφής τα (φ_i ,λ_i) που χρησιμοποιούνται είναι οι συντεταγμένες κάθε κορυφης i του δικτύου και προκύπτουν από τη μετατροπή των αντιστοίχων καρτεσιανών X, Y, Z σε γεωδαιτικές (φ,λ).

$$A = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_i \cdot \cos\lambda_i & -\sin\varphi_i \cdot \sin\lambda_i & \cos\varphi_i \\ -\sin\lambda_i & \cos\lambda_i & 0 \\ \cos\varphi_i \cdot \cos\lambda_i & \cos\varphi_i \cdot \sin\lambda_i & \sin\varphi_i \end{pmatrix}$$

Πίνακας 7: Πίνακας στροφής

Η μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου σε ελλειψοειδείς γεωδαιτικές (φ,λ) ώστε να χρησιμοποιηθούν στο πίνακα στροφής γίνεται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις :

$$\lambda_i = \alpha\text{rctan}\left(\frac{Y_i}{X_i}\right) \tag{5.6}$$

$$\phi_i = \alpha\text{rctan}\left(\frac{Z_i + e^2 \cdot N \cdot \sin\phi}{\sqrt{X_i^{\,2} + Y_i^{\,2}}}\right) \tag{5.7}$$

όπου :

- $N = \dfrac{\alpha}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi i}}$ (5.8)

- e η κύρια (πρώτη) εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς αναφοράς, το οποίο είναι το WGS ’84 και έχει τιμή $e^2 = 0.006694380$

- α ο μεγάλος ημιάξονας και έχει τιμή α = 6378137 m

Οι ελλειψοειδείς συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου στο WGS ’84, παρουσιάζονται στον πίνακα 10 και για ευκολία υπολογισμών, εξήχθησαν από το λογισμικό GNSS Solutions.

Κορυφή	**φ**	**λ**
T2	32° 55' 17.12520"	34° 43' 29.24717"
T3	32° 55' 15.59146"	34° 43' 44.30517"
T4	32° 54' 54.78768"	34° 43' 49.33167"
T5	32° 54' 59.69454"	34° 43' 21.87002"
T6	32° 55' 5.129810"	34° 43' 38.83399"

Πίνακας 8: Ελλειψοειδείς συντεταγμένες στο WGS’ 84

Τα νέα διανύσματα των μετακινήσεων των σημείων ελέγχου στο τοπικό σύστημα υπολογίστηκαν από τη σχέση :

$$\begin{pmatrix} \Delta N_i \\ \Delta E_i \\ \Delta Up_i \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{pmatrix} \tag{5.9}$$

όπου :

- A ο πίνακας στροφής (πίνακας 9)
- ΔX_i, ΔY_i, ΔZ_i οι συντεταγμένες των διανυσμάτων μετακίνησης (πίνακας 8)

Τα αποτελέσματα της στροφής παρουσιάζονται στον πίνακα 11 :

Κορυφή	**ΔN (mm)**	**ΔE(mm)**	**ΔUp(mm)**
T_2	-1.8	5.6	6.6
T_3	6.0	5.9	-23.8
T_4	-0.1	14.9	-20.8
T_5	3.3	6.2	-15.5
T_6	-23.2	8.7	-67.5

Πίνακας 9: Μεταβολές στις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου στο τοπικό σύστημα

Για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων $\sigma\Delta X_i^{II,III}$, $\sigma\Delta Y_i^{II,III}$ και $\sigma\Delta Z_i^{II,III}$ των μετακινήσεων $\Delta X_i^{II,III}$, $\Delta Y_i^{II,III}$ και $\Delta Z_i^{II,III}$ ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Υπολογίζεται ο πίνακας μεταβλητότητας- συμμεταβλητότητας της μεταβολής ως από το άθροισμα των πινάκων μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας II και III φάσης $\mathbf{V_{\delta x=}\ V_x^{II} + V_x^{III}}$

- Γίνεται στροφή του διανύσματος των σφαλμάτων στο τοπικό σύστημα αναφοράς χρησιμοποιώντας τον ίδιο πίνακα στροφής A ώστε τα σφάλματα να αναφέρονται στο ίδιο σύστημα.

$$\begin{pmatrix} \sigma^2\Delta Ni & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2\Delta Ei & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2\Delta Upi \end{pmatrix} = J \cdot \begin{pmatrix} \sigma\Delta Xi & 0 & 0 \\ 0 & \sigma\Delta Yi & 0 \\ 0 & 0 & \sigma\Delta Zi \end{pmatrix} \cdot J^T \qquad (5.10)$$

όπου :

- J ο Ιακωβιανός πίνακας που πρέπει να είναι οι παράγωγοι ως προς τις 3 μεταβλητές X,Y,Z και επειδή ο J δεν περιλαμβάνει τις 3 μεταβλητές ουσιαστικά έχουμε J΄= J = A

Τα αποτελέσματα της στροφής του διανύσματος των σφαλμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 12.

Κορυφή	**$\sigma_{\Delta N}$ (mm)**	**$\sigma_{\Delta E}$ (mm)**	**$\sigma_{\Delta Up}$ (mm)**
T_2	±2.6	±2.6	±2.6
T_3	±2.6	±2.6	±2.6
T_4	±2.6	±2.6	±2.6
T_5	±2.6	±2.6	±2.6
T_6	±2.6	±2.6	±2.6

Πίνακας 10: Σφάλματα των μεταβολών της απόλυτης θέσης των σημείων ελέγχου, στο τοπικό σύστημα

Οι απόλυτες ελλείψεις σφάλματος εκφυλίζονται σε κύκλο διότι δεν υπάρχουν συμμεταβλητότητες.

- **Κατά την οριζόντια έννοια**

Υπολογίζεται η τιμή του διανύσματος μεταβολής, δr

$$\delta r = \sqrt{\Delta N_i^2 + \Delta E_i^2} \tag{5.11}$$

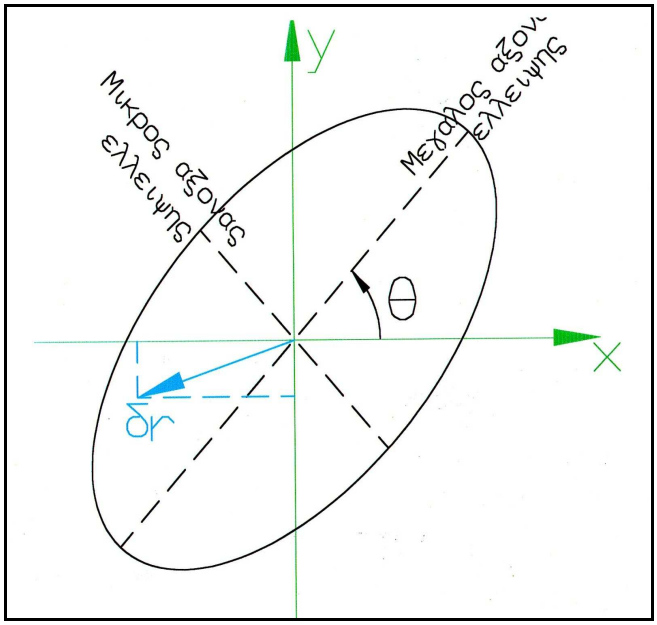
Υπολογισμός των στοιχείων της έλλειψης σφάλματος (σχήμα 13) απόλυτης μεταβολής θέσης:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sigma^2_{\Delta E_i} + \sigma^2_{\Delta N_i} + \sqrt{(\sigma^2_{\Delta E_i} - \sigma^2_{\Delta N_i})^2 + 4\cdot\sigma^2_{\Delta E_i N_i}}}{2}} = \sqrt{\frac{\sigma^2_{\Delta E_i} + \sigma^2_{\Delta N_i} + \sigma^2_{\Delta E_i} - \sigma^2_{\Delta N_i}}{2}} = \sigma_{\Delta E_i} \tag{5.12}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sigma^2_{\Delta E_i} + \sigma^2_{\Delta N_i} - \sqrt{(\sigma^2_{\Delta E_i} - \sigma^2_{\Delta N_i})^2 + 4\cdot\sigma^2_{\Delta E_i N_i}}}{2}} = \sqrt{\frac{\sigma^2_{\Delta E_i} + \sigma^2_{\Delta N_i} - \sigma^2_{\Delta E_i} + \sigma^2_{\Delta N_i}}{2}} = \sigma_{\Delta N_i} \qquad (5.13)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\,\sigma_{\Delta E_i N_i}}{\sigma^2_{\Delta E_i} - \sigma^2_{\Delta N_i}} = 0 \qquad (5.14)$$

Σημειώνεται ότι η γωνία **θ** μετράται αριστερόστροφα από τον άξονα x



Σχήμα 13: Στοιχεία της έλλειψης σφάλματος

Σημειώνεται ότι η γωνία **θ** μετράται αριστερόστροφα από τον άξονα x

<u>Μονοδιάστατος έλεγχος</u>

Για κάθε κορυφή συγκρίνεται η τιμή του διανύσματος μεταβολής δr με τον μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης σφάλματος της μεταβολής της θέσης της κορυφής, πολλαπλασιασμένο με z και εξετάζεται αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από το ($\sigma_u \cdot z$).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 12, από τον οποίο προκύπτει ότι όλα τα σημεία του δικτύου, εκτός του σημείου Τ2, εμφανίζουν μετακίνηση κατά τη οριζόντια έννοια.

Δυδιάστατος έλεγχος

Σχεδιάζεται η έλλειψη σφάλματος της μεταβολής της θέσης της κορυφής με άξονες πολλαπλασιασμένους με λ ($\sigma_u \cdot \lambda$, $\sigma_v \cdot \lambda$) και το διάνυσμα δr της μεταβολής στην ίδια κλίμακα και εξετάζεται αν το πέρας του είναι μέσα ή έξω από την έλλειψη. Στο σχήμα 14, παρουσιάζονται οι απόλυτες ελλείψεις σφάλματος της μετακίνησης για όλα τα σημεία του δικτύου.

- **Κατά την κατακόρυφη έννοια**

Για κάθε κορυφή συγκρίνεται η μεταβολή ΔUp_i με το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα ($\sigma_{\Delta Upi}$) πολλαπλασιασμένο με z και εξετάζεται αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από το ($\sigma_{\Delta Upi} \cdot z$).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 11, ενώ στο σχήμα 15, παρουσιάζονται γραφικά τα διανύσματα κατακόρυφης μετακίνησης των σημείων του δικτύου.

Κορυφή	**ΔUp (mm)**	**$\sigma_{\Delta Up} \cdot z_{95}$ (mm)**	**ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ**
T_2	6.6	± 5	**ΝΑΙ**
T_3	-23.8	± 5	**ΝΑΙ**
T_4	-20.8	± 5	**ΝΑΙ**
T_5	-15.5	± 5	**ΝΑΙ**
T_6	-67.5	± 5	**ΝΑΙ**

Πίνακας 11: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για μονοδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Κορυφή	$\delta r = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2}$ (mm)	σ_u (mm)	$\sigma_u \cdot \lambda_{95}$ (mm)	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
T_2	5.9	2.6	6.2	**ΟΧΙ**
T_3	8.4	2.6	6.2	**ΝΑΙ**
T_4	14.9	2.6	6.2	**ΝΑΙ**
T_5	7.0	2.6	6.2	**ΝΑΙ**
T_6	24.8	2.6	6.2	**ΝΑΙ**

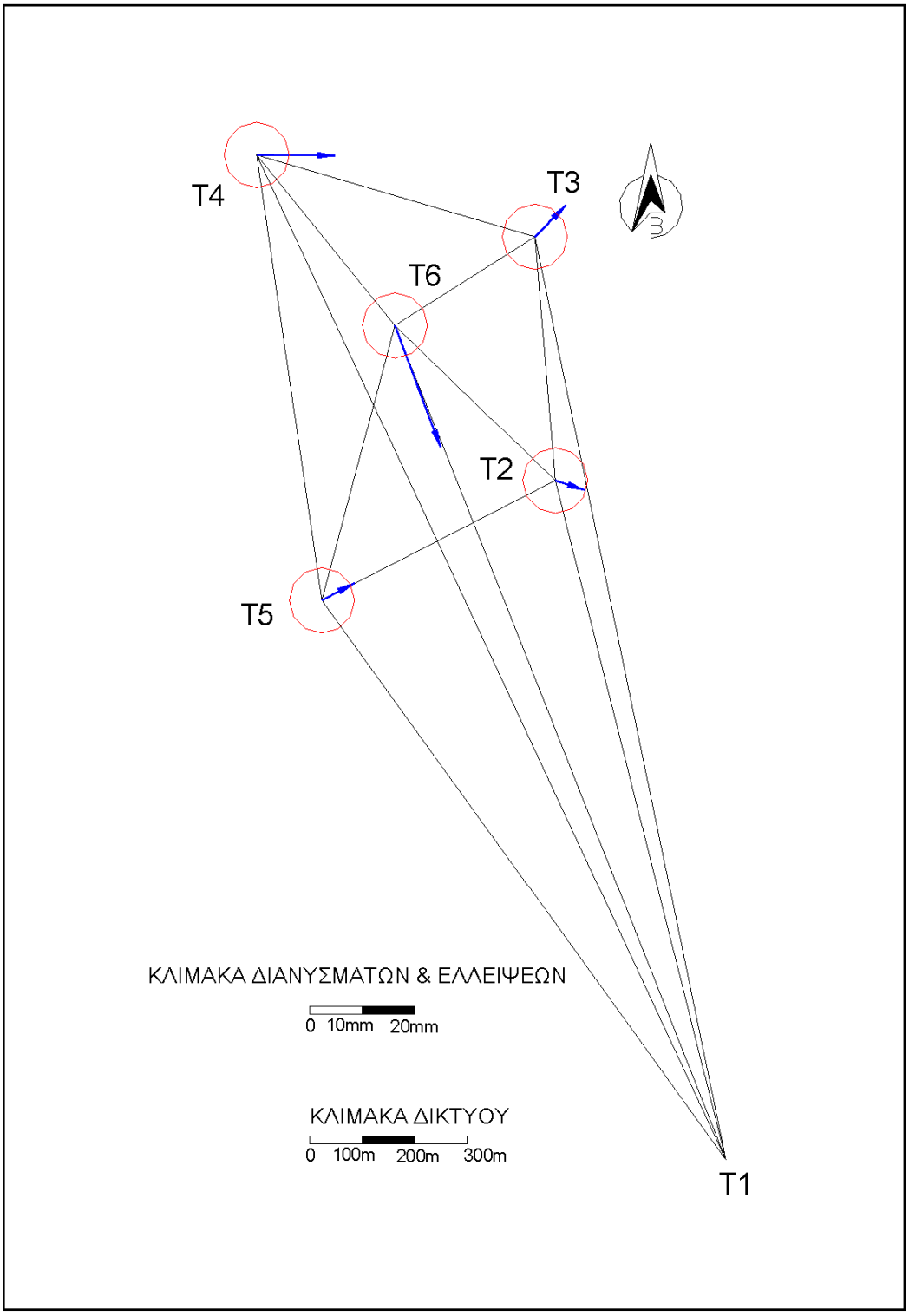
Πίνακας 12: Σύγκριση σε απόλυτες θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για δισδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Τα αποτελέσματα της απόλυτης οριζόντιας μετακίνησης φαίνονται τόσο στο πίνακα 12 όσο και στο σχήμα 14, όπου παρατηρούμε ότι όλα τα σημεία έχουν μετακίνηση εκτός από το σημείο Τ2 που δεν παρουσιάζει μετακίνηση. Αναλυτικότερα:

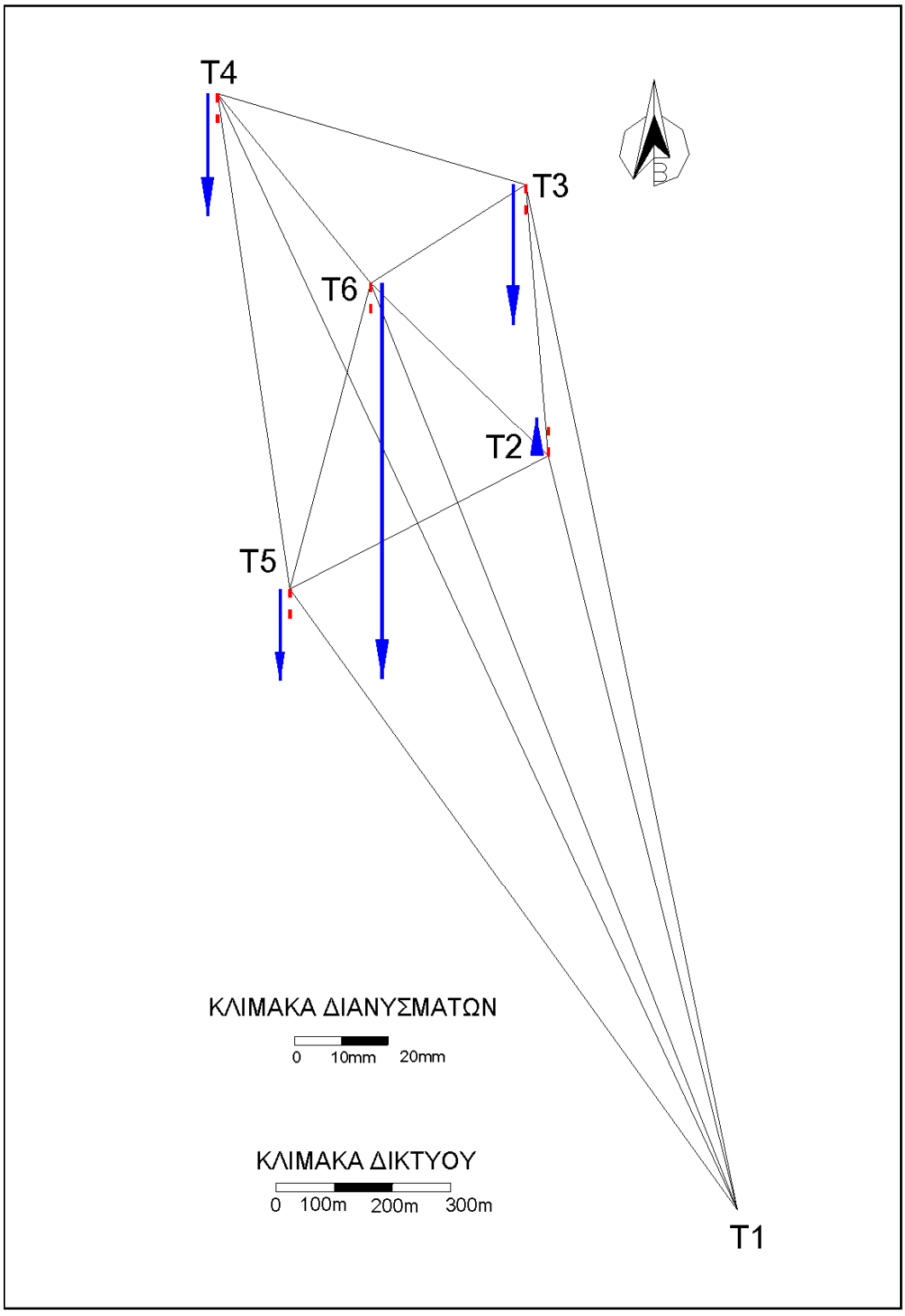
- τα σημεία Τ5 και Τ3 παρουσιάζουν την πιο μικρή μετακίνηση της τάξεως των **7mm και 8.4mm** αντίστοιχα **(διεύθυνση βορειοανατολική).**
- το σημείο Τ4 παρουσιάζει μια μετακίνηση της τάξεως των **14.9mm (διεύθυνση ανατολική)** και
- το σημείο Τ6 παρουσιάζει την πιο μεγάλη μετακίνηση της τάξεως των **24.8mm (διεύθυνση νοτιοανατολική).**

Όσον αφορά στην απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση παρατηρούμε από τον πίνακα 11 και το σχήμα 15, ότι όλα τα σημεία του δικτύου παρουσιάζουν μετακίνηση. Συγκεκριμένα:

- το σημείο Τ2 παρουσιάζει μια οριακή μετακίνηση **προς τα πάνω** της τάξεως των **6.6mm**.
- Τα σημεία Τ5, Τ4 και Τ3 παρουσιάζουν μια μετακίνηση **προς τα κάτω 15.5mm**, **20.8mm** και **23.8mm** αντίστοιχα.
- Τέλος το σημείο που παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση **προς τα κάτω** είναι το Τ6 και είναι **67.5mm**.



Σχήμα 14: Σύγκριση σε απόλυτες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για δισδιάστατο έλεγχο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%



Σχήμα 15: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

5.3 Υπολογισμός σχετικών μετακινήσεων

Με τον όρο σχετική μετακίνηση του σημείου i ως προς το σημείο j, ορίζεται η σχετική μεταβολή της θέσης του σημείου i ως προς το σημείο j μέσα στο χρονικό διάστημα των δυο φάσεων μέτρησης. Ο έλεγχος των σχετικών μετακινήσεων αναπτύσσεται σε δυο στάδια, κατά την οριζόντια έννοια και κατά την κατακόρυφη έννοια.

Κατά την οριζόντια έννοια, από τη σχέση 5.15 προκύπτει το διάνυσμα μεταβολής της σχετικής θέσης των σημείων ελέγχου του τριδιάστατου δικτύου και από τη σχέση 5.16 το μέτρο του.

$$\delta\Delta \mathrm{r}_{ij} = \begin{pmatrix} \delta\Delta \mathrm{E} \\ \delta\Delta N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (E_j - \mathrm{E_i})_{t2} - (E_j - \mathrm{E_i})_{t1} \\ (N_j - \mathrm{N_i})_{t2} - (N_j - \mathrm{N_i})_{t1} \end{pmatrix} \tag{5.15}$$

$$\delta\Delta \mathrm{r} = \sqrt{\left((\mathrm{E_j} - \mathrm{E_i})_{t2} - (\mathrm{E_j} - \mathrm{E_i})_{t1}\right)^2 + \left((\mathrm{N_j} - \mathrm{N_i})_{t2} - (\mathrm{N_j} - \mathrm{N_i})_{t1}\right)^2} \tag{5.16}$$

Για το κάθε διάνυσμα υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσής του και ακολουθεί διερεύνηση. Εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στη σχέση 5.15 – δεν υπάρχουν συμμεταβλητότητες - προκύπτει ότι $\sigma_{\Delta E}=2\cdot\sigma_E$ και $\sigma_{\Delta N}=2\cdot\sigma_N$.

Οι ημιάξονες της σχετικής έλλειψης σφάλματος προκύπτουν από τις σχέσεις :

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{\Delta \mathrm{E_i}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{E_j}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{N_i}+}^2 \sigma_{\Delta \mathrm{N_j}}^2\right) + \sqrt{\left((\sigma_{\Delta \mathrm{E_i}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{E_j}}^2) - (\sigma_{\Delta \mathrm{N_i}+}^2 \sigma_{\Delta \mathrm{N_j}}^2)\right) + 4\cdot\sigma_{\Delta E\Delta N}^2}\right] \tag{5.17}$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{\Delta \mathrm{E_i}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{E_j}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{N_i}+}^2 \sigma_{\Delta \mathrm{N_j}}^2\right) - \sqrt{\left((\sigma_{\Delta \mathrm{E_i}}^2 + \sigma_{\Delta \mathrm{E_j}}^2) - (\sigma_{\Delta \mathrm{N_i}+}^2 \sigma_{\Delta \mathrm{N_j}}^2)\right) + 4\cdot\sigma_{\Delta E\Delta N}^2}\right] \tag{5.18}$$

και η γωνία διεύθυνσης από την σχέση : $\tan(2\theta) = \frac{2 \cdot \sigma_{\Delta E \Delta N}}{\sigma^2_{\Delta E} - \sigma^2_{\Delta N}} = 0^g$ (5.19)

όπου $\sigma_{\Delta E \Delta N} = 0$

Ακολουθεί αντίστοιχος έλεγχος με αυτό των απολύτων ελλείψεων, δηλαδή:

- **Μονοδιάστατος έλεγχος**

Για κάθε συνδυασμό κορυφών, συγκρίνεται η τιμή του διανύσματος μεταβολής δΔr, με τον μεγάλο ημιάξονα της σχετικής έλλειψης σφάλματος πολλαπλασιασμένο με $Z_{95\%}$ και εξετάζεται αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από σu · $Z_{95\%}$ (πίνακας 13).

ΑΠΟ - ΠΡΟΣ	δΔr (mm)	σ_u (mm)	$\sigma_u \cdot Z_{95\%}$ (mm)	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
T_4-T_3	10.9	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_4-T_5	9.4	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_4-T_6	23.9	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_6-T_2	21.6	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_6-T_3	29.3	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_6-T_5	26.6	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_5-T_2	5.2	±5.1	±7.1	**ΟΧΙ**
T_3-T_2	7.8	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_4-T_2	9.5	±5.1	±7.1	**ΝΑΙ**
T_5-T_3	2.7	±5.1	±7.1	**ΟΧΙ**

Πίνακας 13:Μονοδιάστατος έλεγχος σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις

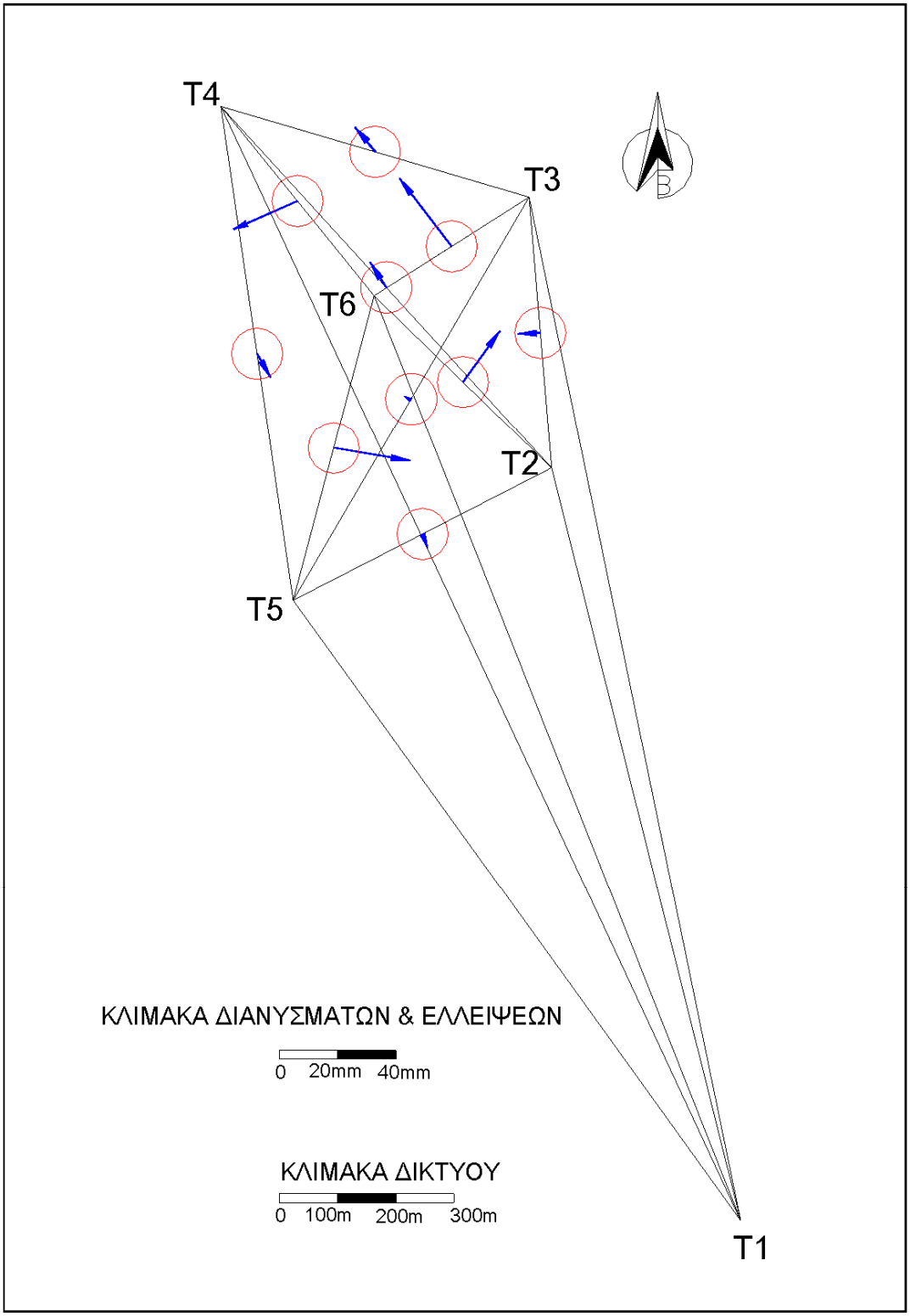
- **Δυδιάστατος έλεγχος**

Σχεδιάζεται η έλλειψη σφάλματος (ουσιαστικά ο κύκλος σφάλματος) στο μέσο του ευθύγραμμου τμήματος i j με άξονες πολλαπλασιασμένους με λ ($\sigma_u \cdot \lambda$, $\sigma_v \cdot \lambda$) και το διάνυσμα $\delta\Delta r$ της μεταβολής στην ίδια κλίμακα και εξετάζεται αν το πέρας του είναι μέσα η έξω από την έλλειψη.

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας 14 με όλα τα στοιχεία των διανυσμάτων μετακίνησης και τα αποτελέσματα των σχετικών οριζοντιογραφικών μετακινήσεων του τρισδιάστατου δικτύου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

ΑΠΟ - ΠΡΟΣ	**ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ**		**ΚΥΚΛΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ**				
	$\delta\Delta r$ (mm)	**θ** (^{g})	**σ_u** (mm)	**$\sigma_u \cdot \lambda_{95}$** (mm)	**σ_v** (mm)	**$\sigma_v \cdot \lambda_{95}$** (mm)	**θ** (^{g})
T_4-T_3	10.9	338.0349	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_4-T_5	9.4	76.1053	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_4-T_6	23.9	216.8822	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_6-T_2	21.6	391.0042	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_6-T_3	29.3	394.1018	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_6-T_5	26.6	394.1343	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_5-T_2	5.2	207.3325	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_3-T_2	7.8	202.6972	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_4-T_2	9.5	288.5719	3.6	8.8	3.6	8.8	0
T_5-T_3	2.7	393.7796	3.6	8.8	3.6	8.8	0

Πίνακας 14: Στοιχεία σχετικών ελλείψεων και σύγκριση σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%



Σχήμα 16: Σύγκριση σε σχετικές οριζοντιογραφικές θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Από τον πίνακα 14 και το σχήμα 16 παρατηρούμε ότι σχετική οριζοντιογραφική μετακίνηση εμφανίζεται μεταξύ όλων των σημείων που συνδέονται με το T_6. Επίσης παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις έχουν μια αριστερόστροφη φορά γύρω από το κεντρικό σημείο του δικτύου T_6.

Κατά την κατακόρυφη έννοια, το διάνυσμα της σχετικής υψομετρικής διαφοράς δΔUp υπολογίζεται από την σχέση :

$$\delta\Delta Up_{ij} = \delta(Up_j - Up_i) = (Up_j - Up_i)_{t2} - (Up_j - Up_i)_{t1} \qquad (5.20)$$

Ακολουθεί ο έλεγχος για μετακίνηση για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Για κάθε κορυφή συγκρίνεται η μεταβολή δΔUp με το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα ($\sigma_{\delta\Delta Up}$) πολλαπλασιασμένο με z_{95} και εξετάζεται αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από το $\sigma_{\delta\Delta Up} \cdot z_{95}$. Το τυπικό σφάλμα $\sigma_{\delta\Delta Up}$ υπολογίζεται από την σχέση :

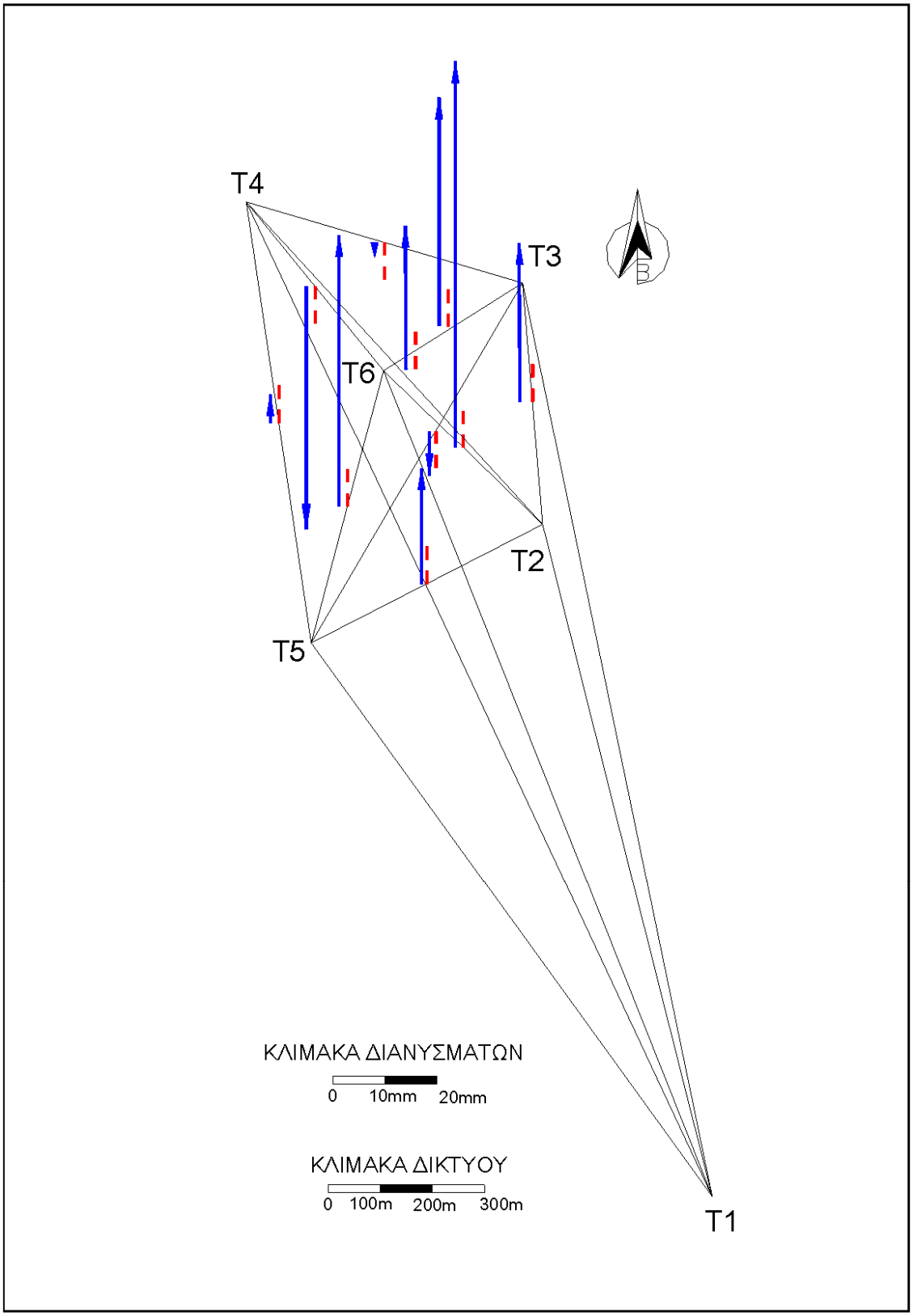
$$\sigma_{\delta\Delta Up_{ij}} = \sqrt{\sigma^2_{\delta Up_i} + \sigma^2_{\delta Up_j} - 2\sigma_{\delta Up_i \delta Up_j}} = \sigma_{\delta Up}\sqrt{2} \qquad (5.21)$$

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (πίνακας 15) με τα αποτελέσματα του ελέγχου μετακίνησης κατά την κατακόρυφη έννοια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, ενώ στο σχήμα 17, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των διανυσμάτων κατακόρυφης σχετικής μετακίνησης.

ΑΠΟ - ΠΡΟΣ	δΔUp (mm)	$\sigma_{\delta\Delta Up}$ (mm)	$\sigma_{\delta\Delta Up} \cdot z_{95}$ (mm)	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
$T_3 - T_2$	+30.4	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_5 - T_2$	+22.1	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_6 - T_2$	+74.1	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_4 - T_3$	-2.9	± 3.6	± 7.1	**ΟΧΙ**
$T_6 - T_3$	+43.8	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_4 - T_5$	+5.4	± 3.6	± 7.1	**ΟΧΙ**
$T_4 - T_6$	-46.7	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_6 - T_5$	+52.0	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_4 - T_2$	+27.5	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**
$T_5 - T_3$	-8.3	± 3.6	± 7.1	**ΝΑΙ**

Πίνακας 15: Σύγκριση σε απόλυτες κατακόρυφες θέσεις σημείων τριδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Τέλος, από τον πίνακα 15 και το σχήμα 17 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη σχετική κατακόρυφη μετακίνηση παρουσιάζεται μεταξύ όλων των σημείων που συνδέονται με την κορυφή T_6. Επίσης παρατηρούμε μεταξύ των σημείων T_3 και T_2 και των σημείων T_5 και T_2 υπάρχει μια μικρότερη σχετική κατακόρυφη μετακίνηση.



Σχήμα 17: Σύγκριση σε σχετικές κατακόρυφες θέσεις σημείων τρισδιάστατου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

6. Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η χρήση των σύγχρονων γεωδαιτικών δεκτών με τεχνολογία GNSS και των κατάλληλων λογισμικών μείωσε σημαντικά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου και γραφείου, αφού χρειάστηκε λιγότερος χρόνος τόσο για τις μετρήσεις όσο και για την επεξεργασία τους. Επίσης η μέθοδος αυτή είναι αξιόπιστη και παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια στις μετρήσεις.

- Η μέτρηση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου με δορυφορικές μεθόδους απαλλάσσει από την απαίτηση της αμοιβαίας ορατότητας μεταξύ των κορυφών του και επιταχύνει τη διαδικασία μέτρησης σε κάθε φάση.

- Το δίκτυο που ιδρύθηκε έχει ευαισθησία ±5mm στην κατακόρυφη μετακίνηση και ±6mm στην οριζόντια μετακίνηση για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Έτσι είναι βέβαιο ότι οποιαδήποτε μετακίνηση μεγαλύτερη **των ±5mm** στο κατακόρυφο επίπεδο και **±6mm** στο οριζόντιο επίπεδο μπορεί να εντοπιστεί, με πιθανότητα 95%.

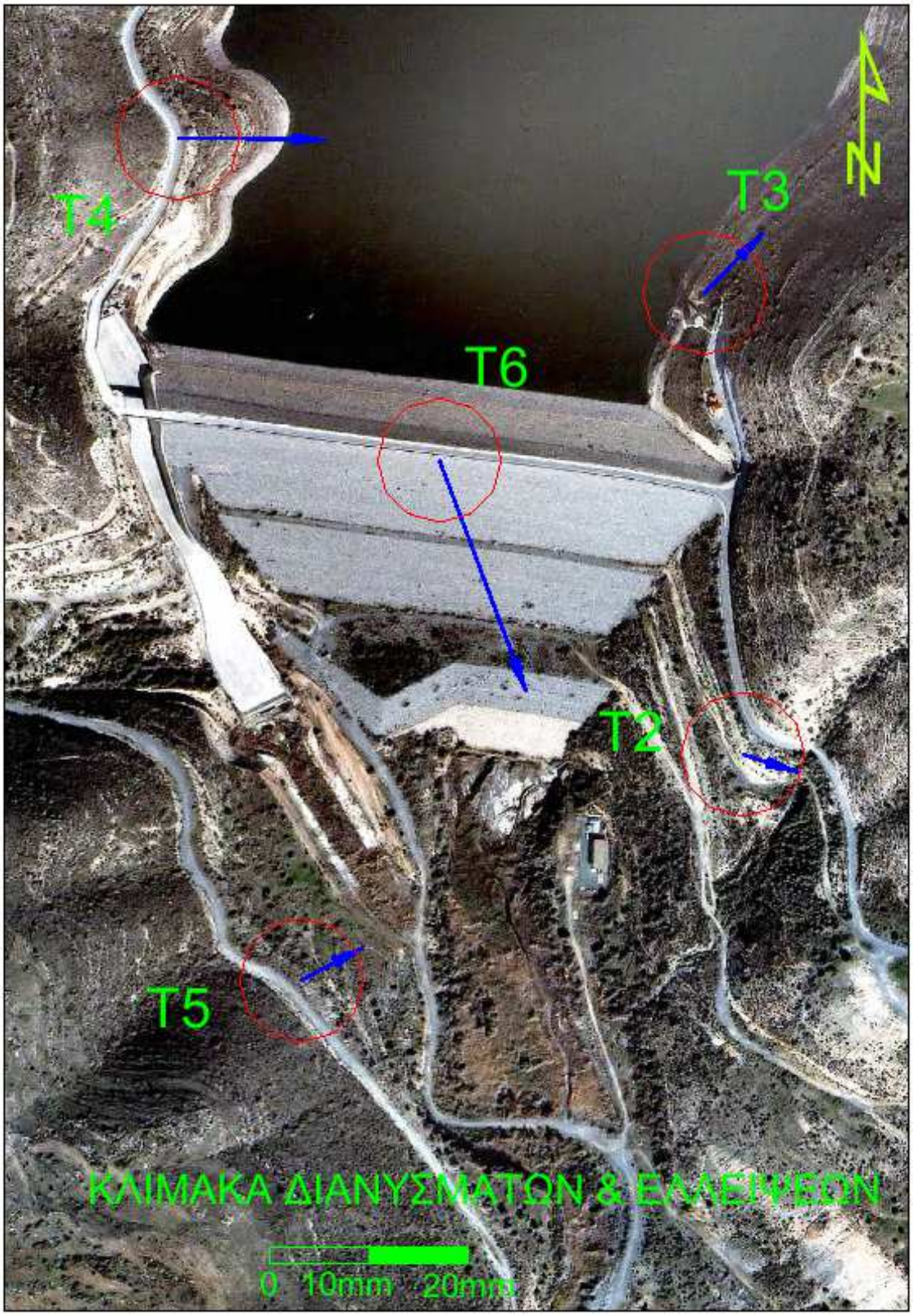
- Το πλεονέκτημα της γεωδαιτικής μεθοδολογίας για τη μελέτη των παραμορφώσεων γενικά, και των φραγμάτων ειδικότερα, είναι ότι οι πιθανές μετακινήσεις μπορούν άμεσα να συσχετισθούν αφού προσδιορίζονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς.

- Με τις γεωδαιτικές μεθόδους δεν καταγράφεται μόνο το μέγεθος της μετακίνησης ενός σημείου αλλά και η διεύθυνση της κίνησής του, τόσο σε σχέση με το σταθερό σημείο (απόλυτη) όσο και σε σχέση με κάθε άλλο σημείο του δικτύου (σχετική). Έτσι ύστερα από ορισμένες σειρές μετρήσεων είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας μετακίνησης ή η πρόβλεψη για τη θέση του στο μέλλον.

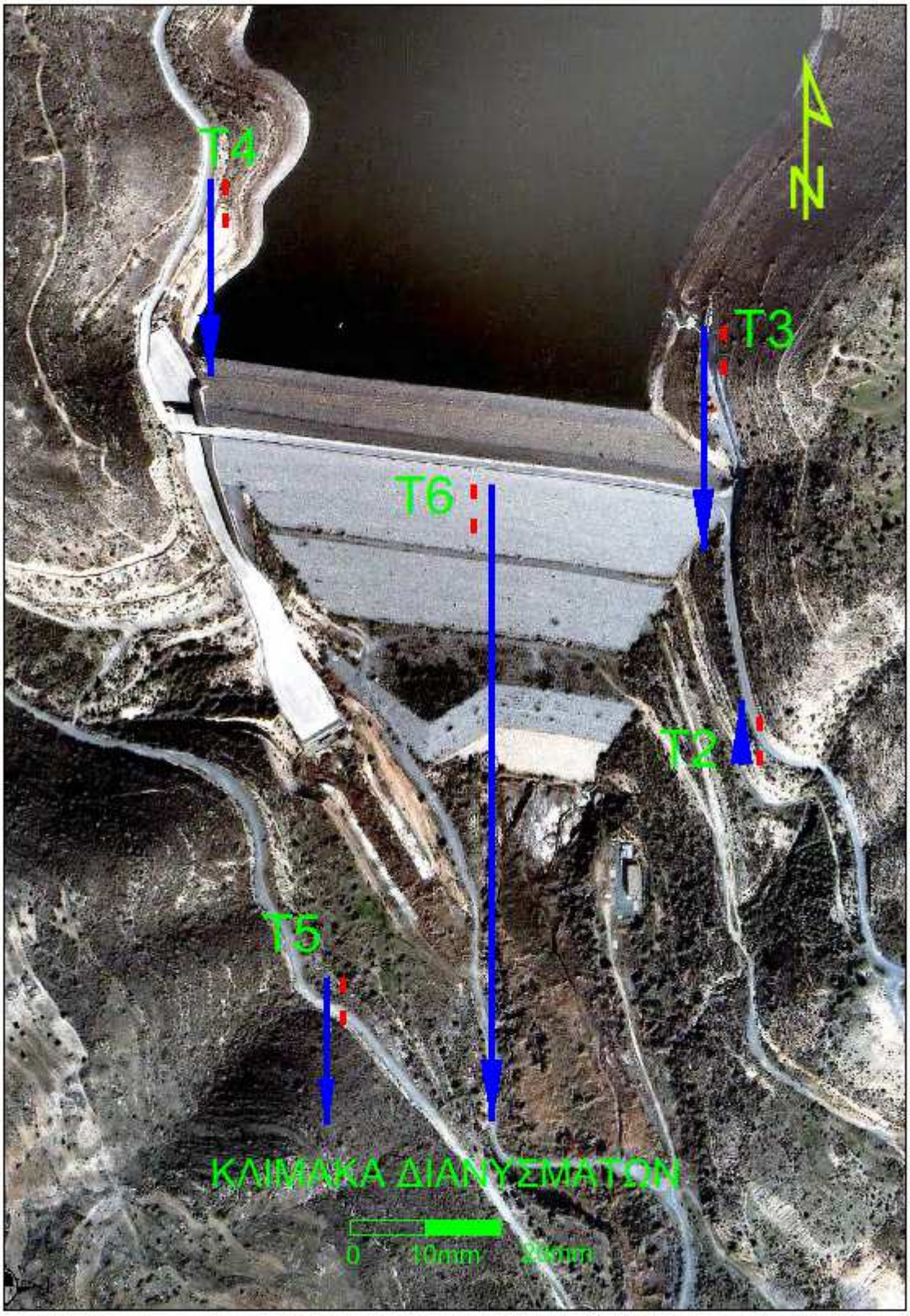
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση των αποτελεσμάτων των ελέγχων μετακινήσεων. Οι φάσεις των μετρήσεων που μελετήθηκαν έγιναν σε μεγάλο χρονικό διάστημα (6 έτη). Παρατηρείται λοιπόν στην πλειονότητα, μεταβολή απόλυτης θέσης σημείων για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Η μεγαλύτερη στατιστικά σημαντική μετακίνηση εντοπίστηκε στην κορυφή T_6, στη στέψη του φράγματος. Στο σημείο αυτό εντοπίζεται **απόλυτη μετακίνηση κατά την οριζόντια έννοια** της τάξης **των 24mm**, με κατεύθυνση νοτιοανατολική (εικόνα 17). Το ίδιο σημείο εμφανίζει **υψομετρική μεταβολή** (κατακόρυφη μετακίνηση) ίση με **-67.5mm** (καθίζηση) (εικόνα 18). Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και από πληροφορία που αφορά στη μελέτη κατακόρυφων μετακινήσεων της στέψης του φράγματος, από ανεξάρτητη μεθοδολογία.

- Στα σημεία T_4 και T_3 που βρίσκονται δίπλα στο φράγμα (εικόνα 17) εντοπίζεται απόλυτη μετακίνηση κατά την οριζόντια έννοια της τάξης των **14.9mm και 8.4mm** αντίστοιχα, τα ίδια σημεία εμφανίζουν υψομετρική μεταβολή ίση με **-20.8 mm και -23.8 mm** αντίστοιχα (καθίζηση), ενώ στα σημεία T_2 και T_5 όπου είναι πιο απομακρυσμένα από το φράγμα (εικόνα 17) εντοπίζεται απόλυτη μετακίνηση κατά την οριζόντια έννοια της τάξης των **5.9mm** (μικρότερο από την ευαισθησία του δικτύου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% άρα δεν είναι μετακίνηση) και **7.0mm** αντίστοιχα, τα ίδια σημεία εμφανίζουν υψομετρική μεταβολή ίση με **6.6 mm** (ανύψωση) και **-15.5 mm** (καθίζηση) αντίστοιχα. Επομένως με τα πιο πάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι τα σημεία που είναι δίπλα στο φράγμα έχουν υποστεί μεγαλύτερη μετακίνηση τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά σε σχέση με τα σημεία που είναι απομακρυσμένα από το φράγμα.

- Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επίλυση του τριδιάστατου δικτύου με τις δορυφορικές μετρήσεις κρίθηκε επιτυχής. Διαπιστώθηκε ότι είναι μια διαδικασία πολυσύνθετη, με παραδοχές, αλλά μας οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 17:Απόλυτες οριζοντιογραφικές μετακινήσεις τριδιάστατου δικτύου ελέγχου.

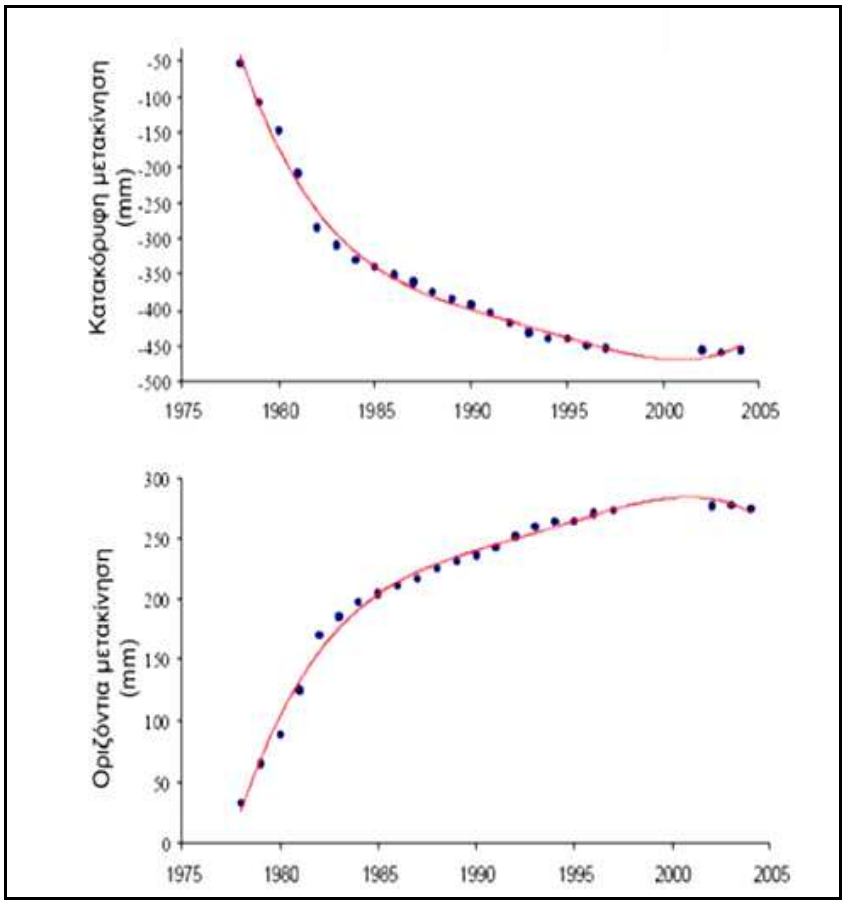


Εικόνα 18 : Απόλυτες κατακόρυφες μετακινήσεις τριδιάστατου δικτύου ελέγχου.

- Επειδή η μελέτη των αιτιών αυτών απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις γεωτεχνικής μηχανικής, ζητήθηκε η συνδρομή του Δρ Λύσανδρου Παντελίδη, Λέκτορα του Τμήματος ΠΟΜΗΓΕ του ΤΕΠΑΚ. Τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται παρακάτω:

  - ✓ Το κυριότερο αίτιο πρόκλησης των παραμορφώσεων θεωρείται ότι είναι οι υδροστατικές ωθήσεις του νερού οι οποίες μεταβάλλονται με το χρόνο και ως εκ τούτου προκαλούν κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης στο φράγμα με ότι αυτό συνεπάγεται στην επιπόνησή του.
  - ✓ Άλλα αίτια πρόκλησης μόνιμων και μη μόνιμων παραμορφώσεων είναι ο σεισμός και πιθανόν η διόγκωση της αργίλου του πυρήνα του φράγματος. Όσον αφορά στο σεισμό, το φράγμα βρίσκεται εντός της δυσμενέστερης από τις τρεις σεισμικές ζώνες της Κύπρου. Μάλιστα, η σεισμική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή κρίνεται μάλλον ως αρκετά έντονη .
  - ✓ Όσον αφορά στη πιθανή διόγκωση του πυρήνα του φράγματος, πιστεύεται ότι όταν η στάθμη του φράγματος βρίσκεται στα υψηλότερα δυνατά επίπεδα, η άργιλος του πυρήνα που λόγω του κορεσμού τείνει να διογκωθεί, πιθανόν να μπορεί να υπερκεράσει τις τάσεις των υπερκείμενων γαιών και κατά συνέπεια να συμβάλει στην κατακόρυφη μετακίνηση της στέψης. Με την υποβάθμιση της στάθμης του νερού λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της στερεοποίησης με συνέπεια την υποβάθμιση του επιπέδου της στέψης.
  - ✓ Η ανύψωση της στάθμης των υδάτων έχει ως συνέπεια την αύξηση του όγκου του σώματος του φράγματος που βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού και άρα την αύξηση του ιδίου βάρους του, καθώς επίσης και την άσκηση κατακόρυφου φορτίου από τον νερό που βρίσκεται πάνω από το πρανές του φράγματος. Τα πρόσθετα αυτά φορτία μεταφέρονται στο επίπεδο της θεμελίωσης και προφανώς είναι αιτία κατακόρυφων (ελαστικών) μετακινήσεων του υλικού της θεμελίωσης.
  - ✓ Επίσης, η παραμόρφωση του φράγματος προς τα κατάντη (οριζόντια μετακίνηση) λόγω της υδροστατικής πίεσης είναι λογικό να συνοδεύεται και από μία κατακόρυφη μετακίνηση (αρνητική), όπως συμβαίνει συνήθως στους φορείς που κάμπτονται ή γενικότερα παραμορφώνονται υπό φόρτιση.

- ✓ Από την εμπειρία είναι γνωστό ότι σε κάθε φράγμα της ίδιας κατηγορίας με αυτό του Κούρη (χωμάτινο φράγμα) λαμβάνουν χώρα μακροχρόνιες μετακινήσεις τόσο οριζόντιες όσο και κατακόρυφες. Στο σχήμα 18 δίνεται παράδειγμα που αφορά σε μετρήσεις στο φράγμα του Μόρνου στην Ελλάδα. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις (και η γενικότερη γεωμετρία) του φράγματος του Μόρνου είναι αντίστοιχες με αυτές του Κούρη. Οι μετακινήσεις τείνουν ασυμπτωτικά σε κάποια τιμή.



Σχήμα 18: Χρονική εξέλιξη των μετακινήσεων σημείου έλεγχου στην στέψη του φράγματος του Μόρνου[18]

[18] *[Πηγή:http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/563/1/Pytharouli_PhD_thesis_2007.pdf]*

6.2 Προτάσεις

Από την εξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων προκύπτουν οι ακόλουθες προτάσεις:

- Προτείνεται η περιοδική μέτρηση του δικτύου, προκειμένου να παρακολουθείται η ταχύτητα εξέλιξης των επιφανειακών μετακινήσεων (καθιζήσεις-ανυψώσεις - μετακινήσεις) στο πέρασμα του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο εξάγονται συμπεράσματα για την κινηματική συμπεριφορά.

- Επίσης, προτείνεται η εγκατάσταση νέων σημείων ελέγχου στα ευαίσθητα σε μετακινήσεις σημεία, ώστε να υπάρχει καλύτερη εικόνα στα αποτελέσματα .

- Ακόμη, προτείνεται η παρακολούθηση του φράγματος με ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, όπου απαιτούν μόνιμη εγκατάσταση στόχων και σταθμών. Έχουν το πλεονέκτημα του ελέγχου λειτουργίας τους από μακριά και της αυτόματης μετάδοσης - μεταφοράς των στοιχείων των μετρήσεων σε λογισμικά υπολογισμών. Επίσης δίνει τη δυνατότητα επίλυσης και υπολογισμό αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, αμέσως μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγατζά - Μπαλοδήμου Α.Μ., *Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις* Ι, Αθήνα 2000.

2. Αγατζά - Μπαλοδήμου Α.Μ., *Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις* ΙΙ, Αθήνα 2005.

3. Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ., Παπαζήση Κ., *Κεφάλαια ανώτερης γεωδαισίας*, ΕΜΠ, Αθήνα. 2006.

4. Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., *Παγκόσμιο Σύστημα Δορυφορικού Προσδιορισμού Θέσης GPS*, Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σερρών 2004.

5. Δεληκαράγλου, Δ. , *Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας*, Αθήνα 2005

6. Λάμπρου Ε. – Πανταζής Γ., *Εφαρμοσμένη Γεωδαισία* , Εκδόσεις ΖΗΤΗ , Αθήνα 2010

7. Λάμπρου Ε.-Πανταζής Γ., *Ακριβής προσδιορισμός υψομετρικών διαφορών με χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών,* Τεχνικά χρονικά επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα 2007.

8. Παραδείσης Δ., *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2000

9. Τελεβάντο Μ., *Το φράγμα του Κούρη*, Πολιτικός Μηχανικός, Λευκωσία, Απρίλιος 2004

10. Τέμενος Κ. ,*Παρακολούθηση παραμορφώσεων του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2007.

11. Φωτίου Α. , Πικριδά Χ. , "*GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές*" , Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2006.

12. Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., *Γεωμετρική γεωδαισία και δίκτυα,* εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2000.

13. Constantinou G., *Annual report of the geological survey department for the year 1980*, Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia 1981.

14. Department Of Defence, *"NAVSTAR GPS User Equipment"* U.S. Government Printing Office, Washington D.C. USA 1996.

15. Kyrou K. – Kridiotis C. – Yziquel A., *Remedial grouting on the right abutment of the Kouris dam*, Commission Internationale des Grands Barrages,2006.

16. Χ. Πικριδάς, *Βαθμονόμηση Δεκτών GPS από Μετρήσεις σε Μηδενική Βάση* Τεχνικά χρονικά επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα 2005.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

7.1 Επίλυση βάσεων τριδιάστατου δικτύου ελέγχου με τεχνολογία GNSS από το λογισμικό GNSS SOLUTIONS – ΦΑΣΗ ΙΙΙ (Ιούνιος 2012)

Land Survey Overview

GNSS Solutions, Copyright (C) 2011 Ashtech. 2/3/2013 6:13:52 AM

www.ashtech.com

Project Name : 18.6DAY2

Spatial Reference System : WGS 84

Time Zone : (GMT-08:00) Pacific Time (US & Canada)

Linear Units : Meters

Coordinate System Summary

Coordinate system

Name :	WGS 84
Type :	Geographic
Unit name :	Radians
Radians per unit :	1
Vertical datum :	Ellipsoid
Vertical unit :	Meters
Meters per unit :	1

Datum

Name :	WGS 84
Ellipsoid Name :	WGS 84
Semi-major Axis :	6378137.000 m
Inverse Flattening :	298.257223563
DX to WGS84 :	0.0000 m
DY to WGS84 :	0.0000 m
DY to WGS84 :	0.0000 m
RX to WGS84 :	0.000000 "
RY to WGS84 :	0.000000 "

RZ to WGS84 : 0.000000 "

ppm to WGS84 : 0.000000000000

Control Points

Name	Components		95% Error	Status	Control Error
T1	Long	32° 55' 29.92635"E	0.000	FIXED	
	Lat	34° 42' 47.46431"N	0.000	FIXED	
	Ellips height	288.661	0.000	FIXED	

Logged Points

Name	Components		95% Error	Status
T2	Long	32° 55' 17.12520"E	0.002	Adjusted
	Lat	34° 43' 29.24717"N	0.002	Adjusted
	Ellips height	259.298	0.004	Adjusted
T3	Long	32° 55' 15.59146"E	0.002	Adjusted
	Lat	34° 43' 44.30517"N	0.002	Adjusted
	Ellips height	282.454	0.005	Adjusted
T4	Long	32° 54' 54.78768"E	0.002	Adjusted
	Lat	34° 43' 49.33167"N	0.002	Adjusted
	Ellips height	296.641	0.005	Adjusted
T5	Long	32° 54' 59.69454"E	0.002	Adjusted
	Lat	34° 43' 21.87002"N	0.002	Adjusted
	Ellips height	221.365	0.004	Adjusted
T6	Long	32° 55' 05.12981"E	0.002	Adjusted
	Lat	34° 43' 38.83399"N	0.002	Adjusted
	Ellips height	283.763	0.005	Adjusted

Files

Name	Start Time	Sampling	Epochs	Size (Kb)	Type
T1__1580.12o	12/06/06 06:16:40	1	10112	10256	L1/L2 GPS/GLONASS
T2__1580.12o	12/06/06 06:48:31	1	7063	6837	L1/L2 GPS/GLONASS
T3__1580.12o	12/06/06 06:49:15	1	11211	10544	L1/L2 GPS/GLONASS
T4__1580.12o	12/06/06 07:00:01	1	10408	9492	L1/L2 GPS/GLONASS

T5__1580.12o 12/06/06 07:26:30 1 7337 6403 L1/L2 GPS/GLONASS

T6__1580.12o 12/06/06 06:49:24 1 9665 9752 L1/L2 GPS/GLONASS

Occupations

Site	Start Time	Time span	Type	File
T1	June 6 2012 06:16:40.00	02:48:31.00	Static	T1__1580.12o
T2	June 6 2012 06:48:31.00	01:57:42.00	Static	T2__1580.12o
T3	June 6 2012 06:49:15.00	03:06:50.00	Static	T3__1580.12o
T4	June 6 2012 07:00:01.00	02:53:27.00	Static	T4__1580.12o
T5	June 6 2012 07:26:30.00	02:02:16.00	Static	T5__1580.12o
T6	June 6 2012 06:49:24.00	02:41:04.00	Static	T6__1580.12o

Processes

Reference	Reference File	Rover	Rover File	Mode	Num
T1	T1__1580.12o	T5	T5__1580.12o	Static	1
T1	T1__1580.12o	T3	T3__1580.12o	Static	2
T1	T1__1580.12o	T6	T6__1580.12o	Static	3
T1	T1__1580.12o	T2	T2__1580.12o	Static	4
T1	T1__1580.12o	T4	T4__1580.12o	Static	5
T3	T3__1580.12o	T4	T4__1580.12o	Static	6
T3	T3__1580.12o	T2	T2__1580.12o	Static	7
T3	T3__1580.12o	T5	T5__1580.12o	Static	8
T3	T3__1580.12o	T6	T6__1580.12o	Static	9
T4	T4__1580.12o	T5	T5__1580.12o	Static	10
T4	T4__1580.12o	T2	T2__1580.12o	Static	11
T4	T4__1580.12o	T6	T6__1580.12o	Static	12
T6	T6__1580.12o	T2	T2__1580.12o	Static	13
T6	T6__1580.12o	T5	T5__1580.12o	Static	14
T5	T5__1580.12o	T2	T2__1580.12o	Static	15

Processed vectors

Vector Identifier	Vector Length	95% Error	Vector Components		95% Error	SV	PDOP	QA
T1 - T4	2105.806	0.010	X	-420.167	0.004	14	1.3	
Fixed								
12/06/06 07:00:01.00			Y	-1337.142	0.004			
+02:05:10.00			Z	1571.601	0.004			
T1 - T2	1328.495	0.006	X	-458.798	0.003	15	1.2	
Fixed								
12/06/06 06:48:31.00			Y	-685.127	0.003			
+01:57:42.00			Z	1041.635	0.003			
T1 - T6	1704.161	0.008	X	-417.334	0.003	16	1.2	
Fixed								
12/06/06 06:49:24.00			Y	-1021.856	0.003			
+02:15:47.00			Z	1298.386	0.003			
T1 - T3	1789.238	0.009	X	-643.515	0.004	16	1.2	
Fixed								
12/06/06 06:49:15.00			Y	-851.209	0.004			
+02:15:56.00			Z	1436.212	0.004			
T1 - T5	1311.664	0.006	X	-135.255	0.003	13	1.5	
Fixed								
12/06/06 07:26:30.00			Y	-1003.988	0.003			
+01:38:41.00			Z	833.172	0.003			
T3 - T6	315.080	0.002	X	226.185	0.001	16	1.2	
Fixed								
12/06/06 06:49:24.00			Y	-170.648	0.001			
+02:41:04.00			Z	-137.824	0.001			
T3 - T5	803.322	0.004	X	508.265	0.002	14	1.3	
Fixed								
12/06/06 07:26:30.00			Y	-152.780	0.002			
+02:02:16.00			Z	-603.035	0.002			
T3 - T2	466.251	0.002	X	184.715	0.001	15	1.3	
Fixed								
12/06/06 06:49:15.00			Y	166.082	0.001			
+01:56:58.00			Z	-394.572	0.001			

T3 - T4	551.676	0.003	X	223.348	0.001	14	1.3
Fixed							
12/06/06 07:00:01.00			Y	-485.934	0.001		
+02:53:27.00			Z	135.388	0.001		
T4 - T6	417.203	0.002	X	2.838	0.001	14	1.3
Fixed							
12/06/06 07:00:01.00			Y	315.285	0.001		
+02:30:27.00			Z	-273.213	0.001		
T4 - T2	841.115	0.004	X	-38.630	0.002	14	1.5
Fixed							
12/06/06 07:00:01.00			Y	652.016	0.002		
+01:46:12.00			Z	-529.960	0.002		
T4 - T5	858.742	0.004	X	284.923	0.002	14	1.4
Fixed							
12/06/06 07:26:30.00			Y	333.155	0.002		
+02:02:16.00			Z	-738.421	0.002		
T5 - T2	499.816	0.002	X	-323.558	0.001	12	1.6
Fixed							
12/06/06 07:26:30.00			Y	318.860	0.001		
+01:19:43.00			Z	208.457	0.001		
T6 - T5	544.342	0.003	X	282.086	0.001	15	1.2
Fixed							
12/06/06 07:26:30.00			Y	17.870	0.001		
+02:02:16.00			Z	-465.206	0.001		
T6 - T2	425.475	0.002	X	-41.475	0.001	15	1.2
Fixed							
12/06/06 06:49:24.00			Y	336.730	0.001		
+01:56:49.00			Z	-256.752	0.001		

Adjusted vectors

Vector Identifier	Vector Length	Length Resid.		Vector Components	Tau Resid.	Test QA
T1 - T4	2105.804	0.005	X	-420.171	-0.003	
12/06/06 07:00:01.00			Y	-1337.142	-0.000	
			Z	1571.597	-0.004	
T1 - T2	1328.497	0.005	X	-458.804	-0.005	
12/06/06 06:48:31.00			Y	-685.127	-0.000	
			Z	1041.635	-0.001	
T1 - T6	1704.160	0.002	X	-417.332	0.002	

12/06/06 06:49:24.00			Y	-1021.857	-0.000
			Z	1298.385	-0.001
T1 - T3	1789.236	0.003	X	-643.517	-0.002
12/06/06 06:49:15.00			Y	-851.208	0.001
			Z	1436.209	-0.003
T1 - T5	1311.665	0.007	X	-135.249	0.006
12/06/06 07:26:30.00			Y	-1003.987	0.001
			Z	833.176	0.004
T3 - T6	315.081	0.001	X	226.185	0.000
12/06/06 06:49:24.00			Y	-170.648	-0.000
			Z	-137.824	-0.000
T3 - T5	803.322	0.004	X	508.268	0.003
12/06/06 07:26:30.00			Y	-152.779	0.001
			Z	-603.033	0.002
T3 - T2	466.252	0.003	X	184.714	-0.002
12/06/06 06:49:15.00			Y	166.081	-0.001
			Z	-394.574	-0.002
T3 - T4	551.675	0.002	X	223.346	-0.002
12/06/06 07:00:01.00			Y	-485.934	0.000
			Z	135.388	-0.001
T4 - T6	417.203	0.002	X	2.838	0.001
12/06/06 07:00:01.00			Y	315.286	0.000
			Z	-273.212	0.001
T4 - T2	841.116	0.003	X	-38.633	-0.003
12/06/06 07:00:01.00			Y	652.015	-0.000
			Z	-529.962	-0.002
T4 - T5	858.742	0.001	X	284.922	-0.001
12/06/06 07:26:30.00			Y	333.155	-0.000
			Z	-738.421	-0.000
T5 - T2	499.815	0.004	X	-323.555	0.004
12/06/06 07:26:30.00			Y	318.860	0.001
			Z	208.459	0.002
T6 - T5	544.343	0.003	X	282.083	-0.002
12/06/06 07:26:30.00			Y	17.869	-0.000

			Z	-465.209	-0.002
T6 - T2	425.473	0.004	X	-41.471	0.004
12/06/06 06:49:24.00			Y	336.730	0.000
			Z	-256.750	0.003

7.2 Επίλυση και συνόρθωση βάσεων Ιουνίου 2012 με το λογισμικό ECXEL

ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΕΩΝ ΙΟΥΝΙΟΥ 2012						
Βάση	**Κεκλιμένο μήκος (m)**	**95% Error (m)**	**Συνιστώσες (m)**		**95% Error (m)**	**PDOP**
T1 - T3	1789.238	±0.009	ΔX	-643.515	±0.004	1.2
			ΔY	-851.209	±0.004	
			ΔZ	1436.212	±0.004	
T1 - T5	1311.664	±0.006	ΔX	-135.255	±0.003	1.5
			ΔY	-1003.988	±0.003	
			ΔZ	833.172	±0.003	
T1 - T2	1328.495	±0.006	ΔX	-458.798	±0.003	1.2
			ΔY	-685.127	±0.003	
			ΔZ	1041.635	±0.003	
T1 - T4	2105.806	±0.010	ΔX	-420.167	±0.004	1.3
			ΔY	-1337.142	±0.004	
			ΔZ	1571.601	±0.004	
T1 - T6	1704.161	±0.008	ΔX	-417.334	±0.003	1.2
			ΔY	-1021.856	±0.003	
			ΔZ	1298.386	±0.003	
T3 - T4	551.676	±0.003	ΔX	223.348	±0.001	1.3
			ΔY	-485.934	±0.001	
			ΔZ	135.388	±0.001	
T3 - T2	466.251	±0.002	ΔX	184.715	±0.001	1.3
			ΔY	166.082	±0.001	
			ΔZ	-394.572	±0.001	

T2 - T5	499.816	±0.002	ΔX	323.558	±0.001	1.6
			ΔY	-318.86	±0.001	
			ΔZ	-208.457	±0.001	
T6 - T3	315.08	±0.002	ΔX	-226.185	±0.001	1.2
			ΔY	170.648	±0.001	
			ΔZ	137.824	±0.001	
T6 - T4	417.203	±0.002	ΔX	-2.838	±0.001	1.3
			ΔY	-315.285	±0.001	
			ΔZ	273.213	±0.001	
T6 - T5	544.342	±0.003	ΔX	282.086	±0.001	1.2
			ΔY	17.87	±0.001	
			ΔZ	-465.206	±0.001	
T6 - T2	425.475	±0.002	ΔX	-41.475	±0.001	1.2
			ΔY	336.73	±0.001	
			ΔZ	-256.752	±0.001	
T5 - T4	858.742	±0.004	ΔX	-284.923	±0.002	1.4
			ΔY	-333.155	±0.002	
			ΔZ	738.421	±0.002	

XT1 =	4405794.718
YT1 =	2852961.908
ZT1 =	3611921.352

ΔX12=X2-X1	-458.798
ΔY12=Y2-Y1	-685.127
ΔZ12=Z2-Z1	1041.635
ΔX13=X3-X1	-643.515
ΔY13=Y3-Y1	-851.209
ΔZ13=Z3-Z1	1436.212
ΔX14	-420.167
ΔY14	-1337.142
ΔZ14	1571.601
ΔX15	-135.255
ΔY15	-1003.988
ΔZ15	833.172
ΔX16	-417.334
ΔY16	-1021.856
ΔZ16	1298.386
ΔX23=	-184.715
ΔY23	-166.082
ΔZ23	394.572
ΔX25	323.558
ΔY25	-318.86
ΔZ25	-208.457
ΔX26	41.475
ΔY26	-336.73
ΔZ26	256.752
ΔX34	223.348
ΔY34	-485.934
ΔZ34	135.388
ΔX36	226.185
ΔY36	-170.648
ΔZ36	-137.824
ΔX45	284.923
ΔY45	333.155
ΔZ45	-738.421
ΔX46	2.838
ΔY46	315.285
ΔZ46	-273.213
ΔX56	-282.086
ΔY56	-17.87
ΔZ56	465.206

]=

	X2=	4405335.92
	Y2=	2852276.781
	Z2=	3612962.987
	X3=	4405151.203
	Y3=	2852110.699
	Z3=	3613357.564
	X4=	4405374.551
	Y4=	2851624.766
	Z4=	3613492.953
	X5=	4405659.463
	Y5=	2851957.92
	Z5=	3612754.524
	X6=	4405377.384
	Y6=	2851940.052
	Z6=	3613219.738
X3-X2=		-184.715
Y3-Y2=		-166.082
Z3-Z2=		394.572
X5-X2=		323.558
Y5-Y2=		-318.86
Z5-Z2=		-208.457
X6-X2=		41.475
Y6-Y2=		-336.73
Z6-Z2=		256.752
X4-X3=		223.348
Y4-Y3=		-485.934
Z4-Z3=		135.388
X6-X3=		226.185
Y6-Y3=		-170.648
Z6-Z3=		-137.824
X5-X4=		284.923
Y5-Y4=		333.155
Z5-Z4=		-738.421
X6-X4=		2.838
Y6-Y4=		315.285
Z6-Z4=		-273.213
X6-X5=		-282.086
Y6-Y5=		-17.87
Z6-Z5=		465.206

$$A=$$

	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	X5	Y5	Z5	X6	Y6	Z6
ΔX12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ΔX15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ΔX16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX23	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY23	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ23	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX25	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY25	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ25	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ΔX26	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY26	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ26	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX34	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY34	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ34	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ΔX36	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY36	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ36	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX45	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY45	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ45	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
ΔX46	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY46	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ46	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
ΔX56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
ΔY56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0
ΔZ56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1

$\mathbf{A^T}=$

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

$$\mathbf{N = (A^T \cdot P \cdot A)}$$

4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0
0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1
0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1
-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0
0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1
-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5	0	0
0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5	0
0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5

$N^{-1}=$

0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667
0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333

u=

4405155.602
2853098.453
3612520.12
4404516.955
2852601.199
3613754.572
4405310.138
2850490.392
3614639.975
4406550.03
2851990.085
3611342.44
4405365.796
2851730.089
3613530.659

x=

X2	4405335.915
Y2	2852276.781
Z2	3612962.987
X3	4405151.201
Y3	2852110.699
Z3	3613357.562
X4	4405374.549
Y4	2851624.766
Z4	3613492.951
X5	4405659.47
Y5	2851957.921
Z5	3612754.529
X6	4405377.386
Y6	2851940.051
Z6	3613219.738

Αρ. Εξισώσεων	**Αρ. Αγνώστων**
n	m
39	15

σ_0=±	**sqrt([Puu]/n-m)**	
σ_0=±	0.0027	m

$\upsilon =$

0.005166667
-4.16664E-05
-4.16664E-05
0.001791667
-0.00025
0.002166667
0.002166667
0.000208334
0.002208334
-0.006958333
-0.00075
-0.004833333
-0.002166665
0.000833334
0.000500001
-0.001375
-0.000208333
-0.002791667
0.002875
0.000291667
0.001208333
0.003666668
-0.000124999
0.001541667
0.000375001
-0.000541667
-0.000958333
4.16678E-05
8.33339E-05
0.000333333
0.001875
4.16666E-05
0.000958333
0.000666667
-0.000375
0.000291666
-0.002208332
-0.000416666
-0.002666666

$\upsilon^2 =$

2.66944E-05
1.73609E-09
1.73609E-09
3.21007E-06
6.24998E-08
4.69445E-06
4.69445E-06
4.34029E-08
4.87674E-06
4.84184E-05
5.62499E-07
2.33611E-05
4.69444E-06
6.94445E-07
2.50001E-07
1.89063E-06
4.34027E-08
7.7934E-06
8.26563E-06
8.50695E-08
1.46007E-06
1.34445E-05
1.56248E-08
2.37674E-06
1.40625E-07
2.93403E-07
9.18402E-07
1.7362E-09
6.94453E-09
1.11111E-07
3.51562E-06
1.73611E-09
9.18402E-07
4.44445E-07
1.40625E-07
8.50693E-08
4.87673E-06
1.73611E-07
7.11111E-06
0.000176375

=[Puu]

Vx=

2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0
0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0
0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.19E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06
1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0
0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0
0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.22E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06
9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0
0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0
0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.76E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06
1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0
0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06	0
0	0	1.2248 3E-06	0	0	9.1862 E-07	0	0	1.22E-06	0	0	2.7558 6E-06	0	0	1.2248 3E-06
1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.4496 5E-06	0	0
0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.4496 5E-06	0
0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	1.22E-06	0	0	1.2248 3E-06	0	0	2.4496 5E-06

σX2	0.001660078
σY2	0.001660078
σZ2	0.001660078
σX3	0.001660078
σY3	0.001660078
σZ3	0.001660078
σX4	0.001660078
σY4	0.001660078
σZ4	0.001660078
σX5	0.001660078
σY5	0.001660078
σZ5	0.001660078
σX6	0.001565137
σY6	0.001565137
σZ6	0.001565137

X2=	4405335.915m	±1.7mm
Y2=	2852276.781m	±1.7mm
Z2=	3612962.987m	±1.7mm
X3=	4405151.201m	±1.7mm
Y3=	2852110.699m	±1.7mm
Z3=	3613357.562m	±1.7mm
X4=	4405374.549m	±1.7mm
Y4=	2851624.766m	±1.7mm
Z4=	3613492.951m	±1.7mm
X5=	4405659.470m	±1.7mm
Y5=	2851957.921m	±1.7mm
Z5=	3612754.529m	±1.7mm
X6=	4405377.386m	±1.6mm
Y6=	2851940.051m	±1.6mm
Z6=	3613219.738m	±1.6mm

7.3 Επίλυση και συνόρθωση βάσεων Δεκεμβρίου 2006 με το λογισμικό ECXEL

ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΕΩΝ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2006						
Βάση	**Κεκλιμένο μήκος (m)**	**95% Error (m)**	**Συνιστώσες (m)**		**95% Error (m)**	**PDOP**
			ΔX	-643.494	±0.004	
			ΔY	-851.201	±0.004	
T1 - T3	1789.23	±0.009	ΔZ	1436.216	±0.004	1.6
			ΔX	-135.231	±0.003	
			ΔY	-1003.985	±0.003	
T1 - T5	1311.666	±0.006	ΔZ	833.183	±0.003	1.4
			ΔX	-458.805	±0.003	
			ΔY	-685.134	±0.003	
T1 - T2	1328.502	±0.006	ΔZ	1041.637	±0.001	1.4
			ΔX	-420.146	±0.004	
			ΔY	-1337.146	±0.004	
T1 - T4	2105.809	±0.010	ΔZ	1571.608	±0.004	1.8
			ΔX	-417.293	±0.003	
			ΔY	-1021.837	±0.003	
T1 - T6	1704.181	±0.008	ΔZ	1298.441	±0.003	1.3
			ΔX	223.349	±0.001	
			ΔY	-485.942	±0.001	
T3 - T4	551.685	±0.003	ΔZ	135.395	±0.001	2.3
			ΔX	-184.685	±0.001	
			ΔY	-166.061	±0.001	
T2 - T3	466.248	±0.002	ΔZ	394.591	±0.001	2.6

			ΔX	-323.576	±0.001	
			ΔY	318.848	±0.001	
T5 - T2	499.817	±0.003	ΔZ	208.451	±0.001	1.5
			ΔX	-226.207	±0.001	
			ΔY	170.637	±0.001	
T6 - T3	315.069	±0.002	ΔZ	137.774	±0.001	1.9
			ΔX	-2.859	±0.001	
			ΔY	-315.305	±0.001	
T6 - T4	417.188	±0.002	ΔZ	273.167	±0.001	2.2
			ΔX	-282.056	±0.001	
			ΔY	-17.854	±0.001	
T5 - T6	544.37	±0.003	ΔZ	465.258	±0.001	1.4
			ΔX	41.508	±0.001	
			ΔY	-336.707	±0.001	
T2 - T6	425.493	±0.002	ΔZ	256.807	±0.001	3
			ΔX	-284.912	±0.002	
			ΔY	-333.162	±0.002	
T5 - T4	858.748	±0.004	ΔZ	738.429	±0.002	1.9

XT1 =	4405794.718
YT1 =	2852961.908
ZT1 =	3611921.352

ΔX12=X2-X1	-458.805
ΔY12=Y2-Y1	-685.134
ΔZ12=Z2-Z1	1041.637
ΔX13=X3-X1	-643.494
ΔY13=Y3-Y1	-851.201
ΔZ13=Z3-Z1	1436.216
ΔX14	-420.146
ΔY14	-1337.146
ΔZ14	1571.608
ΔX15	-135.231
ΔY15	-1003.985
ΔZ15	833.183
ΔX16	-417.293
ΔY16	-1021.837
ΔZ16	1298.441
ΔX23=	-184.685
ΔY23	-166.061
ΔZ23	394.591
ΔX25	323.576
ΔY25	-318.848
ΔZ25	-208.451
ΔX26	41.508
ΔY26	-336.707
ΔZ26	256.807
ΔX34	223.349
ΔY34	-485.942
ΔZ34	135.395
ΔX36	226.207
ΔY36	-170.637
ΔZ36	-137.774
ΔX45	284.912
ΔY45	333.162
ΔZ45	-738.429
ΔX46	2.859
ΔY46	315.305
ΔZ46	-273.167
ΔX56	-282.056
ΔY56	-17.854
ΔZ56	465.258

l=

X2=	4405335.913
Y2=	2852276.774
Z2=	3612962.989
X3=	4405151.224
Y3=	2852110.707
Z3=	3613357.568
X4=	4405374.572
Y4=	2851624.762
Z4=	3613492.96
X5=	4405659.487
Y5=	2851957.923
Z5=	3612754.535
X6=	4405377.425
Y6=	2851940.071
Z6=	3613219.793
X3-X2=	-184.685
Y3-Y2=	-166.061
Z3-Z2=	394.591
X5-X2=	323.576
Y5-Y2=	-318.848
Z5-Z2=	-208.451
X6-X2=	41.508
Y6-Y2=	-336.707
Z6-Z2=	256.807
X4-X3=	223.349
Y4-Y3=	-485.942
Z4-Z3=	135.395
X6-X3=	226.207
Y6-Y3=	-170.637
Z6-Z3=	-137.774
X5-X4=	284.912
Y5-Y4=	333.162
Z5-Z4=	-738.429
X6-X4=	2.859
Y6-Y4=	315.305
Z6-Z4=	-273.167
X6-X5=	-282.056
Y6-Y5=	-17.854
Z6-Z5=	465.258

$$A=$$

	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4	X5	Y5	Z5	X6	Y6	Z6
ΔX12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ΔX15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ΔX16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX23	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY23	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ23	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔX25	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY25	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ25	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ΔX26	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY26	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ26	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX34	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ΔY34	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ΔZ34	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ΔX36	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY36	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ36	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ΔX45	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
ΔY45	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0
ΔZ45	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
ΔX46	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
ΔY46	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
ΔZ46	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
ΔX56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
ΔY56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0
ΔZ56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1

$\mathbf{A^T}=$

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

$$\mathbf{N = (A^T \cdot P \cdot A)}$$

4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0
0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1
0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0	-1
-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0	0
0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	0	0	-1
-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5	0	0
0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5	0
0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	5

$N^{-1}=$

0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667
0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.12500	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.37500	0.00000	0.00000	0.16667
0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333	0.00000	0.00000
0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333	0.00000
0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.16667	0.00000	0.00000	0.33333

u=

4405155.514
2853098.39
3612520.042
4404516.983
2852601.225
3613754.538
4405310.15
2850490.353
3614639.951
4406550.031
2851990.091
3611342.397
4405365.943
2851730.178
3613530.917

x=

X2	4405335.913
Y2	2852276.773
Z2	3612962.985
X3	4405151.224
Y3	2852110.708
Z3	3613357.57
X4	4405374.572
Y4	2851624.763
Z4	3613492.962
X5	4405659.486
Y5	2851957.924
Z5	3612754.534
X6	4405377.427
Y6	2851940.069
Z6	3613219.794

Αρ. Εξισώσεων	**Αρ. Αγνώστων**
n	m
39	15

σ_0=±	**sqrt([Puu]/n-m)**	
σ_0=±	0.0032	m

$\upsilon =$

0.000333333
0.001291667
0.004041667
0.000333333
-0.000583332
-0.001708333
0.000333333
-0.001458333
-0.002208333
0.001333334
-0.001083333
0.000541667
-0.002333333
0.001833334
-0.000666666
0.004
0.004125001
0.00625
0.003
0.000625001
-0.0005
-0.006666666
-0.003458333
-0.001708333
0.001
0.002124999
0.0025
0.003333333
0.001416667
0.002041667
-0.002
0.001375
-0.00125
0.003333334
-0.000708333
0.001541667
0.002333334
0.000916667
-0.001208333

$\upsilon^2 =$

1.11111E-07
1.6684E-06
1.63351E-05
1.11111E-07
3.40277E-07
2.9184E-06
1.11111E-07
2.12674E-06
4.87673E-06
1.77778E-06
1.17361E-06
2.93403E-07
5.44444E-06
3.36111E-06
4.44444E-07
1.6E-05
1.70156E-05
3.90625E-05
9E-06
3.90626E-07
2.5E-07
4.44444E-05
1.19601E-05
2.9184E-06
1E-06
4.51562E-06
6.25E-06
1.11111E-05
2.00694E-06
4.1684E-06
4E-06
1.89063E-06
1.5625E-06
1.11111E-05
5.01736E-07
2.37674E-06
5.44445E-06
8.40278E-07
1.46007E-06
0.000240375

$= [Puu]$

Vx=

3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.67E-06	0	0	1.66927E-06	0	0
0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0
0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06
1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25E-06	0	0	1.66927E-06	0	0
0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0
0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06
1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.67E-06	0	0	1.66927E-06	0	0
0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0
0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06
1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.76E-06	0	0	1.66927E-06	0	0
0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06	0
0	0	1.66927E-06	0	0	1.25195E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.75586E-06	0	0	1.66927E-06
1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.67E-06	0	0	3.33854E-06	0	0
0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.33854E-06	0
0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	1.66927E-06	0	0	3.33854E-06

σX2	0.001938004
σY2	0.001938004
σZ2	0.001938004
σX3	0.001938004
σY3	0.001938004
σZ3	0.001938004
σX4	0.001938004
σY4	0.001938004
σZ4	0.001938004
σX5	0.001938004
σY5	0.001938004
σZ5	0.001938004
σX6	0.001827168
σY6	0.001827168
σZ6	0.001827168

X2=	4405335.913m	±1.9mm
Y2=	2852276.773m	±1.9mm
Z2=	3612962.985m	±1.9mm
X3=	4405151.224m	±1.9mm
Y3=	2852110.708m	±1.9mm
Z3=	3613357.570m	±1.9mm
X4=	4405374.572m	±1.9mm
Y4=	2851624.763m	±1.9mm
Z4=	3613492.962m	±1.9mm
X5=	4405659.486m	±1.9mm
Y5=	2851957.924m	±1.9mm
Z5=	3612754.534m	±1.9mm
X6=	4405377.427m	±1.8mm
Y6=	2851940.069m	±1.8mm
Z6=	3613219.794m	±1.8mm

7.4 Μεταβολή των συντεταγμένων μεταξύ των δυο φάσεων μέτρησης

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΔΧ=Χ2012-Χ2006

	m	**mm**
ΔX2	0.002166666	2
ΔY2	0.008333333	8
ΔZ2	0.002083333	2
ΔX3	-0.022458334	-22
ΔY3	-0.008333333	-8
ΔZ3	-0.007875001	-8
ΔX4	-0.022833334	-23
ΔY4	0.002333333	2
ΔZ4	-0.011416667	-11
ΔX5	-0.015708334	-16
ΔY5	-0.003333333	-3
ΔZ5	-0.005625	-6
ΔX6	-0.041166668	-41
ΔY6	-0.018	-18
ΔZ6	-0.056166667	-56

7.5 Πρόσθεση πινάκων μεταβλητότητας-συμεταβλητοτητας VΔX=VΔX(2006)+VΔX(2012)

VΔx=

6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0
0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0
0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06
2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0
0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0
0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06
2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0
0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0
0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06
2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0
0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06	0
0	0	2.8941E -06	0	0	2.17057 E-06	0	0	2.8941E -06	0	0	6.51172 E-06	0	0	2.8941E -06
2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	5.78819 E-06	0	0
0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	5.78819 E-06	0
0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	2.8941E -06	0	0	5.78819 E-06

7.6 Υπολογισμός απολύτων μετακινήσεων

	φ			λ		
T2	32	55	17.1252	34	43	29.24717
T3	32	55	15.59146	34	43	44.30517
T4	32	54	54.78768	34	43	49.33167
T5	32	54	59.69454	34	43	21.87002
T6	32	55	5.12981	34	43	38.83399

	φ		λ	
	degrees	radians	degrees	radians
T2	32.92142367	0.574587237	34.72479088	0.606061933
T3	32.92099763	0.574579802	34.72897366	0.606134936
T4	32.9152188	0.574478942	34.73036991	0.606159305
T5	32.91658182	0.574502731	34.72274167	0.606026167
T6	32.91809161	0.574529082	34.72745389	0.606108411

JT2=

-0.446691802	-0.309590098	0.839416706
-0.569635197	0.821897647	0
0.689914615	0.478161301	0.543488357

$JT2^T$=

-0.446691802	-0.569635197	0.689914615
-0.309590098	0.821897647	0.478161301
0.839416706	0	0.543488357

JT3=

-0.44666407	-0.309619151	0.839420747
-0.569695197	0.821856059	0
0.689883027	0.478213968	0.543482115

$JT3^T$=

-0.44666407	-0.569695197	0.689883027
-0.309619151	0.821856059	0.478213968
0.839420747	0	0.543482115

JT4=

-0.446586942	-0.3095818	0.839475558
-0.569715225	0.821842176	0
0.689916419	0.478262006	0.543397449

$JT4^T$=

-0.446586942	-0.569715225	0.689916419
-0.3095818	0.821842176	0.478262006
0.839475558	0	0.543397449

JT5=

-0.446644569	-0.309533715	0.839462631
-0.569605802	0.82191802	0
0.689969463	0.478162785	0.543417419

$JT5^T$=

-0.446644569	-0.569605802	0.689969463
-0.309533715	0.82191802	0.478162785
0.839462631	0	0.543417419

JT6=

-0.446637291	-0.309583049	0.839448311
-0.569673397	0.82187117	0
0.689918366	0.478211371	0.54343954

$JT6^T$=

-0.446637291	-0.569673397	0.689918366
-0.309583049	0.82187117	0.478211371
0.839448311	0	0.54343954

	mm				
ΔNT2=	**-1.8**	**JT2*VxT2=**	-2.90873E-06	-2.01596E-06	5.46605E-06
ΔET2=	**5.6**		-3.7093E-06	5.35197E-06	0
ΔUpT2=	**6.6**		4.49253E-06	3.11365E-06	3.53904E-06

ΔNT3=	**6.0**	**JT3*VxT3=**	-2.90855E-06	-2.01615E-06	5.46607E-06
ΔET3=	**5.9**		-3.70969E-06	5.3517E-06	0
ΔUpT3=	**-23.8**		4.49232E-06	3.11399E-06	3.539E-06

ΔNT4=	**-0.1**	**JT4*VxT4=**	-2.90805E-06	-2.01591E-06	5.46643E-06
ΔET4=	**14.9**		-3.70983E-06	5.35161E-06	0
ΔUpT4=	**-20.8**		4.49254E-06	3.11431E-06	3.53845E-06

ΔNT5=	**3.3**	**JT5*VxT5=**	-2.90842E-06	-2.0156E-06	5.46634E-06
ΔET5=	**6.2**		-3.70911E-06	5.3521E-06	0
ΔUpT5=	**-15.5**		4.49289E-06	3.11366E-06	3.53858E-06

ΔNT6=	**-23.2**	**JT6*VxT6=**	-2.58522E-06	-1.79193E-06	4.85889E-06
ΔET6=	**8.7**		-3.29738E-06	4.75715E-06	0
ΔUpT6=	**-67.5**		3.99338E-06	2.76798E-06	3.14553E-06

				σΔ	σΔ*1.96
σΔNT2=	6.51172E-06	0	0	**0.002551807**	**0.005001542**
σΔET2=	0	6.51172E-06	0		
σΔUpT2=	0	0	6.51172E-06		

σΔNT3=	6.51172E-06	0	0	**0.002551807**	**0.005001542**
σΔET3=	0	6.51172E-06	0		
σΔUpT3=	0	0	6.51172E-06		

σΔNT4=	6.51172E-06	0	0	**0.002551807**	**0.005001542**
σΔET4=	0	6.51172E-06	0		
σΔUpT4=	0	0	6.51172E-06		

σΔNT5=	6.51172E-06	0	0	**0.002551807**	**0.005001542**
σΔET5=	0	6.51172E-06	0		
σΔUpT5=	0	0	6.51172E-06		

σΔNT6=	5.78819E-06	0	0	**0.002405867**	**0.004715499**
σΔET6=	0	5.78819E-06	0		
σΔUpT6=	0	0	5.78819E-06		

ΓΙΑ ΑΠΟΛΥΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

	m	mm
σu=	0.0026	**2.6**
σu*λ=	0.0062	**6.2**

λ για 95%=	2.4470

mm

δrT2=	**5.9**
δrT3=	**8.4**
δrT4=	**14.9**
δrT5=	**7.0**
δrT6=	**24.8**

7.7 Υπολογισμός σχετικών μετακινήσεων

ΓΙΑ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ Ε Ν

		ΔΕ	ΔΝ	ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
δΔrT4-T3=	**10.86**	-9.0	6.1	**4**
δΔrT4-T5=	**9.37**	8.7	3.4	**1**
δΔrT4-T6=	**23.92**	-6.3	-23.1	**3**
δΔrT6-T2=	**21.61**	-3.0	21.4	**4**
δΔrT6-T3=	**21.61**	-2.7	29.2	**4**
δΔrT6-T5=	**26.63**	-2.5	26.5	**4**
δΔrT5-T2=	**5.16**	-0.6	-5.1	**3**
δΔrT3-T2=	**7.81**	-0.3	-7.8	**3**
δΔrT4-T2=	**9.5**	-9.3	-1.7	**3**
δΔrT5-T3=	**2.7**	-0.3	2.7	**4**

			ΓΩΝΙΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΣ	
	radians	**degrees**	**degrees**	**grad**
aδΔrT4-T3=	-0.97334593	-55.768614	304.23139	338.0349
aδΔrT4-T5=	1.195459584	68.494789	68.494789	76.1053
aδΔrT4-T6=	0.26518442	15.193948	195.19395	216.8822
aδΔrT6-T2=	-0.14130516	-8.0961894	351.90381	391.0042
aδΔrT6-T3=	-0.09264858	-5.3083725	354.69163	394.1018
aδΔrT6-T5=	-0.09213775	-5.2791044	354.7209	394.1343
aδΔrT5-T2=	0.115178898	6.5992647	186.59926	207.3325
aδΔrT3-T2=	0.042367736	2.4274925	182.42749	202.6972
aδΔrT4-T2=	1.391283929	79.714697	259.7147	288.5719
aδΔrT5-T2=	-0.09770904	-5.5983153	354.40168	393.7796

σΔE=	6.51172E-06
σδΔE=	6.51172E-06

σu=	0.0036088
σv=	0.0036088

σΔN=	0.002551807
σδΔN=	0.002551807

λ για 95%=	2.4470
σu*λ=	0.0088
σv*λ=	0.0088

ΓΙΑ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ UP

	Δup
δΔH4-H3=	-2.9
δΔH4-H5=	5.4
δΔH4-H6=	-46.7
δΔH6-H2=	74.1
δΔH6-H3=	43.8
δΔH6-H5=	52.0
δΔH5-H2=	22.1
δΔH3-H2=	30.4
δΔH4-H2=	27.5
δΔH5-H3=	-8.3

σΔUP=SQRT(2*σδH^2)=	0.0036088
1.96*σΔup=	0.0070732