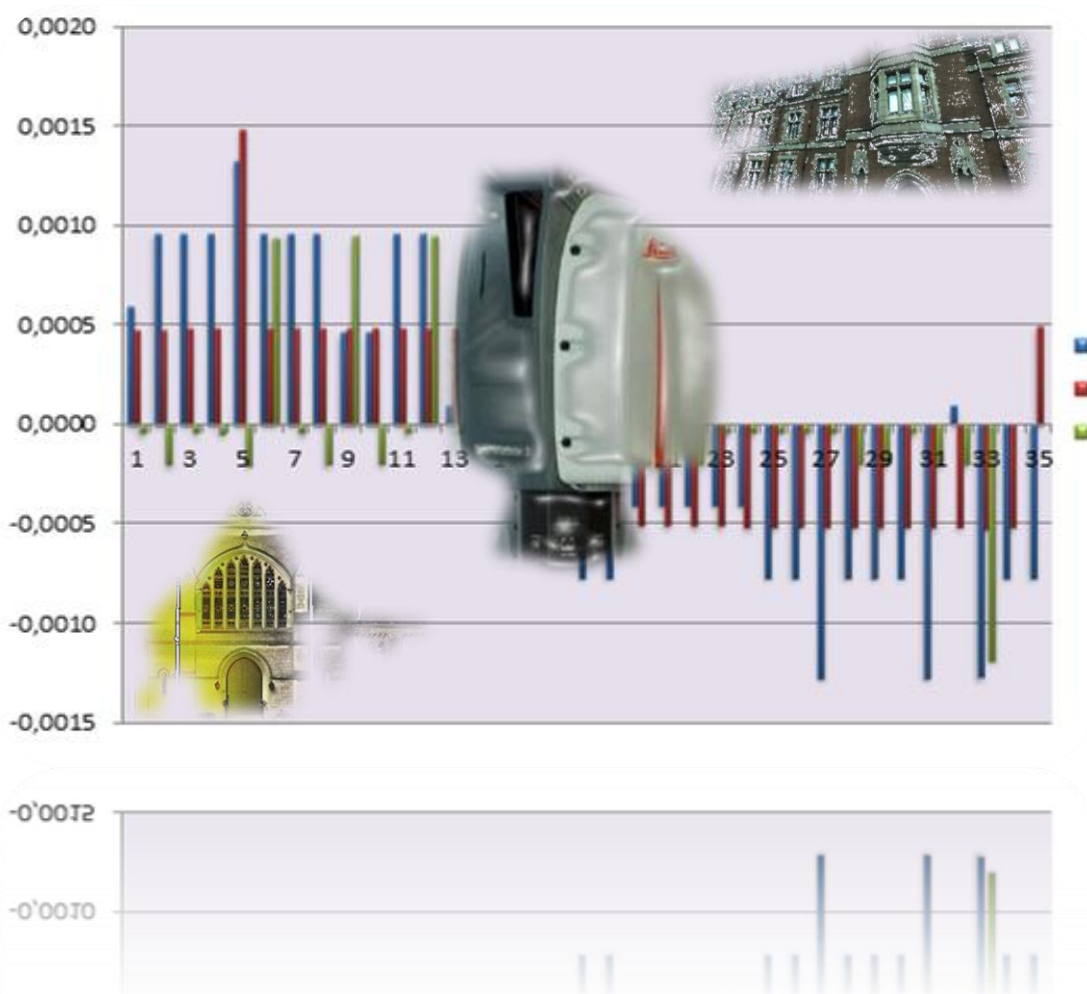




ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ:

ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LASER ΤΥΠΟΥ TOF



Επιβλέπουσα καθηγήτρια:  
Μ. Τσακίρη, Επίκουρη καθηγήτρια της σχολής ΑΤΜ, ΕΜΠ

ΠΑΠΠΑ ΠΑΡΘΕΝΑ  
Α.Μ. 60102120

ΑΘΗΝΑ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά την κ. Μαρία Τσακίρη, Επίκουρη Καθηγήτρια της ΣΑΤΜ για την συνεργασία της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η βοήθεια και οι συμβουλές της ήταν πολύτιμες για τη σωστή διεκπεραίωση της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Βασίλη Παγούνη, Αναπληρωτή Καθηγητή Τ.Ε.Ι. Αθήνας για την βοήθεια και τις υποδείξεις του κατά την συλλογή των δεδομένων. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με την βοήθεια, την συμπαράσταση και την ενθάρρυνση τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης με laser, αποτελεί μια πρόσθετη τεχνική στις εργασίες αποτύπωσης και γενικότερα στις εργασίες που σχετίζονται με τις επιστήμες της γεωδαισίας και της τοπογραφίας. Οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν βελτιώσει πολλές πτυχές των επίγειων σαρωτών laser, π.χ. τον ρυθμό απόκτησης των δεδομένων, την ακρίβεια, το εύρος απόστασης. Δεδομένου ότι τα συστήματα των επίγειων σαρωτών laser εμφανίστηκαν σχετικά πρόσφατα στην αγορά δεν υπάρχει τυποποιημένη διαδικασία διακρίβωσης αυτών των οργάνων, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά γεωδαιτικά όργανα για τα οποία υπάρχει επαρκής γνώση και επίσημα πρότυπα βαθμονόμησης. Επομένως απαιτείται έρευνα για την αξιολόγηση της ποιότητας λειτουργίας των οργάνων και των δεδομένων που συλλέγονται από αυτά.

Τα συστήματα TLS (Terrestrial Laser Scanners) προσφέρουν την δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αποτέλεσμα των σαρώσεων είναι τρισδιάστατες απεικονίσεις αντικειμένων, οι οποίες αποτελούνται από πυκνά καταναμημένα σημεία (X, Y, Z συντεταγμένες). Όπως συμβαίνει με οποιαδήποτε μέθοδο αποτύπωσης, έτσι και στην περίπτωση της αποτύπωσης με laser στα αποτελέσματα των μετρήσεων υπεισέρχονται σφάλματα. Μέχρι σήμερα δεν έχουν οριστεί επαρκώς τα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται με έναν επίγειο σαρωτή laser, με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η τελική ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επομένως απαιτείται η βαθμονόμηση του οργάνου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας μεθοδολογίας βαθμονόμησης ενός σαρωτή laser Time-of-flight - ScanStation 2 της Leica Geosystems. Για τον σκοπό της εργασίας πραγματοποιήθηκαν απλοί μετρολογικοί έλεγχοι σε πεδία ελέγχου. Τα αποτελέσματα έδειξαν σταθερή λειτουργία του συστήματος μέτρησης και σφάλματα εντός των ορίων του κατασκευαστή.

## SYNOPSIS

Terrestrial laser scanning, is a relatively recent technology which offers many advantages in surveying related sciences. However, for these instruments, as opposed to traditional geodetic instruments, there is not available sufficient knowledge on the instrumentation description because of proprietary issues and their calibration depend on the individual manufacturing company. Therefore investigation is needed to assess the quality of instruments operation and the acquired data.

TLS systems (Terrestrial Laser Scanners) offer the possibility of collecting and processing large amounts of data in a short period of time. The results of those scans are three-dimensional representations of objects, which are composed of densely distributed points (X, Y, Z coordinates). As with any surveying technique, so in the case of laser survey the results of measurements usually involve errors. Furthermore, the absence of standards to calibrate these instruments makes it often difficult to compare the accuracy specifications given by the laser scanner producers. Therefore calibration of this instrument is required.

The aim of this thesis is to present a methodology of calibration for a Time-of-flight laser scanner and specifically the scanner ScanStation 2 of Leica Geosystems. For the purpose simplified tests procedures are proposed to check the linear and angular measurements of the specific instrument. The results showed stable operation of the laser scanner and errors within the limits of the manufacturer.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### SYNOPSIS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Τεχνολογία επίγειας σάρωσης με laser.....	1
1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	4
1.3 Δομή της εργασίας.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ .....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Ιστορία της Μετρολογίας .....	6
2.3 Μετρολογικός έλεγχος γεωδαιτικών οργάνων .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΕΠΙΓΕΙΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ LASER.....	15
3.1 Εισαγωγή.....	15
3.2 Γενικά περί επίγειων σαρωτών laser - TLS.....	15
3.2.1 Σύστημα μέτρησης απόστασης και ανακλώμενης ακτινοβολίας .....	16
3.2.2 Σύστημα μέτρησης γωνιών.....	27
3.3 Βαθμονόμηση επίγειου σαρωτή laser.....	31
3.3.1 Σύστημα μέτρησης αποστάσεων .....	31
3.3.2 Σύστημα μέτρησης γωνιών.....	32
3.3.3 Συνένωση και γεωαναφορά στον επίγειο σαρωτή laser .....	33
3.4 Ταξινόμηση σφαλμάτων μέτρησης με επίγειους σαρωτές laser .....	37
3.4.1 Σφάλματα οργάνου μέτρησης .....	39
3.4.2 Σφάλματα αντικειμένου σάρωσης.....	42
3.4.3 Σφάλματα περιβάλλοντος.....	43
3.4.4 Σφάλματα γεωαναφοράς .....	43
3.5 Επίγειος σαρωτής laser ScanStation 2.....	44
3.6 Παραδείγματα βαθμονόμησης επίγειων σαρωτών laser.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ .....	56
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Πειραματική διαδικασία μετρολογικού ελέγχου .....	56
4.2.1 Έλεγχος απόστασης με βάση ελέγχου.....	56
4.2.2 Έλεγχος εσωτερικής ακρίβειας οργάνου με επαναληπτικές μετρήσεις αποστάσεων.....	59
4.2.3 Έλεγχος απόστασης με μέτρηση υψομετρικών διαφορών .....	61

4.2.4 Έλεγχος οριζόντιων διευθύνσεων .....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	67
5.1 Εισαγωγή.....	67
5.2 Επεξεργασία των μετρήσεων .....	67
5.2.1 Μέτρηση απόστασης με βάση ελέγχου .....	67
5.2.2 Έλεγχος εσωτερικής ακρίβειας οργάνου με επαναληπτικές μετρήσεις αποστάσεων.....	73
5.2.3 Έλεγχος απόστασης με μέτρηση υψομετρικών διαφορών .....	85
5.2.4 Έλεγχος οριζόντιων διευθύνσεων .....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	93
6.1 Συμπεράσματα.....	93
6.1.1 Συλλογή δεδομένων .....	94
6.1.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	94
6.2 Προτάσεις.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	101

---

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 3.1: Μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων .....	16
Εικόνα 3.2: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	18
Εικόνα 3.3: Μέθοδος time-of-flight .....	22
Εικόνα 3.4: Μέθοδος διαμόρφωσης παλμού συνεχούς κύματος (AMCW) .....	23
Εικόνα 3.5: Μέθοδος διαμόρφωσης συχνότητας συνεχούς κύματος (FMCW) .....	24
Εικόνα 3.6: Διατάξεις συστήματος μέτρησης γωνιών.....	28
Εικόνα 3.7: Εκτροπή δέσμης laser .....	29
Εικόνα 3.8: Κίνηση κατόπτρων.....	30
Εικόνα 3.9: Λειτουργία ταλαντευόμενου κατόπτρου.....	30
Εικόνα 3.10: Σύστημα συντεταγμένων σαρωτή laser.....	34
Εικόνα 3.11: Άμεση γεωαναφορά .....	36
Εικόνα 3.12: Άξονες σαρωτή laser.....	42
Εικόνα 3.13: Επίγειος σαρωτή laser ScanStation 2.....	44
Εικόνα 3.14: Άξονες περιστροφής .....	45
Εικόνα 3.15: Σύστημα σαρωτή laser .....	46
Εικόνα 3.16: Αποκλίσεις μετρήσεων απόστασης.....	47
Εικόνα 3.17: Πεδίο ελέγχου 1 .....	48
Εικόνα 3.18: Πεδίο ελέγχου 2 .....	49
Εικόνα 3.19: Πεδίο ελέγχου 3 .....	49
Εικόνα 3.20: Πεδίο ελέγχου 4 .....	50
Εικόνα 3.21: Πεδίο ελέγχου 1 .....	51
Εικόνα 3.22: Πεδίο ελέγχου 2 .....	52
Εικόνα 3.23: Πεδίο ελέγχου .....	52
Εικόνα 3.24: Πρότυπη βάση ελέγχου EDM .....	54
Εικόνα 3.25: Πλαίσιο στόχων .....	55
Εικόνα 4.1: Περιοχή εγκατάστασης βάσης ελέγχου.....	57
Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση βάσης ελέγχου.....	58
Εικόνα 4.3: Μετρήσεις αποστάσεων .....	59
Εικόνα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων .....	60
Εικόνα 4.5: Θέση ειδικού στόχου.....	61
Εικόνα 4.6: Περιοχή εγκατάστασης βάσης ελέγχου.....	62
Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων .....	62
Εικόνα 4.8: Διάταξη των στόχων .....	64
Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων .....	65

Εικόνα 5.1: Περιοχή υλοποίησης βάσης ελέγχου.....	68
Εικόνα 5.2: Νέφος σημείων σαρωτή σε σχέση με την απόσταση .....	70
Εικόνα 5.3: Πυκνότητα σημείων – απόσταση από τον σαρωτή.....	70
Εικόνα 5.4: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 62 m.....	74
Εικόνα 5.5: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 40 m.....	74
Εικόνα 5.6: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 20 m.....	75

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Επισκόπηση τεχνικών μέτρησης απόστασης σε σαρωτές laser .....	27
Πίνακας 3.2: Εκτίμηση των σφαλμάτων σε σαρωτές laser .....	42
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα μετρήσεων 1 .....	50
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα μετρήσεων 2 .....	50
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα μετρήσεων 3 .....	51
Πίνακας 3.6: Στοιχεία σαρωτών ελέγχου .....	53
Πίνακας 3.7: Ακρίβεια αποστάσεων.....	53
Πίνακας 3.8: Ακρίβεια γωνιών .....	53
Πίνακας 3.9: Συντεταγμένες στόχων.....	54
Πίνακας 3.10: Αποστάσεις στόχων .....	55
Πίνακας 3.11: Τυπικά σφάλματα μετασχηματισμών .....	55
Πίνακας 4.1: Αποστάσεις οργάνου – στόχου .....	66
Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες κέντρου σφαιρικών στόχων.....	68
Πίνακας 5.2: Αποστάσεις μέτρησης βάσης ελέγχου με τον σαρωτή laser .....	69
Πίνακας 5.3: Αποστάσεις μέτρησης βάσης ελέγχου με τον γεωδαιτικό σταθμό .....	71
Πίνακας 5.4: Διαφορές μετρημένης απόστασης των δύο οργάνων.....	72
Πίνακας 5.5: Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού .....	73
Πίνακας 5.6: Δεδομένα πειράματος .....	75
Πίνακας 5.7: Συντεταγμένες κέντρου σφαίρας.....	76
Πίνακας 5.8: Διαφορές συντεταγμένων κέντρου σφαίρας από μέση τιμή .....	77
Πίνακας 5.9: Στατιστικά συντεταγμένων σφαίρας.....	78
Πίνακας 5.10: Αποστάσεις επαναλαμβανόμενων μετρήσεων.....	79
Πίνακας 5.11: Διαφορές αποστάσεων από την μέση τιμή της απόστασης.....	82
Πίνακας 5.12: Στατιστικά στοιχεία διαφορών.....	83
Πίνακας 5.13: Εσωτερική θερμοκρασία οργάνου .....	84
Πίνακας 5.14: Συντεταγμένες κέντρου στόχων.....	86



Πίνακας 5.15: Αποστάσεις – υψομετρικές διαφορές στόχων.....	88
Πίνακας 5.16: Διαφορές κατακόρυφων αποστάσεων.....	89
Πίνακας 5.17: Στατιστικά στοιχεία διαφορών.....	90
Πίνακας 5.18: Αποστάσεις οργάνου – στόχων.....	91
Πίνακας 5.19: Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων.....	92
Πίνακας 6.1: Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού .....	95
Πίνακας 6.2: Στατιστικά συντεταγμένων σφαίρας.....	95
Πίνακας 6.3: Στατιστικά στοιχεία διαφορών.....	96
Πίνακας 6.4: Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων.....	96

### ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5.1: Διαφορές μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού	72
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα απόστασης 62 μέτρων.....	80
Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα απόστασης 40 μέτρων.....	80
Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα απόστασης 20 μέτρων.....	81
Διάγραμμα 5.5: Διαφορές αποστάσεων από την μέση τιμή της απόστασης.....	83
Διάγραμμα 5.6: Εσωτερική θερμοκρασία οργάνου.....	85
Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα διαφορών της απόστασης μεταξύ των στόχων .....	90

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Τεχνολογία επίγειας σάρωσης με laser

Την τελευταία δεκαετία έχει σημειωθεί μεγάλη εξέλιξη στις τεχνικές της συλλογής και της επεξεργασίας των χωρικών δεδομένων (μεθόδων αποτύπωσης). Μια από αυτές τις εξελίξεις αποτελεί η εμφάνιση της τεχνολογίας της επίγειας σάρωσης με laser (Terrestrial Laser Scanning, TLS). Η τεχνολογία αυτή προσφέρει στους χρήστες την δυνατότητα λεπτομερών τοπογραφικών αποτυπώσεων και την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων του περιβάλλοντος. Τα στοιχεία της αποτύπωσης (σάρωσης) είναι οι τρισδιάστατες συντεταγμένες (X, Y, Z) των αντικειμένων, οι οποίες σχηματίζουν τα «νέφη σημείων».

Η λειτουργία της τεχνολογίας της επίγειας σάρωσης, βασίζεται στην αρχή της εκπομπής και λήψης μια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνα laser). Η απόσταση του σαρωτή από το σημείο της επιφάνειας ενός αντικειμένου προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια, μετρώντας το χρόνο που παρήλθε από την στιγμή της εκπομπής ενός σήματος laser μέχρι την στιγμή της επιστροφής του στον αισθητήρα του οργάνου (μέθοδος time-of-flight, TOF). Οι σαρωτές TOF χρησιμοποιούν τις ακόλουθες μεθόδους - τεχνικές στον προσδιορισμό του χρόνου μετάβασης - επιστροφής μιας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας:

- την άμεση μέθοδο διαφοράς χρόνου, time-of-flight - μέθοδος παλμικών κυμάτων
- την μέθοδο διαφοράς φάσης (Amplitude Modulated Continuous Wave, AMCW)
- την μέθοδο διαφοράς συχνότητας (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)

Η αποτύπωση της επιφάνειας ενός αντικειμένου με την μέθοδο TLS επιτυγχάνεται με την σάρωση του τόσο ως προς την οριζόντια όσο και την κατακόρυφη διεύθυνση, και την καταγραφή μεγάλου πλήθους σημείων ανά δευτερόλεπτο. Η συχνότητα καταγραφής των σημείων είναι συνάρτηση της τεχνικής προσέγγισης και της επιθυμητής διακριτικής ικανότητας (ανάλυση) της σάρωσης. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια τρισδιάστατη απεικόνιση του αντικειμένου, το οποίο αποτελείται από πυκνά κατανεμημένα σημεία. Η απεικόνιση αυτή καλείται «νέφος

σημείων». Για κάθε σημείο καταγράφεται η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και οι τρεις συντεταγμένες X, Y, Z στο σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή.

Η αποτύπωση ενός αντικειμένου μπορεί να γίνει είτε με τον στατικό τρόπο είτε μέσω κίνησης του συστήματος σάρωσης από μια κινούμενη διάταξη – πλατφόρμα. Καθώς πολλά αντικείμενα είναι μεγάλα και πολύπλοκα (βιομηχανικό κέντρο, ιστορικό μνημείο, αρχαιολογικός χώρος κ.λπ.) πολλές φορές απαιτούνται περισσότερες από μία σαρώσεις και σε διαφορετικά σημεία στάσης του οργάνου προκειμένου να καλυφθεί το προς αποτύπωση αντικείμενο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών διαφορετικών νεφών σημείων. Για τη λήψη μιας πλήρους αναπαράστασης του σαρωμένου αντικειμένου, τα νέφη σημείων θα πρέπει αρχικά να μετασχηματιστούν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων (registration), οπότε οι εγγεγραμμένες σαρώσεις συνδυάζονται σε ένα σύνολο δεδομένων και έπειτα το σύνολο αυτό να ενσωματωθεί σε ένα γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο είναι είτε τοπικό είτε κρατικό (georeferencing). Ακολουθεί η μοντελοποίηση και η οπτικοποίηση του αντικειμένου που έχει σαρωθεί.

Τα πλεονεκτήματα της επίγειας σάρωσης με laser, έναντι των παραδοσιακών μεθόδων αποτύπωσης είναι πολλά. Προσφέρει άμεση, ταχεία και λεπτομερή τρισδιάστατη απόδοση του αντικειμένου σάρωσης. Δίνει τη δυνατότητα αποτύπωσης αντικειμένων και περιοχών τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το σημείο στάσης του οργάνου, γεγονός που εξυπηρετεί την αποτύπωση δυσπρόσιτων περιοχών. Μειώνει το κόστος και τον χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών της αποτύπωσης. Επίσης προσφέρει ολοκληρωμένη και πλήρη αποτύπωση. Το όργανο αυτό σαρώνει οποιαδήποτε επιφάνεια συναντήσει η δέσμη laser, ενώ μπορεί να λειτουργήσει και σε συνθήκες ελάχιστου φωτισμού για την απόκτηση των δεδομένων.

Σήμερα η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser μεγάλου βεληνεκούς αποτελεί την πλέον υποσχόμενη μέθοδο σε εργασίες αποτύπωσης του περιβάλλοντος.

Μερικές εφαρμογές του TLS είναι οι παρακάτω:

- Αποτύπωση της γεωμετρίας πολύπλοκων κατασκευών
- Παρακολούθηση των παραμορφώσεων κατασκευών

- Έρευνες σηράγγων και σιδηροδρομικών γραμμών για έλεγχο ή αναγνώριση ζημιών
- Παρακολούθηση της σταθερότητας του εδάφους και γεωτεχνική, γεωλογική χαρτογράφηση κ.λπ.

Όπως συμβαίνει με οποιαδήποτε μέθοδο αποτύπωσης, έτσι και στην μέθοδο της επίγειας σάρωσης με laser τα αποτελέσματα επηρεάζονται από σφάλματα τα οποία προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Ο προσδιορισμός αυτών των σφαλμάτων είναι απαραίτητος προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται. Η τεχνική της επίγειας σάρωσης είναι μια καινούργια μέθοδος αποτύπωσης. Μέχρι σήμερα δεν έχουν οριστεί επαρκώς τα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν τις μετρήσεις που προέρχονται από τη μέθοδο αυτή, με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η τελική ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Μια κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων είναι η ακόλουθη:

- σφάλματα οργάνου μέτρησης
- σφάλματα αντικείμενου
- σφάλματα περιβάλλοντος
- σφάλματα γεωαναφοράς

Η ακρίβεια αποτύπωσης του επίγειου σαρωτή laser επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα σφάλματα του οργάνου μέτρησης. Τα σφάλματα αυτά έχουν τυχαίες και συστηματικές επιδράσεις στις μετρήσεις. Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται κυρίως στον τρόπο σχεδιασμού του οργάνου και αξίζουν ιδιαίτερα μεγάλης προσοχής, διότι οι σαρωτές laser, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές συσκευές αποτύπωσης, δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν και να ρυθμιστούν από τον χρήστη ακολουθώντας τυποποιημένες διαδικασίες. Επομένως η αναγκαιότητα της βαθμονόμησης των επιγείων σαρωτών laser είναι μεγάλη.

Βαθμονόμηση (Calibration) είναι η αναγραφή, στην κενή κλίμακα του οργάνου, των ενδείξεων με βάση ένα γνωστό και καθορισμένης ακρίβειας μέγεθος της φυσικής ιδιότητας την οποία μετρά το όργανο (Μπαλοδήμος & Σταθάς, 2006). Η βαθμονόμηση προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα των προτύπων. Τυποποιημένες ρουτίνες βαθμονόμησης υπάρχουν για τα παραδοσιακά γεωδαιτικά όργανα. Στην περίπτωση των σαρωτών laser τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα. Τα όργανα αυτά

κατασκευάζονται με τρόπο εντελώς διαφορετικό από ότι τα παραδοσιακά. Ενώ λόγω μικρής και μη μαζικής παραγωγής χρησιμοποιούνται για αυτά διαφορετικά κριτήρια ακρίβειας και ορθότητας από τους κατασκευαστές τους, με αποτέλεσμα η ακρίβεια να διαφοροποιείται στα συστήματα και να εξαρτάται από τον συγκεκριμένο έλεγχο που έχει υποστεί το κάθε όργανο.

## 1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται ο προσδιορισμός μιας τυποποιημένης μεθοδολογίας βαθμονόμησης. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρολογικοί έλεγχοι, οι οποίοι περιλαμβάνουν πειραματικές μετρήσεις, για τον καθορισμό της ακρίβειας του οργάνου στην μέτρηση των αποστάσεων. Ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων και ο στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι οι εξής:

- διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε υλοποιημένα πεδία ελέγχου με χρήση επίγειου σαρωτή laser
- επεξεργασία των μετρήσεων με χρήση κατάλληλων λογισμικών
- σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με διακριβωμένο γεωδαιτικό όργανο (Total Station)
- στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων

## 1.3 Δομή της εργασίας

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις βασικές έννοιες της μετρολογίας. Ορίζεται η έννοια της μετρολογίας και περιγράφονται ιστορικά στοιχεία σχετικά με την πορεία της στην διάρκεια του χρόνου. Επίσης περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης και τα βασικά πρότυπα που ισχύουν σήμερα για τα παραδοσιακά γεωδαιτικά όργανα μέτρησης.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα γενικά στοιχεία περί σαρωτών laser (βασικές έννοιες, σύστημα μέτρησης, ταξινόμηση σφαλμάτων). Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του σαρωτή laser που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις και κάποιες προσπάθειες διακρίβωσης του οργάνου που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις πειραματικές μετρήσεις και διατάξεις που πραγματοποιήθηκαν. Περιγράφονται τα πεδία ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν κατά

την συλλογή των δεδομένων και η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια των σαρώσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Τέλος το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων. Επίσης δίνονται προτάσεις για την συνέχιση της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Η μετρολογία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η «επιστήμη της μέτρησης». Γίνεται αναφορά σε αυτή προκειμένου να καθοριστεί αντικειμενικά η τιμή κάποιας ποσότητας όπως είναι αυτή του μήκους, του βάρους ή του χρόνου (<http://www.eim.gr>). Όσον αφορά την επιστήμη της γεωδαισίας, η μετρολογία αφορά τους ελέγχους που πρέπει να γίνουν στα γεωδαιτικά όργανα που χρησιμοποιούνται κατά την συλλογή των δεδομένων, τα οποία θα πρέπει να είναι ελεγμένα ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους και την ποιότητα των μετρήσεων (Μπαλοδήμος & Σταθάς, 2006).

Οι έλεγχοι αυτοί ακολουθούν ορισμένες διεθνείς προδιαγραφές για τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να γίνονται χωρίς να αποκλείεται και η περίπτωση να εφαρμόζονται και άλλου είδους έλεγχοι.

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει δύο υποενότητες. Η πρώτη αφορά στην επιστήμη της μετρολογίας. Δίνεται ο ορισμός της έννοιας αυτής, και αναφέρονται ιστορικά στοιχεία που σχετίζονται με την πορεία της, πορεία της ανάπτυξης των διαφόρων προτύπων βαθμονόμησης δεκαετίες πριν μέχρι και σήμερα. Η δεύτερη υποενότητα αναφέρεται στη διαδικασία της βαθμονόμησης και τους βασικούς ελέγχους που πραγματοποιούνται κατά τον έλεγχο των γεωδαιτικών – τοπογραφικών οργάνων συλλογής δεδομένων.

### 2.2 Ιστορία της Μετρολογίας

Μετρολογία - Metrology - είναι η επιστήμη των μετρήσεων, των συστημάτων μέτρων και σταθμών. Η Μετρολογία περιλαμβάνει όλες τις θεωρητικές και πρακτικές πτυχές της μέτρησης, που σχετίζονται με την αβεβαιότητα, σε οποιοδήποτε επίπεδο της επιστήμης και της τεχνολογίας. Ο όρος προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «μέτρον» και «λόγος». Στην αρχαία ελληνική ο όρος μετρολογία σήμαινε «θεωρία των αναλογιών» (<http://en.wikipedia.org/wiki/Metrology>).

Σκοπός της είναι (Αθανασιάδης, 2006):

- Η δημιουργία γενικής θεωρίας μετρήσεων

- Η θέσπιση μονάδων φυσικών μεγεθών που να είναι διεθνώς αποδεκτές
- Η επεξεργασία επιστημονικών μεθόδων διασφάλισης της ενότητας και ομοιογένειας των μετρήσεων μέσω μιας αδιάσπαστης αλυσίδας μετρήσεων, όπου σε κάθε στάδιο - κρίκο η μετρητική αβεβαιότητα καταγράφεται
- Η δημιουργία προτύπων και μετρητικών μέσων και ο έλεγχος αυτών

Η μετρολογία βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη από την αρχαιότητα. Η ιστορία της αποτελείται από σημαντικά ορόσημα, τα οποία είναι δύσκολο να ορισθούν και ταυτόχρονα να εκφράσουν αντιπροσωπευτικά όλους τους τομείς που καλύπτει η επιστήμη της μετρολογίας.

Όπως είναι κατανοητό από την αρχαιότητα μέχρι τη σύγχρονη εποχή έχουν κάνει την εμφάνιση τους σε διάφορες περιοχές, αρκετά διαφορετικά πρότυπα, τα οποία εξυπηρετούσαν κατά καιρούς τις ανάγκες και τους σκοπούς της εκάστοτε περιοχής και πολιτισμού. Ορισμένα από αυτά, τα οποία αποτέλεσαν την βάση για την εξέλιξη της επιστήμης της μετρολογίας, διασώζονται μέχρι και σήμερα (Δούκας, 2005).

Τα πρώτα μέτρα και σταθμά κάνουν την εμφάνιση τους περίπου το 3000 π.Χ. από τους Σουμέριους. Το αρχαιότερο διατηρημένο πρότυπο μήκους είναι το πόδι ενός αγάλματος, του Gudea, ο οποίος ήταν ο κυβερνήτης της πόλης Lagash της Μεσοποταμίας από το 4000 π.Χ. έως το 3000 π.Χ. Το 2575 π.Χ. στην Αρχαία Αίγυπτο, χρησιμοποιείται ο Αιγυπτιακός Βασιλικός πήχης ο οποίος ισούται με το μήκος από τον αγκώνα μέχρι το μεσαίο δάκτυλο του εκάστοτε κυβερνώντος Φαραώ.

Στην Ελλάδα μια βασική μονάδα μέτρησης, με την ονομασία «πους», εμφανίζεται κατά την διάρκεια των εργασιών κατασκευής του Παρθενώνα, και αποτελεί μια κατασκευή μεγίστου μετρολογικού ενδιαφέροντος. Το μέγεθος της μονάδας αυτής δεν ήταν σταθερό, αλλά εξαρτιόταν από το σημείο όπου γινόταν η μέτρηση στο Εκατόμπεδο του Παρθενώνος.

Από τον 17<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, γίνονται προσπάθειες για την προτυποποίηση των μονάδων και την εισαγωγή ενός ενιαίου συστήματος μονάδων μέτρησης. Έτσι το 1215 μ.Χ. ο βασιλιάς της Αγγλίας Ιωάννης, υπέγραψε τη Magna Carta, στα λατινικά «Μεγάλο Χαρτί», ένα έγγραφο που εισήγαγε το ενιαίο σύστημα μετρήσεων.



Το 1780 με την έναρξη της Βιομηχανικής Επανάστασης, δημιουργείται μια νέα κατάσταση, η οποία είναι κατάλληλη για την εξέλιξη της Μετρολογίας. Έτσι δημιουργήθηκε ένα «Διεθνές Σύστημα Μέτρων και Σταθμών» με την ονομασία «Μετρικό Σύστημα». Η πρώτη μονάδα του που ορίστηκε ήταν αυτή του «μέτρου» ως μονάδα μήκους, γεγονός που συντέλεσε και στην ονομασία του συστήματος. Χαρακτηριστικό αποτελεί ότι πλέον η μονάδα του μέτρου δεν έχει κανένα ανθρωπομετρικό χαρακτήρα.

Στην συνέχεια, το 1875 μ.Χ. ιδρύεται, λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερη ακρίβεια, το Διεθνές Γραφείο Βαρών και Μετρήσεων, International Bureau for Weights and Measures - BIMP, όπου καθιερώνει το Μετρικό σύστημα - Metric System.

Αρκετά χρόνια αργότερα, το Φεβρουάριο του 1947, ιδρύεται ο Διεθνής Οργανισμός για την Τυποποίηση, International Organization for Standardization – ISO, μια διεθνής οργάνωση δημιουργίας και έκδοσης προτύπων. Ο οργανισμός παράγει τα παγκόσμια βιομηχανικά και εμπορικά πρότυπα, τα επονομαζόμενα πρότυπα ISO. Για περισσότερες πληροφορίες, μπορεί κανείς να επισκεφτεί την επίσημη ιστοσελίδα του οργανισμού, <http://www.iso.org/>.

Το 1955 ιδρύεται μια διακυβερνητική οργάνωση που στοχεύει στην προώθηση της σφαιρικής εναρμόνισης των νομικών διαδικασιών Μετρολογίας, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Νομικής Μετρολογίας, International Organization of Legal Metrology - OIML (<http://www.oiml.org/>).

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1960, υιοθετείται κατά την 11η Γενική Διάσκεψη Μέτρων και Σταθμών, General Conference on Weights and Measures - CGPM, το Διεθνές Σύστημα Μονάδων, Systeme international d'unités - SI. Αποτελεί ένα δεκαδικό σύστημα έκφρασης συμβατικών μονάδων μέτρησης φυσικών μεγεθών μέτρων και σταθμών.

Στις 23 Σεπτεμβρίου 1987, στη Μαδρίτη, ιδρύεται η European Collaboration in Measurement Standards - EUROMET. Ενώ την δεκαετία του 1990, στις Βρυξέλλες ιδρύεται η European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories - EUROLAB. Σκοπός της δεύτερης είναι η αντιπροσώπευση των ευρωπαϊκών εργαστηρίων μέσω της διατύπωσης και της

έκφρασης άποψης σχετικά με πολιτικά και τεχνικά ζητήματα που ασκούν άμεση επίδραση στη δραστηριότητά τους στην ευρωπαϊκή σκηνή και παγκοσμίως, καθώς και ο συντονισμός όλων των ευρωπαϊκών οργανώσεων που αναπτύσσουν ενδιαφέρουσες για την εργαστηριακή κοινότητα δραστηριότητες και προσπαθούν να αποφύγουν την επανάληψη προσπαθειών και δραστηριοτήτων.

Μερικά χρόνια αργότερα, το 1999, καθορίζονται οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένα εργαστήριο Μετρολογίας με την εμφάνισή του προτύπου ISO/IEC 17025:1999, Διεθνές πρότυπο, General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories. Το ISO/IEC 17025:1999 αποτελεί το βασικό πρότυπο δοκιμών και διακριβώσεων ενός εργαστηρίου. Έτσι θα έχει την ικανότητα να διεξάγει συγκεκριμένους ελέγχους, δοκιμές, μετρήσεις και διακριβώσεις σύμφωνα με συγκεκριμένες πρότυπες, ενδοεργαστηριακές μεθόδους.

Στην 21η γενική συνέλευση της EUROMET στο Teddington της Μ. Βρετανίας, αποφασίστηκε η δημιουργία μιας νέας ευρωπαϊκής οργάνωσης μετρολογίας που θα διαδεχόταν την παλιά και θα αναλάμβανε όλες τις δραστηριότητες και ευθύνες του παλιού φορέα. Έτσι, δημιουργήθηκε η European Association of National Metrology Institutes – EURAMET, η οποία άρχισε να δραστηριοποιείται από τον Ιούλιο του 2007.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η μετρολογία ως επιστήμη της μέτρησης υποδιαιρείται σε τρεις κατηγορίες με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και αβεβαιότητας μέτρησης, στην Επιστημονική - Θεωρητική Μετρολογία, στην Εφαρμοσμένη - Βιομηχανική Μετρολογία και στη Νομική Μετρολογία (Αθανασιάδης, 2006):

#### *1. Επιστημονική ή θεωρητική μετρολογία*

Η *Επιστημονική Μετρολογία*, έχει να κάνει με την οργάνωση και ανάπτυξη των προτύπων μέτρησης μαζί με την υποστήριξή τους σε ύψιστο επίπεδο. Η *Θεωρητική (βασική) Μετρολογία* δεν έχει διεθνή ορισμό, όμως σηματοδοτεί το ύψιστο επίπεδο για την αβεβαιότητα μέτρησης μέσα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο. Η Θεωρητική Μετρολογία μπορεί επίσης, να περιγραφεί ως η Επιστημονική Μετρολογία εμπλουτισμένη με όλα εκείνα τα μέρη της Νομικής και Βιομηχανικής Μετρολογίας που απαιτούν επιστημονική επάρκεια.

### 2. Εφαρμοσμένη ή βιομηχανική μετρολογία

Η Βιομηχανική Μετρολογία εξασφαλίζει την επαρκή λειτουργία των μετρητικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, καθώς επίσης και στις διαδικασίες ελέγχου και παραγωγής. Εξετάζει τα ερωτήματα της πρακτικής εφαρμογής των θεωρητικών ερευνών (Θεωρητικής Μετρολογίας) σε διάφορα πεδία των επιστημονικών δραστηριοτήτων.

### 3. Νομική μετρολογία

Η Νομική Μετρολογία εμπλέκεται με τις μετρήσεις και την αβεβαιότητα των μετρήσεων όπου αυτές έχουν επίδραση στη διαφάνεια οικονομικών συναλλαγών, στην υγεία και την ασφάλεια.

Η επιστήμη της Μετρολογίας στην Ελλάδα, άρχισε να δραστηριοποιείται επίσημα το 1993, μετά την ενοποίηση της Ευρωπαϊκής Αγοράς.

Εθνικό Φορέα Μετρολογίας της χώρας και επίσημο Σύμβουλο της Ελληνικής Πολιτείας σε θέματα μετρολογίας και μετρήσεων αποτελεί το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας - ΕΙΜ, το οποίο διασφαλίζει τη λειτουργία του μετρολογικού συστήματος.

Οι βασικές αρμοδιότητες του Εθνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας - ΕΙΜ, σύμφωνα με την Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων, ([www.hellaslab.gr](http://www.hellaslab.gr)), είναι οι εξής:

- Η υλοποίηση των βασικών και παράγωγων μονάδων μέτρησης του διεθνούς συστήματος μονάδων (SI) με την τήρηση των αντίστοιχων προτύπων και διατάξεων
- Η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών μέτρησης
- Η υποστήριξη του εθνικού μετρολογικού συστήματος της χώρας
- Η λειτουργία εργαστηρίων διακρίβωσης και η έκδοση πιστοποιητικών διακρίβωσης
- Η διενέργεια δοκιμών σε μετρητικές διατάξεις για την απόκτηση έγκρισης τύπου από τον αρμόδιο φορέα της Πολιτείας
- Η διάδοση της μετρολογίας και της μετρολογικής γνώσης
- Η ανάπτυξη και διάθεση υλικών αναφοράς
- Η εκπροσώπηση της χώρας στους διεθνείς οργανισμούς μετρολογίας

Το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας συνεργάζεται με το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης Α.Ε. - ΕΣΥΔ, σε θέματα που αφορούν τις μεθόδους διακρίβωσης και τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων.

Επίσης υπάρχει και ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, ο οποίος έχει την ευθύνη για την προαγωγή και εφαρμογή της τυποποίησης και των δραστηριοτήτων που είναι συναφείς και απορρέουν από αυτή. Με βάση το ΦΕΚ 708/Β 13-07-98, ο ΕΛΟΤ εφαρμόζει διαδικασίες και συστήματα πιστοποίησης (π.χ. του Διεθνούς Οργανισμού ISO).

Ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης - ΕΛΟΤ, μαζί με το Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης - ΕΣΥΔ, και το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας - ΕΙΜ, αποτελούν τη βασική υποδομή ποιότητας στην Ελλάδα. Ο κύριος ρόλος του ΕΛΟΤ ως φορέας τυποποίησης είναι η έκδοση σχετικών προτύπων και προδιαγραφών που αφορούν την παραγωγή και έλεγχο προϊόντων και υλικών. Το ΕΣΥΔ είναι ο φορέας που παρέχει διαπίστευση σε φορείς πιστοποίησης και εργαστήρια διακριβώσεων και δοκιμών. Ενώ το ΕΙΜ είναι ο ανώτατος φορέας του κράτους σε θέματα μετρολογίας, διατηρώντας και αναπτύσσοντας τα εθνικά πρότυπα των μονάδων των φυσικών μεγεθών μέτρησης και είναι ο αντιπρόσωπος της χώρας στους διεθνείς οργανισμούς μετρολογίας (Αθανασιάδης, 2006).

Σύμφωνα με υπουργική απόφαση, ΦΕΚ 1013 Β/2-8-01, σε ότι αφορά τον μετρητικό εξοπλισμό, περιλαμβανομένου και του μη εργαστηριακού εξοπλισμού θα πρέπει:

- να καταγράφεται το πρόγραμμα ποιότητας έργου
- να τεκμηριώνεται ότι καλύπτει όλους τους ελέγχους και τις δοκιμές που προβλέπεται να γίνουν στο έργο (και που δεν θα εκτελεστούν από εξωτερικούς φορείς, π.χ. εργαστήρια)
- να συντηρείται και να διακριβώνεται
- να διακριβώνεται με βάση κοινά αποδεκτές διαδικασίες
- να διακριβώνεται είτε από τον ανάδοχο είτε από εξωτερικούς φορείς, ενώ η χρήση μη διακριβωμένων οργάνων δεν επιτρέπεται

Στο Παράρτημα (Παράρτημα Α), ακολουθούν βασικές έννοιες οι οποίες αναφέρονται στο θέμα της επιστήμης της Μετρολογίας στην Ελλάδα.

### 2.3 Μετρολογικός έλεγχος γεωδαιτικών οργάνων

Η γεωδαισία και η τοπογραφία είναι επιστήμες με απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας, λόγω του αντικειμένου με το οποίο ασχολούνται, το οποίο επιβάλλει την ανάγκη για χρήση οργάνων με εξασφαλισμένη ποιότητα. Αυτή η ανάγκη οδήγησε στην δημιουργία ορισμένων διεθνών πρότυπων. Τα πρότυπα αυτά ορίζονται με συγκεκριμένη διαδικασία (βλ. Παράρτημα Β). Τα πρότυπα αυτά δεν αφορούν μόνο το αντικείμενο της τοπογραφίας και υπήρχαν πολύ πριν χρησιμοποιηθούν από αυτή.

Κύριος στόχος των προτύπων είναι ο καθορισμός των διαδικασιών και των προδιαγραφών που πρέπει να ακολουθούνται στις μετρήσεις, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια με τα όργανα που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, ενώ ο έλεγχος τους πραγματοποιείται από διεθνείς οργανισμούς, ISO / DIN.

Οι προδιαγραφές αυτές καθιερώνονται με μια διαδικασία, η οποία είναι γνωστή ως *τυποποίηση*. Οι εταιρείες παραγωγής τοπογραφικών οργάνων, είναι υποχρεωμένες να εξασφαλίζουν την ποιότητα των οργάνων τους ακολουθώντας τις διεθνείς προδιαγραφές που επιβάλλονται. Αυτό συνεπάγεται την πραγματοποίηση ελέγχων βασισμένων στις προδιαγραφές αυτές σε μεγέθη όπως μήκη, γωνίες και υψομετρικές διαφορές. Οι έλεγχοι ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιούνται από αυτά, εξασφαλίζουν τον εντοπισμό των συστηματικών τους σφαλμάτων και την απομάκρυνση αυτών από τα εξαγόμενα στοιχεία.

Η διαδικασία αυτή με τη οποία επιτυγχάνεται η ρύθμιση των οργάνων ονομάζεται *βαθμονόμηση*.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν θεσμοθετηθεί πρότυπα για νέα όργανα, ενώ γίνονται προσπάθειες από την Διεθνή Ένωση Τοπογράφων, International Federation of Surveyors - FIG, και ειδικότερα από την Επιτροπή 5, Commission 5 - Positioning and Measurement, μέσω συνεργασίας με τις επιτροπές του ISO, ορισμού νέων προτύπων που εναρμονίζονται και ικανοποιούν τις συνεχείς απαιτήσεις και εξελίξεις (<http://www.fig.net/commission5/index.htm>).

Υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που ακολουθούνται κατά τον έλεγχο των γεωμετρικών παραμέτρων (οριζόντιες αποστάσεις, οριζόντιες γωνίες, κατακόρυφες γωνίες) που συλλέγονται με την βοήθεια των γεωδαιτικών οργάνων, όπως των

ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών - Total Stations, και ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μηκών - EDM, σύμφωνα με τα Διεθνή Πρότυπα. Τα συγκεκριμένα όργανα, είναι όργανα που παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με έναν επίγειο σαρωτή laser.

Τα Διεθνή πρότυπα ISO, που ισχύουν σήμερα και έχουν σχέση με τα γεωδαιτικά όργανα είναι τα ISO 17123. Υπεύθυνη για την δημιουργία αυτών είναι η ISO επιτροπή TC172/SC6 (Slaboch, 1998). Τα πρότυπα αυτά είναι μεταγενέστερα των γερμανικών προτύπων DIN 17823. Ορισμένα από αυτά είναι:

ISO 17123-1:2002: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 1: Theory

ISO 17123-3:2001: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 3: Theodolites

ISO 17123-4:2001: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)

ISO 17123-7:2005: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 7: Optical plumbing instruments

DIN 18718, Publication date: 1986-01: Types and elements of geodetic instruments – Terms

DIN 18723-5, Publication date: 1990-07: Field procedure for precision testing of surveying instruments, plumbing instruments

DIN 18723-6, Publication date: 1990-07: Field procedure for precision testing of surveying instruments, electro-optical distance measuring instruments for short ranges

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση ενός επίγειου σαρωτή laser. Λόγω του τρόπου λειτουργίας του, το συγκεκριμένο όργανο δεν χρησιμοποιεί την αρχή μέτρησης της διαφοράς φάσης σε αντίθεση με τα γεωδαιτικά όργανα που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν θα πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι όπως περιγράφονται από τα διεθνή πρότυπα ISO και αφορούν στην βαθμονόμηση των οργάνων αυτών.

Λόγω έλλειψης τυποποιημένων προδιαγραφών βαθμονόμησης για το συγκεκριμένο όργανο, μέσω πειραματικών μετρήσεων και επεξεργασίας των δεδομένων που θα

προκύψουν από αυτές θα εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια και την αξιοπιστία του (μετρολογικός έλεγχος).

Οι έλεγχοι που θα πραγματοποιηθούν για τον προσδιορισμό της ακρίβειας, αφορούν κυρίως τα μήκη. Οι μετρήσεις που χρειάζονται για τους ελέγχους αυτούς μπορούν να πραγματοποιηθούν με οποιαδήποτε όργανο, ενώ θα δημιουργηθούν στην ύπαιθρο κατάλληλα πεδία ελέγχου. Σε αυτούς τους ελέγχους παράλληλα με τις σαρώσεις θα πραγματοποιείται και συχνός έλεγχος των ατμοσφαιρικών – καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία), προκειμένου να εξετασθεί αν οι μεταβολές αυτών επηρεάζουν τις μετρήσεις. Ο έλεγχος αυτός θα εξασφαλίσει, εφόσον κριθεί απαραίτητο, αξιόπιστες ατμοσφαιρικές διορθώσεις.

Ευνοϊκές καιρικές συνθήκες εγγύαται ένας συννεφιασμένος ουρανός, ενώ οι έλεγχοι που εκτελούνται σε εργαστήρια παρέχουν αποτελέσματα τα οποία είναι σχεδόν ανεπηρέαστα από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Ακολουθεί η περιγραφή των ελέγχων και πειραματικών διατάξεων προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο μετρολογικός έλεγχος του οργάνου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΕΠΙΓΕΙΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ LASER

### 3.1 Εισαγωγή

Η γεωδαισία και η τοπογραφία είναι επιστήμες που έχουν ως αντικείμενο τον προσδιορισμό σημείων της επιφάνειας της γης και την αποτύπωση του περιβάλλοντος (<http://el.wikipedia.org/>). Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση συσκευών, γεωδαιτικών οργάνων, οι οποίες είναι κατάλληλες για την εκάστοτε εργασία αποτύπωσης ως προς την λειτουργία και την ποιότητα μετρήσεων που προσφέρουν.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται χρήση όλο και πιο εξελιγμένων οργάνων, τα οποία ικανοποιούν απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν και οι επίγειοι σαρωτές laser - Terrestrial Laser Scanners. Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser - TLS, μεγάλου βεληνεκούς αποτελεί σήμερα την πλέον υποσχόμενη μέθοδο για λεπτομερείς τοπογραφικές αποτυπώσεις και την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων του περιβάλλοντος χώρου.

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει πέντε υποενότητες. Η πρώτη αφορά στις βασικές έννοιες για τους επίγειους σαρωτές laser. Η δεύτερη υποενότητα περιγράφει τους τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε να γίνει η βαθμονόμηση ενός σαρωτή. Αφορά το σύστημα μέτρησης αποστάσεων και γωνιών του οργάνου. Στην τρίτη ταξινομούνται τα σφάλματα τα οποία υπεισέρχονται στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται με έναν επίγειο σαρωτή laser. Ακολουθεί η τέταρτη υποενότητα με την περιγραφή του επίγειου σαρωτή με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις για το σκοπό αυτής της εργασίας. Το κεφάλαιο τελειώνει με την πέμπτη υποενότητα, στην οποία αναφέρονται ορισμένα άρθρα τα οποία αποτελούν παραδείγματα προσπαθειών βαθμονόμησης.

### 3.2 Γενικά περί επίγειων σαρωτών laser - TLS

Ο επίγειος σαρωτής laser αποτελεί ένα μέσο για τη δημιουργία τρισδιάστατων - 3D - συντεταγμένων. Τα βασικά στοιχεία του σαρωτή για την περιγραφή κάθε σημείου που μετράται και αποδίδεται με τις τρεις συντεταγμένες (X, Y, Z) και μια τιμή εντάσεως, ως τέταρτη διάσταση, είναι το σύστημα μέτρησης της απόστασης και της τιμής της ανακλώμενης ακτινοβολίας, καθώς και το σύστημα μέτρησης γωνιών από το όργανο. Επίσης βασικό στοιχείο στην λειτουργία ενός σαρωτή laser, αποτελεί και



το σύστημα εκτροπής της ακτίνας laser. Στη συνέχεια του κεφαλαίου ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας αυτών των συστημάτων (Schulz, 2007).

### 3.2.1 Σύστημα μέτρησης απόστασης και ανακλώμενης ακτινοβολίας

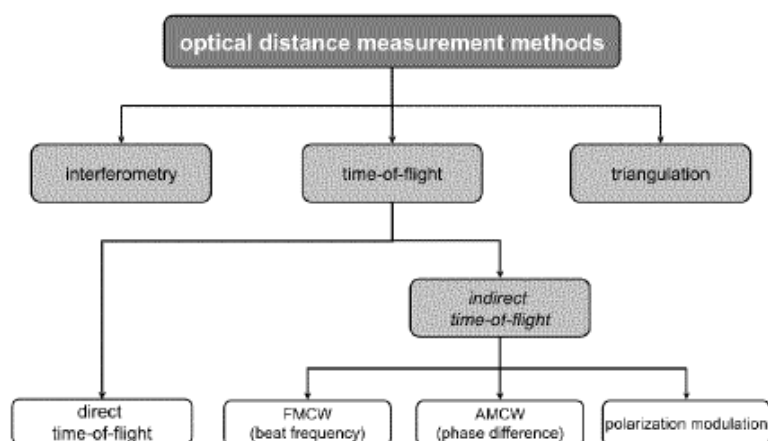
Το σύστημα μέτρησης αποστάσεων αποτελεί την βασική μονάδα στην λειτουργία ενός επίγειου σαρωτή laser. Το σύστημα αυτό προσδιορίζει όχι μόνο το βάθος ανάλυσης, δηλαδή την απόσταση, αλλά ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται και πρόσθετες ιδιότητες όπως:

- το εύρος μέτρησης της απόστασης
- την ακρίβεια των μετρήσεων της απόστασης
- την απόδοση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας απόστασης

Οι οπτικές μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων που χρησιμοποιούνται στους επίγειους σαρωτές laser μπορούν από τεχνικής απόψεως, να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες (Bosch & Lescure, 1995):

1. Μέθοδος διαφοράς χρόνου - *time-of-flight*
2. Μέθοδος τριγωνισμού
3. Συμβολομετρία

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.1), παρουσιάζεται σχηματικά η κατηγοριοποίηση των μεθόδων μέτρησης αποστάσεων ενός σαρωτή laser.



Εικόνα 3.1: Μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων  
(Πηγή: Schulz, 2007)

Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην πρώτη μέθοδο, ενώ οι άλλες δύο χρησιμοποιούνται λιγότερο στους επίγειους σαρωτές laser.

Η μέθοδος διαφοράς χρόνου (time-of-flight) βασίζεται στην μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για έναν παλμό ή ποσό ενέργειας που εκπέμπεται από το σαρωτή laser για να ταξιδέψει, να προσπέσει σε μια επιφάνεια και να επιστρέψει πίσω στον σαρωτή. Η απόσταση αυτή,  $s$ , μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (Rueger, 1996):

$$s = \Delta t \cdot \frac{c}{2} \quad (3.1)$$

όπου  $s$  είναι η απόσταση από την επιφάνεια στην οποία ο παλμός αυτός αντανακλάται,  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός και  $\Delta t$  ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής της ενέργειας του laser. Η χρονική ακρίβεια πρέπει να είναι υψηλή λόγω της γρήγορης ταχύτητας του φωτός ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s), όπου είναι μια φυσική σταθερά καλά καθορισμένη για το κενό.

Από την παραπάνω σχέση, εάν ο χρόνος ταξιδιού είναι γνωστός, η απόσταση μπορεί να υπολογιστεί. Ο προσδιορισμός του χρόνου μπορεί να γίνει είτε άμεσα, μέθοδος time-of-flight, είτε έμμεσα, μέθοδος μέτρησης διαφοράς φάσης. Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται στους επίγειους σαρωτές laser.

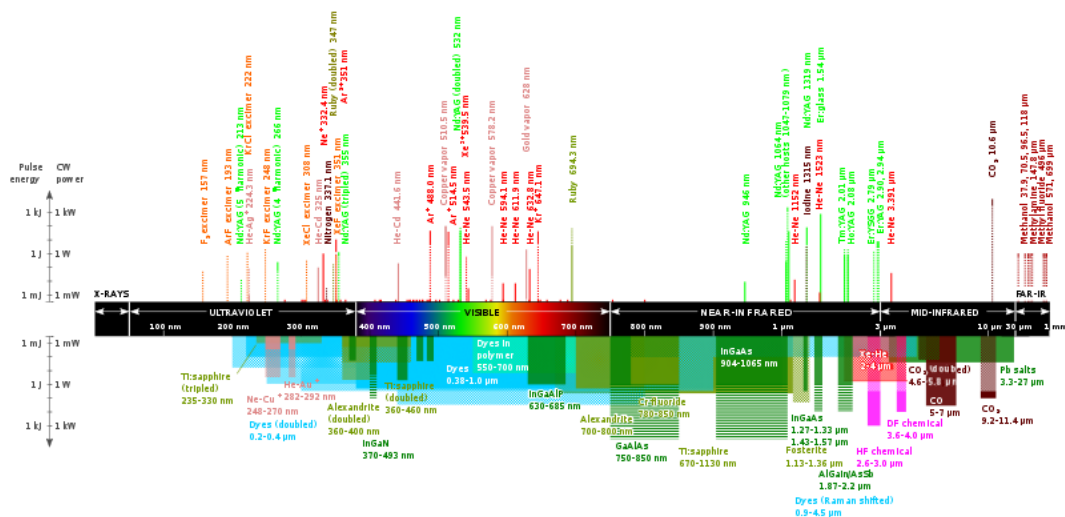
Επιπλέον των τριών διαστάσεων (συντεταγμένες σημείου), η ένταση της ανακλώμενης ακτίνας laser ορίζει μία τέταρτη διάσταση. Η ανακλώμενη ακτίνα laser ανιχνεύεται από μια φωτοδίοδο, και το πλάτος του ανιχνευόμενου σήματος αντιστοιχεί άμεσα στην ένταση της λαμβανόμενης ακτίνας. Είναι μια σταθερά που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως είναι η απόσταση, η γωνία πρόσπτωσης και οι ιδιότητες της επιφάνειας του αντικειμένου (χρώμα, υλικό, τραχύτητα κ.α.). Η φυσική σημασία αυτής της πληροφορίας συχνά δεν ορίζεται από τους κατασκευαστές (Lichti et al., 2002a) και για το λόγο αυτό συχνά η ένταση της ακτίνας μπορεί να συσχετίζεται είτε με το πλάτος είτε με την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος.

Δεδομένου ότι η τεχνική σάρωσης με laser είναι μια τεχνική αποτύπωσης του περιβάλλοντος με χρήση ανακλαστήρα, είναι απαραίτητο να περιγραφούν ορισμένες πτυχές των αρχών της αντανάκλασης.

Η αντανάκλαση ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συνήθως το φως, που αντανακλάται από μια επιφάνεια προς το ποσό που αρχικά πέφτει στην επιφάνεια αυτή.

### Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα από την κοσμική ακτινοβολία με πολύ μικρά μήκη κύματος ( $\lambda < 10^{-14}$  m) μέχρι τα ραδιοκύματα ( $\lambda > 10^6$  m). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των σημάτων, τα οποία παρουσιάζουν ποικίλες μορφές, π.χ. παλμοί. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη στοιβάδα της ατμόσφαιρας π.χ. τροπόσφαιρα, ιονόσφαιρα, και την απόσταση που πρόκειται να μετρηθεί. Καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μεταξύ πομπού και δέκτη, που προκαλούνται από διαφορετικές συνθήκες της ατμόσφαιρας, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι διακυμάνσεις στην θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και την υγρασία, καθώς και άλλες παράμετροι επηρεάζουν την ταχύτητα του φωτός και τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Επομένως, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δεν είναι σταθερή, ενώ πρέπει να γίνονται διορθώσεις λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών.



Εικόνα 3.2: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας  
(Πηγή: <http://en.wikipedia.org>)

Για τις γεωδαιτικές εφαρμογές, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι τα ήλεκτρο-οπτικά κύματα με μήκη κύματος μεταξύ  $0.4 \mu\text{m} < \lambda < 1.3 \mu\text{m}$ , όπου αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό εύρος ζώνης του συνόλου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτά είναι κατάλληλα για εργασίες αποτύπωσης

λόγω των πλεονεκτικών ιδιοτήτων τους στην στοιβάδα της ατμοσφαιράς που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης, όπως είναι η ελαχιστοποίηση της απορρόφησης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά την διάδοση του μέσα σε αυτήν (Hinderung, 2004).

### Laser

Η λέξη «LASER», αποτελεί ακρωνύμιο των λέξεων *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Προέρχεται από την λέξη MASER - Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – και σημαίνει *ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας* (<http://el.wikipedia.org/>).

Σήματα για τον προσδιορισμό των αποστάσεων όπως για παράδειγμα οι παλμοί και οι συχνότητες, διαμορφώνονται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ένα laser εκπέμπει ένα συγκεκριμένο τύπο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πρόκειται για μια μονοχρωματική ακτινοβολία μεγάλης έντασης, που ταξιδεύει προς μια κατεύθυνση ως μια πολύ στενή δέσμη υψηλής ενέργειας. Η ακτίνα laser αντιστοιχεί σε μήκη κύματος που εκτείνονται από τη υπέρυθη ακτινοβολία, και μέσω του ορατού φωτός, έως την υπεριώδη ακτινοβολία. Όσον αφορά τους σαρωτές laser, τα μήκη κύματος κυμαίνονται από 500 nm (πράσινο) μέχρι 800 nm (υπέρυθρο).

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ορατών, υπέρυθρων) μπορεί να περιγραφεί με διάφορα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν βασικές γεωμετρίες (Andrews & Phillips, 1998) και (Meschede, 2004). Επομένως υπάρχουν:

- επίπεδο κύμα
- σφαιρικό κύμα
- Gaussian-beam κύμα (Γκαουσιανής πορείας)

Το μέσο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων η διαταραγμένη ατμόσφαιρα. Οι διακυμάνσεις της ατμόσφαιρας, που έχουν επίδραση και επί του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης της ακτίνας laser, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη διάδοση του κύματος. Για παράδειγμα μπορεί να επηρεάσουν την συνοχή του κύματος και την ενέργεια της δέσμης και να προκαλέσουν διεύρυνση της ακτίνας (Andrews & Phillips, 1998). Δηλαδή επηρεάζεται η διάμετρος της κηλίδας της ακτίνας laser.

Είναι γνωστό ότι μικρότερο μήκος κύματος δημιουργεί μικρότερο μέγεθος κηλίδας αλλά μεγαλύτερη απόκλιση λόγω περίθλασης. Στις προδιαγραφές των σαρωτών το μέγεθος της κηλίδας δίνεται συνήθως στο μέσο του βάθους πεδίου και σύμφωνα με τους νόμους της οπτικής δεν είναι σταθερό για όλο το εύρος λειτουργίας.

Μεγάλο μέγεθος κηλίδας δεν επιτρέπει τον διαχωρισμό μικρών αντικειμένων και σάρωση με «ανάλυση» που είναι μικρότερη από τη διάμετρο της κηλίδας του laser στο αντικείμενο δεν έχει νόημα. Το ίδιο ισχύει και για μεγάλη «ανάλυση» από μεγάλες αποστάσεις, αφού η κηλίδα μεγαλώνει ανάλογα με την απόσταση.

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες laser (Τσακίρη, 2010):

#### *Laser στερεάς κατάστασης*

Ο όρος laser στερεάς κατάστασης χρησιμοποιείται για εκείνα τα laser που έχουν σαν ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο ή γυαλί. Επίσης συχνά χρησιμοποιούν σαν ενεργά συστατικά ιόντα πρόσμιξης που εισάγονται σε έναν ιοντικό κρύσταλλο.

Πλεονεκτήματα των laser στερεάς κατάστασης είναι η υψηλή ισχύς, οι παλμοί σύντομης διάρκειας και η εξαιρετική ποιότητα της ακτίνας, που συνηγορούν υπέρ της επιλογής τους για εφαρμογές μεγάλου βεληνεκούς, όταν δεν τίθεται θέμα κόστους, βάρους και κατανάλωσης τα οποία είναι υψηλά.

#### *Laser ημιαγωγών*

Τα laser ημιαγωγών ή δίοδοι laser είναι πολύ μικρές συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστοιχία και αποτελούν αντικείμενο σύγχρονης έρευνας για την εξέλιξη των laser. Η εκπομπή προκαλείται με τη διέλευση ρεύματος μέσω της σύνδεσης που υπάρχει μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγών.

Τα περισσότερα laser αυτού του τύπου εκπέμπουν υπέρυθη ακτινοβολία, συνήθως με τη μορφή παλμού για να μειώσουν τα προβλήματα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Πλεονεκτήματα των laser ημιαγωγών είναι η διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα του κόστους, του μεγέθους και της κατανάλωσης και οι παλμοί σύντομης διάρκειας, με αντίτιμο την χαμηλότερη ισχύ εκπομπής και τη μεγαλύτερη απόκλιση της ακτίνας έναντι των στερεών laser.

### Μέθοδος time-of-flight

Η βασική αρχή της άμεσης μεθόδου διαφοράς χρόνου, time-of-flight, είναι ο προσδιορισμός του χρόνου  $\Delta t$  ενός παλμού ή ποσού ενέργειας που εκπέμπεται από το σαρωτή laser για να ταξιδέψει, δηλαδή να προσπέσει σε μια επιφάνεια και να επιστρέψει πίσω στον σαρωτή. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει από τη σχέση (Rueger, 1996):

$$s = \Delta t \cdot \frac{c}{2} \quad (3.2)$$

όπου  $s$  είναι η απόσταση από την επιφάνεια στην οποία ο παλμός αυτός αντανακλάται και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός. Η χρονική ακρίβεια πρέπει να είναι υψηλή λόγω της γρήγορης ταχύτητας του φωτός ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  m / s).

Εάν η απόσταση που πρέπει να επιλυθεί είναι ίση με 1 mm, ο χρόνος που απαιτείται δίνεται από τη σχέση:

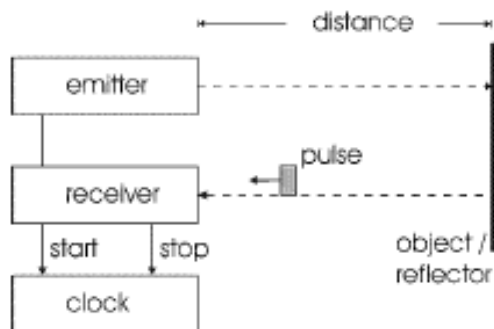
$$\Delta t = \frac{2\Delta s}{c} = \frac{2 \cdot 0.01 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 6.7 \text{ ps} \quad (3.3)$$

Λόγω της ανάλυσης χρόνου που απαιτείται για τη μέτρηση των αποστάσεων σε κλίμακα χιλιοστών, οι ηλεκτρονικές μονάδες πρέπει να παράγουν σύντομους παλμούς και πρέπει να λειτουργούν με μεγάλη ταχύτητα. Ενώ δεδομένου ότι ένας και μόνο χρονομετρημένος παλμός δεν παρέχει μεγάλη ακρίβεια, ένας μεγάλος αριθμός παλμών εκπέμπεται και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος αυτών, για τον υπολογισμό μιας πιο ακριβής απόστασης.

Βασικό πλεονέκτημα της άμεσης μεθόδου διαφοράς χρόνου, τεχνική time-of-flight, είναι οι μεγάλες αποστάσεις που μπορεί να καλύψει ο επίγειος σαρωτής laser. Αποστάσεις έως και αρκετές εκατοντάδες μέτρα ή ακόμη μεγαλύτερες που μπορούν να φτάσουν και το ένα χιλιόμετρο. Άλλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εκπομπής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η επίδραση του περιβάλλοντος, επιτυγχάνεται υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο για το χρόνο διάρκειας του παλμού (SNR) και η μέση ισχύς εκπομπής παραμένει χαμηλή προσφέροντας ικανοποιητική ασφάλεια.

Το πλήθος των παλμών που εκπέμπονται σε δεδομένο χρονικό διάστημα καθορίζεται από τη συχνότητα επανάληψης του παλμού, Pulse Repetition Frequency - PRF. Η

υψηλή επαναληπτική συχνότητα αυξάνει τη ταχύτητα του σαρωτή και βελτιώνει την ανάλυση αλλά περιορίζει το μέγιστο βεληνεκές λόγω ασάφειας. Η ασάφεια εμφανίζεται όταν ένας λαμβανόμενος παλμός από ένα μακρινό στόχο επιστρέφει μετά την εκπομπή του επόμενου παλμού. Η ασάφεια αυτή μπορεί να εξαλειφθεί είτε με την εκπομπή παλμών σε διαφορετικές επαναληπτικές συχνότητες, είτε με τον περιορισμό της λειτουργίας του οργάνου εντός καθορισμένου εύρους βεληνεκού. Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.3) φαίνεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου.



Εικόνα 3.3: Μέθοδος *time-of-flight*  
(Πηγή: Zetsche, 1979)

Εκτός από την παραπάνω μέθοδο, όπου η μέτρηση του χρόνου γίνεται άμεσα, υπάρχουν και άλλες στις οποίες ο υπολογισμός της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος γίνεται έμμεσα με διάφορες τεχνικές, με την σημαντικότερη να είναι η διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σπανιότερα στους επίγειους σαρωτές laser.

### Μετάδοση συνεχούς κύματος

Το συνεχές (αρμονικό) κύμα των laser (φέρον κύμα) διαμορφώνεται κατά πλάτος ή κατά συχνότητα. Στη συνέχεια, εκπέμπεται και μετρείται η διαφορά φάσης ή η διαφορά συχνότητας του διακροτήματος, beat, αντίστοιχα μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου σήματος, η οποία αντιστοιχεί σε διαφορά χρόνου (Τσακίρη, 2010).

### *Διαμόρφωση παλμού συνεχούς κύματος (AMCW) - Διαφορά φάσης*

Το εκπεμπόμενο συνεχές κύμα διαμορφώνεται κατά πλάτος από ένα αρμονικό κύμα μήκους μερικών δεκάδων μέτρων. Μετά την ανάκλασή του από το αντικείμενο ανιχνεύεται σε μια φωτοδίοδο και συγκρίνεται με το εκπεμπόμενο σήμα. Ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής του σήματος είναι ευθέως ανάλογος της διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος και εξαρτάται από τη

συχνότητα διαμόρφωσης και την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης δεν απαιτείται η ύπαρξη χρονομέτρου μεγάλης ακρίβειας αλλά αρκεί μια απλή ηλεκτρονική διάταξη για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης και τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης - επιστροφής του σήματος. Η απόσταση είναι ανάλογη με την μετατόπιση φάσης  $\Delta\varphi$ :

$$s = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} \quad (3.4)$$

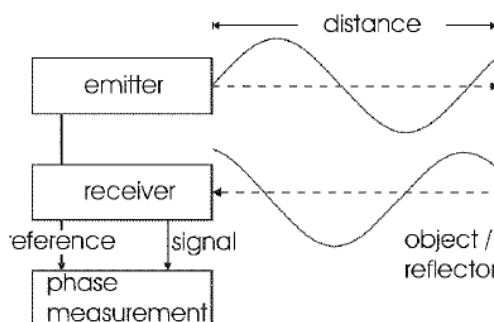
όπου  $f$  είναι η συχνότητα του ημιτονοειδούς κύματος. Αντί του προσδιορισμού του χρόνου  $\Delta t$  άμεσα, ο χρόνος διαδρομής αντικαθίσταται από:

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} \quad (3.5)$$

Αν το κύμα που ορίζει το μέγιστο διάστημα εκπληρώσει περισσότερες από μία περιόδους ένα πολλαπλάσιο  $N$ , του μήκους κύματος  $\lambda$ , πρέπει να προστεθεί στην απόσταση η οποία υπολογίζεται από τη μετατόπιση φάσης  $\Delta\varphi$ . Έτσι, η εξίσωση για τον προσδιορισμό της απόλυτης απόστασης  $s$  γίνεται (Hinderling, 2004):

$$s = \frac{1}{2} \cdot \left( N\lambda + \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right), \quad \text{με } \lambda = \frac{c}{f} \quad (3.6)$$

Η ανάλυση της απόστασης  $s$  δεν εξαρτάται μόνο από τον προσδιορισμό του  $\Delta t$  αλλά επίσης και από τον προσδιορισμό της διαφοράς φάσης  $\Delta\varphi$ . Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου διαφοράς φάσης.



Εικόνα 3.4: Μέθοδος διαμόρφωσης παλμού συνεχούς κύματος (AMCW)  
(Πηγή: Schulz, 2007)

Παρ' όλο που η μέθοδος μέτρησης της διαφοράς φάσης είναι τεχνικά ευκολότερη σε σχέση με τις άλλες μεθόδους time-of-flight, απαιτούνται πιο σύνθετες ηλεκτρονικές διατάξεις αλλά μειωμένο εύρος συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει καλύτερη ανάλυση στο βεληνεκές της τάξης των 3-5 mm, σε βάρος όμως του χρόνου μέτρησης. Επομένως, επειδή απαιτείται καλό σήμα επιστροφής, η εμβέλεια των



σαρωτών που χρησιμοποιούν την παραπάνω μέθοδο μειώνεται και αυξάνεται η τάση για χονδροειδή σφάλματα (Τσακίρη, 2010).

#### Διαμόρφωση συχνότητας συνεχούς κύματος (FMCW) – Διαφορά συχνότητας

Ένα κύμα με γραμμική, χρονικά μεταβαλλόμενη συχνότητα διαμορφώνει τη συχνότητα του αρμονικού κύματος του laser. Ένα τμήμα του εκπεμπόμενου σήματος διαχωρίζεται και κρατείται ως σήμα αναφοράς. Το ανακλώμενο σήμα αναμιγνύεται με το σήμα αναφοράς παράγοντας ένα οπτικό διακρότημα του οποίου η συχνότητα, beat frequency, ισούται με την απόλυτη διαφορά των συχνοτήτων του εκπεμπόμενου και ανακλώμενου κύματος και είναι συνάρτηση του χρόνου μετάβασης - επιστροφής του σήματος που δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{f_D}{f_S} \cdot T \quad (3.7)$$

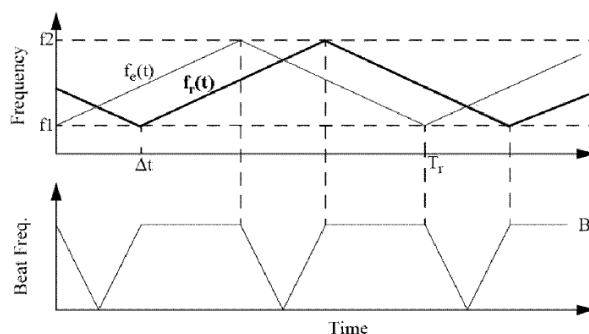
όπου  $T$  είναι η περίοδος του μήκους κύματος,  $f_D$  είναι η συχνότητα του διακροτήματος και  $f_S$  είναι η εκπεμπόμενη συχνότητα.

Η απόσταση δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{f_D}{f_S} \cdot \frac{1}{\Delta F} \quad (3.8)$$

όπου  $\Delta F$  είναι η γραμμική μεταβολή της εκπεμπόμενης συχνότητας.

Η εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.5) παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας της μεθόδου διαφοράς συχνότητας.



Εικόνα 3.5: Μέθοδος διαμόρφωσης συχνότητας συνεχούς κύματος (FMCW)  
(Πηγή: Schulz, 2007)

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι σαρωτές με διαμόρφωση συχνότητας επειδή χρησιμοποιούν τη συχνότητα του παλμού για τον υπολογισμό της απόστασης, η οποία είναι ανεξάρτητη του πλάτους του κύματος, είναι σε μεγάλο βαθμό

ανεπηρέαστοι του θορύβου από διάφορες πηγές όπως ηλεκτρικό θόρυβο, θόρυβο εξαιτίας του περιβάλλοντος φωτισμού και λόγω μεταβολών της ανακλαστικότητας των επιφανειών (Τσακίρη, 2010).

Η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης είναι συνάρτηση της γραμμικότητας της διαμόρφωσης συχνότητας και εξαρτάται από το μήκος συμφωνίας της ακτινοβολίας. Η επίτευξη υψηλού βαθμού γραμμικότητας είναι εφικτή σήμερα και επιτυγχάνει ακρίβεια μέτρησης μm. Με αυτή τη μέθοδο αντιμετωπίζεται η ασάφεια, επειδή χρησιμοποιείται χαμηλότερη συχνότητα διαμόρφωσης.

### Μέθοδος τριγωνισμού

Κατά την μέτρηση μιας απόστασης με την μέθοδο του τριγωνισμού, ένας πομπός laser προβάλλει μια ακτίνα στενής δέσμης στο στόχο. Η εικόνα της ανακλώμενης ακτινοβολίας ανιχνεύεται σε έναν δέκτη, Position Sensitive Detector - PSD, που βρίσκεται σε γνωστή απόσταση  $d$  από τον πομπό. Η θέση του μέγιστου της έντασης που καταγράφεται στο δέκτη είναι ανάλογη της απόστασης του στόχου. Οι συντεταγμένες  $x$ ,  $z$  του στόχου, θεωρώντας αμελητέα τα σφάλματα των φακών προσεγγίζονται ως:

$$z = \frac{d f_0}{p + f_0 \tan\theta} \quad (3.9)$$

$$x = z \cdot \tan\theta \quad (3.10)$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση πομπού - δέκτη,  $f_0$  είναι η απόσταση φακού - δέκτη,  $p$  είναι η θέση της εικόνας του σημείου στο δέκτη και  $\theta$  είναι η γωνία εκπομπής της ακτίνας.

Διακρίνονται δύο υποκατηγορίες σαρωτών που χρησιμοποιούν την αρχή του τριγωνισμού:

#### A. Οι σαρωτές με χρήση μίας ψηφιακής μηχανής

Οι σαρωτές αυτού του είδους αποτελούνται από μία συσκευή μετάδοσης σήματος και μία μηχανή CCD. Η συσκευή μετάδοσης σήματος βρίσκεται στο ένα άκρο της μηχανικής βάσης και εκπέμπει μία ακτίνα laser με καθορισμένη και διαρκώς αυξανόμενη γωνία πάνω στο αντικείμενο. Η κάμερα CCD βρίσκεται στο άλλο άκρο της μηχανικής βάσης και ανιχνεύει το σημείο ή τη γραμμή της ακτίνας laser πάνω στο

αντικείμενο. Η τρισδιάστατη θέση του σημείου στην επιφάνεια προκύπτει από το τρίγωνο που δημιουργείται.

Οι συγκεκριμένοι σαρωτές είναι χρήσιμοι για σαρώσεις μικρού βεληνεκούς καθώς και για μικρά αντικείμενα.

#### B. Οι σαρωτές με χρήση δύο ψηφιακών συσκευών

Μια παραλλαγή της αρχής του τριγωνισμού πραγματοποιείται με τη χρήση δύο CCD μηχανών, όπου τοποθετείται μία σε κάθε άκρο της βάσης. Ένας ξεχωριστός προβολέας φωτός, ο οποίος δεν συμμετέχει σε καμία λειτουργία της μέτρησης, παράγει το σημείο ή το πρότυπο που πρόκειται να ανιχνευτεί.

Η μέθοδος του τριγωνισμού μπορεί να εφαρμοστεί με οποιοδήποτε είδος ακτινοβολίας. Το πλεονέκτημα βρίσκεται στο πολύ μεγάλο βάθος εστίασης που επιτυγχάνει, στην μείωση της επίδρασης του περιβάλλοντος φωτισμού μέσω της εφαρμογής φίλτρου αποκοπής συχνοτήτων, και στην υψηλή ισχύ που διαθέτει σε μικρό μέγεθος πομπού, με αντίτιμο τον θόρυβο των εικόνων συμβολής και περίθλασης. Ωστόσο η ακρίβεια υπολογισμού του  $z$  μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Εντούτοις, για σάρωση μικρών αντικειμένων από μικρή απόσταση, η μέθοδος του τριγωνισμού είναι ακριβέστερη της μεθόδου time-of-flight. Τα σφάλματα στη μέθοδο του τριγωνισμού επηρεάζονται κυρίως από τη γεωμετρία της λήψης και μειώνονται με την αύξηση της βάσης (απόστασης πομπού - δέκτη) και της απόστασης φακού - δέκτη.

#### Συμβολομετρία

Η συμβολομετρία εκμεταλλεύεται την συμφωνία ενός κύματος για τον υπολογισμό της απόστασης. Επίσης προσφέρει πολύ υψηλή ακρίβεια αλλά δεν εφαρμόζεται στη τεχνική μέτρησης των σαρωτών laser και επομένως δεν θα αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία.

Ο πίνακας που ακολουθεί (πίνακας 3.1) δίνει μια επισκόπηση των τεχνικών μέτρησης της απόστασης που χρησιμοποιούνται στους επίγειους σαρωτές laser. Η συσχέτιση μεταξύ της τεχνικής μέτρησης της απόστασης, της απόστασης και του ρυθμού απόκτησης των δεδομένων είναι εμφανής.

Laser Scanner	Manufacturer	Distance Technique	Range (m)	Frequency (kHz)
CPW 8000	Callidus	direct TOF	80	28
LS 880	FARO	AMCW	76	120
HDS 3000	Leica Geosystems	direct TOF	300	1.8
LMS-Z420i	Riegl	direct TOF	800	12
GX	Trimble	direct TOF	350	5
Imager 5003	Zoller+Frohlich	AMCW	53	625

Πίνακας 3.1: Επισκόπηση τεχνικών μέτρησης απόστασης σε σαρωτές laser (Πηγή: Schulz, 2007)

### Αντανάκλαση - Μοντέλα αντανάκλασης

Η αντανάκλαση των ήλεκτρο-οπτικών κυμάτων βασίζεται σε διαφορετικούς τύπους αντανάκλασης. Διακρίνεται σε:

- κατοπτρική αντανάκλαση
- διάχυτη αντανάκλαση

Η κατοπτρική αντανάκλαση εμφανίζεται εάν η τραχύτητα της επιφανείας είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτίνας (Schulz, 2007). Ο συνδυασμός της κατοπτρικής και της διάχυτης αντανάκλασης οδηγεί σε μικτή αντανάκλαση, όπου η εισερχόμενη ακτίνα χωρίζεται σε πολλές διαφορετικές ανακλώμενες ακτίνες οι οποίες καλύπτουν το ημισφαίριο που περιβάλλει την επιφάνεια του αντικειμένου.

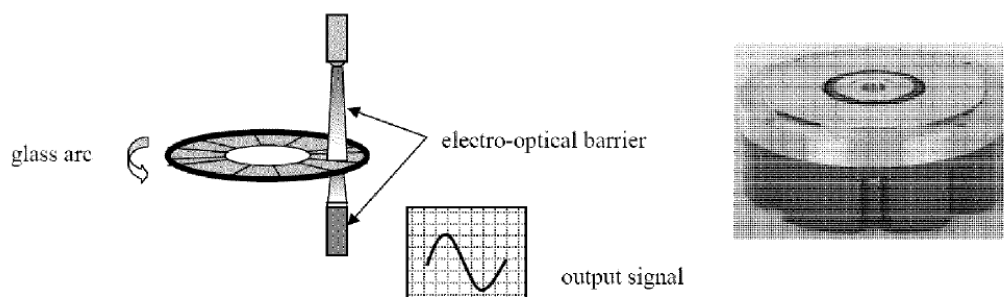
Η κατοπτρική και διάχυτη αντανάκλαση είναι απλές προσεγγίσεις του τρόπου αντανάκλασης της ακτίνας laser σε ένα αντικείμενο. Στην πραγματικότητα, οι επιφάνειες εμφανίζουν διαφόρων τύπων αντανάκλασεις. Τρία βασικά μοντέλα αντανάκλασης είναι (Torrance & Sparrow, 1967):

1. το μοντέλο Lambertian,
2. το μοντέλο Phong
3. το μοντέλο Torrance-Sparrow

### 3.2.2 Σύστημα μέτρησης γωνιών

Ο προσανατολισμός της ακτίνας laser στους επίγειους σαρωτές laser μετράται ήλεκτρο-οπτικά από κωδικοποιητές ως προς μια οριζόντια και μια κατακόρυφη

διεύθυνση. Η ήλεκτρο-οπτική μέθοδος βασίζεται στο φως που εκπέμπεται ή αντανακλάται. Ένας γυάλινος κύκλος διαμέτρου 5 έως 7cm κωδικοποιείται από ένα πρότυπο εναλλαγής αδιαφανών και διαφανών περιοχών και αποκτά κάποια σήματα στην επιφάνεια του, τα οποία αντιστοιχούν σε τιμές γωνιών. Φως από μια εσωτερική πηγή, πέφτει στο γυάλινο κύκλο και φωτοδιόδοι μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός που μεταδίδεται ή ανακλάται σε ηλεκτρική ενέργεια, π.χ. παλμοί ή εικονοστοιχεία πληροφοριών. Το ψηφιακό σήμα στη συνέχεια πρέπει να μετατρέπεται από ένα αναλογικό σήμα σε μια ψηφιακή έξοδο αναγνώσιμη ως δεκαδικός αριθμός. Η εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.6) παρουσιάζει τις διατάξεις που περιγράφηκαν παραπάνω.



**Εικόνα 3.6: Διατάξεις συστήματος μέτρησης γωνιών  
(Πηγή: Schulz, 2007)**

Μια επιπρόσθετη μέθοδο κωδικοποίησης αποτελεί η στοιχειώδης κωδικοποίηση (Incremental Encoding). Στην μέθοδο αυτή, μόνο μια σχετική περιστροφή του γυάλινου κύκλου είναι μετρήσιμη. Φως από μία πηγή διέρχεται διαμέσου του κωδικοποιημένου γυάλινου κύκλου, του οποίου η κατασκευή βασίζεται σε διαφανείς και αδιαφανείς λωρίδες ίσου πλάτους. Η μικρότερη μονάδα κωδικοποίησης ορίζεται από το πλάτος μιας λωρίδας. Η ποσότητα του φωτός που λαμβάνεται από τη φωτοδίοδο εξαρτάται από την περιστροφή του κύκλου και οι αλλαγές είναι σχεδόν ημιτονοειδείς. Οι περίοδοι της ημιτονοειδούς ταλάντωσης υπολογίζονται και η γωνία της περιστροφής μπορεί να προσδιοριστεί. Η κωδικοποίηση αυτή απαιτεί μια εκκίνηση. Ο γυάλινος κύκλος σημειώνεται με έναν πρόσθετο κωδικό. Ο πρόσθετος κωδικός πρέπει να περάσει από το ήλεκτρο-οπτικό φράγμα και έτσι ο μετρητής ενεργοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η γωνία.

Μια δεύτερη μέθοδο κωδικοποίησης αποτελεί η δυαδική κωδικοποίηση. Φως από μία πηγή περνά μέσα από τον κωδικοποιημένο γυάλινο κύκλο που φέρει τον αριθμό της κωδικοποίησης, δηλαδή ένα δυαδικό κώδικα. Κάθε ψηφίο του αντίστοιχου δυαδικού

κώδικα αντιπροσωπεύεται από ένα διαφανές ή αδιαφανές στοιχείο, και μπορεί να αντιστοιχισθεί σε ορισμένο γωνιακό μέγεθος.

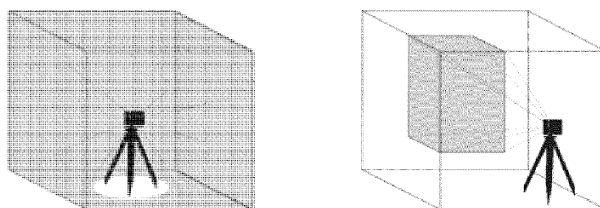
Στους περισσότερους επίγειους σαρωτές laser, υλοποιείται η δυαδική κωδικοποίηση δεδομένου ότι η γωνιακή ανάλυση είναι μεγαλύτερη. Για ακόμα υψηλότερη ανάλυση, μερικών milligons, πρόσθετη κωδικοποίηση πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

### Σύστημα εκτροπής

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δειγματοληψία των σημείων κατά την διαδικασία της σάρωσης του περιβάλλοντος, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές που εφαρμόζονται από τους επίγειους σαρωτές laser.

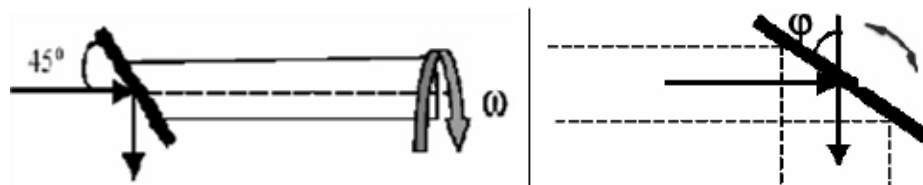
Η σάρωση του περιβάλλοντος απαιτεί την εκτροπή της δέσμης laser σε δύο κατευθύνσεις μια οριζόντια και μια κατακόρυφη. Λόγω των συνεχών μεταβολών της γωνίας σάρωσης δημιουργείται ένα πλέγμα σημείων που αποτελεί ένα νέφος σημείων - point cloud. Το οριζόντιο βήμα εκτροπής συχνά ισούται με το κατακόρυφο βήμα εκτροπής. Τα σημεία είναι διατεταγμένα κατακόρυφα και μετατοπίζονται από μια διακριτή οριζόντια προσαύξηση της γωνίας.

Οι διαστάσεις της περιοχής που μπορεί να σαρωθεί εξαρτώνται από την αρχή που χρησιμοποιεί ο σαρωτής για την εκτροπή της δέσμης laser. Αυτό το οπτικό πεδίο είτε περιορίζεται σε ένα τμήμα, δηλαδή σαρωτής με χρήση κάμερας, είτε καλύπτει μια πλήρη περιοχή, δηλαδή πανοραμικός σαρωτής (εικόνα 3.7).



**Εικόνα 3.7: Εκτροπή δέσμης laser**  
(Πηγή: Runne et. al., 2001)

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές εκτροπής της δέσμης laser. Διακρίνονται μεταξύ αυτών που χρησιμοποιούν επίπεδους καθρέφτες, πολυγωνικούς καθρέφτες και πρίσματα. Άλλη διάκριση αφορά την κίνηση των κατόπτρων, όπου είτε ταλαντεύονται ή απλά περιστρέφονται (εικόνα 3.8).



1. Περιστρεφόμενο κάτοπτρο

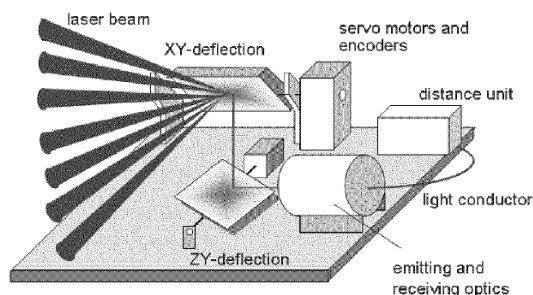
2. Ταλαντευόμενο κάτοπτρο

Εικόνα 3.8: Κίνηση κατόπτρων

Η εκτροπή της δέσμης laser που εφαρμόζεται στους σαρωτές laser είναι συχνά ένας συνδυασμός διαφόρων μεθόδων εκτροπής. Είναι σύνηθες η κύρια περιστροφή να είναι ταχύτερη από ότι η δευτερεύουσα περιστροφή. Λαμβάνοντας υπόψη το πανοραμικό σαρωτή, π.χ. σαρωτές laser Callidus, Faro, Riegl, Zoller+Frohlich, η κύρια εκτροπή γίνεται από ταχύ περιστρεφόμενο κάτοπτρο, ενώ η δευτερεύουσα εκτροπή περιλαμβάνει μια πλήρη περιστροφή της μονάδας εκτροπής, αντί της περιστροφής μόνο του καθρέφτη.

#### A. Ταλαντευόμενο κάτοπτρο

Στην περίπτωση ενός ταλαντευόμενου κατόπτρου, η κύρια περιστροφή περιγράφεται από έναν καθρέπτη που ταλαντεύεται περίπου κατά έναν άξονα. Το διάστημα δειγματοληψίας ορίζεται από την ελάχιστη αύξηση της μονάδας κωδικοποίησης η οποία αναγκάζει τον καθρέπτη να ταλαντευθεί σε επόμενη θέση. Ο συνδυασμός των δύο ταλαντευόμενων καθρεφτών εκτρέπει τη δέσμη laser στις επιθυμητές κατευθύνσεις. Τα κατακόρυφα και οριζόντια διαστήματα δειγματοληψίας ορίζονται από την ελάχιστη αύξηση του κωδικοποιητή που ελέγχει τις ταλαντώσεις των καθρεπτών. Η εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.9) παρουσιάζει της αρχή λειτουργίας του ταλαντευόμενου κατόπτρου.



Εικόνα 3.9: Λειτουργία ταλαντευόμενου κατόπτρου  
(Πηγή: Schulz, 2007)

Κύριο μειονεκτήματα της τεχνικής είναι το περιορισμένο οπτικό πεδίο.

### *B. Περιστρεφόμενο κάτοπτρο*

Στην περίπτωση ενός περιστρεφόμενου κατόπτρου, η κύρια περιστροφή περιγράφεται από έναν καθρέπτη ο οποίος περιστρέφεται περίπου κατά έναν άξονα. Ο άξονας περιστροφής της κύριας περιστροφής είναι συχνά ένας οριζόντιος άξονας. Έτσι, η εκτροπή της δέσμης laser είναι κατακόρυφη. Η δευτερεύουσα περιστροφή προκαλείται από την περιστροφή του σαρωτή laser γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα ώστε να εκτρέπει τη δέσμη laser οριζοντίως.

Όσον αφορά την κατασκευή σαρωτών laser, παρατηρείται μεγαλύτερη τάση στο να κατασκευάζονται πανοραμικοί σαρωτές, λόγω του μεγαλύτερου οπτικού πεδίου. Επίσης οι πανοραμικοί σαρωτές προσφέρουν τη δυνατότητα αποτύπωσης μιας καθορισμένης από τον χρήστη περιοχής.

## **3.3 Βαθμονόμηση επίγειου σαρωτή laser**

### **3.3.1 Σύστημα μέτρησης αποστάσεων**

Το σύστημα μέτρησης αποστάσεων ενός επίγειου σαρωτή laser, βασίζεται στην διάδοση ενός διαμορφωμένου κύματος laser. Αν η ακτίνα laser προσπέσει σε ένα αντικείμενο του περιβάλλοντος, τότε αντανακλάται μερικώς και στη συνέχεια ανιχνεύεται από μια φωτοδίοδο.

Η ανακλαστικότητα ενός αντικειμένου δεν είναι η μόνη παράμετρος η οποία επηρεάζει την ένταση του ανακλώμενου σήματος laser. Άλλες παράμετροι επίσης επηρεάζουν την τιμή της έντασης του ανακλώμενου σήματος (Schulz, 2007):

- η απόσταση  $d$
- η γωνία πρόσπτωσης
- οι επιφανειακές ιδιότητες του αντικειμένου π.χ. χρώμα, τραχύτητα κ.λπ.

Ο σαρωτής laser μπορεί να λειτουργήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους: με το λεγόμενο «scanning mode» όπου η μονάδα εκτροπής περιστρέφεται και το λεγόμενο «static mode», όπου η μονάδα εκτροπής παραμένει ακίνητη.



### Επαναληπτικότητα

Η επαναληπτικότητα στην μέτρηση μιας απόστασης από το συστήματος μέτρησης αποστάσεων του οργάνου, επιτρέπει τον προσδιορισμό των συστηματικών σφαλμάτων. Ο προσδιορισμός επιτυγχάνεται μέσω μιας επαναλαμβανόμενης διαδικασίας μέτρησης η οποία πραγματοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα

### Ακρίβεια

Η αντανακλαστικότητα του αντικειμένου, δεν επηρεάζει την μέση τιμή που προκύπτει από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του συστήματος μέτρησης αποστάσεων.

### Ορθότητα

Η ορθότητα ορίζει το θόρυβο ενός αισθητήρα. Όσον αφορά τον επίγειο σαρωτή laser, η ορθότητα του συστήματος μέτρησης απόστασης δίνει μια εκτίμηση για την εμπειρική τυπική απόκλιση μιας και μόνο μέτρησης απόστασης. Η ορθότητα είναι μια αξιόπιστη παράμετρος, δεδομένου ότι καθορίζει την ασάφεια μίας στόχευσης που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σάρωσης και βοηθά στην αξιολόγηση κάθε επιμέρους σημείου του νέφους σημείων.

### **3.3.2 Σύστημα μέτρησης γωνιών**

Το σύστημα μέτρησης γωνιών παρέχει τις πληροφορίες που λείπουν και είναι απαραίτητες, σε συνδυασμό με μετρήσεις αποστάσεων, για την εξαγωγή των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων αποτύπωσης. Η βαθμονόμηση του συστήματος μέτρησης γωνιών αφορά την ακρίβεια και την ορθότητα διεξαγωγής των μετρήσεων μέσα από πειραματικές διατάξεις που δεν επηρεάζονται από άλλα σφάλματα που οφείλονται στον σαρωτή laser. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις των γωνιών δεν μπορούν να διαβαστούν άμεσα, οι απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με τις τιμές της γωνίας θα πρέπει να προκύψουν με βάση τα μετρημένα στοιχεία των καρτεσιανών συντεταγμένων. Η ακτίνα λέιζερ μπορεί να ευθυγραμμιστεί χειροκίνητα προς ένα στόχο και η τιμή της γωνίας μπορεί να διαβαστεί. Ωστόσο, αυτή η ευθυγράμμιση είναι δύσκολη και δεν παρέχει επαρκή ακρίβεια. Μια πραγματική διαδικασία σάρωσης είναι πιο κατάλληλη για την εκτίμηση του συστήματος μέτρησης των γωνιών, δεδομένου ότι η ποιότητα του συστήματος μέτρησης των

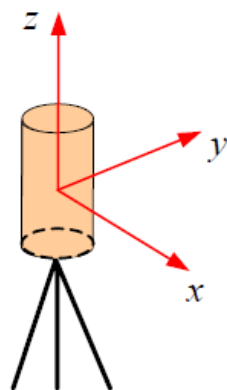
γωνιών που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας σάρωσης έχει ενδιαφέρον.

Η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης των γωνιών ορίζεται ως η εγγύτητα των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας γωνίας σε σχέση με το σύστημα του σαρωτή, ή το κατά πόσο οι επαναλαμβανόμενες τιμές της γωνίας πλησιάζουν. Η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης των γωνιών αξιολογείται με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, ενώ η ορθότητα του ορίζεται ως η απόκλιση της μετρημένης τιμής μιας γωνίας σε σχέση με την ονομαστική τιμή της γωνίας. Επομένως, το σύστημα μέτρησης γωνιών περιγράφεται από τις διαφορές μεταξύ των οριζοντίων και κατακόρυφων γωνιών δύο στόχων.

### 3.3.3 Συνένωση και γεωαναφορά στον επίγειο σαρωτή laser

Τα αντικείμενα τα οποία αποτυπώνονται από έναν σαρωτή laser είναι συχνά αρκετά μεγάλα. Επομένως πρέπει να πραγματοποιηθούν αρκετές σαρώσεις, από διαφορετικά σημεία και ρυθμίσεις του οργάνου, προκειμένου το αντικείμενο να αποτυπωθεί πλήρως. Τα νέφη σημείων που προέρχονται από τις διαφορετικές σαρώσεις έχουν σαν αναφορά το όργανο, δηλαδή το εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή (εικόνα 3.10). Αυτό το σύστημα συντεταγμένων μπορεί να οριστεί από τα εξής (Reshetyuk, 2009):

- προσδιοριστικό σημείο - στο ηλεκτρο-οπτικό κέντρο του σαρωτή
- άξονα z - κατά μήκος του κάθετου άξονα του οργάνου (άξονας περιστροφής)
- άξονα x - κατά μήκος του οπτικού άξονα του οργάνου με μια αυθαίρετη οριζόντια γωνία, για παράδειγμα η πρώτη οριζόντια γωνία ή ο κατά προσέγγιση βορράς σε μια ενσωματωμένη μαγνητική πυξίδα, εάν υπάρχει
- άξονα y - ορθογώνια προς τους δύο προηγούμενες άξονες



**Εικόνα 3.10: Σύστημα συντεταγμένων σαρωτή laser**  
(Πηγή: Reshetyuk, 2009)

Πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των διαφορών στο σχεδιασμό των σαρωτών, σαρωτές διαφορετικών κατασκευαστών θα διαφέρουν και ως προς το σύστημα συντεταγμένων του οργάνου. Για παράδειγμα η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του σαρωτή Callidus CP 3200 είναι το σημείο της τομής του οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα περιστροφής (Kern, 2001). Ενώ στο σαρωτή Leica HDS 2500, η αρχή του συστήματος είναι το μηδενικό σημείο των μετρήσεων απόστασης, και δεν συμπίπτει με τους μηχανικούς άξονες του σαρωτή (Harvey, 2004).

Για την λήψη μιας πλήρους αναπαράστασης του σαρωμένου αντικειμένου, το νέφος σημείων θα πρέπει αρχικά να μετασχηματιστεί σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων, δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων μιας επιλεγμένης σάρωσης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται συνένωση, «registration», οπότε οι εγγεγραμμένες σαρώσεις συνδυάζονται σε ένα σύνολο δεδομένων (Barber et al., 2001) και (Mills & Barber, 2003). Προκειμένου να είναι δυνατή η ενσωμάτωση των δεδομένων του επίγειου σαρωτή σε άλλα γεωχωρικά δεδομένα (π.χ. σε ψηφιακούς χάρτες ή ψηφιακά μοντέλα εδάφους), ο χρήστης θα πρέπει να μετατρέψει το συνενωμένο νέφος σημείων ολόκληρου του αντικειμένου σε ένα εξωτερικό (γεωδαιτικό) σύστημα συντεταγμένων, το οποίο είναι είτε τοπικό είτε κρατικό. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται γεωαναφορά, «georeferencing». Πολύ συχνά ένα τοπικό σύστημα αναφοράς καθορίζεται ειδικά για τους σκοπούς μιας σάρωσης, για να παρέχει τον απαιτούμενο έλεγχο της αποτύπωσης. Δεδομένου ότι σε μια τυπική εφαρμογή ένας απαιτείται για να αποκτηθούν τα δεδομένα στο γεωδαιτικό σύστημα, ένας εκτελεί και τις δυο διαδικασίες της συνένωσης και της γεωαναφοράς (Jacobs, 2005). Αυτές οι

δύο διαδικασίες μπορεί να θεωρηθούν ως το πρώτο βήμα της επεξεργασίας των δεδομένων (Barber et al., 2001).

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή διάφορων προσεγγίσεων συνένωσης πολλαπλών σαρώσεων σε ένα σύνολο δεδομένων, καθώς και δύο προσεγγίσεων γεωαναφοράς - άμεση και έμμεση - που είναι συνάρτηση του σχεδιασμού του σαρωτή.

#### *Συνένωση πολλαπλών σαρώσεων*

«Registration» είναι ο μετασχηματισμός πολλαπλών νεφών σημείων (σαρώσεις) σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων (Coordinate System - CS), το οποίο είναι το σύστημα της επιλεγμένης σάρωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να συνενωθούν δύο νέφη σημείων, θα πρέπει να υπάρχει επικάλυψη. Δηλαδή ένα νέφος σημείων επικαλύπτεται από ένα άλλο νέφος σημείων το οποίο λήφθηκε από διαφορετικό σαρωτή που τοποθετήθηκε σε διαφορετικό σημείο. Είναι πιθανό να υπάρχει επικάλυψη και σε τρία ή περισσότερα νέφη σημείων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός, είναι απαραίτητο να ορισθούν κάποιιοι παράμετροι ανάμεσα στα συστήματα των συντεταγμένων:

- τρεις μετατοπίσεις κατά μήκος των τριών αξόνων συντεταγμένων:  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$
- τρεις περιστροφές γύρω από τους τρεις άξονες συντεταγμένων:  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$

Αυτές οι παράμετροι μετασχηματισμού καλούνται επίσης και «έξι βαθμοί ελευθερίας». Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό των παραμέτρων και κατά συνέπεια διάφορες προσεγγίσεις συνένωσης νεφών σημείων:

- με χρήση ειδικών στόχων (που παρέχονται από τον κατασκευαστή του σαρωτή) που είναι ορατοί και στα δύο νέφη σημείων
- με χρήση κοινών φυσικών χαρακτηριστικών σημείων
- με ταίριασμα της επιφάνειας του αντικειμένου σάρωσης
- με χρήση κοινών γεωμετρικών αντικειμένων (π.χ. αεροπλάνα, φιάλες κ.λπ.)

#### *Έμμεση γεωαναφορά*

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, «georeferencing» είναι ο μετασχηματισμός του νέφους σημείων από το σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή σε ένα εξωτερικό (γεωδαιτικό) σύστημα συντεταγμένων, το οποίο μπορεί να είναι είτε τοπικό σύστημα

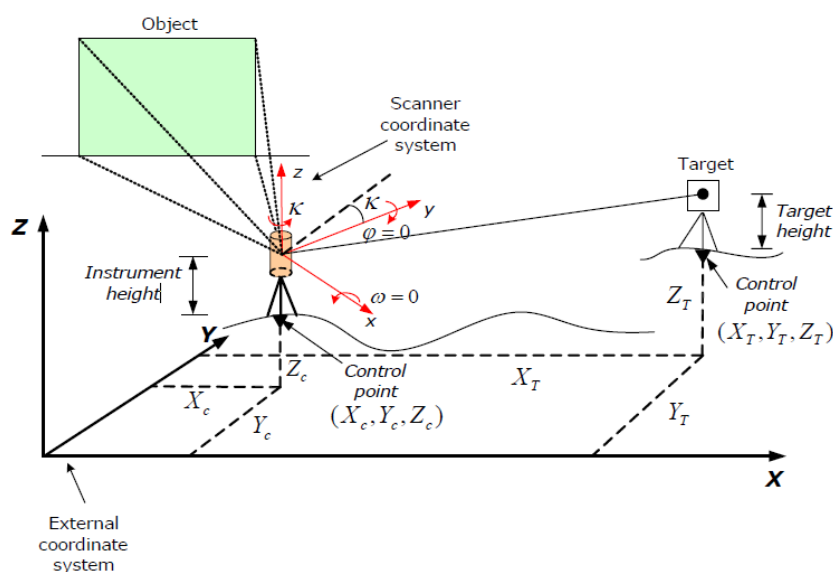
συντεταγμένων είτε κρατικό. Στην έμμεση γεωαναφορά, γίνεται χρήση στόχων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες, ώστε να γίνει ο μετασχηματισμός του νέφους σημείων στο σύστημα των στόχων. Η σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων περιγράφεται από τις έξι παραμέτρους μετασχηματισμού. Ο συντελεστής κλίμακας δεν σχετίζεται με τη διαδικασία μετασχηματισμού (Gordon & Lichti, 2004).

#### Άμεση γεωαναφορά

Όταν χρησιμοποιείται η άμεση γεωαναφορά, ο σαρωτής τοποθετείται σε ένα σημείο με γνωστές συντεταγμένες (γεωδαιτικές συντεταγμένες) όπου κεντρώνεται και οριζοντιώνεται. Ακολουθεί ο προσανατολισμός του προς ένα γνωστό στόχο, όπως ακριβώς γίνεται με ένα γεωδαιτικό σταθμό (Total Station). Η εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.11) παρουσιάζει αυτή την διαδικασία. Οι πληροφορίες της θέσης και του προσανατολισμού καθώς και το ύψος οργάνου εισάγονται στο λογισμικό του σαρωτή πριν την σάρωση, ή χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια επεξεργασίας των δεδομένων, μετά την σάρωση (Gordon, 2005).

Οι σαρωτές επομένως θα πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με:

1. οπτική κέντρωση
2. μια αεροστάμμη για δύσκολη οριζοντίωση και αντισταθμιστή δύο αξόνων για ακριβή οριζοντίωση
3. ένα τηλεσκόπιο για τη στόχευση του στόχου
4. ένα σημάδι από το οποίο μετράται το ύψος του οργάνου



Εικόνα 3.11: Άμεση γεωαναφορά  
(Πηγή: Gordon, 2005)

### 3.4 Ταξινόμηση σφαλμάτων μέτρησης με επίγειους σαρωτές laser

Όπως σε κάθε τοπογραφική τεχνική, οι μετρήσεις με επίγειους σαρωτές laser δεν είναι τέλειες και υπόκεινται σε σφάλματα που προκαλούνται από διάφορα είδη παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν την διαδικασία της αποτύπωσης. Η προσεκτική εξέταση όλων αυτών των παραγόντων και σφαλμάτων που εισάγονται στα δεδομένα παρέχουν μια σταθερή βάση για την αξιολόγηση και την ποιότητα των δεδομένων και την απόδοση του σαρωτή, η οποία είναι απαραίτητη για τη λήψη απόφασης σχετικά με την καταλληλότητα του σε μία ειδική εφαρμογή.

Αρχικά θα πρέπει να γίνει μιας σαφής διάκριση μεταξύ των εννοιών «δεδομένα» και «πληροφορίες», οι οποίες συχνά συγχέονται. Τα δεδομένα είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ειδικά στην περίπτωση των επίγειων σαρωτών laser - TLS , τα δεδομένα είναι νέφη σημείων του αντικειμένου αποτύπωσης. Οι πληροφορίες από την άλλη, είναι τα επεξεργασμένα δεδομένα, π.χ. ένα τρισδιάστατο - 3D - μοντέλο παράγεται από το νέφος σημείων του αντικειμένου (Reshetyuk, 2009).

Η πιο έγκυρη και τελική ένδειξη της ποιότητας των δεδομένων δίνεται από την ορθότητα, τον βαθμό συμφωνίας μεταξύ μιας μέτρησης και της ονομαστικής αξία της ποσότητας που μετράται (Iavarone, 2002). Στους σαρωτές laser, μπορεί να χρησιμοποιηθεί «η ορθότητα των συντεταγμένων των τρισδιάστατων - 3D - σημείων που υπάρχουν στο νέφος σημείων», σαν ο σχετικός δείκτης της ποιότητας των δεδομένων. Δεδομένου ότι το τελικό προϊόν μέτρησης του σαρωτή laser είναι συχνά ένα 3D μοντέλο, η «ορθότητα μοντέλου» μπορεί να επιλεγεί σαν ο σχετικός δείκτης της ποιότητας των πληροφοριών που λαμβάνονται μέσω της σάρωσης με laser. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η ορθότητα αντανακλά το επίπεδο συμμόρφωσης μεταξύ των δεδομένων ή του μοντέλου και του πραγματικού κόσμου.

Ένας άλλος δείκτης της ποιότητας των δεδομένων (ή πληροφοριών) είναι η ακρίβεια, δηλαδή ο βαθμός της επαναληπτικότητας ενός μεγέθους σε μια σειρά μετρήσεων. Αυτή αρκετά συχνά συγχέεται με την ορθότητα. Η ακρίβεια μπορεί να εφαρμοστεί στα αρχικά δεδομένα, στα επεξεργασμένα δεδομένα και στα τρισδιάστατα - 3D - μοντέλα. Μια ρεαλιστική εκτίμηση της ακρίβειας των τρισδιάστατων - 3D - συντεταγμένων του σημείου θα είναι ο ακόλουθος 3x3 πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας:

$$C_{3Dpoint} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Όπου τα διαγώνια στοιχεία είναι οι αποκλίσεις των συντεταγμένων του σημείου, και τα στοιχεία εκτός της διαγώνιου είναι οι συσχετισμοί. Αυτός ο πίνακας μπορεί να προέλθει από τον πολλαπλασιασμό των μεμονωμένων σφαλμάτων που σχετίζονται με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των δεδομένων (Lichti & Gordon, 2004).

Αν όλα τα σημαντικά συστηματικά σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις του σαρωτή έχουν διορθωθεί, και τα τυπικά σφάλματα στον προσδιορισμό τους περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του πίνακα  $C_{3Dpoint}$ , τότε ο πίνακας εκφράζει την ακρίβεια των τρισδιάστατων - 3D - συντεταγμένων του σημείου.

Η ακρίβεια του τρισδιάστατου μοντέλου επηρεάζεται από την ποιότητα των μετρήσεων και την μοντελοποίηση των δεδομένων, και συνήθως υπερβαίνει την ακρίβεια της μέτρησης του σαρωτή (Iavarone, 2002). Τρισδιάστατοι αλγόριθμοι μοντελοποίησης επιτρέπουν στο χρήστη να βελτιώσει αρκετά την ακρίβεια, αν και ο ρόλος τους δεν πρέπει να υπερεκτιμάται. Ωστόσο, το λογισμικό μοντελοποίησης δεν μπορεί να λύσει όλα τα προβλήματα (Blais, 2003) δεδομένου ότι η ποιότητα του τρισδιάστατου μοντέλου εξαρτάται από τις μετρήσεις και είναι αδύνατο να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια από αναξιόπιστα αποτελέσματα μέτρησης. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι μοντελοποίησης είναι συχνά δύσκολο να αναλυθούν.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία μέτρησης και ως αποτέλεσμα την ποιότητα των δεδομένων. Η διερεύνηση αυτών των παραγόντων - πηγών σφάλματος στις μετρήσεις με επίγειους σαρωτές laser είναι μάλλον πολύπλοκη, λόγω του μεγάλου αριθμού τους και της αλληλοσχετίσης που υπάρχει μεταξύ αυτών (Baltsavias, 1999a). Η πολυπλοκότητα αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι οι σαρωτές laser ποικίλουν στο σχεδιασμό, π.χ. λειτουργούν σε διαφορετικά μήκη κύματος και χρησιμοποιούν διαφορετικές μονάδες εκτροπής δέσμης. Ο σχεδιασμός των σαρωτών laser είναι αρκετά περίπλοκος, με πολλά οπτικά, ηλεκτρικά και μηχανικά σύνολα, καθένα από τα οποία συμβάλλει στο συνολικό τελικό σφάλμα των μετρημένων τιμών.

Τα σφάλματα στις μετρήσεις με παλμικούς time-of-flight, TOF, σαρωτές laser μπορούν να υποδιαιρεθούν στις ακόλουθες ομάδες (Staiger, 2005) και (Gordon, 2005):

- οργάνου μέτρησης
- αντικείμενου
- περιβάλλοντος
- γεωαναφοράς

Ο Gordon (2005) διακρίνει τις ακόλουθες ομάδες σφαλμάτων:

- σφάλματα υλικού
- σφάλματα δεδομένων
- σφάλματα περιβάλλοντος
- σφάλματα ανάκλασης επιφάνειας
- σφάλματα κεντραρίσματος στόχου
- σφάλματα γεωαναφοράς

Οι Lichti και Gordon (2004) ταξινομούν τα σφάλματα των επίγειων σαρωτών laser απλά σε δύο ομάδες:

- εσωτερικά (οργάνου μέτρησης)
- εξωτερικά (εδώ θα μπορούσε κανείς να συμπεριλάβει τα σφάλματα λόγω χαρακτηριστικών του αντικείμενου που σχετίζεται με τη σάρωση, του περιβάλλοντος και τα σφάλματα της γεωαναφοράς).

Ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση των σφαλμάτων που αναφέρθηκαν.

### **3.4.1 Σφάλματα οργάνου μέτρησης**

Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στο σχεδιασμό του σαρωτή. Μετά τις εκτιμήσεις των Hebert και Krotkov (1992) και την εφαρμογή τους στον επίγειο σαρωτή laser, διακρίνονται τα ακόλουθα σφάλματα οργάνου μέτρησης:

Α. Θεμελιώδη, δηλαδή τα σφάλματα που σχετίζονται με την φυσική του τηλέμετρου του laser. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στους φυσικούς περιορισμούς της διακύμανσης του laser, και δεν μπορούν να αφαιρεθούν ή να μειωθούν.



Β. Σφάλματα που αφορούν το υλικό (hardware) του σαρωτή, συμπεριλαμβανομένου του αποστασιόμετρου laser, της μονάδας εκτροπής της δέσμης laser, του συστήματος μέτρησης γωνιών και τα σφάλματα αξόνων. Τα σφάλματα αυτά, μπορεί ενδεχομένως να απομακρύνονται ή να ελαχιστοποιούνται με τη βελτίωση του σχεδιασμού του συστήματος του οργάνου ή με την βαθμονόμηση του.

Τα σφάλματα οργάνου μέτρησης έχουν και τυχαίες και συστηματικές επιδράσεις στις μετρήσεις με σαρωτή laser. Τα συστηματικά σφάλματα αξίζουν ιδιαίτερα μεγάλης προσοχής διότι οι σαρωτές laser, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές συσκευές αποτύπωσης, δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν και να ρυθμιστούν από τον χρήστη ακολουθώντας τυποποιημένες διαδικασίες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα η ακρίβεια μιας μέτρησης με το σύστημα του σαρωτή laser περιορίζεται από:

#### *A. Σφάλματα του τηλέμετρου του σαρωτή laser*

Η απόσταση είναι ένα θεμελιώδες μέγεθος στον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου (Lichti & Gordon, 2004). Επομένως η ακρίβεια και η ορθότητα στη μέτρηση αποστάσεων από ένα σαρωτή laser αποτελούν αντικείμενα εκτεταμένης έρευνας. Τα σφάλματα που επηρεάζουν την μέτρηση μιας απόστασης από ένα σαρωτή laser είναι:

#### Τυχαία σφάλματα

Καθορίζουν την ακρίβεια της μέτρησης μιας απόστασης από ένα παλμικό time-of-flight - TOF - laser. Η ακρίβεια μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση (Koskinen et al., 1991):

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \sigma_t \quad (3.12)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στον αέρα και  $\sigma_t$  είναι η μεταβλητότητα του χρόνου.

#### Συστηματικά σφάλματα

Αυτά τα σφάλματα περιορίζουν την ακρίβεια των μετρήσεων, και είναι αδύνατο να εξαλειφθούν.

### *Β. Σφάλματα στη μονάδα εκτροπής δέσμης και στο σύστημα μέτρησης γωνιών*

Ο συνδυασμός της μονάδας εκτροπής της δέσμης laser και του συστήματος μέτρησης γωνιών του οργάνου είναι υπεύθυνος για τη συλλογή δεδομένων, και την δημιουργία των νεφών σημείων. Αυτός ο συνδυασμός, εισάγει σφάλματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την ακρίβεια και την ορθότητα των μετρήσεων (Reshetyuk, 2009).

### *Γ. Σφάλματα αξόνων*

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη των διαδικασιών βαθμονόμησης ενός σαρωτή laser είναι να αναπτυχθεί ένα γεωμετρικό μοντέλο του σαρωτή. Το «κοντινότερο», από άποψη τρόπου λειτουργίας, στο σαρωτή γεωδαιτικό όργανο, είναι ένας γεωδαιτικός σταθμός με ανακλαστήρα (Total Station). Αν και το γεωμετρικό μοντέλο του γεωδαιτικού σταθμού δεν μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως στο σαρωτή, μπορεί να αποτελέσει το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη ενός μοντέλου παρόμοιου με τον σαρωτή, για τον έλεγχο και τον εντοπισμό των σφαλμάτων. Βάση της υπόθεσης αυτής, μπορούν να θεωρηθούν για ένα σαρωτή laser οι παρακάτω άξονες (εικόνα 3.12):

#### Κάθετος άξονας

Είναι ο άξονας περιστροφής της κεφαλής σάρωσης. Είναι δυνατό ο άξονας αυτός να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο σάρωσης, δηλαδή το επίπεδο στο οποίο η δέσμη laser κινείται στην κατακόρυφη διεύθυνση.

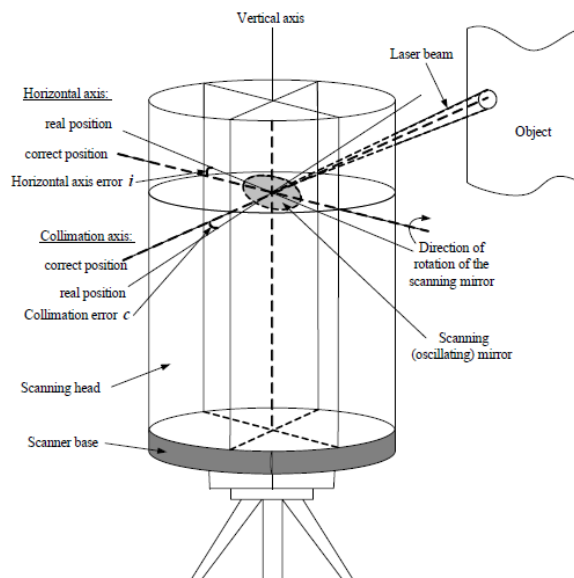
#### Άξονας ευθυγράμμισης

Υποθέτοντας ότι η αποκλίνουσα δέσμη laser είναι κωνικού σχήματος, αυτός είναι ο άξονας ο οποίος διέρχεται μέσω του κέντρου του κατόπτρου σάρωσης και το κέντρο της κηλίδας laser επί της επιφάνειας του αντικειμένου (Reshetyuk, 2009). Ο άξονας ευθυγράμμισης του σαρωτή laser συμπίπτει με την ακτίνα laser.

#### Οριζόντιος άξονας

Ο άξονας περιστροφής του κατόπτρου σάρωσης.

Λόγω των κατασκευαστικών ανοχών, οι άξονες αυτοί δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένοι, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα.



Εικόνα 3.12: Άξονες σαρωτή laser  
(Πηγή: Reshetyuk, 2009)

Ακολουθεί πίνακας (πίνακας 3.2) με τις εκτιμήσεις των σφαλμάτων των δύο αξόνων, άξονα ευθυγράμμισης και οριζόντιου άξονα, σε διάφορους τύπους σαρωτών laser.

Scanner	Author (s)	$c$ °	Std. °	$i$ °	Std. °
Imager 5003	Schulz and Ingensand (2004a)	0.003	No data	0.027	No data
iQsun 880	Lichti and Franke (2005)	0.028	0.0004	-0.054	0.0008
Imager 5003	Neitzel (2006)	-0.013	0.003	-0.032	0.003

Πίνακας 3.2: Εκτίμηση των σφαλμάτων σε σαρωτές laser  
(Πηγή: Reshetyuk, 2009)

### 3.4.2 Σφάλματα αντικειμένου σάρωσης

Αυτή η κατηγορία σφαλμάτων σχετίζεται με τα αντικείμενα σάρωσης. Η πρώτη και κύρια πηγή για αυτά τα σφάλματα είναι η αντανάκλαση της επιφάνειας του αντικειμένου. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις με επίγειο σαρωτή laser, είναι μια τοπογραφική τεχνική αποτύπωσης στην οποία γίνεται χρήση ανακλαστήρα, αυτό συνεπάγεται ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απόστασης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αντανάκλαση. Η αντανάκλαση της επιφάνειας του αντικειμένου με τη σειρά της επηρεάζει το μέγεθος SNR σε μεγάλο βαθμό (Thiel & Wehr, 2004).

Η αντανάκλαση ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ενέργειας της ακτίνας laser που προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και της ενέργειας της ακτίνας laser που αντανακλάται από αυτήν (Ingensand et al., 2003). Αυτή εξαρτάται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τις ιδιότητες του υλικού του αντικειμένου (ηλεκτρική διαπερατότητα, μαγνητική διαπερατότητα, αγωγιμότητα)
- το χρώμα της επιφάνειας
- το μήκος κύματος της ακτίνας laser
- τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας laser
- την τραχύτητα της επιφανείας του αντικειμένου
- την θερμοκρασία της επιφάνειας. Κατά τη σάρωση ενός θερμού στόχου π.χ. σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, η ακτινοβολία που εισάγεται από την καυτή επιφάνεια μειώνει το SNR και επομένως την ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης (Määttä et al., 1993)
- την υγρασία της επιφάνειας

### 3.4.3 Σφάλματα περιβάλλοντος

Παράγοντες του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η πίεση, η σχετική υγρασία, ο φωτισμός κ.λπ., είναι σημαντικοί κατά τις διάρκειες των μετρήσεων με επίγειους σαρωτές laser, και συμβάλλουν στο σφάλμα μέτρησης.

### 3.4.4 Σφάλματα γεωαναφοράς

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σφάλματα που σχετίζονται με την προσέγγιση που έχει επιλεγεί για την γεωαναφορά των νεφών σημείων - point clouds.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια και την ποιότητα των δεδομένων κατά την διαδικασία της γεωαναφοράς είναι οι ακόλουθοι (Lichti & Gordon, 2004):

1. η ακρίβεια του προσδιορισμού των συντεταγμένων της θέσης του σαρωτή και του στόχου προσανατολισμού
2. η ακρίβεια προσδιορισμού του αζιμούθιου ( $\kappa$ ) από τη στάση του σαρωτή στο στόχο
3. τα σφάλματα εγκατάστασης τα οποία αφορούν:
  - την οριζοντίωση

- την κέντρωση
- τη στόχευση του στόχου

### 3.5 Επίγειος σαρωτής laser ScanStation 2

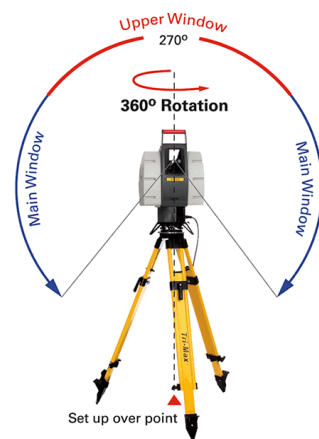
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση ενός επίγειου σαρωτή laser, μέσω πειραματικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τον επίγειο σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica Geosystems (εικόνα 3.13).

Πρόκειται για έναν επίγειο σαρωτή που χρησιμοποιεί ακτίνα laser υψηλής ακριβείας για την καταγραφή σημείων. Έχει τη δυνατότητα καταγραφής μέχρι και 50.000 σημείων το δευτερόλεπτο και σε απόσταση μέχρι και 300 m (90% επιφάνεια ανακλαστικότητας). Επίσης μπορεί να καταγράψει σημεία σε απόσταση μικρότερη του ενός χιλιοστού μεταξύ τους. Λόγω του πλήθους των σημείων που λαμβάνει και της απόστασης μεταξύ τους, το σύνολο αυτών ονομάζεται νέφος σημείων (point cloud).



*Εικόνα 3.13: Επίγειος σαρωτής laser ScanStation 2*

Είναι παλμικός σαρωτής που στέλνει επαναλαμβανόμενους παλμούς ακτίνων laser με δυνατότητα αποτύπωσης 360° στο οριζόντιο και 270° στο κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια δύο περιστρεφόμενων κατόπτρων που κατευθύνουν την ακτίνα laser στον κατακόρυφο άξονα και με την περιστροφή του σαρωτή στον οριζόντιο άξονα (εικόνα 3.14).



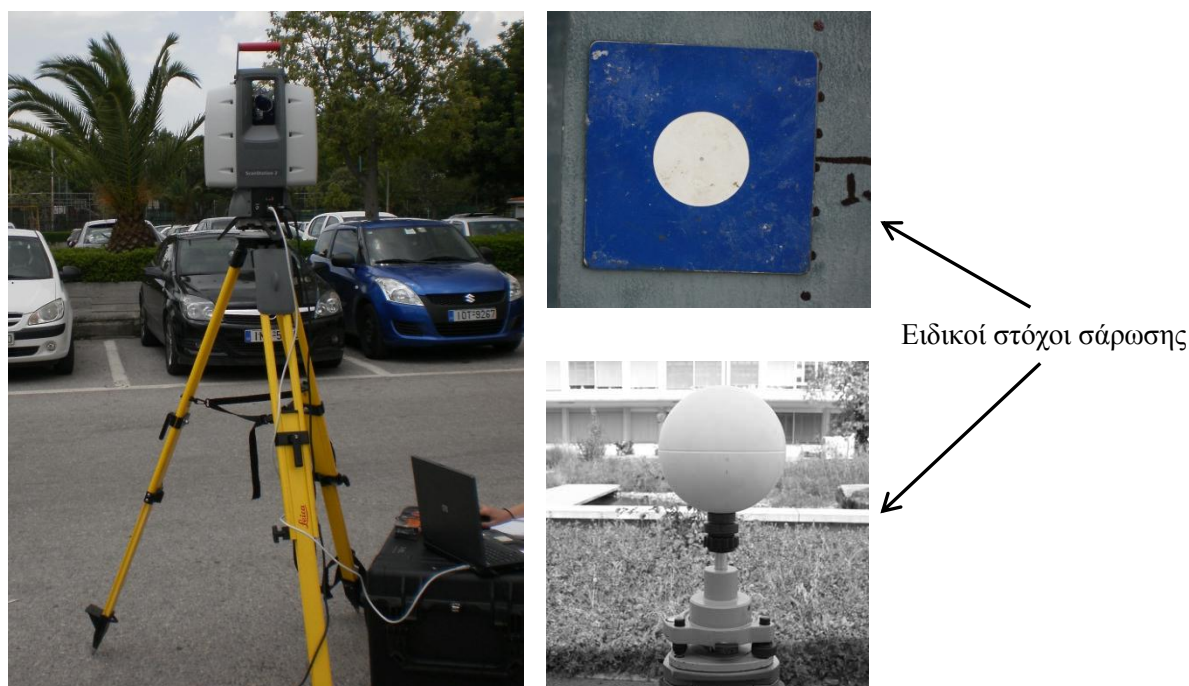
**Εικόνα 3.14: Άξονες περιστροφής**  
(Πηγή: <http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/>)

Η γωνιακή ανάλυση του σαρωτή είναι 60  $\mu$ rad και η ακρίβεια μίας μέτρησης ως προς τη θέση και απόσταση είναι 6 mm και 4 mm αντίστοιχα. Επιπλέον διαθέτει ισοσταθμητή και στους δύο άξονες (dual axis compensator), ηλεκτρονικό σύστημα κίνησης (servo), αυτόματη αναγνώριση στόχων και σκόπευση με τη βοήθεια ψηφιακής οθόνης (imaging). Συγκεκριμένα, ο σαρωτής αυτός προϋποθέτει για το χειρισμό του σύνδεση με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η σκόπευση γίνεται με τη βοήθεια ψηφιακής εικόνας (φωτογραφίας) που λαμβάνεται από το σαρωτή και με τη βοήθεια του λογισμικού Cyclone της Leica Geosystems. Στον φορητό υπολογιστή ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι για την αποτύπωση, και με αυτό το τρόπο καταγράφονται τα δεδομένα που λαμβάνονται και στη συνέχεια, αν απαιτείται, μπορούν να υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία.

Οι διαστάσεις του σαρωτή είναι 265 mm x 370 mm x 510 mm (βάθος x πλάτος x ύψος) και το καθαρό του βάρος 18,5 kg. Για την λειτουργία του απαιτείται επιπλέον τροφοδοσία, η οποία παρέχεται από συσσωρευτές (μπαταρίες) που ο καθένας έχει βάρος 12 kg.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιούνται (εικόνα 3.15):

- Οι μπαταρίες για τη τροφοδοσία του συστήματος
- Η μονάδα ελέγχου που αποτελείται από ένα φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή σε σύνδεση με το σαρωτή. Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το λογισμικό σάρωσης και επεξεργασίας των δεδομένων
- Βασικά παρελκόμενα που συνοδεύουν το σύστημα όπως τρίποδας για να τοποθετηθεί το όργανο και ειδικοί στόχοι σάρωσης



Εικόνα 3.15: Σύστημα σαρωτή laser

(Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το συγκεκριμένο όργανο μπορεί να βρει κανείς στην επίσημη ιστοσελίδα της Leica Geosystems <http://hds.leica-geosystems.com//Leica-ScanStation-2>.)

### 3.6 Παραδείγματα βαθμονόμησης επίγειων σαρωτών laser

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (βλ. ενότητα 2.3), δεν υπάρχουν για το όργανο τυποποιημένες διαδικασίες βαθμονόμησης. Οι προδιαγραφές των κατασκευαστών βασίζονται σε προσωπικές τακτικές βαθμονόμησης. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να διερευνηθούν οι σαρωτές για να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των εκτιμήσεων της ακρίβειας και να αναπτυχθούν τυποποιημένα μοντέλα και διαδικασίες βαθμονόμησης.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση τα τελευταία χρόνια. Περιλαμβάνουν κυρίως τη διερεύνηση της ακρίβειας των σαρωτών και συγκρίνουν την απόδοση διάφορων σαρωτών χρησιμοποιώντας στόχους πεδίου ως αναφορά. Στην πραγματικότητα αυτή η ιδέα δεν είναι καινούργια. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των laser range imaging devices, τους προκάτοχους των σύγχρονων σαρωτών laser.

Αρκετά άρθρα έχουν αφιερωθεί στην πλήρη βαθμονόμηση του οργάνου.

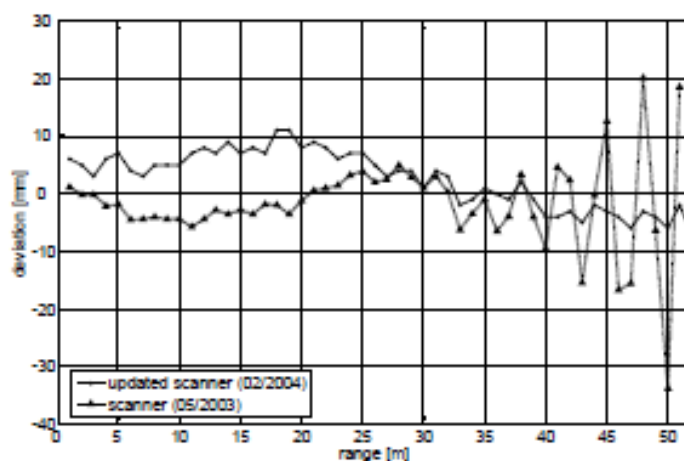
Στην παρούσα υποενότητα θα αναφερθούν ορισμένα μόνο από αυτά, τα οποία περιγράφουν πειραματικούς ελέγχους, με στόχο την ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών βαθμονόμησης για την τεχνολογία των επίγειων σαρωτών laser, Terrestrial Laser Scanning – TLS.

*1<sup>ο</sup> παράδειγμα: Metrological Aspects in Terrestrial Laser - Scanning Technology*

Ο Ingensand (2006), στο άρθρο που δημοσίευσε «Metrological Aspects in Terrestrial Laser - Scanning Technology» αναφέρει τις πειραματικές διατάξεις και διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση επίγειου σαρωτή laser τύπου θεοδολίχου.

Η μέθοδος που εφάρμοσε, βασίστηκε στην προσέγγιση της βαθμονόμησης των επιμέρους συνιστωσών του οργάνου. Αρχικά ασχολήθηκε με την συνιστώσα της κατεύθυνσης. Διαδικασίες οι οποίες εφαρμόζονται σε ένα θεοδόλιχο, λήφθηκαν υπόψη προκειμένου να ελεγχθούν τα σφάλματα του οργάνου που οφείλονται στην διεύθυνση της ακτίνας.

Ακολούθησε η διακρίβωση της συνιστώσας της απόστασης. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο *διαφοράς φάσης*. Τα αποτελέσματα της απόκλισης των μετρήσεων αυτών φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.16).



**Εικόνα 3.16: Απόκλισεις μετρήσεων απόστασης  
(Πηγή: Ingensand, 2006)**

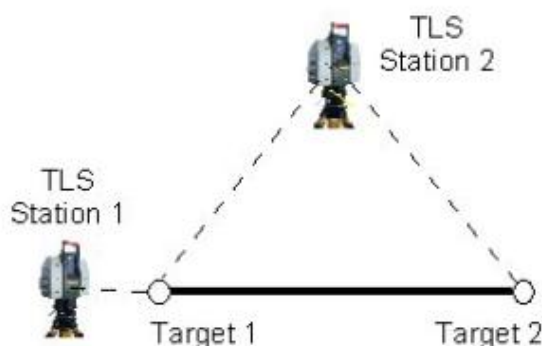


2<sup>ο</sup> παράδειγμα: Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) - A Contribution to a Future ISO Standard

Ο Gottwald (2008) στο άρθρο που δημοσίευσε «Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) - A Contribution to a Future ISO Standard», επιχείρησε μέσω μετρολογικών ελέγχων, τον σχεδιασμό ενός μελλοντικού προτύπου ISO για την βαθμονόμηση επίγειου σαρωτή laser. Οι διαδικασίες και τα αποτελέσματα του ελέγχου περιγράφονται συνοπτικά στην συνέχεια.

*A. Απλοποιημένες διαδικασίες ελέγχου*

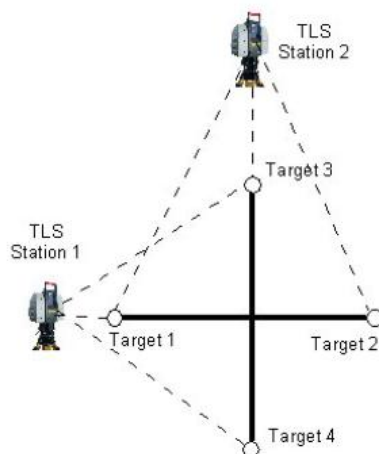
Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν απλές μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών, σε πεδία ελέγχου που υλοποιούνται για τον σκοπό αυτό. Το πρώτο πεδίο ελέγχου περιλαμβάνει δυο στόχους τοποθετημένους στα άκρα μιας γραμμής ελέγχου, ένα πρώτο σημείο στάσης σε ευθυγραμμία με τους στόχους και ένα δεύτερο σημείο στάσης κάθετα σε αυτούς (εικόνα 3.17).



**Εικόνα 3.17: Πεδίο ελέγχου 1**  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Η συγκεκριμένη διάταξη περιλαμβάνει μετρήσεις αποστάσεων.

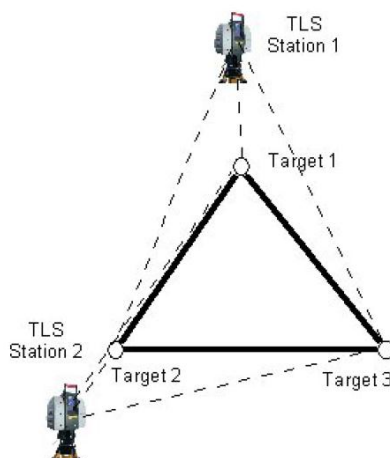
Το δεύτερο πεδίο ελέγχου περιλαμβάνει τέσσερις στόχους τοποθετημένους στα άκρα δύο κάθετων μεταξύ τους γραμμών, ένα σημείο τοποθέτησης του οργάνου σε ευθυγραμμία με την μία γραμμή ελέγχου και ένα δεύτερο σημείο τοποθέτησης σε ευθυγραμμία με την άλλη γραμμή ελέγχου (εικόνα 3.18).



**Εικόνα 3.18: Πεδίο ελέγχου 2**  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Η διάταξη έλεγχου περιλαμβάνει μετρήσεις αποστάσεων.

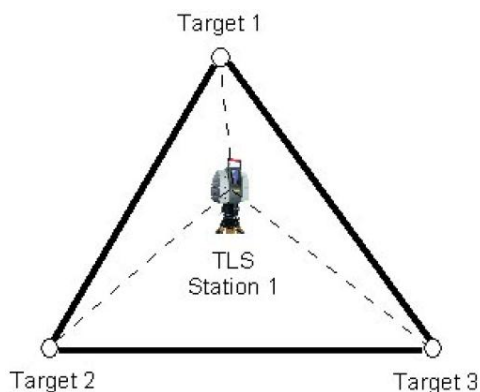
Το τρίτο πεδίο ελέγχου περιλαμβάνει τρεις στόχους τοποθετημένους σε ένα σχεδόν ισόπλευρο τρίγωνο και δύο σημεία στάσης οργάνων εκτός του τριγώνου που δημιουργείται (εικόνα 3.19).



**Εικόνα 3.19: Πεδίο ελέγχου 3**  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Και σε αυτή τη διάταξη πραγματοποιούνται μετρήσεις αποστάσεων.

Το τέταρτο πεδίο ελέγχου περιλαμβάνει τρεις στόχους τοποθετημένους σε ένα σχεδόν ισόπλευρο τρίγωνο, και ένα σημείο στάσης του οργάνου εσωτερικά του τριγώνου που σχηματίζουν οι στόχοι (εικόνα 3.20).



Εικόνα 3.20: Πεδίο ελέγχου 4  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις γωνιών.

Μετά από εφαρμογή των απλοποιημένων διαδικασιών ελέγχου του TLS, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι (πίνακες 3.3, 3.4, 3.5):

Procedure	TLS	Line	TLS Station1 [m]	TLS Station2 [m]	$\Delta=S1-S2$ [mm]	Tolerance S=99% [mm]	Reference TCRP120 [mm]
SDP1	SS2	1-2	44.198	44.199	-1	14	44.203
	6000	1-2	-	-	-	-	-
	SS2nc	1-2	-	-	-	-	-
SDP2	SS2	1-2	44.900	44..899	1	14	44.905
	6000	1-2					
	SS2nc	1-2					
<b>Total time</b>	< 60 min						

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα μετρήσεων 1  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Procedure	TLS	Line	TLS Station1 [m]	TLS Station2 [m]	$\Delta=S1-S2$ [mm]	Tolerance S=99% [mm]	Reference TCRP120 [mm]
CDP1	SS2	1-2	43.046	43.046	0	14	43.049
		3-4	47.478	47.481	-3		47.481
	6000	1-2	43.050	43.048	2	14	43.049
		3-4	47.485	47.483	2		47.481
	SS2nc	1-2	42.812	42.724	88	14	42.925
		3-4	47.009	47.105	-96		47.226
CDP2	SS2	1-2	43.046	43.046	0	14	43.049
		3-4	45.911	45.911	0		45.913
	6000	1-2	43.050	43.048	2	14	43.049
		3-4	45.913	45.914	-1		47.481
	SS2nc	1-2	42.812	42.724	88	14	42.925
		3-4	45.136	44.917	219		45.032
<b>Total time</b>	≈60 min						

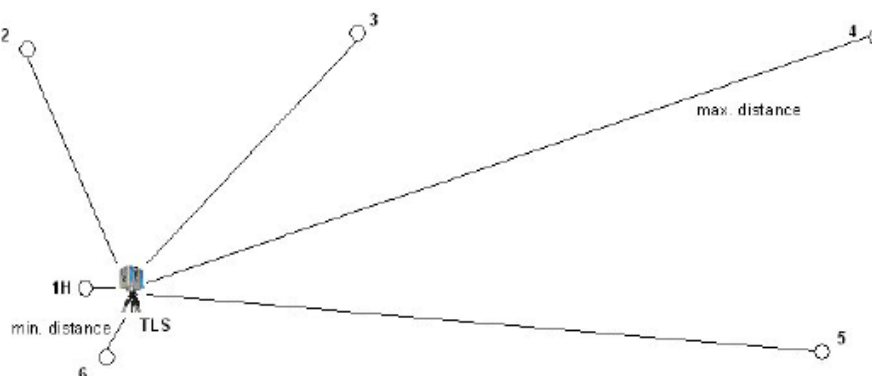
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα μετρήσεων 2  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Procedure	TLS	Line	TLS Station1 [m]	TLS Station2 [m]	$\Delta=S1-S2$ [mm]	Tolerance S=99% [mm]	Reference TCRP120 [mm]
TP1	SS2	1-2	45.595	45.598	-3	14	45.597
		3-4	47.478	47.481	-3		47.481
			36.051	36.051	0		36.055
	6000	1-2	45.599	45.598	1	14	45.597
		3-4	47.485	47.483	2		47.481
			36.055	36.049	6		36.055
	SS2nc	1-2	42.674	42.671	3	14	42.787
		3-4	47.009	47.105	-96		47.226
			36.828	36.758	70		36.931
TP2	SS2	1-2	45.595	45.598	-3	14	45.597
		3-4	45.911	45.911	0		45.913
			39.758	39.759	-1		39.762
	6000	1-2	45.599	45.598	1	14	45.597
		3-4	45.913	45.914	-1		45.913
			39.762	39.757	5		39.762
	SS2nc	1-2	42.674	42.671	3	14	42.787
		3-4	45.136	44.917	219		45.032
			40.280	40.475	-195		40.386
<b>Total time</b>	≈60 min						

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα μετρήσεων 3  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

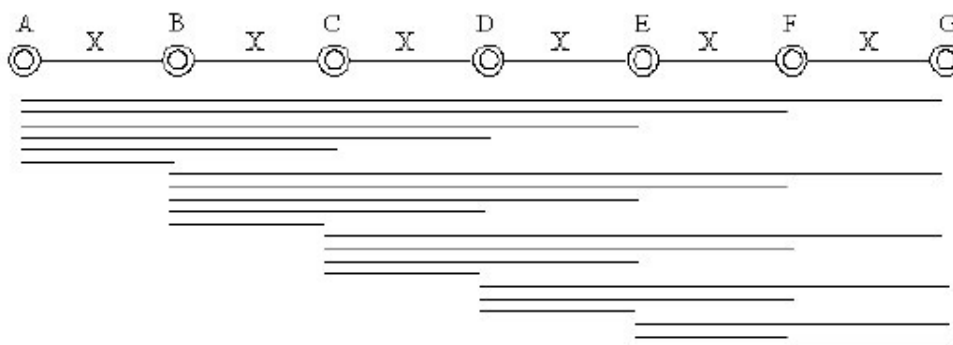
#### Διαδικασίες πλήρους ελέγχου

Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών, στις οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να καθορίζονται ορισμένες παράμετροι (σφάλμα οριζοντίωσης του οργάνου, σφάλμα απόστασης κ.λπ.). Για το λόγο αυτό οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν περισσότερο σύνθετες διατάξεις. Η πρώτη περιλαμβάνει έξι στόχους περιμετρικά ενός σημείου στάσης του οργάνου (εικόνα 3.21).



Εικόνα 3.21: Πεδίο ελέγχου 1  
(Πηγή: Gottwald, 2008)

Η δεύτερη περιλαμβάνει επτά σημεία σε ευθυγραμμία (εικόνα 3.22).

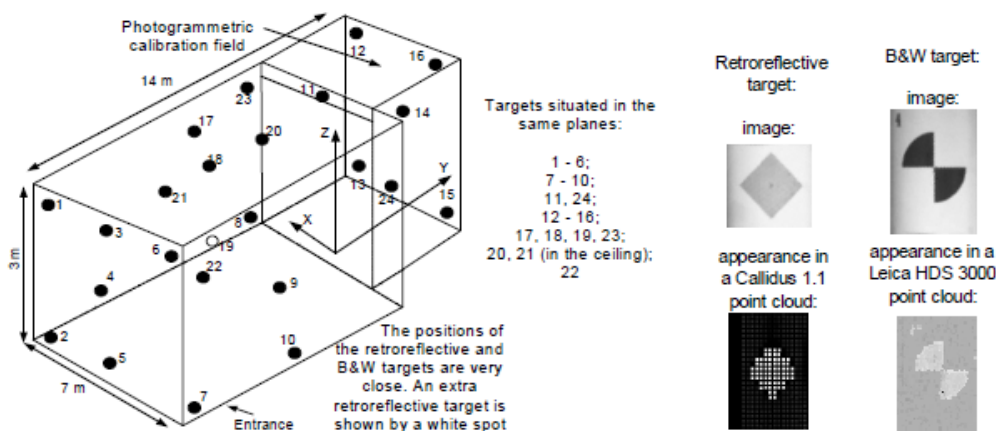


**Εικόνα 3.22: Πεδίο ελέγχου 2**  
 (Πηγή: *Gottwald, 2008*)

Στις διατάξεις αυτές πραγματοποιούνται μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων, και στην συνέχεια ελέγχεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

3<sup>ο</sup> παράδειγμα: Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering

Ο Reshetyuk (2006) στο άρθρο που δημοσίευσε, «Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering», ερευνά την επιρροή των συστηματικών σφαλμάτων του οργάνου, τα οποία αναφέρει ως παραμέτρους βαθμονόμησης, στην ακρίβεια των συντεταγμένων του στόχου στα νέφη σημείων, στην ακρίβεια της απόστασης και στη γωνιακή ακρίβεια και ορθότητα. Το άρθρο τονίζει τα κυριότερα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν κατά την διάρκεια της ερευνητικής εργασίας. Για τους σκοπούς της έρευνας υλοποιήθηκε ένα πεδίο βαθμονόμησης. Πρόκειται για ένα δωμάτιο, του οποίου οι τοίχοι και το πάτωμα έχουν καλυφθεί με στόχους (εικόνα 3.23).



**Εικόνα 3.23: Πεδίο ελέγχου**  
 (Πηγή: *Reshetyuk, 2006*)

Ακολούθησαν μετρήσεις των στόχων από τρία διαφορετικά όργανα. Τα στοιχεία των σαρωτών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3.6.

Scanner	No. of the targets in the point cloud	No. of scans	Resolution (hor°. / vert°. Or mm x mm)
Callidus 1.1	17, 17 and 16	1 scan each	0.125°/0.25°; 0.25°/0.25°, 0.25°/0.25° (5 scans averaged)
	7 (used in the angular precision and accuracy tests)	3	0.25°/0.25°
Leica HDS 3000	21, 23 7, 9, 8 and 10	1 scan each	10 x 10 mm 15 x 15 mm
	7 (used in the angular precision and accuracy tests)	6	5 x 5 mm
Leica HDS 2500	6, 6, 5, 5, 4 and 4	1 scan each	Same
	5 (used in the angular precision and accuracy tests)	3	Same

Πίνακας 3.6: Στοιχεία σαρωτών ελέγχου  
(Πηγή: Reshetyuk, 2006)

Έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις των σαρωτών laser (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων), τα στατιστικά αποτελέσματα είναι (πίνακες 3.7 και 3.8):

Helmert parameters	Callidus 1.1		Leica HDS 3000		Leica HDS 2500	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Translations, mm: $\Delta X$ $\Delta Y$ $\Delta Z$	Not estimated		0.3 0.3 0.5	0.7 0.6 1.3	0.2 0.2 0.4	1.2 0.7 4.7
Rotation angles ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ), °	0.010	0.022	0.005	0.029	0.003	0.034

Πίνακας 3.7: Ακρίβεια αποστάσεων  
(Πηγή: Reshetyuk, 2006)

Scanner	CALLIDUS 1.1	LEICA HDS 3000		LEICA HDS 2500	
		1st position	2nd position		
Precision (°)	Hor.	0.027	0.0015	0.0016	0.002
	Vert.	0.014	0.0008	0.0009	0.002
Accuracy (°)	Hor.	0.069	0.047	0.036	0.010
	Vert.	0.123	0.051	0.053	0.006

Πίνακας 3.8: Ακρίβεια γωνιών  
(Πηγή: Reshetyuk, 2006)

4<sup>ο</sup> παράδειγμα: Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ελέγχου Επίγειων Σαρωτών Laser

Οι Τσακίρη κ.α. (2005) στο άρθρο που δημοσίευσαν «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ελέγχου Επίγειων Σαρωτών Laser», παρουσιάζουν μια μεθοδολογία διακρίβωσης

συστημάτων επίγειας σάρωσης laser τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και στο πεδίο. Η μεθοδολογία βασίζεται στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων και στην χρήση σημείων ελέγχου. Αρχικά το άρθρο περιγράφει τις βασικές αρχές λειτουργίας των επίγειων σαρωτών και τη γεωμετρική αρχή που διέπει τις μετρήσεις καθώς και την μετατροπή τους σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Στην συνέχεια περιγράφει τη πειραματική διαδικασία συλλογής δεδομένων που ακολουθήθηκε.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον (εικόνα 3.24). Γίνεται χρήση μιας πρότυπης βάσης ελέγχου οργάνων EDM (Electronic Distance Meter) μήκους 50 m η οποία με τη σειρά της έχει μετρηθεί με διακριβωμένο όργανο μέτρησης μήκους.



*Εικόνα 3.24: Πρότυπη βάση ελέγχου EDM  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)*

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (συντεταγμένες στόχων) από τον σαρωτή laser παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακα 3.9).

Σημείο	X (m)	$\sigma_X$ (mm)	Y (m)	$\sigma_Y$ (mm)	Z (m)	$\sigma_Z$ (mm)
1	-0.478	0.4	1.171	0.4	-50.006	0.3
2	-0.289	0.3	1.049	0.4	-45.013	0.2
3	-0.097	0.1	0.933	0.1	-40.015	0.1
4	0.093	0.2	0.809	0.3	-35.020	0.2
5	0.283	0.3	0.691	0.1	-30.024	0.2
6	0.438	0.1	0.590	0.2	-26.027	0.2
7	0.667	0.1	0.441	0.2	-20.037	0.2
8	0.863	0.2	0.314	0.1	-15.065	0.1
9	1.052	0.0	0.196	0.1	-10.048	0.3
10	1.247	0.1	0.069	0.2	-5.066	0.3

*Πίνακας 3.9: Συντεταγμένες στόχων  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)*

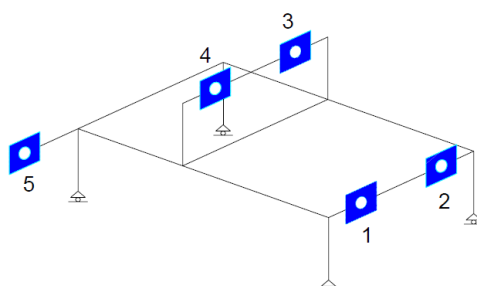
Ο προσδιορισμός του κέντρου κάθε στόχου έγινε επίσης με κλασσικές γεωδαιτικές μεθόδους, δηλαδή μετρήσεις γωνιών και μετρήσεις υψομετρικών διαφορών με

όργανα που είναι διακριβωμένα. Οι οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των στόχων που ήταν τοποθετημένοι στα βάθρα υπολογίστηκαν τόσο από τις γεωδαιτικές συντεταγμένες όσο και από τις συντεταγμένες των σαρώσεων. Ο πίνακας 3.10 δίνει τα παραπάνω αποτελέσματα μαζί με τις απόλυτες διαφορές τους.

Σχετική θέση βάθρων	Απόσταση από συν/νες σαρωτή (m)	Απόσταση από γεωδαιτικές συν/νες (m)	Απόλυτες διαφορές (mm)
1-2	4.9982	4.9996	1.4
2-3	5.0030	5.0005	2.5
3-4	5.0001	5.0002	0.1
4-5	5.0003	5.0054	5.1
5-6	4.0011	4.0005	0.6
6-7	5.9970	5.9980	1.0
7-8	4.9774	4.9780	0.6
8-9	5.0213	5.0200	1.3
9-10	4.9879	4.9845	3.4

Πίνακας 3.10: Αποστάσεις στόχων  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)

Στην συνέχεια, ακλούθησαν μετρήσεις σε περιβάλλον εξωτερικού χώρου, με το ίδιο όργανο. Πέντε στόχοι τοποθετήθηκαν σε ένα σταθερό πλαίσιο και σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 m (εικόνα 3.25). Οι αποστάσεις ελέγχονται με χρήση διακριβωμένων οργάνων EDM.



Εικόνα 3.25: Πλαίσιο στόχων  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 3.11) φαίνεται η ακρίβεια προσδιορισμού  $\sigma_0$  των συντεταγμένων των κέντρων των στόχων όπως προέκυψαν από το λογισμικό του σαρωτή, καθώς και από την εφαρμογή κατάλληλου αλγόριθμου.

Τυπικό σφάλμα	Συν/νες σαρώσεων από λογισμικό σαρωτή			Συν/νες σαρώσεων από αλγόριθμο		
	C15	C35	C55	FF15	FF35	FF55
$\sigma_0$ (m)	5.70E-04	6.17E-04	6.01E-04	7.97E-04	7.90E-04	8.43E-04

Πίνακας 3.11: Τυπικά σφάλματα μετασχηματισμών  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Η αναγκαιότητα της διακρίβωσης των σαρωτών laser είναι μεγάλη, κυρίως γιατί διαφαίνεται ότι η ακρίβεια των δεδομένων που προέρχονται από μετρήσεις με επίγειους σαρωτές, διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ διαφορετικών οργάνων. Λόγω έλλειψης τυποποιημένης βαθμονόμησης, που οφείλεται στη μικρή και μη μαζική παραγωγή των συστημάτων αυτών εξαιτίας του αυξημένου κόστους της μονάδας παραγωγής παλμού laser για μεγάλο βεληνεκές, η ακρίβεια που δίνεται από τους κατασκευαστές πρέπει να αντιμετωπίζεται πάντα με επιφύλαξη. Συνεπώς γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού μιας τυποποιημένης μεθοδολογίας διακρίβωσης μέσω πειραματικών μετρήσεων και ελέγχων. Αυτοί οι έλεγχοι περιλαμβάνουν μετρήσεις αποστάσεων.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι πειραματικές μετρήσεις και διατάξεις που πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια και την ποιότητα λειτουργίας ενός επίγειου σαρωτή laser τύπου TOF. Πρόκειται για απλούς μετρολογικούς ελέγχους, οι οποίοι περιλαμβάνουν μετρήσεις μηκών.

### 4.2 Πειραματική διαδικασία μετρολογικού ελέγχου

Οι πειραματικές μετρήσεις που περιγράφονται στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του επίγειου σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica Geosystems. Το σύστημα λειτουργεί με την χρήση εξωτερικού υπολογιστή και η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει με το λογισμικό πακέτο Cyclone.

#### 4.2.1 Έλεγχος απόστασης με βάση ελέγχου

Σε αυτή την υποενότητα περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της ακρίβειας του οργάνου στην μέτρηση των αποστάσεων. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε βάση ελέγχου που υλοποιήθηκε. Οι αποστάσεις της βάσης ελέγχθηκαν με χρήση διακριβωμένου οργάνου Total Station Leica TS30 (γεωδαιτικός σταθμός).

Η βάση ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε, υλοποιήθηκε εντός του χώρου του Τ.Ε.Ι. Αθήνας.

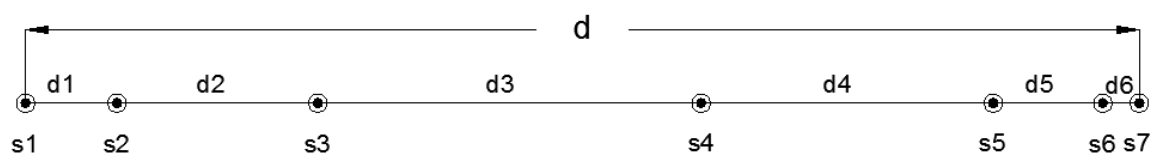
Η επιλογή της εξασφαλίζει εύκολη πρόσβαση και επανάληψη της διαδικασίας οποιαδήποτε στιγμή κριθεί αναγκαίο.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.1) φαίνεται η περιοχή εγκατάστασης του πεδίου ελέγχου στην μέτρηση των αποστάσεων.



*Εικόνα 4.1: Περιοχή εγκατάστασης βάσης ελέγχου  
(Πηγή: Google Earth)*

Η βάση ελέγχου αποτελείται από επτά (7) σημεία τοποθετημένα σε άνισες μεταξύ τους αποστάσεις, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.2). Τα σημεία αυτά σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή, μικρής ή και μηδενικής κλίσης. Το συνολικό μήκος της γραμμής ελέγχου είναι περίπου ίσο με 300 m.



Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση βάσης ελέγχου

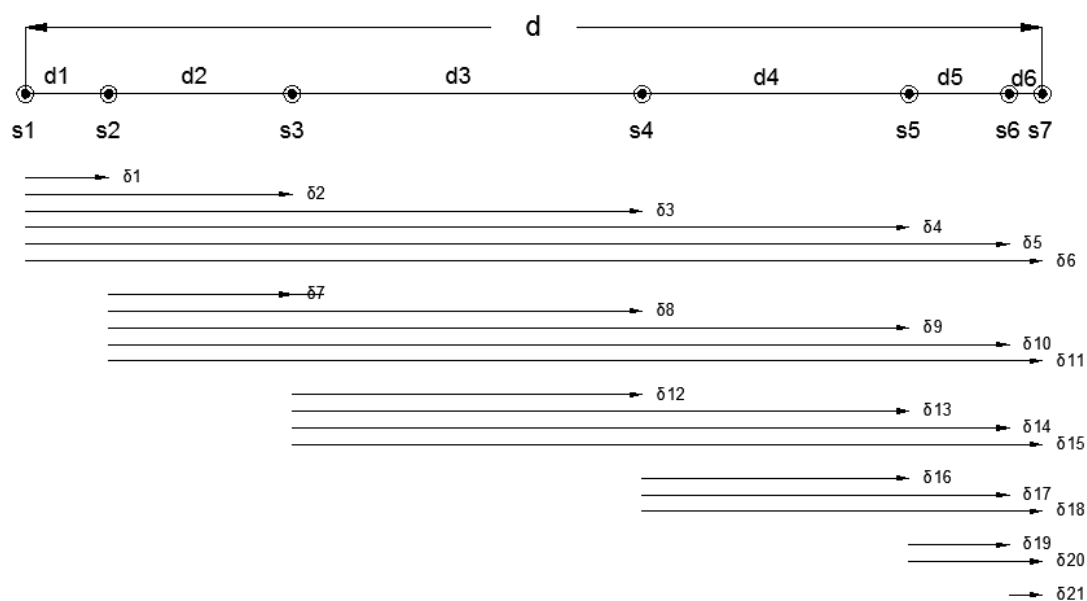
$d_1, d_2, d_3, \dots, d_6$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων και  $d$  η συνολική απόσταση της γραμμής ελέγχου.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- επίγειος σαρωτής laser (ScanStation 2)
- διακριβωμένος γεωδαιτικός σταθμός (Total Station TS30)
- ειδικό στόχοι (σφαίρα, πρίσμα)
- τρίποδες
- τρικόγλια
- σύστημα συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων (τύπου Kestrel)
- η μονάδα ελέγχου του σαρωτή

Στα σημεία της βάσης ελέγχου τοποθετήθηκαν αρχικά οι επτά τρίποδες. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε στη μία άκρη της βάσης και πραγματοποιήθηκαν έξι σαρώσεις - μετρήσεις αποστάσεων προς κάθε θέση του στόχου. Οι σαρώσεις προέκυψαν μετά από τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης των στόχων, σε φωτογραφία χαμηλής ανάλυσης που είναι ενσωματωμένη στο σαρωτή. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και στα επόμενα σημεία της βάσης. Συνολικά μετρήθηκαν είκοσι μια αποστάσεις.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.3) φαίνονται οι αποστάσεις που μετρήθηκαν.



Εικόνα 4.3: Μετρήσεις αποστάσεων

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \dots, \delta_{21}$  είναι οι 21 μετρημένες αποστάσεις μεταξύ των σημείων.

Όλες οι σαρώσεις έγιναν με διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) 1 mm. Καθ' όλη την διάρκεια των σαρώσεων πραγματοποιούνταν μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ατμοσφαιρική θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, που επικρατούσαν στην περιοχή.

Μετρήσεις των ίδιων αποστάσεων πραγματοποιήθηκαν, ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία, και με διακριβωμένο γεωδαιτικό σταθμό, Total Station. Σε επόμενο κεφάλαιο θα ακολουθήσει η επεξεργασία και η σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν από τα δύο όργανα.

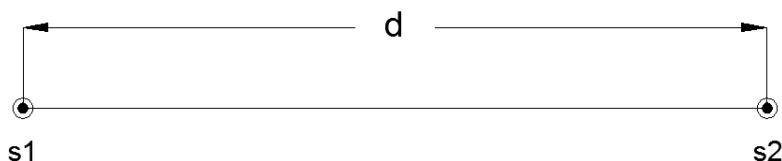
Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την ίδια μέρα, προς αποφυγή σφαλμάτων κέντρωσης που θα επιδράσουν στις μετρήσεις.

#### 4.2.2 Έλεγχος εσωτερικής ακρίβειας οργάνου με επαναληπτικές μετρήσεις αποστάσεων

Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον μετρολογικό έλεγχο της εσωτερικής ακρίβειας του οργάνου, με την επαναληψιμότητα μέτρησης σταθερής απόστασης. Για τον έλεγχο έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις τριών διαφορετικών αποστάσεων.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε σε εσωτερικό χώρο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις από τις μεταβολές των συνθηκών της ατμόσφαιρας.

Η πειραματική διάταξη των μετρήσεων περιλαμβάνει δύο σημεία. Το σημείο στάσης του οργάνου, και το σημείο τοποθέτησης του στόχου (εικόνα 4.4).



*Εικόνα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων*

s<sub>1</sub> είναι το σημείο στάσης του οργάνου, s<sub>2</sub> το σημείο τοποθέτησης του στόχου (σφαίρα) και d η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων.

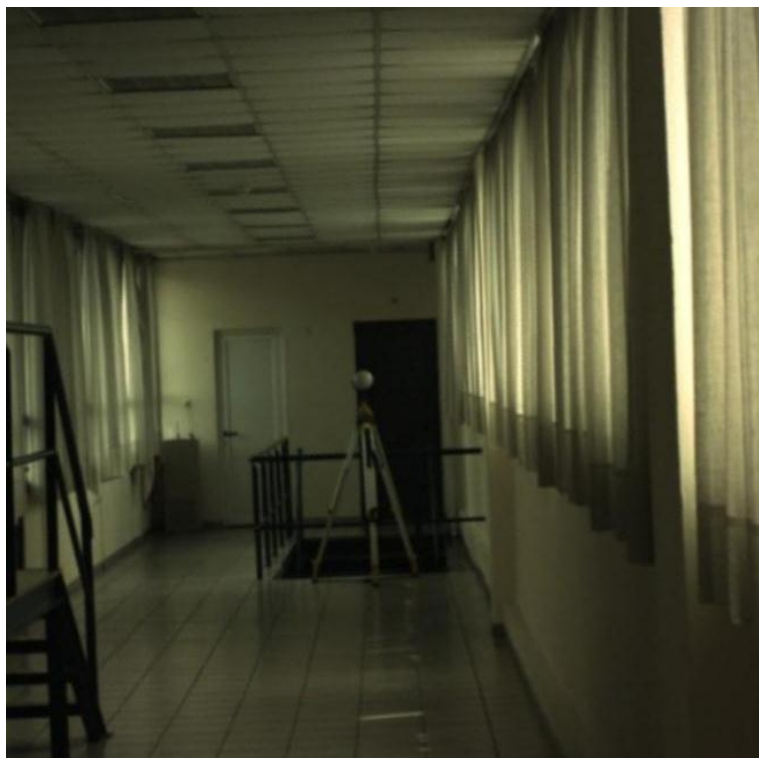
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- επίγειος σαρωτής laser (ScanStation 2)
- ειδικός στόχος (σφαίρα)
- τρίποδες
- τρικόγλια
- σύστημα συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων (τύπου Kestrel)
- η μονάδα ελέγχου του σαρωτή

Στα σημεία αρχικά τοποθετήθηκαν οι δυο τρίποδες. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε στη μία άκρη της γραμμής και πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες σαρώσεις - μετρήσεις προς τη θέση του στόχου. Οι σαρώσεις των στόχων προέκυψαν μετά από τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης του στόχου, σε φωτογραφία χαμηλής ανάλυσης που είναι ενσωματωμένη στο σαρωτή. Οι μετρήσεις είχαν διάρκεια μερικών ωρών, ενώ οι σαρώσεις πραγματοποιούνταν κάθε τέσσερα με πέντε λεπτά.

Η διαδικασία περιλαμβάνει μετρήσεις τριών διαφορετικών αποστάσεων, 20 m, 40 m και 62 m.

Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει το σημείο στάσης του ειδικού στόχου (σφαίρα) (εικόνα 4.5).



*Εικόνα 4.5: Θέση ειδικού στόχου*

Όλες οι σαρώσεις έγιναν με διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) 1 mm. Καθ' όλη την διάρκεια των σαρώσεων πραγματοποιούνταν μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) που επικρατούσαν στο χώρο, καθώς και των εσωτερικών συνθηκών του οργάνου (εσωτερική θερμοκρασία).

#### **4.2.3 Έλεγχος απόστασης με μέτρηση υψομετρικών διαφορών**

Σε αυτή την υποενότητα περιγράφεται ο μετρολογικός έλεγχος που πραγματοποιήθηκε, πειραματικές διατάξεις και μετρήσεις, προκειμένου να προσδιοριστεί η ακρίβεια του οργάνου στην μέτρηση αποστάσεων, μεταξύ σημείων που δεν βρίσκονταν στο ίδιο επίπεδο (υψομετρική διαφορά). Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε βάση ελέγχου που υλοποιήθηκε. Οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων προσδιορίστηκαν με διακριβωμένο γεωδαιτικό όργανο, Total Station - γεωδαιτικός σταθμός.

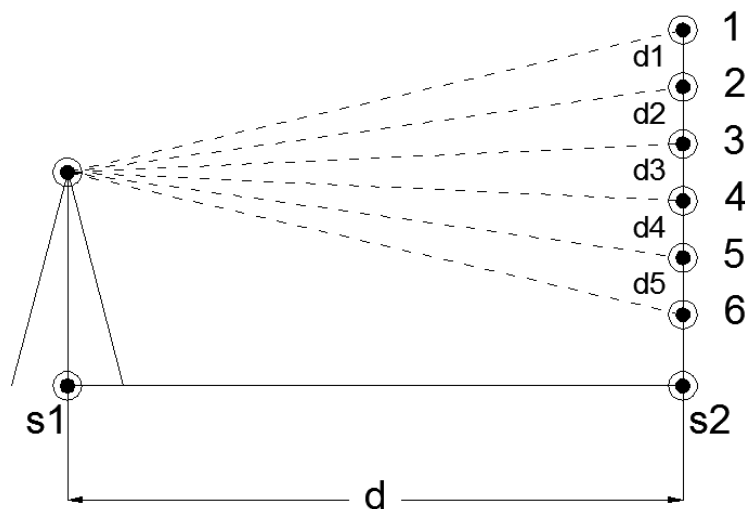
Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.6) φαίνεται η περιοχή εγκατάστασης της βάσης, στη μέτρηση των υψομετρικών διαφορών.





Εικόνα 4.6: Περιοχή εγκατάστασης βάσης ελέγχου  
(Πηγή: Google Earth)

Η βάση ελέγχου περιλαμβάνει έξι (6) σημεία – στόχους τοποθετημένους κατά μήκος ενός κατακόρυφου στύλου. Οι αποστάσεις (υψομετρικές διαφορές) μεταξύ των στόχων είναι ίσες. Τα σημεία είναι τοποθετημένα ώστε να σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή (εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_5$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ των στόχων (υψομετρικές διαφορές),  $s_1$  το σημείο στάσης του οργάνου,  $s_2$  η θέση του κατακόρυφου στύλου και  $d$  η απόσταση μεταξύ των δύο.

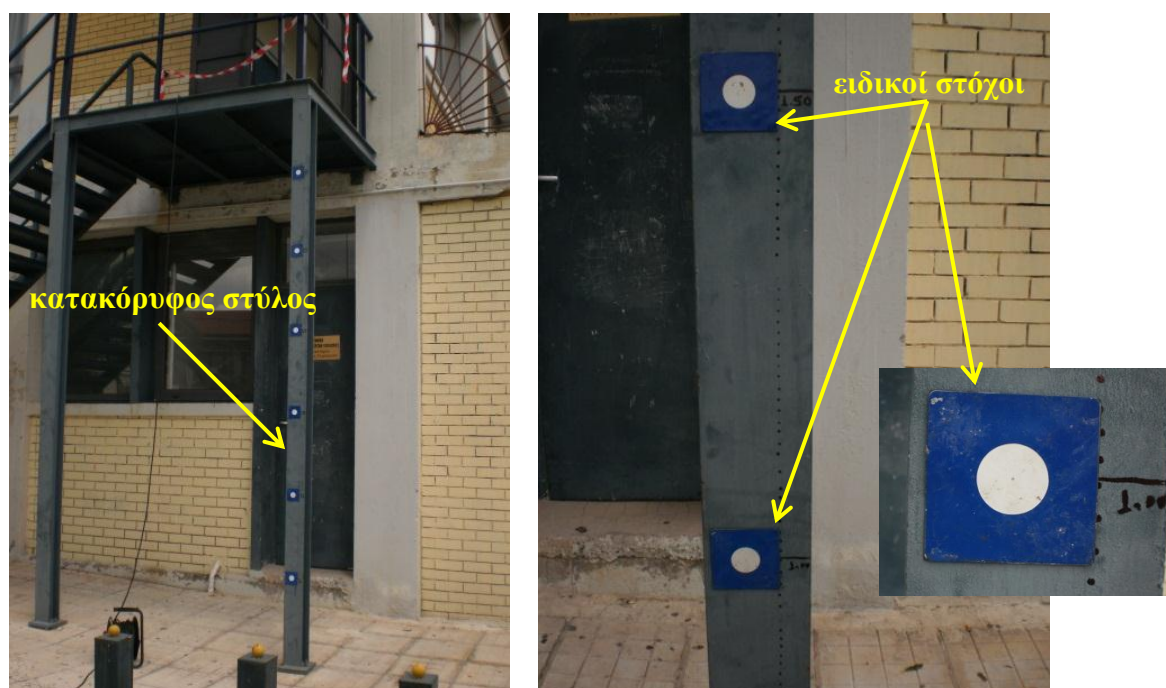
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- επίγειος σαρωτής laser (ScanStation 2)
- διακριβωμένος γεωδαιτικός σταθμός (Total Station TS30)
- ειδικόί στόχοι
- τρίποδας
- τρικόγλιο
- σύστημα συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων (τύπου Kestrel)
- η μονάδα ελέγχου του σαρωτή

Αρχικά τοποθετήθηκαν οι έξι στόχοι επί του στύλου. Η τοποθέτηση έγινε με χρήση γεωδαιτικού σταθμού, Total Station. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε στη μια άκρη της βάσης, σε απόσταση  $d$  από τους στόχους, και πραγματοποιήθηκαν έξι σαρώσεις - μετρήσεις προς κάθε στόχο. Η φορά των μετρήσεων ήταν από πάνω προς τα κάτω (1, 2, 3, 4, 5, 6). Ακολούθησαν άλλες έξι σαρώσεις με αντίθετη φορά (6, 5, 4, 3, 2, 1). Οι μισές από τις σκοπεύσεις που έγιναν ήταν σκοπεύσεις πάνω από τον ορίζοντα του οργάνου ενώ οι υπόλοιπες κάτω από αυτόν. Οι σαρώσεις των στόχων προέκυψαν μετά από τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης του κάθε στόχου, σε φωτογραφία χαμηλής ανάλυσης που είναι ενσωματωμένη στο σαρωτή. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε άλλες τρεις φορές (τέσσερις σειρές παρατηρήσεων). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 48 σαρώσεις.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.8) φαίνεται η διάταξη των στόχων.





Εικόνα 4.8: Διάταξη των στόχων

Όλες οι σαρώσεις έγιναν με διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) 1 mm. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στόχων είναι ίση με 0.5 m. Ο τελευταίος στόχος απέχει από το έδαφος απόσταση ίση με 0.5 m. Καθ' όλη την διάρκεια των σαρώσεων πραγματοποιούνταν μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ατμοσφαιρική θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, που επικρατούσαν στην περιοχή.

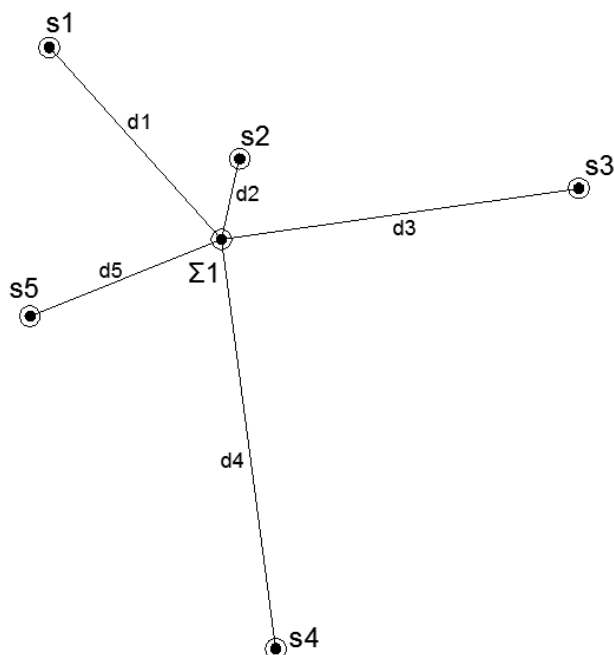
Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την ίδια μέρα.

Η απόσταση μεταξύ του οργάνου και του στύλου τοποθέτησης των στόχων είναι  $\approx$  30m.

#### 4.2.4 Έλεγχος οριζόντιων διευθύνσεων

Στην υποενότητα περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις και μετρήσεις που έγιναν με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας του οργάνου στην μέτρηση των οριζόντιων διευθύνσεων. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου υλοποιήθηκε κατάλληλο πεδίο μετρήσεων.

Το πεδίο ελέγχου περιλαμβάνει πέντε (5) σφαιρικούς στόχους (cyra sphere target) τοποθετημένους περιμετρικά του σαρωτή. Οι στόχοι κατανεμήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν σχεδόν ένα κανονικό πεντάγωνο (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης μετρήσεων

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_5$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σαρωτή και των πέντε σημείων,  $\Sigma_1$  το σημείο στάσης του οργάνου και  $s_1, s_2, \dots, s_5$  οι θέσεις των σημείων - στόχων.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- επίγειος σαρωτής laser (ScanStation 2)
- ειδικόί στόχοι (σφαίρα)
- τρίποδες
- τρικόχλια
- σύστημα συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων (τύπου Kestrel)
- η μονάδα ελέγχου του σαρωτή

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) σειρές μετρήσεων. Κάθε σειρά μετρήσεων περιλαμβάνει τρία (3) πλήρη σετ παρατηρήσεων. Το πρώτο σετ παρατηρήσεων αποτελείται από τη σάρωση των στόχων (1, 2, 3, 4, 5) και ολοκληρώνεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως (5, 4, 3, 2, 1). Τα δύο άλλα σετ παρατηρήσεων πραγματοποιούνται με την ίδια διαδικασία με χρονική καθυστέρηση 5 λεπτών μεταξύ τους.

Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων και του σαρωτή φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 4.1).

Στόχος	Απόσταση (m)
1	$d_1 = 66.87$
2	$d_2 = 12.71$
3	$d_3 = 73.27$
4	$d_4 = 100.47$
5	$d_5 = 36.45$

*Πίνακας 4.1: Αποστάσεις οργάνου – στόχου  
(Πηγή: Τσακίρη κ.α., 2005)*

Όλες οι μετρήσεις των στόχων έγιναν με διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) 1mm.

Την συλλογή των μετρήσεων που περιγράφηκαν παραπάνω, ακολούθησε η επεξεργασία αυτών. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία επεξεργασίας και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας του σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica Geosystems. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εσωτερικά και εξωτερικά πεδία ελέγχου που υλοποιήθηκαν για τους μετρολογικούς ελέγχους.

### 5.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

Την συλλογή των δεδομένων, μέσω των πειραματικών μετρήσεων οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο τέσσερα, ακολούθησε η επεξεργασία αυτών. Στην υποενότητα περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

#### 5.2.1 Μέτρηση απόστασης με βάση ελέγχου

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποστάσεων σε εξωτερική βάση ελέγχου. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση επίγειου σαρωτή laser. Ακολούθησε έλεγχος των αποστάσεων της βάσης με διακριβωμένο γεωδαιτικό σταθμό, Total Station. Σκοπός του ελέγχου είναι να διαπιστωθούν αποκλίσεις της μετρούμενης απόστασης μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις των δύο οργάνων.

Το συνολικό μήκος της γραμμής ελέγχου είναι ίσο με 300 m. Η διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) ίση με 1 mm. Συνολικά μετρήθηκαν είκοσι μια (21) αποστάσεις.

Κατά την διάρκεια των σαρώσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) που επικρατούσαν στην περιοχή. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την ίδια μέρα. Η μέτρηση των αποστάσεων έγινε σε σφαιρικό στόχο (Cyra Sphere Target).

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 5.1) φαίνεται η περιοχή εγκατάστασης του πεδίου ελέγχου στην μέτρηση των αποστάσεων.



Εικόνα 5.1: Περιοχή υλοποίησης βάσης ελέγχου

Οι συντεταγμένες του κέντρου των στόχων υπολογίστηκαν χειροκίνητα με την εισαγωγή vertex (κέντρο σφαίρας) μέσω του λογισμικού Cyclone (Leica Geosystems Cyclone Software).

Από στάση	Προς στόχο	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	2	-1,671	20,023	-0,017
	3	-6,680	79,729	0,286
	4	-15,029	179,358	0,569
	5	-	-	-
	6	-	-	-
	7	-	-	-
	2	3	16,092	57,706
4		42,957	154,009	0,477
5		64,458	231,065	0,853
6		-	-	-
7		-	-	-
3	4	-33,558	94,174	0,293
	5	-60,400	169,514	1,047
	6	-	-	-
	7	-	-	-
4	5	-49,665	62,686	0,648
	6	-74,263	93,725	1,059
	7	-74,561	94,128	1,109
5	6	-30,387	25,401	0,165
	7	-30,759	25,736	0,212
6	7	0,360	0,340	-0,072
Σύνολο:	21 σαρώσεις			

Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες κέντρου σφαιρικών στόχων

Οι συντεταγμένες των σφαιρικών στόχων που προέκυψαν από τις σαρώσεις με τον επίγειο σαρωτή laser φαίνονται στον παραπάνω πίνακα (πίνακας 5.1).

Από τις συντεταγμένες του κέντρου του στόχου και δεδομένου ότι η θέση στάσης του οργάνου (σαρωτή laser) έχει συντεταγμένες  $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ , με εφαρμογή της σχέσης (5.1) προκύπτουν οι αποστάσεις μεταξύ σαρωτή – στόχου.

$$d = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (5.1)$$

όπου  $X_i, Y_i, Z_i$  είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της σφαίρας,  $X_j, Y_j, Z_j$  οι συντεταγμένες του σημείου στάσης του σαρωτή και  $d$  η μεταξύ τους απόσταση.

Τα αποτελέσματα των αποστάσεων που προέκυψαν από την σχέση (5.1) φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.2).

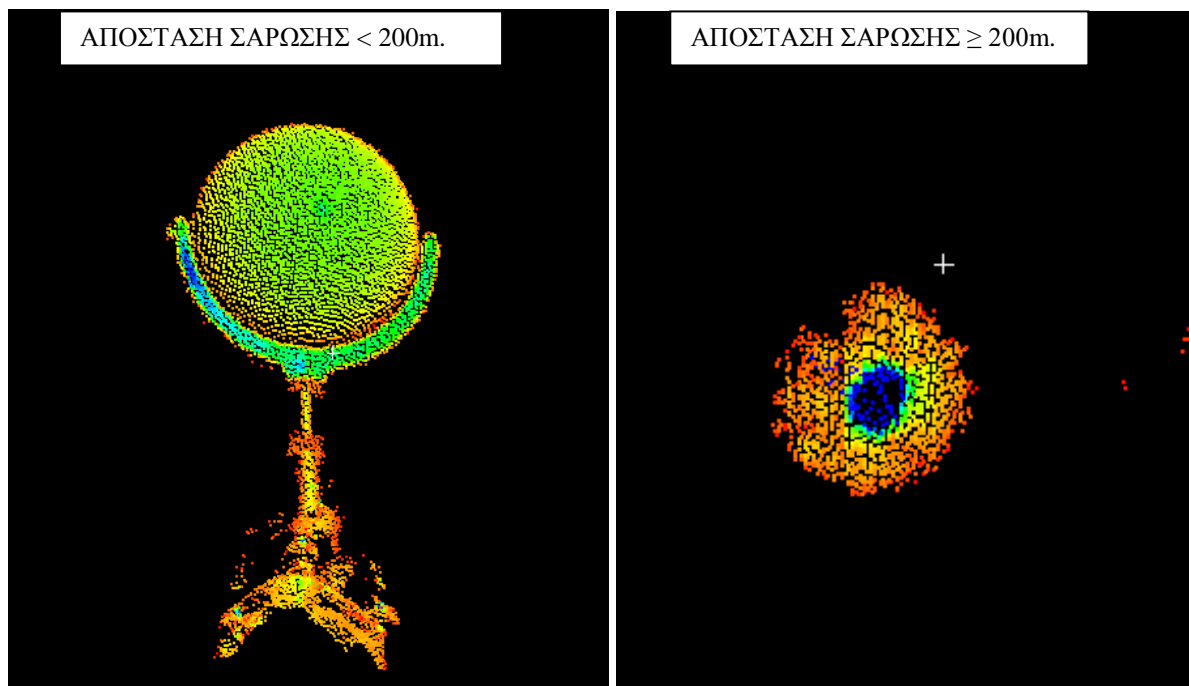
Από στάση	Προς στόχο	Απόσταση (m)
1	2	20,0926
	3	80,0089
	4	179,9875
	5	-
	6	-
	7	-
2	3	59,9080
	4	159,8884
	5	239,8887
	6	-
	7	-
3	4	99,9748
	5	179,9563
	6	-
	7	-
4	5	79,9785
	6	119,5847
	7	120,0860
5	6	39,6057
	7	40,1061
6	7	0,5004
<b>Σύνολο:</b>	21 αποστάσεις	300 m.

Πίνακας 5.2: Αποστάσεις μέτρησης βάσης ελέγχου με τον σαρωτή laser

Για αποστάσεις άνω των 200 μέτρων, ανεξάρτητα των προδιαγραφών του κατασκευαστή που ορίζει ως μέγιστο βεληνεκές τα 300 μέτρα για την συγκεκριμένη συσκευή λήψης, ο επίγειος σαρωτής laser δεν αποτυπώνει ικανοποιητικό αριθμό σημείων ώστε να προκύψει το κατάλληλο μοντέλο στόχου (σφαίρα), από το οποίο θα

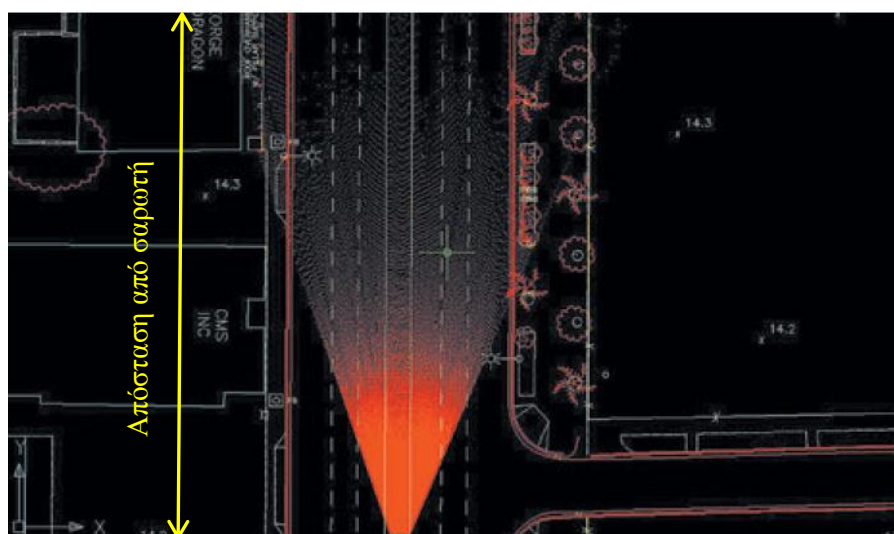
προκύψουν οι συντεταγμένες του κέντρου και επομένως η απόσταση μεταξύ οργάνου – στόχου.

Στις εικόνες που ακολουθούν (εικόνα 5.2α, εικόνα 5.2β) φαίνεται το νέφος σημείων του σαρωτή σε σχέση με την απόσταση.



(α) (β)  
Εικόνα 5.2: Νέφος σημείων σαρωτή σε σχέση με την απόσταση  
(Πηγή: Cyclone)

Όσο μεγαλώνει η απόσταση από την θέση του επίγειου σαρωτή laser, τόσο η πυκνότητα των σημείων αποτύπωσης (νέφος σημείων) μειώνεται (εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Πυκνότητα σημείων – απόσταση από τον σαρωτή

Ακολούθησαν μετρήσεις των αποστάσεων της γραμμής ελέγχου με βαθμονομημένο γεωδαιτικό σταθμό, Total Station Leica TS30. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.3).

Οι μετρήσεις των αποστάσεων έγιναν σε έξι θέσεις τηλεσκοπίου, με παράλληλη μέτρηση των συνθηκών της ατμόσφαιρας. Σαν τελική απόσταση θεωρείται η μέση τιμή των έξι αποστάσεων.

Από	Προς	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5	Θέση 6	Μ.Τ.
1	2	20,0950	20,0946	20,0948	20,0945	20,0950	20,0948	20,0948
	3	80,0130	80,0129	80,0131	80,0130	80,0131	80,0127	80,0130
	4	179,9975	179,9973	179,9975	179,9972	179,9974	179,9973	179,9974
	5	259,9825	259,9830	259,9828	259,9829	259,9825	259,9827	259,9827
	6	299,5898	299,5900	299,5899	299,5896	299,5899	299,5896	299,5898
	7	300,0899	300,0894	300,0898	300,0895	300,0902	300,0895	300,0897
2	3	59,9182	59,9178	59,9178	59,9179	59,9176	59,9179	59,9179
	4	159,9018	159,9016	159,9017	159,9018	159,9020	159,9018	159,9018
	5	239,8856	239,8861	239,8858	239,8859	239,8860	239,8860	239,8859
	6	279,4950	279,4948	279,4950	279,4946	279,4952	279,4949	279,4949
	7	279,9945	279,9941	279,9941	279,9943	279,9943	279,9943	279,9943
3	4	99,9844	99,9845	99,9843	99,9847	99,9844	99,9846	99,9845
	5	179,9674	179,9677	179,9680	179,9675	179,9677	179,9673	179,9676
	6	219,5772	219,5771	219,5767	219,5772	219,5767	219,5770	219,5770
	7	220,0758	220,0762	220,0760	220,0757	220,0759	220,0758	220,0759
4	5	79,9836	79,9834	79,9837	79,9838	79,9836	79,9837	79,9836
	6	119,5928	119,5933	119,5927	119,5933	119,5931	119,5934	119,5931
	7	120,0917	120,0912	120,0917	120,0914	120,0916	120,0916	120,0915
5	6	39,6082	39,6082	39,6081	39,6080	39,6083	39,6080	39,6081
	7	40,1081	40,1081	40,1077	40,1080	40,1076	40,1079	40,1079
6	7	-	-	-	-	-	-	-
<b>Σύνολο:</b>		21 αποστάσεις - 300 m.						

*Πίνακας 5.3: Αποστάσεις μέτρησης βάσης ελέγχου με τον γεωδαιτικό σταθμό*

Δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση από το σημείο έξι στο σημείο εφτά, λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο (0.5 m).

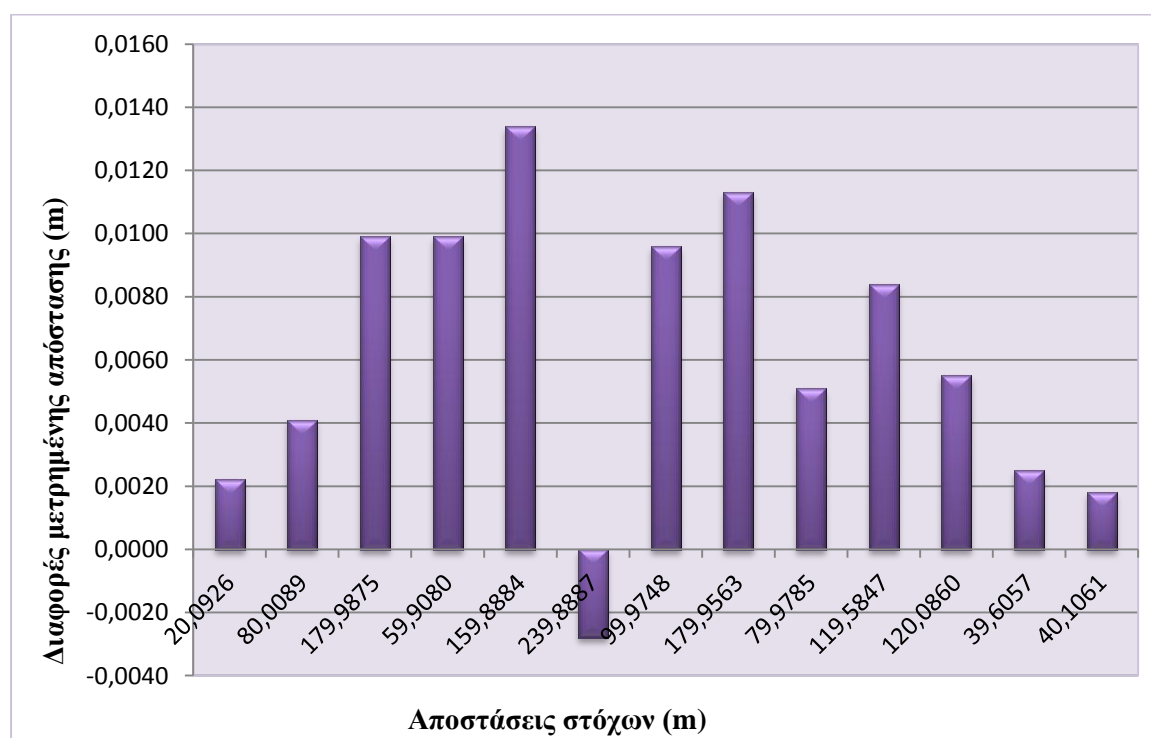
Οι διαφορές στην απόσταση μεταξύ των δύο οργάνων αποτύπωσης φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.4).



Από	Προς	TS30	SCANSTATION 2	Διαφορά αποστάσεων (m)
		Απόσταση (m)	Απόσταση (m)	
1	2	20,0948	20,0926	0,0022
	3	80,0130	80,0089	0,0041
	4	179,9974	179,9875	0,0099
	5	259,9827	-	-
	6	299,5898	-	-
	7	300,0897	-	-
2	3	59,9179	59,9080	0,0099
	4	159,9018	159,8884	0,0134
	5	239,8859	239,8887	-0,0028
	6	279,4949	-	-
	7	279,9943	-	-
3	4	99,9845	99,9748	0,0096
	5	179,9676	179,9563	0,0113
	6	219,5770	-	-
	7	220,0759	-	-
4	5	79,9836	79,9785	0,0051
	6	119,5931	119,5847	0,0084
	7	120,0915	120,0860	0,0055
5	6	39,6081	39,6057	0,0025
	7	40,1079	40,1061	0,0018
6	7	-	0,5004	-

Πίνακας 5.4: Διαφορές μετρημένης απόστασης των δύο οργάνων

Οι διαφορές της μετρημένης απόστασης με τον επίγειο σαρωτή laser από την απόσταση που μετρήθηκε με τον γεωδαιτικό σταθμό δίνονται και στο παρακάτω διαγράμματα (διάγραμμα 5.1).



Διάγραμμα 5.1: Διαφορές μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού

Ακολουθεί πίνακας με τα βασικά στοιχεία των διαφορών των μετρημένων αποστάσεων των δύο οργάνων (πίνακας 5.5).

Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική Απόκλιση (m)
- 0,0028	0,0134	0,0162	0,0062	0,0046

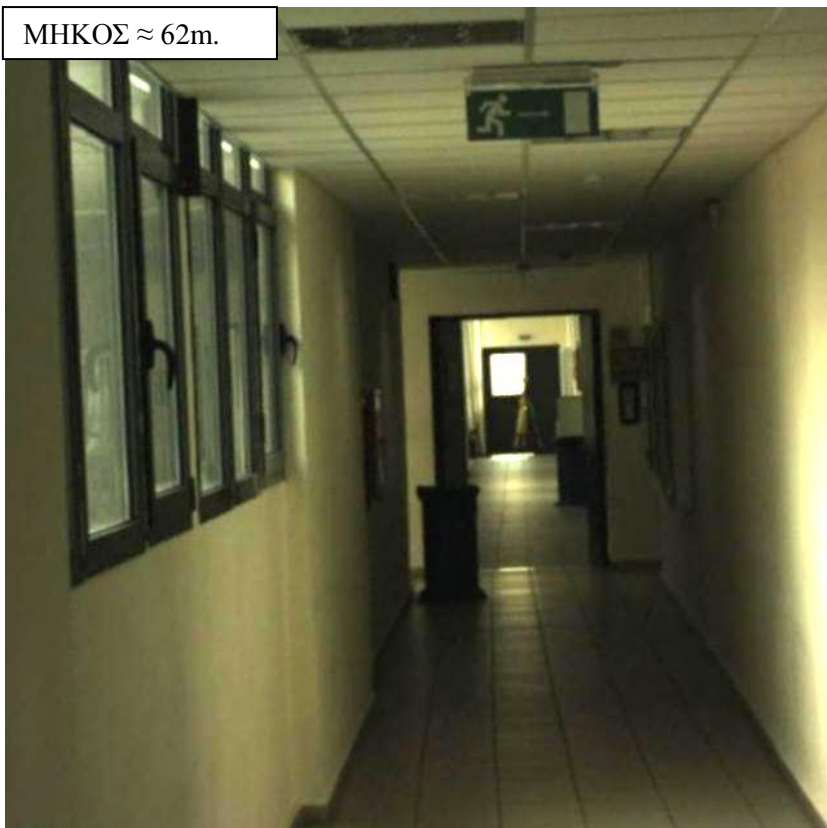
*Πίνακας 5.5: Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού*

### 5.2.2 Έλεγχος εσωτερικής ακρίβειας οργάνου με επαναληπτικές μετρήσεις αποστάσεων

Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σταθερής απόστασης σε βάση που υλοποιήθηκε. Πρόκειται για έλεγχο προσδιορισμού της εσωτερικής ακρίβειας - σταθερότητας του οργάνου. Ο έλεγχος έγινε σε έναν από τους σαρωτές Leica ScanStation 2. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε εσωτερικό χώρο. Ο σφαιρικός στόχος (Cyra Sphere Target) σαρώθηκε σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις, 20 m, 40 m, 62 m, για διάστημα λίγων ωρών (εικόνα 5.4, εικόνα 5.5, εικόνα 5.6). Το χρονικό βήμα των σαρώσεων κυμαινόταν μεταξύ 4 και 5 λεπτά.

Υπολογίστηκε η απόσταση από το κέντρο του στόχου. Οι συντεταγμένες του κέντρου του στόχου προσδιορίστηκαν χειροκίνητα με την εισαγωγή vertex (κέντρο σφαίρας) μέσω του λογισμικού Cyclone. Κατά την διάρκεια των σαρώσεων έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) στο πεδίο ελέγχου. Επίσης έγινε καταγραφή και της εσωτερικής θερμοκρασίας του οργάνου.

ΜΗΚΟΣ  $\approx$  62m.



*Εικόνα 5.4: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 62 m.*

ΜΗΚΟΣ  $\approx$  40m.



*Εικόνα 5.5: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 40 m.*



Εικόνα 5.6: Τοποθέτηση σφαιρικού στόχου στην απόσταση των 20 m.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα του πειράματος (πίνακας 5.6).

Σαρωτής	Απόσταση (m)	Στόχος	Ανάλυση σάρωσης (mm)	Χρονικό βήμα (min)	Συνολικός Χρόνος σάρωσης (ώρες)
Leica ScanStation2	62	Σφαιρικός	1 x 1 mm.	4 - 5	3:00
Leica ScanStation2	40	Σφαιρικός	1 x 1 mm.	4 - 5	2:00
Leica ScanStation2	20	Σφαιρικός	1 x 1 mm.	4 - 5	3:00

Πίνακας 5.6: Δεδομένα πειράματος

Τα αποτελέσματα των συντεταγμένων, σε μέτρα, του κέντρου της σφαίρας παρουσιάζονται στον πίνακα (πίνακας 5.7).

Απόσταση 62 m			Απόσταση 40 m			Απόσταση 20 m		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-54,126	31,254	-0,070	-0,421	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,125	31,255	-0,069	-0,421	-36,769	-0,232	-20,778	3,317	-0,132
-54,125	31,255	-0,070	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,125	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,133
-54,124	31,256	-0,069	-0,420	-36,768	-0,232	-20,778	3,317	-0,133
-54,125	31,255	-0,070	-0,420	-36,769	-0,232	-20,777	3,316	-0,133
-54,125	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,125	31,255	-0,070	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,317	-0,132
-54,125	31,256	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,777	3,316	-0,132
-54,125	31,256	-0,068	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,317	-0,132
-54,125	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,125	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,777	3,316	-0,132
-54,126	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,126	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,133
-54,125	31,255	-0,068	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,317	-0,132
-54,125	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,317	-0,132
-54,126	31,255	-0,069	-0,420	-36,770	-0,231	-20,777	3,316	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,420	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,420	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,126	31,256	-0,068	-0,420	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,126	31,256	-0,067	-0,420	-36,770	-0,231	-20,777	3,317	-0,132
-54,126	31,256	-0,067	-0,420	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,126	31,256	-0,068	-0,420	-36,770	-0,231	-20,778	3,316	-0,132
-54,126	31,256	-0,068	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,316	-0,132
-54,127	31,255	-0,068	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,316	-0,132
-54,127	31,255	-0,068	-0,420	-36,770	-0,232	-20,778	3,316	-0,132
-54,127	31,256	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,316	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,316	-0,132
-54,127	31,256	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,126	31,255	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231	-20,778	3,317	-0,132
-54,127	31,256	-0,068	-0,421	-36,770	-0,232	-20,779	3,317	-0,132
-54,127	31,255	-0,069	-0,421	-36,770	-0,231			
-54,127	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,231			
$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$
-54,126	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132

Πίνακας 5.7: Συντεταγμένες κέντρου σφαίρας

$\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Z}$ , η μέση τιμή των συντεταγμένων  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  του στόχου.

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.8) φαίνονται οι διαφορές των συντεταγμένων των στόχων από την μέση τιμή:

Απόσταση 62 m			Απόσταση 40 m			Απόσταση 20 m		
ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
-0,002	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,001
-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001
-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000
-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000
0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,000	-0,001	-0,002	0,000	0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,000
0,000	-0,001	-0,002	0,000	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,000	-0,001	-0,001	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,001	0,000	-0,001	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
0,001	-0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,001	-0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	-0,001	0,000
0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001			
0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001			
$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$
-54,126	31,255	-0,069	-0,420	-36,769	-0,232	-20,778	3,316	-0,132

Πίνακας 5.8: Διαφορές συντεταγμένων κέντρου σφαίρας από μέση τιμή

$$\Delta X = \bar{X} - X_i \quad (5.2)$$

$$\Delta Y = \bar{Y} - Y_i \quad (5.3)$$

$$\Delta Z = \bar{Z} - Z_i \quad (5.4)$$

Το σφάλμα των διαφορών, RMS, φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.9).

	Απόσταση 62 m	Απόσταση 40 m	Απόσταση 20 m
<b>RMS<sub>X</sub> (mm.)</b>	0,893	0,475	0,409
<b>RMS<sub>Y</sub> (mm.)</b>	0,511	0,554	0,499
<b>RMS<sub>Z</sub> (mm.)</b>	0,720	0,499	0,326

*Πίνακας 5.9: Στατιστικά συντεταγμένων σφαίρας*

$$RMS = \sqrt{\frac{[U \cdot U]}{n - 1}} \quad (5.5)$$

U οι διαφορές των συντεταγμένων από την μέση τιμή και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Όπως διαπιστώνεται οι τιμές του σφάλματος των διαφορών RMS (πίνακας 5.9) είναι εντός ορίου επιτρεπτού σφάλματος.

$$RMS \leq 1 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Από τις συντεταγμένες του κέντρου του στόχου και δεδομένου ότι οι συντεταγμένες της θέσης του σαρωτή είναι ίσες με  $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ , με εφαρμογή της σχέσης (5.1) προκύπτουν οι αποστάσεις μεταξύ σαρωτή – στόχου.

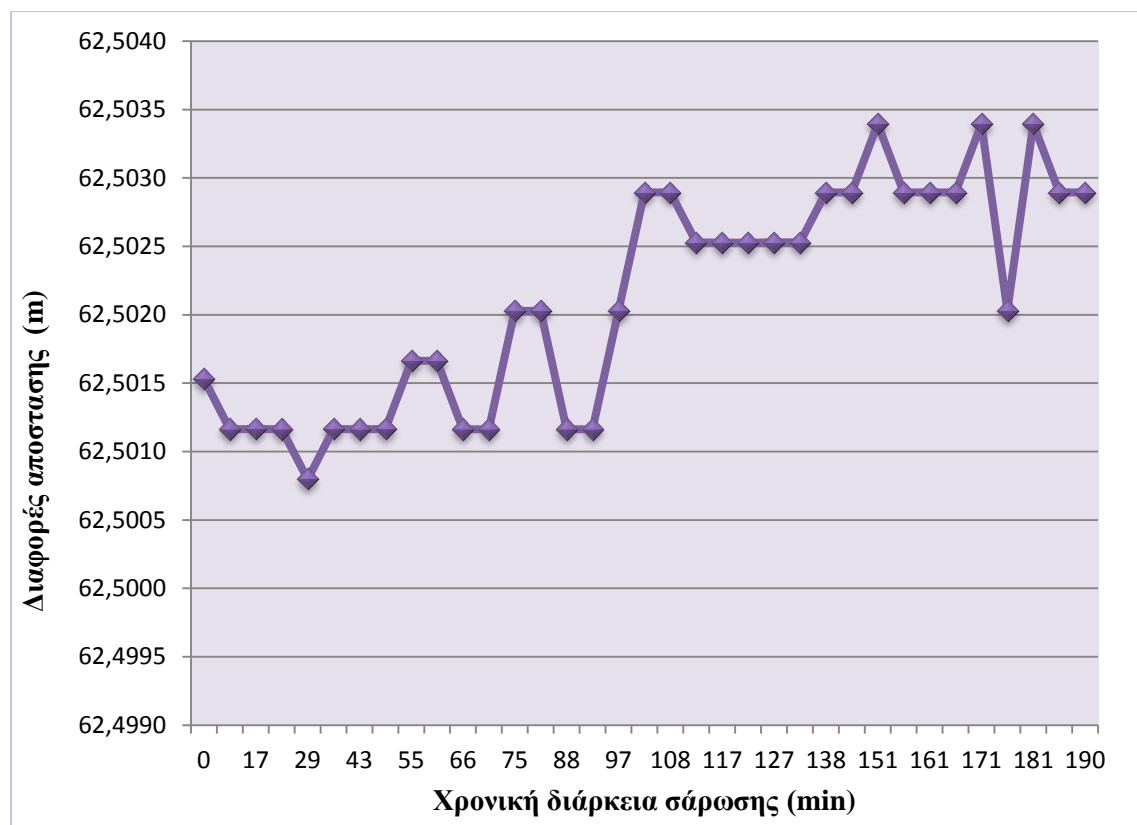
Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.10).

Α/Α	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 1 <sup>η</sup> (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2 <sup>η</sup> (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 3 <sup>η</sup> (m)
1	62,5015	36,7721	21,0414
2	62,5012	36,7721	21,0415
3	62,5012	36,7721	21,0414
4	62,5012	36,7721	21,0414
5	62,5008	36,7711	21,0415
6	62,5012	36,7721	21,0404
7	62,5012	36,7721	21,0414
8	62,5012	36,7721	21,0415
9	62,5017	36,7721	21,0404
10	62,5017	36,7721	21,0415
11	62,5012	36,7721	21,0414
12	62,5012	36,7721	21,0404
13	62,5020	36,7721	21,0414
14	62,5020	36,7721	21,0414
15	62,5012	36,7721	21,0415
16	62,5012	36,7721	21,0415
17	62,5020	36,7731	21,0404
18	62,5029	36,7731	21,0415
19	62,5029	36,7731	21,0415
20	62,5025	36,7731	21,0415
21	62,5025	36,7731	21,0405
22	62,5025	36,7731	21,0415
23	62,5025	36,7731	21,0414
24	62,5025	36,7731	21,0414
25	62,5029	36,7731	21,0414
26	62,5029	36,7731	21,0414
27	62,5034	36,7731	21,0414
28	62,5029	36,7731	21,0415
29	62,5029	36,7731	21,0415
30	62,5029	36,7731	21,0414
31	62,5034	36,7731	21,0415
32	62,5020	36,7731	21,0415
33	62,5034	36,7731	21,0425
34	62,5029	36,7731	-
35	62,5029	36,7721	-
M.T.	62,5021	36,7726	21,0413

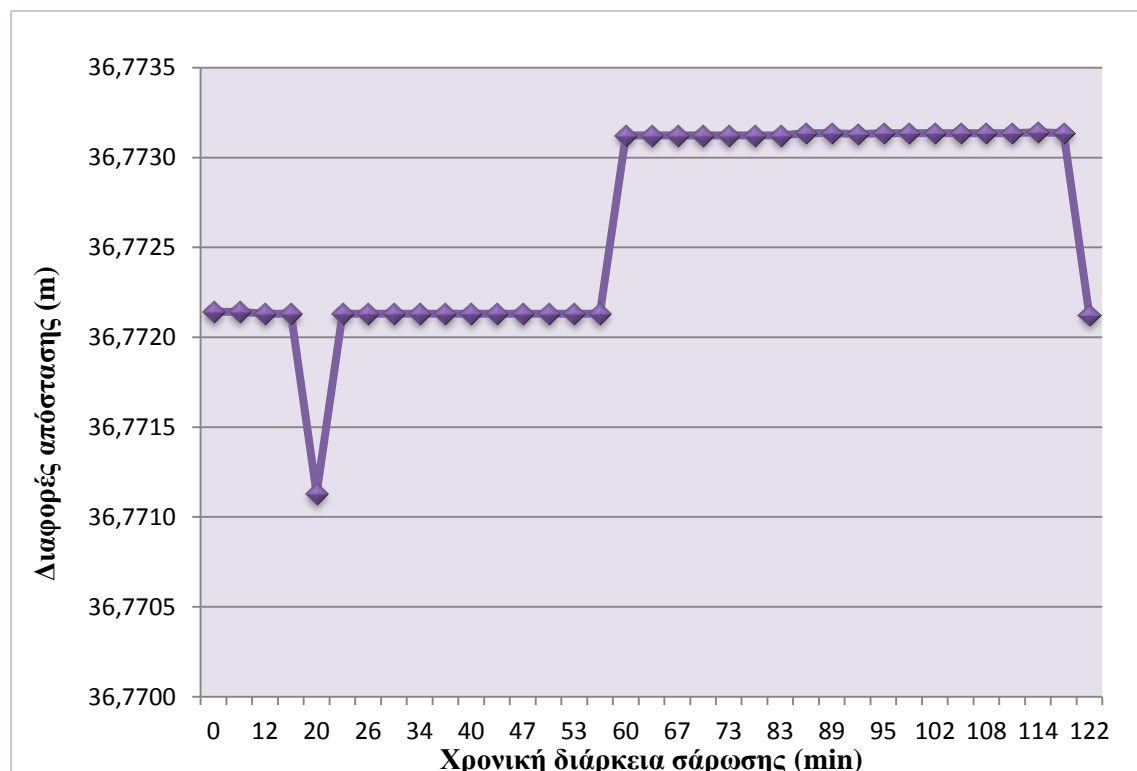
Πίνακας 5.10: Αποστάσεις επαναλαμβανόμενων μετρήσεων

Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζονται οι αποστάσεις αυτές (διάγραμμα 5.2, 5.3, 5.4).

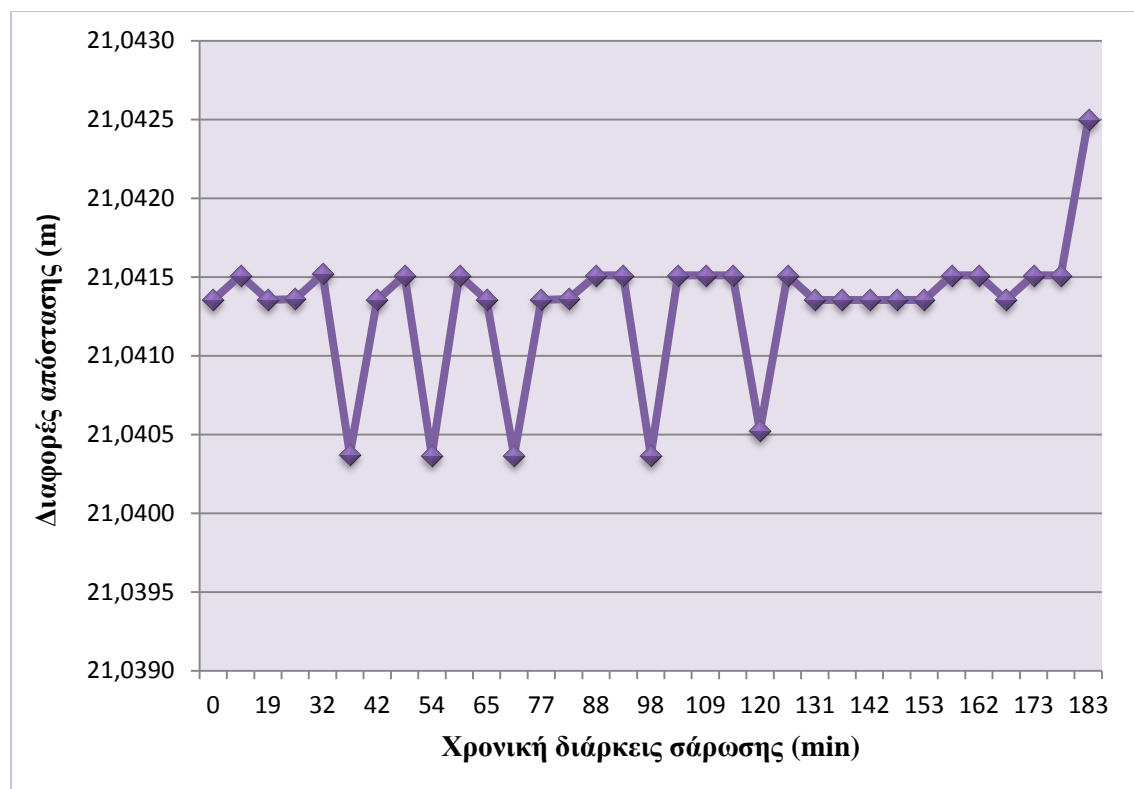




Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα απόστασης 62 μέτρων



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα απόστασης 40 μέτρων



Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα απόστασης 20 μέτρων

Οι διαφορές των αποστάσεων από την μέση τιμή, φαίνονται στον πίνακα 5.11.

Α/Α	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 1 <sup>η</sup> (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2 <sup>η</sup> (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ 3 <sup>η</sup> (m)
1	0,00059209	0,00047510	-0,00004251
2	0,00095913	0,00047510	-0,00020013
3	0,00095802	0,00048653	-0,00004251
4	0,00095913	0,00048653	-0,00004881
5	0,00132503	0,00148645	-0,00020643
6	0,00095802	0,00048653	0,00093867
7	0,00095913	0,00048653	-0,00004251
8	0,00095802	0,00048653	-0,00020013
9	0,00045906	0,00048653	0,00094497
10	0,00046015	0,00048653	-0,00020013
11	0,00095913	0,00048653	-0,00004251
12	0,00095913	0,00048653	0,00094497
13	0,00009315	0,00048653	-0,00004251
14	0,00009315	0,00048653	-0,00004881
15	0,00096023	0,00048653	-0,00020013
16	0,00095913	0,00048653	-0,00020013
17	0,00009315	-0,00050709	0,00094497
18	-0,00077284	-0,00050709	-0,00020013
19	-0,00077284	-0,00050709	-0,00020013
20	-0,00040583	-0,00050709	-0,00020013
21	-0,00040475	-0,00050709	0,00078734
22	-0,00040475	-0,00050709	-0,00020013
23	-0,00040583	-0,00050709	-0,00004251
24	-0,00040583	-0,00051852	-0,00004251
25	-0,00077175	-0,00051852	-0,00004251
26	-0,00077175	-0,00051338	-0,00004251
27	-0,00127291	-0,00051852	-0,00004251
28	-0,00077284	-0,00051852	-0,00020013
29	-0,00077284	-0,00051852	-0,00020013
30	-0,00077284	-0,00051852	-0,00004251
31	-0,00127291	-0,00051852	-0,00020013
32	0,00009315	-0,00051852	-0,00020013
33	-0,00127181	-0,00052482	-0,00118761
34	-0,00077284	-0,00051852	
35	-0,00077284	0,00049283	

Πίνακας 5.11: Διαφορές αποστάσεων από την μέση τιμή της απόστασης

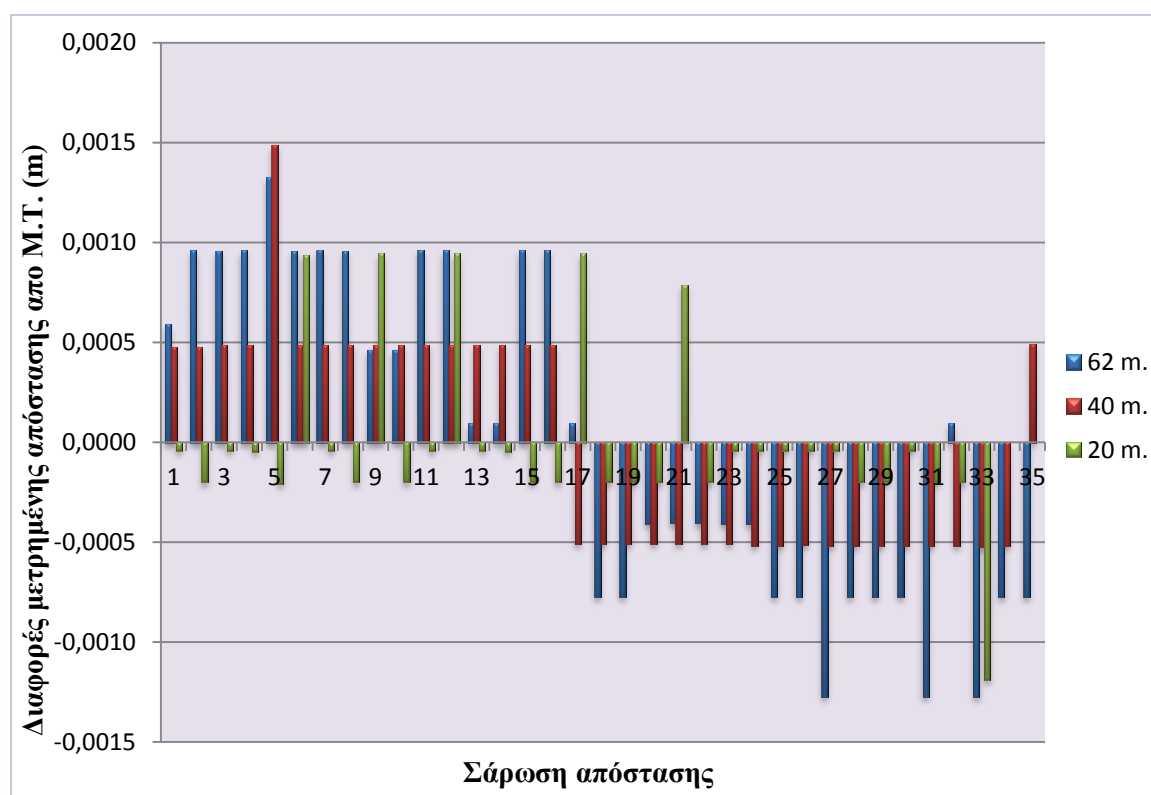
Ακολουθεί πίνακας (πίνακας 5.12) με τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών.

Σαρωτής	Απόσταση (m)	Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)
Leica ScanStation2	62	-0,00127291	0,00132503	0,00259794
Leica ScanStation2	40	-0,00052482	0,00148645	0,00201127
Leica ScanStation2	20	-0,00118761	0,00094497	0,00213258

Πίνακας 5.12: Στατιστικά στοιχεία διαφορών

Όπως διαπιστώνεται, τα αποτελέσματα του σαρωτή που ελέγχθηκε βρίσκονται εντός του θορύβου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ( $1.96 \times 4 \text{ mm}$ ).

Το ακόλουθο διάγραμμα (διάγραμμα 5.5) απεικονίζει τις παραπάνω διαφορές.

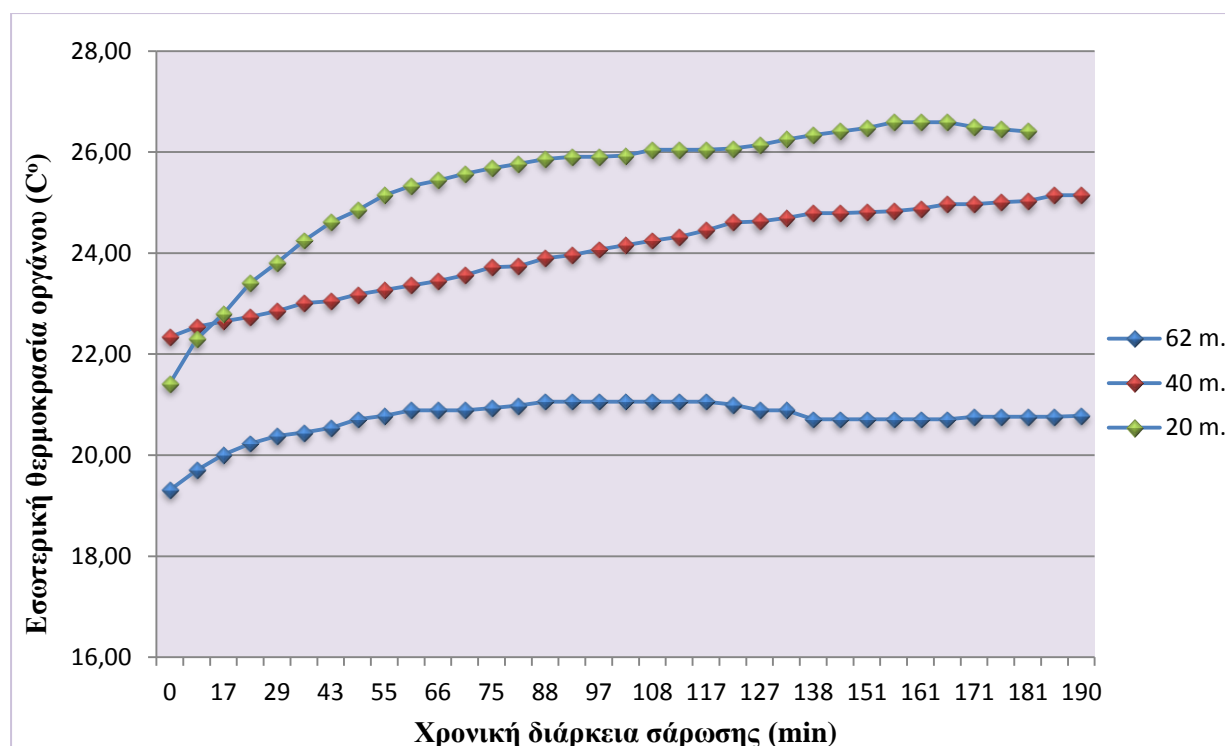


Διάγραμμα 5.5: Διαφορές αποστάσεων από την μέση τιμή της απόστασης

Ακολουθεί ο πίνακας της εσωτερική θερμοκρασίας του οργάνου (πίνακας 5.13), και το διάγραμμα το οποίο την απεικονίζει (διάγραμμα 5.6).

Απόσταση 1 <sup>η</sup>		Απόσταση 2 <sup>η</sup>		Απόσταση 3 <sup>η</sup>	
ΩΡΑ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	ΩΡΑ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	ΩΡΑ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ
14:14	19,31	11:00	22,34	13:41	21,42
14:23	19,70	11:08	22,54	13:54	22,3
14:31	20,01	11:12	22,65	14:00	22,8
14:37	20,23	11:16	22,74	14:06	23,41
14:43	20,38	11:20	22,85	14:13	23,81
14:52	20,45	11:23	23,01	14:19	24,25
14:57	20,54	11:26	23,05	14:23	24,61
15:03	20,71	11:30	23,18	14:30	24,85
15:09	20,78	11:34	23,27	14:35	25,15
15:15	20,89	11:37	23,36	14:40	25,33
15:19	20,89	11:40	23,45	14:46	25,44
15:25	20,89	11:43	23,56	14:53	25,57
15:29	20,93	11:47	23,72	14:58	25,68
15:37	20,98	11:50	23,74	15:03	25,77
15:42	21,06	11:53	23,90	15:09	25,86
15:46	21,06	11:57	23,96	15:14	25,91
15:51	21,06	12:00	24,07	15:19	25,91
15:58	21,06	12:03	24,16	15:25	25,93
16:02	21,06	12:07	24,25	15:30	26,05
16:06	21,06	12:10	24,32	15:35	26,05
16:11	21,06	12:13	24,45	15:41	26,05
16:16	21,00	12:20	24,61	15:46	26,07
16:21	20,89	12:23	24,63	15:52	26,14
16:28	20,89	12:27	24,70	15:57	26,25
16:32	20,71	12:29	24,79	16:03	26,34
16:38	20,71	12:32	24,79	16:08	26,41
16:45	20,71	12:35	24,81	16:14	26,48
16:50	20,71	12:38	24,83	16:19	26,59
16:55	20,71	12:42	24,88	16:23	26,59
17:01	20,71	12:45	24,97	16:29	26,59
17:05	20,76	12:48	24,97	16:34	26,50
17:10	20,76	12:51	25,01	16:39	26,45
17:15	20,76	12:54	25,03	16:44	26,41
17:20	20,76	12:58	25,15		
17:24	20,78	13:02	25,15		

Πίνακας 5.13: Εσωτερική θερμοκρασία οργάνου



Διάγραμμα 5.6: Εσωτερική θερμοκρασία οργάνου

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασίας.

### 5.2.3 Έλεγχος απόστασης με μέτρηση υψομετρικών διαφορών

Σε αυτόν τον έλεγχο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποστάσεων – υψομετρικών διαφορών σε εξωτερική βάση ελέγχου που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση επίγειου σαρωτή laser. Οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων, προσδιορίστηκαν με διακριβωμένο γεωδαιτικό όργανο Total Station. Ο έλεγχος αφορά τον προσδιορισμό της ακρίβειας στην μέτρηση αποστάσεων.

Πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις έξι ειδικών στόχων οι οποίοι τοποθετήθηκαν κατά μήκος ενός κατακόρυφου στύλου. Οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των στόχων είναι ίσες με 0.50 m.

Όλες οι σαρώσεις έγιναν με διακριτική ικανότητα (ανάλυση σάρωσης) 1 mm. Η απόσταση μεταξύ του οργάνου και του στύλου είναι περίπου ίση με 30 m. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές παρατηρήσεων, η καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει δώδεκα σαρώσεις. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 48 μετρήσεις.

Σάρωση στόχου	X (m)	Y (m)	Z (m)	
1 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1	-4,122	-29,099	1,499
	2	-4,122	-29,100	0,997
	3	-4,124	-29,102	0,501
	4	-4,125	-29,104	-0,001
	5	-4,125	-29,106	-0,498
	6	-4,126	-29,11	-0,992
	6	-4,126	-29,110	-0,992
	5	-4,124	-29,106	-0,498
	4	-4,125	-29,104	-0,001
	3	-4,124	-29,103	0,500
	2	-4,123	-29,101	0,996
	1	-4,123	-29,100	1,499
2 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1	-4,123	-29,100	1,499
	2	-4,121	-29,101	0,996
	3	-4,123	-29,102	0,500
	4	-4,126	-29,104	-0,002
	5	-4,126	-29,106	-0,499
	6	-4,128	-29,109	-0,995
	6	-4,128	-29,109	-0,995
	5	-4,127	-29,106	-0,500
	4	-4,126	-29,104	-0,002
	3	-4,124	-29,102	0,500
	2	-4,123	-29,100	0,996
	1	-4,123	-29,099	1,498
3 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1	-4,123	-29,099	1,499
	2	-4,122	-29,100	0,996
	3	-4,124	-29,102	0,500
	4	-4,126	-29,104	-0,001
	5	-4,125	-29,106	-0,498
	6	-4,126	-29,109	-0,993
	6	-4,126	-29,110	-0,992
	5	-4,124	-29,106	-0,498
	4	-4,124	-29,103	0,0001
	3	-4,123	-29,102	0,501
	2	-4,122	-29,101	0,997
	1	-4,122	-29,099	1,499
4 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1	-4,121	-29,100	1,500
	2	-4,122	-29,100	0,997
	3	-4,123	-29,102	0,501
	4	-4,124	-29,104	0,0001
	5	-4,125	-29,106	-0,498
	6	-4,127	-29,109	-0,993
	6	-4,128	-29,109	-0,993
	5	-4,127	-29,106	-0,498
	4	-4,126	-29,104	-0,001
	3	-4,125	-29,102	0,500
	2	-4,124	-29,1	0,997
	1	-4,123	-29,099	1,498

Πίνακας 5.14: Συντεταγμένες κέντρου στόχων

Όλες οι μετρήσεις έγιναν την ίδια μέρα.

Οι συντεταγμένες του κέντρου των στόχων που προέκυψαν από τις σαρώσεις με τον επίγειο σαρωτή laser φαίνονται στον παραπάνω πίνακα (πίνακας 5.14).

Από τις συντεταγμένες του κέντρου, με εφαρμογή της σχέσης (5.1) προκύπτουν οι αποστάσεις – υψομετρικές διαφορές μεταξύ των στόχων.

$$d = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (5.1)$$

όπου  $X_i, Y_i, Z_i$  είναι οι συντεταγμένες του στόχου  $i$ ,  $X_j, Y_j, Z_j$  οι συντεταγμένες του στόχου  $j$  και  $d$  η μεταξύ τους απόσταση – υψομετρική διαφορά.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 5.15).



Υψομετρική διαφορά στόχων(m)			Μέση τιμή (m)	
1 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,50200	1 - 2	0,5024
	2 - 3	0,49600		
	3 - 4	0,50200		
	4 - 5	0,49700		
	5 - 6	0,49401		
	5 - 6	0,49402		
	4 - 5	0,49700		
	3 - 4	0,50100		
	2 - 3	0,49600		
	1 - 2	0,50300		
2 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,50300	2 - 3	0,4961
	2 - 3	0,49600		
	3 - 4	0,50201		
	4 - 5	0,49700		
	5 - 6	0,49601		
	5 - 6	0,49501		
	4 - 5	0,49800		
	3 - 4	0,50201		
	2 - 3	0,49600		
	1 - 2	0,50200		
3 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,50300	3 - 4	0,5014
	2 - 3	0,49601		
	3 - 4	0,50101		
	4 - 5	0,49700		
	5 - 6	0,49501		
	5 - 6	0,49402		
	4 - 5	0,49811		
	3 - 4	0,50090		
	2 - 3	0,49600		
	1 - 2	0,50200		
4 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,50300	4 - 5	0,4974
	2 - 3	0,49600		
	3 - 4	0,50090		
	4 - 5	0,49810		
	5 - 6	0,49501		
	5 - 6	0,49501		
	4 - 5	0,49700		
	3 - 4	0,50100		
	2 - 3	0,49700		
	1 - 2	0,50100		
4 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,50300	5 - 6	0,4948
	2 - 3	0,49600		
	3 - 4	0,50090		
	4 - 5	0,49810		
	5 - 6	0,49501		
	5 - 6	0,49501		
	4 - 5	0,49700		
	3 - 4	0,50100		
	2 - 3	0,49700		
	1 - 2	0,50100		

Πίνακας 5.15: Αποστάσεις – υψομετρικές διαφορές στόχων

Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των στόχων είναι ίση με 0.50 m. Ο παρακάτω πίνακας (πίνακας 5.16) δίνει τις διαφορές μεταξύ αυτής και των μετρημένων με τον επίγειο σαρωτή laser.

Διαφορές κατακόρυφων αποστάσεων στόχων (m)		
1 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,00200
	2 - 3	-0,00399
	3 - 4	0,00200
	4 - 5	-0,00299
	5 - 6	-0,00598
	5 - 6	-0,00598
	4 - 5	-0,00299
	3 - 4	0,00100
	2 - 3	-0,00399
	1 - 2	0,00300
2 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,00300
	2 - 3	-0,00399
	3 - 4	0,00201
	4 - 5	-0,00300
	5 - 6	-0,00399
	5 - 6	-0,00499
	4 - 5	-0,00199
	3 - 4	0,00201
	2 - 3	-0,00399
	1 - 2	0,00200
3 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,00300
	2 - 3	-0,00399
	3 - 4	0,00101
	4 - 5	-0,00299
	5 - 6	-0,00499
	5 - 6	-0,00598
	4 - 5	-0,00189
	3 - 4	0,00091
	2 - 3	-0,00400
	1 - 2	0,00200
4 <sup>η</sup> Σειρά σαρώσεων	1 - 2	0,00300
	2 - 3	-0,00399
	3 - 4	0,00090
	4 - 5	-0,00189
	5 - 6	-0,00499
	5 - 6	-0,00499
	4 - 5	-0,00299
	3 - 4	0,00100
	2 - 3	-0,00299
	1 - 2	0,00100

Πίνακας 5.16: Διαφορές κατακόρυφων αποστάσεων

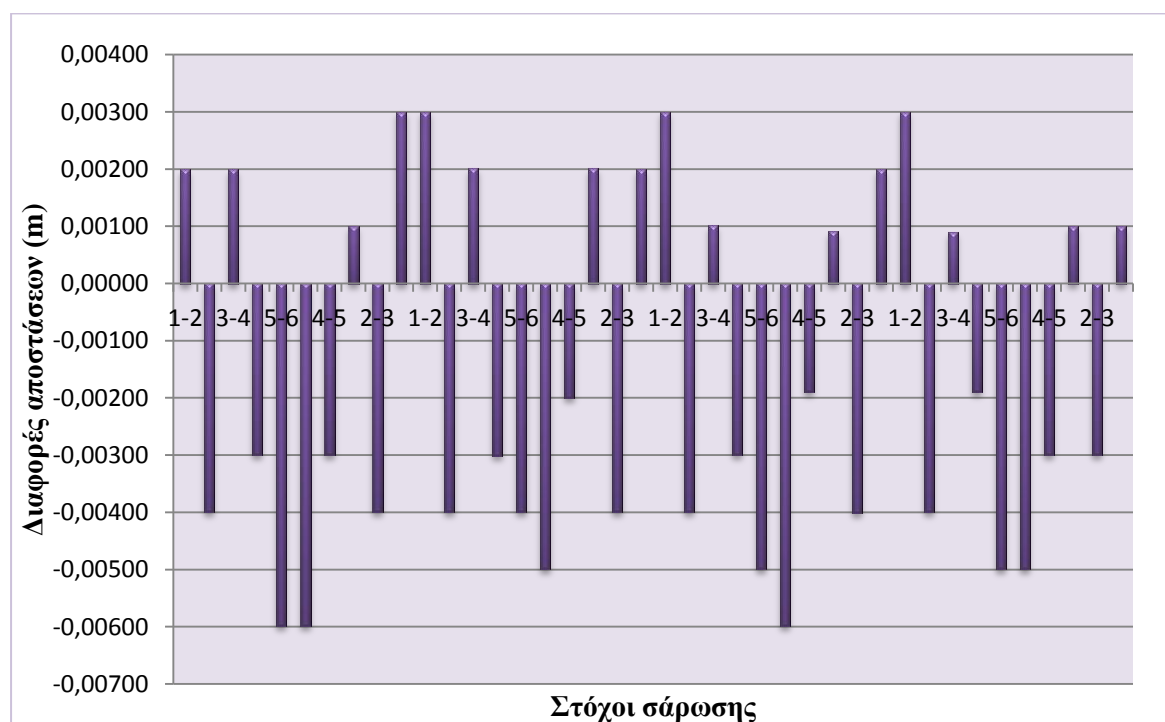
Ακολουθεί πίνακας (πίνακας 5.17) με τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών.

Σαρωτής	Στόχοι	Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)
Leica ScanStation2	1 - 2	0,00100	0,00300	0,00200
Leica ScanStation2	2 - 3	-0,00400	-0,00299	0,00100
Leica ScanStation2	3 - 4	0,00090	0,00201	0,00111
Leica ScanStation2	4 - 5	-0,00300	-0,00189	0,00111
Leica ScanStation2	5 - 6	-0,00598	-0,00399	0,00200

Πίνακας 5.17: Στατιστικά στοιχεία διαφορών

Τα αποτελέσματα του σαρωτή που ελέγχθηκε βρίσκονται εντός του θορύβου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ( $1.96 \times 4 \text{ mm}$ ).

Οι παραπάνω διαφορές απεικονίζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 5.7).



Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα διαφορών της απόστασης μεταξύ των στόχων

#### 5.2.4 Έλεγχος οριζόντιων διευθύνσεων

Έγιναν μετρήσεις όπως περιγράφονται στο άρθρο «Βαθμονόμηση Επίγειων Σαρωτών Laser στο Πλαίσιο των Διεθνών Προδιαγραφών ISO» των Τσακίρη, Αραμπατζή, Παγούνη, Σταθά, Ανδριτσάνου, το οποίο παρουσιάστηκε στο 4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας (Τσακίρη κ.α., 2005).

Για τον έλεγχο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εξωτερικό πεδίο ελέγχου. Ο έλεγχος, πειραματικές μετρήσεις και διάταξη πεδίου, βασίστηκε στην διαδικασία που περιγράφεται στις διεθνείς προδιαγραφές ISO/DIS 12857-2 για τα όργανα μέτρησης γωνιών (θεοδολίων και total stations). Το πεδίο ελέγχου αποτελείται από το σημείο στάσης του οργάνου και πέντε σημεία περιμετρικά αυτού. Τα κριτήρια που πληροί το πεδίο είναι (Gottwald, 2008):

- Η απόσταση των στόχων από το σαρωτή βρίσκονταν εντός του εύρους της ελάχιστης και μέγιστης απόστασης που μπορεί να μετρήσει ο σαρωτής
- Οι στόχοι ήταν κατανεμημένοι πάνω από τον ορίζοντα
- Ένας στόχος βρίσκονταν σε πολύ διαφορετικό ύψος από τους υπολοίπους (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο στόχος 5)

Η υλοποίηση του πεδίου έγινε με τη χρήση πέντε σφαιρικών στόχων (cyra sphere targets) που τοποθετήθηκαν περιμετρικά του σαρωτή. Οι στόχοι κατανεμήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν σχεδόν κανονικό πεντάγωνο, ενώ οι αποστάσεις των στόχων από το σημείο στάσης του σαρωτή φαίνονται στον πίνακα 5.18. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων, όπου κάθε σειρά περιλαμβάνει τρία πλήρη σετ παρατηρήσεων. Το πρώτο σετ αποτελείται από τη σάρωση των στόχων (1, 2, 3, 4, 5) και ολοκληρώνεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως (5, 4, 3, 2, 1). Τα δύο υπόλοιπα σετ παρατηρήσεων πραγματοποιούνται με την ίδια διαδικασία με χρονική καθυστέρηση 5 λεπτών μεταξύ τους.

Όλες οι σαρώσεις των στόχων πραγματοποιήθηκαν με τη μέγιστη ανάλυση 1x1 mm.

	Στόχος	Απόσταση (m)
<b>Leica ScanStation2</b>	1	66.87
	2	12.71
	3	73.27
	4	100.47
	5	36.45

*Πίνακας 5.18. Αποστάσεις οργάνου – στόχων*

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση των στόχων και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους για όλα τα σετ και όλες τις σειρές μετρήσεων. Υπολογίστηκαν οι γωνίες διεύθυνσης για κάθε στόχο και οι μέσοι όροι των διευθύνσεων για κάθε σετ μετρήσεων. Τέλος υπολογίστηκαν, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στους κανονισμούς ISO/DIS 12857-2, το τυπικό σφάλμα για τη μέτρηση διευθύνσεων

σε κάθε σετ παρατηρήσεων και το τελικό σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων κατά ISO/DIS 12857-2 (πίνακας 5.19).

Σετ παρατηρήσεων	Τυπικό σφάλμα Si (cc)
1ο	± 18 cc
2ο	± 24 cc
3ο	± 21 cc
4ο	± 26 cc
Τελικό $S_o$ : $S_o = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	± 22.5 cc

Πίνακας 5.19: Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων

Στα 4 σετ παρατηρήσεων, ο βαθμός ελευθερίας με τον οποίο προσδιορίζεται το αντίστοιχο a posteriori  $S_{oi}$  είναι 8. Και οι έλεγχοι πραγματοποιούνται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Τα αποτελέσματα και για τα 4 σετ, περνούν το test X2, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

$$\frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} \leq \frac{X_{95\%}^2}{r} \rightarrow \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} \leq \frac{15.5}{8} \rightarrow \frac{S_{o,i}}{38cc} \leq 1.9 \quad (5.2)$$

Τα επιμέρους  $S_{o,i}$  όσο και το τελικό  $S_o$  που υπολογίστηκε, είναι μέσα στο θόρυβο της μέτρησης. Επιπλέον, στην απόσταση των 100 m, το  $S_o = \pm 22.5$  cc αντιστοιχεί σε γραμμική μετατόπιση ± 3.5 mm, αποτέλεσμα συμβατό με την γραμμική ακρίβεια που δίνουν οι κατασκευαστές των ± 4 mm.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που ανακύπτουν από την αξιολόγηση των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η αξιολόγηση αφορά τόσο τη συλλογή των δεδομένων όσο και την επεξεργασία αυτών.

### 6.1 Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος της βαθμονόμησης έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής για τον καθορισμό των συστηματικών σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται με τα γεωδαιτικά όργανα (π.χ. Total Station, EDM). Όσον αφορά τους επίγειους σαρωτές laser έχουν αναπτυχθεί προσεγγίσεις για την βαθμονόμηση του οργάνου οι οποίες βασίζονται στο μοντέλο σφαλμάτων ενός γεωδαιτικού σταθμού - total station, λόγω ομοιότητας των δύο οργάνων. Έτσι προσδιορίζονται τα συστηματικά σφάλματα και η ακρίβεια των μετρήσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η ανάπτυξη μιας τυποποιημένης διαδικασίας βαθμονόμησης ενός συγκεκριμένου επίγειου σαρωτή laser τύπου TOF, μέσω μετρολογικών ελέγχων οι οποίοι προσδιορίζουν την ακρίβεια του οργάνου.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις αντικειμένων (ειδικοί στόχοι) σε κατάλληλα διαμορφωμένα πεδία ελέγχου (εσωτερικά και εξωτερικά) τα οποία υλοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν με τον επίγειο σαρωτή laser ScanStation 2 της Leica Geosystems. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές μετρολογικού ελέγχου, με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας του οργάνου στην μέτρηση των αποστάσεων - μηκών. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν έγινε λήψη σημείων με μεγάλη πυκνότητα (ανάλυση σάρωσης 1x1 mm).

### 6.1.1 Συλλογή δεδομένων

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων με το σύστημα της επίγειας σάρωσης με laser υπήρχαν ορισμένοι περιορισμοί. Η εμβέλεια του οργάνου είναι μικρή (μικρότερη σε σχέση με τα παραδοσιακά γεωδαιτικά όργανα). Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα μειώνεται όσο η απόσταση μεταξύ οργάνου και στόχου μεγαλώνει. Τα νέφη σημείων που προέκυψαν από τις σαρώσεις ανταποκρίθηκαν στις απαιτήσεις της εργασίας όταν η απόσταση μεταξύ του στόχου και του οργάνου ήταν μικρή. Δηλαδή η πυκνότητα και ο όγκος των σημείων που συλλέχθηκαν ήταν ικανοποιητικά, ώστε να γίνει η μοντελοποίηση των αντικειμένων που σαρώθηκαν και έτσι να προκύψουν τα επιθυμητά στοιχεία (συντεταγμένες X, Y, Z). Επιπλέον, παράλληλα με τις μετρήσεις, έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία) στις περιοχές των πεδίων, προκειμένου να ελεγχθεί αν οι μεταβολές αυτών επηρεάζουν τα δεδομένα των μετρήσεων και να γίνουν διορθώσεις στις τελικές τιμές αν αυτό κριθεί απαραίτητο. Για τον ίδιο λόγο πραγματοποιήθηκε καταγραφή και της εσωτερικής θερμοκρασίας του οργάνου.

### 6.1.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για τον έλεγχο της ακρίβειας του οργάνου στην μέτρηση της απόστασης πραγματοποιήθηκαν οι εξής επιμέρους μετρολογικοί έλεγχοι:

α) ο έλεγχος απόστασης με βάση ελέγχου. Κατά τον έλεγχο αυτό μετρήθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων εξωτερικής βάσης ελέγχου. Η ανάλυση των σαρώσεων ήταν ίση με 1 mm. Στον συγκεκριμένο έλεγχο, για αποστάσεις στόχων μεγαλύτερες των 200 μέτρων, ο αριθμός σημείων των σαρώσεων δεν ήταν επαρκής ώστε να προκύψουν οι συντεταγμένες του κέντρου του στόχου και τελικά η απόσταση μεταξύ οργάνου – στόχου. Δηλαδή υπήρχαν προβλήματα λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ σαρωτή – στόχου.

Η βάση μετρήθηκε και με διακριβωμένο γεωδαιτικό σταθμό (Total Station), προκειμένου να γίνει σύγκριση και έλεγχος των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα των διαφορών μεταξύ των δυο οργάνων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.1).

Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)	Μέση τιμή (m)	Τυπική Απόκλιση (m)
- 0,0028	0,0134	0,0162	0,0062	0,0046

*Πίνακας 6.1: Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης σαρωτή – γεωδαιτικού σταθμού*

Παρατηρείται ότι η μέγιστη διαφορά είναι εκτός ορίου επιτρεπτού σφάλματος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (1.96 x 4 mm) σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

β) ο έλεγχος εσωτερικής ακρίβειας οργάνου με επαναληπτικές μετρήσεις αποστάσεων. Κατά τον έλεγχο αυτό πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σταθερών αποστάσεων, προκειμένου να ελεγχθεί η σταθερότητα του οργάνου. Για το λόγο αυτό η κάθε μια μέτρηση είχε διάρκεια μερικών ωρών. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούσαν στο πεδίο καθώς και της εσωτερικής θερμοκρασίας του οργάνου. Έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε το RMS σφάλμα των συντεταγμένων του κέντρου του στόχου (πίνακας 6.2).

	Απόσταση 62 m.	Απόσταση 40 m.	Απόσταση 20 m.
<b>RMS<sub>X</sub> (mm.)</b>	0,893	0,475	0,409
<b>RMS<sub>Y</sub> (mm.)</b>	0,511	0,554	0,499
<b>RMS<sub>Z</sub> (mm.)</b>	0,720	0,499	0,326

*Πίνακας 6.2: Στατιστικά συντεταγμένων σφαίρας*

Το RMS των διαφορών είναι εντός ορίου επιτρεπτού σφάλματος.

$$\text{RMS} \leq 1 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Επίσης η διακύμανση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και της εσωτερικής θερμοκρασίας του οργάνου δεν ήταν σημαντική ώστε να επηρεάσει τις μετρήσεις.

γ) ο έλεγχος απόστασης με μέτρηση υψομετρικών διαφορών. Κατά τον έλεγχο αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υψομετρικών διαφορών μεταξύ σημείων. Οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων είναι ίσες με 0.50 m και προσδιορίστηκαν με διακριβωμένο γεωδαιτικό σταθμό. Τα στατιστικά στοιχεία των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των στόχων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 6.3):



Σαρωτής	Στόχοι	Ελάχιστο (m.)	Μέγιστο (m.)	Εύρος (m.)
Leica ScanStation2	1 - 2	0,00100	0,00300	0,00200
Leica ScanStation2	2 - 3	-0,00400	-0,00299	0,00100
Leica ScanStation2	3 - 4	0,00090	0,00201	0,00111
Leica ScanStation2	4 - 5	-0,00300	-0,00189	0,00111
Leica ScanStation2	5 - 6	-0,00598	-0,00399	0,00200

Πίνακας 6.3: Στατιστικά στοιχεία διαφορών

Τα αποτελέσματα του σαρωτή που ελέγχθηκε βρίσκονται εντός του θορύβου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ( $1.96 \times 4 \text{ mm}$ ).

Οι διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) δεν ήταν σημαντικές ώστε να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

δ) ο έλεγχος οριζόντιων διευθύνσεων (Τσακίρη κ.α. 2012). Κατά τον έλεγχο αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όπως περιγράφονται στις διεθνείς προδιαγραφές ISO/DIS 12857-2 για τα όργανα μέτρησης γωνιών (θεοδολίχων και total stations). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.4).

Σετ παρατηρήσεων	Τυπικό σφάλμα $S_i$ (cc)
1ο	$\pm 18 \text{ cc}$
2ο	$\pm 24 \text{ cc}$
3ο	$\pm 21 \text{ cc}$
4ο	$\pm 26 \text{ cc}$
Τελικό $S_o$ : $S_o = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	$\pm 22.5 \text{ cc}$

Πίνακας 6.4: Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων

Όπως φαίνεται στα 4 σετ παρατηρήσεων, ο βαθμός ελευθερίας με τον οποίο προσδιορίζεται το αντίστοιχο a posteriori  $S_{oi}$  είναι 8. Και οι έλεγχοι πραγματοποιούνται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Τα αποτελέσματα και για τα 4 σετ περνούν το test  $X^2$ , για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι σαρωτές laser προσφέρουν τη δυνατότητα μετρήσεων υψηλής ακρίβειας. Οι αποτυπώσεις μεγάλης ακρίβειας με τη χρήση σαρωτή laser «ανοίγουν το δρόμο» σε ένα αριθμό νέων εφαρμογών. Οι αποτυπώσεις αυτές επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τα

δεδομένα. Ο έλεγχος των συστημάτων laser συνιστάται με μια διαδικασία βαθμονόμησης.

Η διαδικασία βαθμονόμησης και ελέγχου θα βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων διαφορετικών σαρωτών laser. Μεγαλύτερη ακρίβεια στην μέτρηση του σαρωτή laser θα έχει ως αποτέλεσμα την καθιέρωση των συστημάτων ψηφιακής καταγραφής σε διάφορες εφαρμογές αποτύπωσης.

## 6.2 Προτάσεις

Σ' αυτήν την ενότητα γίνονται οι προτάσεις για την συνέχιση της εργασίας. Αυτές είναι οι εξής:

1. Υλοποίηση μόνιμης εξωτερικής βάσης ελέγχου απόστασης, προκειμένου να πραγματοποιούνται μετρήσεις μεγαλύτερες των 50 μέτρων.
2. Εφαρμογή των προτεινόμενων πειραματικών διαδικασιών και σε άλλους σαρωτές laser της τεχνολογίας TOF.
3. Η αυτό-βαθμονόμηση είναι μια τεχνική βαθμονόμησης η οποία προσδιορίζει τα συστηματικά σφάλματα των οργάνων ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό των παραμέτρων των συστημάτων τους. Προτείνεται η εφαρμογή της διαδικασίας της αυτό-βαθμονόμησης στον επίγειο σαρωτή laser τύπου TOF που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική, μέσω του σχεδιασμού ενός κατάλληλου δικτύου (γεωμετρία δικτύου, περιορισμοί δικτύου κ.λπ.). Η διαδικασία αυτή θα εξασφαλίσει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την ακρίβεια του οργάνου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη Βιβλιογραφία

*Άρθρα, συγγράμματα, βιβλία και εργασίες*

1. Andrews L.C. & Phillips R. L., (1998). Laser Beam Propagation through Random Media, SPIE Optical Engineering Press, Bellmham, Washington
2. Bosch T. & Lescure M., (1995). Selected Papers on Laser Distance Measurement, SPIE Milestone SPIE Optical Engineering Press, Bellmham, WA
3. Barber D., Mills J., Bryan PG, (2001). Laser Scanning and Photogrammetry: 21st century metrology. In: Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001, Potsdam, Germany
4. Blais F., (2003). A Review of 20 Years of Range Sensor Development. In: El-Khakim SF, Gruen A, Walton JS (eds.) Videometrics VII, Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE
5. Fröhlich C., Mettenleiter M., Hartl F., Dalton G. & Hines D., (2000). Imaging Laser Radar for 3-D Modelling of Real World Environments, in 'Journal of Sensor Review
6. Gordon S.J. & Lichti D.D., (2004). Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: the effect on 3D resection solutions
7. Gordon S.J., (2005). Structural Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanners, Curtin University of Technology, Department of Spatial Sciences, Australia
8. Gottwald R., (2008). Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) A Contribution to a Future ISO Standard, Switzerland
9. Harvey B.R., (2004). Registration and transformation of multiple site terrestrial laser scanning, Geomat Res Australas
10. Hebert M. & Krotkov E., (1992). 3D measurements from imaging laser radars: how good are they?
11. Ingensand H., Ryf A., Schulz T., (2003). Performances and experiences in terrestrial laser scanning, In: Gruen A., Kahmen H. (eds.) Optical 3-D Measurement Techniques VI.
12. Ingensand H., (2006). Metrological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology, Hilmar Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zurich
13. Koskinen M., Kostamovaara J., Myllylä R., (1991). Comparison of the continuous wave and pulsed time-of-flight laser range finding techniques, In: SPIE Proceedings
14. Kern F., (2001). Supplementing laser scanner geometric data with photogrammetric images for modelling. In: Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001, Potsdam, Germany
15. Lichti D.D., (2002a). Gordon S.J. & Stewart M.P., Ground-Based Laser Scanners Operation, Systems and Applications, in 'Geomatica'

16. Mills J. & Barber D., (2003). An Addendum to the Metric Survey Specifications for English Heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods
17. Meschede D., (2004). Optics, Light and Lasers The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics, Wiley-VCH
18. Määttä K., Kostamovaara J., Myllylä R., (1993). Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques
19. Runne H., Niemeier W., Kern F., (2001). Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings, in A. Grun and H. Kahmen, eds, 'Optical 3-D Measurement Techniques V, Vienna, Austria
20. Rueger M., (1996). Electronic Distance Measurement, Springer, Berlin
21. Reshetyuk Y., (2006). Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering, Department of Transport and Economics, Geodesy Division, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden
22. Reshetyuk Y., (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Stockholm
23. Staiger R., (2005). The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS), In: Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt
24. Slaboch V., (1998). ISO and the Surveyor, XXI FIG International Congress, Brighton
25. Schulz T., (2007). Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy, Technical University of Berlin
26. Torrance K. & Sparrow E., (1967). Theory for Off- Specular Reflection From Roughened Surfaces, in 'Journal of the Optical Society of America'
27. Thiel K.H., Wehr A., (2004). Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. In: Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment", Freiburg, Germany

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

*Άρθρα, συγγράμματα, βιβλία και εργασίες*

28. Αγάτζα - Μπαλοδήμου Α.Μ., Μπαλοδήμος Δ.Δ., (1988). Εισαγωγή στη Γεωδαισία, Αθήνα
29. Αθανασιάδης Κ.Ν., (2006). Μέτρηση, Μετρολογία και Αξιώματα της Μετρολογίας, Αθήνα
30. Αθανασιάδης Κ.Ν., (2006). Μετρήσεις, Ποιότητα και Μετρολογία στην Ελλάδα: Εσωτερικά Γνωρίσματα, Περιβάλλον και Προκλήσεις, Αθήνα
31. Δούκας Ι.Δ., (2005). Η Ιστορική εξέλιξη της Επιστήμης της Μετρολογίας, Επιστημονικό συνέδριο "Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στη Ελλάδα", Θεσσαλονίκη

32. Δούκας Ι.Δ., (2005). Περί της διακρίβωσης των Γεωδαιτικών (Τοπογραφικών) Οργάνων, 1<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό συνέδριο Μετρολογίας, "Metrologia 2005 : Η μετρολογία στην Ελλάδα. Έρευνα, εφαρμογές, προτεραιότητες και προοπτικές", Αθήνα
33. Μπαλοδήμος Δ.Δ. & Σταθάς Δ., (2006). Σημειώσεις Μαθήματος «ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ», Βασικές Έννοιες και Ορισμοί, Στατιστικοί Έλεγχοι για την Αξιοπιστία των Οργάνων, Αθήνα
34. Τσακίρη Μ., (2010). Η Τεχνολογία της Επίγειας Σάρωσης Laser, Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα
35. Τσακίρη Μ., Σταθάς Δ., Μπίθας Α., Βαλάνη Α., (2005). Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Έλεγχου Επίγειων Σαρωτών Laser, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
36. Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β., (2012). Βαθμονόμηση Επίγειων Σαρωτών Laser στο Πλαίσιο των Διεθνών Προδιαγραφών ISO, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

### **Πηγές και τοποθεσίες στο διαδίκτυο**

<http://en.wikipedia.org/wiki/Metrology>

<http://www.esyd.gr/portal/p/esyd/el/esyd.jsp>

<http://el.wikipedia.org/wiki/>

<http://www.eim.gr>

<http://www.iso.org/>

<http://www.oiml.org/>

[www.hellaslab.gr](http://www.hellaslab.gr)

<http://www.fig.net/commission5/index.htm>

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/>

<http://hds.leica-geosystems.com//Leica-ScanStation-2>

<http://www.eim.gr/EIMv1/html/greek/metrology/skopos.html>

<http://www.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=949>

<http://www.leicageosystems>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ***A. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ***

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές έννοιες που αφορούν σε θέματα μετρολογίας στην Ελλάδα (Μπαλοδήμος & Σταθάς, 2006).

#### *Βαθμονόμηση*

Είναι η αναγραφή, στην κενή κλίμακα του οργάνου, των ενδείξεων με βάση ένα γνωστό και καθορισμένης ακρίβειας μέγεθος της φυσικής ιδιότητας την οποία μετρά το όργανο. Για παράδειγμα στο θεοδόλιχο που μετρά γωνίες (φυσική ιδιότητα) αναγράφονται οι βαθμοί και η απόδοση του (κλίμακα μέτρησης ανά 10 cc ή 25 cc κ.λπ.).

#### *Διακρίβωση*

Είναι η σύγκριση μεταξύ δυο οργάνων ή συσκευών μέτρησης, από τα οποία το ένα είναι το εθνικό πρότυπο ή πρότυπο γνωστής ακρίβειας η οποία έχει μεταφερθεί σε αυτό από τα εθνικά πρότυπα. Με τη σύγκριση αυτή βαθμονομείται το υπό έλεγχο όργανο και διαπιστώνεται, επαληθεύεται ή επαναφέρεται με ρύθμιση η ακρίβεια του.

#### *Διαπίστευση*

Είναι η διαδικασία κατά την οποίαν ένας εξουσιοδοτημένος φορέας χορηγεί επίσημη αναγνώριση για την ικανότητα άλλου φορέα ή ατόμου να εκτελεί συγκεκριμένα καθήκοντα.

#### *Πιστοποίηση*

Είναι η πράξη του Εθνικού Ιδρύματος Μετρολογίας (Ε.Ι.Μ.) ή οποιουδήποτε άλλου διαπιστευμένου φορέα με την οποίαν πιστοποιείται η τεκμηρίωση της ακρίβειας σύμφωνα με προκαθορισμένες απαιτήσεις.

#### *Συμμόρφωση*

Είναι η ικανοποίηση προδιαγεγραμμένων απαιτήσεων από προϊόν διαδικασίας ή υπηρεσία.

### Πρότυπο

Είναι η υλοποιημένη μονάδα μέτρησης, τα υλικά αναφοράς ή συστήματα μέτρησης, προορισμένα να ορίσουν, να πραγματοποιήσουν, να συντηρήσουν ή να αναπαραγάγουν μια μονάδα ή μια ή και περισσότερες αξίες ενός μεγέθους για να χρησιμεύσουν ως βάση αναφοράς.

### Εθνικό πρότυπο

Είναι το εθνικά αναγνωρισμένο πρότυπο προκειμένου να χρησιμοποιείται σε μια χώρα ως βάση για τον καθορισμό τιμών σε άλλα πρότυπα του μεγέθους που αφορά.

### Πρωτεύον πρότυπο

Είναι το πρότυπο το οποίο έχει καθορισθεί ή αναγνωρίζεται ευρέως ότι έχει τις υψηλότερες μετρολογικές ιδιότητες και η τιμή του είναι αποδεκτή χωρίς να γίνεται αναφορά σε άλλα πρότυπα του ίδιου μεγέθους.

### Δευτερεύον πρότυπο

Είναι το πρότυπο του οποίου η τιμή καθορίζεται μέσω σύγκρισης με ένα πρωτεύον πρότυπο για το ίδιο μέγεθος.

### Πρότυπα εργασίας

Είναι οι πιστοποιημένες μονάδες, συσκευές ή διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη διακρίβωση συσκευών δοκιμών, μετρήσεων ή διαγνώσεων καθημερινής χρήσης.

## **B. ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ISO**

Κύριος στόχος των προτύπων ISO είναι ο καθορισμός των διαδικασιών που πρέπει να ακολουθούνται στις μετρήσεις, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια, με τα όργανα που χρησιμοποιούνται κάθε φορά.

Η ανάπτυξη των προτύπων γίνεται σε τρία στάδια (Slaboch, 1998):

### Πρώτο στάδιο

Ο Εθνικός Οργανισμός Τυποποίησης του φορέα που έχει διαγνώσει μια ανάγκη για νέο διεθνές πρότυπο ενημερώνει τον ISO. Εφόσον η ανάγκη επιβεβαιωθεί και υπάρξει επίσημη συμφωνία, ειδικοί καθορίζουν το τεχνικό αντικείμενο του μελλοντικού προτύπου.

### Δεύτερο Στάδιο

Οι χώρες διαπραγματεύονται τις λεπτομερείς προδιαγραφές που θα περιλαμβάνονται στο πρότυπο ώστε να υπάρξει πλειοψηφία.

### Τρίτο Στάδιο

Εγκρίνεται το Διεθνές Πρότυπο με κριτήρια την αποδοχή των 2/3 από τα μέλη που το ανέπτυξαν και του 75% των μελών που θα ψηφίσουν.

Τα Διεθνή πρότυπα ISO, που ισχύουν σήμερα και έχουν σχέση με τον τοπογραφικό εξοπλισμό είναι (Slaboch, 1998):

**ISO 17123-1:2002:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 1: Theory

**ISO 17123-2:2001:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 2: Levels

**ISO 17123-3:2001:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 3: Theodolites

**ISO 17123-4:2001:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)

**ISO 17123-6:2003:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 6: Rotating lasers



**ISO 17123-5:2005:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 5: Electronic tachometers

**ISO 17123-7:2005:** Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 7: Optical plumbing instruments

**ISO 12858, Publication date: 1994-04:** Optics and optical instruments – Ancillary devices for geodetic instruments - Part 1: Invar leveling staffs

Υπεύθυνη για την δημιουργία αυτών είναι η ISO επιτροπή TC172/SC6

Άλλα πρότυπα για τα γεωδαιτικά όργανα μέτρησης είναι τα γερμανικά πρότυπα DIN 17823 (German National Body of Standardization). Αυτά είναι προγενέστερα των προτύπων ISO. Είναι τα ακόλουθα (Slaboch, 1998):

**DIN 18718, Publication date: 1986-01:** Types and elements of geodetic instruments – Terms

**DIN 18719, Publication date: 1975-12:** Surveying instruments, centering, stub and socket

**DIN 18720, Publication date: 1995-07:** Instrument and tripod connectors on surveying instruments

**DIN 18721, Publication date: 1977-11:** Circle graduation with visual reading for surveying instruments

**DIN 18722, Publication date: 1983-02:** Tubular level for surveying instruments, terms and requirements

**DIN 18723-1, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, general informations

**DIN 18723-2, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, levels

**DIN 18723-3, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, Theodolites

**DIN 18723-4, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, optical distance measuring instruments

**DIN 18723-5, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, plumbing instruments

**DIN 18723-6, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, electro-optical distance measuring instruments for short ranges

**DIN 18723-7, Publication date: 1990-07:** Field procedure for precision testing of surveying instruments, gyroscopes

**DIN 18723-8 (Draft standard), Publication date: 1998-08:** Field procedure for precision testing of surveying instruments – Part 8: Rotating laser levels

**DIN 18724, Publication date: 1990-06:** Geodetic instruments, precision of levels and theodolites from technical data

**DIN 18725, Publication date: 1971-03:** Surveying instruments, reticules

**DIN 18726, Publication date: 1996-07:** Tripods for surveying instruments