



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΧΗΣ ΤΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ
ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ GNSS / INS / DMI**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ ΑΞΟΝΑ ΚΙΝΕΤΤΑ – ΚΙΑΤΟ

ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Β. ΓΚΙΚΑΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2009

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε με την αρωγή πολλών προσώπων, κάθε ένα από τα οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γκίκα Βασίλη, για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές που απεκόμισα από εκείνον ως δάσκαλο, για την αμέριστη συμπαράστασή του αλλά και για τον πλούσιο χρόνο που διέθεσε καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες προς τον “ΟΣΕ” και ειδικότερα προς τον Τοπογράφο Μηχ. κ. Παπανδρεάδη Σπύρο, για το ενδιαφέρον που έδειξε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και την διάθεση του οχήματος καταγραφής (δρεζίνας). Ευχαριστώ επίσης τον κ. Σπυράκο Βασίλη από την ΕΡΓΟΣΕ ΑΕ για τη συμβολή του στις αρχικές συνεννοήσεις πρόσβασης στα στοιχεία χάραξης της γραμμής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μηχανοδηγό του οχήματος κ. Λυμπερόπουλο Θεοφάνη για την προθυμία και βοήθειά του τόσο κατά την εγκατάσταση του εξοπλισμού στο όχημα καταγραφής όσο και κατά την εκτέλεση των μετρήσεων. Ακόμα, ευχαριστίες οφείλονται στον υπεύθυνο κατασκευής και παρακολούθησης του έργου της σιδηροδρομικής γραμμής της Προαστιακός ΑΕ (ΣΚΑ – Κιάτο) κ. Μπεζά Δημήτρη για τη διάθεση των κατασκευαστικών δεδομένων καθώς και για την άμεση ανταπόκρισή του σε ό,τι χρειάστηκε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Ευχαριστίες ανήκουν και στον κ. Νουνό Μιχάλη, μηχανουργό, για τη σχολαστική ενασχόλησή του με την κατασκευή του τμήματος προσάρτησης του αισθητήρα του οδομέτρου στον τροχό του οχήματος καταγραφής.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Φράγκο Κυριάκο, για την ουσιαστική βοήθεια που προσέφερε τόσο σε πρακτικά όσο και σε οργανωτικά θέματα σε όλα τα στάδια εκτέλεσης των μετρήσεων, καθώς και για τις συμβουλές του κατά την επεξεργασία τους. Τις ευχαριστίες μου επίσης εκφράζω στον συνεργάτη της ΣΑΤΜ κ. Πηνιώτη Γιώργο, για τη βοήθειά του κατά τις εργασίες πεδίου υπολογισμού εκκεντροτήτων μεταξύ των αισθητήρων καταγραφής. “Ευχαριστώ” οφείλεται και στον κ. Ζαχαρή Βαγγέλη, συνεργάτη της ΣΑΤΜ για τη βοήθειά του κατά την προεπισκόπηση του συστήματος SPAN, καθώς και για τις συμβουλές

του κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, όπως επίσης και στον κ. Γκέκα Αθανάσιο για την αρχική παρουσίαση του συστήματος, καθώς και για τις οδηγίες του σε θέματα διαχείρισης του σχετικού λογισμικού. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον κ. Στρατάκο Γιάννη, κ. Σόφη Άγγελο και κ. Φουρνάρο Σταύρο για την παραμονή τους στα σημεία αναφοράς το βράδυ διεξαγωγής των μετρήσεων κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής, καθώς και για την παραμονή του πρώτου στο σημείο αναφοράς κατά την εκτέλεση των επιπρόσθετων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για έλεγχο. Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τον φοιτητή της ΣΑΤΜ κ. Παπανικολάου Ξάνθο για την βοήθειά του κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο Μπίμη Αθανάσιο, για την άψογη συνεργασία, τη σημαντική βοήθεια, καθώς και για τη στήριξη που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Ευχαριστίες εκφράζω και στους γονείς του για την εξυπηρέτηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επισήμανσης των σταθμών αναφοράς.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο “ευχαριστώ” στους γονείς μου Μαρία και Μάνο Ανδρουλάκη και στον αδερφό μου Μιχάλη, για την αγάπη και φροντίδα με την οποία με στηρίζουν σε όλες μου τις προσπάθειες, καθώς και για τη σημαντική κατανόηση που έδειξαν καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	14
ABSTRACT	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ	
ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ – ΓΕΩΕΙΔΕΣ	
1.1 Επιφάνειες Αναφοράς	20
1.1.1 Γεωειδές	20
1.1.2 Ελλειψοειδές εκ περιστροφής	21
1.2 Αποχή Γεωειδούς	22
1.2.1 Ορισμός	22
1.2.2 Μοντέλα γεωειδούς	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ	
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	
2.1 Βασικές Έννοιες - Ορισμοί	25
2.2 Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού	25
2.2.1 Αρχή λειτουργίας δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού	25
2.2.2 Το σύστημα GPS και άλλα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού	27
2.2.3 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα	30
2.2.4 Κύριες μέθοδοι σχετικού δορυφορικού εντοπισμού	37
2.3 Αδρανειακά Συστήματα Εντοπισμού	40
2.3.1 Αρχή λειτουργίας αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού	40
2.3.2 Συστήματα αναφοράς αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού	45
2.3.3 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα	47

2.3.4 Βασικές κατηγορίες αδρανειακών συστημάτων	48
2.4 Σύστημα Ψηφιακού Οδομέτρου	49
2.4.1 Αρχή λειτουργίας ψηφιακού οδομέτρου	49
2.4.2 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ	
ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ SPAN SYSTEM	
3.1 Συνοπτικά	51
3.2 Μέρη Εξοπλισμού	51
3.2.1 Δέκτες δορυφορικού εντοπισμού	51
3.2.2 Αδρανειακή μονάδα εντοπισμού	53
3.2.3 Ψηφιακό οδόμετρο	54
3.2.4 Μονάδα συγχρονισμού αισθητήρων	55
3.3 Μέρη Λογισμικού	56
3.3.1 Λογισμικό χειρισμού μονάδας συγχρονισμού αισθητήρων	56
3.3.2 Λογισμικό εκ των υστέρων επεξεργασίας μετρήσεων	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ	
ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	
4.1 Προπαρασκευαστικές Εργασίες	60
4.1.1 Εξοικείωση με το σύστημα καταγραφής – πρακτικά προβλήματα	60
4.1.2 Όχημα καταγραφής – εγκατάσταση εξοπλισμού - κατασκευές	69
4.1.3 Κατασκευαστικά σχέδια άξονα καταγραφής	74
4.2 Σχεδιασμός Πειράματος	75
4.2.1 Παράμετροι συλλογής δεδομένων πεδίου	75
4.2.2 Επιλογή θέσεων σταθμών αναφοράς	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ	
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ	
5.1 Περιοχή Μελέτης	78
5.1.1 Γενική περιγραφή – Οριοθέτηση περιοχής	78
5.1.2 Κατασκευαστικά σχέδια σιδηροδρομικής γραμμής	80

5.2 Υπολογισμός Εκκεντροτήτων Αισθητήρων Εντοπισμού	80
5.2.1 Γενικά	80
5.2.2 Μεθοδολογία υπολογισμού εκκεντροτήτων	81
5.2.3 Εργασίες πεδίου	82
5.2.4 Υπολογισμός τιμών εκκεντροτήτων	85
5.3 Καταγραφή Δεδομένων Γραμμής “Λιόσια – Κιάτο”	87
5.3.1 Κατάσταση εξοπλισμού	87
5.3.2 Χρόνος διεξαγωγής πειράματος	89
5.3.3 Συλλογή δεδομένων - Προβλήματα	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Εισαγωγή	91
6.2 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς	91
6.2.1 Παρατηρήσεις σταθμών αναφοράς	91
6.2.2 Επίλυση βάσεων GPS	92
6.3 Επίλυση Τροχιάς Οχήματος Καταγραφής	93
6.3.1 Αρχεία καταγραφής	93
6.3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης	94
6.3.3 Εξαγωγή συντεταγμένων τροχιάς καταγραφής	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΜΗΣ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

7.1 Εισαγωγή	102
7.2 Δημιουργία Ενιαίας Τροχιάς Καταγραφής	102
7.2.1 Αφαίρεση σημείων από δεδομένα καταγραφής	102
7.2.2 Συνένωση επιμέρους τμημάτων καταγραφής	104
7.3 Απόκλιση Γεωειδούς από Μετρήσεις	104
7.3.1 Αντιστοίχιση σημείων κατασκευαστικών σχεδίων με τα σημεία καταγραφής	104
7.3.2 Υπολογισμός απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις του συστήματος καταγραφής	107

7.3.3 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις	107
7.3.4 Ακρίβεια υπολογισμού απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις	108
7.4 Απόκλιση Γεωειδούς με Χρήση Παγκόσμιων Μοντέλων Γεωειδούς	109
7.4.1 Περιγραφή παγκόσμιων μοντέλων γεωειδούς	109
7.4.2 Υπολογισμός απόκλισης γεωειδούς στην περιοχή μελέτης με βάση τα μοντέλα γεωειδούς EGM'96 και EGM'08	110
7.4.3 Ακρίβεια υπολογισμού απόκλισης γεωειδούς από παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς	111
7.5 Σύγκριση Τιμών Απόκλισης Γεωειδούς στην Περιοχή Μελέτης	111
7.6 Επιπλέον Μετρήσεις Επαλήθευσης	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΩΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

8.1 Εισαγωγή	118
8.2 Συμπεράσματα	118
8.2.1 Αναφορικά με το σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας των μετρήσεων	118
8.2.2 Αναφορικά με το ανάπτυγμα της τομής απόκλισης του γεωειδούς	119
8.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση	120

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SPAN

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

A1 Γενικά	122
A2 Περιγραφή Εξοπλισμού	122
A3 Μετατροπή Καλωδίου Οδομέτρου	123
A4 Διασύνδεση Εξοπλισμού και Ορισμός Ειδών Καταγραφών για Σταθερό Δέκτη	123
A5 Διασύνδεση Εξοπλισμού στο Όχημα Καταγραφής Δεδομένων	125
A6 Επικοινωνία Λογισμικού με PROPAK-V3 και Έναρξη Καταγραφών	126

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	
ΟΔΟΠΟΡΙΚΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	130
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	
ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΤΟΜΩΝ ΑΠΟΧΗΣ	
ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	
ΛΙΟΣΙΑ - ΚΙΑΤΟ	134
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ	142

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Ελλειψοειδές εκ περιστροφής
Σχήμα 1.2	Απόκλιση κατακορύφου
Σχήμα 1.3	Χάρτης μοντέλου γεωειδούς EGM'96
Σχήμα 2.1	Γεωμετρική ερμηνεία απόλυτου προσδιορισμού θέσης
Σχήμα 2.2	Γεωμετρία δορυφορικού σχηματισμού και δείκτης GDOP
Σχήμα 2.3	Ψευδοαπόσταση μεταξύ δορυφόρου S^i και δέκτη P_j
Σχήμα 2.4	Ασάφεια φάσης
Σχήμα 2.5	Σφάλμα πολυανάκλασης
Σχήμα 2.6	Σχετικός προσδιορισμός θέσης
Σχήμα 2.7	Στατικός προσδιορισμός θέσης
Σχήμα 2.8	Σχηματική παράσταση γυροσκοπίου TDF
Σχήμα 2.9	Σχηματική παράσταση ενός RLG γυροσκοπίου
Σχήμα 2.10	Σχηματική παράσταση ενός επιταχυνσιομέτρου με πυκνωτές
Σχήμα 2.11	Σχηματική παράσταση συστήματος αναφοράς κινούμενου σώματος
Σχήμα 2.12	Σχηματική παράσταση συστήματος σταθερής πλατφόρμας
Σχήμα 2.13	Τμήματα ψηφιακού οδομέτρου
Σχήμα 3.1	Δέκτης GNSS DL-V3
Σχήμα 3.2	Αδρανειακή μονάδα
Σχήμα 3.3	Οδόμετρο Corrsys Datron
Σχήμα 3.4	PROPAK-V3
Σχήμα 3.5	Λογισμικό Novatel CDU
Σχήμα 3.6	DL-Explorer για DL-V3
Σχήμα 3.7	Λογισμικό Inertial Explorer
Σχήμα 4.1	Πορεία διαδρομής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Σχήμα 4.2	Συνδυασμένη λύση GPS/IMU στη Δοκιμή 2
Σχήμα 4.3	Συνδυασμένη λύση GPS/IMU στη Δοκιμή 3
Σχήμα 4.4	Πορεία διαδρομής στο παλαιό αεροδρόμιο του Ελληνικού
Σχήμα 4.5	Προσάρτηση οδομέτρου και αδρανειακής μονάδας στο όχημα καταγραφής
Σχήμα 4.6	Συνδυασμένη λύση GPS/INS/DMI στη Δοκιμή 4
Σχήμα 4.7	Πορεία διαδρομής σε τμήμα της λεωφόρου Σταυρός – Λαύριο
Σχήμα 4.8	Διαστάσεις οχήματος
Σχήμα 4.9	Εξωτερική άποψη δρεζίνας
Σχήμα 4.10	Στερέωση αδρανειακής μονάδας στο όχημα καταγραφής
Σχήμα 4.11	Μέρη μετατροπής προσάρτησης οδομέτρου
Σχήμα 4.12	Μετατροπή προσάρτησης οδομέτρου
Σχήμα 4.13	Συνδεσμολογία συσσωρευτών
Σχήμα 4.14	Τμήμα κατασκευαστικών σχεδίων σιδηροδρομικής γραμμής
Σχήμα 4.15	Κατανομή σταθμών αναφοράς
Σχήμα 5.1	Πορεία διαδρομής Λιόσια – Κιάτο
Σχήμα 5.2	Ομαλοποιημένο γεωειδές αναφερόμενο στο ελλειψοειδές του GRS80
Σχήμα 5.3	Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς για αποτύπωση δρεζίνας
Σχήμα 5.4	Μέτρηση εκκεντροτήτων
Σχήμα 5.5	Κατακόρυφη ανύψωση μηδενικού σημείου αδρανειακής μονάδας για μέτρηση εκκεντροτήτων
Σχήμα 5.6	Τοποθέτηση κατάφωτου για μέτρηση εκκεντροτήτων στη κεραία GPS
Σχήμα 5.7	Σχέδιο αποτύπωσης μετρημένων σημείων

- Σχήμα 5.8 Πορεία διαδρομής – σταθμοί αναφοράς – σημεία ενδιάμεσων στάσεων
- Σχήμα 6.1 Επίλυση βάσεων σε λογισμικό TGOOffice v.1.63
- Σχήμα 6.2 Διαχωρισμός ενιαίου αρχείου καταγραφής στα επιμέρους τμήματα GNSS-INS-DMI
- Σχήμα 6.3 Εισαγωγή τιμών εκκεντροτήτων στο λογισμικό εκ των υστέρων επίλυσης
- Σχήμα 6.4 Επιλογή επίλυσης των καταγραφών με “υψηλή συνέργεια” και στις δύο κατευθύνσεις
- Σχήμα 6.5 Ομαλοποίηση της τροχιάς με τον αλγόριθμο RTS Smoother
- Σχήμα 6.6 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση Λιόσια→S1
- Σχήμα 6.7 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S1→S2
- Σχήμα 6.8 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S2→Κιάτο
- Σχήμα 6.9 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση Κιάτο→S1
- Σχήμα 6.10 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S1→Λιόσια
- Σχήμα 6.11 Εξαγωγή συντεταγμένων σε επιλεγμένα συστήματα αναφοράς
- Σχήμα 7.1 Αντιστοίχιση σημείων αρχείου καταγραφής με σημεία κατασκευαστικών σχεδίων
- Σχήμα 7.2 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς βάσει του σημείου καταγραφής
- Σχήμα 7.3 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς από μοντέλα EGM’96 και EGM’08
- Σχήμα 7.4 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM’96 και του συστήματος καταγραφής
- Σχήμα 7.5 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM’08 και του συστήματος καταγραφής
- Σχήμα 7.6 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM’96 και του συστήματος καταγραφής
- Σχήμα 7.7 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM’08 και του συστήματος καταγραφής
- Σχήμα 7.8 Σημείο μετρήσεων επαλήθευσης
- Σχήμα 7.9 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM’08, του συστήματος καταγραφής και του σημείου επαλήθευσης
- Σχήμα 7.10 Επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων
- Σχ. Παραρτήματος 1 Οριζοντιογραφία τροχιάς καταγραφής
- Σχ. Παραρτήματος 2 Σύγκριση γεωμετρικών υψομέτρων από μετρήσεις και ορθομετρικών υψομέτρων από κατασκευαστικά σχέδια
- Σχ. Παραρτήματος 3 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς βάση του σημείου καταγραφής
- Σχ. Παραρτήματος 4 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μοντέλα EGM’08 και EGM’96
- Σχ. Παραρτήματος 5 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’96
- Σχ. Παραρτήματος 6 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’08
- Σχ. Παραρτήματος 7 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’96
- Σχ. Παραρτήματος 8 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’08
- Σχ. Παραρτήματος 9 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς και μεταβλητοτήτων από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’96
- Σχ. Παραρτήματος 10 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς και μεταβλητοτήτων από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM’08

Σχ. Παραρτήματος 11 Διάγραμμα σύγκρισης μεταξύ αποχής γεωειδούς από
ομαλοποιημένες μετρήσεις, μοντέλο γεωειδούς EGM'08 και
σημεία ελέγχου

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1	Χαρακτηριστικά δεκτών GNSS συστήματος SPAN
Πίνακας 3.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά αδρανειακής μονάδας
Πίνακας 4.1	Τιμές εκκεντροτήτων αισθητήρων ως προς την αδρανειακή μονάδα
Πίνακας 5.1	Τιμές εκκεντροτήτων αισθητήρων ως προς την αδρανειακή μονάδα
Πίνακας 6.1	Γεωδαιτικές συντεταγμένες (WGS'84) σημείων αναφοράς και αβεβαιότητες βάσεων
Πίνακας 7.1	Συντεταγμένες Σημείου Επαλήθευσης (προβολή ΕΓΣΑ'87, h) και αβεβαιότητες επίλυσης της βάσης
Πίνακας Παραρτήματος 1	Εξοπλισμός πειραμάτων
Πίνακας Παραρτήματος 2	Μετατροπή καλωδίου οδομέτρου
Πίνακας Παραρτήματος 3	Είδη καταγραφών για σταθερό δέκτη GPS – DL-V3
Πίνακας Παραρτήματος 4	Διασύνδεση εξοπλισμού οχήματος
Πίνακας Παραρτήματος 5	Είδη καταγραφών στα τέσσερα πειράματα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς στο τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής Κινέττα – Κιάτο της Προαστιακής ΑΕ, με τη βοήθεια γνωστών ορθομετρικών και μετρημένων γεωμετρικών υψομέτρων. Τα ορθομετρικά υψόμετρα προέρχονται από τα κατασκευαστικά σχέδια της σιδηροδρομική γραμμής. Τα γεωμετρικά υψόμετρα προέκυψαν από την καταγραφή της σιδηροδρομικής γραμμής, με χρήση ειδικού οχήματος (δρεζίνα) και διασυνδεδεμένους γεωδαιτικούς αισθητήρες δορυφορικού εντοπισμού (GNSS), αδρανειακής μονάδας ακριβείας (INS) και ψηφιακού οδομέτρου (DMI).

Η υλοποίηση του έργου περιλαμβάνει μία σειρά από προπαρασκευαστικές εργασίες οι οποίες αποσκοπούν στην εκμάθηση του συστήματος εντοπισμού, στην εγκατάσταση και λειτουργία του στο όχημα καταγραφής, καθώς και στο σχεδιασμό των θέσεων των σταθμών αναφοράς του κινηματικού εντοπισμού. Το αντικείμενο του κυρίως πειράματος περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μετρήσεων για τον υπολογισμό των εκκεντροτήτων των αισθητήρων στο όχημα, επισκόπηση της περιοχής μελέτης και τελικά τη συλλογή των δεδομένων κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής.

Η επεξεργασία των μετρήσεων καταγραφής σε πρώτο στάδιο περιλαμβάνει επίλυση του κινηματικού εντοπισμού του οχήματος στο γραφείο και αξιολόγηση της ποιότητας και πληρότητας της λύσης. Επίσης, περιλαμβάνει τη συγγραφή λογισμικού για τη διαχείριση των δεδομένων και αποτελεσμάτων (μετατροπές συντεταγμένων αναφοράς, δημιουργία ενιαίας τροχιάς κ.α.), καθώς και για τον υπολογισμό της αποχής του γεωειδούς από τα μετρημένα μεγέθη. Το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας αφορά στον υπολογισμό της αποχής του γεωειδούς στην περιοχή από τα παγκόσμια μοντέλα EGM'96 και EGM'08.

Από την ανάλυση και συγκριτική αντιπαράθεση της αποχής του γεωειδούς από μετρημένα υψόμετρα και βαρυτικά μοντέλα προκύπτει μία συγκεκριμένη διαφορά της τάξης των 40 cm μεταξύ των δύο εκτιμήσεων σε όλο το μήκος της διαδρομής.

ABSTRACT

The aim of this work is to compute the profile of geoid separation (undulation) along a sample cross-section in Central Greece and its cross-comparison with the estimations derived by Earth Geopotential Models. In our approach the cross-section used in this study coincides with the railway track from Kineta to Kiato stations (~ 50 km long) of the suburban railway connecting the metropolis of Athens with north Peloponnesus. This assumption facilitates for precise orthometric heights along the rail tracks. Moreover, geometric heights are easy to be computed on the very same track based on GNSS techniques; thus a true value of geoid separation can be computed.

Navigational data were acquired using a suitably modified railway vehicle in collaboration with the National Railway Company. Field work involved setting up the geodetic sensors on the vehicle, preliminary testing of the system and data acquisition. More specifically, the positioning system comprises three GNSS (L1/L2) receivers, a high accuracy inertial unit and a distance measuring instrument. All various sensors were connected and operated through SPAN system, supplied by NovAtel. Prior to data collection, a dimensional survey was undertaken to compute the lever-arms between sensors, so that all measurements are reduced to a pre-defined point.

Data processing involves vehicle positioning in post-processing mode and its associated quality measures. At a next stage, the vehicle trajectory was reduced on the rail track axis supplied in the as-built plans; hence a direct computation of geoid separation was produced. Therefore, the computed profile from the recorded trajectory was directly compared with the geoidal separation obtained from the EGM'96 and EGM'08 geopotential models.

The conclusions drawn from such a comparison reveal a systematic difference (or the order of ~ 40 cm) between measured and estimated values. More importantly, the slope of the two geoidal separation curves nearly equals each other, suggesting that global geopotential models (especially EGM'08) can sufficiently describe the local variation in the geoidal separation.

Γενικά

Η μελέτη της επιφάνειας του γεωειδούς αποτελεί βασικό πρόβλημα στην επιστήμη της Γεωδαισίας δεδομένου ότι περιγράφει το σχήμα και τη μορφή της γης. Ο προσδιορισμός του γεωειδούς από την επιφάνεια αναφοράς ενός ελλειψοειδούς αναφοράς επιτυγχάνεται μέσω υπολογισμού της αποχής του γεωειδούς που ορίζεται από τη απόσταση σε ένα σημείο μεταξύ των δύο επιφανειών. Σε παγκόσμια κλίμακα, η απόκλιση του γεωειδούς υπολογίζεται σύμφωνα με γεωδυναμικά μοντέλα, τα οποία έχουν προκύψει με μετρήσεις βαρύτητας και δορυφορικής αλτιμετρίας. Ωστόσο, πρωτογενώς ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς πραγματοποιείται μέσω της διαφοράς γεωμετρικών και ορθομετρικών υψομέτρων μία περιοχής, δεδομένου του ότι η επιφάνεια αναφοράς των γεωμετρικών υψομέτρων είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής και αντίστοιχα των ορθομετρικών υψομέτρων είναι η ΜΣΘ που προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια το γεωειδές.

Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός της αποχής του γεωειδούς κατά μήκος του τμήματος της σιδηροδρομικής γραμμής Κινέττα – Κιάτο. Ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς επιτυγχάνεται με τη χρήση ορθομετρικών υψομέτρων ακριβείας και μετρημένων γεωμετρικών υψομέτρων κατά μήκος της περιοχής μελέτης. Η επιλογή της συγκεκριμένης διαδρομής για την εξαγωγή της τομής του γεωειδούς πραγματοποιήθηκε κυρίως λόγω της έντονης μεταβολής που παρουσιάζει το γεωειδές στη συγκεκριμένη περιοχή. Η μέτρηση των γεωμετρικών υψομέτρων πραγματοποιείται με τη χρήση διασυνδεδεμένων αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού (GNSS), αδρανειακής μονάδας (INS) και ψηφιακού οδομέτρου (DMI). Τα ορθομετρικά υψόμετρα κατά μήκος της γραμμής κίνησης διατέθηκαν από την εταιρία κατασκευής του έργου μετά από συνεννόηση με τον Οργανισμό Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ).

Οι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου είναι:

- η επιλογή, διασύνδεση, εκμάθηση και ο πειραματικός έλεγχος κατάλληλου εξοπλισμού προκειμένου να επιτευχθεί η καταγραφή και επίλυση των γεωμετρικών υψομέτρων κατά μήκος της περιοχής μελέτης
- η συλλογή δεδομένων καταγραφής (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά) κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής με τη χρήση του ολοκληρωμένου συστήματος καταγραφής της ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- η επεξεργασία των μετρήσεων και εξαγωγή του αναπτύγματος του γεωειδούς κατά μήκος της γραμμής
- η εκτέλεση ανεξάρτητων μετρήσεων για έλεγχο των μετρημένων στοιχείων
- ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς με βάση παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς και σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Δομή Εργασίας

Συνολικά η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει οκτώ κεφάλαια, τα περιεχόμενα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις επιφάνειες αναφοράς του γεωειδούς και του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, δίνεται ο ορισμός της απόκλισης του γεωειδούς και του τρόπου αναπαράστασής του. καθώς και τα κριτήρια επιλογής για τη μελέτη της απόκλισης του γεωειδούς στη συγκεκριμένη περιοχή.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρονται τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα εντοπισμού. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές, οι μεθοδολογίες μέτρησης, τα σφάλματα, καθώς και οι κατηγορίες των δορυφορικών, αδρανειακών και γραμμικών συστημάτων.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού SPAN System, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή μετρήσεων. Στη ΔΕ παρουσιάζονται τα μέρη του συστήματος, καθώς και το λογισμικό που

το συνοδεύει τόσο για τον χειρισμό του, όσο και για την εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων.

Το Τέταρτο Κεφάλαιο περιέχει τις προπαρασκευαστικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εξοικείωση με το σύστημα καταγραφής, την αντιμετώπιση πρακτικών προβλημάτων πριν την εκτέλεση του κυρίως πειράματος καθώς και την μελέτη των κατασκευαστικών σχεδίων της σιδηροδρομικής γραμμής. Ακολουθεί η περιγραφή των σταδίων σχεδιασμού του κυρίως πειράματος με τον καθορισμό των παραμέτρων συλλογής των δεδομένων πεδίου, καθώς και την επιλογή των θέσεων των σταθμών αναφοράς.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση της περιοχής μελέτης, οπότε οριοθετείται το ακριβές τμήμα μελέτης της σιδηροδρομικής γραμμής και επισημαίνεται στα κατασκευαστικά σχέδια της γραμμής. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος μέτρησης και υπολογισμού των τιμών των εκκεντροτήτων μεταξύ των αισθητήρων στο όχημα καταγραφής.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σταθμών αναφοράς, καθώς και την εξαγωγή των συντεταγμένων των σημείων καταγραφής.

Στο Έβδομο Κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος ανάλυσης των μετρήσεων με σκοπό τον υπολογισμό της τομής του γεωειδούς κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας της ενιαίας τροχιάς καταγραφής από τα αρχεία καταγραφής που δημιουργήθηκαν, την συσχέτισή τους με τα σημεία γνωστών ορθομετρικών υψομέτρων και τελικά την εξαγωγή των τιμών της απόκλισης του γεωειδούς. Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος εξαγωγής της απόκλισης του γεωειδούς σύμφωνα με τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς EGM'96 και EGM'08 και δίνεται και η ακρίβεια υπολογισμού των αντίστοιχων τιμών. Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των εξαγόμενων τιμών από τις μετρήσεις και τα μοντέλα και γίνεται αναφορά στις επιπρόσθετες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, με στόχο τον έλεγχο των μετρήσεων του οχήματος καταγραφής.

Στο Όγδοο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω χρήση του συστήματος καταγραφής και διερεύνησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - ΓΕΩΕΙΔΕΣ

1.1 Επιφάνειες Αναφοράς

1.1.1 Γεωειδές

Γεωειδές είναι η επιφάνεια που προσεγγίζει το σχήμα της Γης. Εξ' ορισμού, το γεωειδές είναι κάθετο στη διεύθυνση της βαρύτητας σε κάθε σημείο του, και προσεγγίζεται για πολλές εφαρμογές ικανοποιητικά από τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ). Σε παγκόσμια κλίμακα, η απόσταση μεταξύ γεωειδούς και ΜΣΘ είναι έως 1 m (και αλλάζει αργά κατά μήκος δεκάδων χιλιομέτρων).

Ο προσδιορισμός του γεωειδούς, τοπικά ή σε παγκόσμια κλίμακα, μπορεί να προέλθει από παρατηρήσεις βαρύτητας, παρατηρήσεις δορυφορικής αλτιμετρίας και από άλλες πηγές. Σε παγκόσμια κλίμακα, η μορφή του γεωειδούς μπορεί να υπολογιστεί μέσω συντελεστών σφαιρικών αρμονικών. Με αυτόν τον τρόπο, το γεωειδές εκφράζεται μέσω αλληλουχίας συναρτήσεων με πολύ μικρό μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, όταν ένα μοντέλο περιγράφεται από μία συνάρτηση βαθμού N_{\max} , τότε μπορεί να μοντελοποιηθεί μήκος κύματος $180^\circ/N_{\max}$ (J C Aliffe, 2003).

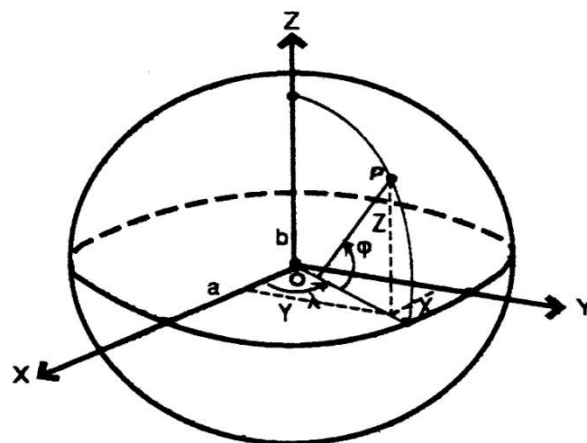
Η πολυπλοκότητα του γεωειδούς (σχήμα, μορφή) οφείλεται στις ανωμαλίες του Γήινου πεδίου βαρύτητας, στις μεταβολές πυκνότητας των μαζών της Γης. Ειδικότερα, η ανωμαλία του γεωειδούς που παρατηρείται για μεγάλα μήκη κύματος οφείλεται σε βαθύτερα αίτια, όπως στην αλληλεπίδραση μεταξύ του φλοιού και του μανδύα της γης που εμφανίζεται μέσω της τεκτονικής δράσης στα όρια των τεκτονικών πλακών. Τα γνωρίσματα αυτά περιγράφονται επαρκώς από τα παγκόσμια μοντέλα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση μικρότερου μήκους κύματος σχετίζονται με ανωμαλίες της γήινης επιφάνειας.

Τα υψόμετρα σημείων που χρησιμοποιούν ως επιφάνεια αναφοράς το γεωειδές (σύστημα της ΜΣΘ) ονομάζονται ορθομετρικά υψόμετρα και συμβολίζονται με H . Τα ορθομετρικά υψόμετρα χρησιμοποιούνται σε τοπογραφικές/γεωδαιτικές και

χαρτογραφικές εφαρμογές. Τα υψόμετρα αυτά προκύπτουν από γεωμετρική χωροστάθμιση και για εφαρμογές ακριβείας γίνονται κατάλληλες διορθώσεις προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη παραλληλία των χωροσταθμικών επιφανειών. Οι διορθώσεις αυτές είναι της τάξης των μερικών cm σε αποστάσεις δεκάδων km (Βέης, 2006). Η υψομετρική αφετηρία της ΜΣΘ στα διεθνή υψομετρικά συστήματα προκύπτει με πληροφoρία από παλιρροιογράφους. Δεδομένου ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ ΜΣΘ και γεωειδούς, το σύστημα αναφοράς των υψομέτρων σε κάθε χώρα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις.

1.1.2 Ελλειψοειδές εκ περιστροφής

Ως μαθηματική έκφραση απεικόνισης του σχήματος της Γης επιλέγεται το ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Το ελλειψοειδές εκ περιστροφής δημιουργείται με τη περιστροφή μιας έλλειψης γύρω από το μικρό της ημιάξονα. Ένα τέτοιο ελλειψοειδές ορίζεται αποκλειστικά με δύο μόνο παραμέτρους, το μεγάλο ημιάξονα (a) και την επιπλάτυνση του γεωειδούς (f). Επίσης χρησιμοποιούνται και οι παράμετροι e (πρώτη εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς) και e' (δεύτερη εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς).



Σχ. 1.1 Ελλειψοειδές εκ περιστροφής [Βέης et al., 2006]

Fig. 1.1 Rotated ellipsoidal [Veis et al., 2006]

Το ελλειψοειδές προσεγγίζει το σχήμα της γης, αλλά δεν την αναπαριστά πλήρως. Αν προσαρμοστεί ένα ελλειψοειδές έτσι ώστε να εφαρμόζει όσο το δυνατόν καλύτερα στο γεωειδές, οι διαφορές μεταξύ τους είναι της τάξης των ± 100 m με μέσο

τετραγωνικό σφάλμα (rms) παγκοσμίως ~ 30 m. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ γεωειδούς και ελλειψοειδούς είναι γνωστή ως απόκλιση του γεωειδούς και συμβολίζεται με το γράμμα N. Η ποσότητα αυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

Η κατεύθυνση της κατακορύφου (κάθετα στο γεωειδές) συνήθως δε συμπίπτει με την κάθετη στο ελλειψοειδές. Η γωνία μεταξύ των δύο καλείται απόκλιση της κατακορύφου και αναλύεται σε δύο συνιστώσες, κατά τη διεύθυνση του μεσημβρινού (ξ) και κατά τη διεύθυνση του πρώτου κάθετου επιπέδου στο μεσημβρινό (η). Οι τιμές των γωνιών αυτών κυμαίνονται σε μερικά δευτερόλεπτα της μοίρας.

Σε κάθε χώρα, ο κλαστικός ορισμός ενός γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς προκύπτει με τις συντεταγμένες που δίνονται σε ένα βασικό σημείο που καλείται αφετηρία και το αζιμούθιο προς ένα δεύτερο σημείο. Οι τιμές αυτές όταν συνδυάζονται με τις παραμέτρους του ελλειψοειδούς αναφοράς ορίζουν το λεγόμενο γεωδαιτικό Datum. Κάθε γεωδαιτικό Datum υλοποιείται με τις συντεταγμένες που δίνονται στα πρωτεύοντα σημεία ελέγχου (π.χ. τριγωνισμός πρώτης τάξης) που ανήκουν στο σύστημα αυτό.

Τα υψόμετρα που μετρώνται ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς ονομάζονται γεωμετρικά (h). Τα γεωμετρικά υψόμετρα χρησιμοποιούνται κατά τους γεωδαιτικούς υπολογισμούς για την αναγωγή των μετρημένων πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια αποστάσεων στο ελλειψοειδές αναφοράς, αλλά και ως τρίτη συνιστώσα μαζί με τις ελλειψοειδείς συντεταγμένες (φ , λ) για τον προσδιορισμό σημείων στο χώρο και τη μετατροπή τους σε καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) (Βέης, 2006).

1.2 Αποχή Γεωειδούς

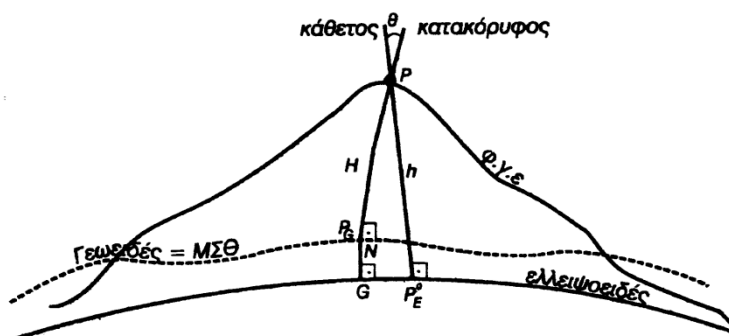
1.2.1 Ορισμός

Αποχή γεωειδούς ορίζεται το υψόμετρο του γεωειδούς από το ελλειψοειδές κατά την κατακόρυφο. Η σχέση μεταξύ ορθομετρικών και γεωμετρικών υψομέτρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, δίνεται από την Εξίσωση 1.1, με την προϋπόθεση ότι

η απόκλιση της κατακόρυφου είναι μικρή. Η παραπάνω σχέση επιτρέπει τον υπολογισμό των ορθομετρικών υψομέτρων, θεωρώντας γνωστή την απόκλιση του γεωειδούς καθώς και την τιμή των γεωμετρικών υψομέτρων, οι οποίες προκύπτουν από δορυφορικές παρατηρήσεις.

Επίσης, η αποχή του γεωειδούς μπορεί να προσδιοριστεί με αστρογεωδαιτική χωροστάθμιση ή και με άλλες μεθόδους.

$$h = H + N \quad (1.1)$$



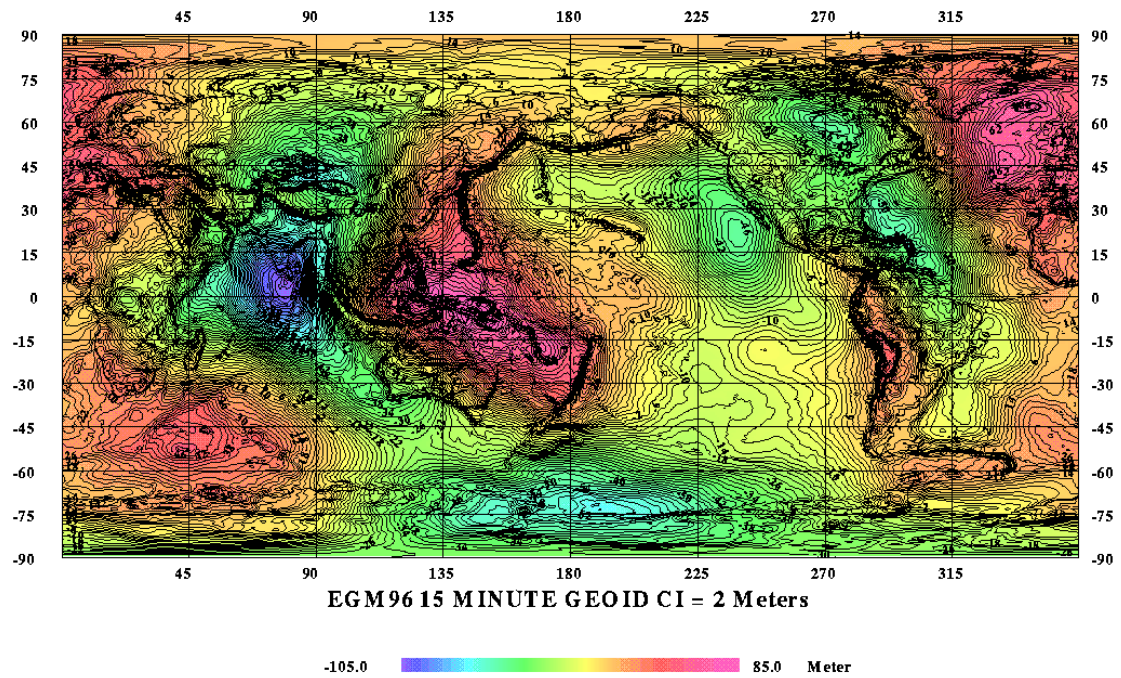
Σχ. 1.2 Απόκλιση κατακόρυφου [Βέης et al., 2006]

Fig. 1.2 Deviation of the vertical [Veis et al., 2006]

1.2.2 Μοντέλα γεωειδούς

Τα μοντέλα του γεωειδούς αναπαριστούν τις ανωμαλίες του πεδίου βαρύτητας της γης και συνήθως αναπαριστούνται με τη χρήση σφαιρικών αρμονικών. Τα πιο πρόσφατα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς είναι το EGM'96 (Earth Gravitational Model) και το EGM'08. Το EGM'96 υλοποιείται από κάρναβο 30'x30' και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της αποχής του γεωειδούς με ακρίβεια ~ 1 m. Ο βαθμός του πολωνύμου των σφαιρικών αρμονικών από το οποίο προήλθε είναι $N_{\max}=360$. Το νεότερο μοντέλο EGM'08 αποτελείται από κάρναβο 5'x5' ενώ ο βαθμός του πολωνύμου των σφαιρικών αρμονικών είναι $N_{\max}=2159$.

Οι συνήθεις τιμές της αποχής του γεωειδούς στην Ελλάδα κυμαίνονται μεταξύ +15 έως +45m, ενώ σε παγκόσμια κλίμακα κυμαίνονται μεταξύ -105 έως +85m (Σχήμα 1.3).



Σχ. 1.3 Χάρτης μοντέλου γεωειδούς EGM'96 [<http://cddis.gsfc.nasa.gov>]

Fig. 1.3 Earth Gravitational Model '96 [<http://cddis.gsfc.nasa.gov>]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

2.1 Βασικές Έννοιες – Ορισμοί

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα χερσαία συστήματα εντοπισμού. Οι βασικοί αισθητήρες που συνθέτουν τα ολοκληρωμένα συστήματα είναι δέκτες GNSS, αδρανειακό σύστημα εντοπισμού, καθώς και ψηφιακό οδόμετρο υψηλής ακρίβειας. Ο βασικός λόγος σύζευξης των ετερογενών συστημάτων εντοπισμού είναι η επίτευξη συνεχών μετρήσεων υψηλής ποιότητας (ακρίβεια και αξιοπιστία). Συγκεκριμένα, το σύστημα GNSS απορροφά το σφάλμα των μετρήσεων της αδρανειακής μονάδας. Παράλληλα, η αδρανειακή μονάδα συμπληρώνει τις μετρήσεις του συστήματος GNSS σε περιόδους απώλειας δορυφορικού σήματος. Τέλος, οι μετρήσεις του ψηφιακού οδομέτρου αξιοποιούνται στις περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις του συστήματος GNSS είναι μειωμένης ακρίβειας καθώς και σε άλλες λειτουργίες.

2.2 Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού

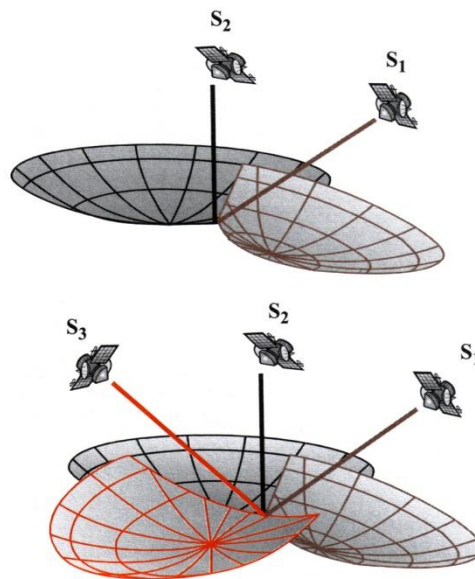
2.2.1 Αρχή λειτουργίας δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού

Ο όρος GNSS προκύπτει από τις λέξεις Global Navigation Satellite Systems, δηλαδή Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης. Η πλοήγηση αναφέρεται σε κινούμενα αντικείμενα και περιλαμβάνει τον προσδιορισμό και την καθοδήγηση της τροχιάς τους. Η τροχιά ενός κινούμενου αντικειμένου περιγράφεται από τη θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του κινητού κάθε χρονική στιγμή.

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού στηρίζονται στη χρήση Γεωδαιτικών Δορυφόρων, οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη και εκπέμπουν τη θέση τους και άλλα στοιχεία με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι μετρήσεις στους επίγειους δέκτες καταλήγουν στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δέκτη και δορυφόρων με γνωστό ρυθμό καταγραφής. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης διαβάζει ένα μήνυμα δεδομένων πλοήγησης που περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης και της ταχύτητάς του σε πραγματικό

χρόνο. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τα στοιχεία των τροχιών των δορυφόρων, παραμέτρους διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα.

Ο δέκτης υπολογίζει τη θέση του κάθε φορά ως τομή τριών σφαιρών με κέντρα τους αντίστοιχους δορυφόρους και ακτίνες τις μετρημένες αποστάσεις. Από την τομή αυτή προκύπτουν δύο σημεία – εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στη γη είναι το ζητούμενο (Σχήμα 2.1).

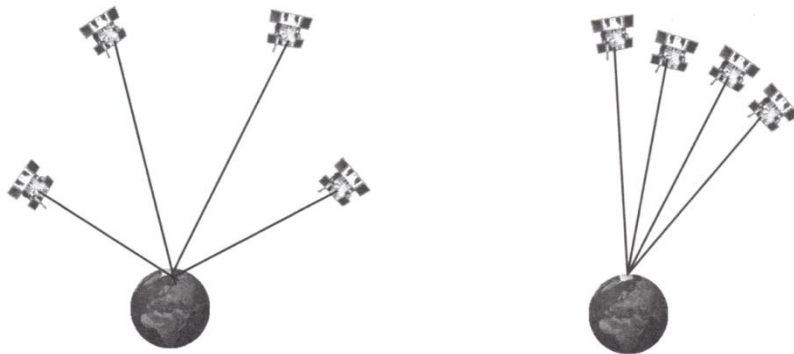


Σχ. 2.1 Γεωμετρική ερμηνεία απόλυτου προσδιορισμού θέσης [Φωτίου – Πικριδάς, 2006]

Fig. 2.1 Representation of satellite positioning [Fotiou – Pikridas, 2006]

Ο δορυφορικός προσδιορισμός θέσης, διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες, απόλυτο και τον σχετικό. Με τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου ως προς γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς από παρατηρήσεις μόνο ενός δέκτη. Ο προσδιορισμός θέσης με τη μέθοδο αυτή μπορεί να παρομοιασθεί με οπισθοτομία μηκών στο χώρο όπου τα γνωστά σημεία είναι οι δορυφόροι (σημεία γνωστών συντεταγμένων), ενώ τα άγνωστα σημεία είναι οι δέκτες GNSS και παρατηρήσεις οι αποστάσεις μεταξύ δεκτών και δορυφόρων. Στον σχετικό προσδιορισμό θέσης, προσδιορίζεται το διάνυσμα στο χώρο μεταξύ δύο σημείων. Αυτό ισοδυναμεί με υπολογισμό των συντεταγμένων ενός σημείου ως προς ένα άλλο του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές. Στη μέθοδο αυτή απαιτούνται ταυτόχρονες παρατηρήσεις των δύο δεκτών προς ίδιους δορυφόρους, οπότε ελαχιστοποιούνται συστηματικά σφάλματα.

Ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται άμεσα η ποιότητα των δορυφορικών μετρήσεων και άρα η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης, είναι εκείνος της γεωμετρίας του δορυφορικού σχηματισμού που εκφράζεται μέσω του δείκτη DOP (Dilution of Precision) (Σχήμα 2.2). Ο δείκτης αυτός προκύπτει ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μεταβλητοτήτων των εκτιμήσεων των συντεταγμένων και του σφάλματος του ρολογιού του δέκτη. Όταν ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην ποιότητα των συντεταγμένων στις τρεις διαστάσεις, ονομάζεται PDOP (Position Dilution of Precision). Ο δείκτης που αφορά την κατακόρυφη θέση ονομάζεται VDOP (Vertical Dilution of Precision), ενώ εκείνος που αφορά την οριζόντια θέση HDOP (Horizontal Dilution of Precision).



Σχ. 2.2 Γεωμετρία δορυφορικού σχηματισμού και δείκτης GDOP [Φωτίου – Πικριδάς, 2006]

Fig. 2.2 Satellite geometry and GDOP indicator [Fotiou – Pikridas, 2006]

Η ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο είναι της τάξης των μερικών μέτρων (5 – 15 m). Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια, της τάξης μερικών χιλιοστών. Η επίτευξη τέτοιας ακρίβειας, προϋποθέτει τη μέτρηση φάσεων και εξαρτάται από το μήκος της βάσης και τη διάρκεια των παρατηρήσεων.

2.2.2 Το σύστημα GPS και άλλα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

2.2.2α Μέρη του συστήματος GPS

Το σύστημα GPS αρχικά χρησιμοποιήθηκε για στρατιωτικούς σκοπούς από την κυβέρνηση των ΗΠΑ. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στον προσδιορισμό της θέσης και ταχύτητας σημείων πάνω στη γη, με γνωστές τις τροχιές

των δορυφόρων του συστήματος. Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης, είναι το τμήμα διαστήματος, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρηστών.

Το τμήμα διαστήματος του συστήματος GPS, αποτελείται από 29 δορυφόρους των σειρών BLOCK II, IIA, IIR, IIR-M. Κάθε σειρά συμπληρώνει ή αντικαθιστά σταδιακά τις προηγούμενες δεδομένου ότι οι δορυφόροι έχουν ορισμένη διάρκεια ζωής. Ο πρώτος δορυφόρος ήταν της σειράς BLOCK I (1^η εκτόξευση το 1978). Οι δορυφόροι της τροχιάς II τέθηκαν σε τροχιά το 1989, ενώ το Σεπτέμβριο του 2005 εκτοξεύθηκε ο πρώτος δορυφόρος της σειράς IIR-M και το 2006 έγινε η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου της σειράς BLOCK IIF (με επιπρόσθετα εκπεμπόμενα σήματα).

Το τμήμα ελέγχου του συστήματος GPS αποτελείται από πέντε επίγειους μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης, τρεις σταθμούς τηλεπικοινωνιών, και έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου.

Τέλος, το τμήμα των χρηστών διαχωρίζεται σε στρατιωτικούς και πολιτικούς χρήστες, με δυνατότητα χρήσης του συστήματος σε κάθε περιοχή της γης για πλοήγηση ή εντοπισμό θέσης.

Το σύστημα GPS παρέχει ευρύ φάσμα εφαρμογών, δεδομένου ότι προσφέρει αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Δύο βασικές κατηγορίες εφαρμογών είναι γεωδαιτικές / τοπογραφικές εργασίες και εφαρμογές πλοήγησης.

2.2.2β Άλλα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

Παράλληλα με το GPS, η πρώην Σοβιετική Ένωση προχώρησε στη δημιουργία παρόμοιου συστήματος παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης με την ονομασία GLONASS. Σύμφωνα με το σχεδιασμό του συστήματος, ο δορυφορικός σχηματισμός του περιλαμβάνει 24 δορυφόρους σε τροχιά (21 +3 εφεδρικούς), ισοκαταναμημένους σε τροχιακά επίπεδα με οχτώ δορυφόρους στο κάθε ένα. Οι κώδικες που εκπέμπονται από το ηλεκτρομαγνητικό σήμα των δορυφόρων είναι διαμορφωμένοι και στις δύο συχνότητες με αποτέλεσμα να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε σχέση με το GPS που έχει κώδικα C/A διαμορφωμένο μόνο

στην L1 και τον κώδικα P κρυπτογραφημένο. Το σύστημα GLONASS, ξεκίνησε με φιλόδοξους στόχους και κατάφερε μέχρι και το 1995 να διατηρήσει ικανοποιητικά επίπεδα εξυπηρέτησης και διαθεσιμότητας δορυφόρων. Ωστόσο μερικοί από τους δορυφόρους που εκτοξεύτηκαν μέχρι το 1991 σταμάτησαν να λειτουργούν. Από το σημείο αυτό και μέχρι σήμερα η Ρωσία δεν ολοκλήρωσε το σύστημα με αποτέλεσμα να βρίσκονται σε λειτουργία λιγότεροι από τους μισούς προβλεπόμενους δορυφόρους.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει μέσω της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA: European Space Agency) το σύστημα GALILEO. Πρόκειται για ένα πολιτικό παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας. Ο πρώτος δορυφόρος GIOVE-A (Galileo In – Orbit Validation Element) εκτοξεύθηκε στις 28 Δεκεμβρίου 2005 και τα πρώτα αποτελέσματα εκπομπής και ανάλυσης του σήματος ήταν επιτυχή. Τον Απρίλιο του 2006 τέθηκε σε τροχιά ο δεύτερος δορυφόρος GIOVE-B για την ολοκλήρωση των ελέγχων και θα ακολουθήσει η εκτόξευση επιχειρησιακών δορυφόρων. Το σύστημα θα αποτελείται συνολικά από 30 δορυφόρους (27+3 εφεδρικούς) τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα, το ύψος τροχιάς των οποίων θα είναι ~ 23600 km. Η επιχειρησιακή ετοιμότητα του συστήματος αναμένεται να επιτευχθεί μετά το 2010.

Το BeiDou είναι ένα εθνικό, παντός καιρού δορυφορικό σύστημα πλοήγησης που έχει αναπτυχθεί στην Κίνα. Το σύστημα στην παρούσα κατάσταση (BeiDou-1), αποτελείται από 3 γεωσύγχρονους δορυφόρους (δύο σε λειτουργία) και έναν εφεδρικό). Οι δύο δορυφόροι σε λειτουργία εκτοξεύθηκαν τον Οκτώβριο και Δεκέμβριο του 2000, ενώ ο εφεδρικός τον Μάιο του 2003. Το σύστημα BeiDou παρέχει υπηρεσίες πλοήγησης και επικοινωνίας τόσο σε στρατιωτικούς όσο και σε πολιτικούς χρήστες της Κίνας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετα με τα συστήματα GPS και GLONASS. Απώτερος σκοπός της Κίνας είναι να τεθεί σε επιχειρησιακή ετοιμότητα το BeiDou-2 ή Compass, το οποίο θα αποτελεί ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης. Έχει σχεδιαστεί ώστε να αποτελείται από 35 δορυφόρους, 5 γεωστατικούς και 30 μέσου ύψους τροχιάς, με σκοπό να παρέχει πλήρη κάλυψη της γήινης επιφάνειας. Στο πλαίσιο ανάπτυξης του BeiDou-2, εκτοξεύθηκε τον Απρίλιο του 2007 ο πρώτος δορυφόρος (BeiDou-2A), ο οποίος είναι ένας από τους 30 μέσου ύψους τροχιάς δορυφόρους που προβλέπονται.

Η κυβέρνηση της Ιαπωνίας σε συνεργασία με την ιαπωνική βιομηχανία, προκειμένου να ικανοποιήσει εμπορικές ανάγκες, ανέπτυξε ένα εθνικό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, γνωστό ως QZSS (Quasi-Zenith Satellite System). Πρόκειται για ένα αυτόνομο σύστημα, συμβατό με το GPS, που εξυπηρετεί την Ιαπωνία, καθώς επίσης και ολόκληρη την Ασία. Επιπρόσθετα, το QZSS παρέχει τόσο ραδιοφωνικές όσο και υπηρεσίες επικοινωνιών στην Ιαπωνία. Η δομή του συστήματος αυτού αποτελείται από τρεις κεκλιμένες, μεγάλου ύψους τροχιές, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από έναν δορυφόρο. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η διαλειτουργικότητά του με το GPS, το QZSS χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες L1, L2 και L5. Μελλοντικά, το σύστημα θα αποτελείται από 7 γεωστατικούς δορυφόρους, με αποτέλεσμα τουλάχιστον 4 δορυφόροι να είναι ορατοί από σχετικά μεγάλες γωνίες ύψους (canyons).

2.2.3 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα

2.2.3α Το δορυφορικό σήμα και τύποι δορυφορικών μετρήσεων

Το δορυφορικό σήμα. – Κάθε δορυφόρος GPS εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σε δύο φέρουσες συχνότητες, διαμορφωμένες από δύο ψηφιακούς κώδικες και από ένα μήνυμα ναυσιπλοΐας (Ahmed, 2006). Η δομή του σήματος αυτού διαφέρει μεταξύ των δορυφόρων πρώτης γενιάς GPS (Blocks II, IIA, IIR) και σύγχρονων δορυφόρων (Blocks IIR-M). Από τις δύο φέρουσες συχνότητες, η L1 παράγεται στα 1575.42MHz, ενώ η L2 στα 1227.60MHz. Τα αντίστοιχα μήκη κύματος των συχνοτήτων αυτών είναι ~ 19 cm και 24.4 cm, αντίστοιχα. Ο συνδυασμός δύο συχνοτήτων επιτρέπει τη διόρθωση ενός σημαντικού σφάλματος GPS, γνωστό ως ιονοσφαιρική καθυστέρηση. Ο προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο απαιτεί τη μέτρηση αποστάσεων μεταξύ δεκτών και δορυφόρων.

Οι δορυφόροι πρώτης γενιάς GPS, στα σήματά τους, παράγουν δύο κώδικες, γνωστούς ως C/A και P (στην πραγματικότητα αντί του P, ο κρυπτογραφημένος κώδικας P(Y)), που δεν είναι παρά δυαδικές ακολουθίες ψευδοτυχαίου χαρακτήρα. Οι κώδικες αυτοί δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και για τον λόγο αυτό, προστίθενται πάνω στα δύο σήματα – φορείς της δέσμης L, με τον ακόλουθο τρόπο. Στη φέρουσα συχνότητα L1 διαμορφώνεται ολόκληρος

ο κώδικας C/A και ένα τμήμα του κώδικα P(Y), ενώ στην L2 διαμορφώνεται το υπόλοιπο τμήμα του κώδικα P(Y). Η διαμόρφωση είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση του χρόνου διάδοσης (χρόνου μετάδοσης του σήματος) από τον δορυφόρο στον δέκτη. Οι C/A και P είναι κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου – PRN (Pseudo Random Noise), διότι ενώ μοιάζουν με τυχαία σήματα (θόρυβος), στην πραγματικότητα παράγονται από μαθηματικούς αλγορίθμους. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο φέρουσες συχνότητες διαμορφώνονται και από το μήνυμα ναυσιπλοΐας, για την παροχή πρόσθετων πληροφοριών, όπως είναι τα στοιχεία της τροχιάς των δορυφόρων (δορυφορική εφημερίδα) και παράμετροι για τον συγχρονισμό των ρολογιών δορυφόρου και δέκτη. Τα τρία ψηφιακά αυτά μηνύματα (C/A, P(Y), μήνυμα ναυσιπλοΐας) αποτελούνται από ακολουθίες δυαδικών ψηφίων και επαναλαμβάνονται στην αρχή κάθε εβδομάδας (Σάββατο 24:00 – Κυριακή 00:00).

Οι εκσυγχρονισμένοι δορυφόροι της σειράς Block IIR-M εκπέμπουν επιπλέον ένα νέο αναβαθμισμένο πολιτικό σήμα στον φορέα L2, γνωστό ως κώδικα L2C, καθώς και δύο στρατιωτικούς κώδικες (L1M και L2M), βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα προσδιορισμού θέσης από τα 80 m στα 3-5 m. Οι δορυφόροι της σειράς Block IIF εκπέμπουν επιπλέον έναν καινούργιο πολιτικό κώδικα, γνωστό ως L5, αναβαθμίζοντας σημαντικά την πολιτική χρήση του συστήματος και βελτιώνοντας περαιτέρω την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο στο επίπεδο του 1-3 m (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).

Τύποι δορυφορικών μετρήσεων. – Η δομή του δορυφορικού σήματος είναι δύο φορείς συχνοτήτων (L1, L2) διαμορφωμένοι από δύο κώδικες PRN (C/A (μόνο στον φορέα L1), P(Y)) και ένα μήνυμα δεδομένων. Η μέτρηση στους κώδικες δίνει την παρατήρηση της ψευδοαπόστασης, ενώ η μέτρηση στους φορείς δίνει την παρατήρηση της φάσης.

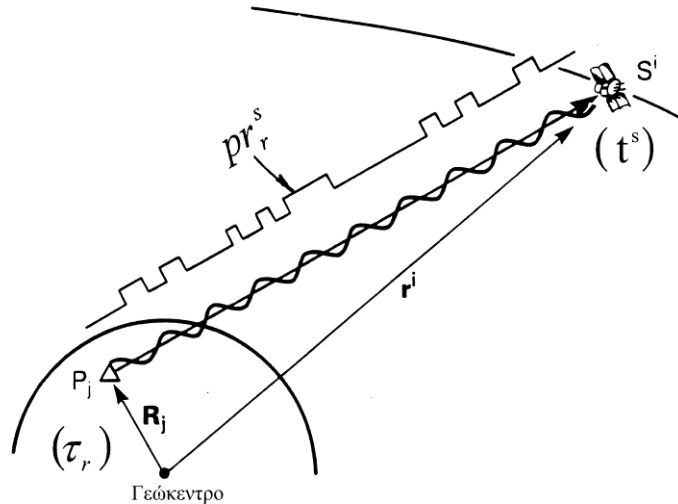
Η ψευδοαπόσταση (pseudorange measurement) αναφέρεται στη μέτρηση της απόστασης, μεταξύ του δέκτη GPS και του δορυφόρου (συγκεκριμένα είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου φάσης της κεραίας του δέκτη GPS και του κέντρου της κεραίας του δορυφόρου) (Σχήμα 2.3). Τόσο ο P(Y) κώδικας όσο και ο C/A μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μέτρηση της ψευδοαπόστασης. Η διαδικασία προσδιορισμού της ψευδοαπόστασης περιγράφεται στη συνέχεια. Υποθέτοντας ότι

τα χρονόμετρα του δέκτη και του δορυφόρου είναι τέλεια συγχρονισμένα και επιπλέον ότι το μέσο διάδοσης είναι το κενό, τότε η ψευδοαπόσταση είναι ίση με τη γεωμετρική απόσταση μεταξύ δέκτη και δορυφόρου. Σε όλα τα προβλήματα προσδιορισμού θέσης οι συντεταγμένες του δορυφόρου είναι γνωστές από τα στοιχεία της εφημερίδας (εκπεμπόμενη ή εκ των υστέρων), ενώ οι συντεταγμένες του δέκτη οι άγνωστες παράμετροι. Η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στη ψευδοαπόσταση (παρατήρηση), την αντίστοιχη γεωμετρική απόσταση (ζητούμενο μέγεθος) και διάφορα συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Η γεωμετρική απόσταση εκφράζεται συναρτήσει των γνωστών συντεταγμένων του δορυφόρου και των αγνώστων του δέκτη. Τελικά, η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης σε πλήρη μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$pr_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} - c \cdot (\delta\tau_r - \delta t^s) + d_{iono} + d_{tropo} \quad (2.1)$$

όπου: pr_r^s : ψευδοαπόσταση
 (X^s, Y^s, Z^s) : συντεταγμένες δορυφόρου
 (X_r, Y_r, Z_r) : συντεταγμένες δέκτη
 c : ταχύτητα του φωτός στο κενό
 $\delta\tau_r$: αποχή του χρονομέτρου του δέκτη
 δt^s : αποχή του χρονομέτρου του δορυφόρου
 d_{iono} : ιονοσφαιρική καθυστέρηση
 d_{tropo} : τροποσφαιρική καθυστέρηση

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της απόστασης μεταξύ δέκτη – δορυφόρου αποτελεί η μέτρηση φάσης (carrier phase measurements). Αν η απόσταση δορυφόρου δέκτη χωριστεί σε τμήματα ίσα με το μήκος κύματος της συχνότητας L1 (~19 cm), όλα τα τμήματα αυτά είναι όμοια μεταξύ τους, οπότε όταν ο δέκτης GPS εγκλωβίσει έναν δορυφόρο και κάνει την πρώτη ανάγνωση, δεν μπορεί να ξέρει σε ποιόν κύκλο βρίσκεται στην απόσταση δορυφόρου – δέκτη (Σχήμα 2.4). Γνωρίζει μόνο τη θέση του μέσα στο κύκλο (στο ένα μήκος κύματος). Άρα η πρώτη ανάγνωση της απόστασης δορυφόρου – δέκτη αποτελείται από το άθροισμα ενός άγνωστου αριθμού ακεραίων κύκλων και τμήματος ενός κύκλου.



Σχ. 2.3 Ψευδοαπόσταση μεταξύ δορυφόρου S^i και δέκτη P_j [Παραδείσης 2000]

Fig. 2.3 Pseudorange measurements between satellite S^i and receiver P_j [Paradeisis, 2000]

Από τη στιγμή της πρώτης ανάγνωσης μέχρι τη στιγμή εντολής της πρώτης μέτρησης από τον μικροεπεξεργαστή του δέκτη, ο δέκτης καταγράφει με έναν μετρητή τους ακέραιους κύκλους μεταξύ των δύο χρονικών στιγμών. Ο ακριβής προσδιορισμός των ακέραιων ασαφειών φάσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμος. Σφάλμα ενός κύκλου συνεπάγεται συστηματικό σφάλμα 19 cm σε όλες τις μετρήσεις. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ασάφειες φάσης χρειάζεται ανάλυση δεδομένων από δύο ή περισσότερους δέκτες που παρατηρούν τους ίδιους δορυφόρους ταυτόχρονα. Η εξίσωση παρατήρησης της φάσης της φέρουσας συχνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_r^s(\tau_r) = \frac{f}{c} \cdot \rho_r^s(T^s, T_r) - f \cdot [\delta\tau_r(\tau_r) - \delta t^s(t^s)] + N_r^s + d_{tropo} - d_{iono} \quad (2.2)$$

όπου: f : συχνότητα

c : ταχύτητα του φωτός στο κενό

$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$: απόσταση δορυφόρου - δέκτη

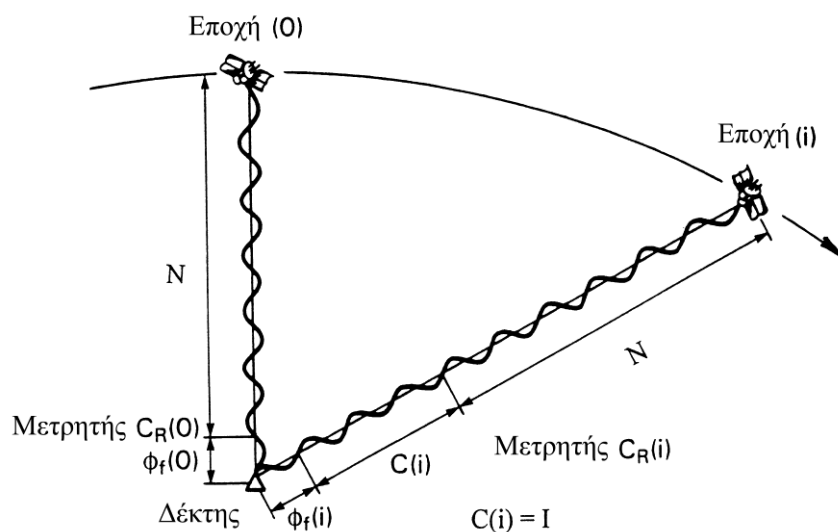
$\delta\tau_r$: αποχή του χρονομέτρου του δέκτη

δt^s : αποχή του χρονομέτρου του δορυφόρου

N_r^s : εκτίμηση της ασάφειας

d_{iono} : ιονοσφαιρική καθυστέρηση

d_{tropo} : τροποσφαιρική καθυστέρηση



Σχ. 2.4 Ασάφεια φάσης [Παραδείσης, 2000]

Fig. 2.4 Carrier phase ambiguity [Paradeisis 2000]

2.2.3β Πηγές σφαλμάτων

Κατά τον προσδιορισμό θέσης με τη βοήθεια δορυφορικών παρατηρήσεων, υπεισέρχονται μία σειρά σφαλμάτων, συστηματικού κυρίως χαρακτήρα. Τα σφάλματα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Σε αυτά που προέρχονται από τους δορυφόρους, σε αυτά που προέρχονται από το δέκτη και σε αυτά που σχετίζονται με τη μετάδοση του σήματος.

Σφάλματα δορυφόρων. – Το σφάλμα της τροχιάς του δορυφόρου αφορά στην αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης και των κινηματικών χαρακτηριστικών του δορυφόρου. Σήμερα που ο χρήστης έχει στη διάθεσή του τροχιές πολύ υψηλής ακρίβειας και μάλιστα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, το πρόβλημα της επίδρασης των σφαλμάτων των τροχιών στην ακρίβεια προσδιορισμού θέσης είναι μικρότερο σε σχέση με το παρελθόν.

Μία άλλη κατηγορία σφαλμάτων αφορά στην αβεβαιότητα προσδιορισμού του χρόνου στο χρονόμετρο του δορυφόρου. Το σφάλμα αυτό επιδρά ως χρονική υστέρηση μεταξύ του ατομικού ρολογιού του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS που ορίζει την κλίμακα χρόνου του συστήματος.

Σφάλματα δεκτών. – Η χρονική υστέρηση μεταξύ του χρονόμετρου του δορυφορικού δέκτη με την κλίμακα χρόνου GPS εκφράζει το σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη που είναι σημαντικό και δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Το ηλεκτρικό κέντρο της κεραίας ή αλλιώς κέντρο φάσης είναι το σημείο όπου γίνεται η λήψη των δορυφορικών σημάτων και στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις GPS. Το κέντρο φάσης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την κατεύθυνση του δορυφορικού σήματος, καθώς η απόσταση δορυφόρου – δέκτη μεταβάλλεται. Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μία μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτούν κρίσιμο χαρακτήρα σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία ύψους και λιγότερο από το αζιμούθιο (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).

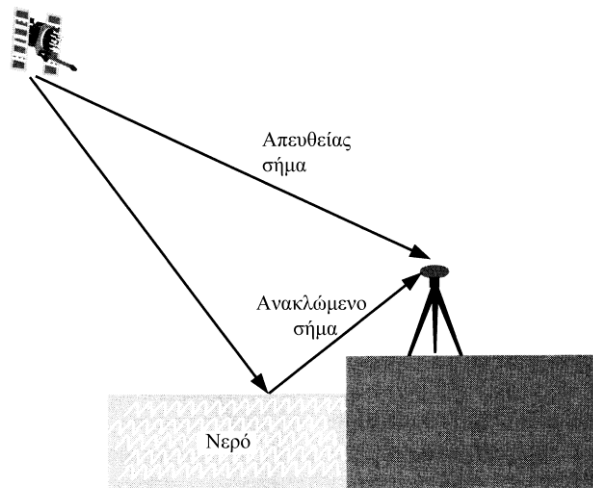
Σφάλματα λόγω διάδοσης του σήματος. – Τα τμήματα της ατμόσφαιρας που επηρεάζουν ουσιαστικά και κατά διαφορετικό τρόπο τη διαδρομή του δορυφορικού (ηλεκτρομαγνητικού) σήματος, με αποτέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις, είναι η τροπόσφαιρα και η ιονόσφαιρα. Η επίδραση της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα, χαρακτηρίζονται με τους όρους τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα ή τροποσφαιρική και ιονοσφαιρική καθυστέρηση. Για τη μείωση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας λαμβάνουμε ή χρησιμοποιούμε μετρήσεις προς δορυφόρους που έχουν γωνία ύψους πάνω από ένα όριο, συνήθως πάνω από 15 deg. Η γωνία αυτή είναι γνωστή και ως γωνία αποκοπής (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).

Η τροπόσφαιρα είναι το μεταβλητού πάχους χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται σε ύψος της τάξης των εννέα χιλιομέτρων στους πόλους και μέχρι 16 km στον ισημερινό. Συνήθως περιλαμβάνει και ένα τμήμα της στρατόσφαιρας το οποίο επιδρά κατά πολύ λιγότερο και έτσι η τροπόσφαιρα θεωρείται ότι εκτείνεται μέχρι τα 50 km. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη πίεση και την υγρασία. Είναι επίσης συνάρτηση της απόστασης που διανύει το σήμα στην τροπόσφαιρα, της ζενίθιας γωνίας του δορυφόρου και του υψομέτρου του δέκτη. Το τροποσφαιρικό σφάλμα επιδρά το ίδιο στις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσεων, ανεξάρτητα από τη συχνότητα διάδοσης (L1 ή L2). Δεν μπορεί να απαλειφεί με δέκτες δύο συχνοτήτων. Με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων και με

παραμέτρους τη θερμοκρασία, πίεση και υγρασία υπολογίζεται περίπου το 90% του τροποσφαιρικού σφάλματος (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).

Η ιονόσφαιρα είναι το τμήμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από 50 km έως 1000 km πάνω από τη γήινη επιφάνεια και χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ελευθέρων ηλεκτρονίων αλλά και θετικών ιόντων. Με δέκτες δύο συχνοτήτων το ιονοσφαιρικό σφάλμα μπορεί να ελαττωθεί ουσιαστικά. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από άτομα και μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας, επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος, δηλαδή μεταβάλουν την ταχύτητα, τη διεύθυνση και την πολικότητα με τη μεγαλύτερη επίδραση στην ταχύτητα και συνεπώς στην απόσταση δέκτη – δορυφόρου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το ιονοσφαιρικό σφάλμα μειώνεται κατά μέσο όρο πέντε φορές σε σχέση με την ημέρα, οπότε η δραστηριότητα του ηλίου διεγείρει την ενεργειακή κατάσταση των ελεύθερων ηλεκτρονίων (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).

Πολυανάκλαση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το δορυφορικό σήμα λαμβάνεται και από άλλη ή άλλες έμμεσες διαδρομές εκτός από την απευθείας λήψη, εξαιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες (Σχήμα 2.5). Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική, καθυστερεί και επηρεάζει τις παρατηρήσεις GPS. Η επίδραση αυτή ονομάζεται σφάλμα πολυανάκλασης και για τον δορυφόρο δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη, ενώ για τον δέκτη είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος χώρου (τύπος, υλικό κατασκευής). Ο πιο ασφαλής τρόπος ελαχιστοποίησης του σφάλματος της πολυανάκλασης είναι η κατάλληλη επιλογή της θέσης του δέκτη για στατικές εφαρμογές. Γενικά, το σφάλμα αυτό είναι από τα πιο δύσκολα στη μοντελοποίησή του (Φωτίου – Πικριδάς, 2006).



Σχ. 2.5 Σφάλμα πολυανάκλασης [Ahmed, 2006]

Fig. 2.5 Multipath effect [Ahmed, 2006]

Περιπτώσεις εμποδίων στην πορεία του δορυφορικού σήματος, αδυναμίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του δέκτη ή και ιονοσφαιρικής δραστηριότητας έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια λήψης του δορυφορικού σήματος και συνεπώς εμφάνιση του φαινομένου της ολίσθησης κύκλων. Έτσι, όλες οι επόμενες μετρήσεις είναι επηρεασμένες κατά τον ίδιο ακέραιο αριθμό κύκλων που μεσολαβούν στο διάστημα της αδυναμίας λήψης σήματος. Το συστηματικό αυτό σφάλμα είναι εύκολα ανιχνεύσιμο. Ο εντοπισμός του αποτελεί ένα από τα βασικά στάδια της προεπεξεργασίας των παρατηρήσεων.

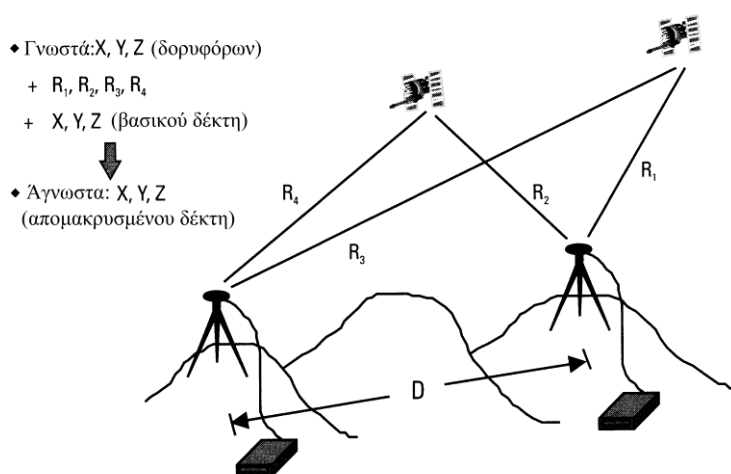
2.2.4 Κύριες μέθοδοι δορυφορικού εντοπισμού

2.2.4α Γενικά

Ο προσδιορισμός θέσης με συστήματα GNSS διακρίνεται καταρχάς σε απόλυτο και σχετικό εντοπισμό. Γενικά ο προσδιορισμός θέσης, μπορεί να διακριθεί σε στατικό και κινηματικό προσδιορισμό, σε προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο και εκ των υστέρων. Οι κατηγορίες αυτές, χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι προσδιορισμού θέσης και συνδυαζόμενες μεταξύ τους, καθορίζουν πλήρως μια συγκεκριμένη μέθοδο που θα εφαρμοστεί στην πράξη.

Ο απόλυτος εντοπισμός αφορά στον προσδιορισμό της θέσης ενός ή περισσότερων σημείων σε γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Ο εντοπισμός επιτυγχάνεται με

παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους προς το σημείο (A) ενδιαφέροντος. Αντίθετα, ο σχετικός εντοπισμός αφορά στον προσδιορισμό της θέσης ενός άλλου ως προς ένα δεύτερο σημείο. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν η θέση του ενός σημείου είναι γνωστή (π.χ. τριγωνομετρικό σημείο) η θέση του δεύτερου υπολογίζεται ως προς τη θέση πρώτου σημείου. Όπως είναι φανερό, η διαδικασία του σχετικού εντοπισμού απαιτεί δύο δέκτες (Σχήμα 2.6). Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο σχετικό εντοπισμό θέσης για τοπογραφικές / γεωδαιτικές εφαρμογές.



Σχ. 2.6 Σχετικός προσδιορισμός θέσης [Ahmed, 2006]

Fig. 2.6 Principle of GPS relative positioning [Ahmed, 2006]

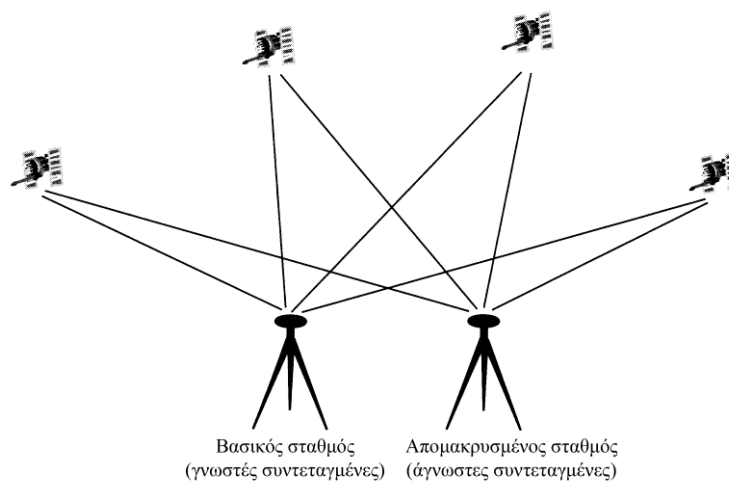
Στον προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, ο προσδιορισμός θέσης γίνεται την ίδια, ή σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή εκτέλεσης των μετρήσεων. Στον εκ των υστέρων επίλυση, ο προσδιορισμός θέσης πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων.

2.2.4β Στατικός εντοπισμός

Η μέθοδος του στατικού προσδιορισμού θέσης, αναφέρεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου οι δορυφορικοί δέκτες παραμένουν ακίνητοι σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχήμα 2.7). Δύο παραλλαγές της υπόψη μεθόδου, είναι ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός και ο ψευδοκινηματικός στατικός ή στατικός προσδιορισμός με επαναμέτρηση.

Ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός θέσης, δεν έχει κάποια ουσιαστική διαφορά στη μεθοδολογία μέτρησης με τον στατικό προσδιορισμό. Απλά χρησιμοποιείται για μικρές βάσεις της τάξης των μερικών χιλιομέτρων και με ρυθμό καταγραφής συνήθως τα 10 sec. Έτσι ο χρόνος παραμονής των δεκτών στα σημεία, είναι γενικά μικρός.

Ο ψευδοκινηματικός προσδιορισμός, είναι μια καθαρά στατική μέθοδος. Εδώ, ο κινητός δέκτης, επισκέπτεται τα άγνωστα σημεία δύο ή και περισσότερες φορές διαδοχικά, με διάρκεια παραμονής λίγων λεπτών της ώρας, (λιγότερο και από τη μέθοδο του γρήγορου στατικού εντοπισμού). Μεταξύ της πρώτης και δεύτερης επίσκεψης, έχει μεσολαβήσει ικανό χρονικό διάστημα, ώστε η γεωμετρία των δορυφόρων να έχει αλλάξει σημαντικά και να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του σημείου. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στην πράξη η μέθοδος τείνει να εξαληφθεί.



Σχ. 2.7 Στατικός προσδιορισμός θέσης [Ahmed, 2006]

Fig. 2.7 Static GPS surveying [Ahmed, 2006]

2.2.4γ Κινηματικός εντοπισμός

Η μέθοδος του κινηματικού προσδιορισμού θέσης, αφορά στον προσδιορισμό της θέσης σημείων που ορίζουν τη διαδρομή ενός κινητού μέσου, καθώς και τα κινηματικά του χαρακτηριστικά. Επομένως, ο δέκτης βρίσκεται σε κίνηση και καταγράφει παρατηρήσεις είτε σε τυχαία σημεία κατά μήκος μιας διαδρομής, είτε σε συγκεκριμένα σημεία που επιλέγει ο χρήστης.

Ειδικότερα, ο σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης αφορά συνήθως εφαρμογές για τον προσδιορισμό της τροχιάς οχημάτων, διαδρομών και σημείων λεπτομερειών στις τοπογραφικές και χαρτογραφικές αποτυπώσεις. Κατά τη διαδικασία του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού θέσης, υπάρχει ένας ακίνητος δέκτης, ο οποίος μένει συνεχώς σε σημείο γνωστών συντεταγμένων και ένας κινητός δέκτης, ο οποίος είτε κινείται σε συγκεκριμένα σημεία ή σε κάποια διαδρομή, είτε παραμένει ακίνητος για λίγες εποχές σε συγκεκριμένα σημεία.

Απαραίτητο για τον προσδιορισμό θέσης είναι η επίλυση των ασαφειών φάσης προς όλους τους παρατηρούμενους δορυφόρους. Έτσι, ο δέκτης παραμένει ακίνητος σε ένα σημείο μέχρι να συλλέξει ικανό αριθμό μετρήσεων για την επίλυση των ασαφειών φάσεις (static initialization). Το σημείο αυτό μπορεί να είναι σημείο γνωστών συντεταγμένων, οπότε ο δέκτης παραμένει ακίνητος μόνο για λίγες εποχές, είτε μπορεί να είναι άγνωστο σημείο, οπότε ο δέκτης παραμένει ακίνητος περισσότερο χρόνο.

Μετά από αυτό το αρχικό στάδιο, ο κινούμενος δέκτης είναι έτοιμος να αρχίσει την κινηματική διαδικασία, τίθεται σε κίνηση. Γενικά, ο κινούμενος δέκτης δεν πρέπει να χάσει το δορυφορικό σήμα, το οποίο προϋποθέτει λήψη από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους ταυτόχρονα (Ahmed, 2006).

2.3 Αδρανειακά Συστήματα Εντοπισμού

2.3.1 Αρχή λειτουργίας αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης είναι αυτόνομες συσκευές πλοήγησης οι οποίες χρησιμοποιούν μία σειρά μετρητικών διατάξεων από αισθητήρες, όπως είναι τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα, για να προσδιορίσουν τη θέση, την ταχύτητα και την κινηματική συμπεριφορά ενός κινητού σώματος βάσει των αρχών της αδράνειας και της Νευτώνειας μηχανικής.

Η αρχή της αδρανειακής ναυσιπλοΐας χρονολογείται στη δεκαετία του 1920. Κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου αναπτύχθηκαν στη Γερμανία τα πρώτα αδρανειακά συστήματα καθοδήγησης για βαλλιστικούς πυραύλους.

Τα πρώτα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης για αεροναυσιπλοΐα κατασκευάστηκαν στο πανεπιστήμιο του MIT το 1950. Η ανάπτυξη ειδικών συστημάτων για εφαρμογή των αδρανειακών συστημάτων στην τοπογραφία άρχισε τη δεκαετία του 1970.

2.3.1α Πρωτογενείς μετρήσεις αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Οι βασικές παρατηρήσεις ενός αδρανειακού συστήματος πλοήγησης είναι οι επιταχύνσεις ενός κινητού κατά μήκος των αξόνων του οποίου έχει οριστεί ένα σύστημα αναφοράς που αναφέρεται ως πλαίσιο πλοήγησης (navigation frame) καθώς και οι γωνίες κατά άξονα μεταξύ αδρανειακής μονάδας και συστήματος αναφοράς του κινούμενου σώματος (body frame).

Οι επιταχύνσεις αυτές προκύπτουν από καταγραφές των επιταχυνσιομέτρων, οι οποίες με διπλή ολοκλήρωση προσδιορίζουν το διάνυσμα θέσης του κινητού. Εάν $x(t)$, $\dot{x}(t)$ και $\ddot{x}(t)$ είναι το διάνυσμα θέσης, ταχύτητας και μετρημένης επιτάχυνσης ενός κινητού που φέρει αδρανειακό σύστημα εντοπισμού, τότε η ταχύτητά του προκύπτει:

$$\dot{x}(t) = \int_0^T \ddot{x}(t)dt + \dot{x}_0 \quad (2.3)$$

και το διάνυσμα θέσης:

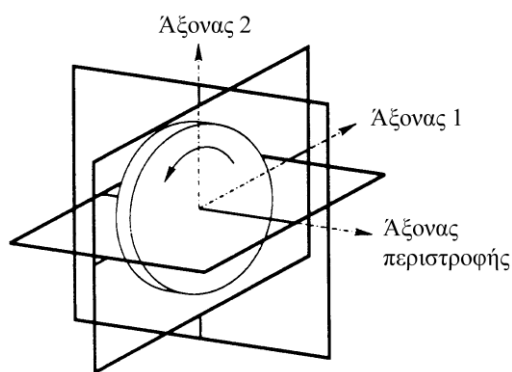
$$x(t) = \int_0^T \dot{x}(t)dt + x_0 \quad (2.4)$$

Αντίστοιχα, οι γωνίες μετρώνται από τους αισθητήρες του γυροσκοπίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι για εφαρμογές πάνω ή κοντά σε μεγάλες μάζες, όπως η Γη, το αρχικό διάνυσμα της επιτάχυνσης του κινητού επηρεάζονται από τις δυνάμεις βαρύτητας. Επιπλέον, οι δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στη μετακίνηση του συστήματος αναφοράς επηρεάζουν τις μετρήσεις επιτάχυνσης του επιταχυνσιομέτρου. Επομένως, όταν ενσωματώνονται μετρήσεις επιτάχυνσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις του πεδίου βαρύτητας της γης καθώς και οι πιθανές δυνάμεις που επιδρούν.

2.3.1β Αισθητήρες αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

Γυροσκόπια. – Τα γυροσκόπια είναι αισθητήρες οι οποίοι “αντιλαμβάνονται” τις γωνίες μεταξύ του συστήματος αναφοράς του κινητού σώματος (body frame) και της αδρανειακής μονάδας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσανατολίσουν τους άξονες του συστήματος αναφοράς, προσδιορίζοντας τις στροφές γύρω από τον άξονά τους. Η πλειοψηφία των γυροσκοπίων περιλαμβάνει μηχανικά και οπτικά μέρη. Τα μηχανικά γυροσκόπια χρησιμοποιούνται σε αδρανειακά συστήματα σταθερής πλατφόρμας (gimbaled INS), ενώ τα οπτικά σε προσκολλημένα (strap-down INS).

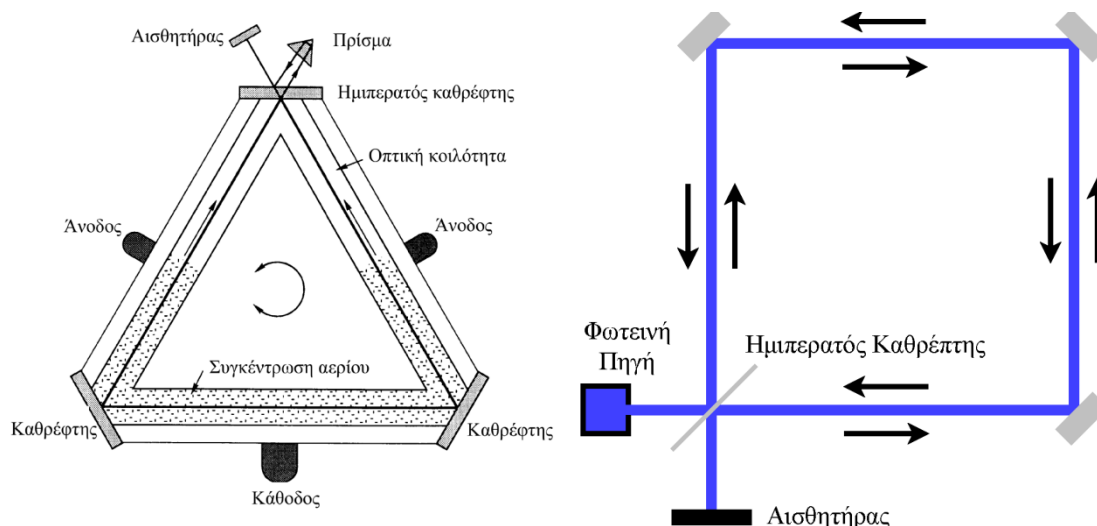
Τα μηχανικά γυροσκόπια διαχωρίζονται σε περιστροφικά και δονητικά. Τα περιστροφικά, μηχανικά γυροσκόπια αποτελούνται από ένα συμμετρικό άκαμπτο σώμα (π.χ. έναν τροχό). Το κέντρο μάζας τους αναρτώνται πάνω σε έναν άξονα ο οποίος περιστρέφεται με μεγάλη συχνότητα και ελάχιστες τριβές. Ο αριθμός των κινήσεων που μπορεί να εκτελεί ο άξονας αυτός καθορίζεται από τον αριθμό των εδράνων πάνω στα οποία στηρίζεται. Έτσι, διακρίνονται δύο είδη περιστροφικών γυροσκοπίων: ενός και δύο βαθμών ελευθερίας (TDF – Two Degree of Freedom (Σχήμα 2.8), SDF – Single Degree of Freedom). Ως βασικές ιδιότητες του περιστροφικού γυροσκοπίου αναφέρεται η τάση να διατηρεί τον άξονα περιστροφής του λόγω αδράνειας της μάζας των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται και αφετέρου, η αντίδραση σε δυνάμεις που ασκούνται στον άξονα περιστροφής τους γνωστή ως μετάπτωση. Τα δονητικά γυροσκόπια αποτελούνται από ένα ταλαντευόμενο σώμα, το οποίο διατηρεί το επίπεδο δόνησης στην αδρανειακή μονάδα ανεξάρτητα από τις περιστροφές (Hofman et al., 2003).



Σχ. 2.8 Σχηματική παράσταση γυροσκοπίου TDF [Hofman et al., 2003]

Fig. 2.8 Schematic diagram of a TDF gyroscope [Hofman et al., 2003]

Σήμερα, τα οπτικά γυροσκόπια χρησιμοποιούνται συχνότερα. Η λειτουργία των οπτικών γυροσκοπίων βασίζεται στο φαινόμενο Sagnac. Σύμφωνα με αυτό δύο ακτίνες φωτός οι οποίες παράγονται από μία κοινή πηγή ακολουθούν αντίθετες κατευθύνσεις σε ένα κλειστό οπτικό βρόγχο. Σε κατάσταση ισορροπίας, και οι δύο ακτίνες διανύουν την ίδια απόσταση μέχρι να φτάσουν στη πηγή. Εάν το σύστημα περιστρέφεται (ο άξονας περιστροφής να είναι κάθετος στο βρόγχο), οι αποστάσεις που διανύει κάθε ακτίνα διαφέρουν. Ειδικότερα, η ακτίνα που έχει ίδια φορά περιστροφής με το βρόγχο διανύει μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χρόνο από εκείνη που έχει αντίθετη φορά περιστροφής. Τα οπτικά γυροσκόπια έχουν ένα βαθμό ελευθερίας και εφαρμόζονται καλά στα προσκολλημένα αδρανειακά συστήματα. Υπάρχουν δύο τύποι οπτικών γυροσκοπίων: τα γυροσκόπια με δακτύλιο laser (RLG: Ring Laser Gyroscopes) (Σχήμα 2.9) και τα γυροσκόπια οπτικών ινών (FOG: Fiber Optic Gyroscopes).



Σχ. 2.9 Σχηματική παράσταση ενός RLG γυροσκοπίου [Hofman et al., 2003 – Wikipedia]

Fig. 2.9 Schematic diagram of a RLG gyro [Hofman et al., 2003 – Wikipedia]

Μια άλλη κατηγορία γυροσκοπίων είναι τα μικρο – ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο της δύναμης Coriolis, η οποία περιγράφει την φαινόμενη επιτάχυνση των σωμάτων που κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Η δύναμη Coriolis οφείλεται για τις πλευρικές επιταχύνσεις που ασκούνται στα κινούμενα σώματα. Τα γυροσκόπια αυτά προσδιορίζουν τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, μετρώντας τις επιταχύνσεις που οφείλονται στην δύναμη Coriolis.

Επιταχυνσιόμετρα. – Η βασική αρχή των επιταχυνσιομέτρων στηρίζεται στη μέτρηση των δυνάμεων που επιδρούν πάνω σε ένα δοκίμιο μάζας. Διακρίνονται σε αυτό ανοιχτού και κλειστού κύκλου λειτουργίας. Τα επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού κύκλου λειτουργίας (open loop) μετράνε απευθείας την μετατόπιση του δοκιμίου μάζας η οποία προκαλείται από εξωτερική διέγερση που δρα απευθείας στον αισθητήρα. Σε αντίθεση, τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας (close loop) μετράνε τη δύναμη που χρειάζεται ώστε το δοκίμιο μάζας να παραμείνει ακίνητο αντιδρώντας στη δύναμη που προκαλεί τη μετατόπισή του. Τα επιταχυνσιόμετρα διακρίνονται σε σερβομηχανικά, σε επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων, σε πιεζοηλεκτρικά, με πυκνωτές καθώς και σε επιταχυνσιόμετρα με χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

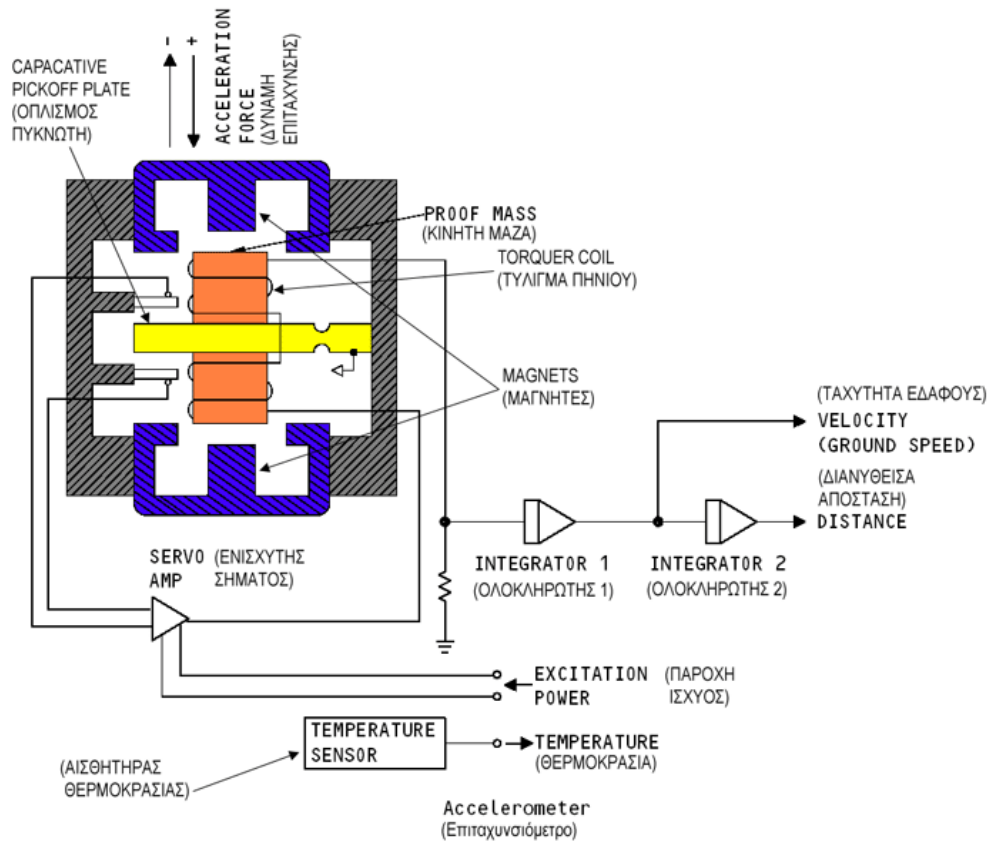
Τα σερβομηχανικά επιταχυνσιόμετρα είναι λειτουργίας κλειστού τύπου και περιέχουν ένα σύστημα σερβομηχανισμών ο οποίος εντοπίζει τη μετατόπιση του δοκιμίου μάζας. Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα είναι μεγάλης ακρίβειας.

Τα επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων αποτελούνται από δοκίμιο μάζας η μετατόπιση του οποίου διεγείρει το ηλεκτρικό κύκλωμα που βρίσκεται μέσα σε μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Με αυτό τον τρόπο, προκαλούνται δονήσεις στο ηλεκτρικό κύκλωμα με συχνότητα ανάλογη των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται.

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (χαλαζία ή κεραμικό υλικό) το οποίο παράγει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της δύναμης που δέχεται η δόκιμη μάζα πάνω στην οποία είναι προσκολλημένο.

Στα επιταχυνσιόμετρα με πυκνωτές οι μετακινήσεις της δόκιμης μάζας αλλάζουν τη συχνότητα λειτουργίας των πυκνωτών και των πηνίων που περιέχουν δεομένου ότι προκαλείται αλλαγή στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (Σχήμα 2.10).

Τέλος, τα επιταχυνσιόμετρα με χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων μετρούν τη μετατόπιση του δοκιμίου μάζας κάνοντας χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Τα κυκλώματα αυτά μετατρέπουν την μετακίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα η ανάλυση της συχνότητας του οποίου προσδιορίζει την επιτάχυνση.



Σχ. 2.10 Σχηματική παράσταση ενός επιταχυνσιόμετρου με πυκνωτές [www.k-makris.gr]

Fig. 2.10 Schematic diagram of a capacitive accelerometer [www.k-makris.gr]

2.3.2 Συστήματα αναφοράς αδρανειακών συστημάτων εντοπισμού

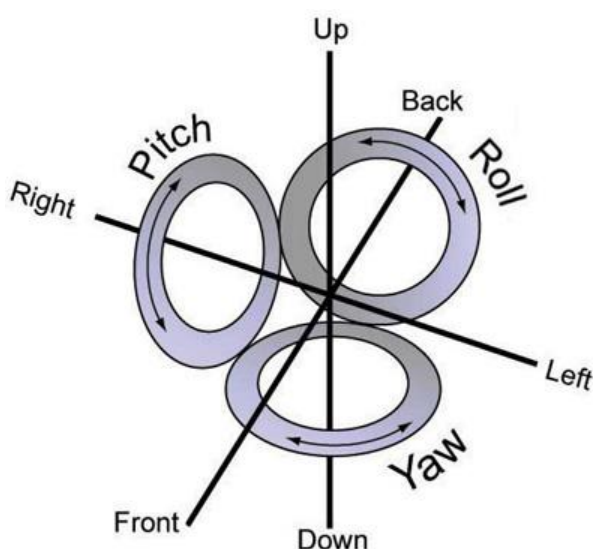
Η χρήση αδρανειακών συστημάτων προϋποθέτει τη καθιέρωση και χρήση διαφορετικών συστημάτων αναφοράς. Συγκεκριμένα, αυτά είναι το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς, το σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος, καθώς και το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (Earth Centered – Earth Fixed). – Κέντρο του γεωκεντρικού συστήματος (ECEF) είναι το κέντρο μάζας της γης, ο άξονας X διέρχεται από το σημείο τομής του ισημερινού επιπέδου με τον μεσημβρινό του Greenwich, ο άξονας Z είναι παράλληλος με το μέσο άξονα περιστροφής της γης ενώ ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (local level frame). – Αναφέρεται στο σύστημα πλοήγησης του κινητού μέσου και χρησιμοποιείται έτσι ώστε να περιγράψει

την κίνηση του σώματος ως προς τη περιοχή κίνησης του σώματος. Το κέντρο του τοποκεντρικού συστήματος αναφοράς (l-frame) είναι ένα σημείο πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια, ο άξονας y έχει κατεύθυνση προς τον γεωδαιτικό βορρά, ο άξονας z είναι παράλληλος με την κάθετη στο ελλειψοειδές, ενώ ο άξονας x, προσανατολισμένος προς την ανατολή, συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς.

Σύστημα αναφοράς του κινούμενου σώματος (body frame). – Ως κέντρο του συστήματος αναφοράς (b-frame), ορίζεται το σημείο τομής των αξόνων μέτρησης των επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων της αδρανειακής μονάδας μέτρησης (Inertial Measurement Unit – IMU). Ο άξονας x έχει διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του σώματος, ο άξονας y διεύθυνση παράλληλη με τον διαμήκη άξονα κίνησης του σώματος, ενώ ο άξονας z συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων με κατεύθυνση προς τα επάνω. Οι γωνίες στροφής όπως προκύπτουν από την κινηματική συμπεριφορά του σώματος και καταγράφονται στους άξονες αυτούς είναι γνωστές ως γωνίες πρόνευσης (γύρω από τον άξονα x – pitch), διατοιχισμού (γύρω από τον άξονα y – roll) και αξιμουθίου (γύρω από τον άξονα z – yaw) (Σχήμα 2.11).



Σχ. 2.11 Σχηματική παράσταση συστήματος αναφοράς κινούμενου σώματος [<http://weboflife.nasa.gov>]

Fig. 2.11 Schematic diagram of body frame [<http://weboflife.nasa.gov>]

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (inertial frame). – Πρόκειται για ένα σύστημα αναφοράς στο οποίο ισχύουν οι νόμοι του Νεύτωνα. Κέντρο του αδρανειακού

συστήματος αποτελεί το κέντρο μάζας της γης, ο άξονας x ορίζεται ως το σημείο τομής της Εκλειπτικής με τον ουράνιο ισημερινό (εαρινό ισημερινό σημείο), ο άξονας z είναι παράλληλος με τον μέσο άξονα περιστροφής της γης, ενώ ο άξονας y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

2.3.3 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα

Τα κύρια σφάλματα των αδρανειακών συστημάτων χωρίζονται σε σφάλματα των αδρανειακών αισθητήρων, στα σφάλματα αρχικοποίησης, ευθυγράμμισης του συστήματος αναφοράς του κινητού με τους άξονες μετρήσεων της αδρανειακής μονάδας και τέλος, τα σφάλματα λόγω των μοντέλων βαρύτητας που χρησιμοποιούνται.

Τα σφάλματα που προκύπτουν από τους αισθητήρες είναι τεσσάρων ειδών. Συγκεκριμένα, υπάρχει το σφάλμα του συντελεστή κλίμακας (scale factor) το οποίο εκφράζεται σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm) και αφορά την αδυναμία των αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρων και γυροσκοπίων) να μετατρέψουν τη μετρημένη ποσότητα σε τιμή επιτάχυνσης ή γωνιακής ταχύτητας αντίστοιχα. Επιπλέον, εντοπίζεται το σφάλμα λανθασμένης εκτίμησης (bias) το οποίο ορίζεται ως τιμή μέτρησης του αισθητήρα σε θέση ισορροπίας. Το σφάλμα αυτό οφείλεται σε λανθασμένη βαθμονόμηση της αδρανειακής μονάδας και εκφράζεται σε m/s^2 για τα επιταχυνσιόμετρα και σε deg/h για τα γυροσκόπια. Ένα ακόμα σφάλμα λόγω αισθητήρων είναι εκείνο που αφορά στην μη πλήρη ευθυγράμμιση των αξόνων των αισθητήρων (axis misalignment), με αποτέλεσμα να μην σχηματίζουν μεταξύ τους ένα τέλειο τρισσορθογώνιο σύστημα και μετράται σε deg . Τέλος, υπάρχει και το σφάλμα του θορύβου (gyro random walk), το οποίο αναφέρεται στο σφάλμα που υπεισέρχεται στις μετρήσεις λόγω θορύβου. Το σφάλμα αυτό είναι τυχαίο και η διόρθωσή του γίνεται με τη βοήθεια στοχαστικών μοντέλων. Για παράδειγμα, το σφάλμα θορύβου που εμφανίζεται στα γυροσκόπια οφείλεται στη γωνιακή περιστροφή και εκφράζεται σε deg/\sqrt{h} (Hofman et al., 2003).

Τα σφάλματα αρχικοποίησης (initialization errors) σχετίζονται με την αβεβαιότητα των τιμών θέσης και ταχύτητας στην αρχική κατάσταση του συστήματος. Οι αρχικές τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην ολοκλήρωση των μετρήσεων επιτάχυνσης και

γωνιακής ταχύτητας από τις οποίες προκύπτει η θέση και η κινηματική συμπεριφορά του κινητού. Επομένως, η αβεβαιότητα σε αυτές τις αρχικές τιμές επηρεάζει σημαντικά την όλη διαδικασία προσδιορισμού των παραπάνω τιμών. Για το λόγο αυτό, γίνεται αρχικοποίηση με χρήση εξωτερικών συστημάτων (GPS) ή άλλων μεθόδων (ZUPT, CUPT).

Τα σφάλματα ευθυγράμμισης (alignment errors) σχετίζονται με τα σφάλματα που παραμένουν μετά τη διαδικασία ευθυγράμμισης της αδρανειακής μονάδας με το σύστημα αναφοράς του κινητού μέσου.

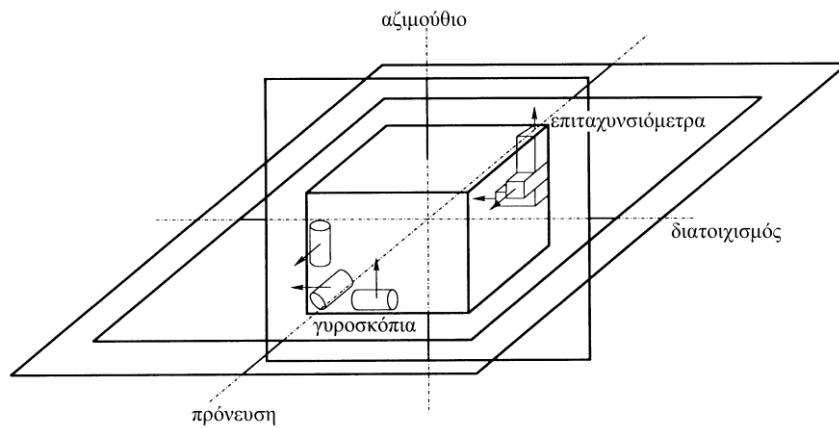
Τα σφάλματα μοντέλων βαρύτητας αφορούν στα σφάλματα που περιέχουν τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα του πεδίου βαρύτητας της γης. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται από την αδρανειακή μονάδα ώστε να διαχωρίζεται η επιτάχυνση που οφείλεται στη κίνηση του σώματος από εκείνη που οφείλεται στην επίδραση του πεδίου βαρύτητας της γης.

2.3.4 Βασικές κατηγορίες αδρανειακών συστημάτων

Τα αδρανειακά συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στα συστήματα σταθερής πλατφόρμας (gimballed INS) και στα προσκολλημένα (strapdown INS).

Τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας αποτελούνται από μια άκαμπτη πλατφόρμα πάνω στην οποία τοποθετούνται οι αισθητήρες σχηματίζοντας τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων και μένουν απομονωμένοι από τις γωνιακές κινήσεις του κινητού. Τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται έτσι ώστε το εύρος κινήσεων στο οποίο λειτουργούν οι αισθητήρες να διατηρείται πολύ μικρό, ούτως ώστε να εξαλείφονται όσο το δυνατό περισσότερο τα σφάλματα.

Στα προσκολλημένα συστήματα πλατφόρμας τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα δημιουργούν έναν άκαμπτο αισθητήρα ο οποίος είναι απευθείας τοποθετημένος επάνω στο όχημα. Με τον τρόπο αυτό, οι μετρήσεις αναφέρονται απευθείας στο σύστημα αναφοράς του κινητού. Συγκρινόμενα με τα αδρανειακά συστήματα σταθερής πλατφόρμας έχουν μικρότερο μέγεθος και βάρος, χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, τιμή κτήσης καθώς και απλούστερο τρόπο συντήρησης.



Σχ. 2.12 Σχηματική παράσταση συστήματος σταθερής πλατφόρμας [Hofman et al., 2003]

Fig. 2.12 Schematic diagram of a gimballed platform [Hofman et al., 2003]

2.4 Σύστημα Ψηφιακού Οδομέτρου

2.4.1 Αρχή λειτουργίας ψηφιακού οδομέτρου

Το ψηφιακό οδόμετρο αποτελεί έναν αισθητήρα καταγραφής του αναπτύγματος της διανυθείσας απόστασης και προσαρμόζεται σε μη κινητήριο τροχό του οχήματος καταγραφής. Η λειτουργία του βασίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων καθώς μεταφέρεται σε αυτό η κίνηση του τροχού του οχήματος. Αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, το τμήμα καταγραφής και το τμήμα περιστροφής (Σχήμα 2.13). Το τμήμα περιστροφής περιστρέφεται παράλληλα και ομόκεντρα με τον άξονα περιστροφής του τροχού, ενώ το τμήμα καταγραφής παραμένει ακίνητο, παράγει ηλεκτρικά σήματα κατά τη κίνηση και αναλαμβάνει την ενσύρματη μετάδοση των σημάτων στο σύστημα καταγραφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μια πλήρη περιστροφή του τροχού μεταδίδονται συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτρικών σημάτων (ticks), ο οποίος είναι προκαθορισμένος για κάθε αισθητήρα. Τα ηλεκτρικά σήματα, που παράγονται, είναι ανάλογα της ταχύτητας κίνησης και του αριθμού των παλμών που μεταδίδει ο αισθητήρας σε μια πλήρη περιστροφή του τροχού (ticks/rev).



Σχ. 2.13 Τμήματα ψηφιακού οδομέτρου [Corrsys Datron]

Fig. 2.13 Digital odometer parts [Corrsys Datron]

2.4.2 Πρωτογενείς μετρήσεις και σφάλματα

Οι μετρήσεις του ψηφιακού οδομέτρου αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο με τρεις τρόπους. Αρχικά, παρέχουν γραμμική αναφορά (χιλιομέτρηση) για τη θέση του οχήματος καταγραφής, και απορρίπτουν τις μετρήσεις του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού όταν το όχημα βρίσκεται σε στάση ώστε να μην επηρεάζεται (αυξάνει πλασματικά) η χιλιομέτρηση. Τέλος, οι μετρήσεις του ψηφιακού οδομέτρου αξιοποιούνται στις περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις του συστήματος GNSS είναι υποδεέστερης ακρίβειας από εκείνες του οδομέτρου, οπότε τελικά συνδυάζονται με εκείνες της αδρανειακής μονάδας.

Η ακρίβεια καταγραφής των ψηφιακών οδομέτρων είναι μειωμένη και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται επικουρικά στα ολοκληρωμένα συστήματα καταγραφής. Συγκεκριμένα, η αβεβαιότητα τους είναι συνάρτηση της περιφέρειας του τροχού στον οποίο προσαρτάται, καθώς και του αριθμού των ηλεκτρικών σημάτων που μεταδίδονται σε κάθε πλήρη περιστροφή του τροχού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ SPAN SYSTEM

3.1 Συνοπτικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το Ολοκληρωμένο Σύστημα Πλοήγησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Πολυτεχνείου, Span System της εταιρίας Novatel. Το ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης αποτελείται από δύο δέκτες GPS όμοιων τεχνικών χαρακτηριστικών, μία αδρανειακή μονάδα ακριβείας και ένα ψηφιακό οδόμετρο. Ο ένας δέκτης GPS λειτουργεί ως βασικός σταθμός αναφοράς σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Ο δεύτερος δέκτης ενσωματώνεται στο σύστημα συγχρονισμού SPAN, στο οποίο συνδέονται οι διάφοροι αισθητήρες για την καταγραφή των ετερογενών μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y).

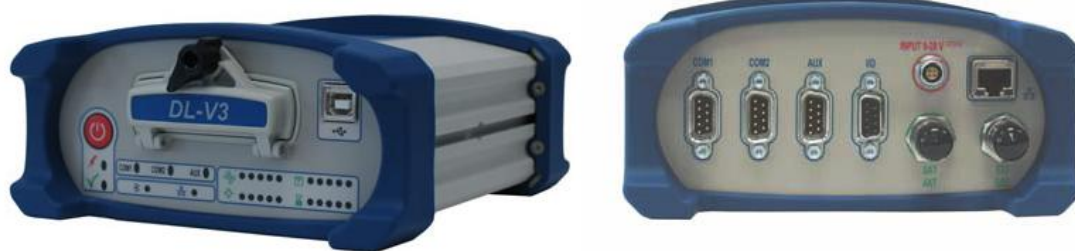
Η παρουσίαση αυτή περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τμημάτων του συστήματος, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία. Ακόμα, παρουσιάζεται το λογισμικό ελέγχου (CDU), καθώς επίσης και το λογισμικό της εκ των υστέρων επεξεργασίας των μετρήσεων (Inertial Explorer 8.00).

3.2 Μέρη Εξοπλισμού

3.2.1 Δέκτες δορυφορικού εντοπισμού

Όπως αναφέρθηκε, το ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης αποτελείται από δύο δέκτες GNSS (GPS / GLONASS).

Ένας από αυτούς χρησιμοποιείται ως σταθμός αναφοράς τοποθετούμενος σε σημείο γνωστών συντεταγμένων (Base). Η εμπορική ονομασία του δέκτη αυτού είναι Novatel DL-V3 (Σχήμα 3.1). Ο δέκτης αυτός έχει δυνατότητα ραδιοζεύξης για κινηματικές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (RTK). Επίσης, έχει τη δυνατότητα καταγραφής των μετρήσεων σε αφαιρούμενη κάρτα μνήμης, αλλά και δυνατότητες δικτύωσης μέσω Bluetooth και δικτύου LAN.



Σχ. 3.1 Δέκτης GNSS DL-V3 [www.novatel.com]

Fig. 3.1 GNSS receiver DL-V3 [www.novatel.com]

Ο δεύτερος δέκτης GNSS του συστήματος ενσωματώνεται στο σύστημα συγχρονισμού SPAN. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο τύπων δεκτών GPS είναι κοινές και δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Χαρακτηριστικά δεκτών GPS (DL-V3 PROPAK-V3)		
<i>Τεχνικά Χαρακτηριστικά</i>		
Συστήματα λειτουργίας	GPS, GLONASS	
Συστήματα διαφορικού GPS	CDGPS, OmniSTAR (με συνδρομή), WAAS, EGNOS	
Κανάλια	72	
Συχνότητα λειτουργίας	GPS: L1 C/A, L2C, L2 P(Y), με αναβάθμιση L5) GLONASS: L1 L2	
Συχνότητα μετρήσεων	Έως 20 Hz	
Εξωτερικό χρονόμετρο	Ναί	
<i>Οριζοντιογραφική Ακρίβεια</i>		
RMS	Single Point L1	1.8 m
RMS	Single Point L2	1.5 m
RMS	SBAS	0.6 m
RMS	DGPS	0.45 m
<i>Ακρίβεια Μετρήσεων</i>		
RMS	L1 (C/A code)	4 cm
RMS	L1 (Carrier Phase)	0.5 mm
RMS	L2 (P(Y) code)	8 cm
RMS	L2 (Carrier Phase)	1 mm
RTK mode		2 cm
RMS	Ακρίβεια Χρονόμετρου	20 ns
RMS	Ακρίβεια Ταχύτητας	0.03 m/s

Πίν. 3.1 Χαρακτηριστικά δεκτών GNSS συστήματος SPAN

Table 3.1 Specifications of GNSS receivers of SPAN system

3.2.2 Αδρανειακή μονάδα εντοπισμού

Η αδρανειακή μονάδα κατασκευάζεται στη Γερμανία, από την εταιρία iMAR (<http://www.imar-navigation.de>). Πρόκειται για το μοντέλο: iIMU-FSAS-E-EI-SN-O (Σχήμα 3.2), του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Επιπλέον χαρακτηριστικό της αδρανειακής μονάδας είναι ότι υποστηρίζει καταγραφές από αισθητήρα οδομέτρου.

Οι καταγραφές του οδομέτρου μεταφέρονται ενσύρματα στην αδρανειακή μονάδα. Από εκεί, οι καταγραφές του οδομέτρου μαζί με τις καταγραφές της αδρανειακής μονάδας μεταφέρονται στο σύστημα συγχρονισμού SPAN.



Σχ. 3.2 Αδρανειακή Μονάδα [www.imar-navigation.de]

Fig. 3.2 IMU unit [www.imar-navigation.de]

Χαρακτηριστικά Αδρανειακής Μονάδας IMAR iIMU-FSAS-E-EI-SN-O			
<i>Τεχνικά Χαρακτηριστικά</i>			
	Εύρος μέτρησης	Αβεβαιότητα	Σφάλμα κλίμακας
Γυροσκόπια	$\pm 500 \text{ deg/sec}$	$< 0.75 \text{ deg/hr}$	300ppm
Επιταχυνσιόμετρα	$\pm 5 \text{ g}$	1.0mg	400ppm
Τυχαίο γωνιακό σφάλμα		$0.1 \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$	
<i>Λοιπά χαρακτηριστικά</i>			
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών	35000 hr		
Συχνότητα μετρήσεων	200 Hz		
Διαστάσεις	128x128x104 mm		
Βάρος	2.1 kg		
Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης (RMS)	1.8 m (SPP) – 0.45 m (DGPS)		
Ακρίβεια προσδιορισμού ταχύτητας (RMS)	0.02 m/s		
Ακρίβεια προσδιορισμού επιτάχυνσης (RMS)	0.03 m/s ²		
Ακρίβεια προσδιορισμού κιν. συμπεριφοράς	0.015° (roll, pitch) – 0.041° (yaw)		

Πίν. 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αδρανειακής μονάδας

Table 3.2 Technical specifications of IMU

3.2.3 Ψηφιακό οδόμετρο

Το οδόμετρο που συνοδεύει το ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης είναι το WPT-M12 και κατασκευάζεται από τη γερμανική εταιρία Corrsys Datron (<http://www.corrsys-datron.com>) (Σχήμα 3.3).

Ο αισθητήρας προσαρμόζεται σε μη κινητήριο τροχό του οχήματος με χρήση κατάλληλου προσαρμογέα. Με αυτόν τον τρόπο, τοποθετείται ομοαξονικά στον τροχό προσάρτησης, ώστε να μεταδίδεται σε αυτόν ο αριθμός των περιστροφών.

Η μετάδοση των καταγραφών γίνεται μέσω ηλεκτρονικών παλμών (ticks). Μία πλήρη περιστροφή του τροχού αντιστοιχεί σε 1000 παλμούς (1000 ticks/revolution). Με αυτόν τον τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης του οχήματος μεταβάλλεται και ο αριθμός των παλμών που μεταδίδονται από τον αισθητήρα στην μονάδα του χρόνου (ticks/sec). Συνεπώς, με γνωστή την περίμετρο του τροχού στον οποίο προσαρμόζεται το οδόμετρο και σε συνδυασμό με τη συχνότητα μετάδοσης των παλμών (ticks/sec), το σύστημα υπολογίζει την διανυθείσα απόσταση καθώς και την ταχύτητα κάθε χρονική στιγμή.



Σχ. 3.3 Οδόμετρο Corrsys Datron [www.corrsys-datron.com]

Fig. 3.3 Corrsys Datron odometer [www.corrsys-datron.com]

3.2.4 Μονάδα συγχρονισμού αισθητήρων

Η εμπορική ονομασία της μονάδας συγχρονισμού, είναι Novatel PROPAK-V3 (Σχήμα 3.4). Το σύστημα συγχρονισμού SPAN ενσωματώνει τον κινητό δέκτη GNSS (rover) που τοποθετείται στο όχημα, συνδέεται με τις σειριακές θύρες επικοινωνίας και ελέγχου της αδρανειακής μονάδας και τελικά με τον Η/Υ.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αδρανειακή μονάδα συνδέεται και δέχεται τις καταγραφές του οδομέτρου τις οποίες τελικά αποστέλλει μαζί με τις δικές της στο σύστημα SPAN. Το σύστημα ελέγχεται από το λογισμικό ελέγχου μέσω του Η/Υ που συνδέεται σε αυτό. Μέσα από το λογισμικό αυτό εκτός από τον έλεγχο ορίζονται και τα είδη των καταγραφών που αποστέλλονται στο σύστημα SPAN και τελικά αποθηκεύονται στον Η/Υ. Έτσι, οι καταγραφές που συγκεντρώνονται στο σύστημα SPAN τελικά είναι οι μετρήσεις GPS, οι καταγραφές της αδρανειακής μονάδας, καθώς και οι καταγραφές οδομέτρου.

Από τα παραπάνω καταδεικνύεται ότι η σύνδεση με τον Η/Υ είναι απαραίτητη. Όχι μόνο για τον έλεγχο του δέκτη και την επιλογή των καταγραφών που αποθηκεύονται, αλλά και για το χώρο αποθήκευσης δεδομένου ότι η μονάδα PROPAK-V3 δεν έχει

δυνατότητα αποθήκευσης των καταγραφών σε ενσωματωμένη μνήμη όπως ο δέκτης DL-V3.



Σχ. 3.4 PROPAK-V3 [www.novatel.com]

Fig. 3.4 PROPAK-V3 [www.novatel.com]

3.3 Μέρη Λογισμικού

3.3.1 Λογισμικό χειρισμού μονάδας συγχρονισμού αισθητήρων

Το λογισμικό ελέγχου του συστήματος SPAN εκτός του ότι ελέγχει και μεσολαβεί για την αποθήκευση των καταγραφών στον H/Y, ρυθμίζει και διαχειρίζεται τον βασικό δέκτη του συστήματος DL-V3. Η εμπορική ονομασία του λογισμικού αυτού είναι Novatel CDU 3.5.0.7. Στιγμιότυπο κατά τη λειτουργία του φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

Στο λογισμικό ελέγχου εμφανίζονται παράθυρα τα οποία δίνουν διάφορες πληροφορίες. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι ορατότητες προς τον δορυφορικό σχηματισμό, η ισχύς του σήματός τους (SNR), η γεωμετρία των δορυφόρων μέσω τιμών DOPs (Dilution Of Precision), ο τεχνητός ορίζοντας του οχήματος όπως προκύπτει από τις ενδείξεις της αδρανειακής μονάδας, η ταχύτητα και η θέση του οχήματος κάθε χρονική στιγμή, καθώς και η τροχιά που διαγράφεται. Ενδεικτικό παράθυρο του λογισμικού φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το λογισμικό ελέγχου Novatel CDU χρησιμοποιείται και για τη ρύθμιση και διαχείριση του βασικού δέκτη DL-V3.

Το παράθυρο μέσα από το οποίο γίνεται η ρύθμιση και διαχείριση του δέκτη DL-V3, καλείται DL-Explorer. Ενδεικτική εικόνα του παραθύρου που εμφανίζεται από τον DL-Explorer φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχ. 3.5 Λογισμικό Novatel CDU

Fig. 3.5 Novatel CDU software



Σχ. 3.6 DL-Explorer για DL-V3

Fig. 3.6 DL-Explorer for DL-V3

3.3.2 Λογισμικό εκ των υστέρων επεξεργασίας μετρήσεων

Οι καταγραφές που αποθηκεύονται και προέρχονται από τους δέκτες GNSS, την αδρανειακή μονάδα και τον αισθητήρα οδομέτρου αποτελούν τα πρωτογενή δεδομένα του συστήματος καταγραφής. Η επεξεργασία τους για την εξαγωγή συντεταγμένων των σημείων της τροχιάς του κινητού γίνεται σε λογισμικό εκ των υστέρων επίλυσης (post-processing software), το οποίο διατίθεται από την εταιρία Novatel. Η ονομασία του υπόψη λογισμικού είναι Novatel Inertial Explorer 8.10. Στιγμιότυπο κατά τη λειτουργία του φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από τον δέκτη που τοποθετείται στο όχημα (PROPAK-V3) είναι συγχωνευμένα σε ένα αρχείο. Έτσι, οι εποχές GPS, οι καταγραφές της αδρανειακής μονάδας και αυτές του οδομέτρου αποθηκεύονται σε ένα ενιαίο αρχείο με κατάληξη “.gps”. Όμοια, ο βασικός δέκτης καταγράφει τις εποχές GPS σε παρόμοιο αρχείο με κατάληξη “.pdc”. Προκειμένου οι πρωτογενείς αυτές μετρήσεις να εισαχθούν στο λογισμικό την εκ των υστέρων επίλυσή τους, απαιτείται διαχωρισμός τους από το ενιαίο αρχείο στο οποίο περιέχονται.

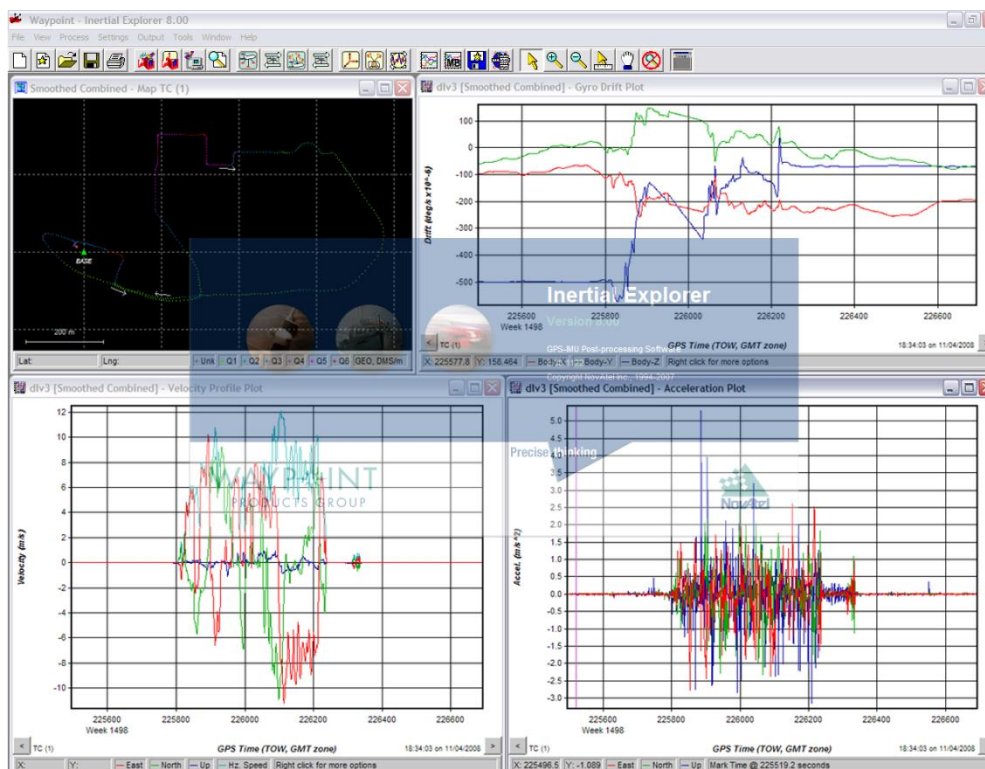
Συγκεκριμένα, από το αρχείο του βασικού δέκτη (“.pdc”) εξάγονται δύο επιμέρους αρχεία, ένα με τις φάσεις GPS (“.gpb”) και ένα με τις εκπεμπόμενες εφημερίδες των δορυφόρων (almanac) (“.erp”). Αντίστοιχα, από το αρχείο του δέκτη PROPAK-V3 (“.gps”) εξάγονται τέσσερα επιμέρους αρχεία. Δύο από αυτά αφορούν τις μετρήσεις GPS – δηλαδή, το αρχείο με τις εποχές GPS (“.gpb”) και εκείνο με τις εκπεμπόμενες εφημερίδες των δορυφόρων (“.erp”). Τα υπόλοιπα δύο αρχεία αφορούν τις καταγραφές της αδρανειακής μονάδας (“.imr”) και του αισθητήρα του οδομέτρου (“.dmr”).

Επόμενο βήμα είναι η διαδικασία επίλυσης, η οποία ξεκινάει με τη δημιουργία ενός νέου “project”. Στο “project” αυτό εισάγονται τα αρχεία του βασικού και κινητού δέκτη GPS, το αρχείο με τις καταγραφές της αδρανειακής μονάδας, καθώς και εκείνο με τις καταγραφές του οδομέτρου. Στη συνέχεια, το λογισμικό από μόνο του ζητάει τις ακριβείς σχετικές θέσεις του κέντρου φάσης της κεραίας GPS και του αισθητήρα του οδομέτρου ως προς το κέντρο της αδρανειακής μονάδας, με ακρίβεια της τάξης λίγων χιλιοστών.

Εφόσον υπολογιστούν οι συντεταγμένες για τις εποχές GPS που κατέγραψε ο κινητός δέκτης με τη μέθοδο του διαφορικού προσδιορισμού θέσης (D-GNSS), γίνεται υπολογισμός των τελικών συντεταγμένων των σημείων της τροχιάς του οχήματος συμπεριλαμβάνοντας και τις καταγραφές της αδρανειακής μονάδας, καθώς και του οδομέτρου. Ο βαθμός συνέργειας των παραπάνω καταγραφών μπορεί να επιλεγεί από το λογισμικό είτε ως χαμηλός (loosely coupled) είτε ως υψηλός (tightly coupled). Σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε υψηλός βαθμός συνέργειας (tightly coupled).

Επιπλέον, μετά την εξαγωγή των συντεταγμένων της τροχιάς του οχήματος, υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής φίλτρου Kalman προκειμένου να βελτιωθεί το εξαγόμενο αποτέλεσμα. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται “RTS smoother” και εφαρμόζεται και προς τις δύο κατευθύνσεις (forward & reverse).

Το λογισμικό έχει δυνατότητα εξαγωγής των συντεταγμένων των σημείων της τροχιάς του οχήματος σε πολλές μορφές, όπως για παράδειγμα σε μορφή “.kml” η οποία είναι αξιοποιήσιμη από το λογισμικό Google Earth.



Σχ. 3.7 Λογισμικό Inertial Explorer

Fig. 3.7 Inertial Explorer software

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τις προπαρασκευαστικές εργασίες, καθώς και τα βήματα σχεδιασμού του κύριου πειράματος. Ειδικότερα, γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις δοκιμές λειτουργίας του συστήματος πλοήγησης, στις βοηθητικές κατασκευές εγκατάστασης του εξοπλισμού στο όχημα καταγραφής, καθώς και στη διαδικασία επιλογής του περαιτέρω σχεδιασμού του οριστικού πειράματος.

4.1 Προπαρασκευαστικές Εργασίες

4.1.1 Εξοικείωση με το σύστημα καταγραφής – πρακτικά προβλήματα

4.1.1α Γενικά

Οι εργασίες, που περιγράφονται στη συνέχεια, προηγήθηκαν του κυρίως πειράματος, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά τα τμήματα από τα οποία αποτελείται το ολοκληρωμένο σύστημα SPAN και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Οι δοκιμές διασύνδεσης και λειτουργίας όλων των τμημάτων του συστήματος υλοποιήθηκαν σε διαφορετικά στάδια, με τη βοήθεια διαδοχικών πειραμάτων. Οι δοκιμές αυτές στόχο έχουν την όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, την εξοικείωση με αυτό, την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν, και γενικά για την καλύτερη προετοιμασία του κυρίως πειράματος. Οι δοκιμές, με χρονολογική σειρά πραγματοποίησης είναι:

4.1.1β Δοκιμή 1 (18/09/2008)

Στη Δοκιμή 1 (18/09/2008), τοποθετήθηκε το σύστημα SPAN σε αυτοκίνητο ώστε να γίνει αποτύπωση επιλεγμένης διαδρομής στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένας βασικός σταθμός, ο οποίος τοποθετήθηκε στην οροφή του κτιρίου Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερος προσδιορισμός θέσης των μετρήσεων δορυφορικού εντοπισμού, με εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων. Ο εξοπλισμός του πειράματος περιλαμβάνει:

- φορητό H/Y και λογισμικό ελέγχου συστήματος SPAN: CDU software v.3.4.0.1
- μεταλλική μετροταινία
- δέκτη αναφοράς GPS: DL-V3 (κεραία και καλώδιο κεραίας για GPS: GPS 702-GG, καλώδιο τροφοδοσίας και μετατροπή για συσσωρευτή 12V, 1 συσσωρευτή 12V, 1 γεωδαιτικό τρίποδα, 1 τρικόχλιο)
- σύστημα SPAN: PROPAK-V3 (αδρανειακή μονάδα: IMU-FSAS, κεραία και καλώδιο κεραιών για τον κινητό δέκτη GPS: GPS 702-GG, καλώδιο τροφοδοσίας και μετατροπή για συσσωρευτή 12V, καλώδιο σύνδεσης της αδρανειακής μονάδας με σύστημα SPAN: CABLE-FSAS-EI-SN-CP2, σειριακό καλώδιο διασύνδεσης συστήματος SPAN και ηλεκτρονικού υπολογιστή (RS232 to RS232), 2 συσσωρευτές 12V για λειτουργία του συστήματος SPAN και της αδρανειακής μονάδας, μαγνητική βάση και στυλαιός για τη στερέωση της κεραίας του κινητού δέκτη GPS).

Το ολοκληρωμένο σύστημα SPAN, το οποίο τοποθετήθηκε στο αυτοκίνητο, ρυθμίστηκε έτσι ώστε να καταγράφει τη συνδυασμένη θέση από δορυφορικές μετρήσεις και αδρανειακού.

Αρχικά, προηγήθηκε η ευθυγράμμιση της αδρανειακής μονάδας του συστήματος ώστε τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα να λάβουν αρχικές τιμές, αναλόγως με τη θέση του συστήματος πάνω στη γήινη επιφάνεια. Στη συνέχεια, καθορίστηκαν τα είδη των καταγραφών, καθώς και η συχνότητα καταγραφής τους. Επόμενο βήμα, ήταν η έναρξη της καταγραφής ενώ το όχημα βρισκόταν σε στάση, δηλαδή με μηδενική ταχύτητα (coarse alignment) για χρονικό διάστημα ~ 5 min. Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκαν οι αναγκαίες ρυθμίσεις βάσει των οποίων επιτυγχάνεται η επικοινωνία του δέκτη PROPAK με το λογισμικό, ορίζονται τα είδη των καταγραφών και εκτελείται η έναρξή τους. Αναλυτικά, οι ρυθμίσεις αυτές δίδονται στο Παράρτημα Α.

Στη συνέχεια, το όχημα ξεκίνησε την πορεία του μπροστά από το κτίριο Λαμπαδαρίου με κατεύθυνση ΒΑ προς το κτίριο της Κεντρικής Διοίκησης. Από εκεί, ακολουθώντας τη διαδρομή στον υπόγειο χώρο στάθμευσης κατευθύνθηκε προς

τα εργαστήρια της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για να καταλήξει και πάλι στην περιφερειακή οδό, όπου κινούμενο ΝΔ επέστρεψε στο σημείο εκκίνησης, περνώντας μπροστά από το κτίριο Βέη.



Σχ. 4.1 Πορεία διαδρομής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου [Google Earth]

Fig. 4.1 Vehicle trajectory at National Technical University of Athens (NTUA) campus [Google Earth]

Μετά το τέλος της διαδρομής, όπως και κατά την έναρξη του πειράματος η καταγραφή συνεχίστηκε για ~ 5 min ακόμη με το όχημα σε στάση (coarse alignment).

Από το πρώτο αυτό πείραμα, προέκυψαν κάποια προβλήματα αλλά και κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, η σύνδεση του φορητού Η/Υ με το σύστημα SPAN, έγινε μέσω της σειριακής θύρας του Η/Υ, οπότε η ταχύτητα επικοινωνίας ήταν περιορισμένη, με αποτέλεσμα η συχνότητα καταγραφής της αδρανειακής μονάδας να μην είναι η μέγιστη (200Hz). Επίσης, τα είδη των καταγραφών ρυθμίστηκαν σε μορφή ASCII – ενώ, έπρεπε να ρυθμιστούν σε δυαδική μορφή (Binary), ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από το λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης (Inertial Explorer). Τέλος, ο δέκτης GPS στο σημείο αναφοράς δεν ρυθμίστηκε ώστε τα είδη των καταγραφών του να είναι εκείνα που απαιτούνται από το λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης. Αποτέλεσμα των παραπάνω προβλημάτων ήταν αδυναμία στην επίλυση των μετρήσεων που συλλέχθηκαν.

4.1.1γ Δοκιμή 2 (23/09/2008)

Η Δοκιμή 2 έγινε στις 23/09/2008, ακολουθώντας τη διαδρομή της δοκιμής 1. Τα είδη των καταγραφών καθώς και η διάταξη του εξοπλισμού παρέμειναν τα ίδια.

Ωστόσο, έγιναν αλλαγές στον τρόπο σύνδεσης του H/Y με το σύστημα SPAN, (χρήση καλωδίου RS232 to USB, σε αντίθεση με Δοκιμή 1, όπου η σύνδεση ήταν σειριακή). Έτσι, με τη σύνδεση USB, επιτεύχθηκε ο μέγιστος ρυθμός καταγραφής της αδρανειακής μονάδας (200Hz).

Επιπρόσθετα, τροποποιήθηκε η μορφή των καταγραφών, έτσι ώστε αυτές να εξάγονται σε δυαδική (Binary) μορφή, ώστε το πρόγραμμα της εκ των υστέρων επίλυσης να μπορεί να τις αξιοποιήσει.

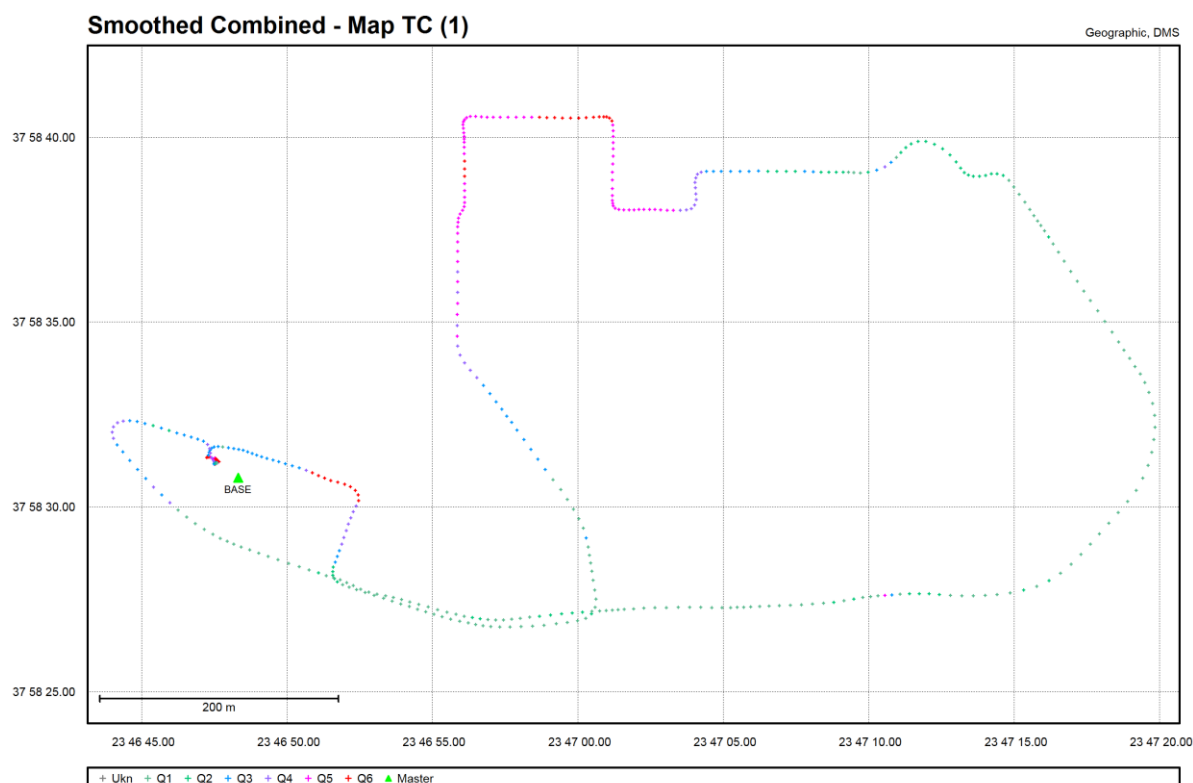
Τέλος, εκτός από τον δέκτη GPS (DL-V3), που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο πείραμα στο σημείο αναφοράς, σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκε και δεύτερος δέκτης (Trimble 4700), ώστε να συγκριθούν οι λύσεις ως προς τους δύο σταθμούς αναφοράς. Ο βασικός δέκτης GPS DL-V3, σε αντίθεση με τη Δοκιμή 1, ρυθμίστηκε έτσι ώστε τα είδη των καταγραφών να είναι εκείνα τα οποία να μπορεί να χειριστεί το λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης.

Αποτέλεσμα της επίλυσης των σημείων τόσο ως προς τον βασικό δέκτη DL-V3, όσο και ως προς τον Trimble 4700, ήταν η πολύ μικρή απόκλιση, της τάξης των 2 mm σε κάθε άξονα (Easting, Northing, h). Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά δεν προκύπτουν διαφορές, εξ' αιτίας χρησιμοποίησης δέκτη διαφορετικού κατασκευαστή.

Τα προβλήματα που προέκυψαν σε αυτή τη Δοκιμή αφορούν στη μειωμένη ποιότητα λύσεων σε συγκεκριμένα τμήματα της διαδρομής. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο βεβαρυσμένο ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλον της περιοχής (ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές λόγω κεραιών στον Υμηττό) το οποίο φαίνεται στο λογισμικό ελέγχου του συστήματος SPAN (CDU), κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με έναν δείκτη ο οποίος περιγράφεται ως “δείκτης αναλογίας σήματος / θορύβου” (SNR Signal / Noise Ratio).

Αποτέλεσμα των παραπάνω προβλημάτων ήταν, ορισμένες λύσεις να έχουν υποβαθμισμένη έως κακή ποιότητα λύσης. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η τροχιά

του οχήματος, όπως προέκυψε από την συνδυασμένη λύση σε μετάβαση και επιστροφή.



Σχ. 4.2 Συνδυασμένη λύση GPS/IMU στη 2^η Δοκιμή [Inertial Explorer]

Fig. 4.2 Combined solution GPS/IMU at trial 2 [Inertial Explorer]

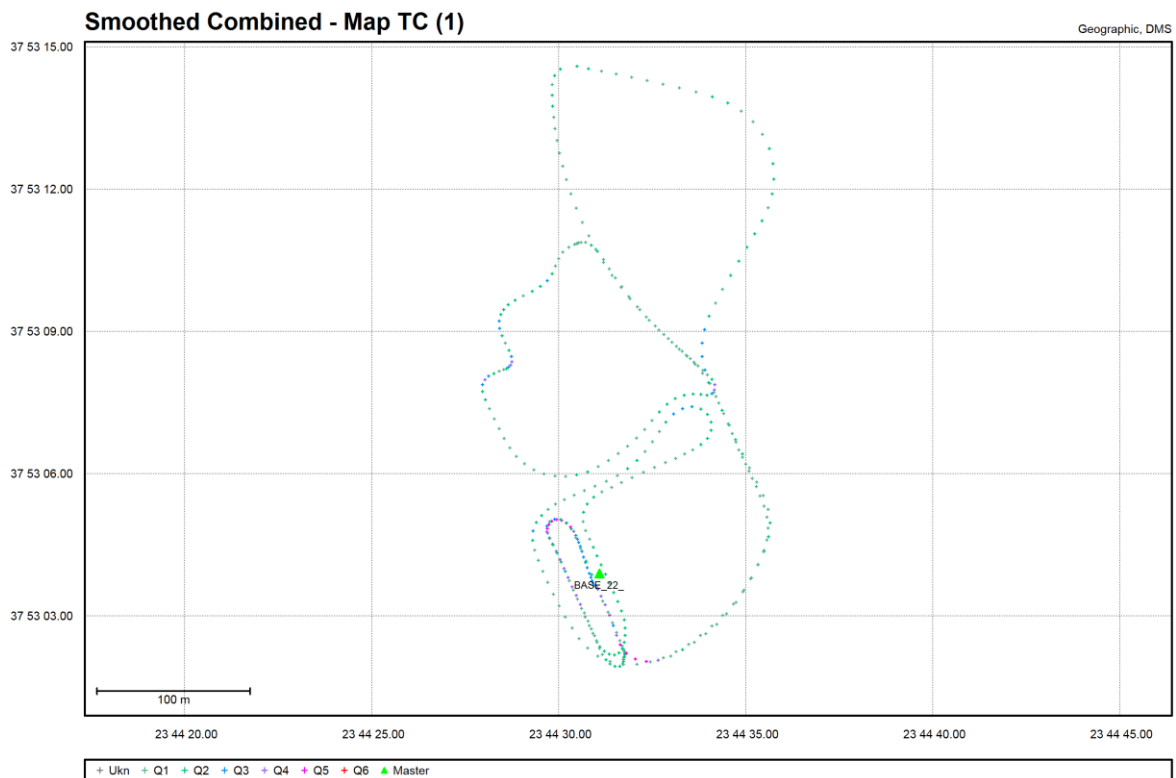
4.1.1δ Δοκιμή 3 (22/10/2008)

Η Δοκιμή 3 πραγματοποιήθηκε στις 22/10/2008, στο χώρο του παλαιού Αεροδρομίου στο Ελληνικό, και συγκεκριμένα στο χώρο στάθμευσης του πρώην Ανατολικού Αεροδρομίου. Η επιλογή της τοποθεσίας αυτής έγινε προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατό λιγότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, όπως προέκυψε στην Ενότητα 4.1.1γ.

Στο πείραμα αυτό, στόχος ήταν και η ενσωμάτωση αισθητήρα οδομέτρου στο σύστημα SPAN. Ωστόσο, μετά από δοκιμές που προηγήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι αφενός το λογισμικό της αδρανειακής μονάδας, (με την οποία έπρεπε να συνδεθεί ο αισθητήρας του οδομέτρου) δεν υποστήριζε καταγραφή οδομέτρου και αφετέρου, ότι η συνδεσμολογία μεταξύ αδρανειακής μονάδας και οδομέτρου δεν ήταν συμβατή. Έτσι, το πείραμα αυτό έγινε χωρίς καταγραφές οδομέτρου.

Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των μετρήσεων της αδρανειακής μονάδας, χρησιμοποιήθηκε η εντολή, “RVBCALIBRATE ENABLE”. Η εντολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό των στροφών του συστήματος αναφοράς του αυτοκινήτου (b-frame), ως προς το σύστημα αναφοράς του αδρανειακού (i-frame). Η καταγραφή των τριών αυτών στροφών, ως προς κάθε άξονα, επιτυγχάνεται επιλέγοντας το είδος καταγραφής (log) “VEHICLEBODYROTATION” και αξιοποιούνται εφόσον εισαχθούν από το χρήστη στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων έδειξαν ότι βελτιώθηκαν πράγματι οι μετρήσεις GPS, καθώς και η ποιότητα των τελικών συντεταγμένων των σημείων που καταγράφηκαν. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η τροχιά του οχήματος, όπως προέκυψε από την συνδυασμένη λύση από μετάβαση και επιστροφή.



Σχ. 4.3 Συνδυασμένη λύση GPS/IMU στη Δοκιμή 3 [Inertial Explorer]

Fig. 4.3 Combined solution GPS/IMU at trial 3 [Inertial Explorer]



Σχ. 4.4 Πορεία διαδρομής στο παλιό αεροδρόμιο του Ελληνικού [Google Earth]

Fig. 4.4 Vehicle trajectory at old airport “Helliniko” in Athens [Google Earth]

4.1.1ε Δοκιμή 4 (20/11/2008)

Η Δοκιμή 4 πραγματοποιήθηκε στις 20/11/2008, σε τμήμα μήκους ~ 10 km της λεωφόρου Σταυρός – Λαύριο, μετά την Κερατέα.

Σκοπός του πειράματος ήταν η ενσωμάτωση του οδομέτρου στο σύστημα SPAN. Αυτό επιτεύχθηκε μετά την αναβάθμιση του λογισμικού της αδρανειακής μονάδας, έτσι ώστε να υποστηρίζει την καταγραφή μετρήσεων οδομέτρου, και την κατασκευή συνδεσμολογίας σειριακής επικοινωνίας, ώστε η συνδεσμολογία μεταξύ αδρανειακής μονάδας και οδομέτρου να είναι δυνατή.

Μετά τις τροποποιήσεις αυτές κατέστη δυνατή αφενός, η συνδεσμολογία μεταξύ αδρανειακής μονάδας και οδομέτρου και αφετέρου, η καταγραφή μετρήσεων μέσω του συστήματος SPAN.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ο τρόπος προσάρτησης του οδομέτρου σε μη κινητήριο τροχό του οχήματος, καθώς και η θέση στο όχημα, στην οποία τοποθετήθηκε η αδρανειακή μονάδα.



Σχ. 4.5 Προσάρτηση οδομέτρου και αδρανειακής μονάδας στο όχημα καταγραφής
 Fig. 4.5 Odometer and IMU installation on the recording vehicle

Επιπρόσθετα, για τις ανάγκες αυτού του πειράματος μετρήθηκαν οι εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας GPS και του άξονα του οδομέτρου, ως προς το σύστημα αναφοράς της αδρανειακής μονάδας (i-frame). Οι τιμές των εκκεντροτήτων αυτών δίνονται στον Πίνακα 4.1.

		x (m)	y (m)	z (m)
IMU	GPS Antenna	0.012	-0.042	1.155
	DMI Sensor	-0.840	-0.838	-0.175

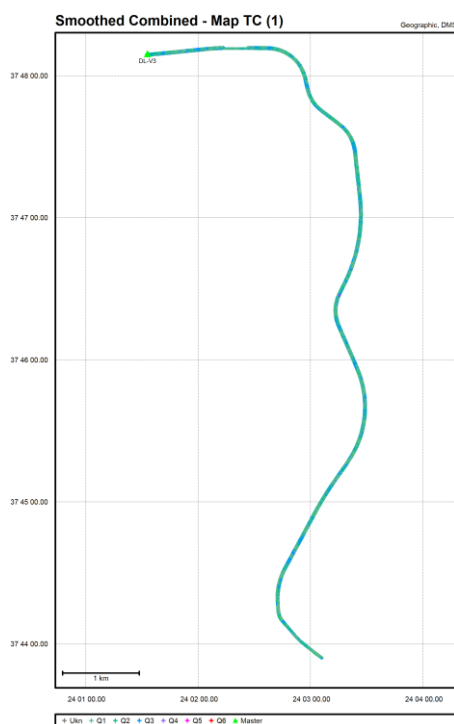
Πίνακας. 4.1 Τιμές εκκεντροτήτων αισθητήρων ως προς την αδρανειακή μονάδα
 Table 4.1 Sensor lever-arms with respect to the IMU reference system

Οι εκκεντρότητες εισάγονται από τον χρήστη στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης, προκειμένου η θέση των σημείων που βρίσκονται στο κέντρο φάσης της κεραίας του GPS να αναχθούν στο μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας. Αντίστοιχα, η θέση των σημείων που αναφέρονται στο οδόμετρο ανάγονται στο μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας. Με αυτόν τον τρόπο, η θέση που υπολογίζεται με συγχώνευση των δεδομένων των τριών μονάδων (GPS, IMU, DMI) αναφέρεται στο μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η τροχιά του οχήματος, όπως προέκυψε από την συνδυασμένη λύση σε μετάβαση και επιστροφή.

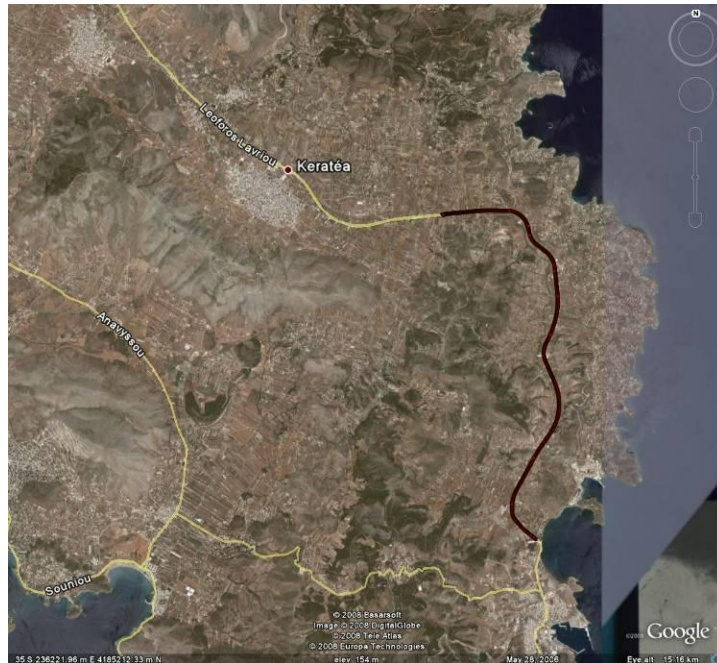
Αναφορικά με τη λειτουργία του οδομέτρου, οι καταγραφές αξιοποιούνται στην περίπτωση όπου η ποιότητα της λύσης που παρέχει ο συνδυασμός των μετρήσεων GPS – IMU είναι χειρότερη από το τυπικό σφάλμα του αισθητήρα του οδομέτρου.

Τα είδη των καταγραφών που ορίστηκαν στο σύστημα ήταν ίδια με αυτά της Δοκιμής 3 με προσθήκη δύο είδη καταγραφών, τα οποία αφορούν τη λειτουργία του οδομέτρου και τα οποία φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α (Πίνακας Παραρτήματος 5).



Σχ. 4.6 Συνδυασμένη λύση GPS/IMU/DMI στη Δοκιμή 4 [Inertial Explorer]

Fig. 4.6 Combined solution GPS/IMU/DMI for trial four [Inertial Explorer]



Σχ. 4.7 Πορεία διαδρομής σε τμήμα της λεωφόρου Σταυρός-Λαύριο [Google Earth]

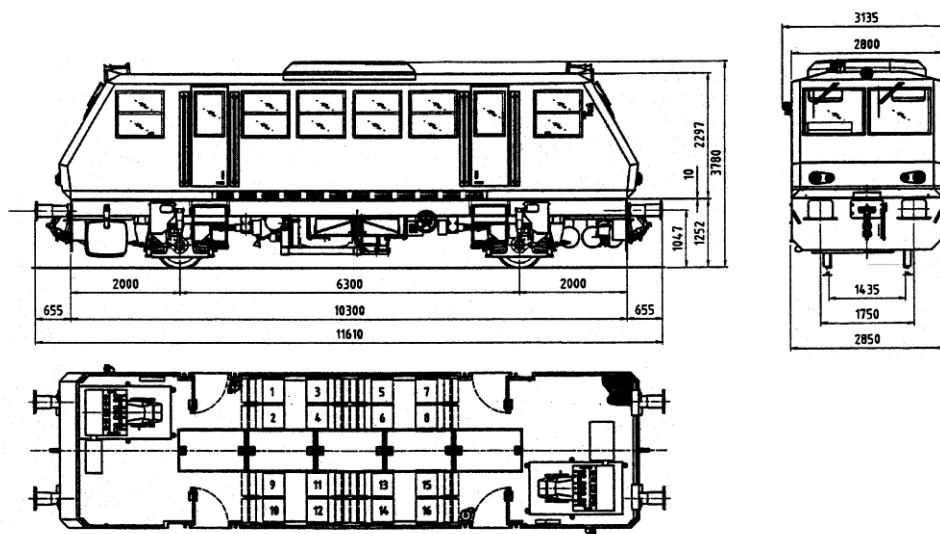
Fig. 4.7 Vehicle trajectory at a part of Lauriou Avenue [Google Earth]

4.1.2 Όχημα καταγραφής – εγκατάσταση εξοπλισμού – κατασκευές

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι εργασίες που προηγήθηκαν του κυρίως πειράματος. Αρχικά, γίνεται περιγραφή του οχήματος καταγραφής (δρεζίνα) όπου εγκαταστάθηκε ο εξοπλισμός καταγραφής. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις κατασκευές οι οποίες κρίθηκαν αναγκαίες για τη λειτουργία του εξοπλισμού. Επιπρόσθετα, αναφέρονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν καθώς και οι βασικές αποφάσεις που λήφθηκαν προκειμένου αυτά να ξεπεραστούν. Τέλος, παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της σιδηροδρομικής γραμμής κατά μήκος της οποίας γίνεται η συλλογή των δεδομένων του πειράματος.

4.1.2a Περιγραφή του οχήματος καταγραφής

Το όχημα που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση του κυρίως πειράματος, είναι μία δρεζίνα του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ). Δρεζίνα είναι ένα μικρό τετράτροχο σιδηροδρομικό όχημα, το οποίο χρησιμοποιείται από τους υπαλλήλους και εργάτες του ΟΣΕ, για μετακινήσεις, επισκόπηση γραμμής κ.ο.κ.. Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε (όχημα Δ883) έχει μήκος ~ 11.5 m, εύρος ~ 3 m και ύψος ~ 4 m. Ενδεικτικά σχέδια του οχήματος καταγραφής δίνονται στο Σχήμα 4.8.



Σχ. 4.8 Διαστάσεις οχήματος [Geismar 2002]

Fig. 4.8 Vehicle's dimensions [Geismar 2002]

Η δρεζίνα μπορεί να φιλοξενήσει έως είκοσι καθήμενους επιβάτες. Έχει κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις και μπορεί να κινηθεί με μέγιστη ταχύτητα τα 100km/h (Σχήμα 4.9).



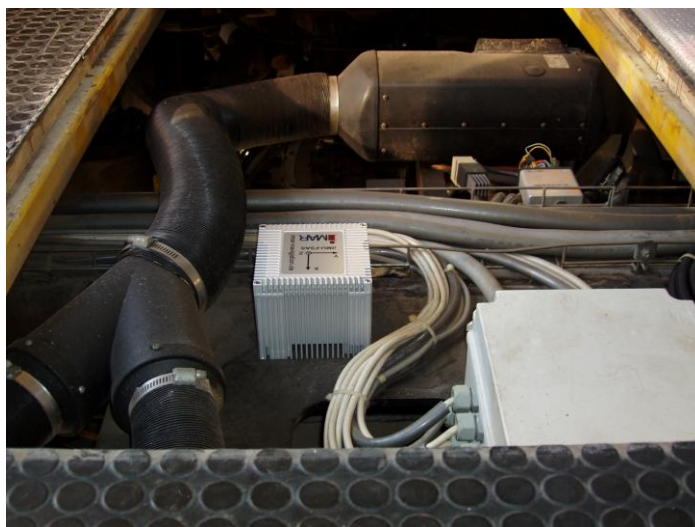
Σχ. 4.9 Εξωτερική άποψη δρεζίνας

Fig. 4.9 Vehicle exterior view

4.1.2β Τοποθέτηση αδρανειακής μονάδας

Η αδρανειακή μονάδα τοποθετήθηκε στέρεα μέσω κοχλίωσης σε μεταλλική δοκό, η οποία ανήκει στο κυρίως πλαίσιο του οχήματος (σασί). Με αυτόν τον τρόπο, η αδρανειακή μονάδα προσαρμόζεται στον σκελετό της δρεζίνας, εξασφαλίζοντας

τη σταθερή στερέωσή της, καθώς και την τοποθέτησή της προσανατολισμένη κατά το δυνατόν καλύτερα κατά μήκος της κίνησης του οχήματος.



Σχ. 4.10 Στερέωση αδρανειακής μονάδας στο όχημα καταγραφής

Fig. 4.10 Fixing of IMU unit in recording vehicle

4.1.2γ Τοποθέτηση ψηφιακού οδομέτρου

Ένα από τα βασικά προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν η προσάρτηση του αισθητήρα του οδομέτρου σε έναν από τους τέσσερις τροχούς της δρεζίνας και η μετάδοση της κίνησης του οχήματος σε αυτό. Συγκεκριμένα, χρειάστηκε επέκταση του άξονα κίνησης του οχήματος, τέτοια ώστε το οδόμετρο να προσαρτηθεί σωστά (όχι έκκεντρα) στο επίπεδο κάθετο στον άξονα της κίνησης, ώστε να καταγράφει την πλήρη περιστροφή του και να αποφευχθεί καταστροφή του αισθητήρα.

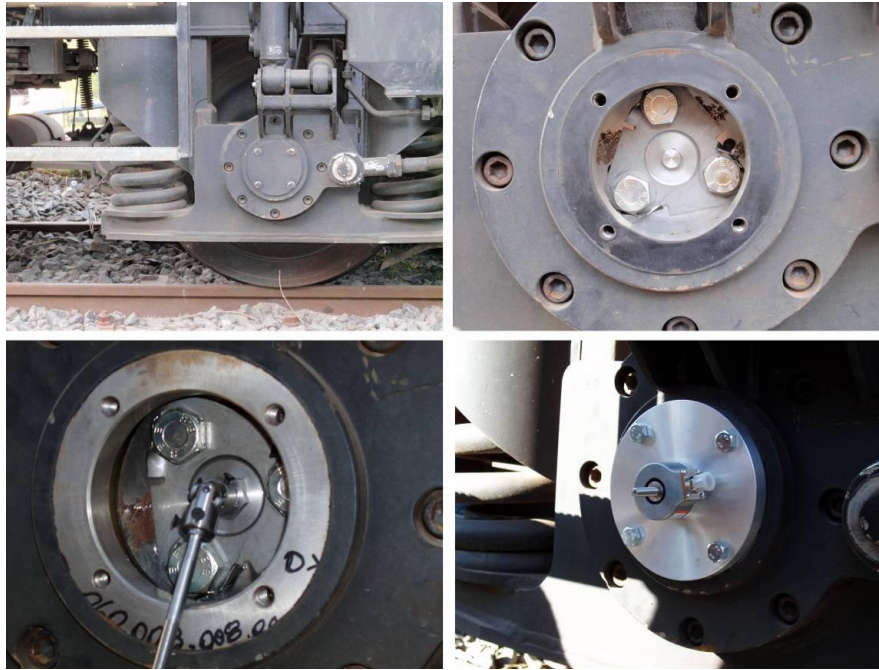
Το μέγεθος του αισθητήρα του οδομέτρου δεν διευκόλυνε την άμεση προσάρτησή του επί του άξονα του τροχού του οχήματος. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η επέκταση του άξονα κίνησης του οχήματος στην εξωτερική πλευρά του τροχού, όπου τοποθετήθηκε το οδόμετρο, με την κατασκευή κατάλληλου μετατροπέα. Αρχικά, αποσπάστηκε προσωρινά από τη δρεζίνα τμήμα του καλύμματος το οποίο βρίσκεται στερεωμένο στην εσωτερική πλευρά του τροχού. Στην επιφάνεια αυτή έγινε διαμερής οπή με σπείρωμα, έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης κοχλίας. Στη συνέχεια, επανατοποθετήθηκε το κάλυμμα και στην οπή του προσαρμόστηκε ο κοχλίας ο οποίος μετέφερε την κίνηση στο επίπεδο τοποθέτησης του οδομέτρου. Αυτό επιτεύχθηκε στερεώνοντας διαδοχικά ως προέκταση του κοχλίας έναν «σταυρό»

και με χρήση αποστάτη. Ο αποστάτης τοποθετήθηκε με σκοπό τη ζεύξη μεταξύ οδομέτρου και κοχλία. Αντίστοιχα, για την εξάλειψη τυχών εκκεντροτήτων μεταξύ του κέντρου του κοχλία και του άξονα κίνησης του τροχού, τοποθετήθηκε ο “σταυρός” (Σχήμα 4.11). Τέλος, ο αποστάτης εφαρμόστηκε στο οδόμετρο. Παράλληλα, το οδόμετρο στερεώθηκε στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού, η οποία παραμένει σταθερή κατά την κίνηση του οχήματος (δεν περιστρέφεται μαζί με τον άξονα του τροχού) (Σχήμα 4.12).



Σχ. 4.11 Μέρη μετατροπής προσάρτησης οδομέτρου
Fig. 4.11 Parts for odometer attachment modification

Η καταγραφή της κίνησης από το οδόμετρο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό (ticks/sec), οπότε στη συνέχεια συνυπολογίζοντας την περίμετρο του τροχού προκύπτει η απόσταση που έχει διανύσει το όχημα στη μονάδα του χρόνου.



Σχ. 4.12 Μετατροπή προσάρτησης οδομέτρου

Fig. 4.12 Odometer attachment modification

4.1.2δ Τροφοδοσία συστήματος καταγραφής και φορητού Η/Υ

Οι προδιαγραφές της αδρανειακής μονάδας, του κινητού δέκτη PROPAC-V3 και του οδομέτρου απαιτούν ανορθωμένη τάση 12 Volt από συσσωρευτές τύπου αυτοκινήτου.

Λόγω της αυξημένης ανάγκης σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και για την τροφοδότηση του Η/Υ, ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός των συνολικών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Για τον σκοπό αυτό, υπολογίστηκαν οι συνολικές ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, η συνολική διάρκεια τροφοδότησης του εξοπλισμού και η χωρητικότητα των συσσωρευτών του εργαστηρίου, προκειμένου να βρεθεί το πλήθος των συσσωρευτών που ήταν αναγκαίοι για την υλοποίηση του πειράματος. Τελικά, χρησιμοποιήθηκαν επτά συσσωρευτές αυτοκινήτου (12 Volt και αντοχής κατά μέσο όρο 60 Ah έκαστος), συνδεδεμένοι παράλληλα.

Για τη συνδεσμολογία αυτή, κατασκευάστηκαν δύο σειρές καλωδίων για κάθε πόλο, μία για τους θετικούς και μία για τους αρνητικούς. Η κάθε μία από αυτές αποτελούνταν από επτά σφικτήρες για πόλους συσσωρευτών αυτοκινήτων, οι οποίοι

συνδέονταν μεταξύ τους με καλώδιο διατομής 2.5 mm². Πάνω στη συνδεσμολογία αυτή αγκιστρώθηκαν οι τροφοδοσίες του υπόψη εξοπλισμού (Σχήμα 4.13).



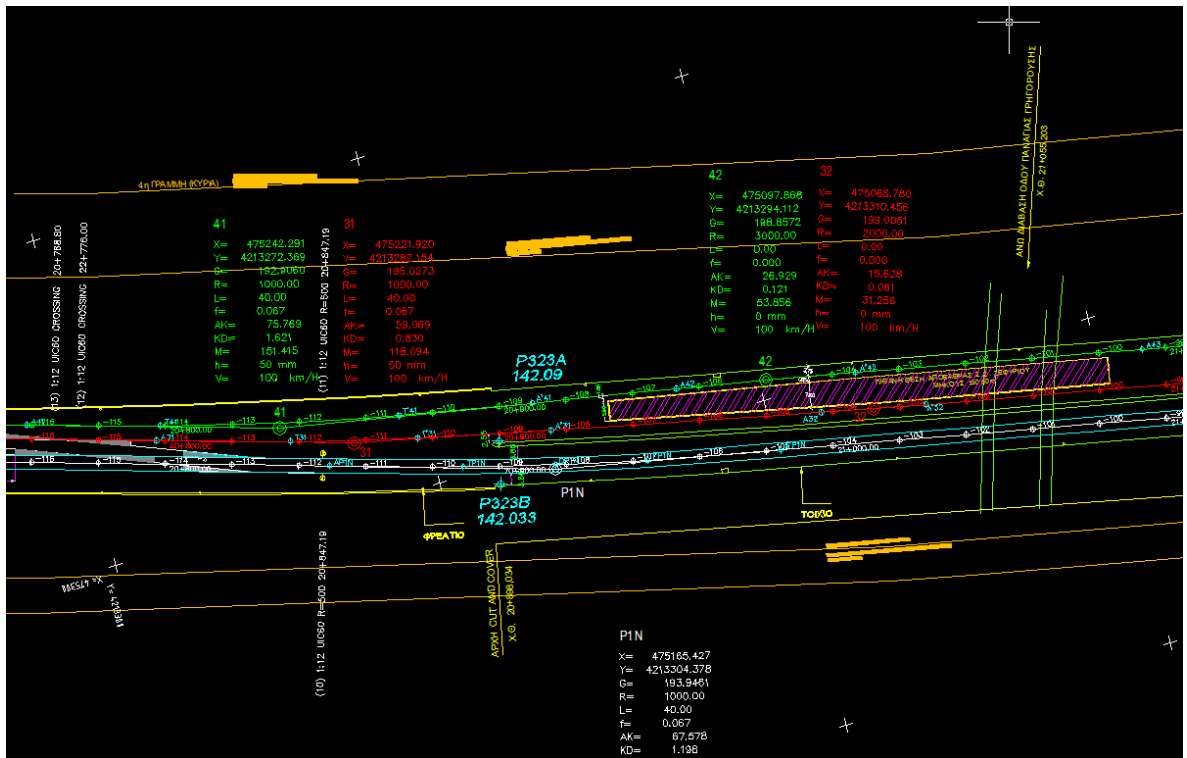
Σχ. 4.13 Συνδεσμολογία συσσωρευτών

Fig. 4.13 Accumulators connection

4.1.3 Κατασκευαστικά σχέδια άξονα καταγραφής

Ο υπολογισμός της τροχιάς της διαδρομής στηρίχθηκε σε κατασκευαστικά σχέδια της γραμμής. Τα σχέδια αυτά (Σχήμα 4.14) περιέχουν μεγάλη ποσότητα πληροφορίας, από την οποία τα στοιχεία που ενδιαφέρουν δίνονται με βήμα 20 m και φαίνονται στη συνέχεια:

- πληροφορία για την οριζοντιογραφική θέση σημείων του άξονα των σιδηροτροχιών
- ορθομετρικά υψόμετρα στη θέση αυτή, τα οποία αναφέρονται στην εσωτερική σιδηροτροχιά
- επίκλιση στη θέση της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς
- χιλιομέτρηση των σημείων αυτών ως προς γνωστή χιλιομετρική αφετηρία (θέση επί της Αττικής Οδού στην περιοχή Άνω Λιοσίων)



Σχ. 4.14 Τμήμα κατασκευαστικών σχεδίων σιδηροδρομικής γραμμής
 Fig. 4.14 As built drawings sample of railway road

4.2 Σχεδιασμός Πειράματος

4.2.1 Παράμετροι συλλογής δεδομένων πεδίου

Για την πραγματοποίηση του κυρίως πειράματος αναγκαία ήταν η αντιμετώπιση ορισμένων πρακτικών ζητημάτων όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

4.2.1a Υπολογισμός εκκεντροτήτων

Πρωταρχικής σημασίας ζήτημα είναι ο υπολογισμός των εκκεντροτήτων κάθε αισθητήρα στο σύστημα αναφοράς του οχήματος. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκε η θέση κάθε αισθητήρα (κεραία του GPS και αισθητήρα οδομέτρου) ως προς το μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας.

Οριζοντιογραφικά εφαρμόστηκε η μέθοδος της εμπροσθοτομίας και υψομετρικά η γεωμετρική χωροστάθμιση.

4.2.1β Κίνηση οχήματος καταγραφής σε μετάβαση και επιστροφή

Για την εξαγωγή των γεωμετρικών υψομέτρων από συνδυασμένες παρατηρήσεις GPS/IMU/DMI αρκεί μονή καταγραφή από το ΣΚΑ στο Κιάτο. Ωστόσο, το πείραμα διεξήχθη σε μετάβαση και επιστροφή, προκειμένου να εξασφαλισθεί επαναληψιμότητα της διαδικασίας.

Πρώτος λόγος ήταν η εξασφάλιση μέτρησης σημείων σε όλο το μήκος της διαδρομής. Ένας άλλος λόγος ήταν η πύκνωση και επαλήθευση των μετρήσεων, οι οποίες τελικά ανάγονται στον άξονα της σιδηροδρομικής γραμμής, όπου αναφέρονται και τα κατασκευαστικά σχέδια.

4.2.1γ Ταχύτητα κίνησης οχήματος καταγραφής

Ο δέκτης GPS του ολοκληρωμένου συστήματος SPAN ρυθμίστηκε ώστε να καταγράφει με συχνότητα 1 Hz. Στα κατασκευαστικά σχέδια, τα σημεία γνωστών συντεταγμένων στον άξονα της σιδηροτροχιάς, που δίνει ο κατασκευαστής, απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με 20 m. Προκειμένου, να καταγράφονται σημεία τα οποία να απέχουν απόσταση 20 m, δεδομένης της συχνότητας καταγραφής, η ταχύτητα της δρεζίνας πρέπει να είναι 20 m/s, δηλαδή περίπου 60-80 km/h.

Για την εκτέλεση του κυρίως πειράματος, υπήρχε περιορισμός ως προς την ώρα κίνησης της δρεζίνας, λόγω των δρομολογίων του προαστιακού σιδηρόδρομου. Έτσι, χρονικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, η εκτέλεση του πειράματος ορίστηκε μετά το πέρας του τελευταίου δρομολογίου του προαστιακού σιδηρόδρομου, δηλαδή μετά τις 23:30.

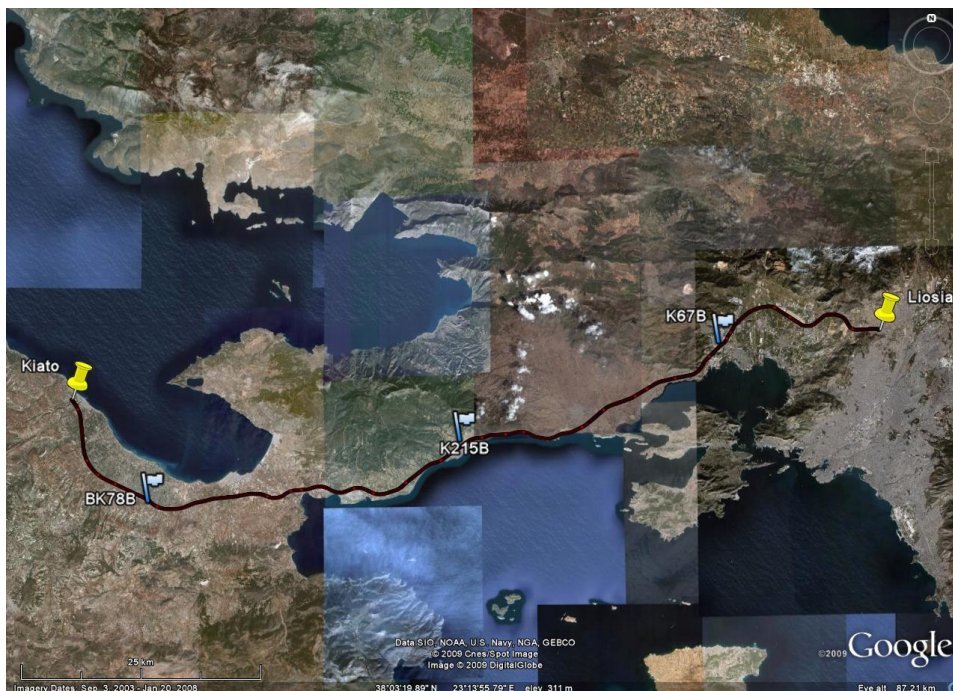
4.2.2 Επιλογή θέσεων σταθμών αναφοράς

Στον εκ των υστέρων σχετικό προσδιορισμό θέσης, εκτός από τον κινητό δέκτη GPS (rover), χρησιμοποιείται και ένας δέκτης GPS (base) σε σημείο γνωστής θέσης. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζονται εκ των υστέρων ,με μεγάλη ακρίβεια, οι συντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν από τον κινητό δέκτη (kinematic post-processed DGPS).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, απαιτείται ακρίβεια προσδιορισμού των γεωμετρικών υψομέτρων των σημείων που μετρούνται περίπου ίση με ± 4 cm. Έτσι, προκύπτει ότι το διάστημα μεταξύ βασικού και κινητού δέκτη κάθε χρονική στιγμή πρέπει να μην υπερβαίνει τα ~ 15 km. Επομένως, όταν το μέτρο αυτό είναι μεγαλύτερο από 15 km, πρέπει η επίλυση των συντεταγμένων των σημείων που καταγράφει ο κινητός δέκτης να γίνεται από έναν επόμενο βασικό δέκτη, ο οποίος έχει τις προδιαγραφές του προηγούμενου. Έτσι, ορίστηκε μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών αναφοράς 30 km. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του σημείου αφετηρίας και τερματισμού είναι ~ 100 km, σύμφωνα και με τα παραπάνω, απαιτήθηκε η χρήση τριών σταθμών αναφοράς.

Η κατανομή των δεκτών αυτών έχει την εξής μορφή: ο πρώτος απέχει από το σημείο εκκίνησης απόσταση ίση με 15 km και οι επόμενοι δύο απέχουν μεταξύ τους, αλλά και από τον πρώτο, απόσταση ίση με 30 km. Άρα, το σημείο τερματισμού βρίσκεται σε απόσταση 15 km περίπου από τον τελευταίο βασικό σταθμό GPS. Η κατανομή των σταθμών αναφοράς φαίνεται στο Σχήμα 4.15.

Αναλυτικά, οι συντεταγμένες των σημείων καθώς και τα οδοιπορικά έντυπα για τη μετάβαση στα σημεία αυτά περιγράφονται στο Παράρτημα Β.



Σχ. 4.15 Κατανομή σταθμών αναφοράς [Google Earth]

Fig. 4.15 Control points distribution [Google Earth]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

5.1 Περιοχή Μελέτης

5.1.1 Γενική περιγραφή – Οριοθέτηση περιοχής

Η περιοχή μελέτης στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του κυρίως πειράματος, είναι το τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής μεταξύ των σταθμών «Λιόσια» και «Κιάτο», συνολικού μήκους ~100 km. Συγκεκριμένα, το όχημα καταγραφής κινήθηκε στο ρεύμα κίνησης από το σταθμό «Λιόσια» προς «Κιάτο» τόσο σε μετάβαση όσο και επιστροφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

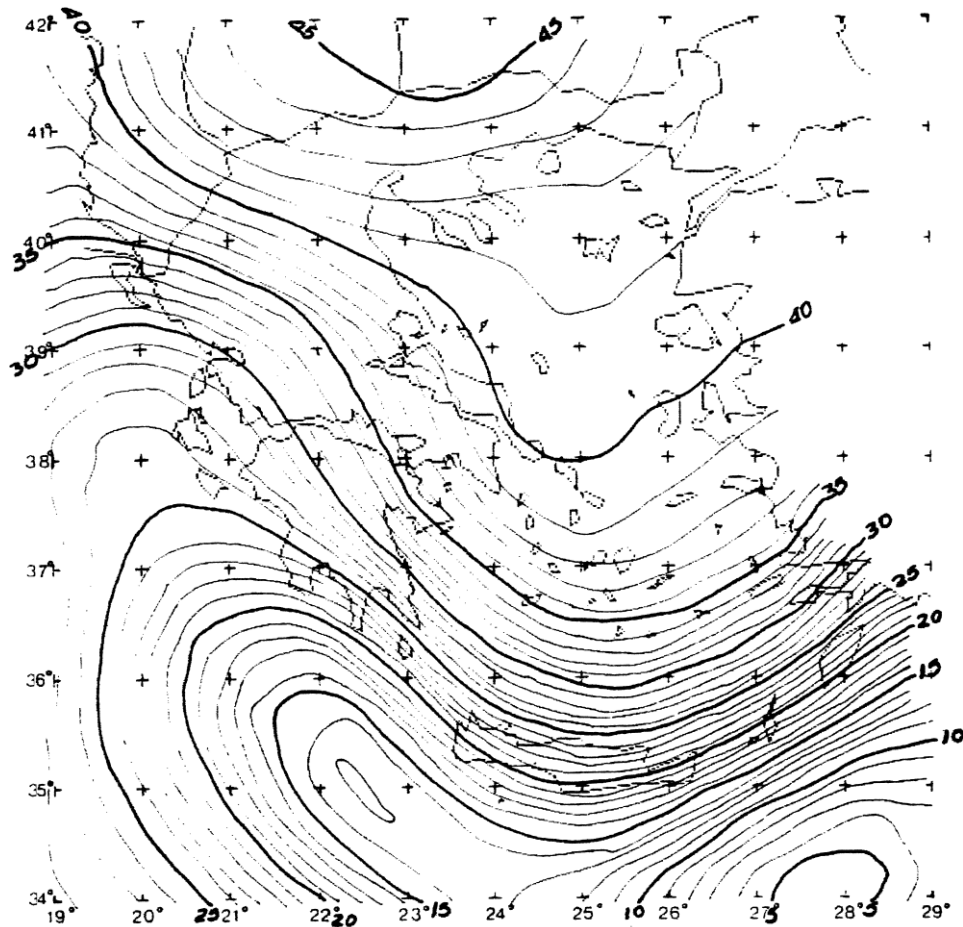


Σχ. 5.1 Πορεία διαδρομής Λιόσια – Κιάτο [Google Earth]

Fig. 5.1 Trajectory from “Liosia” to “Kiato” [Google Earth]

Ένας από τους λόγους επιλογής του συγκεκριμένου τμήματος ήταν η ύπαρξη κατασκευαστικών σχεδίων οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και επικλίσεων.

Επιπλέον, η μεταβολή του γεωειδούς στο συγκεκριμένο τμήμα, όπως προκύπτει από τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς EGM'96 και EGM'08 παρουσιάζει υψηλές τιμές και έντονες κλίσεις. Κατά συνέπεια, η περιοχή αυτή προσφέρεται προκειμένου να υπολογιστεί με μεγαλύτερη σαφήνεια η αποχή του γεωειδούς και κατά συνέπεια η μορφολογία του. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το ομαλοποιημένο γεωειδές αναφερόμενο στο ελλειψοειδές του GRS80, και ειδικότερα η έξαρση του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης. Από το Σχήμα 5.2 είναι εμφανές ότι η τροχιά κίνησης είναι σε διεύθυνση κάθετη με τις ισογεωειδείς καμπύλες.



Σχ. 5.2 Ομαλοποιημένο γεωειδές αναφερόμενο στο ελλειψοειδές του GRS80 [Γ. Βέης, 2006]

Fig. 5.2 Smoothed geoid based on GRS80 ellipsoidal [G. Veis, 2006]

5.1.2 Κατασκευαστικά σχέδια σιδηροδρομικής γραμμής

Ο Προαστιακός Σιδηρόδρομος εξυπηρετεί τις περιοχές από το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος στην Αττική μέχρι το Κιάτο στην Πελοπόννησο. Η γραμμή αποτελείται από δύο κλάδους (προς και από Κιάτο) εύρους 1435 mm. Σύμφωνα με τη σύμβαση του έργου, η γραμμή μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής αποτυπώθηκε προκειμένου να πιστοποιηθεί η οριστική μελέτη. Τα σχέδια που προέκυψαν περιλαμβάνουν διαγράμματα οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και διατομών. Τα κατασκευαστικά σχέδια καθώς και οι συντεταγμένες οριζοντιογραφίας των δύο κλάδων στη προβολή του ΕΓΣΑ'87, (με βήμα 20 m) έγιναν διαθέσιμες για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας. Τα υψόμετρα που συνοδεύουν τα σημεία αυτά είναι ορθομετρικά και αναφέρονται στην κεφαλή της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς για κάθε κλάδο. Συγκεκριμένα, τα σχέδια είναι σε μορφή .dwg (αρχείο AutoCAD) και περιέχουν επιπρόσθετη πληροφορία όπως τεχνικά έργα τα οποία κατασκευάστηκαν στη ζώνη του τροχιόδρομου (γέφυρες, σήραγγες, φρεάτια, τοιχία), σύμφωνα με τις αρχές γεωμετρικού σχεδιασμού σιδηροδρομικών έργων.

Στα υπόψη σχέδια το πρόσημο της επίκλισης διαφοροποιείται ανάλογα με τη φορά του κυκλικού τόξου. Συγκεκριμένα, αν το κυκλικό τόξο είναι αριστερόστροφο η τιμή της επίκλισης είναι θετική, ενώ αν το κυκλικό τόξο είναι δεξιόστροφο η επίκλιση είναι αρνητική. Με αυτόν τον τρόπο, επισημαίνεται ποια σιδηροτροχιά βρίσκεται χαμηλότερα σε σχέση με την αντικριστή της. Προκειμένου τα υψόμετρα να αναφέρονται σε μια σιδηροτροχιά, έγινε αναγωγή των επικλίσεων ώστε τελικά τα υψόμετρα να αναφέρονται σταθερά στη δεξιά σιδηροτροχιά στη διεύθυνση με κατεύθυνση Αθήνα – Κιάτο.

5.2 Υπολογισμός Εκκεντροτήτων Αισθητήρων Εντοπισμού

5.2.1 Γενικά

Για τις ανάγκες του πειράματος οι αισθητήρες εντοπισμού που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν ένα δέκτη GNSS (GPS/GLONASS), μία αδρανειακή μονάδα και ψηφιακό οδόμετρο. Ως εκκεντρότητες των γεωδαιτικών αισθητήρων αναφέρονται

τα διανύσματα θέσης μεταξύ του κέντρου της αδρανειακής μονάδας και των υπόλοιπων αισθητήρων. Οι τιμές των εκκεντροτήτων χρησιμοποιούνται προκειμένου οι μετρήσεις του δέκτη GPS και του οδομέτρου να αναχθούν στο κέντρο της αδρανειακής μονάδας – ως προς την οποία, αναφέρονται οι μετρήσεις τόσο των επιταχυνσιομέτρων όσο και των γυροσκοπίων.

5.2.2 Μεθοδολογία υπολογισμού εκκεντροτήτων

Η μέτρηση των εκκεντροτήτων έγινε χωριστά σε οριζοντιογραφία και υψομετρία. Οριζοντιογραφικά επιλέχθηκε η μέθοδος της εμπροσθοτομίας και υψομετρικά η μέθοδος γεωμετρικής χωροστάθμησης και της τριγωνομετρικής υψομετρίας. Αρχικά, υπολογίστηκαν οι εκκεντρότητες σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς. Συγκεκριμένα, το τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς ορίζεται από δύο σημεία A, B (Σχήμα 5.3). Στο σημείο A, δόθηκαν αυθαίρετα συντεταγμένες $A(100, 100)$, ενώ στο σημείο B $(100+D_{AB}, 100)$, όπου D_{AB} η οριζόντια απόσταση μεταξύ των σημείων A, B. Με τον τρόπο αυτό, ορίστηκε η γωνία διεύθυνσης $\alpha_{AB}=100.0000$ grad. Μεταξύ των σημείων A και B πραγματοποιήθηκε γεωμετρική χωροστάθμηση, προκειμένου να βρεθεί το υψόμετρο του B, έχοντας ορίσει αυθαίρετα το υψόμετρο του σημείου A ίσο με 5 m.

Οι εκκεντρότητες, όμως, έπρεπε τελικά να αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του οχήματος καταγραφής (body frame). Στο σύστημα αυτό, ο άξονας y ορίζεται κατά μήκος της τροχιάς κίνησης, ο άξονας up κατακόρυφα προς το ζενίθ, ενώ ο άξονας x κάθετα στο επίπεδο yup έτσι ώστε να συμπληρώνεται το δεξιόστροφο τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς. Οπότε, το τοπικό σύστημα αναφοράς περιστράφηκε και μετατοπίστηκε κατάλληλα ώστε οι συντεταγμένες να αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του οχήματος.



Σχ. 5.3 Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς για αποτύπωση δρεζίνας

Fig. 5.3 Topical reference system for recording vehicle drawing

5.2.3 Εργασίες πεδίου

5.2.3α Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μέτρηση των εκκεντροτήτων αποτελούνταν από:

- 1 γεωδαιτικό σταθμό Leica TCA1201M (Reflector less)
- 1 ψηφιακό χωροβάτη Topcon DL-102
- 3 τρίποδες
- 3 τρικόχλια
- 2 κατάφωτα
- 2 σταδίες
- 1 μεταλλική μετροταινία
- σωληνωτή αεροστάθμη

5.2.3β Συλλογή δεδομένων πεδίου

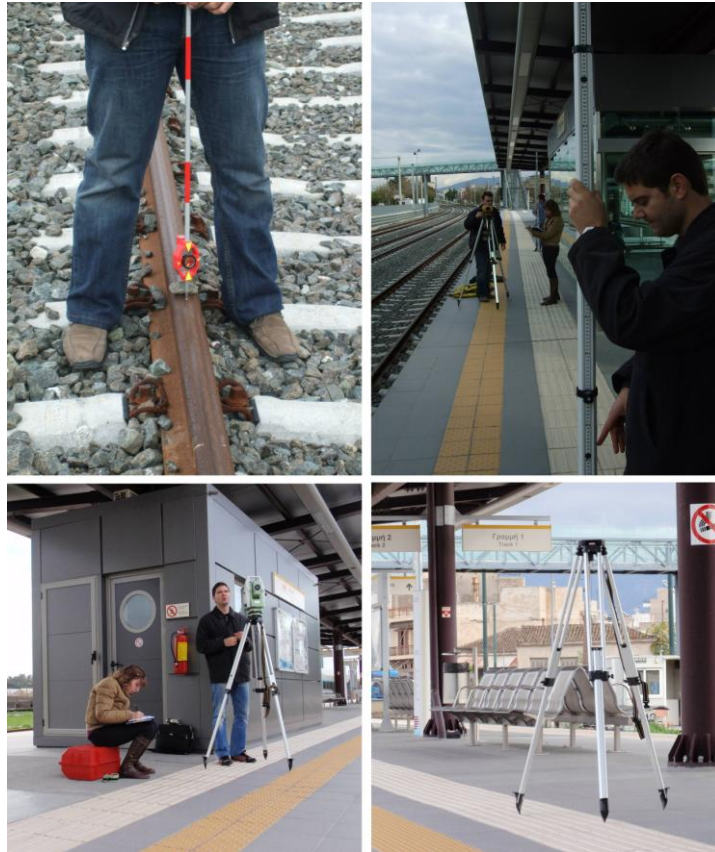
Η συλλογή των δεδομένων για τον υπολογισμό των εκκεντροτήτων πραγματοποιήθηκε στο χώρο αποβίβασης του σταθμού του Προαστιακού Σιδηρόδρομου «Αγ. Ιωάννης Ρέντης», το πρωί της 21/12/2008 (Σχήμα 5.4). Εκεί, το όχημα τοποθετήθηκε απέναντι από την αποβάθρα του σταθμού σε τμήμα γραμμής ώστε το όχημα καταγραφής να είναι όσο το δυνατό οριζοντιωμένο (θέση μηδενικής επίκλισης και κατά μήκος κλίσης).

Στο χώρο της αποβάθρας ιδρύθηκαν οι στάσεις A, B σε απόσταση τέτοια ώστε να σχηματίζουν με το κέντρο του οχήματος καταγραφής ισόπλευρο τρίγωνο, προκειμένου να εξασφαλίζεται συμμετρία στη γεωμετρία παρατηρήσεων. Από τις στάσεις αυτές μετρήθηκαν οριζόντιες αποστάσεις, οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες προς όλα τα σημεία ενδιαφέροντος. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η εκτέλεση εμπροσθοτομιών και τριγωνομετρικής υψομετρίας προκειμένου τελικά να υπολογιστούν οι εκκεντρότητες.

Τα σημεία για τα οποία υπολογίστηκαν οι εκκεντρότητες από το μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας αφορούν το κέντρο φάσης της κεραίας GPS, τον αισθητήρα οδομέτρου, το κέντρο της αδρανειακής μονάδας καθώς και σημεία σε επιλεγμένες θέσεις στις δύο σιδηροτροχιές στις οποίες εδραζόταν το όχημα καταγραφής. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν να μετρηθούν ώστε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων να διαπιστωθεί η οριζοντιότητα του οχήματος καταγραφής.

Από τις στάσεις A, B δεν υπήρχε ορατότητα προς την αδρανειακή μονάδα. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε κατακόρυφα πάνω από αυτή κατάφωτο στερεωμένο σε τρικόγλιο και τρίποδα προκειμένου να ανυψωθεί το υπόψη σημείο ώστε να υπάρχει ορατότητα από τις στάσεις A και B (Σχήμα 5.5).

Ως σημείο αναφοράς στο ψηφιακό οδόμετρο επιλέχθηκε το κέντρο του συνδέσμου προσάρτησής του πάνω στον τροχό του οχήματος καταγραφής.



Σχ. 5.4 Μέτρηση εκκεντροτήτων

Fig. 5.4 Lever arm measurements



Σχ. 5.5 Κατακόρυφη ανύψωση μηδενικού σημείου αδρανειακής μονάδας για μέτρηση εκκεντροτήτων

Fig. 5.5 IMU point vertical reduction implemented for lever arm measurements

Η εκκεντρότητα που αφορά την κεραία GPS μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ειδικό κατάφωτο (mini prism), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6. Συγκεκριμένα, το κατάφωτο τοποθετήθηκε στη βάση στερέωσης της κεραίας GPS. Στη συνέχεια, με γνωστή την απόσταση μεταξύ της βάσης και του κέντρου φάσης της κεραίας προέκυψε η εκκεντρότητα ως προς το κέντρο φάσης της κεραίας GPS.



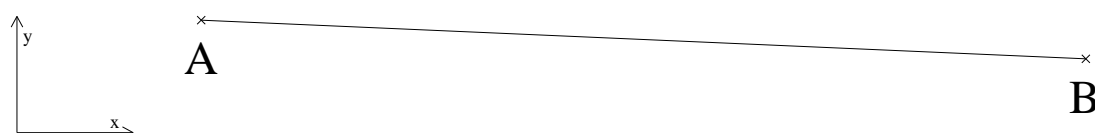
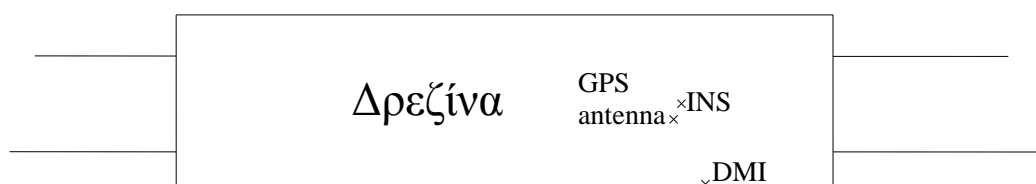
Σχ. 5.6 Τοποθέτηση κατάφωτου για μέτρηση εκκεντροτήτων στη κεραία GPS

Fig. 5.6 Mini-prism set up for lever arm measurements at GPS antenna

5.2.4 Υπολογισμός τιμών εκκεντροτήτων

Ο υπολογισμός των τιμών των εκκεντροτήτων σε οριζοντιογραφία πραγματοποιήθηκε από την επίλυση των εμπροσθοτομιών. Η υψομετρική πληροφορία υπολογίστηκε για τα σημεία A, B και την αδρανειακή μονάδα με γεωμετρική χωροστάθμηση, ενώ για τα υπόλοιπα σημεία του συστήματος παρατήρησης με τριγωνομετρική υψομετρία.

Για την επίλυση των εμπροσθοτομιών, υπήρχαν μετρήσεις τόσο οριζόντιων μηκών όσο και οριζόντιων γωνιών. Επομένως, για κάθε σημείο υπολογίστηκαν δύο ζεύγη οριζοντιογραφικών συντεταγμένων, το πρώτο προέκυψε με μετρήσεις μήκων και το δεύτερο με μετρήσεις γωνιών. Σε ορισμένα σημεία όπου δεν ήταν δυνατή η χρήση κατάφωτου, η μέτρηση του μήκους έγινε απευθείας στο σημείο (reflector less). Όπως είναι φανερό, η ακρίβεια του μήκους σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μειωμένη σε σχέση με εκείνη της γωνίας. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για τα σημεία όπου τα μήκη μετρήθηκαν με καλή ακρίβεια, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες υπολογίστηκαν με εμπροσθοτομία μηκών, ενώ για τα υπόλοιπα με εμπροσθοτομία γωνιών. Η σχετική θέση των σημείων που μετρήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχ. 5.7 Σχέδιο αποτύπωσης μετρημένων σημείων

Fig. 5.7 Drawing of measured points

Το υψόμετρο στο σημείο A ορίστηκε αυθαίρετα ίσο με 5 m, οπότε το υψόμετρο στο σημείο B αλλά και στην αδρανειακή μονάδα προέκυψαν επιλύοντας τη γεωμετρική χωροστάθμηση με υψομετρική αφετηρία το σημείο A. Τα υψόμετρα των υπολοίπων μετρημένων σημείων προέκυψαν με τη μέθοδο της τριγωνομετρικής υψομετρίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ύψη οργάνου στα σημεία A, B μετρήθηκαν με γεωμετρική χωροστάθμηση, χρησιμοποιώντας αντί χωροβάτη τον γεωδαιτικό σταθμό στη μία στάση και σταδία στην άλλη.

Οι τελικές συντεταγμένες των σημείων των οποίων ενδιέφεραν οι εκκεντρότητες, πρέπει να αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του οχήματος καταγραφής. Για το σκοπό αυτό, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες που υπολογίστηκαν στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς μετατέθηκαν και περιστράφηκαν έτσι ώστε να αναφέρονται στο νέο σύστημα συντεταγμένων, όπου το κέντρο της αδρανειακής μονάδας είναι η αρχή των αξόνων. Αντίστοιχα, τα υψόμετρα μετατέθηκαν κατάλληλα ώστε το κέντρο της αδρανειακής μονάδας να έχει υψόμετρο μηδέν. Οι τελικές τιμές των εκκεντροτήτων φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Σημείο	x [m]	y [m]	up [m]
GPS antenna	0.2304	-0.1143	2.524115
DMI	1.2471	0.3855	-0.86905

Πίνακας. 5.1 Τιμές εκκεντροτήτων αισθητήρων ως προς την αδρανειακή μονάδα

Table 5.1 Sensors' lever-arm offsets with respect to IMU unit

5.3 Καταγραφή Δεδομένων Γραμμής “Λιόσια – Κιάτο”

5.3.1 Κατάσταση εξοπλισμού

Κατά τη διεξαγωγή του κυρίως πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός ως εξής:

- Συσσωρευτές
 - 7 συσσωρευτές των 60 Ah
 - 2 συσσωρευτές των 12 Ah
 - 1 φορτιστής συσσωρευτών 12 Ah
- Μετατροπές – Εξοπλισμός συσσωρευτών
 - 7 ζεύγη σφικτήρων για πόλους συσσωρευτών
 - 2 καλώδια τροφοδοσίας 5 m / 2.5 mm²
 - 3 μετατροπείς από “κροκοδειλάκια” σε υποδοχή τύπου αναπτήρα αυτοκινήτου

- Καλώδια – Εξοπλισμός τροφοδοσίας
 - καλώδιο τροφοδοσίας PROPACK
 - τροφοδοτικό φορητού Η/Υ από συσσωρευτή
- Παρελκόμενα φορητού Η/Υ
 - φορητός Η/Υ
 - εφεδρικός Η/Υ
 - εξωτερικός σκληρός δίσκος χωρίς τροφοδοσία
- Σύστημα καταγραφής SPAN
 - PROPAK
 - αδρανειακή μονάδα IMU-FSAS
 - κοχλίες στερέωσης αδρανειακής μονάδας
 - καλώδιο σύνδεσης IMU με PROPAK
 - καλώδιο σύνδεσης PROPAK με φορητό Η/Υ (USB→RS232)
 - καλώδιο κεραίας δέκτη GPS οχήματος καταγραφής NOVA-702GG
 - 1 μαγνητική βάση
 - 1 τρικόχλιο για την οριζοντίωση κεραίας GPS
 - εργαλεία για την κοχλίωση αδρανειακής μονάδας
- Οδόμετρο
 - αισθητήρας οδομέτρου
 - καλώδιο σύνδεσης οδομέτρου σε PROPAK (8 pin M12 →Female DB9)
 - καλώδιο μετατροπής οδομέτρου (Female DB9 →Male DB9 + Red & Black Bananas)
 - μηχανολογική μετατροπή για προσαρμογή οδομέτρου σε δρεζίνα και απαραίτητα εργαλεία προσαρμογής
- Σταθμοί αναφοράς
 - 2 δέκτες GPS Trimble 5800
 - χειριστήριο για ρύθμιση δεκτών
 - 1 δέκτης DL-V3
 - 1 κεραία δέκτη DL-V3 NOVA-702GG
 - φορητός Η/Υ
 - 1 καλώδιο κεραίας
 - 1 καλώδιο τροφοδοσίας από συσσωρευτή
 - 3 τρίποδες
 - 3 τρικόχλια
 - 3 μεταλλικά δίμετρα
 - οδοιπορικά σημείων σταθμών αναφοράς

- Άλλος εξοπλισμός – παρελκόμενα
 - φακός
 - GPS χειρός Garmin

5.3.2 Χρόνος διεξαγωγής πειράματος

Το κυρίως πείραμα επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σε χρόνο εκτός λειτουργίας της γραμμής. Μετά από σχετική αίτηση στο αρμόδιο τμήμα της «Προαστιακός Α.Ε.» εγκρίθηκε η κίνηση μεταξύ των σταθμών: «Σταθμός Λαρίσης» - «Κιάτο» κατά τις πρώτες πρωινές ώρες της 21^{ης} Δεκεμβρίου 2008. Συγκεκριμένα, το χρονικό διάστημα που ήταν διαθέσιμο, ήταν μεταξύ 00:30 και 05:00 τοπική ώρα.

Η εκκίνηση του οχήματος από το σταθμό «Λιόσια» έγινε στις 00:40, ενώ οι δύο πρώτοι σταθμοί αναφοράς (K67B, K215B) μετρούσαν ήδη από 00:20. Ο τελευταίος σταθμός αναφοράς (BK78B) τέθηκε σε λειτουργία στις 02:15. Το όχημα καταγραφής αφίχθη στο σταθμό «Κιάτο» στις 03:15, ενώ επέστρεψε στην αρχική του θέση (σταθμός «Λιόσια»), στις 05:00.

5.3.3 Συλλογή δεδομένων – Προβλήματα

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στην σιδηροδρομική γραμμή επιστροφής Κιάτο → Αθήνα, τόσο σε μετάβαση όσο και επιστροφή.

Το δρομολόγιο της μετάβασης, από το σταθμό «Λιόσια» μέχρι το σταθμό «Κιάτο», καταγράφηκε σε τρία επιμέρους αρχεία. Ο λόγος για το οποίο έγινε η κατάτμηση της συνολικής καταγραφής ήταν διττός αφενός μεν για τη διασφάλιση των δεδομένων από τυχόν αστοχία του λογισμικού καταγραφής, ή του H/Y και αφετέρου, για τη σαφέστερη οριοθέτηση του τμήματος της τροχιάς όπου ο κάθε σταθμός αναφοράς μπορούσε να επιλύσει με μεγαλύτερη ακρίβεια (< 30 km). Το κάθε αρχείο καταγραφών περιέχει καταγραφές σε πλήρη ακινησία του οχήματος (stationary recording) τόσο κατά την έναρξη όσο και κατά τη λήξη του. Το σημείο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν στάσεις του οχήματος στο τέλος κάθε αρχείου, ήταν ίδιο με εκείνο της έναρξης καταγραφής του επόμενου αρχείου. Η χρονική διάρκεια κάθε στάσης ήταν για τα δύο πρώτα τμήματα 5 min, ενώ για το τρίτο 3 min.

Η μέση ταχύτητα κίνησης του οχήματος καταγραφής κατά τη μετάβαση ήταν κατά μέσο όρο ~ 50 km/h.

Τα δεδομένα του δρομολογίου της επιστροφής καταγράφηκαν σε δύο αρχεία, λόγω έλλειψης χρόνου. Το stationary μεταξύ των δύο αρχείων που πραγματοποιήθηκε ήταν χρονικής διάρκειας ~ 4 min. Η μέση ταχύτητα κίνησης κατά την επιστροφή ήταν ~ 80 km/h. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η πορεία της διαδρομής, οι σταθμοί αναφοράς καθώς και τα σημεία ενδιάμεσων στάσεων.

Κατά μήκος της διαδρομής και μεταξύ των σταθμών “Λιόσια” – “Κιάτο” περιλαμβάνονται οι σταθμοί “Θριάσιο”, “Μαγούλα”, “Νέο Πέραμα”, “Μέγαρα” και “Κόρινθος”. Επιπλέον, διασχίστηκαν πέντε σήραγγες η μεγαλύτερη από τις οποίες βρισκόταν στη μέση περίπου της διαδρομής με συνολικό μήκος ~ 2.4 km.



Σχ. 5.8 Πορεία διαδρομής – σταθμοί αναφοράς – σημεία ενδιάμεσων στάσεων [Google Earth]

Fig. 5.8 Vehicle trajectory – control points – stationary recording points [Google Earth]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων με σκοπό την εξαγωγή τελικών συντεταγμένων για την τροχιά που διανύθηκε κατά την κίνηση του οχήματος καταγραφής. Αρχικά, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίστηκαν συντεταγμένες στα σημεία αναφοράς, τα οποία τοποθετήθηκαν σε άγνωστες θέσεις κατά μήκος της διαδρομής. Ακολούθως, αναλύεται ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης και περιγράφεται η μέθοδος επίλυσης των μετρημένων τροχιών και της εξαγωγής των τελικών συντεταγμένων.

Παρόλο που η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη του τμήματος καταγραφής “Κινέττα – Κιάτο”, η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ενιαία, στο σύνολο των δεδομένων καταγραφής της σιδηροδρομικής γραμμής “Λιόσια – Κιάτο”. Η μελέτη του τμήματος “Λιόσια – Κινέττα” αποτελεί αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας του φοιτητή Μπίμη Αθανάσιου, με τίτλο “Υπολογισμός Αποχής του Γεωειδούς από Ορθομετρικά Υψόμετρα Ακριβείας και Γεωμετρικά Υψόμετρα με Χρήση Διασυνδεδεμένων Αισθητήρων GNSS / INS / DMI. Εφαρμογή στον Σιδηροδρομικό Άξονα “Λιόσια – Κινέττα”.

6.2 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς

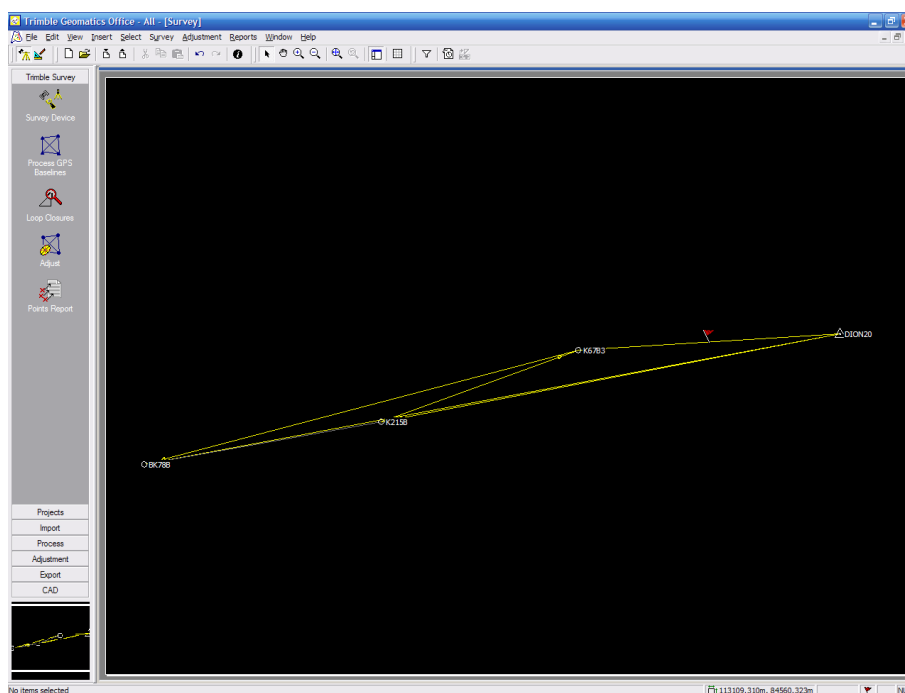
6.2.1 Παρατηρήσεις σταθμών αναφοράς

Πρωταρχικό στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων αποτελεί ο υπολογισμός συντεταγμένων στους τρεις σταθμούς αναφοράς. Η κατανομή των σταθμών αναφοράς κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής έγινε με γνώμονα ώστε η μέγιστη απόσταση μεταξύ του οχήματος καταγραφής και του πλησιέστερου, κάθε φορά, σταθμού αναφοράς να είναι μικρότερη από 15 km. Ο πρώτος σταθμός που συναντάται, σε μετάβαση (Λιόσια→Κιάτο), είναι ο σταθμός K67B, ο οποίος

κατέγραψε με συχνότητα 2 Hz κατά τη διάρκεια που το όχημα καταγραφής βρισκόταν εντός της περιοχής επιρροής του (~15 km εκατέρωθεν του σημείου αναφοράς). Ακολουθεί ο σταθμός αναφοράς K215B, ο οποίος εγκαταστάθηκε κοντά στην Κινέττα και κατέγραψε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, με συχνότητα καταγραφής 2 Hz. Τέλος, ο σταθμός αναφοράς BK78B, τοποθετήθηκε κοντά στο Κιάτο, κατέγραψε επίσης με συχνότητα 2 Hz και ήταν ενεργός από τη στιγμή κατά την οποία το όχημα καταγραφής εισήλθε στην περιοχή της ζώνης επιρροής του μέχρι το τέλος της διαδρομής.

6.2.2 Επίλυση βάσεων GPS

Η επίλυση της βάσης κάθε σταθμού αναφοράς πραγματοποιήθηκε ως προς τον μόνιμο σταθμό GPS DION του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που βρίσκεται στον Διόνυσο Αττικής. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των βάσεων είναι το Trimble Geomatics Office (TGOOffice v.1.63) (Σχήμα 6.1).



Σχ. 6.1 Επίλυση βάσεων σε λογισμικό TGOOffice v.1.63 [TGOOffice v.1.63]

Fig. 6.1 Base line processing using TGOOffice v.1.63 software [TGOOffice v.1.63]

Ως στοιχεία εισόδου στο λογισμικό TGO είναι τα δεδομένα καταγραφής κάθε σταθμού αναφοράς, τα αρχεία παρατηρήσεων από τον σταθμό DION για το ίδιο χρονικό διάστημα, καθώς και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σταθμού DION

εποχής 2004.00 σε WGS'84 ($\varphi=38^{\circ}04'42.7221$, $\lambda=23^{\circ}55'57.5317$, $h=515.545$ m). Κατά τη διαδικασία επίλυσης των βάσεων, ο σταθμός DION ορίστηκε ως “control point”.

Τα στοιχεία εξόδου του λογισμικού αποτελούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων αναφοράς στο σύστημα αναφοράς WGS'84, καθώς και οι αβεβαιότητες κατά ΔX, ΔY και ΔZ κάθε βάσης που επιλύθηκε (Πίνακα 6.1):

Γεωδαιτικές Συντεταγμένες (WGS'84)				Αβεβαιότητες Βάσεων [mm]			
Σταθμοί Αναφοράς	K67B	K215B	BK78B	Βάση DION με	K67B	K215B	BK78B
φ	38°03'31.87813	37°58'08.03787	37°54'49.00004	$\sigma_{\Delta X}$	3	1	2
λ	23°31'03.35497	23°12'20.15506	22°49'51.60375	$\sigma_{\Delta Y}$	2	1	1
h (m)	64.854	61.786	82.822	$\sigma_{\Delta Z}$	2	1	2

Πίν. 6.1: Γεωδαιτικές συντεταγμένες (WGS'84) σημείων αναφοράς και αβεβαιότητες βάσεων

Table 6.1: Geodetic Coordinates (WGS'84) of base points and base line's errors

6.3 Επίλυση Τροχιάς Οχήματος Καταγραφής

6.3.1 Αρχεία καταγραφής

Τα δεδομένα καταγραφής ολόκληρου του πειράματος χωρίστηκαν σε πέντε επιμέρους αρχεία – τα τρία πρώτα δημιουργήθηκαν κατά τη μετάβαση (Λιόσια→Κιάτο), ενώ τα δύο τελευταία κατά την επιστροφή (Κιάτο→Λιόσια). Τα αρχεία δεδομένων που δημιουργήθηκαν σε μετάβαση περιέχουν τις καταγραφές από τα τρία διαφορετικά τμήματα της διαδρομής στα οποία είχε επιρροή ο εκάστοτε από τους τρεις σταθμούς αναφοράς. Κατά την επιστροφή, το πρώτο από τα δύο αρχεία που δημιουργήθηκαν περιέχει τις καταγραφές του τμήματος στο οποίο έχουν επιρροή οι δύο πρώτοι, κατά την επιστροφή, σταθμοί αναφοράς (BK78B, K215B), ενώ το δεύτερο αρχείο περιέχει τις καταγραφές του τμήματος που ανήκει στη ζώνη επιρροής του τελευταίου, κατά την επιστροφή, σταθμού αναφοράς (K67B). Τα πέντε αρχεία καταγραφών εισάγονται

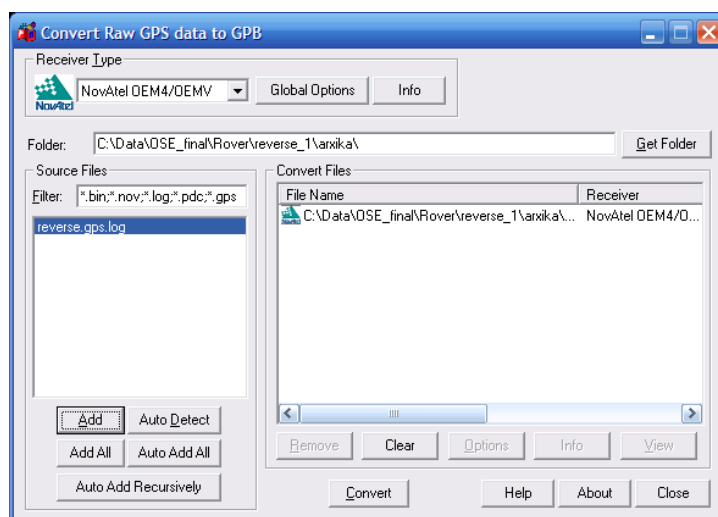
στο πρόγραμμα εκ των υστέρων επίλυσης (Inertial Explorer v.810) και επιλύονται ξεχωριστά.

6.3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης

Αρχικό στάδιο της επίλυσης των δεδομένων αποτελεί η εισαγωγή τους στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης (Inertial Explorer v.8.10). Για κάθε αρχείο καταγραφής δημιουργείται διαφορετικό αρχείο επίλυσης. Επομένως, για την επίλυση των δεδομένων καταγραφής, σε μετάβαση και σε επιστροφή, δημιουργούνται πέντε αρχεία επίλυσης - όσα δηλαδή και τα αρχεία των μετρήσεων.

Τα στοιχεία εισόδου που απαιτούνται για τη δημιουργία κάθε αρχείου επίλυσης είναι αρχικά το αρχείο δεδομένων του πλησιέστερου σταθμού αναφοράς (ή και περισσότερων του ενός), καθώς και τα δεδομένα που κατέγραψαν οι αισθητήρες του οχήματος καταγραφής.

Οι μετρήσεις του οχήματος καταγραφής κατά τη στιγμή λήψης τους αποθηκεύονται σε ένα ενιαίο αρχείο. Για την εισαγωγή τους όμως στο λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης απαιτείται η διάσπαση του αρχείου αυτού στα επιμέρους τμήματά του, τα οποία περιέχουν τις καταγραφές του δέκτη GNSS, εκείνες της αδρανειακής μονάδας, καθώς και εκείνες του αισθητήρα του ψηφιακού οδομέτρου (Σχήμα 6.2).

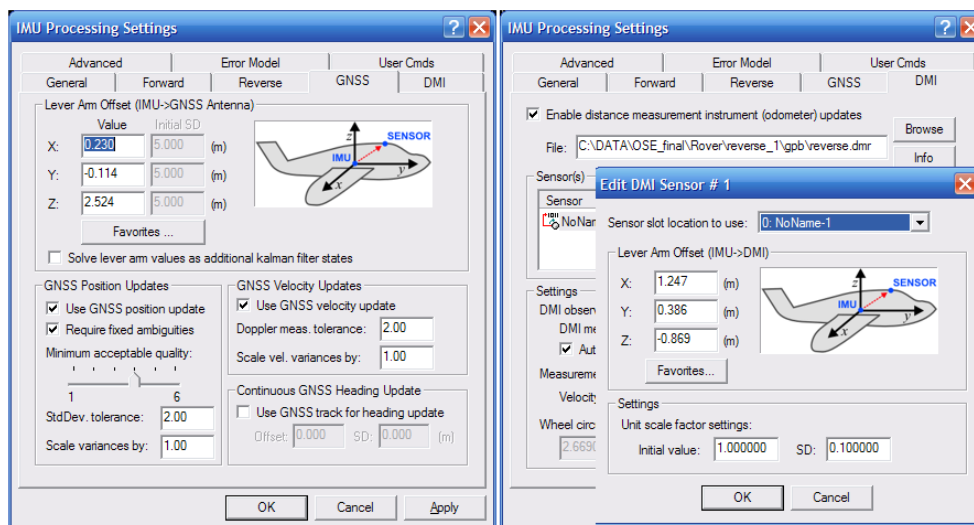


Σχ. 6.2 Διαχωρισμός ενιαίου αρχείου καταγραφής στα επιμέρους τμήματα GNSS-INS-DMI [Inertial Explorer]

Fig. 6.2 Conversion of raw data to GNSS, INS and DMI data files [Inertial Explorer]

Συνεπώς, κατά τη δημιουργία κάθε νέου αρχείου επίλυσης εισάγονται εκτός από τις καταγραφές του σταθμού αναφοράς και τα επιμέρους αρχεία δεδομένων των τριών αισθητήρων που απαρτίζουν το όχημα καταγραφής, ο τύπος της αδρανειακής μονάδας που χρησιμοποιείται κατά την καταγραφή, προκειμένου να εξαιρεθεί η αβεβαιότητα που επιφέρει η συγκεκριμένη μονάδα στις μετρήσεις καθώς επίσης και η διάμετρος του τροχού στον οποίο αναρτάται ο αισθητήρας του οδομέτρου.

Επιπλέον στοιχεία που εισάγονται στο λογισμικό της εκ των υστερών επίλυσης είναι οι τιμές των εκκεντροτήτων των αισθητήρων του οχήματος καταγραφής. Συγκεκριμένα, κατά τη δημιουργία κάθε αρχείου επίλυσης ζητείται η σχετική θέση του κέντρου φάσης του δέκτη GNSS, καθώς και του σημείου αναφοράς του ψηφιακού οδομέτρου ως προς το μηδενικό σημείο της αδρανειακής μονάδας (Σχήμα 6.3). (Οι τιμές των εκκεντροτήτων δίδονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1 της παραγράφου 5.2.4).

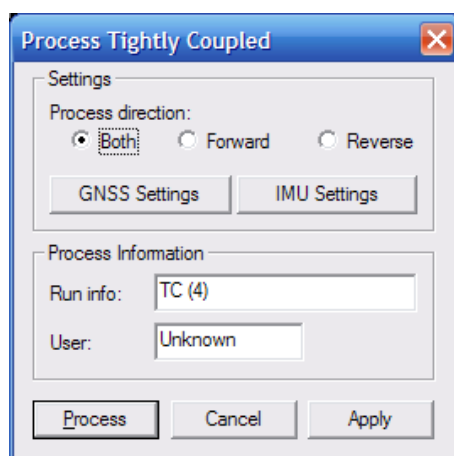


Σχ. 6.3 Εισαγωγή τιμών εκκεντροτήτων στο λογισμικό εκ των υστερών επίλυσης [Inertial Explorer]
 Fig. 6.3 Setting up lever arms offsets in the post-processing software [Inertial Explorer]

6.3.3 Εξαγωγή συντεταγμένων τροχιάς καταγραφής

Επόμενο στάδιο κατά την επεξεργασία των μετρήσεων αποτελεί ο συνδυασμός τους, η επίλυσή τους και η εξαγωγή τελικών συντεταγμένων θέσης για τα διαδοχικά σημεία της τροχιάς που υπολογίστηκαν, στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς.

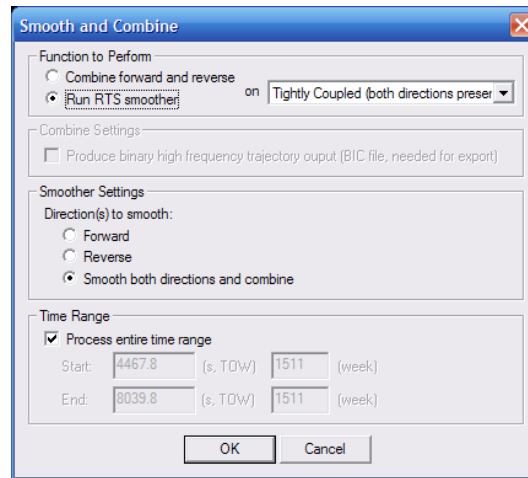
Επίλυση τροχιών. - Αρχικά, ορίζεται στο σύστημα ο τρόπος και ο βαθμός συνδυασμού των δεδομένων της αδρανειακής μονάδας και του δέκτη GNSS. Για την επίλυση των δεδομένων του πειράματος, επιλέχθηκε ο συνδυασμός των δεδομένων GNSS και της αδρανειακής μονάδας με “υψηλή συνέργεια” (tightly coupled), τόσο σε μετάβαση όσο και σε επιστροφή (“Process Direction: Both”) (Σχήμα 6.4) ως εκ τούτου συνδυάζονται οι επιμέρους λύσεις και προκύπτει η βέλτιστη. Η επιλογή επίλυσης “υψηλής συνέργειας” ως τρόπου συνδυασμού των δεδομένων ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου η ισχύς του σήματος του δέκτη GNSS είναι περιορισμένη, καθώς και όταν η παντελής απώλεια σήματος είναι χρονικά εκτεταμένη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω ορυγμάτων κατά μήκος της γραμμής και συνεχών τμημάτων σηράγγων κρίθηκε απαραίτητη η επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου συνδυασμού των παρατηρήσεων. Σημειώνεται ότι κατά την επίλυση των δεδομένων πραγματοποιείται ξεχωριστά η επίλυση των μετρήσεων του δέκτη GNSS και ακολουθεί η επίλυση των δεδομένων της αδρανειακής μονάδας (τόσο σε μετάβαση όσο και σε επιστροφή), υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη βέλτιστη συνδυαστική λύση.



Σχ. 6.4 Επιλογή επίλυσης των καταγραφών με “υψηλή συνέργεια” και στις δύο κατευθύνσεις [Inertial Explorer]
Fig. 6.4 Data processing adhere the tightly coupled mode in both directions [Inertial Explorer]

Ομαλοποίηση τροχιών. - Στη συνέχεια, με τη χρήση του αλγόριθμου ομαλοποίησης RTS Smoother επιτυγχάνεται η ομαλοποίηση της τροχιάς του κινητού, όπως έχει προκύψει από το προηγούμενο στάδιο. Ο αλγόριθμος της ομαλοποίησης επιλέγεται

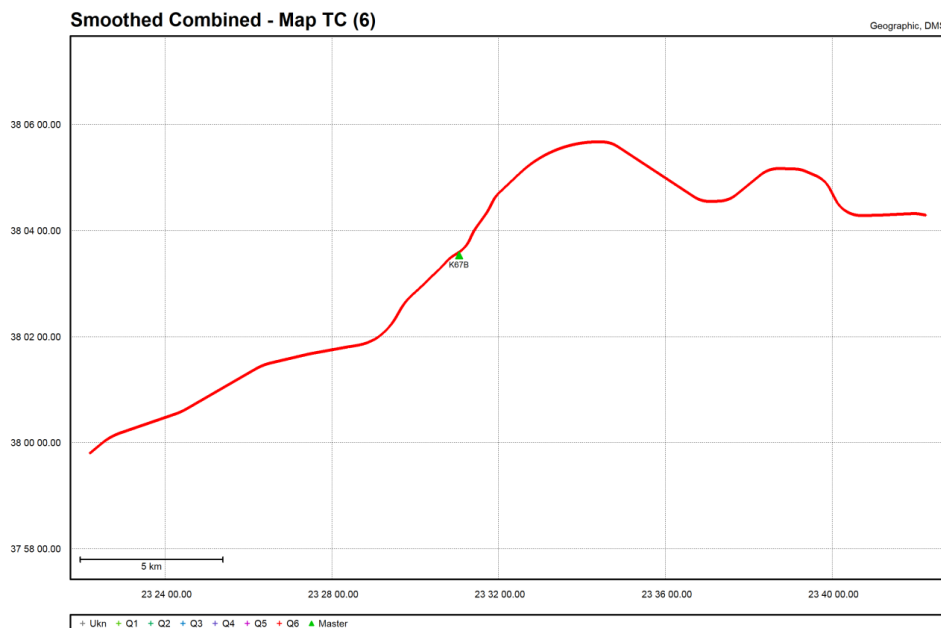
να εφαρμοστεί και στις δύο κατευθύνσεις (“smooth both directions and combine”) (Σχήμα 6.5).



Σχ. 6.5 Ομαλοποίηση της τροχιάς με τον αλγόριθμο RTS Smoother [Inertial Explorer]

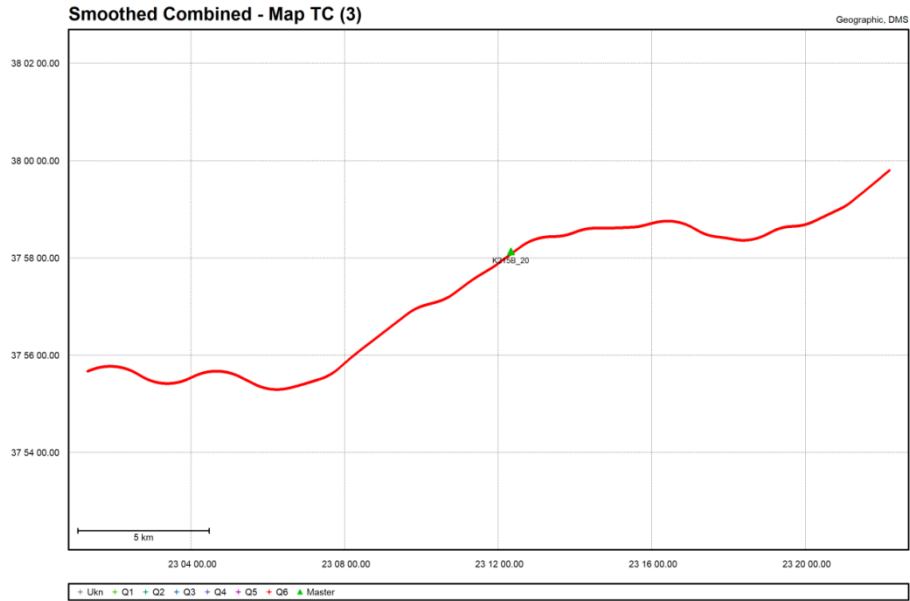
Fig. 6.5 Vehicle trajectory smoothing using RTS Smoother algorithm [Inertial Explorer]

Ακολούθως, δίνονται σχηματικά οι ομαλοποιημένες τροχιές σε μετάβαση και επιστροφή, όπως προκύπτουν από το λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης (Σχήμα 6.6 έως Σχήμα 6.10):



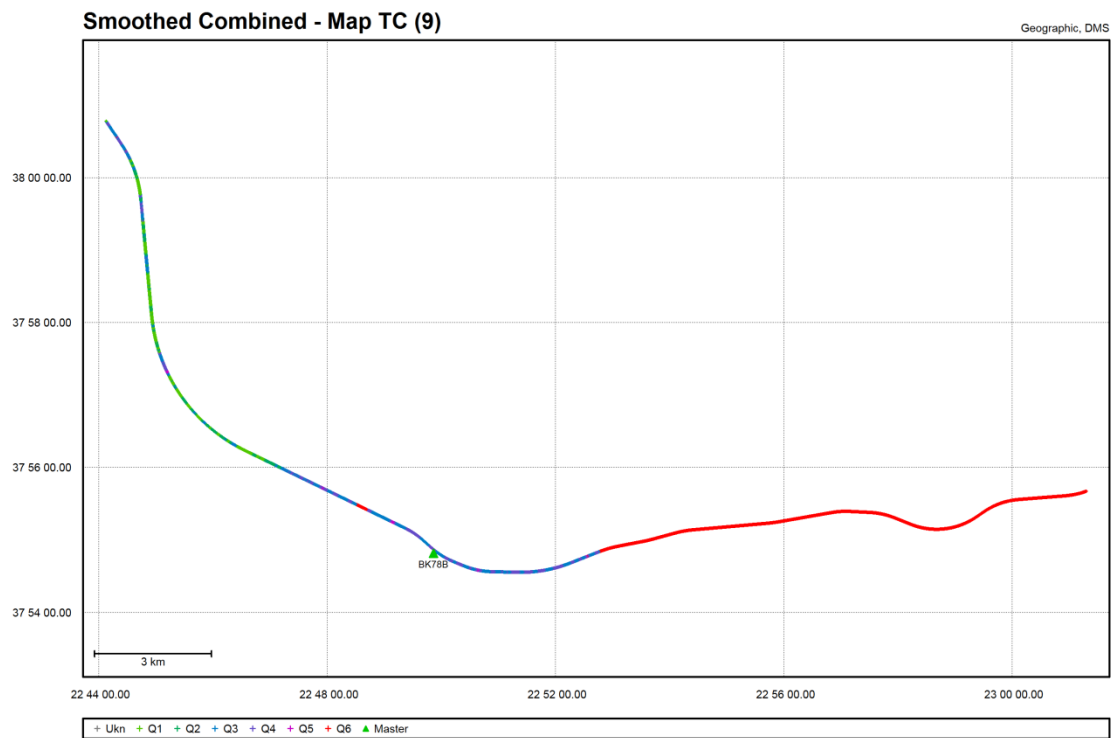
Σχ. 6.6 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση Λιόσια→S1 [Inertial Explorer]

Fig. 6.6 Smoothed out vehicle trajectory for “Liosia→S1” section [Inertial Explorer]



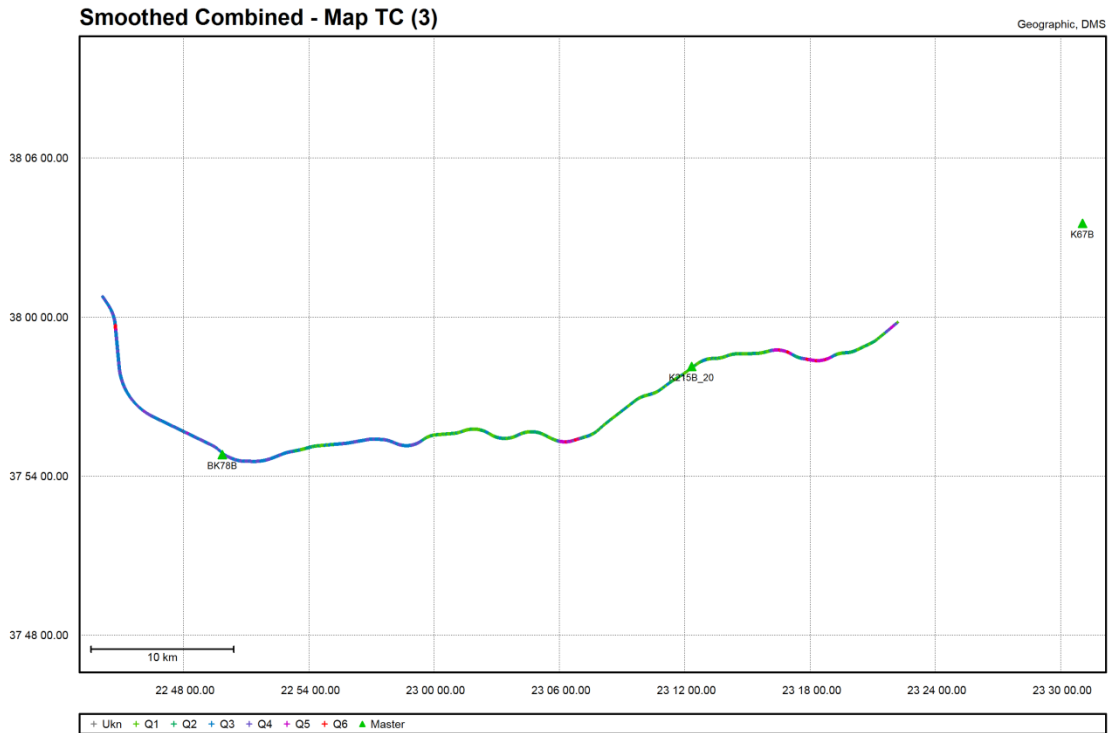
Σχ. 6.7 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S1→S2 [Inertial Explorer]

Fig. 6.7 Smoothed out vehicle trajectory for “S1→S2” section [Inertial Explorer]



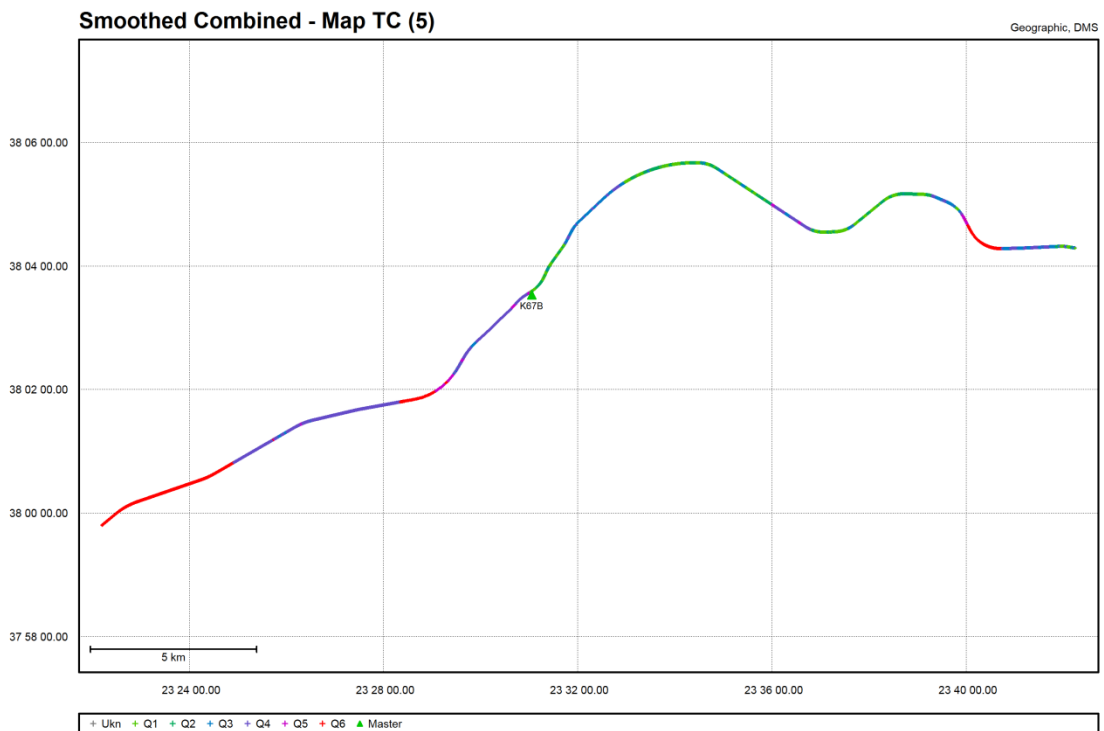
Σχ. 6.8 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S2→Κιάτο [Inertial Explorer]

Fig. 6.8 Smoothed out vehicle trajectory for “S2→Κιάτο” section [Inertial Explorer]



Σχ. 6.9 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση Κιάτο→S1 [Inertial Explorer]

Fig. 6.9 Smoothed out vehicle trajectory for “Κιάτο→S1” section [Inertial Explorer]



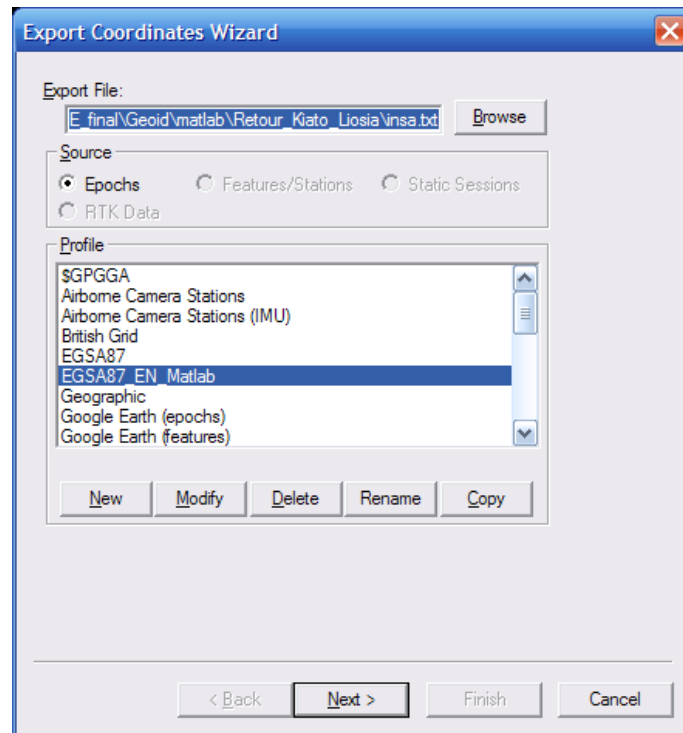
Σχ. 6.10 Ομαλοποιημένη τροχιά σε μετάβαση S1→Liosia [Inertial Explorer]

Fig. 6.10 Smoothed out vehicle trajectory for “S1→Liosia” section [Inertial Explorer]

Στη σχηματική απεικόνιση των τροχιών φαίνονται η πορεία του οχήματος καταγραφής, οι σταθμοί αναφοράς, καθώς και η διαφοροποίηση στην ποιότητα επίλυσής τους – τα χρώματα του υπομνήματος αντιστοιχούν σε διαφορετική ποιότητα επίλυσης. Σύμφωνα με τις εξαγόμενες ομαλοποιημένες τροχιές προκύπτει ότι η ακρίβεια εντοπισμού σε μετάβαση (Λιόσια→Κιάτο) είναι μειωμένη σε σχέση με την ποιότητα εντοπισμού σε επιστροφή (Κιάτο→Λιόσια).

Συστήματα αναφοράς εξαγόμενων συντεταγμένων. – Μέσω του λογισμικού της εκ των υστέρων επίλυσης, γίνεται εξαγωγή των τελικών συντεταγμένων των σημείων των μετρημένων τροχιών σε αρχεία μορφής ASCII, σε σύστημα αναφοράς που επιλέγεται από το χρήστη (Σχήμα 6.6). Το σημείο ως προς το οποίο εξάγονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες είναι εκείνο που αντιστοιχεί στον άξονα μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών κίνησης του οχήματος καταγραφής. Υψομετρικά οι συντεταγμένες εξάγονται ως προς την κεφαλή της σιδηροτροχιάς πάνω στην οποία κινούνταν ο τροχός με το οδόμετρο. Οι συντεταγμένες επιλέχθηκε να εξαχθούν τόσο στο γεωκεντρικό σύστημα WGS'84 (φ, λ, h) όσο και στην προβολή του ΕΓΣΑ'87 (Easting, Northing, h). Η εξαγωγή των συντεταγμένων σε γεωδαιτικές συντεταγμένες χρησιμεύει στην πραγματοποίηση παρεμβολής και τελικά στην εξαγωγή της απόκλισης του γεωειδούς για κάθε σημείο της τροχιάς σύμφωνα με το παγκόσμιο μοντέλο του γεωειδούς EGM'08 που χρησιμοποιήθηκε, δεδομένου ότι οι κορυφές του καννάβου του μοντέλου δίνονται σε γεωδαιτικές συντεταγμένες. Η εξαγωγή συντεταγμένων των σημείων των τροχιών στην προβολή του ΕΓΣΑ'87 πραγματοποιήθηκε προκειμένου τα σημεία της τροχιάς να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της σιδηροδρομικής γραμμής, τα οποία δίνονται σε προβολικές συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87.

Σημειώνεται ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων η πυκνότητα εξαγωγής των συντεταγμένων για κάθε αρχείο καταγραφής επιλέχθηκε να είναι ανά 0.1 sec. Επομένως, με δεδομένη τη μέση ταχύτητα κίνησης του οχήματος καταγραφής (~ 50 km/h) τα σημεία που απεικονίζονται στα αρχεία καταγραφών απέχουν το ένα από το άλλο μέση απόσταση ίση με 1.5 m.



Σχ. 6.11 Εξαγωγή συντεταγμένων σε επιλεγμένα συστήματα αναφοράς [Inertial Explorer]

Fig. 6.11 Export of trajectory coordinates into predefined coordinates systems [Inertial Explorer]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΜΗΣ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

7.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση του τρόπου ανάλυσης των παρατηρήσεων του συστήματος καταγραφής σε συνδυασμό με τα κατασκευαστικά σχέδια της σιδηροδρομικής γραμμής, με στόχο την εξαγωγή της απόκλισης του γεωειδούς στο τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής Κινέττα – Κιάτο. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάλυσης των στοιχείων καταγραφής, καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξή της. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον τρόπο σύγκρισης της εξαγόμενης - από τις μετρήσεις - απόκλισης του γεωειδούς και εκείνης που προκύπτει από τα στοιχεία παγκόσμιων μοντέλων γεωειδούς για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Όπως προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων (Ενότητα 6.3), η ποιότητα της λύσης για την καταγραφή σε μετάβαση (Λιόσια→Κιάτο) είναι μειωμένη σε σχέση με την ποιότητα λύσης των καταγραφών επιστροφής (Κιάτο→Λιόσια). Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση των μετρήσεων πραγματοποιείται μόνο στα δεδομένα σε επιστροφή.

7.2 Δημιουργία Ενιαίας Τροχιάς Καταγραφής

7.2.1 Αφαίρεση σημείων από δεδομένα καταγραφής

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, η συλλογή των μετρήσεων κατά την κίνηση του οχήματος καταγραφής πραγματοποιήθηκε σε τμήματα (με ενδιάμεσες στάσεις του οχήματος) προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν απώλεια δεδομένων λόγω πιθανών προβλημάτων κατά την εκτέλεση του πειράματος. Έτσι, δημιουργήθηκαν δύο αρχεία καταγραφής κατά την επιστροφή (Κιάτο→Λιόσια) (Reverse 1, Reverse 2), τα οποία επιλύθηκαν ξεχωριστά στη φάση επεξεργασίας των μετρήσεων. Για την περαιτέρω όμως ανάλυση των αποτελεσμάτων, απαραίτητη κρίθηκε η συνένωση των δύο επιμέρους λύσεων (τμημάτων συντεταγμένων) και η δημιουργία μίας ενιαίας τροχιάς.

Για τον λόγο αυτό, αρχικά επιλέχθηκαν από κάθε αρχείο καταγραφής, τα πλεονάζοντα σημεία που έπρεπε να αφαιρεθούν για την τελικά ομαλή ενοποίηση των δύο αρχείων.

Η αφαίρεση των περιττών σημείων πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την ταυτόχρονη απεικόνιση των δύο αρχείων καταγραφής σε επιστροφή, στο προβολικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ'87, σε αρχείο του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Σκοπός της ενιαίας απεικόνισης των συντεταγμένων της τροχιάς καταγραφής και των δύο αρχείων ήταν η επισήμανση των σημείων συνένωσης των δύο αρχείων και εκείνων που έπρεπε να αφαιρεθούν. Να σημειωθεί ότι, στην απεικόνιση των σημείων στο αρχείο AutoCAD κάθε σημείο ταυτοποιείται μέσω του χρόνου καταγραφής του (GPS time). Ο χρόνος καταγραφής κάθε σημείου από το επόμενο του διαφέρει κατά 0.1 sec, δεδομένου ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων η πυκνότητα εξαγωγής των σημείων για κάθε αρχείο καταγραφής επιλέχθηκε ίση προς 10 Hz. Από την κατανομή της θέσης των σημείων στο αρχείο AutoCAD παρατηρήθηκε ότι και στα δύο αρχεία (Reverse 1 και Reverse 2) περιλαμβάνονται τα σημεία που καταγράφονταν κατά τη διάρκεια στάσης (stationary) του οχήματος καταγραφής, γεγονός που θα δημιουργούσε σύγχυση στην ανάλυση των μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, από κάθε αρχείο καταγραφής επιλέχθηκε να αφαιρεθεί το σύνολο των σημείων που καταγράφηκε για τα χρονικά διαστήματα στάσης του οχήματος.

Σε αυτή τη διαδικασία το σύνολο των σημείων προς αφαίρεση επισημάνθηκε με βάση τον κωδικό κάθε σημείου (GPS time). Για αυτόν τον σκοπό δημιουργήθηκε ρουτίνα λογισμικού στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab, το οποίο δέχεται δύο αρχεία καταγραφών και στα δύο συστήματα αναφοράς (ΕΓΣΑ'87 και WGS'84) - όπως αυτά είχαν προκύψει κατά την επεξεργασία των μετρήσεων - αφαιρείται το σύνολο των περιττών σημείων και εξάγονται δύο διορθωμένα αρχεία καταγραφής, τόσο στο προβολικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ'87 όσο και σε γεωδαιτικές συντεταγμένες σε WGS'84.

7.2.2 Συνένωση επιμέρους τμημάτων καταγραφής

Η ενοποίηση της τροχιάς καταγραφής ολοκληρώθηκε με τη συνένωση των απαλλαγμένων από τα περιττά σημεία επιμέρους αρχείων καταγραφής. Η ένωση των δύο νέων αρχείων (Reverse 1 και Reverse 2) πραγματοποιήθηκε μέσω ρουτίνας λογισμικού Matlab. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν δύο αρχεία που περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες της ενιαίας τροχιάς σε επιστροφή (το πρώτο στην προβολή του ΕΓΣΑ'87 και το δεύτερο σε σύστημα WGS'84).

7.3 Απόκλιση Γεωειδούς Από Μετρήσεις

7.3.1 Αντιστοίχιση σημείων κατασκευαστικών σχεδίων με τα σημεία καταγραφής

Οριζοντιογραφική και υψομετρική αναφορά. - Ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς προκύπτει από τη διαφορά ορθομετρικών και γεωμετρικών υψομέτρων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα ορθομετρικά υψόμετρα δίνονται στα κατασκευαστικά σχέδια της γραμμής ενώ τα γεωμετρικά υψόμετρα προκύπτουν από τις μετρήσεις του οχήματος καταγραφής.

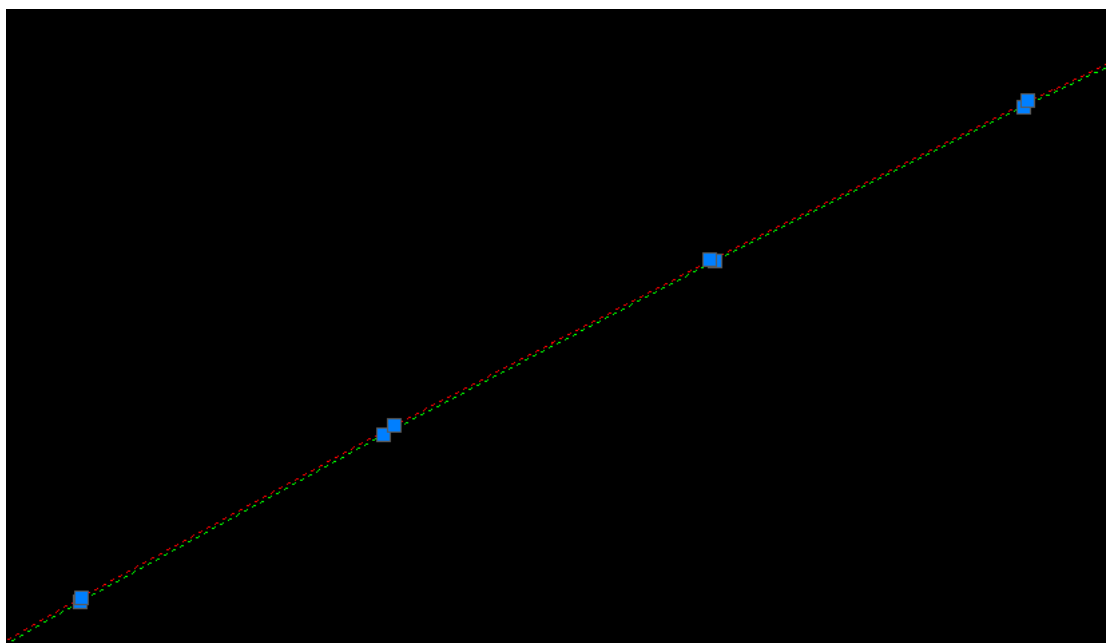
Επισημαίνεται ότι στα κατασκευαστικά σχέδια, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες αναφέρονται στον άξονα των δύο κλάδων της γραμμής, ενώ η υψομετρική πληροφορία αναφέρεται στην κεφαλή της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς για κάθε κλάδο. Επιπλέον, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες της τροχιάς καταγραφής εξάγονται στον άξονα του κλάδου κίνησης του οχήματος καταγραφής. Σημειώνεται ότι το ύψος της σιδηροτροχιάς που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των συντεταγμένων στον άξονα ισούται με 172 mm. Τα υψόμετρα εξάγονται στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς πάνω στην οποία κινείται ο τροχός του οχήματος με το προσαρτημένο οδόμετρο. Προκειμένου οι δύο ομάδες δεδομένων να καταστούν συγκρίσιμες τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά πρέπει τα σημεία τους να έχουν κοινό σημείο αναφοράς. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η οριζοντιογραφική μετατόπιση του συνόλου των σημείων του κατασκευαστικού σχεδίου κατά απόσταση ίση με την απόσταση που ορίζεται μεταξύ του άξονα των δύο κλάδων και του άξονα στον κλάδο κίνησης του οχήματος καταγραφής – δηλαδή, κατά 2.10 m. Υψομετρικά, πραγματοποιείται αναγωγή των σημείων

των κατασκευαστικών σχεδίων στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς πάνω στην οποία κινείται ο τροχός με το προσαρτημένο οδόμετρο. Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.1.2, στα κυκλικά τόξα το πρόσημο της επίκλισης διαφοροποιείται σύμφωνα με το είδος της στροφής. Συγκεκριμένα, στις αριστερόστροφες στροφές η τιμή της επίκλισης είναι θετική ενώ στις δεξιόστροφες αρνητική. Επομένως, στις περιπτώσεις όπου η στροφή είναι αριστερόστροφη – και για το λόγο αυτό τα υψόμετρα αναφέρονται στην απέναντι σιδηροτροχιά που είναι η χαμηλότερη - πραγματοποιείται ανύψωση των υψομέτρων που αναφέρονται στην κεφαλή της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς ίση προς την απόλυτη τιμή της υπερύψωσης των σιδηροτροχιών λόγω επίκλισης, όπως προκύπτει από τα στοιχεία των κατασκευαστικών σχεδίων. Με τον τρόπο αυτό, το αρχείο των κατασκευαστικών σημείων όσο και εκείνο της καταγραφής αναφέρονται οριζοντιογραφικά στον άξονα του κλάδου κίνησης του οχήματος καταγραφής, ενώ υψομετρικά στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς όπου ακουμπά ο τροχός με το προσαρτημένο οδόμετρο.

Αντιστοίχιση τροχιάς καταγραφής με τα κατασκευαστικά σχέδια. – Το επόμενο βήμα απαιτεί την αντιστοίχιση μεταξύ των μετρημένων στοιχείων με εκείνα των κατασκευαστικών σχεδίων. Τα κατασκευαστικά σχέδια περιλαμβάνουν στοιχεία της σιδηροδρομικής γραμμής από τη θέση ΣΚΑ μέχρι το Κιάτο, ενώ η καταγραφή περιορίζεται στο τμήμα Λιόσια – Κιάτο. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η απομόνωση από τα κατασκευαστικά σχέδια μόνο των στοιχείων που αντιστοιχούν στο τμήμα της μετρημένης τροχιάς. Η αποκοπή των περιττών στοιχείων από τα κατασκευαστικά σχέδια πραγματοποιήθηκε μέσω λογισμικού στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab, κατά την εκτέλεση του οποίου υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου αντίστοιχα σημείου του αρχείου καταγραφής της τροχιάς και των σημείων των κατασκευαστικών σχεδίων. Το χρήσιμο τμήμα των κατασκευαστικών σχεδίων αρχίζει και τελειώνει με τα σημεία των οποίων οι αποστάσεις από το πρώτο και το τελευταίο σημείο του αρχείου καταγραφής, αντίστοιχα, είναι οι ελάχιστες. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψε το αρχείο με τα κατασκευαστικά στοιχεία το οποίο αναφέρονται στο τμήμα της μετρημένης τροχιάς.

Αραίωση σημείων αρχείου καταγραφής. - Ακολούθως, προκειμένου να γίνει μονοσήμαντη αντιστοίχιση των μετρημένων σημείων της τροχιάς με εκείνα

των κατασκευαστικών σημείων, χρειάστηκε αραίωση των σημείων της μετρημένης τροχιάς. Αυτό συνέβη διότι στα κατασκευαστικά σχέδια η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων είναι 20 m, σε αντίθεση με τα σημεία του αρχείου καταγραφής που εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα. Επομένως, για να καταστεί εφικτή η σύγκριση των δύο αρχείων, επιλέχθηκε στο αρχείο της καταγεγραμμένης τροχιάς να παραμείνουν μόνο εκείνα τα σημεία που αντιστοιχούν στα πλησιέστερα σημεία των κατασκευαστικών σχεδίων. Συγκεκριμένα, μέσω ρουτίνας λογισμικού που δημιουργήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab, για κάθε σημείο του κατασκευαστικού σχεδίου υπολογίστηκαν οι αποστάσεις προς όλα τα σημεία του αρχείου καταγραφής. Τα σημεία του αρχείου καταγραφής που είχαν την ελάχιστη απόσταση από τα σημεία του κατασκευαστικού σχεδίου διατηρήθηκαν στο αρχείο καταγραφής, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα που αφαιρέθηκαν. Με τον τρόπο αυτό, στο αρχείο καταγραφής τα σημεία που παρέμειναν έχουν βήμα 20 m και αντιστοιχούν αμφιμονοσήμαντα στα σημεία του κατασκευαστικού σχεδίου, οπότε είναι άμεσα συγκρίσιμα (Σχήμα 7.1).



Σχ. 7.1 Αντιστοίχιση σημείων αρχείου καταγραφής με σημεία κατασκευαστικών σχεδίων [AutoCAD]

Fig. 7.1 Matching between measured point with these from as build drawings [AutoCAD]

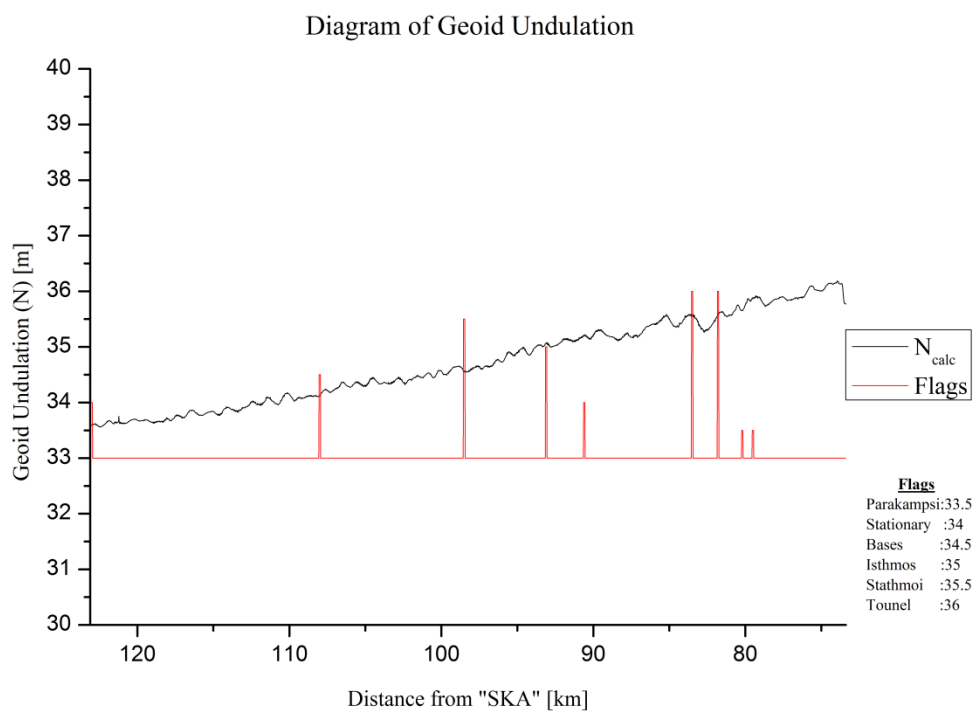
7.3.2 Υπολογισμός απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις του συστήματος καταγραφής

Ο υπολογισμός της απόκλισης του γεωειδούς από τις μετρήσεις των γεωμετρικών υψομέτρων του οχήματος καταγραφής (h_{INS}) και τα ορθομετρικά υψόμετρα τα οποία προέρχονται από τα κατασκευαστικά σχέδια της σιδηροδρομικής γραμμής ($H_{κατ}$) πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση 7.1.

$$N_{calc} = h_{INS} - H_{κατ} \quad (7.1)$$

7.3.3 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις

Διάγραμμα απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις. - Η απόκλιση του γεωειδούς ως προς τη χιλιομετρική θέση δίνεται στο Σχήμα 7.2.



Σχ. 7.2 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς βάσει του σημείου καταγραφής

Fig. 7.2 Geoid undulation using track survey data

Άξονας χιλιομέτρησης. - Προκειμένου να υπάρχει αντιστοίχιση της τιμής της απόκλισης του γεωειδούς που προέκυψε κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής με τη θέση στην οποία βρίσκονται τα σημεία από τα οποία προέκυψε,

δημιουργήθηκε η ανάγκη υιοθέτησης ενός άξονα χλιομέτρησης, ανεξάρτητου του χλιομετρικού άξονα των κατασκευαστικών σχεδίων (άξονας x Σχήματος 7.2). Η δημιουργία του χλιομετρικού αυτού άξονα βασίστηκε σε στοιχεία της χλιομέτρησης των κατασκευαστικών σχεδίων, σύμφωνα με την οποία το πρώτο σημείο καταγραφής βρίσκεται στη ΧΘ 123+000 km από το ΣΚΑ. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σημείων υπολογίζεται σύμφωνα με τις συντεταγμένες των διαδοχικών σημείων. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε νέος χλιομετρικός άξονας οι τιμές του οποίου στο τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής Κινέττα – Κιάτο κυμαίνονται μεταξύ ΧΘ:123+000 και ΧΘ: 73+384.

7.3.4 Ακρίβεια υπολογισμού απόκλισης γεωειδούς από μετρήσεις

Στην ακρίβεια υπολογισμού της απόκλισης του γεωειδούς επιδρούν τα σφάλματα των γεωμετρικών υψομέτρων που προκύπτουν από τις μετρήσεις, καθώς και η αβεβαιότητα των ορθομετρικών υψομέτρων που περιλαμβάνονται στα κατασκευαστικά σχέδια. Επομένως, η ακρίβεια της απόκλισης του γεωειδούς σύμφωνα με τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma_{N_{calc}} = \pm \sqrt{\sigma_{h_{INS}}^2 + \sigma_{H_{κατ}}^2} \quad (7.2)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί το μέσο τυπικό σφάλμα της απόκλισης του γεωειδούς, ομαλοποιήθηκε το διάγραμμα της απόκλισης του γεωειδούς με χρήση αλγορίθμου κινητού μέσου όρου με μέγεθος παραθύρου εξομάλυνσης 400 σημείων. Το παράθυρο εξομάλυνσης σάρωσε ολόκληρη την καμπύλη του κινητού μέσου όρου σε n επαναλήψεις, για κάθε μία από τις οποίες προέκυψε και ένας μέσος όρος τιμών \bar{x}_n . Τελικά, το μέσο τυπικό σφάλμα της απόκλισης του γεωειδούς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{N_{\text{calc}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m-r+1} (x_i - \bar{x}_n)^2}{n-1}} \quad (7.3)$$

όπου: $\sigma_{N_{\text{calc}}}$: το μέσο τυπικό σφάλμα της απόκλισης του γεωειδούς
 x_i : υπολογισμένη τιμή απόκλισης γεωειδούς
 \bar{x}_n : μέση τιμή περιεχομένων παραθύρου κινητού μέσου όρου για κάθε επανάληψη
 m : σύνολο σημείων στα οποία υπολογίστηκε η τιμή της απόκλισης του γεωειδούς
 r : αριθμός σημείων παραθύρου εξομάλυνσης
 n : σύνολο επαναλήψεων σάρωσης της καμπύλης από το παράθυρο εξομάλυνσης

Οπότε προκύπτει $\sigma_{N_{\text{calc}}} = \pm 7 \text{ cm}$.

7.4 Απόκλιση Γεωειδούς με Χρήση Παγκόσμιων Μοντέλων Γεωειδούς

7.4.1 Περιγραφή παγκόσμιων μοντέλων γεωειδούς

Τα πιο σύγχρονα και ευρέως αποδεκτά παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς είναι το EGM'96 και το EGM'08. Οι τιμές απόκλισης του γεωειδούς που απεικονίζονται στα μοντέλα αυτά έχουν προκύψει από μετρήσεις βαρύτητας. Η αναπαράσταση της επιφάνειας του γεωειδούς γίνεται μέσω πολυωνυμικών συναρτήσεων σφαιρικών αρμονικών μεγάλου βαθμού.

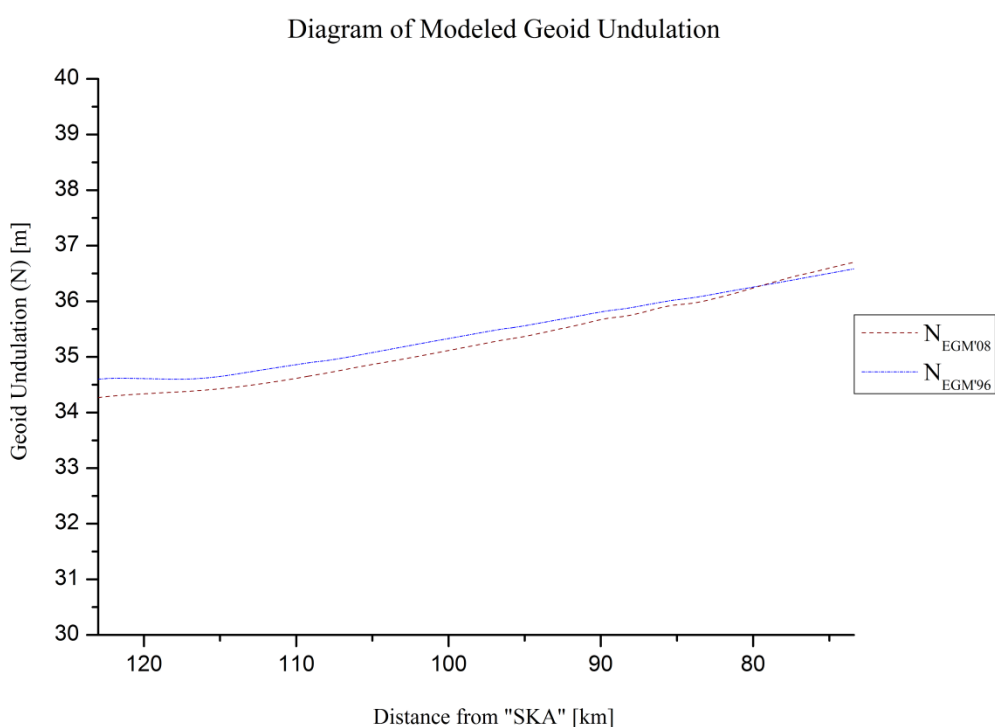
Τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς υλοποιούνται μέσω ενός καννάβου σημείων με γνωστές τιμές της απόκλισης του γεωειδούς στις κορυφές του. Συγκεκριμένα, το παγκόσμιο μοντέλο EGM'96 έχει βήμα καννάβου 30'x30' ενώ, το παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM'08 έχει βήμα καννάβου 5'x5'.

Κάθε ένα από τα μοντέλα αυτά συνοδεύεται από ένα λογισμικό παρεμβολής το οποίο υπολογίζει τις τιμές της απόκλισης του γεωειδούς σε όποιο σημείο του καννάβου ζητηθεί. Το λογισμικό παρεμβολής διαφέρει μεταξύ των δύο μοντέλων, δεδομένου ότι το μέγεθος του φατνίου για κάθε μοντέλο είναι διαφορετικό.

7.4.2 Υπολογισμός απόκλισης του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης με βάση τα μοντέλα γεωειδούς EGM'96 και EGM'08

Οι τιμές της απόκλισης του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με τα παγκόσμια μοντέλα προέκυψαν μέσω παρεμβολής στον κάρναβο του κάθε μοντέλου (EGM'96 και EGM'08) αντίστοιχα. Τα προγράμματα παρεμβολής των δύο μοντέλων EGM'96 και EGM'08 προέρχονται από την ιστοσελίδα της Υπηρεσίας NGIA (National Geospatial Intelligence Agent) του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ (<http://earth-info.nga.mil/GandG/index.html>). Συγκεκριμένα, σε κάθε πρόγραμμα παρεμβολής έγινε εισαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων καταγραφής και ως στοιχείο εξόδου προέκυψε ένα αρχείο με τιμές της απόκλισης του γεωειδούς για κάθε σημείο.

Διαγραμματικά η απεικόνιση της απόκλισης του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης όπως προκύπτει από τα μοντέλα EGM'96 και EGM'08 αντίστοιχα, δίνεται στο Σχήμα 7.3.



Σχ. 7.3 Ανάπτυγμα απόκλισης γεωειδούς από μοντέλα EGM'96 και EGM'08

Fig. 7.3 EGM'96 and EGM'08 geoid undulation

7.4.3 Ακρίβεια υπολογισμού απόκλισης γεωειδούς από παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς

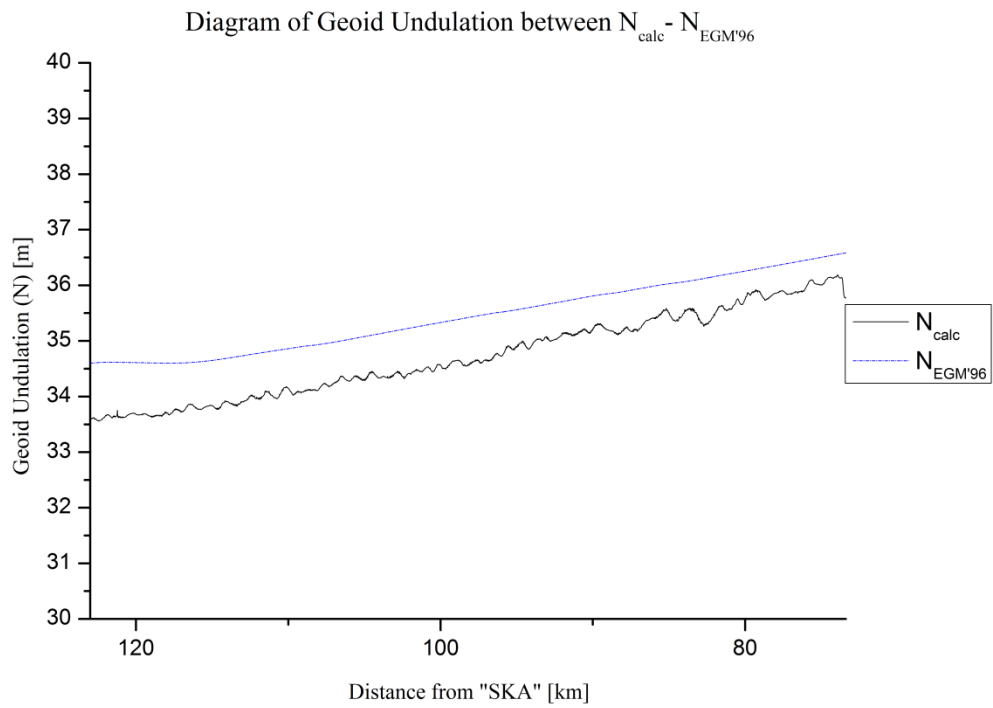
Η ακρίβεια με την οποία προέκυψαν οι τιμές της απόκλισης του γεωειδούς από τα παγκόσμια μοντέλα στα σημεία κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής είναι ανάλογη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, το παγκόσμιο μοντέλο EGM'96 παρέχει αναμενόμενη ακρίβεια της απόκλισης του γεωειδούς της τάξης ± 1 m, ενώ το μοντέλο EGM'08 της τάξης $\pm 30-50$ cm.

7.5 Σύγκριση Τιμών Απόκλισης Γεωειδούς στην Περιοχή Μελέτης

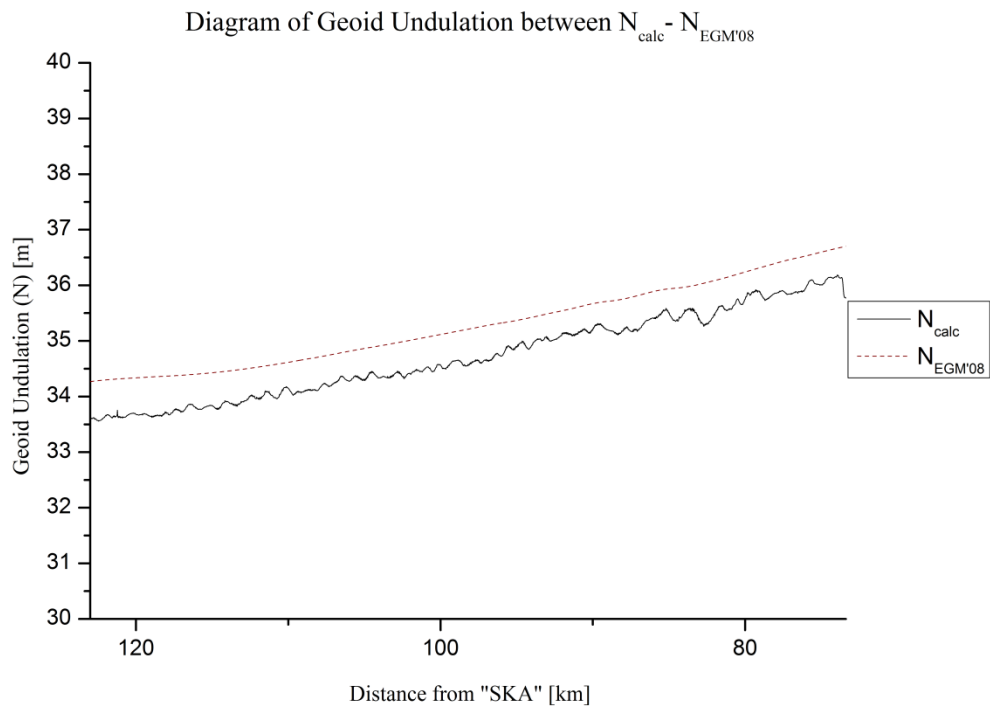
Η σύγκριση των υπολογισμένων τιμών απόκλισης του γεωειδούς από τις μετρήσεις και εκείνων που προκύπτουν βάσει των δύο παγκόσμιων μοντέλων γίνεται με την αναπαράσταση των τιμών τους σε κοινό γράφημα. Στα γραφήματα δίνεται και η ομαλοποιημένη καμπύλη της απόκλισης του γεωειδούς που έχει προκύψει από τις μετρήσεις. Η ομαλοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω αλγορίθμου κινητού μέσου όρου με παράθυρο εξομάλυνσης 400 σημείων.

Προκειμένου να απεικονιστούν θέσεις ειδικού ενδιαφέροντος κατά μήκος της τροχιάς καταγραφής προστέθηκαν στο γράφημα κατακόρυφες γραμμές στις αντίστοιχες ΧΘ. Το ύψος κάθε κατακόρυφης γραμμής αντιπροσωπεύει και διαφορετική ιδιότητα που υπάρχει κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες ενδιαφέροντος που απεικονίζονται είναι: (α) τα σημεία όπου έγιναν οι στάσεις του οχήματος καταγραφής, (β) τα σημεία που τοποθετήθηκαν οι σταθμοί αναφοράς, (γ) οι εγκαταστάσεις των σταθμών του προαστιακού σιδηρόδρομου, (δ) τα τμήματα στα οποία έγιναν παρακάμψεις από τη σιδηροδρομική γραμμή των κατασκευαστικών σχεδίων και τέλος (ε) τα τμήματα της γραμμής όπου υπήρχαν σήραγγες (Σχήμα 7.2).

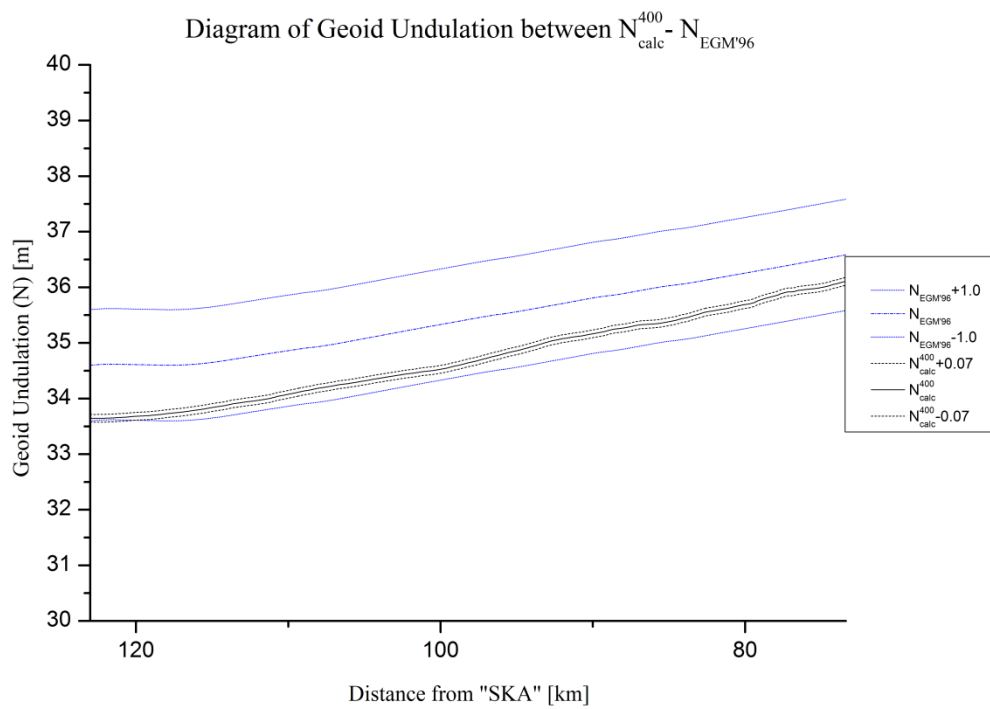
Στη συνέχεια, δίνονται συγκριτικά διαγράμματα της απόκλισης του γεωειδούς που προέκυψαν από τις μετρήσεις με εκείνη που προκύπτει από τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς EGM'96 και EGM'08, στο τμήμα Κινέττα – Κιάτο (Σχήμα 7.4 έως Σχήμα 7.7).



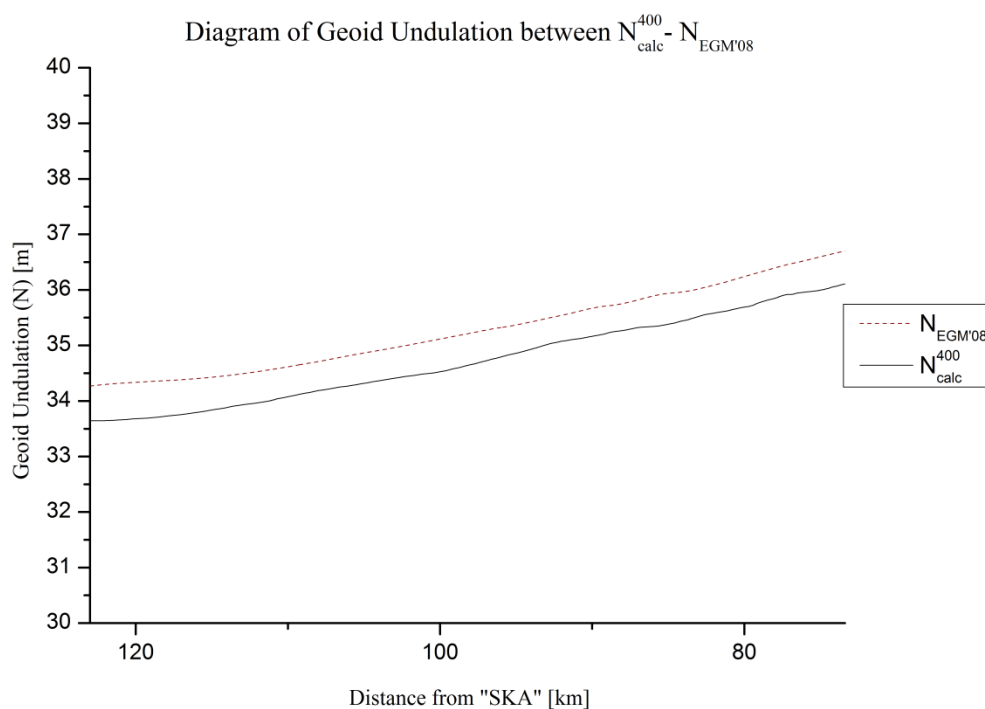
Σχ. 7.4 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM'96 και του συστήματος καταγραφής
 Fig. 7.4 Comparison between $N_{EGM'96}$ and N_{calc}



Σχ. 7.5 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM'08 και του συστήματος καταγραφής
 Fig. 7.5 Comparison between $N_{EGM'08}$ and N_{calc}



Σχ. 7.6 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM'96 και του συστήματος καταγραφής
 Fig. 7.6 Comparison between $N_{EGM'96}$ and N_{calc}



Σχ. 7.7 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM'08 και του συστήματος καταγραφής
 Fig. 7.7 Comparison between $N_{EGM'08}$ and N_{calc}

7.6 Επιπλέον Μετρήσεις Επαλήθευσης

Προκειμένου να εξακριβωθεί η ορθότητα των μετρήσεων του οχήματος καταγραφής, καθώς και της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει από τις μετρήσεις αυτές, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες μετρήσεις σε σημείο γνωστών συντεταγμένων πλησίον στη σιδηροδρομική γραμμή.

Το σημείο που μετρήθηκε για επαλήθευση βρίσκεται στη Χ.Θ. 81+396 σε κατάλληλα διαμορφωμένο βάθρο με δυνατότητα εξαναγκασμένης κέντρωσης (Σχήμα 7.8). Για τις μετρήσεις ως σταθμός αναφοράς επιλέχθηκε το σημείο γνωστών συντεταγμένων K215B, το οποίο απέχει ~ 8.4 km από το υπόψη σημείο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με δέκτες GPS Trimble 4700 και ο κοινός χρόνος παρατηρήσεων ήταν ~ 50 min.



Σχ. 7.8 Σημείο μετρήσεων επαλήθευσης

Fig. 7.8 Point of verification measurements

Η επίλυση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Trimble Geomatics Office (TGOffice v.1.63) και οι συντεταγμένες που προέκυψαν δίνονται στον Πίνακα 7.1.

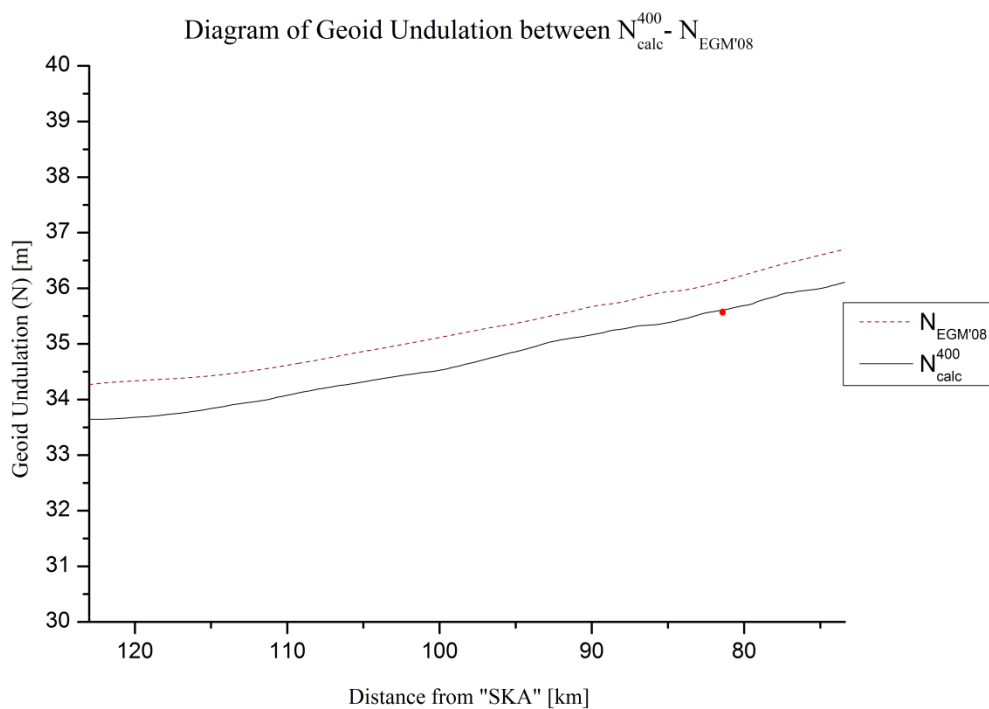
Συντεταγμένες Σημείου Επαλήθευσης [m]		Αβεβαιότητα Βάσης [mm]	
$X_{ΕΓΣΑ'87}$	423087.333	$\sigma_{\Delta X}$	5
$Y_{ΕΓΣΑ'87}$	4197730.893	$\sigma_{\Delta Y}$	3
h	31.576	$\sigma_{\Delta Z}$	4

Πίν. 7.1: Συντεταγμένες Σημείου Επαλήθευσης (προβολή ΕΓΣΑ'87, h) και αβεβαιότητες επίλυσης της βάσης

Table 7.1: Coordinates of verification point (projection EGSA'87, h) and base line's errors

Προκειμένου να υπολογιστεί η απόκλιση του γεωειδούς στο συγκεκριμένο σημείο, δόθηκε το ορθομετρικό του υψόμετρο (H_{verif}) από τον κατασκευαστή του έργου. Η τιμή του ορθομετρικού υψόμετρου αναφέρεται στην κεφαλή της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς. Για τον λόγο αυτό, έγινε αναγωγή της μετρημένης τιμής

του γεωμετρικού υψομέτρου στο επίπεδο της χαμηλότερης σιδηροτροχιάς. Η απόκλιση του γεωειδούς για το σημείο επαλήθευσης (N_{verif}) υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ του ορθομετρικού υψομέτρου του σημείου (H) και του ανηγμένου στη χαμηλότερη σιδηροτροχιά γεωμετρικού υψομέτρου (h_{verif}). Η τιμή της απόκλισης του γεωειδούς που προέκυψε για το σημείο επαλήθευσης ήταν ίση με $N_{\text{verif}} = h_{\text{verif}} - H_{\text{verif}} = 35.534 \text{ m}$. Αντίστοιχα, η τιμή της απόκλισης του γεωειδούς που προέκυψε από την ανάλυση των μετρήσεων του οχήματος καταγραφής στη Χ.Θ. 81+396 ήταν $N_{\text{calc}} = h_{\text{INS}} - H_{\text{κατ}} = 35.605 \text{ m}$. Επομένως, η διαφορά μεταξύ των αποκλίσεων του γεωειδούς, όπως αυτές προκύπτουν από τους δύο διαφορετικούς τρόπους μέτρησης, είναι ίση με $N_{\text{calc}} - N_{\text{verif}} = 7.1 \text{ cm}$. Η διαφορά είναι αποδεκτή, δεδομένης και της ακρίβειας μέτρησης υψομέτρων με GPS σε κινηματικό εντοπισμό (Σχήμα 7.9).

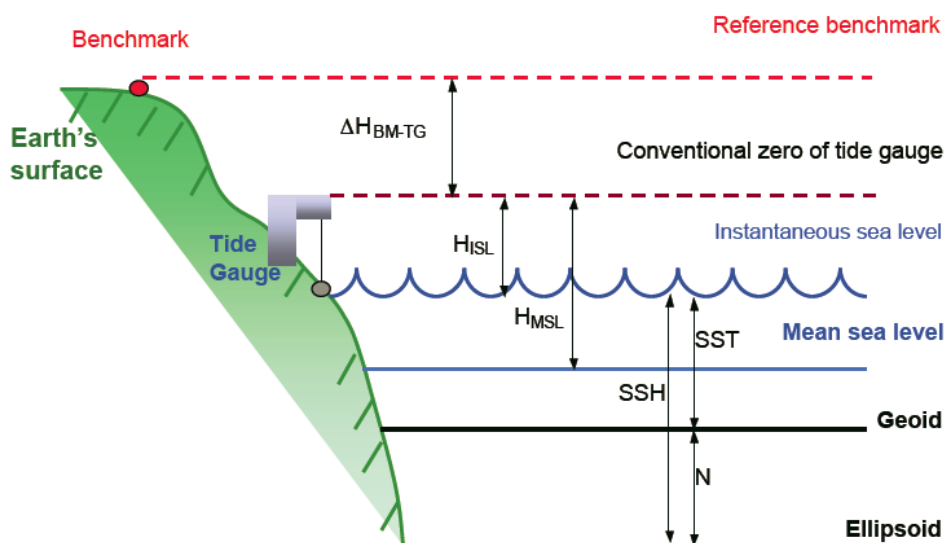


Σχ. 7.9 Σύγκριση απόκλισης γεωειδούς μεταξύ του μοντέλου EGM'08, του συστήματος καταγραφής και του σημείου επαλήθευσης

Fig. 7.9 Comparison between $N_{\text{EGM}'08}$, N_{calc} and check point

Από τη διαφορά στην τιμή της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει από τους δύο διαφορετικούς τρόπους μέτρησής της συμπεραίνεται ότι όντως η τιμή της απόκλισης του γεωειδούς στην διατομή με Χ.Θ. 81+396 κυμαίνεται στις τιμές της απόκλισης

του γεωειδούς που προκύπτουν από τις μετρήσεις του οχήματος καταγραφής. Επιπλέον, η τιμή που προκύπτει από τις επιπλέον μετρήσεις που έγιναν για επαλήθευση δεν πλησιάζει τις τιμές των παγκόσμιων μοντέλων στην περιοχή. Επομένως, ισχυροποιείται η άποψη ότι όντως η αποχή στις τιμές του που προκύπτουν από τα παγκόσμια μοντέλα απόκλισης του γεωειδούς και από τις μετρήσεις του οχήματος καταγραφής οφείλονται στη μορφή του τοπικού γεωειδούς στην περιοχή μελέτης (Σχήμα 7.10).



Σχ. 7.10 Επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων [wcrp.ipsl.jussieu.fr]

Fig. 7.10 Vertical datum levels [wcrp.ipsl.jussieu.fr]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

8.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς και από τη μελέτη της απόκλισης του γεωειδούς όπως εξάγεται κατά την ανάλυση των μετρήσεων και των βαρυτικών μοντέλων. Επιπλέον, παρατίθενται καταρχήν σκέψεις τόσο για περαιτέρω διερεύνηση των αποτελεσμάτων σχετικά με την απόκλιση του γεωειδούς, όσο και για τις εφαρμογές που μπορεί να καλύψει το σύστημα εντοπισμού.

8.2 Συμπεράσματα

8.2.1 Αναφορικά με το σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας των μετρήσεων

Ακρίβεια καταγραφής. - Διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια των γεωμετρικών υψομέτρων που μετρήθηκαν (± 7 cm) είναι ικανοποιητική, συγκρινόμενη και με τη μέση ακρίβεια προσδιορισμού των υψομέτρων μόνο με σύστημα GNSS (± 5 cm). Η μικρή προσαύξηση που παρατηρείται δικαιολογείται δεδομένων των συνθηκών καταγραφής (τμήματα σηράγγων, ορύγματα κατά μήκος της διαδρομής). Επομένως, δεδομένων των εφαρμογών που καλείται να καλύψει η χρήση του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου συστήματος πλοήγησης, διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια μέτρησης υψομέτρων από το συγκεκριμένο σύστημα είναι ικανοποιητική.

Καταγραφή μετρήσεων. - Από την εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων, διαπιστώθηκε η ανάγκη πραγματοποίησης στάσεων εντός των σηράγγων με μεγάλο μήκος. Στα τμήματα αυτά λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος (> 2 min) που η αδρανειακή μονάδα λειτουργούσε χωρίς παροχή δεδομένων θέσης από τον δέκτη GNSS, διαπιστώθηκε μειωμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης του οχήματος καταγραφής. Συμπερασματικά, για χρονική απώλεια των δορυφορικών δεδομένων προς την αδρανειακή μονάδα μεγαλύτερη των 2 min, ενδείκνυται η πραγματοποίηση

στάσης του οχήματος καταγραφής, ούτως ώστε να μηδενιστούν τα σφάλματα των αισθητήρων (biases) της αδρανειακής μονάδας.

Επεξεργασία μετρήσεων καταγραφής. – Σε περιπτώσεις συχνών απωλειών του δορυφορικού σήματος, κατά την εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων απαιτείται η εφαρμογή του αλγορίθμου ARTK. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου επιτυγχάνει την εκ των υστέρων επίλυση των ασαφειών φάσης με δεδομένα κίνησης του οχήματος καταγραφής (on the fly). Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων η εφαρμογή του αλγορίθμου ARTK βελτιώνει την ποιότητα της λύσης.

Η πυκνότητα των σημείων της τροχιάς που μετρήθηκαν ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την πυκνότητα των σημείων που δίδονται στα κατασκευαστικά σχέδια. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ των ορθομετρικών υψομέτρων των κατασκευαστικών σχεδίων και των γεωμετρικών υψομέτρων των σημείων που μετρήθηκαν, πραγματοποιήθηκε αραίωση των σημείων που μετρήθηκαν, ούτως ώστε να υπάρξει αμφιμονοσήμαντη αντιστοίχιση μεταξύ τους.

8.2.2 Αναφορικά με το ανάπτυγμα της τομής απόκλισης του γεωειδούς

Η ομαλοποίηση (smoothing) της καμπύλης της απόκλισης του γεωειδούς προκύπτει μέσω αλγορίθμου κινητού μέσου όρου. Η διαδικασία ομαλοποίησης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με εναλλακτικούς αλγορίθμους, προκειμένου να επιτευχθεί αρτιότερη αναπαράσταση της αρχικής καμπύλης.

Από την ομαλοποίηση της καμπύλης απόκλισης του γεωειδούς προκύπτει νέα ομαλοποιημένη καμπύλη η κλίση της οποίας συγκρινόμενη με την κλίση της καμπύλης του γεωειδούς όπως προκύπτει από τα παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφορές.

Μετά τον υπολογισμό της απόκλισης του γεωειδούς των μοντέλων με χρήση των στοιχείων σφαιρικών αρμονικών παρατηρείται ότι η μορφή της καμπύλης της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει και για τα δύο μοντέλα (EGM'96, EGM'08) δε διαφέρει ουσιαστικά από εκείνη που προκύπτει από τη χρήση

του καννάβου παρεμβολής. Επομένως, εφαρμόζοντας και τις δύο μεθόδους οι διαφορές που προκύπτουν είναι επουσιώδεις.

Δεδομένων των ακριβειών με τις οποίες υπολογίζεται η απόκλιση του γεωειδούς από τις μετρήσεις καθώς και από τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς, παρατηρείται ότι η καμπύλη της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει από τα μετρημένα στοιχεία είναι εντός του εύρους των τιμών της απόκλισης του γεωειδούς των παγκόσμιων μοντέλων (EGM'96, EGM'08).

Κατά τη σύγκριση της μηκοτομής της απόκλισης του γεωειδούς όπως προκύπτει από τις μετρήσεις με εκείνη που προκύπτει από κάθε μοντέλο του γεωειδούς παρατηρείται μία συστηματική απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή, όπως αποδεικνύεται και από τις μετρήσεις επαλήθευσης που πραγματοποιήθηκαν σε μεμονωμένα σημεία, εκτιμάται ότι υποδηλώνει την αβεβαιότητα του παγκόσμιου μοντέλου στη συγκεκριμένη περιοχή. Συγκεκριμένα, η μηκοτομή της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει από τις μετρήσεις αναφέρεται στην τοπική Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ) ενώ οι καμπύλες που προκύπτουν από τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς αναφέρονται στην επιφάνεια του γεωειδούς. Η διαφορά στην απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών εκτιμάται ότι οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια της ΜΣΘ τοπικά προκύπτει από μετρήσεις παλιρροιογράφων ενώ η επιφάνεια του γεωειδούς προκύπτει παγκόσμια από μετρήσεις βαρύτητας.

8.3 Προτάσεις Για Περαιτέρω Διερεύνηση

Προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω τα συμπεράσματα, ακολουθούν μερικές προτάσεις ως προς την ανάλυση και χρήση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Συγκεκριμένα, για την ανάλυση της συστηματικότητας που παρουσιάζει η μορφή της καμπύλης της απόκλισης του γεωειδούς που προκύπτει από τις μετρήσεις προτείνεται η ανάλυση σήματος με χρήση εξισώσεων Fourier.

Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να μελετηθεί ο αλγόριθμος εντοπισμού του συστήματος SPAN δεδομένου ότι το σύστημα παρέχει πρωτογενείς μετρήσεις.

Τέλος, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και για άλλες εφαρμογές, όπως είναι η ανάλυση των γεωμετρικών στοιχείων της σιδηροδρομικής γραμμής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SPAN ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Α1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται αρχικά τα τμήματα από τα οποία αποτελείται το ολοκληρωμένο σύστημα SPAN καθώς και η συνδεσμολογία μεταξύ των τμημάτων του. Επιπρόσθετα, αναφέρονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις και εντολές που απαιτούνται για τη μεταξύ τους επικοινωνία, αλλά και τα είδη καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Α2 Περιγραφή Εξοπλισμού

Στο Πίνακα Παραρτήματος 1 φαίνονται τα μέρη του εξοπλισμού από τα οποία απαρτίζεται κάθε σύστημα καθώς και οι θύρες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από κάθε ένα.

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΤΥΠΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	ΘΥΡΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ
SPAN SYSTEM	NOVATEL PROPAK-V3 (ROVER)	COM1 male
		AUX male
		I/O female
		GPS (antenna) – TNC female
		POWER
	IMAR iIMU-FSAS-E-EI-SN-O-HM-SB	COM3 female
		I/O male
		ODO female
		POWER
	ODOMETER CORRSYS DATRON WPT M12	RS-422 (TTL compatible) male
GPS – 702GG		
NOVATEL DL-V3 (BASE)	NOVATEL DL-V3	SAT – ANT – TNC female
		USB
		POWER
PC	NOTEBOOK	USB
		SERIAL PORT male
		POWER car adaptor 12V

Πίνακας Παραρτήματος 1 Εξοπλισμός πειραμάτων

Appendix Table 1 Equipment of trials

A3 Μετατροπή Καλωδίου Οδομέτρου

Προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση μεταξύ της αδρανειακής μονάδας και του οδομέτρου, μέσω των θυρών επικοινωνίας “ODO” του IMU και “RS-422” του ODOMETER, χρειάστηκε τροποποίηση του συστήματος, ο οποίος πραγματοποιήθηκε με επέκταση του καλωδίου του οδομέτρου.

Συγκεκριμένα, η μετατροπή έγινε σε ένα σειριακό καλώδιο. Το καλώδιο αυτό τροποποιήθηκε έτσι ώστε να γίνει σωστή αντιστοίχιση μεταξύ των ηλεκτρικών σημάτων που στέλνει ο αισθητήρας του οδομέτρου και περιμένει να λάβει η αδρανειακή μονάδα. Η μετατροπή αυτή φαίνεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Μπαταρία	Οδόμετρο “RS-422” Female DB9		Καλώδιο μετατροπής			IMU “ODO” Male DB9	
	Λειτουργία	# Pin	Male	→	Female	# Pin	Λειτουργία
	A ⁺	2	2	→	6	6	A ⁺
Ground	Ground	5	5	→	7	7	A ⁻
					1	1	B ⁻
+12V	+12V	4					

Πίνακας Παραρτήματος 2 Μετατροπή καλωδίου οδομέτρου

Appendix Table 2 Odometer cable modification

A4 Διασύνδεση Εξοπλισμού και Ορισμός Ειδών Καταγραφών για Σταθερό Δέκτη

Εδώ περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκε η συνδεσμολογία του βασικού δέκτη, ο οποίος τοποθετείται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων αλλά και το χρόνο καταγραφής στην κάρτα μνήμης που περιλαμβάνει.

Ο εξοπλισμός που χρειάζεται προκειμένου να στηθεί ένας σταθμός αναφοράς, είναι:

- Τρίποδας
- Τρικόχλιο
- Στυλαιουδάκι
- Κεραία GPS-702GG

- Καλώδιο κεραίας GPS
- Δορυφορικός δέκτης Novatel DL-V3
- Συσσωρευτής 12V
- Καλώδιο τροφοδοσίας και μετατροπέας για τροφοδοσία από συσσωρευτή 12V
- Καλώδιο USB
- Φορητός Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
- Μεταλλική μετροταινία

Ο φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής καθώς και το καλώδιο USB, χρειάζονται μόνο προσωρινά, προκειμένου να ρυθμιστεί ο δέκτης για το τύπο των καταγραφών που αποθηκεύει. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, μπορούν να αποσυνδεθούν και να αφαιρεθούν.

Αρχικά, συνδέεται το ένα άκρο του καλωδίου της κεραίας με τη κεραία GPS και το άλλο άκρο στην υποδοχή “SAT – ANT” του δέκτη. Μετά, κεντρώνεται και οριζοντιώνεται η κεραία του GPS πάνω από το σημείο γνωστών συντεταγμένων με τον τρίποδα, το τρικόχλιο και το στυλαιουδάκι. Στη συνέχεια, συνδέεται στη μπαταρία το καλώδιο τροφοδοσίας, με τον μετατροπέα για τροφοδοσία από 12V, με τη σωστή πολικότητα (κόκκινο στο “+” και μαύρο στο “-“). Ακολούθως συνδέεται το καλώδιο τροφοδοσίας με τον δέκτη, όπου παρατηρείται να ανάβει η πορτοκαλί λυχνία ετοιμότητας στην οθόνη ελέγχου του δέκτη.

Έπειτα, εγκαθίσταται το λογισμικό χειρισμού “CDU” στον φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, το οποίο χρησιμεύει και στον δέκτη ProPak-V3, ο οποίος τοποθετείται στο όχημα.

Αφού γίνει εγκατάσταση του λογισμικού, τότε συνδέεται το καλώδιο USB με το υπολογιστή αλλά και με τον δέκτη στην κατάλληλη υποδοχή και ενεργοποιείται ο δέκτης πατώντας το κουμπί ενεργοποίησης μέχρι να ανάψει η πράσινη λυχνία ενεργοποίησης.

Τότε στον φορητό υπολογιστή ανιχνεύονται οι διάφορες συσκευές που ενσωματώνει ο δέκτης και ζητούνται οδηγοί εγκατάστασης (“drivers”), οι οποίοι βρίσκονται στο CD εγκατάστασης του λογισμικού “CDU software”. Όταν ο υπολογιστής αναγνωρίσει

τον δέκτη, τότε ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία προκειμένου το λογισμικό CDU, να συνδεθεί και να διαχειριστεί από τον δέκτη.

Ενεργοποιείται το λογισμικό “CDU software” και επιλέγεται: *>Device > Open > New*. Στη συνέχεια επιλέγεται Baud Rate: 57600, Αποεπιλογή “*Use Hardware handshaking*” *> OK*, τέλος επιλέγουμε το προφίλ που δημιουργήθηκε και στη συνέχεια *>Open*.

Αμέσως μετά τη σύνδεση του “CDU” με τον δέκτη, επιλέγεται: *>Tools > DL Explorer > Edit DL Groups > + > «Όνομα προφίλ»*. Στη συνέχεια ακολουθούν τα είδη καταγραφών που αποθηκεύονται καθώς και οι ρυθμίσεις για τη καταγραφή τους.

Name	Port	Format	Trigger	Period
RANGECMP	FILE	BINARY	ONTIME	1
RAWEPHEM	FILE	BINARY	ONNEW	-
ALMANAC	FILE	BINARY	ONCHANGED	-

Πίνακας Παραρτήματος 3 Είδη καταγραφών για σταθερό δέκτη GPS – DL-V3
Appendix Table 3 Logs for base GPS station – DL-V3

Στον Πίνακα Παραρτήματος 3 φαίνεται ότι όλες οι καταγραφές έχουν ως “Port” την επιλογή “File”. Αυτό σημαίνει ότι όλες θα αποθηκευτούν στην κάρτα μνήμης που περιλαμβάνει ο βασικός δέκτης.

Στο ίδιο παράθυρο επιλέγεται *>Group Management > Click στο CDU group που δημιουργήθηκε > Upload*, για να ενσωματωθεί στη στήλη DL groups, και *> Click στο group που επιθυμούμε > Start*, ώστε να αρχίσει η καταγραφή στο αρχείο.

Προκειμένου να αποσυνδεθεί ο υπολογιστής από τον δέκτη, επιλέγεται: *Device > Close Config* και στη συνέχεια αποσυνδέεται το καλώδιο USB.

Προκειμένου να σταματήσει την καταγραφή ο δέκτης χρειάζεται να πατηθεί το κουμπί της απενεργοποίησης για μία φορά.

A5 Διασύνδεση Εξοπλισμού στο Όχημα Καταγραφής Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται ο τρόπος εγκατάστασης του εξοπλισμού στο όχημα καταγραφής.

Προκειμένου η εγκατάσταση αυτή να γίνει με τον πιο σωστό τρόπο, καλό είναι να προηγηθεί η στερέωση της κεραίας του GPS στην οροφή του οχήματος. Στα τέσσερα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της εξοικείωσης με το σύστημα, η κεραία GPS στερεώθηκε στη οροφή του οχήματος με μαγνητική βάση.

Στη συνέχεια, εξίσου σημαντικό είναι η όσο το δυνατό καλύτερη στερέωση της αδρανειακής μονάδας κατά μήκος του άξονα κίνησης του οχήματος, ώστε να μετακινείται όσο το δυνατό λιγότερο κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος. Όσο το εξωτερικό πλαίσιο της αδρανειακής μονάδας κινείται λόγω της κίνησης του οχήματος, τόσο υπεισέρχεται θόρυβος κατά τις μετρήσεις.

Τελευταίο βήμα εγκατάστασης του εξοπλισμού είναι η εγκατάσταση του αισθητήρα του οδομέτρου. Το οδόμετρο πρέπει να τοποθετηθεί ομοαξονικά σε έναν μη κινητήριο τροχό. Αν το οδόμετρο δεν ευθυγραμμιστεί σωστά τότε ο άξονάς του κάνει δύο κινήσεις, μία παράλληλη με τη κίνηση του τροχού (περιστροφή) και μία γύρω από τον άξονα του τροχού (σαν δορυφόρος). Έτσι οι καταγραφές του οδομέτρου δεν είναι σωστές.

Μετά την παραπάνω εγκατάσταση, σειρά έχει η πολύ καλή μέτρηση των μεταθέσεων της κεραίας του GPS και του οδομέτρου, ως προς το κέντρο της αδρανειακής μονάδας στο σύστημα αναφοράς του αδρανειακού. Οι εκκεντρότητες αυτές χρησιμεύουν ώστε οι συντεταγμένες των θέσεων, να αναφέρονται στο κέντρο της αδρανειακής μονάδας.

Επόμενο βήμα, είναι η διασύνδεση των συστημάτων μεταξύ τους. Ο Πίνακας Παραρτήματος 4 δείχνει με απλά βήματα πώς μπορεί να γίνει αυτό.

A6 Επικοινωνία λογισμικού με PROPAK-V3 και Έναρξη Καταγραφών

Σε αυτή τη φάση της διαδικασίας τροφοδοτείται με ρεύμα αρχικά η αδρανειακή μονάδα, στη συνέχεια το οδόμετρο και τέλος το PROPAK-V3 από μπαταρίες 12V. Με τον ίδιο τρόπο που γίνεται η σύνδεση του σταθερού δέκτη DL-V3 μέσω του λογισμικού “CDU software”, όπως αναφέρεται παραπάνω, έτσι γίνεται κι εδώ. Από το λογισμικό “CDU software” επιλέγεται *>Device > Open>* και γίνεται η σύνδεση του δέκτη με τον H/Y.

Τύπος εξοπλισμού	Θύρα	→	Θύρα			Τύπος εξοπλισμού
NOVATEL PROPAK- V3	TNC	→	TNC			GPS antenna
	COM1	→	USB			PC
	AUX	→	COM3			IMU
	I/O	→	I/O			
CORRSYS DATRON WPT ODOMETER	RS-422	→	Odometer Modification	→	ODO	

Πίνακας Παραρτήματος 4 Διασύνδεση εξοπλισμού οχήματος (rover)

Appendix Table 4 Equipment interconnection of vehicle (rover)

Στη συνέχεια, απαιτείται η επικοινωνία του λογισμικού με την αδρανειακή μονάδα, αλλά και η αρχικοποίηση των τιμών των επιταχυνσιομέτρων και των γυροσκοπίων ανάλογα με τη θέση του οχήματος στην φυσική γήινη επιφάνεια. Όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται με την επιλογή του “SPAN Alignment Wizard”. Στον οδηγό αυτό αυτόματης ρύθμισης δηλώνονται τα lever-arms της κεραίας του GPS, ως προς το κέντρο του αδρανειακού, αλλά και η κατεύθυνση των αξόνων του συστήματος αναφοράς του αδρανειακού (i-frame), ως προς τη κίνηση του οχήματος. Η αρχικοποίηση αυτή διαρκεί ~ 1 min. Μετά, δηλώνονται μέσα από την επιλογή “Logging Control Window” τα είδη των καταγραφών, ο τρόπος καταγραφής, αλλά και η συχνότητα εγγραφής τους.

Στον Πίνακα Παραρτήματος 5 φαίνονται οι επιλογές των καταγραφών που έγιναν στα τέσσερα πειράματα.

Καταγραφές	Πειράματα			Πείραμα 18/09			Πείραμα 23/09			Πείραμα 22/10			Πείραμα 20/11		
	Type	Trigger	Period	Type	Trigger	Period	Type	Trigger	Period	Type	Trigger	Period			
BESTGPSPOS							BINARY	ONTIME	1	BINARY	ONTIME	1			
INSUPDATE										BINARY	ONCHANCED	-			
RANGECMP	ASCII	ONTIME	1	BINARY	ONTIME	1	BINARY	ONTIME	1	BINARY	ONTIME	1			
RAWEPHEM	ASCII	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-			
RAWIMU	ASCII	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-	BINARY	ONNEW	-			
TIMEDWHEELDATA										BINARY	ONNEW	-			
VEHICLEBODYROTATION							BINARY	ONCHANCED	-	BINARY	ONCHANCED	-			
WHEELSIZE										BINARY	ONNEW	-			

Πίνακας Παραρτήματος 5 Είδη καταγραφών στα τέσσερα πειράματα

Appendix Table 5 Logs of four trials

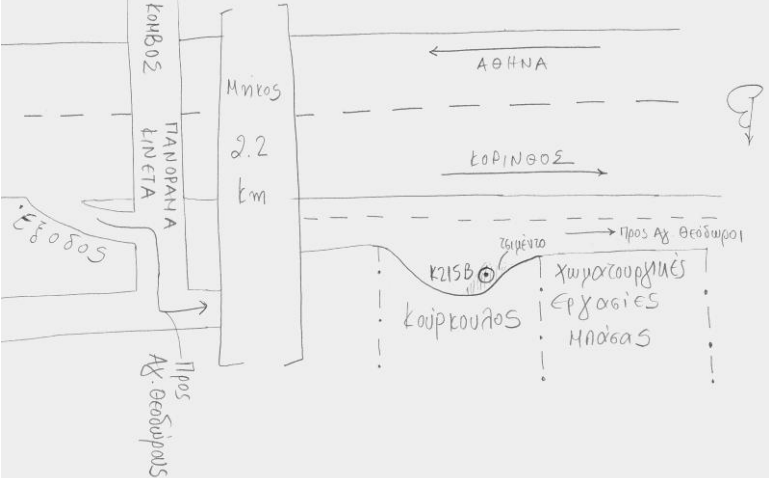


Αφού λοιπόν δηλωθούν τα είδη καθώς και οι επιλογές καταγραφής, στη συνέχεια, γίνεται έναρξη της καταγραφής. Το όχημα παραμένει ακίνητο για ~ 5 min (stationary coarse alignment). Το βήμα αυτό βοηθάει το λογισμικό της εκ των υστέρων επίλυσης, ώστε να εξάγει όσο το δυνατό καλύτερες λύσεις. Η ίδια διαδικασία γίνεται και στο τέλος της διαδρομής. Με αυτό το τρόπο συνεχίζονται οι καταγραφές ενώ το όχημα παραμένει ακίνητο μετά το τέλος της διαδρομής. Όταν τελειώσει το τελευταίο stationary coarse alignment (διαρκεί ~ 5 min), διακόπτεται και η καταγραφή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΟΔΟΠΟΡΙΚΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται τα οδοιπορικά που δημιουργήθηκαν προκειμένου τα ιδρυθέντα σημεία στα οποία θα στηθούν οι βασικοί δέκτες, να είναι εύκολα εντοπίσιμα. Στα οδοιπορικά περιλαμβάνεται η ονομασία του σημείου, η ακριβής περιγραφή της θέσης, ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται το σημείο, οι συντεταγμένες του, ένα σκαρίφημα της γύρω περιοχής, καθώς και κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες.

<p>Όνομασία</p>	<p>Όνομα: Κ67Β</p>	<p>Θέση</p>	<p>Επί της Παλαιάς Ε.Ο. Αθηνών – Θηβών στη διασταύρωση με την γέφυρα της Αττικής Οδού στο ρεύμα προς Ελευσίνα στη στάση λεωφορείου ΟΑΣΑ “Αερογέφυρα”</p>	
<p>Υλοποίηση</p>	<p>Πρόκα πίσω από την προστατευτική μπαριέρα με κόκκινη επισήμανση</p>	<p>Συντεταγμένες Σημείου</p>	<p>Χ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>457534</p>
			<p>Υ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>4212157</p>
<p>Οδοιπορικό</p>				
<p>Φωτογραφίες</p>				

<p>Όνομασία</p>	<p>Όνομα: K215B</p>	<p>Θέση</p>	<p>Στην έξοδο “Πανόραμα – Κινέτα”, της Νέας Ε.Ο. Αθηνών – Κορίνθου μετά το τρίτο τούνελ της Κακιάς Σκάλας με κατεύθυνση την Κόρινθο, ακολουθούμε την πινακίδα για Αγίους Θεοδώρους και σε απόσταση περίπου 2.2km.</p>	
<p>Υλοποίηση</p>	<p>Καρφί με κόκκινη επισήμανση πάνω σε τσιμέντο κοντά στο όριο του οικόπεδου, μπροστά από την είσοδο μάντρας “Κούρκουλος”</p>	<p>Συντεταγμένες Σημείου</p>	<p>Χ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>430084</p>
			<p>Υ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>4202376</p>
<p>Οδοιπορικό</p>				
<p>Φωτογραφίες</p>				
				

<p>Όνομασία</p>	<p>Όνομα: BK78B</p>	<p>Θέση</p>	<p>92.5 χιλιόμετρο Νέας Ε.Ο. Αθηνών – Πατρών σε απόσταση 4.6km μετά τον κόμβο για Αρχαία Κόρινθο με κατεύθυνση προς Πάτρα στο πρώτο parking που υπάρχει μετά το τέλος της διαχωριστικής νησίδας, πάνω σε στροφή</p>	
<p>Υλοποίηση</p>	<p>Καρφί με κόκκινη επισήμανση μπροστά από το πρώτο πεζούλι, επί του οδοστρώματος</p>	<p>Συντεταγμένες Σημείου</p>	<p>Χ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>397096</p>
			<p>Υ_{ΕΓΣΑ}: [m]</p>	<p>4196585</p>
<p>Οδοιπορικό</p>				
<p>Φωτογραφίες</p>				

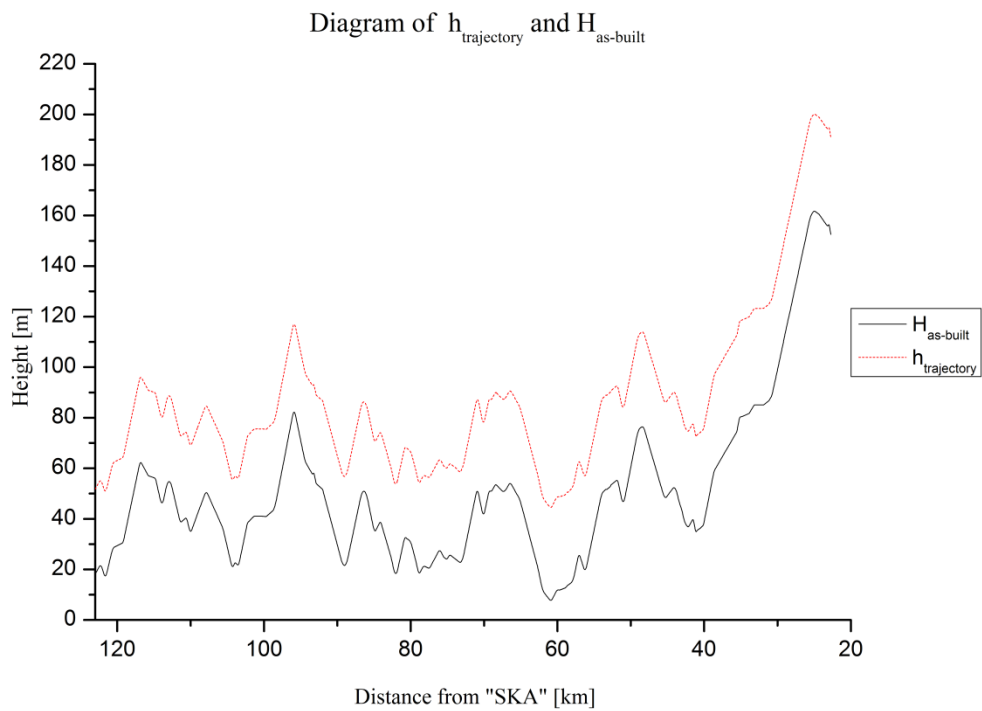
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΤΟΜΩΝ ΑΠΟΧΗΣ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΛΙΟΣΙΑ – ΚΙΑΤΟ

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα γραφήματα μηκοτομής αποχής γεωειδούς, η οριζοντιογραφία της τροχιάς καταγραφής, καθώς και η σύγκριση των μηκοτομών μεταξύ των γεωμετρικών και ορθομετρικών υψομέτρων σε ολόκληρη τη περιοχή μελέτης Λιόσια – Κιάτο.

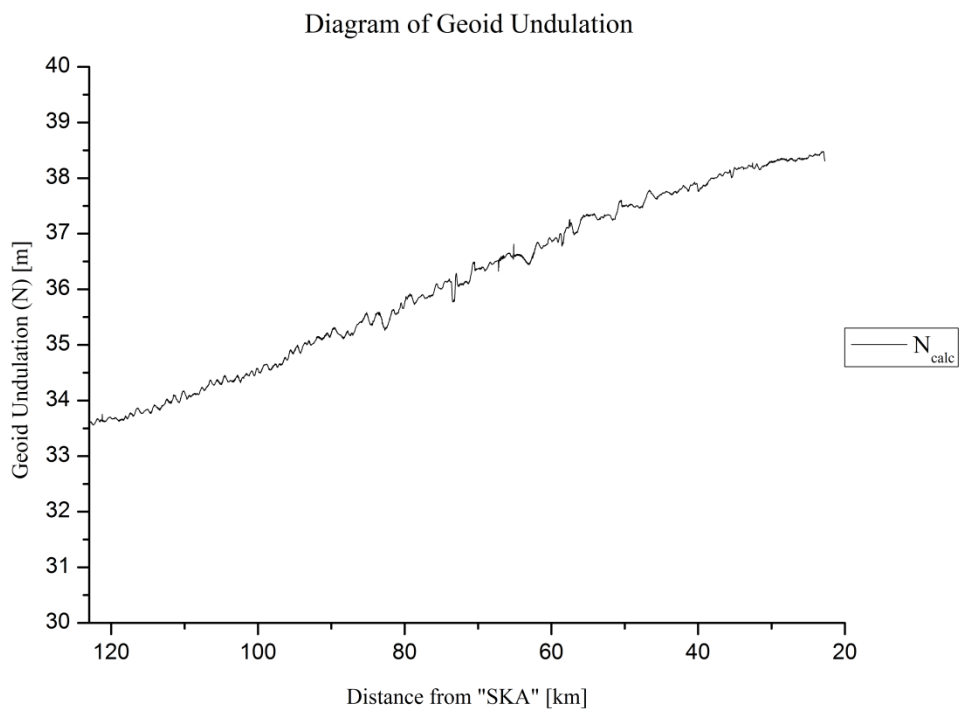


Σχ. Παραρτήματος 1 Οριζοντιογραφία τροχιάς καταγραφής
Appendix Fig. 1 Horizontal alignment of recording trajectory



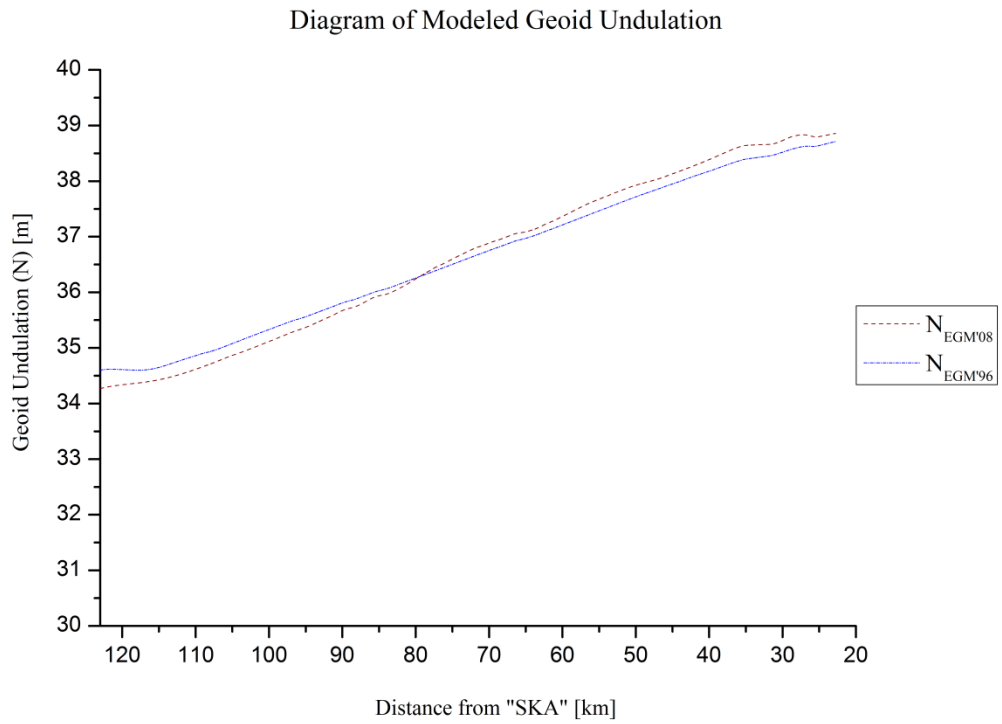
Σχ. Παραρτήματος 2 Σύγκριση γεωμετρικών υψομέτρων από μετρήσεις και ορθομετρικών υψομέτρων από κατασκευαστικά σχέδια

Appendix Fig. 2 Comparison between measured ellipsoidal heights and orthometric heights of as-built drawings

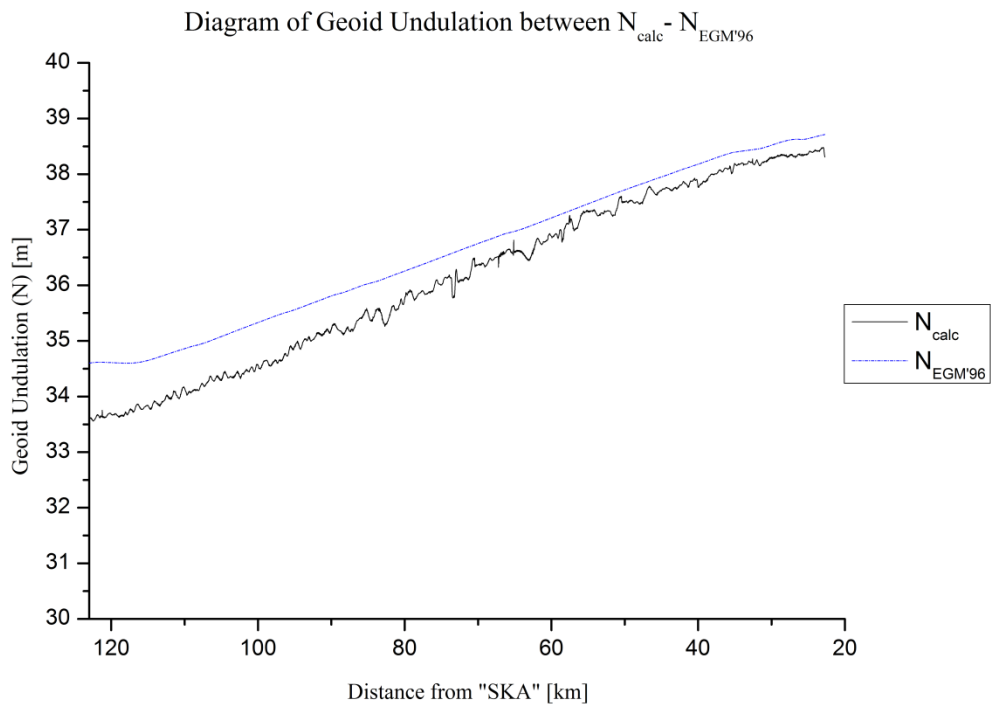


Σχ. Παραρτήματος 3 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς βάση του σημείου καταγραφής

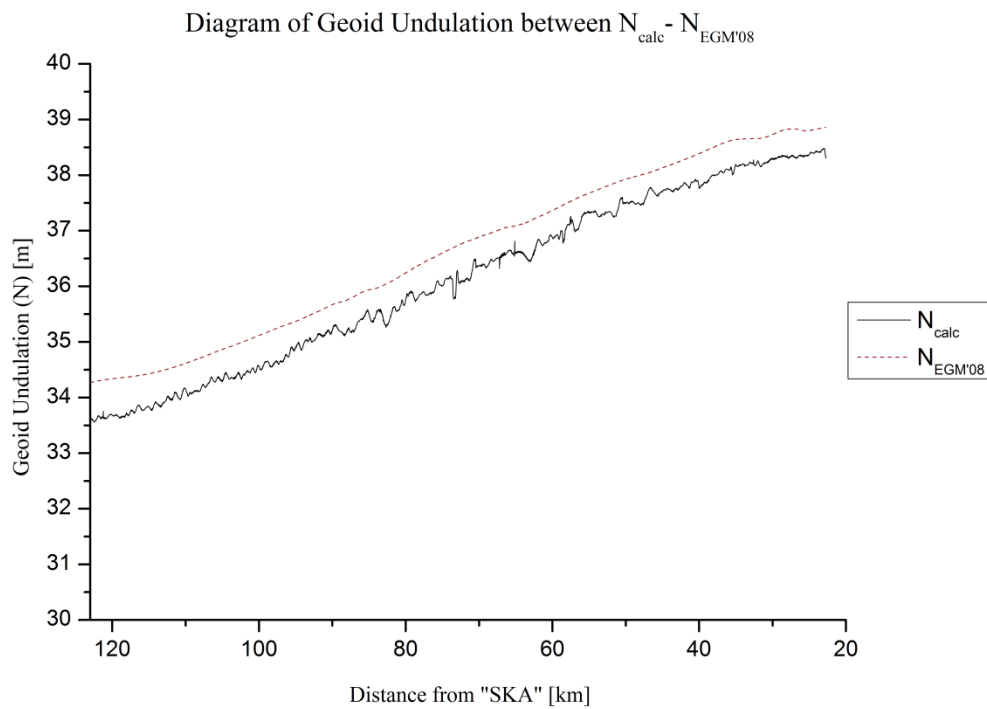
Appendix Fig. 3 Diagram of Geoid Undulation using track survey data



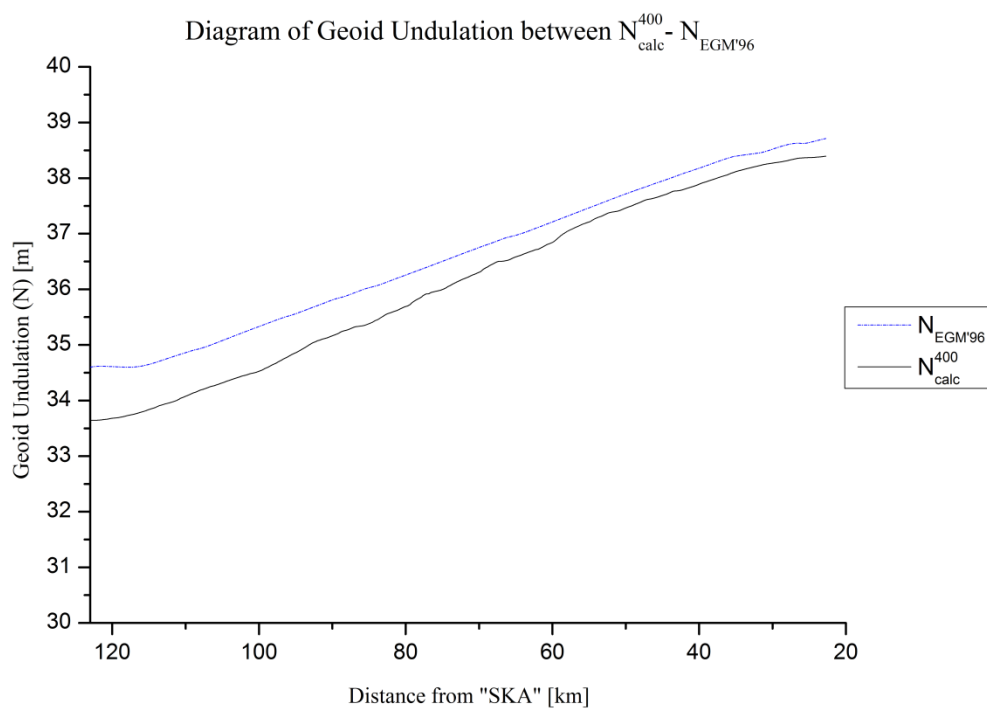
Σχ. Παραρτήματος 4 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μοντέλα EGM'08 και EGM'96
 Appendix Fig. 4 Diagram of Geoid Undulation using EGM'08 and EGM'96 models



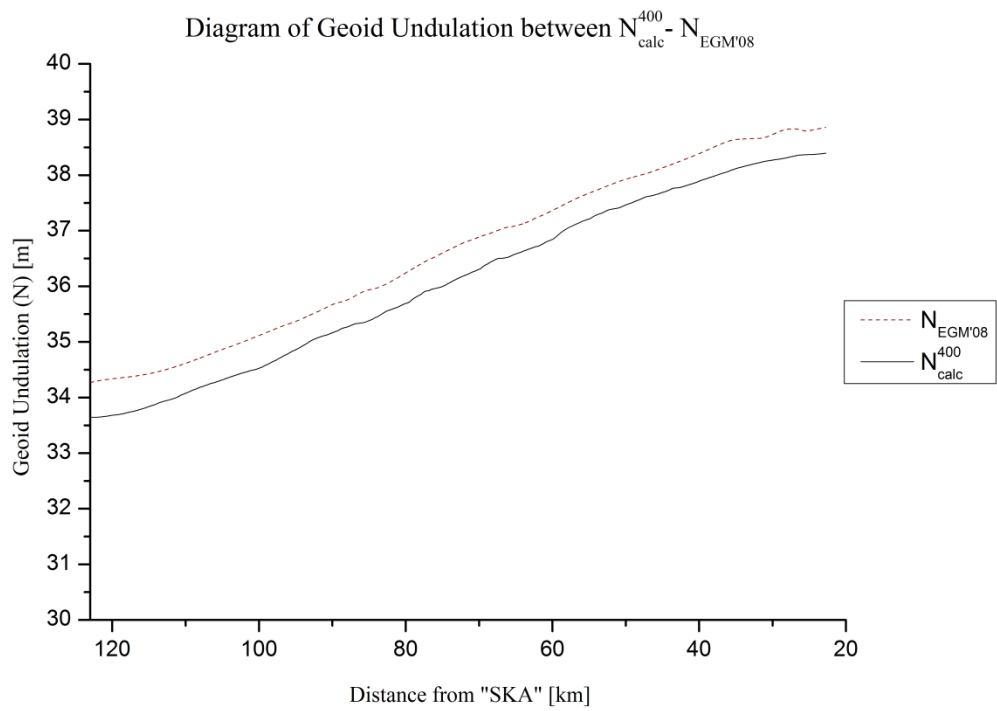
Σχ. Παραρτήματος 5 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'96
 Appendix Fig. 5 Diagram of Geoid Undulation from measurements and EGM'96 geoid model



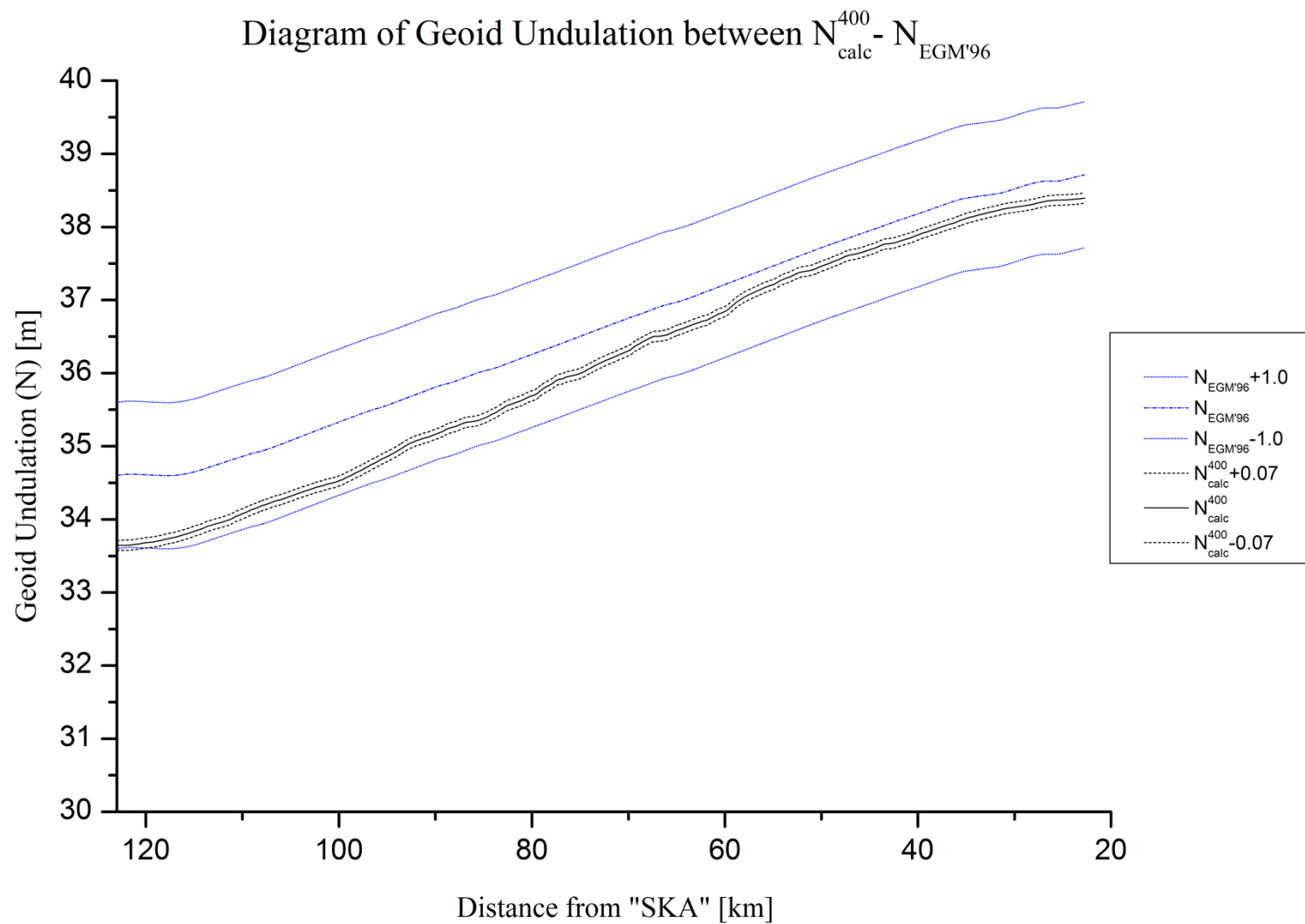
Σχ. Παραρτήματος 6 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'08
 Appendix Fig. 6 Diagram of Geoid Undulation from measurements and EGM'08 geoid model



Σχ. Παραρτήματος 7 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'96
 Appendix Fig. 7 Diagram of Geoid Undulation from smoothed measurements and EGM'96 geoid model

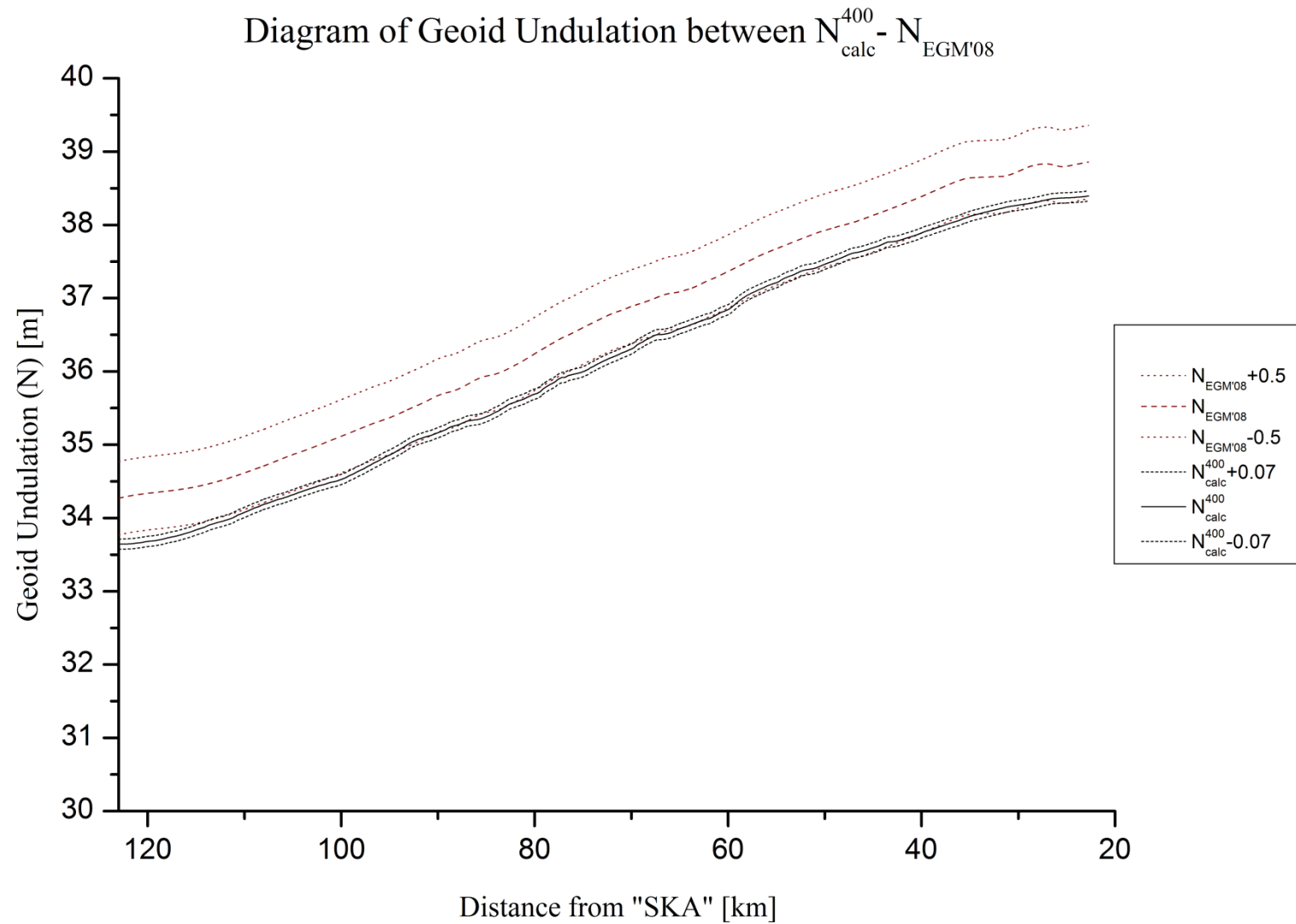


Σχ. Παραρτήματος 8 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'08
 Appendix Fig. 8 Diagram of Geoid Undulation from smoothed measurements and EGM'08 geoid model



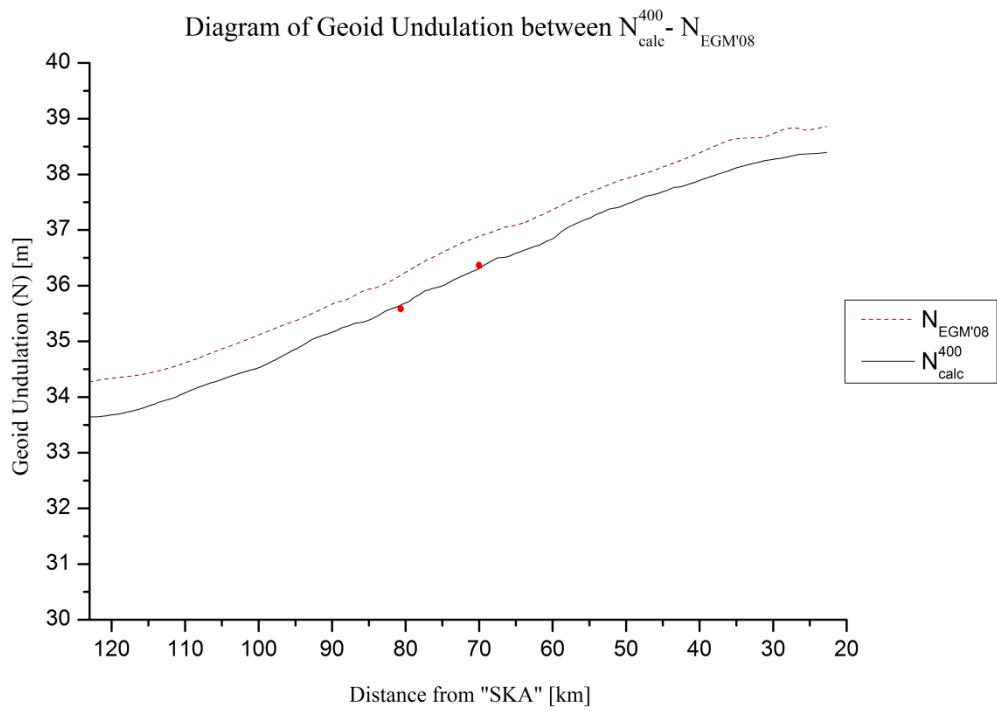
Σχ. Παραρτήματος 9 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς και μεταβλητοτήτων από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'96

Appendix Fig. 9 Diagram of Geoid Undulation and confidence area from smoothed measurements and EGM'96 model [Origin]



Σχ. Παραρτήματος 10 Διάγραμμα αποχής γεωειδούς και μεταβλητοτήτων από ομαλοποιημένες μετρήσεις και το μοντέλο γεωειδούς EGM'08

Appendix Fig. 10 Diagram of Geoid Undulation and confidence area from smoothed measurements and EGM'08 model



Σχ. Παραρτήματος 11 Διάγραμμα σύγκρισης μεταξύ αποχής γεωειδούς από ομαλοποιημένες μετρήσεις, μοντέλο γεωειδούς EGM'08 και σημεία ελέγχου

Appendix Fig. 11 Diagram of comparison among Geoid Undulation from smoothed measurements, EGM'08 geoid model and check points

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

Γ. Βέης – Χ. Μπιλλήρης - Κ. Παπαζήση, (2006), Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Β. Γκίκας, (2007), Ψηφιακή καταγραφή οδικού δικτύου: Διαδικασίες εντοπισμού οχήματος και προσδιορισμός θεματικών στοιχείων, Δ.Π.Μ.Σ. “Γεωπληροφορική” ΕΜΠ, Αθήνα

Δ. Παραδείσης, (2000), Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, ΕΜΠ, Αθήνα

Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς, (2006), GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

Β. Γκίκας, (2005), Στρώση γραμμής συστημάτων LRT: Μία μέθοδος για την προσαρμογή των σιδηροτροχιών στη γεωμετρία της χάραξης και το γεωδαιτικό έλεγχο στρώσης, Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ Ι τεύχ. 2-3

T. Kingston – V. Gikas – C. Laflamme – C. Larouche, (2007), An integrated Mobile Mapping System for Data Acquisition and Automatic Asset Extraction, 5th Int. Mobile Mapping Conference Padova, Italy

V. Gikas – S. Daskalakis, Determining rail track axis geometry using satellite and terrestrial geodetic data, Greece

Hofman – Wellenhof, Legat, Wieser, (2003), Navigation principles of positioning and guidance, Springer Wien New York

Ahmed El-Rabbany, (2006), Introduction to GPS the global Positioning System, Second Edition, Artech House, Boston | London

J C Iliffe, (2003), Datums and map projections for Remote Sensing, GIS and Surveying, Whittles Publishing

Geismar, (2002), VMT 860 PL – Use and maintenance handbook, Geismar, France

C.Laflamme – T. Kingston – R. McCuaig, Automated Mobile Mapping for Asset Managers, “Shaping the changes” XXIII FIG Congress, Germany

G. Pierre-Yves – K. Jeff, Enhanced Navigation System for Road Telematics, 3rd Swiss Transport Research Conference – Conference Paper, Swiss

J. Talaya – E. Bosch – R. Alamus – A. Baron, Geovan: The mobile mapping system from the ICC, Institut Cartografic de Catalunya, Spain