



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

**ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΝΟΜΕΩΝ Υ/Β ΜΕ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ**



ΣΟΦΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ:

ΓΚΙΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 2 |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | 5 |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 10 |
| ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ | 11 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 12 |
| ABSTRACT | 13 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΟΡΙΣΜΟΙ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ..... | 18 |
| 1.1. Η επιστήμη και οι Κλάδοι της Γεωδαισίας | 18 |
| 1.2. Βιομηχανική Γεωδαισία | 18 |
| 1.2.1. Ορισμός – Βασικές Αρχές..... | 18 |
| 1.2.2. Βασικά χαρακτηριστικά Βιομηχανικής Γεωδαισίας..... | 20 |
| 1.2.3. Περιοχές Εφαρμογών - Ακρίβειες της Βιομηχανικής Γεωδαισίας | 21 |
| 1.3. Ιστορική αναδρομή..... | 24 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ 3Δ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ..... | 27 |
| 2.1. Γενικά – Εφαρμοζόμενες Μεθοδολογίες..... | 27 |
| 2.2. Συστήματα συντεταγμενογράφων | 28 |
| 2.3. Γεωδαιτικές μέθοδοι..... | 29 |
| 2.3.1. Σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί | 29 |
| 2.3.2. Συστήματα γεωδαιτικών σταθμών | 31 |
| 2.3.3. Laser trackers | 32 |
| 2.4. Φωτογραμμετρικές μέθοδοι..... | 33 |
| 2.4.1. Laser scanners | 35 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ..... | 38 |
| 3.1. Γενικά | 38 |
| 3.2. Βασικοί Μέθοδοι Υπολογισμού | 39 |
| 3.2.1. Μέθοδος πολικών συντεταγμένων | 39 |
| 3.2.2. Μέθοδος εμπροσθοτομίας..... | 41 |
| 3.2.2.A Εμπροσθοτομία στο επίπεδο..... | 42 |
| 3.2.2.B Εμπροσθοτομία στο χώρο..... | 43 |
| 3.2.3. Συνδυασμένη μέθοδος εμπροσθοτομίας – Μέθοδος Hansen..... | 45 |
| 3.3. Πηγές σφαλμάτων | 49 |
| 3.3.1. Σφάλματα χειριστών | 49 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.3.2. | Σφάλματα οργάνων | 50 |
| 3.3.3. | Σφάλματα περιβάλλοντος | 52 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ LEICA TDA 5005 ΚΑΙ TCA 1800 (LEICA_GEOSYSTEMS) | | 54 |
| 4.1. | Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικών σταθμών | 54 |
| 4.1.1. | Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 | 54 |
| 4.1.2. | Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800..... | 57 |
| 4.2. | Διαδικασίες αυτοελέγχου των γεωδαιτικών σταθμών..... | 59 |
| 4.2.1. | Έλεγχος κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' | 60 |
| 4.2.2. | Έλεγχος της μηδενικής ανάγνωσης του κατακόρυφου κύκλου | 60 |
| 4.2.3. | Έλεγχος καθετότητας της σκοπευτικής γραμμής ΣΣ' ως προς τον δευτερεύοντα άξονα ΔΔ' | 61 |
| 4.2.4. | Έλεγχος καθετότητας του δευτερεύοντος άξονα ΔΔ' ως προς τον πρωτεύοντα άξονα ΠΠ'..... | 62 |
| 4.2.5. | Έλεγχος ATR | 62 |
| 4.3. | Παρελκόμενα Γεωδαιτικών Σταθμών Leica TDA 5005 και TCA 1800 | 63 |
| 4.3.1. | Στόχοι | 63 |
| 4.3.2. | Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας..... | 65 |
| 4.3.3. | Hidden point bar | 65 |
| 4.3.4. | Προσοφθάλμιο με laser | 65 |
| 4.3.5. | Ράβδος κλίμακας | 66 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ AXIS XYZ (LEICA_GEOSYSTEMS) | | 67 |
| 5.1. | Γενικά | 67 |
| 5.2. | Δομή λογισμικού | 67 |
| 5.2.1. | Το υποπρόγραμμα προσανατολισμού (Orientation Module)..... | 70 |
| 5.3. | Παραδείγματα εφαρμογής | 72 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ..... | | 74 |
| 6.1. | Περιγραφή εξοπλισμού..... | 74 |
| 6.2. | Διαμόρφωση πειραματικής διάταξης και διεξαγωγή μετρήσεων..... | 75 |
| 6.3. | Προβλήματα που προέκυψαν | 78 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΝΟΜΕΩΝ Υ/Β | | 79 |
| 7.1. | Η Βιομηχανική Γεωδαισία σε Εφαρμογές Ναυπηγικής | 79 |
| 7.2. | Το πρόγραμμα Κατασκευής Υ/Β στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. | 80 |
| 7.3. | Εφαρμοζόμενες Διαδικασίες Γεωδαιτικής Παρακολούθησης | 82 |
| 7.4. | Αντικείμενο Εργασίας και Οργάνωση Μετρήσεων – Μετρήσεις πεδίου | 83 |
| 7.4.1. | Πρώτη σειρά μετρήσεων (I)..... | 87 |
| 7.4.2. | Δεύτερη σειρά μετρήσεων (II) | 89 |
| 7.4.3. | Τρίτη σειρά μετρήσεων (III) | 91 |

| | |
|--|-----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΩΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ | 93 |
| 8.1. Στάδια επεξεργασίας..... | 93 |
| 8.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων | 95 |
| 8.2.1. Ακρίβεια εντοπισμού..... | 95 |
| 8.2.2. Έλεγχος κυκλικότητας | 95 |
| 8.2.2.A Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση όλων των μετρημένων σημείων. | 98 |
| 8.2.2.B Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση διαφορετικού πλήθους σημείων | 102 |
| 8.2.2.C Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση συνδυασμών από τρία σημεία με καλή γεωμετρία αλλά και από πέντε σημεία με δυσμενή γεωμετρία | 103 |
| 8.2.3. Έλεγχος επιπεδότητας..... | 105 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 108 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 111 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 117 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.1: Πολικές συντεταγμένες [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 3.1: Polar coordinates [Goudinakos G, 2004]..... | 39 |
| Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση της εμπροσθοτομίας [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005] Figure 3.2: Intersection method [Technical Geodesy Notes, 2005]..... | 41 |
| Σχήμα 3.3: Οι χρησιμοποιούμενες γωνίες της εμπροσθοτομίας Figure 3.3: Angles observed in the intersection method | 41 |
| Σχήμα 3.4: Προσδιορισμός υψομετρικής διαφοράς [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 3.4: Height difference computation [Goudinakos G, 2004]..... | 44 |
| Σχήμα 3.5: Το γραμμικό σφάλμα δ λόγω σ_γ Figure 3.5: Linear error δ corresponding to angular error σ_γ | 45 |
| Σχήμα 3.6: Περιοχή αβεβαιότητας στην εμπροσθοτομία λόγω σφαλμάτων των γωνιών [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 3.6: Uncertainty area of the intersection method due to directional errors [Goudinakos G, 2004]..... | 45 |
| Σχήμα 3.9: Ελλείψεις σφάλματος σημείων με δύο γεωδαιτικούς σταθμούς τοποθετημένους αντικριστά [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 3.9: Error ellipses of points measured by two total stations facing each other [Goudinakos G, 2004]..... | 51 |
| Σχήμα 4.1: Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 [www.leica-geosystems.com] Figure 4.1: Total station Leica TDA 5005 [www.leica-geosystems.com]..... | 54 |
| Σχήμα 4.2: Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800 [www.leica-geosystems.com] Figure 4.2: Total station Leica TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]..... | 57 |
| Σχήμα 4.3: Απόκλιση ϕ, γ του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' από την κατακόρυφο [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.3: ϕ, γ deviation between ΠΠ' axis and vertical axis [Goudinakos G, 2004]..... | 59 |
| Σχήμα 4.4: Επίδραση απόκλισης ϕ, γ του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' από την κατακόρυφο [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.4: Impact of ϕ, γ deviation between ΠΠ' axis and vertical axis [Goudinakos G, 2004]..... | 59 |
| Σχήμα 4.5: Έλεγχος κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.5: Vertical control procedure of ΠΠ' axis [Goudinakos G, 2004]..... | 60 |
| Σχήμα 4.6: Έλεγχος της μηδενικής ανάγνωσης του κατακόρυφου κύκλου [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.6: Zero-readout control of vertical angle reading circle [Goudinakos G, 2004]..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 4.7: Έλεγχος καθετότητας της σκοπευτικής γραμμής ΣΣ' ως προς τον δευτερεύοντα άξονα ΔΔ' [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.7: Vertical control of target line ΣΣ' and tilting axis ΔΔ' [Goudinacos G, 2004]..... | 61 |
| Σχήμα 4.8: Έλεγχος καθετότητας του δευτερεύοντος άξονα ΔΔ' ως προς τον πρωτεύοντα άξονα ΠΠΠ' [Γκουντινάκος Γ, 2004] Figure 4.8: Vertical control of tilting axis ΔΔ' and vertical axis ΠΠΠ' [Goudinacos G, 2004]..... | 62 |
| Σχήμα 4.9: Λειτουργία ATR για εύρεση του κέντρου του στόχου [www.leica-geosystems.com] Figure 4.9: Automatic Target Recognition function (ATR) [www.leica-geosystems.com]..... | 62 |
| Σχήμα 4.10: Στόχοι που χρησιμοποιούνται με τα Leica TDA5005 και TCA 1800 [www.leica-geosystems.com] Figure 4.10: Targets used with Leica TDA 5005 and TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]..... | 64 |
| Σχήμα 4.11: Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας [www.leica-geosystems.com] Figure 4.11: Industrial Geodesy tripod [www.leica-geosystems.com]..... | 65 |
| Σχήμα 4.12: Ράβδος εντοπισμού κρυμμένου σημείου [www.leica-geosystems.com] Figure 4.12: Hidden point bar [www.leica-geosystems.com]..... | 65 |
| Σχήμα 4.13: Προσοφθάλμιο με laser [www.leica-geosystems.com] Figure 4.13: Laser Eyepiece [www.leica-geosystems.com]..... | 66 |
| Σχήμα 4.14: Ράβδος κλίμακας [www.leica-geosystems.com] Figure 4.14: Scale bar [www.leica-geosystems.com]..... | 66 |
| Σχήμα 5.1: Το υποπρόγραμμα Data Manager του λογισμικού Axyz Figure 5.1: Data Manager module of the Axyz software..... | 68 |
| Σχήμα 5.2: Παράδειγμα απεικόνισης μετρημένων σημείων σε μορφή CAD [www.leica-geosystems.com] Figure 5.2: Example of measured points in CAD form [www.leica-geosystems.com]..... | 69 |
| Σχήμα 5.3: Έλεγχος σκελετού αυτοκινήτου της BMW με χρήση Laser tracker συνδεδεμένου με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com] Figure 5.3: Bmw chassis control using Laser tracker on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]..... | 72 |
| Σχήμα 5.4: Έλεγχος τμημάτων μηχανημάτων με χρήση γεωδαιτικού σταθμού συνδεδεμένου με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com] Figure 5.4: Machine parts control using Total station on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]..... | 73 |
| Σχήμα 5.5: Έλεγχος ρύθμισης δορυφόρου της NASA με χρήση δικτύου γεωδαιτικών σταθμών συνδεδεμένων με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com] Figure 5.5: NASA satellite structure control using Total stations network on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 6.1: Διάταξη γεωδαιτικών σταθμών, ηλεκτρονικού υπολογιστή και βιομηχανικής ράβδου Figure 6.1: Total stations, computer and scale bar setup | 75 |
| Σχήμα 6.2: Ορισμός του μήκους της ράβδου κλίμακας και το σφάλμα της στο λογισμικό Axyz Figure 6.2: Definition of the scale bar's length and associated error | 77 |
| Σχήμα 7.1: Χώρος Τομέα Κατασκευής Υποβρυχίων στα Ελληνικά Ναυπηγεία [www.hellinic-shipyards.gr] Figure 7.1: Submarine Building Section at the Hellenic Shipyards [www.hellinic-shipyards.gr]..... | 80 |
| Σχήμα 7.2: Υποβρύχιο τύπου 214 κατά τη διαδικασία καθέλκυσης [www.hellinic-shipyards.gr] Figure 7.2: Submarine Class 214 at launch time [www.hellinic-shipyards.gr] | 81 |
| Σχήμα 7.3: Νομείς υποβρυχίου κατά τη συγκόλληση [www.hellinic-shipyards.gr] Figure 7.3: Submarine hull parts during the welding procedure [www.hellinic-shipyards.gr] | 82 |
| Σχήμα 7.4: Διάταξη εξοπλισμού στο χώρο των Ελληνικών Ναυπηγείων Figure 7.4: Instruments setup at Hellenic Shipyards | 85 |
| Σχήμα 7.5: Σύστημα αναφοράς καρτεσιανών συντεταγμένων όπως ορίζεται από το Axyz Figure 7.5: Cartesian Coordinates System as it is set by Axyz..... | 86 |
| Σχήμα 7.6: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων πρώτης σειράς μετρήσεων Figure 7.6: Position of the points measured during the first set of measurements | 89 |
| Σχήμα 7.7: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων πρώτης σειράς μετρήσεων Figure 7.7: Position of the points measured during the first set of measurements | 90 |
| Σχήμα 7.8: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων τρίτης σειράς μετρήσεων Figure 7.8: Position of the points measured during the third set of measurements | 92 |
| Σχήμα 8.2: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD του βέλτιστου κύκλου της πρώτης σειράς μετρήσεων Figure 8.2: Best-fit circle for the first set of measurements in CAD form | 98 |
| Σχήμα 8.3: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD των βέλτιστων κύκλων των δύο πρώτων σειρών μετρήσεων Figure 8.3: Best-fit circle for the first two sets of measurements in CAD form..... | 99 |
| Σχήμα 8.4: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD του βέλτιστου κύκλου της τρίτης σειράς μετρήσεων Figure 8.4: Best-fit circle for the third set of measurements in CAD form | 100 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1.1: Πεδία εφαρμογής Βιομηχανικής Γεωδαισίας [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005] Table 1.1: Fields of Industrial Geodesy [Technical Geodesy Notes, 2005]..... | 19 |
| Πίνακας 1.2: Απαιτούμενες ακρίβειες - όργανα βιομηχανικής γεωδαισίας [Γκουντινάκος Γ, 2004] Table 1.2: Accuracy required - Instruments used by Industrial Geodesy [Goudinacos G, 2004]..... | 22 |
| Πίνακας 1.3: Σύγκριση συστημάτων βιομηχανικής γεωδαισίας [Γκουντινάκος Γ, 2004] Table 1.3: Comparison among Industrial Geodesy Systems [Goudinacos G, 2004]..... | 23 |
| Πίνακας 2.1: Διαχωρισμός μεθόδων 3Δ προσδιορισμού θέσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους Table 2.1: List of 3D measuring systems according to their technical features | 27 |
| Πίνακας 2.2: Παρουσίαση ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών ακριβείας [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005] Table 2.2: List of High-precision Total stations [Technical Geodesy Notes, 2005] | 31 |
| Πίνακας 2.3: Αναλογικοί αισθητήρες φωτογραμμετρικών συστημάτων [Μπακόπουλος Γ, 2006] Table 2.3 : Analog sensors of photogrammetric systems [Μπακόπουλος Γ, 2006].. | 34 |
| Πίνακας 2.4: Ψηφιακοί αισθητήρες φωτογραμμετρικών συστημάτων [Μπακόπουλος Γ, 2006] Table 2.4 : Digital sensors of photogrammetric systems [Μπακόπουλος Γ, 2006]..... | 34 |
| Πίνακας 2.5 : Σαρωτές Laser [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005] Table 2.5 : Laser scanners [Technical Geodesy Notes, 2005]..... | 37 |
| Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά TDA 5005 [www.leica-geosystems.com] Table 4.1: Technical specifications of TDA 5005 [www.leica-geosystems.com] | 56 |
| Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά TCA 1800 [www.leica-geosystems.com] Table 4.2: Technical specifications of TCA 1800 [www.leica-geosystems.com] | 58 |
| Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά στόχων [Γκουντινάκος Γ, 2004] Table 4.3: Target specifications [Goudinacos G, 2004] | 64 |
| Πίνακας 7.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά υποβρυχίων τύπου 214 [www.hellinic-shipyards.gr] Table 7.1: Principle Characteristics of 214 class submarines [www.hellinic-shipyards.gr] 81 | 81 |
| Πίνακας 7.2: Συντεταγμένες των στάσεων Table 7.2: Stations coordinates..... | 85 |
| Πίνακας 7.3: Συντεταγμένες των στόχων της ράβδου απόδοσης κλίμακας, υπολογισμένο και ακριβές μήκος Table 7.3: Scale bar targets coordinates, calculated and accurate length | 86 |
| Πίνακας 7.4: Πρώτη σειρά μετρήσεων Table 7.4: First set of measurements | 88 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 7.5: Δεύτερη σειρά μετρήσεων Table 7.5: Second set of measurements | 90 |
| Πίνακας 7.6: Τρίτη σειρά μετρήσεων Table 7.6: Third set of measurements | 91 |
| Πίνακας 8.1: Σύγκριση ακρίβειας μεθόδων 3Δ προσδιορισμού θέσης Table 8.1: Comparison of 3D measurement methods | 95 |
| Πίνακας 8.2: Δεδομένα πρώτης και δεύτερης σειράς μετρήσεων Table 8.2: Data from the first and second set of measurements | 97 |
| Πίνακας 8.3 Δεδομένα δεύτερης σειράς μετρήσεων Table 8.3: Data from the second set of measurements | 97 |
| Πίνακας 8.4: Δεδομένα τρίτης σειράς μετρήσεων Table 8.4: Data from the third set of measurements | 98 |
| Πίνακας 8.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών σειρών μετρήσεων Table 8.5: Comparison between the results of the three sets of measurements | 101 |
| Πίνακας 8.6: Επιλύσεις για τα σημεία της πρώτης σειράς μετρήσεων Table 8.6: Solutions for the first set of measurements | 102 |
| Πίνακας 8.7: Επιλύσεις για τα σημεία της τρίτης σειράς μετρήσεων Table 8.7: Solutions for the third set of measurements | 103 |
| Πίνακας 8.8: Έλεγχος της επίδρασης της γεωμετρίας των σημείων της πρώτης σειράς μετρήσεων στην επίλυση του βέλτιστου κύκλου Table 8.8: Control of the affection of the first set of measurements geometry on the best-fit circle solution..... | 104 |
| Πίνακας 8.9: Έλεγχος της επίδρασης της γεωμετρίας των σημείων της τρίτης σειράς μετρήσεων στην επίλυση του βέλτιστου κύκλου Table 8.9: Control of the affection of the third set of measurements geometry on the best-fit circle solution..... | 105 |
| Πίνακας 8.10: Αποχές σημείων πρώτης σειράς από το βέλτιστο επίπεδο Table 8.10: Distances between the first set of measurements and the best-fitted plane | 106 |
| Πίνακας 8.11: Αποχές σημείων τρίτης σειράς από το βέλτιστο επίπεδο Table 8.11: Distances between the third set of measurements and the best-fitted plane | 107 |

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρξαν πρόσωπα τα οποία βοήθησαν για την επιτυχή ολοκλήρωση της, τα οποία αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο Λέκτορα κ. Γκίκα Βασίλειο, καταρχήν για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου να μου αναθέσει το παρόν αντικείμενο δεδομένου ότι εκτός του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου εμπλέκονται εξωτερικοί φορείς. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον του και τη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας τόσο σε πρακτικά όσο και θεωρητικά θέματα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέφανο Δογγούρη, για την ουσιαστική του βοήθεια, αφιερώνοντας αρκετές ώρες στη φάση των προπαρασκευαστικών διαδικασιών αλλά και κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στο χώρο των Ελληνικών Ναυπηγείων.

Εκτός του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, θα ήθελα καταρχήν να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τη διοίκηση της Εταιρείας Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε., για τη δυνατότητα πρόσβασης στους χώρους του Τομέα Κατασκευής Υποβρυχίων και την παροχή κάθε δυνατής στήριξης. Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καταρτζή, Υπεύθυνο του τομέα για το ενδιαφέρον του στη διπλωματική εργασία. Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Σέτα Δημήτριο, Υπεύθυνο Τοπογράφου του τομέα, καθώς και τους δύο βοηθούς του Παναγιώτη και Νικόλα, οι οποίοι όχι μόνο ανέχτηκαν την καθημερινή μου παρουσία στο γραφείο τους αλλά με αντιμετώπισαν εξαρχής σαν φίλο και μέλος της μεγάλης οικογένειας των εργαζομένων στα Ελληνικά Ναυπηγεία. Αμέριστη ήταν και η βοήθεια και των τριών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, για κάθε δυνατή διευκόλυνση που παρείχαν. Τέλος, επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία METRICA, και ειδικότερα στον κ. Λελούδα Σπύρο για τη βοήθειά του σχετικά με τη χρήση των οργάνων αλλά και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

TDA 5005 & TCA 1800 = Γεωδαιτικοί σταθμοί της εταιρείας Leica Geosystems με κύρια χρήση τη Βιομηχανική Γεωδαισία με πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων.

ATR = Δυνατότητα των δύο παραπάνω γεωδαιτικών σταθμών να εντοπίζουν μετά από χονδρική σκόπευση το κέντρο του στόχου ακριβώς με τη χρήση σερβομηχανισμών (**A**uto-**T**arget **R**ecognition). Πρόκειται για ευρεσιτεχνία της εταιρείας Leica Geosystems.

Axyz = Λογισμικό Βιομηχανικής Γεωδαισίας της εταιρείας Leica Geosystems που είναι σχεδιασμένο για να συνεργάζεται με τα δύο παραπάνω όργανα για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο (on-line).

Mean error = πρόκειται για τη μεταβλητότητα του σφάλματος προσδιορισμού της θέσης του κάθε σημείου, από το πλήθος των γεωδαιτικών σταθμών που χρησιμοποιούνται.

Hidden point bar = Πρόκειται για ράβδο γνωστού μήκους με πολύ μεγάλη ακρίβεια, που χρησιμοποιείται ώστε να δοθεί κλίμακα στο αυθαίρετο δίκτυο που δημιουργείται σε μετρήσεις Βιομηχανικής Γεωδαισίας.

Std R, Std H, Std Z = Πρόκειται για τα τυπικά σφάλματα των κυλινδρικών συντεταγμένων των σημείων που μετρήθηκαν.

CAD = Πρόκειται για εφαρμογές που παρουσιάζουν τα δεδομένα και τα αποτελέσματα σε μορφή σχεδίου, για την καλύτερη ερμηνεία τους.

RS232 = Τύπος σύνδεσης που χρησιμοποιείται για την «on-line» επικοινωνία των γεωδαιτικών σταθμών με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

«On-line» σύνδεση = Σύνδεση ηλεκτρονικού υπολογιστή με γεωδαιτικό σταθμό ή αισθητήρα που έχει αυτή τη δυνατότητα ώστε οι μετρήσεις που παίρνονται από αυτό να μεταβιβάζονται απευθείας στον υπολογιστή και να γίνεται η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η γεωμετρική τεκμηρίωση (έλεγχος κυκλικότητας) των νομέων ενός πολεμικού υποβρυχίου, λόγω παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής και έως τη φάση της μεταξύ τους συγκόλλησης. Ειδικότερα, μελετάται το σχήμα (κυκλικότητα) των νομέων ενός υποβρυχίου του προγράμματος Class 214 που πραγματοποιείται στο χώρο του Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε.. Η μελέτη στηρίζεται στη μέθοδο της εμπροσθοτομίας με τη χρήση δύο γεωδαιτικών σταθμών υψηλής ακρίβειας στη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων.

Οι εργασίες πεδίου περιλαμβάνουν την διεξαγωγή τριών ομάδων μετρήσεων, η πρώτη με χρήση και των δύο γεωδαιτικών σταθμών για μετρήσεις στην περιφέρεια του νομέα, η δεύτερη με χρήση και των δύο γεωδαιτικών σταθμών για μετρήσεις στον πρώτο εσωτερικό δακτύλιο στήριξης και η τρίτη με χρήση ενός μόνο γεωδαιτικού σταθμού για μετρήσεις στην περιφέρεια του νομέα. Σε όλες τις ομάδες μετρήσεων τα όργανα ήταν συνδεδεμένα με υπολογιστή για την πραγματοποίηση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Axyz, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των μετρημένων σημείων, τον υπολογισμό των βέλτιστων κύκλων που σχηματίζουν ανά ομάδα μετρήσεων και την προσαρμογή του συστήματος αναφοράς, ώστε να μετατραπούν από καρτεσιανές οι συντεταγμένες σε κυλινδρικές, για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τη μεταξύ τους σύγκριση από ομάδα σε ομάδα μετρήσεων. Εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι όχι μόνο καλύτερης ακρίβειας από τα αποτελέσματα που δίνονται από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους αλλά παράγονται με μεγαλύτερη ευκολία και σε αρκετά μικρότερο χρονικό διάστημα.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to study the shape (circularity control) of the hull parts of a submarine. The ultimate goal is to check the deformations in the shape during the construction before welding them together. More specifically, this diploma thesis studies the circularity of the hull parts of the submarines made according to Class 214 program by the Submarines Construction Division of the Hellenic Shipyards S.A. The method used is the multi – intersection method based on the use of two robotic total stations with high angular and distance accuracy.

The field work undertaken was consists of three major sets of measurements. The first set uses two total stations to measure a certain number of points at the periphery of the submarine hull, the second uses two total stations to measure points at the first inner supporting ring, while the third set uses one single total station to measure points at the periphery of the submarine hull. During all three sets of observations the total stations were connected to a computer to operate in real-time mode.

Data analysis was undertaken using the Axyz software, in order to calculate the coordinates of the measured points, to find the best-fitting (in least square sense) circles for each set of measurements and to transform the coordinate system from cartesian to cylindrical. This was done in order to interpret more accurately the results and compare them with those resulted from each of the set of measurements. It is estimated that the results were not only more accurate in comparison with the methods that are currently in use but also easier to get and the time needed is much lesser.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά

Η εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει συνεισφέρει ουσιαστικά στην ανάπτυξη όλο και περισσότερων εφαρμογών που σχετίζονται με αντικείμενα που απαιτούν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται εφαρμογές που αφορούν στη διαστασιολόγηση βιομηχανικών προϊόντων – παραγώγων. Τα σύγχρονα όργανα που κατασκευάστηκαν έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια αλλά και με μεγάλη ταχύτητα, καθώς και ευκολία. Εκτός των οργάνων, είτε πρόκειται για γεωδαιτικούς σταθμούς είτε για laser trackers και laser scanners, παρέχονται επίσης λογισμικά πακέτα που συνδυάζονται με τα κατάλληλα όργανα – αισθητήρες εξασφαλίζοντας ακόμη περισσότερα πλεονεκτήματα τέτοιων ολοκληρωμένων συνόλων έναντι προγενέστερων.

Ακολουθώντας την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, η επιστήμη της εφαρμοσμένης γεωδαισίας αναπτύσσει νέες μεθόδους μετρήσεων ή προσαρμόζει τις ήδη υπάρχουσες πάνω στα νέες εξελίξεις, ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση των τεχνολογικών καινοτομιών που οδηγούν στην επίτευξη μεγαλύτερων ακριβειών και ολοκληρωμένων προϊόντων.

Αντικείμενο – Στόχοι εργασίας

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η γεωμετρική τεκμηρίωση (έλεγχος κυκλικότητας) των νομέων ενός υποβρυχίου, έναντι παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια κατασκευής και έως τη φάση της μεταξύ τους συγκόλλησης. Ειδικότερα, μελετάται το σχήμα (κυκλικότητα) των νομέων ενός εκ των υποβρυχίων του προγράμματος Class 214 που πραγματοποιείται στο χώρο του Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνεται η λήψη μετρήσεων με διαφορετικές μεθόδους – τεχνικές Βιομηχανικής Γεωδαισίας, ο υπολογισμός του σχήματος των νομέων και η εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μεταξύ τους σύγκριση. Επιπλέον, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται και στον παράγοντα του χρόνου, που στον τομέα της βιομηχανίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα αξιολόγησης της οποιαδήποτε μεθόδου χρησιμοποιείται.

Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθούν τα παραπάνω, τέθηκαν εξαρχής ορισμένοι στόχοι οι οποίοι είναι οι εξής :

- να εξοπλιστούν τα απαραίτητα όργανα και ο υπολογιστής με το λογισμικό πακέτο
- να γίνουν ορισμένες δοκιμαστικές μετρήσεις με τα νέα όργανα και το λογισμικό πακέτο Axyz
- να διεξαχθούν οι αναγκαίες μετρήσεις στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε.

Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά ως εξής :

Το Κεφάλαιο 1 αναφέρεται στη Βιομηχανική Γεωδαισία ως κλάδο της εφαρμοσμένης Τεχνικής Γεωδαισίας, περιγράφοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της, τις περιοχές που βρίσκει εφαρμογή και τις ακρίβειες που επιδιώκονται. Κλείνοντας δίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή του κλάδου αυτού από την δημιουργία του έως σήμερα.

Το Κεφάλαιο 2 αναφέρεται στις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον προσδιορισμό θέσης και τη διαστασιολόγηση προϊόντων σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αναφέρονται τα είδη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές, κάνοντας διαχωρισμό σε παλιότερες και νέες μεθόδους και σε μεθόδους γεωδαιτικές και φωτογραμμετρικές. Αναφορά γίνεται για κάθε μέθοδο στα είδη των οργάνων – αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη λήψη μετρήσεων.

Το Κεφάλαιο 3 παρέχει σχετικές πληροφορίες για τις μεθόδους μέτρησης και υπολογισμών στη Βιομηχανική Γεωδαισία. Αναφέρονται οι μέθοδοι των πολικών συντεταγμένων, της απλής εμπροσθοτομίας και της εμπροσθοτομίας στο χώρο αλλά και η μέθοδος της συνδυασμένης μεθόδου εμπροσθοτομίας και της μεθόδου Hansen. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού επεξηγούνται οι κατηγορίες σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις αλλά και η ακρίβεια των υπολογισμένων συντεταγμένων για κάθε μια από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους.

Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα όργανα και τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Δίνεται μια γενική περιγραφή των γεωδαιτικών

σταθμών Leica TDA 5005 και TCA 1800, της αρχής λειτουργίας τους, των δυνατοτήτων τους, καθώς επίσης ορισμένα στοιχεία που αφορούν τον υπόλοιπο εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε (στόχοι, τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας, ράβδος εντοπισμού «κρυμμένου» σημείου, προσοφθάλμιο με laser και ράβδος κλίμακας).

Το Κεφάλαιο 5 αποτελεί την παρουσίαση του λογισμικού καταγραφής και επεξεργασίας Axyz, τα βασικά χαρακτηριστικά του και τον τρόπο λειτουργίας του. Τέλος, συνοπτική αναφορά γίνεται σε εφαρμογές που χρησιμοποιείται ήδη το συγκεκριμένο λογισμικό, κυρίως για εργασίες του βιομηχανικών προϊόντων.

Στο Κεφάλαιο 6 δίνεται αρχικά μια λεπτομερής περιγραφή της διάταξης των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν και περιγράφονται διεξοδικά οι προπαρασκευαστικές διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο της Σχολής Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών για την εξοικείωση με τα όργανα, πριν τις κύριες μετρήσεις στους χώρους της Εταιρείας Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε.

Το Κεφάλαιο 7 χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά δίνεται μια σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα Class 214 των Ελληνικών Ναυπηγείων Α.Ε., στα πλαίσια του οποίου κατασκευάζεται το υποβρύχιο στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις. Κατόπιν περιγράφονται οι νομείς του υποβρυχίου και δίνονται οι προδιαγραφές κατασκευής τους. Στο δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου 7 παρουσιάζονται οι τρεις σειρές των μετρήσεων που διεξήχθησαν στα ναυπηγεία και παρατίθενται οι πίνακες των δεδομένων όπως παρήχθησαν από το λογισμικό πακέτο Axyz και αναφέρονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν, κυρίως κατά τη δεύτερη σειρά των μετρήσεων.

Το Κεφάλαιο 8 περιλαμβάνει τα στάδια της επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων μέσω του λογισμικού Axyz. Αυτά τα στάδια ήταν ο έλεγχος της ακρίβειας εντοπισμού της θέσης στο χώρο κάθε μετρημένου σημείου, ο προσδιορισμός του βέλτιστου κύκλου για κάθε σειρά μετρήσεων, αλλά και για περιπτώσεις διαφορετικού πλήθους σημείων με καλή ή δυσμενή γεωμετρία, μετά την προσαρμογή του συστήματος αναφοράς ώστε οι συντεταγμένες από καρτεσιανές να εμφανίζονται σαν κυλινδρικές και η εμφάνιση των βέλτιστων κύκλων με τα μετρημένα σημεία σε μορφή CAD ώστε να γίνονται πιο κατανοητά και αξιοποιήσιμα. Τέλος το στάδιο της επεξεργασίας κλείνει με

τον έλεγχο της επιπεδότητας υπολογίζοντας τις αποχές των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο επίπεδο που τα περιλαμβάνει.

Το Κεφάλαιο 9 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις εργασίες υπαίθρου, καθώς και από την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων για τον νομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΟΡΙΣΜΟΙ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.1. Η επιστήμη και οι Κλάδοι της Γεωδαισίας

Η ετυμολογία της λέξης, που προέρχεται από το "γη + δαίω", που σημαίνει "μοιράζω τη γη". Η Γεωδαισία, είναι η επιστήμη που με μετρήσεις και υπολογισμούς, προσδιορίζει τις ακριβείς θέσεις σημείων στο χώρο, το σχήμα και το μέγεθος τμημάτων περιοχών που βρίσκονται πάνω στη γήινη επιφάνεια καθώς και τις μεταβολές τους μέσα στο χρόνο.

Η Γεωδαισία χωρίζεται σε κλάδους, από τους οποίους σημαντικότεροι είναι:

- Φυσική Γεωδαισία
- Δορυφορική Γεωδαισία
- Τοπογραφία
- Υδρογραφία
- Τεχνική Γεωδαισία

1.2. Βιομηχανική Γεωδαισία

1.2.1. Ορισμός – Βασικές Αρχές

Η Βιομηχανική Γεωδαισία που αποτελεί μέρος της Τεχνικής Γεωδαισίας αναπτύχθηκε προκειμένου να εκτελούνται γεωδαιτικές εργασίες ακριβείας σε πεδίο περιορισμένης έκτασης με τη χρήση οργάνων και μεθόδων υψηλών ακριβειών. Αυτό όμως που διαφοροποιεί τη Βιομηχανική Γεωδαισία και την καθιστά ξεχωριστό τομέα της γεωδαισίας είναι ότι εστιάζει σε βιομηχανικές εφαρμογές και το αντικείμενο που ενδιαφέρει είναι συνήθως βιομηχανικά παράγωγα.

Καθώς ο τομέας της βιομηχανίας αναπτύσσεται συνεχώς έγινε επιτακτικότερη η ανάγκη μέτρησης των διαστάσεων και του σχήματος των βιομηχανικών υλικών και

κατασκευών. Πλέον ο σχεδιασμός των βιομηχανικών εξαρτημάτων γίνεται με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, ενώ η κατασκευή τους έχει υποχρέωση να ακολουθήσει το σχεδιασμό χωρίς σημαντικές αποκλίσεις. Ιδιαίτερα στους τομείς της βιομηχανίας που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια κατά την παραγωγή η οποιαδήποτε απόκλιση από το σχεδιασμό επιφέρει σημαντικά προβλήματα. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ορισμένες από τις σημαντικότερες εφαρμογές της βιομηχανικής γεωδαισίας :

| | Προσδιορισμός Επιφανειών | Προσδιορισμός Διατομών | Σημεία Ελέγχου | Ακολουθία Σημείων |
|----------------------|---|---------------------------|--|----------------------|
| Αεροναυπηγική | Έλεγχος Συναρμολογούμενων τμημάτων Δορυφορικές κεραίες | | Άξονες μηχανών | |
| Αυτοκινητοβιομηχανία | | | Σκελετός αυτοκινήτων | |
| Ρομποτική | | | | Έλεγχος ρομπότ |
| Βαριά Βιομηχανία | | | Μέρη μηχανών με υψηλή θερμοκρασία Τμήματα γεφυρών | |
| Ναυπηγική | | Υποβρύχια | | |
| Κατασκευές | | Υψικάμινι | Τμήματα σε σήραγγες | |

Πίνακας 1.1: Πεδία εφαρμογής Βιομηχανικής Γεωδαισίας [*Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005*]
Table 1.1: Fields of Industrial Geodesy [*Technical Geodesy Notes, 2005*]

Οι απαιτήσεις αυτές, οι οποίες ανάγονται ουσιαστικά σε πρόβλημα προσδιορισμού συντεταγμένων επιλεγμένων σημείων, υπολογίζονται με γεωδαιτικές μεθόδους. Εξαιτίας όμως της ιδιαιτερότητας του αντικειμένου, αναπτύχθηκε ο ξεχωριστός αυτός κλάδος της Τεχνικής Γεωδαισίας, η Βιομηχανική Γεωδαισία.

Σκοπός της Βιομηχανικής Γεωδαισίας είναι να προσδιορίσει τις συντεταγμένες X, Y, Z σημείων κάποιου αντικειμένου, που συνήθως είναι βιομηχανικό παράγωγο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προκύψουν οι διαστάσεις, η μορφή και το σχήμα του αντικειμένου. Οι προσδιοριζόμενες συντεταγμένες ανήκουν σε ένα τοπικό αυθαίρετο σύστημα, το οποίο μπορεί να αναχθεί στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Κατόπιν είναι δυνατό, με τη

βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού να βρεθούν οι σχετικές αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές θέσεις των σημείων, καθώς επίσης να γίνει και μία προσαρμογή κάποιου μαθηματικού μοντέλου στο σύνολο των σημείων.

Όπως και στις τοπογραφικές εργασίες, έτσι και στις εργαστηριακές μετρήσεις της Βιομηχανικής Γεωδαισίας απαιτείται συνεργασία με τους υπεύθυνους της βιομηχανίας ούτως ώστε να επιλεγθούν με μεγάλη προσοχή τα σημεία που πρόκειται να μετρηθούν για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πληρότητα και ακρίβεια στην απεικόνιση του αντικειμένου μέτρησης.

1.2.2. Βασικά χαρακτηριστικά Βιομηχανικής Γεωδαισίας

Κατά τη διαδικασία της μέτρησης θα πρέπει να ακολουθούνται κάποιες βασικές αρχές καθώς η μετρητική διαδικασία πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιεί συγκεκριμένες, προκαθορισμένες απαιτήσεις. Τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι τα κατάλληλα (να καλύπτουν τις απαιτήσεις ως προς την ακρίβεια, το κόστος και το χρονικό ορίζοντα) και η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί οφείλει να επιλεγεί με μεγάλη προσοχή. Τα άτομα που διεξάγουν τις μετρήσεις πρέπει να είναι καταρτισμένα κι έμπειρα. Το περιορισμένο πεδίο όπου εκτελούνται οι μετρήσεις πρέπει να παρουσιάζει σταθερότητα όσον αφορά τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και φωτισμού. Οι διαδικασίες μέτρησης πρέπει να τηρούνται σε όλες τις μετρήσεις, ενώ επίσης πρέπει να γίνεται κατάλληλος έλεγχος των αποδόσεων και των διαδικασιών μέτρησης. Η κατάλληλη περιοδική επιθεώρηση έχει σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση μιας εργασίας. Επίσης πρέπει να υπάρχει πιστοποίηση της απόδοσης όλων των συσκευών και διαδικασιών μέτρησης. Εσωτερική εκτίμηση γίνεται από τους ανθρώπους που έχουν αναλάβει το έργο των μετρήσεων και εξωτερική εκτίμηση από πιστοποιημένους φορείς ελέγχου.

Στις εφαρμογές Βιομηχανικής Γεωδαισίας τα όργανα μέτρησης δεν κεντρώνονται όπως συμβαίνει στη κλασική τοπογραφία. Εάν το αντικείμενο μέτρησης πρόκειται να μετρηθεί μία μόνο φορά δημιουργείται ένα ελεύθερο δίκτυο, οπότε τα όργανα δεν χρειάζεται να κεντρωθούν σε κάποιο σημείο. Σε περίπτωση που οι μετρήσεις θα επαναλαμβάνονται (π.χ. η εύρεση των σημείων όπου διανοίγονται οπές από ρομποτικό μηχάνημα σε γραμμή παραγωγής κάποιας αυτοκινητοβιομηχανίας), τότε για να αποφεύγεται κάθε φορά η χρονοβόρα διαδικασία του προσανατολισμού των οργάνων ιδρύονται σταθερά βάθρα των

οποίων βρίσκονται οι συντεταγμένες. Στη συνέχεια, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου, τοποθετούνται όπου πρέπει τα όργανα και εκτελούνται οι μετρήσεις. Ο λόγος που δημιουργούνται βάθρα είναι για να υπάρχει εξαναγκασμένη κέντρωση, εφόσον τα επίπεδα αβεβαιότητας που επιθυμεί η βιομηχανική γεωδαισία δεν δικαιολογούν κανέναν άλλον τρόπο κέντρωσης.

Όπως σε κάθε γεωδαιτικό δίκτυο, είτε χρησιμοποιείται ελεύθερο δίκτυο είτε με εξαναγκασμένες κεντρώσεις, οι συντεταγμένες των στάσεων των οργάνων θα πρέπει να έχουν ακρίβεια τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους καλύτερη από το προσδιορισμό των σημείων. Στη Βιομηχανική Γεωδαισία όμως, όπου οι επιδιωκόμενες ακρίβειες είναι της τάξης των 0.5 mm, 0.1 mm ή και εκατοστών του χιλιοστού, είναι ιδιαίτερα δύσκολο, χρονοβόρο και δαπανηρό να προσδιοριστούν στάσεις με ακόμα περισσότερη ακρίβεια. Για αυτό και οι στάσεις των οργάνων προσδιορίζονται με περίπου την ίδια ακρίβεια με τα απλά σημεία και η δυνατότητα που υπάρχει για βελτίωση είναι μέσω περισσότερων παρατηρήσεων προς τις στάσεις.

1.2.3. Περιοχές Εφαρμογών - Ακρίβειες της Βιομηχανικής Γεωδαισίας

Οι τεχνικές της βιομηχανικής γεωδαισίας πρωτοεμφανίστηκαν στις εργασίες εξόρυξης φυσικών πόρων ανοιχτής θαλάσσης. Σταδιακά εξαπλώθηκαν σε πάρα πολλούς τομείς της βιομηχανίας όπως στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ναυπήγηση πλοίων και υποβρυχίων, στις τηλεπικοινωνίες, στην κατασκευαστική και χημική βιομηχανία, στη ρομποτική, στις μεταλλικές κατασκευές, στην πυρηνική τεχνολογία και στη σιδηροδρομική.

Με τη χρήση θεοδόλιχων επιτυγχάνεται η κατασκευή, ευθυγράμμιση και συνένωση των κομματιών που αποτελούν τη γάστρα (π.χ. των δεξαμενόπλοιων τύπου Double Eagle της εταιρείας Eletson στο Πειραιά). Χρησιμοποιώντας θεοδόλιχα γίνεται η συνένωση και ο έλεγχος κυλινδρικότητας των τμημάτων υποβρυχίων (π.χ. τα νέα υποβρύχια τύπου 214 του Πολεμικού Ναυτικού). Μετρήσεις με θεοδόλιχο γίνονται, για να βρεθούν οι παραμορφώσεις λόγω βαρύτητας σε παραβολικές κεραίες (π.χ. στην τεράστια παραβολική κεραία διαμέτρου 70m που συμμετέχει στο πρόγραμμα Deep Space Network της NASA. Το laser tracker χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των διαστάσεων και του σχήματος των μεταβαλλόμενα καμπυλόγραμμων περιστρεφόμενων πτερυγίων των κινητήρων

αεροπλάνων με μεγάλες διαστάσεις (40x10x5 m). Αντίστοιχα, όργανα όπως τα laser tracker χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της γεωμετρίας στοιχείων του νέου επιταχυντή σωματιδίων LHC στο κέντρο φυσικών ερευνών.

Ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή των οργάνων είναι η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί. Σε γενικές γραμμές ισχύουν οι κατηγοριοποιήσεις του επόμενου πίνακα που ακολουθεί :

| Μέγιστη διάσταση αντικειμένου (mm) | Απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης (mm) | Διάστημα ανοχής των μετρήσεων (mm) | Παράδειγμα εφαρμογής | Συστήματα οργάνων |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--|
| 5000 | 0,2 | 0,05 | Αεροδιαστημική | Laser tracker |
| 10000 | 1 | 0,5 | Αεροδιαστημική | Laser tracker, Θεοδόλιχα, Φωτογραμμετρία |
| 15000 | 3 | 2 | Ναυπήγηση | Θεοδόλιχα |
| 1000 | 0,1 | 0,02 | Αεροδιαστημική | Θεοδόλιχα και φωτογραμμετρία |
| 10000 | 1 | 0,2 | Ναυπήγηση | Θεοδόλιχα |

Πίνακας 1.2: Απαιτούμενες ακρίβειες - όργανα βιομηχανικής γεωδαισίας [Γκουντινάκος Γ, 2004]
 Table 1.2: Accuracy required - Instruments used by Industrial Geodesy [Goudinacos G, 2004]

Σε κάθε περίπτωση για την τελική επιλογή υλοποιείται μια μελέτη που εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης, το κόστος ,τον απαιτούμενο χώρο και περιβάλλον λειτουργίας, την ευχρηστία και ταχύτητα του συστήματος, το συνοδευόμενο λογισμικό και τον απαιτούμενο αριθμό χρηστών σε σχέση και με τις απαιτούμενες γνώσεις τους. Άλλωστε, οι μέγιστες ακρίβειες των οργάνων επιτυγχάνονται μόνο από πολύ έμπειρους χειριστές, κάτι το οποίο απαιτεί πάρα πολύ χρόνο. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται μια σύγκριση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη Βιομηχανική Γεωδαισία λαμβάνοντας υπόψη και άλλους παράγοντες εκτός της ακρίβειας, όπως τον οικονομικό και τον χρονικό παράγοντα.

| Μετρητικό σύστημα | Total station | Δυο θεοδόλιχα | 3 θεοδόλιχα | Laser tracker | Εγγύς Φωτογραμμετρία |
|---|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Ακρίβεια σε περιβάλλον εργαστηρίου | 0,1 mm-0,5 mm | 0,1 mm - 0,5 mm | 0,1 mm-0,2 mm | 0,01 mm - 0,2 mm | 0,1 mm - 0,5 mm |
| Ακρίβεια εκτός ελεγχόμενων συνθηκών | 1-3 mm | 1-3 mm | 1-3 mm | Συνήθως δεν υπάρχει τέτοια περίπτωση | 0,25-3 mm |
| Μέγιστο εύρος μετρήσεων | Έως 1000 m | Έως 30-40 m | Έως 100 m | 30 m | 30 m |
| Πρακτικό εύρος μετρήσεων | 2-200 m | 2-40 m | 2-100 m | 1-30 m | 4-30 m |
| Χρόνος προετοιμασίας | 10 min χωρίς καλιμπράρισμα | 30-60 min, απαιτείται καλιμπράρισμα | 30-60 min, απαιτείται καλιμπράρισμα | 2-4 h, ζέσταμα, καλιμπράρισμα | Δεν έχει εκτός της τοποθέτησης στόχων |
| Συντεταγμένες σε άμεσο χρόνο | Ναι | Ναι | Ναι | Ναι | Μερικές φορές |
| Απαιτούμενη προεπεξεργασία | Όχι | Όχι | Όχι | Όχι | Ναι |
| Αριθμός χειριστών | 1 | 1-2 | 1-3 | 1-2 | 1 |
| Γνώσεις χειριστή | 2 | 3 | 3-4 | 5 | 5 |
| Τιμή κατά προσέγγιση (σε χιλιάδες €, δεν είναι σημερινές) | 30-45 | 80-100 | 120-140 | 100-200 | 80-180 |
| Έξοδα συντήρησης | 1 | 1-2 | 2-3 | 5 | 2-3 |
| Ευκολία μεταφοράς | 1 | 3 | 3 | 5 | 1 |

Πίνακας 1.3: Σύγκριση συστημάτων βιομηχανικής γεωδαισίας [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Table 1.3: Comparison among Industrial Geodesy Systems [Goudinakos G, 2004]

Το περιβάλλον εργαστηρίου απαιτεί προστατευμένο χώρο και μικρή έκθεση σε άνεμο, ήλιο, δονήσεις, γρήγορες μεταβολές θερμοκρασίας.

Στους χειριστές δεν περιλαμβάνονται βοηθητικά άτομα για τοποθέτηση στόχων

Γνώσεις χειριστή : 1= επιπέδου Λυκείου ,5= επιπέδου μηχανικού ΑΕΙ

Τα έξοδα συντήρησης αφορούν τους στόχους, τις επισκευές των οργάνων, την βαθμονόμηση τους, την εκπαίδευση ατόμων κ.α. 1= λίγα, 5= πάρα πολλά

Η ευκολία μεταφοράς αφορά όλο το σύστημα (μέγεθος, βάρος οργάνων, αριθμός τους, προσωπικό κ.α.)

1= το πιο εύκολα μεταφερόμενο

Συνοψίζοντας λοιπόν όλα τα πλεονεκτήματα όλων μαζί των ηλεκτρονικό-οπτικών μετρητικών οργάνων συντεταγμένων που προσφέρει η βιομηχανική γεωδαισία είναι:

- ακριβής, γρήγορη και ικανή συλλογή τρισδιάστατων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- υψηλής φορητότητας όργανα που βγάζουν σε πέρας εργασία σε πολυπληθείς χώρους και επιτρέπουν την μέτρηση αντικειμένων στο χώρο τους.
- δυνατότητα μέτρησης μικρών και μεγάλων αντικειμένων με ακρίβεια καλύτερη του χιλιοστού.
- εξοικονόμηση χρημάτων και αυξημένη ασφάλεια σαν αποτέλεσμα του περιορισμού του χρόνου στο περιβάλλον εργασίας, υποβοηθώντας έτσι και την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων.
- ικανότητα πραγματοποίησης με τρισδιάστατες συντεταγμένες ευθυγραμμίσεων, συμμετριών, καθετοτήτων και άλλων γεωμετρικών απαιτήσεων.
- δυνατότητα μαθηματικών προσαρμογών γεωμετρικών προβλημάτων σε δυο ή περισσότερα στοιχεία μέσω συνοδευόμενου λογισμικού ή ελέγχου του βαθμού εφαρμογής των αρχικών σχεδιασμών εκάστοτε εφαρμογής.
- δυνατότητα μετρήσεων αντικειμένων χωρίς την απαίτηση επαφής τους από ανθρώπους (εξ' αποστάσεως μέτρηση).

1.3. Ιστορική αναδρομή

Χρονολογικά, η αρχή της βιομηχανικής γεωδαισίας τοποθετείται στη δεκαετία του 1980, όπου ήδη είχε αναγνωριστεί η ικανότητα των οπτικών μετρητικών οργάνων με σκοπό την απόκτηση συντεταγμένων (optical Coordinate Measure Machine-optical CMM) να επιτύχουν τις μετρητικές ακρίβειες που απαιτούνται από την βιομηχανική μετρολογία. Στην αρχή όλα αυτά τα συστήματα βασίστηκαν στην αρχή της τομής μετρημένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας είτε απ' ευθείας μετρήσεις μέσω ενός θεοδολίχου είτε έμμεσων μετρήσεων χρησιμοποιώντας τη φωτογραμμετρία. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ήταν πολύ πιο εύκολο να μετρηθούν διευθύνσεις με ακρίβεια απ' ό,τι αποστάσεις με ακρίβεια. Συστήματα που βασίζονταν στη τομή γωνιών (αρχή της εμπροσθοτομίας) χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό θεοδολίχο αντιπροσώπευαν τις πρώτες σοβαρές απόπειρες

για την εμπορευματοποίηση των συσκευών μέτρησης συντεταγμένων εξ' αποστάσεως. Το πρώτο σύστημα που κυκλοφόρησε στην αγορά ήταν το σύστημα HP3822A της Hewlett Packard στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Αυτή η καινοτομία οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών ανταγωνιστικών συστημάτων και από άλλες εταιρείες όπως την AIMS, την Zeiss κ.α. Οι δυο κύριοι ανταγωνιστές που αναδείχθηκαν ήταν η Wild-Leitz με το Wild-Zeiss RMS system και η KERN με το KERN ECDS, συστήματα που μοιράζονταν πολλά κοινά στοιχεία (οι δυο αυτές εταιρείες έπειτα συνενώθηκαν το 1988 και σταδιακά αποτέλεσαν μέρος της Leica Geosystems). Στα προαναφερθέντα συστήματα υιοθετούνταν δύο ή περισσότερα θεοδόλγια, τα οποία χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της συνόρθωσης κατά δέσμες καθόριζαν την θέση και τον προσανατολισμό των οργάνων σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο οριζοντιωμένο σύστημα συντεταγμένων. Από τη στιγμή που ολοκληρώνονταν αυτή η διαδικασία, οποιαδήποτε σημεία του μετρητικού αντικειμένου μπορούσαν να τμηθούν από οπτικές ακτίνες και σε πραγματικό χρόνο να τους δοθούν τρισδιάστατες συντεταγμένες με εκτίμηση των σφαλμάτων τους.

Ένα από τα κύρια προβλήματα που είχαν τέτοια συστήματα, ήταν η απαίτηση για πολλούς χειριστές που έπρεπε να δουλεύουν ταυτόχρονα για να αναγνωρίσουν και να μετρήσουν στοχευόμενα σημεία. Αυτή η μεθοδολογία ήταν πολύ κοπιαστική, δεδομένου ότι μόλις μερικές δεκάδες σημεία μπορούσαν να μετρηθούν ανά ώρα. Οι προσπάθειες για αυτοματοποίηση της διαδικασίας ήταν αρκετές. Οι Wild και KERN ανέπτυξαν τα συστήματα SPACE και ATMS τα οποία χρησιμοποιούσαν σερβοκαθοδηγούμενα βιντεοθεοδόλγια για τη μέτρηση των στόχων. Η έρευνα καθοδηγήθηκε από το χώρο της αεροδιαστημικής στην Αμερική (US Aerospace), αλλά λόγω του κόστους του εξοπλισμού ελάχιστα συστήματα ξέφυγαν και δούλεψαν σε άλλο χώρο. Λόγω της μεθοδολογίας των τεμνομένων διευθύνσεων, γρήγορα συνειδητοποιήθηκε η απαίτηση χώρου ώστε να δημιουργείται σωστή γεωμετρία (καλή γωνία τομής των οπτικών ακτινών). Αυτή η απαίτηση, καθώς και για άλλους λόγους, συχνά η προσπάθεια για βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του δικτύου περνούσε σε δεύτερη μοίρα και αποτελούσε παράγοντα μικρότερης σημασίας (ενώ στη πραγματικότητα συμβαίνει το αντίθετο).

Σε όλο αυτό το διάστημα, έγιναν σοβαρές προσπάθειες να αναπτυχθούν όργανα ικανά να προσδιορίσουν την απόσταση με πολύ μεγάλη ακρίβεια (π.χ. νήματα invar). Τέτοιες συσκευές δεν προχώρησαν πέρα από το περιβάλλον των εργαστηρίων και ουσιαστικά παρέμειναν πρωτότυπα με χρήση μόνο σε πειράματα φυσικής υψηλής ενέργειας. Στα τέλη

όμως της δεκαετίας του 1980, αναπτύχθηκε η συσκευή σάρωσης laser interferometer σε βιομηχανικό περιβάλλον (laser tracker). Το πρώτο εμπορικό laser tracker με τέτοια τεχνολογία παραδόθηκε από τη Leica το 1991 με την ονομασία SMART 310. Ακολούθησε το 1992 το CLS 3000 από τη Chesapeake (μετέπειτα SMX) και το 1999 το Tracker II από την API. Αυτά τα όργανα μέτρησης πολικών συντεταγμένων έχουν το πλεονέκτημα, έναντι των θεοδολίχων, την απαίτηση ενός μόνο χειριστή και τα μεγάλα προβλέψιμα χαρακτηριστικά όσον αφορά τις ακρίβειες μέτρησης. Βασίζονται στην απ' ευθείας μέτρηση ενός σημείου με το καθορισμό μιας γωνίας και μιας απόστασης μετρημένης με interferometer με κατάλληλο ανακλαστικό στόχο. Σε αντίθεση όμως με τα θεοδολίχα, δεν μπορούν να δουλέψουν σε περιβάλλον όπου δεν είναι δυνατή η επαφή με το αντικείμενο αφού αναγκαστικά απαιτείται η τοποθέτηση του στόχου στο αντικείμενο. Η επόμενη εξέλιξη των laser tracker, ήταν η κατασκευή τους με βάση την αρχή του Mekometer.

Τα τελευταία χρόνια έγινε προσπάθεια στη βιομηχανική γεωδαισία, να συνδυαστούν οι παράγοντες της ακρίβειας, του κόστους, της παραγωγικότητας και της ευκολίας εφαρμογής. Για παράδειγμα τα laser tracker είναι φορητά συστήματα αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι μπορεί να εκτεθούν σε ένα εχθρικό περιβάλλον, όπως π.χ. σε ένα ναυπηγείο, κυρίως λόγω της ευαισθησίας τους. Διαπιστώθηκε ότι σε πολλές εφαρμογές απαιτούνταν πολύ μεγάλη ακρίβεια στις συντεταγμένες αλλά όχι τόσο μεγάλη όσο έδιναν τα laser tracker ή ο συνδυασμός θεοδολίχων. Επιπρόσθετα, το κόστος απόκτησης, λειτουργίας και συντήρησης τέτοιων συστημάτων δεν ήταν ανεκτό από εταιρείες με μικρότερη αγορά εργασίας. Παρόλα αυτά ο ανταγωνισμός επέβαλε σε κάθε βιομηχανική μονάδα να ζητά γρήγορα αποτελέσματα και ευκολία χρήσης.

Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η χρησιμοποίηση οργάνων μέτρησης πολικών συντεταγμένων που προερχόταν από την οικογένεια των total stations (θεοδολίχο με ενσωματωμένη συσκευή μέτρησης αποστάσεων) και έχουν την ικανότητα να δίνουν συντεταγμένες με ακρίβεια καλύτερη του χιλιοστού. Κύριοι κατασκευαστές αυτών των οργάνων είναι η Leica και η Sokkia. Στην ουσία πρόκειται για total stations με πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων, τα οποία συνοδεύονται και συνδέονται με κατάλληλο λογισμικό για την εξαγωγή συντεταγμένων με εκτίμηση των σφαλμάτων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ 3Δ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1. Γενικά – Εφαρμοζόμενες Μεθοδολογίες

Τις τελευταίες δεκαετίες η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα της παραγωγής νέων μετρητικών συστημάτων που βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες εργασίες του τομέα της Βιομηχανικής Γεωδαισίας (αεροναυπηγική, βιομηχανία, ναυπηγική κ.α) κατέστησε δυνατή την αντικατάσταση των κλασσικών, μηχανικών ή οπτικών συστημάτων που προϋπήρχαν (συστήματα συντεταγμενογράφων, κλασσικές γεωδαιτικές μέθοδοι, φωτογραμμετρικές μέθοδοι), με νέα σύγχρονα οπτικά κυρίως συστήματα, γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά (γεωδαιτικοί σταθμοί, laser scanners, laser trackers κ.α). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παραπάνω μέθοδοι σύμφωνα με τον παραπάνω διαχωρισμό :

| Μέθοδος 3Δ προσδιορισμού θέσης | Χαρακτηριστικά μεθόδου | | | |
|---------------------------------------|------------------------|----------|----------|--------|
| | Κλασσική | Σύγχρονη | Μηχανική | Οπτική |
| Συστήματα συντεταγμενογράφων | X | | X | |
| Σύγχρονα συστήματα συντεταγμενογράφων | | X | | X |
| Κλασσικές γεωδαιτικές μέθοδοι | X | | | X |
| Ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί | | X | | X |
| Σαρωτές Laser | | X | | X |
| Laser trackers | | X | | X |
| Φωτογραμμετρικές μέθοδοι | X | | | X |
| Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές μέθοδοι | | X | | X |

Πίνακας 2.1: Διαχωρισμός μεθόδων 3Δ προσδιορισμού θέσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους
Table 2.1: List of 3D measuring systems according to their technical features

Οι μεγαλύτερες αλλαγές πραγματοποιήθηκαν στα χαρακτηριστικά αυτοματοποίησης των νέων συστημάτων, τόσο στον τομέα της διαδικασίας των μετρήσεων όσο και στη διαδικασία της επεξεργασίας τους. Έτσι έχουν αναπτυχθεί νέα συστήματα, εύκολα στη χρήση, που μπορούν να διαχειριστούν δεδομένα από ένα ή και περισσότερα όργανα που πραγματοποιούν μετρήσεις και βρισκόμενα σε on-line επικοινωνία με αυτά να λαμβάνουν τα δεδομένα που συλλέγουν, να τα αναλύουν και να τα εμφανίζουν κατευθείαν σε μορφή CAD.

2.2. Συστήματα συντεταγμενογράφων

Τα συστήματα συντεταγμενογράφων αποτελούν μια μηχανική λύση μεγάλης ακρίβειας για τον προσδιορισμό 3Δ θέσης και πρόκειται για ψηφιοποιητές που χρησιμοποιούν στην πράξη κωδικοποιητές προκειμένου να ελέγχουν τις διάφορες φάσεις υπολογισμού των συντεταγμένων. Τα συστήματα αυτά είναι στενά συνδεδεμένα με τις CAD εφαρμογές, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτοματοποιημένες μετρήσεις και επαναλαμβανόμενες διαδικασίες και μπορούν να επιτευχθούν ακρίβειες της τάξης των μερικών μικρόμετρων.

Ένα σοβαρό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι το μεγάλο μέγεθός τους, που καθιστά συσχερή τη μεταφορά τους και έτσι αναγκαστικά μεταφέρεται το προς εξέταση αντικείμενο στο χώρο που βρίσκεται ο συντεταγμενογράφος. Άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι μεγάλης ακρίβειας συντεταγμενογράφοι, που μπορούν να μετρήσουν αντικείμενα μερικών μέτρων σε μέγεθος με ακρίβεια της τάξης του μικρόμετρου, απαιτούν μεγάλες και ακριβές εγκαταστάσεις με συνθήκες ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα αναπτύχθηκαν και κάποια συστήματα φορητών συντεταγμενογράφων, οι οποίοι τοποθετούνται επάνω στο εξεταζόμενο αντικείμενο και εισάγονται στο σύστημα αναφοράς αυτού. Η επιφάνεια μέτρησης αυτών συστημάτων ποικίλει από 1 ως 3 m και η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης του 0,1 mm. Προκειμένου να μετρηθούν μεγάλα αντικείμενα χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα συστήματα φορητών συντεταγμενογράφων εισαγμένα όλα στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Τα φορητά αυτά συστήματα έχουν τύχει ευρείας αποδοχής κυρίως στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας λόγω της φορητότητάς τους και στις ευκολίας στη χρήση.

Μια άλλη κατηγορία πιο σύγχρονων συστημάτων συντεταγμενογράφων είναι οι οπτικοί συντεταγμετογράφοι που χρησιμοποιούν κάμερες σε μια φορητή διάταξη που είναι συνδεδεμένες με καλώδιο σε μια συσκευή LED. Αυτές οι συσκευές έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να μετρήσουν μεγαλύτερη επιφάνεια αλλά η ακρίβεια κατά μήκος αυτής της επιφάνεια ποικίλει. Αυτές οι συσκευές μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία των “optical trackers” που έχουν τη δυνατότητα να «ακολουθούν» τη δέσμη LED που εκπέμπεται μέσα σε μια προκαθορισμένη περιοχή. Οι περιοχές που έχουν βρει εφαρμογή αυτά τα συστήματα είναι η εξέταση των βιολογικών κινήσεων από την ιατρική επιστήμη, η ρομποτική και οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Στον τομέα της αεροναυπηγικής καθώς και στον τομέα της βιομηχανίας περιορίζονται που έχουν να κάνουν με μετρήσεις

μοντέλων μέσα σε σήραγγες αεροδυναμικής και σε ευθυγράμμιση τμημάτων βιομηχανικών κατασκευών.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι έγιναν προσπάθειες βελτίωσης στον τομέα της ευστάθειας και της ακρίβειας με την οποία τοποθετούνται τα μηχανικά μέρη των συστημάτων αυτών πάνω στο αντικείμενο που μετράται (Nasham, 1993) καθώς και ο συνδυασμός αυτών των συστημάτων με συσκευές laser (Ramanan et al, 1995). Με αυτό το συνδυασμό δίνεται η δυνατότητα να μετρηθούν πιο περίπλοκες διατάξεις καθώς το προς μέτρηση αντικείμενο σαρώνεται απευθείας από τη δέσμη laser αυξάνοντας κατά πολύ την ακρίβεια. Επίσης υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης μια συσκευής κάμερας πάνω στη μετρητική συσκευή, ούτως ώστε οι μετρήσεις να μπαίνουν αυτόματα πάνω στη φωτογραφία του αντικειμένου, σε περιβάλλον CAD, μέσω της ανίχνευσης των γωνιών (Nasham, 1993).

2.3. Γεωδαιτικές μέθοδοι

Τα κλασικά όργανα που χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη λήψη μετρήσεων μπορεί να δίνουν αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, ωστόσο χρειάζεται αρκετός χρόνος και αρκετός χώρος για τη σωστή λειτουργία τους. Έγινε έτσι προσπάθεια να δημιουργηθούν φορητά μηχανικά μετρητικά όργανα όπως όργανα για μέτρηση μηκών που χρησιμοποιούν σύρματα Invar, κλασικά θεοδόλιχα ή οπτικομηχανικοί χωροβάτες, που όμως δεν έδιναν αποτελέσματα με την επιθυμητή ακρίβεια. Δημιουργήθηκαν έτσι οπτικές μετρητικές μηχανές μεγάλης ακρίβειας που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις γρήγορα και σε πιο περιορισμένους χώρους. Τέτοιες μετρητικές μηχανές είναι οι σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί, τα συστήματα με δύο ή περισσότερους γεωδαιτικούς σταθμούς και τα laser trackers.

2.3.1. Σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί

Η άμεση μέτρηση μηκών και γωνιών με τη μέθοδο πολικών συντεταγμένων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τους ψηφιακούς ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς. Τα όργανα αυτά είναι η εξέλιξη των παλαιότερων συστημάτων μηχανικών θεοδολίχων και E.D.M, που έχουν πλέον το αποστασιόμετρο ενσωματωμένο με το ψηφιακό θεοδόλιχο.

Στα πλεονεκτήματα των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών σημαντικό στοιχείο εκτός από την εμβέλεια τους, αποτελεί και η ταυτόχρονη μέτρηση και η καταγραφή μηκών αλλά και γωνιών (οριζόντιων και κατακόρυφων) σε ενσωματωμένη καταγραφική μονάδα. Σημαντικό πλεονέκτημα επίσης, αποτελεί ο τρόπος και η ψηφιακή διαδικασία οριζοντίωσης (η κέντρωση του οργάνου στις εργασίες της βιομηχανικής γεωδαισίας γίνεται, εφόσον χρειάζεται, εξαναγκασμένα).

Οι ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί ακριβείας είναι όργανα εύχρηστα, παρέχουν ανάγνωση των γωνιακών μεγεθών που κυμαίνεται από 0".1 έως 3", ενώ το γωνιακό σφάλμα μέτρησης φτάνει έως και τα 0".5. Έχουν δυνατότητα μέτρησης μηκών από μερικά μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα (ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους ανακλαστήρες) με ακρίβεια της τάξης των $\pm 1 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ και παρέχουν σε αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού σε μετρήσεις ακριβείας είναι:

- η ακρίβεια που παρέχει στη μέτρηση μηκών ($\pm a \text{ mm} \pm b \text{ ppm}$) και στη μέτρηση γωνιών
- το βεληνεκές του για τη μέτρηση μήκους
- η ποιότητα (γυαλί, πλαστικό, φωσφορίζουσα ταινία) και ο αριθμός των κατάφωτων για τη μέτρηση του μήκους
- η διάρκεια της μοναδιαίας μέτρησης ενός μήκους
- το βάρος και ο όγκος του
- η δυνατότητα προσαρμογής άλλων παρελκόμενων
- ο τρόπος αποθήκευσης και διαχείρισης των μετρήσεων (σε καταγραφική μονάδα, απευθείας σύνδεση με H/Y, κ.α.)
- το κόστος του

| Τύπος γεωδαιτικού σταθμού | Κατασκευάστρια εταιρία | Απόδοση γωνιών | Ακρίβεια μετρ. γωνιών | Ακρίβεια μετρ. μηκών | Βεληνεκές | Χρόνος μετρ. μήκους | Βάρος |
|---------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------------|----------|
| TPS 5000 | Leica (Ελβετία) | 0 ^{cc} .1 | ± 1 ^{cc} .5 | ±1 mm ±2 ppm | 1.2Km-5Km | 3 sec | 7.2 Kgr |
| TC 2003 | Leica (Ελβετία) | 0 ^{cc} .1 | ± 1 ^{cc} .5 | ±1 mm ±2 ppm | 3 Km | 3 sec | 12.5 Kgr |
| TC 1800 | Leica (Ελβετία) | 1 ^{cc} .0 | ± 3 ^{cc} .0 | ±1 mm ±2 ppm | 3 Km | 3 sec | 7.2 Kgr |
| GTS 600 | Topcon (Ιαπωνία) | 1 ^{cc} .0 | ± 3 ^{cc} .0 | ± 2 mm ±2 ppm | 3.5 Km | 4 sec | 5.8 Kgr |
| 5601 | Trimble (ΗΠΑ) | 1 ^{cc} .0 | ± 3 ^{cc} .0 | ±1 mm ±1 ppm | 3.5 Km | 3.5 sec | 6.4 Kgr |

Πίνακας 2.2: Παρουσίαση ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών ακριβείας [*Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005*]

Table 2.2: List of High-precision Total stations [*Technical Geodesy Notes, 2005*]

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των γεωδαιτικών σταθμών στις μετρολογικές εργασίες γίνεται ολοένα και πιο συχνή και σε ευρύτερο πεδίο δράσης. Αυτό οφείλεται στη συνεχή και απότομη βελτίωση στις ακρίβειες μέτρησης των γεωδαιτικών σταθμών σε συνδυασμό με τη δυνατότητα σύνδεσης των οργάνων με ΗΥ για επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Σημαντική βελτίωση είναι και η κατασκευή αυτοκινούμενων θεοδολίχων που καθοδηγούνται είτε με χειριστήριο είτε μέσω υπολογιστή. Αυτού του είδους οι γεωδαιτικοί σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με μηχανή λήψης εικόνας μικρών διαστάσεων, με ενσωματωμένο κάρναβο. Τέτοιοι γεωδαιτικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται για εργασίες στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας ή γενικότερα για διαστασιολόγηση βιομηχανικών κατασκευών, στη ναυπηγική και την αεροναυπηγική.

2.3.2. Συστήματα γεωδαιτικών σταθμών

Τα συστήματα θεοδολίχων χρησιμοποιούνται ευρέως στη Βιομηχανική Γεωδαισία σε εργασίες μικροτριγωνισμού. Ειδικότερα, η επικρατούσα μέθοδος που εφαρμόζεται είναι αυτή της εμπροσθοτομίας στο χώρο. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται συνήθως από 2-6 γεωδαιτικούς σταθμούς και προσδιορίζουν τα σημεία με ακρίβειες που αγγίζουν το 0.1mm.

Σε σχέση με τους γεωδαιτικούς σταθμούς και τα laser trackers, τα συστήματα αυτά διαφέρουν στο ότι μετρούν μόνο γωνίες οι οποίες παρέχονται με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις αποστάσεις και για αυτό το λόγο προσφέρουν υψηλής ποιότητας μετρήσεις.

Είναι γεγονός ότι οι πωλήσεις των συστημάτων θεοδολίχων το τελευταίο χρονικό διάστημα έχουν μειωθεί πάρα πολύ· η ανάπτυξη της τεχνολογίας των laser trackers και laser scanners καθώς και η βελτίωση των γεωδαιτικών σταθμών μαζί με το ότι ο χειρισμός ενός συστήματος θεοδολίχων απαιτεί αντίστοιχο αριθμό εμπειρών και καλά καταρτισμένων ατόμων έχει οδηγήσει σε μία τάση παραγκωνισμού των θεοδολίχων, όσον αφορά εργαστηριακές γεωδαιτικές εφαρμογές, χωρίς όμως αυτό να εννοεί την κατάργησή τους.

Τομείς εφαρμογής της μεθόδου με περισσότερους από έναν γεωδαιτικούς σταθμούς είναι η ναυπηγική και αεροναυπηγική, ο έλεγχος της ποιότητας του σκελετού κάποιων κατασκευών καθώς και ο έλεγχος κάποιας ηλεκτρονικής διάταξης.

2.3.3. Laser trackers

Τα laser trackers αποτελούν μια σύγχρονη τεχνολογία των οπτικών συστημάτων μέτρησης (CCM-Coordinate Measurement Machines). Η λειτουργία τους βασίζεται στο συνδυασμό επιμέρους μηχανισμών. Μία συσκευή εκπομπής laser στέλνει μία δέσμη φωτός σε ένα στρεφόμενο αντανακλαστικό μέσο, ενώ ένα laser interferometer ή mekometer μετρά σχετικές αποστάσεις. Ταυτόχρονα, οπτικοί δέκτες υπολογίζουν την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία του στόχου.

Μια δευτερεύουσα λειτουργία των laser trackers για μετρήσεις αποστάσεων, είναι αυτή που χρησιμοποιείται για στόχους σε παράταξη. Το laser tracker κατευθύνει την εκπεμπόμενη δέσμη φωτός προς ένα δοσμένο retro-reflector στόχο και εκτελεί μια σπειροειδή κίνηση για να εντοπίσει και να κλειδώσει το στόχο. Η απόσταση υπολογίζεται χωρίς το ιντερφερόμετρο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει η παρακολούθηση μιας κατασκευής για τυχόν παραμορφώσεις ή μετακινήσεις, χωρίς να χρειάζεται να είναι κοντά στο όργανο ο χειριστής. Η λειτουργία αυτή που καλείται ADM (Absolute Distance Meter), έχει ακρίβεια της τάξης των 50 μικρών.

Τα συστήματα με laser trackers αποτελούν την ιδανική επιλογή για μετρήσεις μεγάλων βιομηχανικών εξαρτημάτων, καθότι έχουν τη δυνατότητα αρκετά γρήγορης μέτρησης (η

συλλογή των δεδομένων είναι πιο γρήγορη από συστήματα θεοδολίων, και πιο αργή από φωτογραμμετρικές μεθόδους και γεωδαιτικούς σταθμούς) με ακρίβεια μερικών μικρών σε αποστάσεις λίγων δεκάδων μέτρων. Ακόμα, η δυνατότητα σύνδεσής τους σε πραγματικό χρόνο με προγράμματα επεξεργασίας και απόδοσης συντεταγμένων τα καθιστά ευέλικτα και εύχρηστα. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδήγησαν τα laser trackers να επικρατήσουν στο χώρο των βιομηχανικών μετρολογικών συστημάτων. Πλέον κατέχουν περίπου το 90% της αγοράς, ενώ η τεχνολογία τους συνεχώς αναβαθμίζεται.

Στα μειονεκτήματά τους συμπεριλαμβάνονται το σχετικά μεγάλο τους βάρος και μέγεθος, καθώς και το υψηλό τους κόστος αγοράς. Επίσης, εξαιτίας του μεγέθους του retro-reflector στόχου οι υπολογιζόμενες συντεταγμένες είναι μετατοπισμένες σε σχέση με την πραγματική επιφάνεια.

Χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική, στη βαθμονόμηση οργάνων, στην ευθυγράμμιση ηλεκτρονικών διατάξεων, στον έλεγχο ποιότητας του σκελετού κατασκευών καθώς και στο σχεδιασμό βιομηχανικών εξαρτημάτων.

2.4. Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο στις εφαρμογές της Βιομηχανικής Γεωδαισίας όσο και σε άλλες τοπογραφικές εφαρμογές. Μεγάλο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η μεγάλη ποικιλία και εναλλαγή συνδυασμών του εξοπλιστικού υλικού (όργανα για καταγραφή εικόνων, μετρήσεων επί των εικόνων και επεξεργασίας δεδομένων), που μπορεί να καλύψει τις απαιτούμενες ακρίβειες των αποτελεσμάτων.

Οι καταγραφικές τους μονάδες αποτελούνται από το φακό (lens) και από τον αισθητήρα καταγραφής της εικόνας (image sensor). Ο τελευταίος μπορεί να είναι, είτε φωτοευαίσθητη επιφάνεια (film), είτε πλάκα réseau ή ψηφιακής μορφής. Τα ψηφιακά καταγραφικά συστήματα είναι εξοπλισμένα με οπτικό-ηλεκτρονικούς αισθητήρες CCD (charged coupled device sensor), οι οποίοι αποτελούνται από τους στοιχειώδεις φωτοευαίσθητους αισθητήρες (light sensitive sensor elements) σε γραμμή (linear sensors) ή και σε επιφάνεια (matrix sensors).

| Κατασκευάστρια εταιρία | Τύπος | Διαστάσεις εικόνας (mm) x (mm) | Πλάκα réseau (mm) |
|------------------------|------------|--------------------------------|-------------------|
| Leica | R5 | 24x36 | 5 |
| Rollei | 35 | 24x36 | 5,5 |
| Rollei | 3003 | 24x36 | 5,5 |
| Rollei | 6006 | 55x55 | 5 |
| Rollei | 6008 | 55x55 | 2 |
| Pentax | PAMS 645P | 45x69 | 20/25 |
| Hasselblad | MK70 | 50x50 | 10 |
| Wild | P32 | 60x90 | - |
| GSI Inc | CRC-3 | 60x90 | 30 |
| Linhof | METRIKA 45 | 95 x 120 | 10 |
| Linhof/Rollei | R METRIKA | 95 x 120 | 2 |
| GSI Inc | CRC-2 | 115x115 | 25 |
| Zeiss | UMK1318 | 130x180 | - |
| GSI Inc | CRC-1 | 230 x 230 | 50 |
| Rollei | LFC | 230x230 | 2 |

Πίνακας 2.3: Αναλογικοί αισθητήρες φωτογραμμετρικών συστημάτων [Μπακόπουλος Γ, 2006]
Table 2.3 : Analog sensors of photogrammetric systems [Μρακοπουλος G, 2006]

| Κατασκευάστρια εταιρία | Τύπος | Διαστάσεις εικόνας (mm) x (mm) | Πλήθος στοιχειωδών φωτοευαίσθητων αισθητήριων δεκτών |
|------------------------|-------------|--------------------------------|--|
| Toshiba | TC 1500 | 35 x 0,007 | 5000 x 1 |
| Pulnix | TM - 560 | 8,8 x 6,6 | 500 x 592 |
| Valvo | NXA1011 | 6x4,5 | 604 x 576 |
| Sony | XC - 77 CE | 8,8 x 6,6 | 756x581 |
| Cidtec | 2710 | 8,8 x 6,6 | 776x512 |
| EEV | CCD 05 - 10 | 22,5 x 22,5 | 298x1152 |
| Videk | MEGAPLUS | 9x7 | 1320 x 1035 |
| VDS | CCD - 1000 | 13,9x7,8 | 1260x1152 |
| Dalsa Inc | IA-D2 | 10x10 | 1024x1024 |
| Hamamatsu | C4742 | 12 x 12,2 | 1000x1018 |
| Thomson - SSF | TH7896A | 19x19 | 1024x1024 |
| Tektronix | TK1024M | 24,6x 24,6 | 1024 x 1024 |
| Kodak | KAF - 4200 | 9x9 | 2048 x 2048 |
| Ford Aerospace | - | 30,7 x 30,7 | 4096 x 4096 |
| Dalsa Inc | MEGASENSOR | 12x12 | 5120x5120 |

Πίνακας 2.4: Ψηφιακοί αισθητήρες φωτογραμμετρικών συστημάτων [Μπακόπουλος Γ, 2006]
Table 2.4 : Digital sensors of photogrammetric systems [Μρακοπουλος G, 2006]

Σε ότι αφορά τις εφαρμογές Βιομηχανική Γεωδαισίας, οι μετρήσεις μεταξύ των σημείων στις αναλογικές εικόνες χρησιμοποιώντας ψηφιοποιητή (digitizer-table), μονοεικονικό ή στερεοσκοπικό συγκριτή εικόνων (image comparator) ή στερεοσκοπικό σχεδιοποιητή (stereo-plotter), έχουν περιοριστεί. Αντί αυτών χρησιμοποιείται η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων με ψηφιακά on-line συστήματα ή με φωτογραφικά συστήματα κατόπιν σάρωσης του film με μια CCD κάμερα.

Μια άλλη κατηγορία συστημάτων που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές της Βιομηχανικής Γεωδαισίας είναι οι σαρωτές laser (laser scanners) οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με ένα matrix αισθητήρα καταγραφής, όπου ο προσανατολισμός των επιμέρους εικόνων στη συνολική εικόνα του αντικειμένου δίνεται μηχανικά ή οπτικο-αριθμητικά με την τεχνική réseau.

2.4.1. Laser scanners

Οι σαρωτές laser μικρού βεληνεκούς είναι στην πραγματικότητα ενεργά τηλεπισκοπικά συστήματα για επίγειες εφαρμογές, γνωστά και ως 3D close-range Laser Mapping Systems (3D-LMS). Ο όρος «ενεργά» αναφέρεται στην ιδιότητα των συστημάτων αυτών να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει στα αντικείμενα ενδιαφέροντος, ανακλάται και επιστρέφει στο όργανο το οποίο καταγράφει και το σήμα επιστροφής. Έτσι «αποτυπώνεται» η επιφάνεια πάνω στην οποία έχει ανακλαστεί το εκπεμπόμενο σήμα. Πρόκειται δηλαδή για πηγές και δέκτες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Οι σαρωτές κατατάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας που χρησιμοποιούν για τη μέτρηση της απόστασης σαρωτή - σκοπευόμενου σημείου, ανάλογα με την εμβέλεια τους και ανάλογα με τη δυνατότητα τοποθέτησης τους. Οι Boehler & Marbs (2002) διακρίνουν ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, τους σαρωτές βεληνεκούς (ranging scanners) και τους σαρωτές τριγωνισμού (triangulation scanners).

Η τεχνολογία των σαρωτών μικρού βεληνεκούς υπολογίζει την απόσταση με δύο τρόπους, είτε με τον χρόνο διαδρομής ενός παλμού laser, είτε με τη μέθοδο σύγκρισης φάσης. Σύμφωνα με την πρώτη αρχή, η εξερχόμενη από τον σαρωτή παλλόμενη δέσμη laser προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και ανακλάται μερικώς, δεδομένου ότι τμήμα της ακτινοβολίας απορροφάται από την επιφάνεια του αντικειμένου και κάποιο ποσοστό αυτής χάνεται κατά τη διαδρομή μετάβασης-επιστροφής. Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση της δέσμης και την επιστροφή της στο δέκτη μετράται με τα ακριβή χρονόμετρα του συστήματος και έτσι υπολογίζεται η απόσταση του σαρωτή και του σημείου που έδωσε το σήμα επιστροφής, δεδομένου ότι είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Η τρισδιάστατη θέση του σημείου υπολογίζεται με μετρήσεις των διευθύνσεων της δέσμης του laser κατά τη σάρωση και της απόστασης σαρωτή-σημείου.

Οι σαρωτές που εφαρμόζουν αυτή την αρχή σάρωσης είναι ικανοί να μετρήσουν πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Σύμφωνα με την αρχή σύγκρισης φάσης, η μεταδιδόμενη δέσμη διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται με βάση την διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του επιστρεφόμενου κύματος. Στην πραγματικότητα η μέθοδος σύγκρισης φάσης δεν διαφέρει πολύ από την πρώτη μέθοδο. Δεδομένου όμως, ότι σε αυτή την μέθοδο η ανάλυση των σημάτων είναι πιο σύνθετη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πιο ακριβή εις βάρος της ταχύτητας μέτρησης. Σε αυτού του τύπου τους σαρωτές, ανήκουν και οι σαρωτές με διακύμανση πλάτους δέσμης laser. Στην περίπτωση αυτή, οι σαρωτές εκπέμπουν μια συνεχή δέσμη laser με αυξομειούμενο πλάτος που κινείται στο χώρο με τη βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων καθρεφτών. Ο δέκτης καταγράφει την ανακλώμενη ενέργεια. Ο συνδυασμός του μήκους κύματος του επιστρεφόμενου σήματος και του πλάτους του εκπεμπόμενου κύματος δίνουν την απόσταση σαρωτή-στόχου (Τσάμου, 2003).

Οι σαρωτές τριγωνισμού αποτελούνται από μια πηγή laser και μία μηχανή CCD. Η πηγή laser βρίσκεται στο ένα άκρο της μηχανικής βάσης και εκπέμπει μια ακτίνα laser με καθορισμένη και διαρκώς αυξανόμενη γωνία πάνω στο αντικείμενο. Η κάμερα CCD βρίσκεται στο άλλο άκρο της μηχανικής βάσης όπου ανιχνεύει και καταγράφει το σημείο ή την γραμμή της ακτίνας laser πάνω στο αντικείμενο. Η γωνία υπό την οποία φεύγει η δέσμη από το σαρωτή καταγράφεται στο εσωτερικό σε ειδική καταγραφική μονάδα, ενώ η απόσταση της βάσης, δηλαδή η απόσταση της πηγής του laser και της κάμερας είναι γνωστή από τη βαθμονόμηση του οργάνου. Η απόσταση του σημείου της επιφάνειας του αντικειμένου από το σαρωτή υπολογίζεται από τη γωνία αυτή και το μήκος της βάσης. Δηλαδή, η τρισδιάστατη θέση του σημείου στην επιφάνεια προκύπτει από την επίλυση του τριγώνου που δημιουργείται, όπως φαίνεται και στην. Στους σαρωτές που λειτουργούν με την αρχή του τριγωνισμού, η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης μεταξύ του οργάνου και του αντικειμένου μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο αυτής της απόστασης. Είναι φανερό πως για πρακτικούς λόγους, το μήκος της βάσης δεν μπορεί να αυξάνεται τυχαία. Συνεπώς, οι συγκεκριμένοι σαρωτές είναι ιδιαίτερα σημασίας για σαρώσεις μικρού βεληνεκούς και για μικρά αντικείμενα όπου είναι πολύ πιο ακριβή από τους σαρωτές μεγάλου βεληνεκούς.

Συγκεκριμένα, πετυχαίνουν ακρίβειες από 0.1mm σε αποστάσεις μικρότερες από 2m από το αντικείμενο. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία αντιμετώπισης της περίπτωσης όπου το αντικείμενο προς σάρωση βρίσκεται μακριά. Τότε η γωνία τριγωνισμού γίνεται πολύ μικρή και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Για γωνίες μικρότερες από 40' υπάρχει πρόβλημα στον υπολογισμό της απόστασης στόχου-σαρωτή.

Το βεληνεκές μέτρησης των σαρωτών κυμαίνεται από 1.5 m έως 100 m και η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων από ± 0.1 mm έως ± 45 mm.

Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων εξαρτάται από:

- την απόσταση από το αντικείμενο
- την ταχύτητα και ανάλυση σάρωσης
- το υλικό της ανακλώμενης επιφάνειας
- τη μέθοδο σάρωσης που κάθε σύστημα χρησιμοποιεί
- το μέγεθος της μοναδιαίας κουκκίδας παλμού λέιζερ που εκπέμπεται
- οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διαδικασία μέτρησης

| Τύπος σαρωτή | Κατασκευάστρια εταιρία | Ακρίβεια μέτρησης απόστασης/ συν/ων | Διάμετρος κουκκίδας laser | Εμβέλεια | Οπτικό πεδίο Hz/V | Σημεία avasec | Hz/V Ανάλυση στη σάρωση | Βάρος (με μπαταρία) |
|--------------|------------------------|--|---------------------------------|----------|-------------------|---------------|-------------------------|---------------------|
| Cyrax 2500 | Leica (Ελβετία) | ± 4 mm (1.5 – 50m) / 4 mm S < 50 m | 6mm (0 έως 50 m) | 100m | 40° / 40° | 1000 | 0.0005° | 27.8 Kgr |
| Callidus | Trimble (ΗΠΑ) | ± 5 mm / ± 3 mm στα 10 m | 3 mrad \approx 10 cm στα 50 m | 80m | 360° / 140° | 1750 | 0.0018° | 13.0 Kgr |
| Mensi | Topcon (Ιαπωνία) | ± 6 mm | 3mm (0 έως 50 m) | 100m | 360° / 60° | 5000 | 0.0018° | 16.0 Kgr |

Πίνακας 2.5 : Σαρωτές Laser [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005]
Table 2.5 : Laser scanners [Technical Geodesy Notes, 2005]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ

3.1. Γενικά

Η μεθοδολογία μέτρησης και υπολογισμού στην οποία στηρίζεται η βιομηχανική γεωδαισία είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές και συνίσταται στο προσδιορισμό των συντεταγμένων X , Y , Z προκαθορισμένων σημείων του αντικειμένου. Απώτερος σκοπός είναι ο υπολογισμός της μορφής και των διαστάσεων του αντικειμένου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Οι συντεταγμένες που υπολογίζονται ανήκουν σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς που ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να μετατραπεί και στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Τελικά, οι συντεταγμένες μπορούν να συγκριθούν με εκείνες που δίνει ο κατασκευαστής για να υπολογισθούν και αξιολογηθούν τυχόν αποκλίσεις.

Όσον αφορά τη γεωδαιτική διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των συντεταγμένων, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι. Η πρώτη είναι η μέθοδος της εμπροσθοτομίας και η δεύτερη η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων. Τα συστήματα με δύο ή περισσότερα θεοδόλιχα χρησιμοποιούν τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας, ενώ τα συστήματα των laser tracker και των γεωδαιτικών σταθμών χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων.

Σκοπός των μετρήσεων της βιομηχανικής γεωδαισίας είναι ο υπολογισμός συντεταγμένων με υψηλή ακρίβεια. Από το σκοπό και μόνο, προκύπτει η σημαντικότητα των διαφόρων πηγών σφαλμάτων. Οι πηγές των σφαλμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που σχετίζονται με :

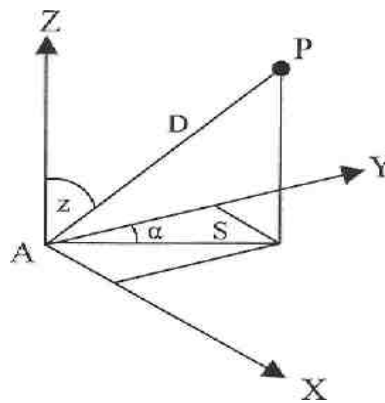
- τον χειριστή
- τα όργανα μέτρησης και τους χρησιμοποιούμενους στόχους
- το περιβάλλον των μετρήσεων

Στη συνέχεια αναλύονται οι παραπάνω μεθοδολογίες και αναφέρονται τα σφάλματα που επηρεάζουν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή τους και μπορούν να επιφέρουν αλλοίωση των τελικών αποτελεσμάτων.

3.2. Βασικοί Μέθοδοι Υπολογισμού

3.2.1. Μέθοδος πολικών συντεταγμένων

Η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων στηρίζεται στη μέτρηση της οριζόντιας γωνίας, της κατακόρυφης γωνίας και της απόστασης από ένα γνωστό σημείο προς το άγνωστο σημείο.



Σχήμα 3.1: Πολικές συντεταγμένες [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 3.1: Polar coordinates [Goudinakos G, 2004]

Οι συντεταγμένες του σημείου P βρίσκονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} X_p &= X_A + S \sin \alpha \\ Y_p &= Y_A + S \cos \alpha \\ Z_p &= Z_A + S \cos z \end{aligned} \quad (3.1)$$

, όπου $S = D \sin z$

Όπως είναι φανερό, η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων προϋποθέτει το άγνωστο σημείο ως προσβάσιμο για να τοποθετηθεί το ανακλαστικό μέσο της ακτινοβολίας του EDM. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται κύρια από την ικανότητα της ακριβούς μέτρησης του μήκους παρά των γωνιών, και αυτό αποτελεί το γεγονός που την περιορίζει. Αυτό προκύπτει αν υπολογίσουμε το σφάλμα της μιας συντεταγμένης, π.χ. της σ_{x_p} με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων (θεωρώντας το σημείο A χωρίς σφάλμα).

$$\sigma_{X_p} = (\sin \alpha \sigma_s)^2 + (S \cos \alpha \sigma_\alpha)^2 \quad (3.2)$$

Όσο μεγαλώνει το S, κυρίαρχο ρόλο στην ακρίβεια της συντεταγμένης παίζει το σ_α . Όσο μικραίνει το S, δραστικό ρόλο στην ακρίβεια της συντεταγμένης παίζει το σ_s . Κατά κανόνα στη βιομηχανική γεωδαισία επικρατούν κοντινές αποστάσεις, για αυτό και στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων παίζει σημαντικό ρόλο το σφάλμα της μετρούμενης απόστασης. Να σημειωθεί ότι αυτό δεν απαλλάσσει τη μέθοδο από την ανάγκη για υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση των γωνιών. Απλά όπως προαναφέρθηκε, οι παράμετροι των οργάνων που μετράνε γωνίες με μεγάλη ακρίβεια φτιάχνονται πιο εύκολα και έτσι το ζητούμενο είναι να υπάρχει αρμονική ακρίβεια γωνιομετρήσεων και μέτρησης αποστάσεων, δίνοντας έτσι μια έλλειψη σφάλματος που θα τείνει σε κύκλο.

Φυσικά και σε αυτή τη μεθοδολογία, όσο αυξάνει η απόσταση αυξάνεται και το σφάλμα του άγνωστου σημείου. Είναι συνέπεια της μέτρησης των γωνιών, που εδώ επιδεινώνεται και από τη μέτρηση μήκους. Να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται και από τη σχέση που δίνει το σφάλμα της συντεταγμένης Y

$$\sigma_{Y_p} = (\cos \alpha \sigma_s)^2 + (S \sin \alpha \sigma_\alpha)^2 \quad (3.3)$$

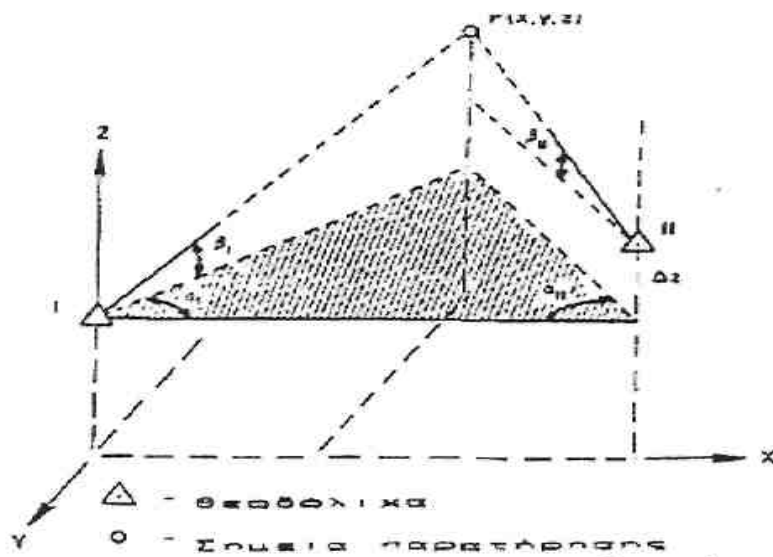
ότι σε ένα σημείο P τα σ_X και σ_Y είναι αντίστροφα, δηλαδή μεγάλο σ_X θα έχει και μικρό σ_Y . Το ποιο από τα δύο θα είναι μεγαλύτερο εξαρτάται από το ποια συντεταγμένη του αγνώστου σημείου είναι κοντύτερα στους άξονες του συστήματος αναφοράς (εξαιρέση η διαγώνιος).

Στο σφάλμα της συντεταγμένης Z αυτό που παρατηρείται είναι ότι σε μικρές αποστάσεις πολύ μικρά σφάλματα παρατηρούνται για ζενίθιες γωνίες γύρω στους 100 βαθμούς ενώ σε μεγάλες αποστάσεις μικρά σφάλματα παρατηρούνται σε μικρές ζενίθιες γωνίες.

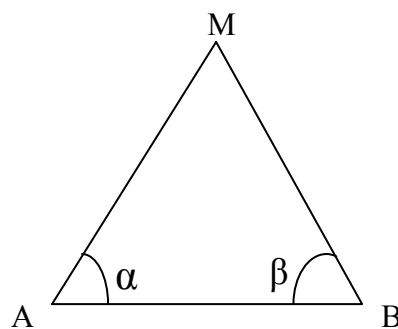
$$\sigma_{Z_p} = (\cos z \sigma_D)^2 + (D \sin z \sigma_z)^2 \quad (3.4)$$

3.2.2. Μέθοδος εμπροσθοτομίας

Σε όλες τις γεωδαιτικές περιπτώσεις, ανάλογα με τα στοιχεία που χρειάζεται κάθε μέθοδος, γίνονται ακριβείς μετρήσεις οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών καθώς και ακριβείς μετρήσεις αποστάσεων. Η μεθοδολογία της εμπροσθοτομίας αποτελεί την αρχή στην οποία βασίστηκαν τα πρώτα συστήματα βιομηχανικής γεωδαισίας. Η απλή μέθοδος εμπροσθοτομίας επιτρέπει την εύρεση των συντεταγμένων ενός σημείου M, εφ' όσον ξέρουμε τις συντεταγμένες δυο άλλων σημείων A και B από τα οποία μπορούν να γίνουν μετρήσεις προς το σημείο M.



Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση της εμπροσθοτομίας [Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, 2005]
Figure 3.2: Intersection method [Technical Geodesy Notes, 2005]



Σχήμα 3.3: Οι χρησιμοποιούμενες γωνίες της εμπροσθοτομίας
Figure 3.3: Angles observed in the intersection method

3.2.2.A Εμπροσθοτομία στο επίπεδο

Αρχικά θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα στο επίπεδο και έπειτα στο χώρο. Οι απαραίτητες μετρήσεις για την εύρεση των συντεταγμένων X_M, Y_M είναι ή οι οριζόντιες γωνίες α και β ή τα οριζόντια μήκη D_{AM} και D_{BM} . Δεδομένα είναι οι συντεταγμένες X_A, Y_A, X_B, Y_B .

Είναι προφανές ότι όταν μετρούνται μήκη, σε λίγες περιπτώσεις είναι δυνατή η μέτρηση απ' ευθείας των οριζόντιων μηκών. Έτσι κατά κανόνα μετρώνται κεκλιμένα μήκη και μετά γίνεται αναγωγή τους σε οριζόντιο επίπεδο. Πρέπει να τονιστεί ότι ανάλογα με την εφαρμογή πρέπει να επιβάλλονται οι απαιτούμενες αναγωγές και διορθώσεις των μηκών.

Από το Σχήμα 3.3 φαίνεται ότι και στις δυο περιπτώσεις, είτε έχουν μετρηθεί γωνίες είτε μήκη, το τρίγωνο ABM είναι κατασκευάσιμο σύμφωνα με την Ευκλείδεια Γεωμετρία διότι η πλευρά D_{AB} είναι γνωστή, ενώ κατά περίπτωση ή είναι γνωστές οι προσκείμενες πλευρές ή οι άλλες δυο πλευρές. Οπότε υπάρχουν αρκετοί τρόποι επίλυσης. Αυτοί είναι:

- Με μετρημένες τις γωνίες α και β
 - επίλυση του τριγώνου ABM
 - εύρεση X_M, Y_M με εξισώσεις ευθειών
- Με μετρημένα τα μήκη D_{AM} και D_{BM}
 - επίλυση του τριγώνου ABM
 - επίλυση με τομή δύο κύκλων

Εδώ παρουσιάζεται μόνο η περίπτωση της μέτρησης των γωνιών και επίλυση του τριγώνου ABM, η οποία χρησιμοποιήθηκε.

Η επίλυση του τριγώνου ακολουθεί τα εξής στάδια:

- Από τις συντεταγμένες των σημείων A και B υπολογίζονται, σύμφωνα με το 2^ο θεμελιώδες πρόβλημα, το μήκος D_{AB} και οι γωνίες α_{AB} και α_{BA} .

- Με γνωστά το μήκος D_{AB} και τις μετρημένες γωνίες α και β , από το νόμο των ημιτόνων, υπολογίζονται τα οριζόντια μήκη D_{AM} και D_{BM} :

$$D_{BM} = \frac{D_{AB} \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$D_{AM} = \frac{D_{AB} \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$
(3.5)

- Με τις γνωστές γωνίες διεύθυνσης α_{AB} και α_{BA} και τις μετρημένες γωνίες α , β υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης των πλευρών AM και BM :

$$\begin{aligned} \text{Από το Α :} \quad X_M &= X_A + D_{AM} \sin \alpha_{AM} \\ Y_M &= Y_A + D_{AM} \cos \alpha_{AM} \end{aligned}$$
(3.6)

$$\begin{aligned} \text{Από το Β :} \quad X_M &= X_B + D_{BM} \sin \alpha_{BM} \\ Y_M &= Y_B + D_{BM} \cos \alpha_{BM} \end{aligned}$$
(3.7)

Τελικά λαμβάνεται ο μέσος όρος από τις δύο λύσεις.

Να σημειωθεί, ότι ο διπλός υπολογισμός του σημείου αποτελεί μόνο έλεγχο των πράξεων και όχι πλεονασμό παρατηρήσεων.

3.2.2.B Εμπροσθοτομία στο χώρο

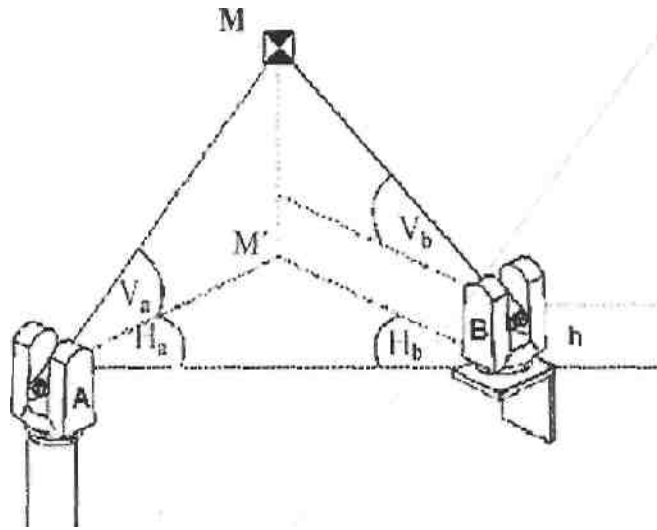
Στην περίπτωση της εμπροσθοτομίας στο χώρο, η επίλυση στο οριζόντιο επίπεδο είναι ίδια και επιλύονται άλλα δύο τρίγωνα στο κατακόρυφο επίπεδο με επιπλέον στοιχεία, την υψομετρική διαφορά των δύο οργάνων και τις κατακόρυφες μετρημένες γωνίες Z_{AM} και Z_{BM} .

Χρησιμοποιώντας τις ονομασίες σημείων του προηγούμενου παραδείγματος, το ύψος του σημείου M από το οριζόντιο επίπεδο του οργάνου είναι :

$$Z_M = D_{AM} \cos Z_{AM} + Z_A \text{ από το τρίγωνο } AMM' \quad (3.8)$$

$$Z_M = D_{BM} \cos Z_{BM} + Z_B \text{ από το τρίγωνο } BMM' \quad (3.9)$$

Στο τέλος από το μέσο όρο προκύπτει το ύψος του M. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται σχηματικά η παραπάνω διαδικασία :



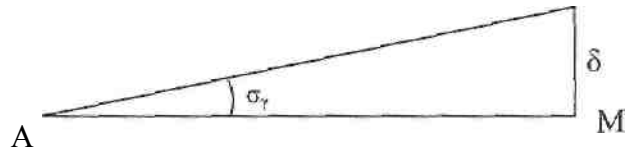
Σχήμα 3.4: Προσδιορισμός υψομετρικής διαφοράς [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 3.4: Height difference computation [Goudinakos G, 2004]

Λόγω των υψηλών απαιτήσεων στις ακρίβειες που έχει η βιομηχανική γεωδαισία, συνήθως δεν ακολουθείται η προηγούμενη περίπτωση αλλά η πολλαπλή εμπροσθοτομία.

Το άγνωστο σημείο προσδιορίζεται από την τομή τριών ή περισσότερων ευθειών. Το σκεπτικό είναι το ίδιο όπως στην περίπτωση της απλής εμπροσθοτομίας, με την ύπαρξη όμως περισσότερων μετρήσεων από τις απαραίτητες, μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία των ελαχίστων τετραγώνων και να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του σημείου.

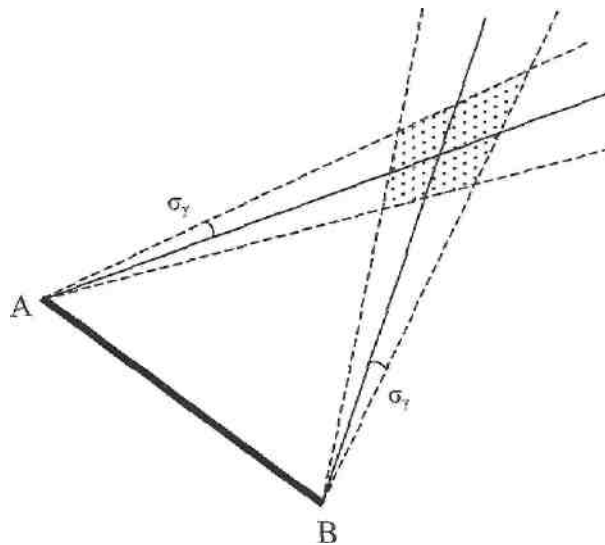
Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή ακρίβεια και το γεγονός ότι δεν απαιτείται το άγνωστο σημείο να προσεγγίζεται παρά μόνο να είναι ορατό. Η μεγαλύτερη ακρίβεια πηγάζει από την ικανότητα που υπάρχει για μεγαλύτερης ικανότητας ακρίβεια στη μέτρηση γωνιών σε σχέση με την ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων.

Αυτή καθ' αυτή η μέθοδος, επηρεάζεται κυρίως από δύο παράγοντες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, όσο μεγαλώνει η απόσταση ανάμεσα στο όργανο μέτρησης και το άγνωστο σημείο τόσο μεγαλώνει και το γραμμικό σφάλμα δ της αβεβαιότητας σ_γ . Άρα όσο μεγαλώνει η απόσταση, το σφάλμα του προσδιοριζόμενου σημείου μεγαλώνει.



Σχήμα 3.5: Το γραμμικό σφάλμα δ λόγω σ_γ
 Figure 3.5: Linear error δ corresponding to angular error σ_γ

Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου της εμπροσθοτομίας είναι η γωνία τομής της διεύθυνσης σκόπευσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, κάθε διεύθυνση που σκοπεύεται έχει μια περιοχή αβεβαιότητας. Η τομή των δυο ευθειών δίνει ένα τετράπλευρο αβεβαιότητας. Όσο η γωνία τομής των δυο ευθειών γίνεται πιο αμβλεία ή πιο οξεία τόσο περισσότερο αυξάνεται το εμβαδόν αυτού του τετραπλεύρου, προκαλώντας και κατά συνέπεια αύξηση στην αβεβαιότητα προσδιορισμού του σημείου. Η ιδανική περίπτωση δημιουργείται όταν οι ευθείες τέμνονται κάθετα, οπότε ελαχιστοποιείται και το εμβαδόν του τετραπλεύρου. Τότε οι συντεταγμένες του αγνώστου σημείου έχουν τη μικρότερη αβεβαιότητα. Πρακτικά είναι αδύνατον να σχηματίζεται πάντα ορθή γωνία μεταξύ των τεμνόμενων ευθειών, για αυτό και αποδεκτές γωνίες τομής θεωρούνται από 65-130 βαθμούς.



Σχήμα 3.6: Περιοχή αβεβαιότητας στην εμπροσθοτομία λόγω σφαλμάτων των γωνιών [Γκουντινάκος Γ, 2004]

Figure 3.6: Uncertainty area of the intersection method due to directional errors [Goudinacos G, 2004]

3.2.3. Συνδυασμένη μέθοδος εμπροσθοτομίας – Μέθοδος Hansen

Αξιοποιώντας την σύγχρονη τεχνολογία που χαρίζει πληθώρα επιλογών και εργαλείων, που παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερα αποτελέσματα, μια πλέον διαδεδομένη

μέθοδος μετρήσεων στη Βιομηχανική Γεωδαισία είναι η σύνδεση ενός ή και περισσότερων γεωδαιτικών σταθμών με έναν υπολογιστή με κατάλληλο λογισμικό. Έτσι πραγματοποιούνται οι μετρήσεις αλλά και η επεξεργασία αυτών σε πραγματικό χρόνο (real time) και η μέθοδος αυτή υπερέρχει της off-line διαδικασίας καθώς :

- Μεγάλο πλεονέκτημα της λειτουργίας συστημάτων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί επίσης η άμεση αναγνώριση και εξάλειψη των χονδροειδών σφαλμάτων.
- Η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο προσφέρει μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου, ενώ βοηθά να έρθει σε πέρας η εργασία με όσο το δυνατόν λιγότερο ανθρώπινο δυναμικό.
- Μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμη η πλειοψηφία των δυνατοτήτων των οργάνων σε μεγαλύτερο βαθμό (όπως για παράδειγμα η λειτουργία ATR στους γεωδαιτικούς σταθμούς που επιτρέπει στο όργανο να εντοπίζει ακριβώς το κέντρο του πρίσματος).

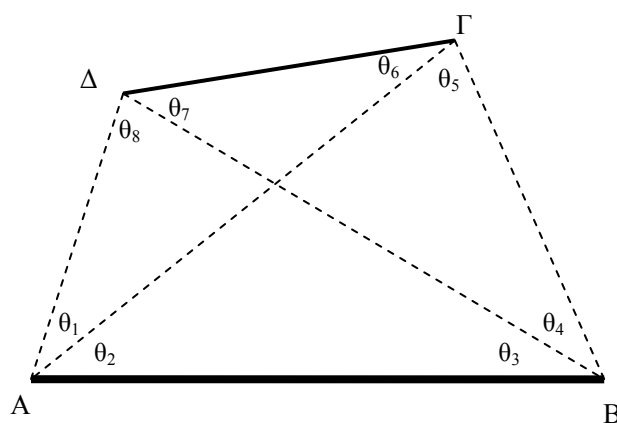
Για την εφαρμογή της μεθόδου επιλέγεται η στάση και δίνονται σε αυτό αυθαίρετες συντεταγμένες. Έπειτα δεδομένου ότι το ένα όργανο έχει τοποθετηθεί στην στάση που προαναφέρθηκε τοποθετείται και το δεύτερο γεωδαιτικό σταθμό σε τέτοια θέση ώστε να μπορούν να στοχεύσουν ταυτόχρονα και τα δύο όργανα όσον το δυνατόν περισσότερα σημεία. Ακολουθούν οι διαδικασίες της οριζοντίωσης και της σύνδεσης των δύο οργάνων με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το επόμενο βήμα είναι να δοθούν συντεταγμένες στο σημείο που έχει τοποθετηθεί ο δεύτερος γεωδαιτικός σταθμός ώστε να οριστεί πλήρως το σύστημα αναφοράς που θα χρησιμοποιηθεί. Για λόγους ευκολίας θεωρείται ότι ο ένας άξονας του συστήματος αναφοράς (ο X ή ο Y) ότι βρίσκεται στην ευθεία που ενώνει τα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί οι δύο γεωδαιτικοί σταθμοί. Έτσι, αρκεί να μετρηθεί η απόσταση μεταξύ των δύο στάσεων, πράγμα που επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας Hansen, και να βρεθεί η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο στάσεων.

Σε πρώτη φάση προηγείται η διαδικασία της αλληλοσκοπέυσης των δύο γεωδαιτικών σταθμών. Με αυτόν τον τρόπο θα μετριοούνται οι εσωτερικές γωνίες στο τρίγωνο που θα σχηματίζεται από τις δύο στάσεις και το εκάστοτε άγνωστο σημείο που θα στοχεύεται από τις δύο στάσεις. Η διαδικασία της αλληλοσκοπέυσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος της διαδικασίας, για αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή προκειμένου να γίνει σωστά και με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Η διαδικασία της αλληλοσκοπέυσης πραγματοποιείται ως εξής: Αρχικά από τον ένα γεωδαιτικό σταθμό σκοπεύεται το κέντρο του φακού του δεύτερου γεωδαιτικού σταθμού και μηδενίζεται ο οριζόντιος δίσκος μετρήσεων γωνιών. Στη συνέχεια ο δεύτερος γεωδαιτικός σταθμός σκοπεύει το κέντρο του πρώτου και μηδενίζει τον οριζόντιο δίσκο μετρήσεων γωνιών του. Έτσι επιτυγχάνεται η σύμπτωση των σκοπευτικών αξόνων των δύο γεωδαιτικών σταθμών. Πιο πρακτικά αρκεί το ένα όργανο να εστιάσει στο άπειρο και να στοχεύσει το σταυρόνημα του άλλου, μέθοδος ιδιαίτερα ακριβής.

Ο μηδενισμός μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους χωρίς να γίνει στόχευση προς το άλλο όργανο αλλά προς κάποιο άλλο προσημασμένο σημείο. Έτσι μπορεί να τοποθετηθεί ένας έκκεντρος στόχος στο απέναντι τηλεσκόπιο και να γίνει η σκόπευση σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου. Άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση μικρού στόχου στον αντικειμενικό φακό του τηλεσκοπίου ο οποίος έχει μικρή οπή για να βλέπει ο χειριστής ή τοποθέτηση στόχων πάνω από το όργανο όπως στηρίζονται οι επιβατικές αεροστάθμες. Ο πλέον πρακτικός τρόπος προϋποθέτει τη χρήση ενός πρίσματος αυτοσκοπέυσης προσαρμοσμένο στο τηλεσκόπιο ενός οργάνου. Τότε, το δεύτερο όργανο στοχεύει το πρίσμα, εστιάζοντας στο άπειρο. Η σύμπτωση των οπτικών ακτινών έχει επιτευχθεί όταν το σταυρόνημα του τηλεσκοπίου ταυτιστεί με το είδωλό του. Εναλλακτικά, λόγω του μεγάλου κόστους του πρίσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μικρός επίπεδος καθρέφτης.

Εφόσον ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία με τον τρόπο που επιλέξουμε και έχοντας έτσι μηδενίσει την ένδειξη της οριζόντιας γωνίας από τον ένα γεωδαιτικό σταθμό προς τον άλλο, μπορούμε να προχωρήσουμε στη διεξαγωγή της διαδικασίας Hansen ώστε να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ των δύο γεωδαιτικών σταθμών. Η μέθοδος περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 3.7:



Σχήμα 3.7: Μέθοδος Hansen
Figure 3.7: Hansen Method

Το μήκος ΓΔ είναι γνωστό και μετρούνται οι γωνίες $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ και θ_4 . Το ζητούμενο είναι να βρεθεί η απόσταση AB, που αποτελεί την τετμημένη ή τεταγμένη του σημείου B (ανάλογα ποιος άξονας, X ή Y, έχουμε θεωρήσει ότι περνάει από το A και το B). Το πρόβλημα ανάγεται σε εμπροσθοτομία από τα Γ και Δ εφ' όσον υπολογιστούν οι γωνίες $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ και θ_8 . Ένας τρόπος είναι η επίλυση του συστήματος εξισώσεων :

$$\begin{aligned}\theta_1 + \theta_8 &= \theta_4 + \theta_5 \\ \theta_2 + \theta_3 &= \theta_6 + \theta_7 \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 &= 400^g \\ \frac{\sin\theta_2 \sin\theta_4 \sin\theta_6 \sin\theta_8}{\sin\theta_1 \sin\theta_3 \sin\theta_5 \sin\theta_7} &= 1\end{aligned}\quad (3.10)$$

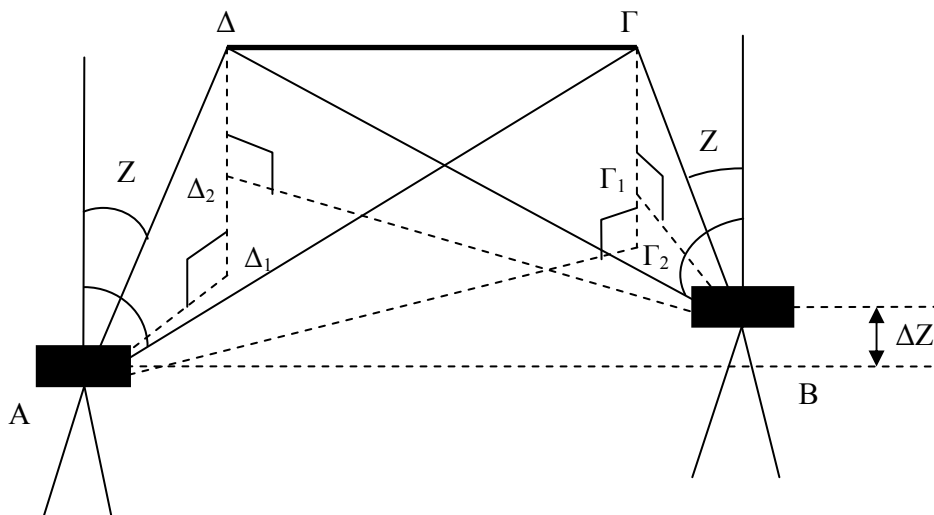
Εφόσον βρεθούν οι γωνίες από τα σημεία Γ και Δ υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου B. Το μήκος ΓΔ που προκύπτει από τα άκρα μιας ράβδου κλίμακας. Η ράβδος κλίμακας είναι μια ράβδος που στα άκρα της έχει στόχους και είναι φτιαγμένη από υλικό το οποίο έχει πάρα πολύ μικρό συντελεστή διαστολής ώστε το μήκος της να μην μεταβάλλεται όταν αλλάζει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που γίνονται οι μετρήσεις. Έτσι, έχοντας οριζοντιώσει επακριβώς τη ράβδο μας είναι γνωστή με πολύ μεγάλη ακρίβεια η απόσταση μεταξύ των δύο στόχων που βρίσκονται στα άκρα της. Οι μετρήσεις στη ράβδο κλίμακας είναι καλό να γίνονται σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου, αφού από αυτές προκύπτουν οι συντεταγμένες της στάσης B.

Το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστεί το υψόμετρο Z της στάσης B. Υπάρχουν δύο τρόποι:

- Ο πρώτος τρόπος απαιτεί τη μέτρηση των κατακόρυφων γωνιών προς τους στόχους της ράβδου οπότε διαλέγοντας ένα κατακόρυφο τρίγωνο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.8, η υψομετρική διαφορά των δύο στάσεων είναι :

$$\Delta Z = \frac{A\Delta_1}{\tan z_{A\Delta}} - \frac{B\Delta_2}{\tan z_{B\Delta}} \quad (3.11)$$

Προστιθέμενη η υψομετρική διαφορά στο ZA βρίσκουμε το ZB. Για έλεγχο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και το δεύτερο τρίγωνο ή για περιορισμό των πράξεων τη μία κατακόρυφη απόσταση να τη βρούμε από το ένα τρίγωνο και την άλλη από το άλλο τρίγωνο.



Σχήμα 3.8 : Προσδιορισμός υψομετρικής διαφοράς των στάσεων
 Figure 3.8 : Height difference determination between stations

- Ο δεύτερος τρόπος είναι παρόμοιος, με τη διαφορά ότι δεν μετρούνται καθόλου κατακόρυφες γωνίες στη ράβδο, αλλά τοποθετούνται οι αναγνώσεις των κατακόρυφων γωνιών και στα δύο όργανα όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια στους 100 βαθμούς, ώστε οι γεωδαιτικοί σταθμοί να λειτουργούν πλέον ως χωροβάτες. Κατόπιν λαμβάνονται αναγνώσεις πάνω σε σταδία ακριβείας. Από τη διαφορά των αναγνώσεων προκύπτει η υψομετρική διαφορά των στάσεων.

Με αυτόν τον τρόπο, αφού γίνουν οι μετρήσεις από τις δύο στάσεις (A και B) προς τους δύο στόχους της ράβδου (Γ και Δ) και στη συνέχεια έχοντας προσδιορίσει το υψόμετρο της στάσης B, έχουμε ολοκληρώσει τη διαδικασία ορισμού του συστήματος αναφοράς στο οποίο θα ενταχθούν τα σημεία που μας ενδιαφέρουν, οπότε μπορούν να αρχίσουν οι μετρήσεις προς αυτά, μετρώντας οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες.

3.3. Πηγές σφαλμάτων

3.3.1. Σφάλματα χειριστών

Για να γίνουν σωστές μετρήσεις τα μετρολογικά συστήματα πρέπει να χειρίζονται από επαρκώς καταρτισμένα. Απαιτείται μεγάλη εμπειρία, η οποία αποκτάται μόνο έπειτα από μακροχρόνια πρακτική εξάσκηση. Παρόλα αυτά πάντα είναι πιθανό να γίνει κάποιο χονδροειδές λάθος, π.χ. να οριστεί λάθος κάποια παράμετρος του οργάνου ή να μετρηθεί λάθος σημείο ή να χρησιμοποιηθεί λάθος στόχος. Για αυτό και είναι κρίσιμο να τηρούνται καθορισμένες διαδικασίες, οι οποίες ελαχιστοποιούν τις πιθανότητες για χονδροειδή λάθη

ή θα εξασφαλίζουν τον επαρκή πλεονασμό παρατηρήσεων ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση χονδροειδών λαθών.

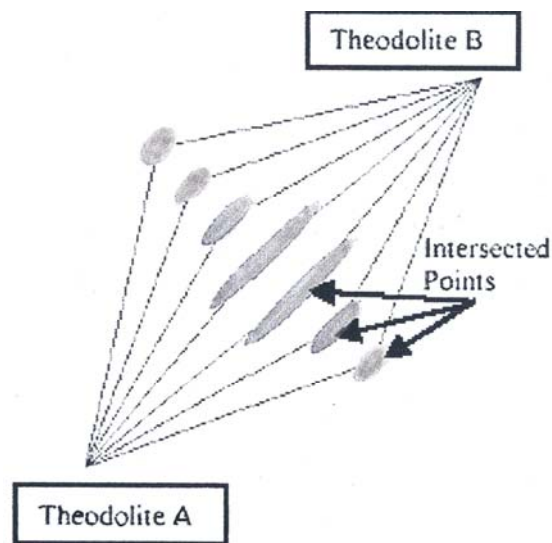
3.3.2. Σφάλματα οργάνων

Σφάλματα μπορούν να προκύψουν από τα όργανα. Οι μετρήσεις που γίνονται για να βρεθούν συντεταγμένες, αφορούν μετρήσεις μηκών και γωνιών. Οι περαιτέρω αναλύσεις που γίνονται, θεωρούν γενικά ότι οι μετρήσεις επιτυγχάνουν τη μέγιστη ακρίβεια τους. Στην πράξη όμως όλα τα όργανα παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις μέγιστες ακρίβειές τους όσο αυξάνεται η χρήση τους και η διάρκεια ζωής τους. Προς αποφυγή τέτοιων φαινομένων, ανεξάρτητα αν έχουν την ικανότητα να επιβάλλουν διορθώσεις, πρέπει τα μετρητικά όργανα να βαθμονομούνται κατά περιοδικά χρονικά διαστήματα. Προσοχή πρέπει να δίνεται και στη χρησιμοποίηση των κατάλληλων στόχων. Θα πρέπει κάθε φορά να επιλέγεται το σωστό μέγεθος, χρώμα και σχήμα ώστε οι παρατηρήσεις να επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Τις περισσότερες φορές δεν ενδιαφέρουν οι συντεταγμένες του στόχου αλλά του σημείου που αναφέρεται, κάτι το οποίο επιβάλλει τη σωστή μέτρηση απόστασης σημείου - κέντρο στόχου, καθώς και το περιοδικό έλεγχο για τυχόν φθορές. Σε μετρήσεις αποστάσεων θα πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να διορθώνονται σωστά οι σταθερές των οργάνων. Συχνά αμελείται, αποτελώντας μεγάλη πηγή σφάλματος, η θέση του στόχου ως προς το όργανο ή σταθερή τοποθέτηση του. Για παράδειγμα, ένας στραμμένος στόχος σε σχέση με το όργανο οδηγεί σε λάθος σκόπευση ή εσφαλμένη μετρημένη απόσταση χωρίς κιόλας να γίνεται αντιληπτό από το χρήστη.

Μια ακόμα πηγή σφαλμάτων που σχετίζεται με τα όργανα, χωρίς να είναι άμεσα συνδεδεμένη, αφορά τη γεωμετρική διαμόρφωση της τοποθεσίας των οργάνων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο θεοδόλιχα τα οποία βρίσκονται περίπου το ένα απέναντι από το άλλο, οι αβεβαιότητες μερικών σημείων είναι πολύ μεγάλες όπως φαίνεται στο αντίστοιχο γράφημα στις ελλείψεις σφάλματος.

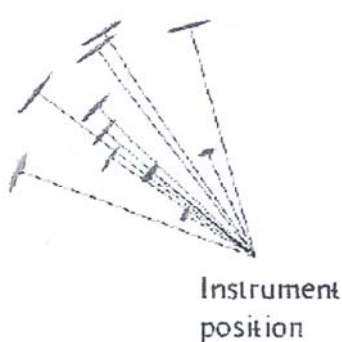
Μικρή αιτία σφάλματος μπορεί να αποτελέσει και η επιλογή οργάνων μικρότερης ακρίβειας. Δηλαδή, αν και οι διαφορές είναι μικρές, τα laser tracker γενικά έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό αποστάσεων από τα total station. Αντίθετα τα total station προσδιορίζουν διευθύνσεις με καλύτερη ακρίβεια. Αυτό φαίνεται και από τον προσανατολισμό των ελλείψεων σφάλματος στα γραφήματα που ακολουθούν. Οπότε σε

ένα αντικείμενο που οι στόχοι έχουν τοποθετηθεί κυρίως κατά μήκος μιας δέσμης ακτίνων, ίσως το laser tracker να δίνει καλύτερες ακρίβειες. Αντιθέτως σε στόχους τοποθετημένους ακτινικά γύρω από το όργανο, τα όργανα με ακριβέστερες μετρήσεις γωνιών θα υπερτερούν. Δηλαδή επιτυγχάνεται μια πιο αρμονική ακρίβεια των μετρήσεων σε σχέση με τις διαστάσεις του αντικειμένου. Η παραπάνω διαπίστωση ισχύει σε γενικές γραμμές, αφού π.χ. οι μετρήσεις αποστάσεων μπορεί να μετρώνται τόσο καλά που να καλύπτουν την αδυναμία μέτρησης γωνιών ή άλλοι λόγοι να επιβάλλουν διαφορετικά όργανα στα παραπάνω παραδείγματα.

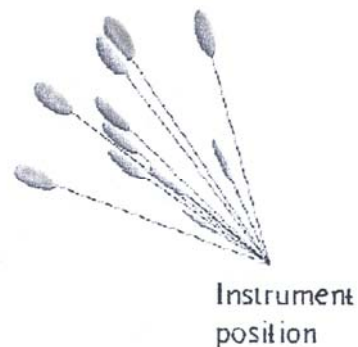


Σχήμα 3.9: Ελλείψεις σφάλματος σημείων με δύο γεωδαιτικούς σταθμούς τοποθετημένους αντικριστά [Γκουντινάκος Γ, 2004]

Figure 3.9: Error ellipses of points measured by two total stations facing each other [Goudinacos G, 2004]



Σχήμα 3.10: Ελλείψεις σφάλματος σημείων από όργανα που έχουν υψηλή ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων σε σχέση με την ακρίβεια μέτρησης διευθύνσεων [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 3.10: Error ellipses of points computed using total stations with higher distance accuracy than angular accuracy [Goudinacos G, 2004]



Σχήμα 3.11: Ελλείψεις σφάλματος σημείων από όργανα που έχουν υψηλή ακρίβεια μέτρησης διευθύνσεων σε σχέση με την ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 3.11: Error ellipses of points computed using total stations with higher angular accuracy than distance accuracy [Goudinacos G, 2004]

Ευτυχώς σφάλματα που σχετίζονται με τη γεωμετρία μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας τα σωστά μαθηματικά μοντέλα. Αβεβαιότητες που προκαλούνται από τυχόν λάθος μαθηματικά και στοχαστικά μοντέλα μπορούν να εκλείψουν με την απαραίτητη προσοχή και τη σωστή βαθμονόμηση των οργάνων.

3.3.3. Σφάλματα περιβάλλοντος

Ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την αποφυγή σφαλμάτων στη βιομηχανική γεωδαισία είναι η σταθερότητα του περιβάλλοντος εργασίας. Φυσικά φαινόμενα, όπως η ανομοιόμορφη θέρμανση των μετρητικών οργάνων, η οπτική διάθλαση ή οι μηχανικές δονήσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις θεωρητικά επιτεύξιμες ακρίβειες των μετρήσεων. Πολλοί ασχολούμενοι με τη βιομηχανική γεωδαισία έχουν αναφέρει, από τη στιγμή που δεν υπάρχουν συστηματικά λάθη ή λάθη βαθμονόμησης, κύρια πηγή εσφαλμένων μετρήσεων είναι οι επιδράσεις του περιβάλλοντος.

Οι επιδράσεις του περιβάλλοντος μπορούν να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες.

- στις σχετικές μετακινήσεις ανάμεσα στο όργανο και το μετρούμενο αντικείμενο
- στη παραμόρφωση της οπτικής ακτίνας ανάμεσα στο όργανο και το μετρούμενο αντικείμενο

Οι σχετικές μετακινήσεις μπορούν να οφείλονται είτε σε ατυχή γεγονότα (όπως κατά λάθος μετακίνηση του οργάνου), είτε σε περιοδικά φαινόμενα (όπως υψηλής ή χαμηλής συχνότητας δονήσεις), είτε σε συστηματικές επιδράσεις (όπως οι μεταβολές λόγω ανομοιόμορφης θέρμανσης). Είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται σταθερή θέση οργάνου και η πρόσβαση γύρω από αυτό να είναι ελεγχόμενη. Ίδιας βαρύτητας πρέπει να είναι και η προστασία των οργάνων από τον ήλιο ή άλλη πηγή θέρμανσης. Μια καλή πρακτική, είναι η μέτρηση 3 ή περισσότερων σημείων ελέγχου καλά κατανεμημένων στο χώρο πριν την έναρξη των κυρίως εργασιών. Στο τέλος ή μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα, μεγάλες αποκλίσεις των σημείων ελέγχου ίσως αποκαλύψουν κάποια μεταβολή λόγω επίδρασης του περιβάλλοντος.

Τα φαινόμενα διάθλασης είναι γενικά τα πιο σημαντικά στις επιδράσεις των μετρήσεων. Αλλαγές στη θερμοκρασία και στην πίεση και μεταβολές στην ατμόσφαιρα

μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη μέτρηση αποστάσεων, λόγω των αποκλίσεων που επιβάλλουν στη ταχύτητα του φωτός όπου βασίζονται όλες οι συσκευές μέτρησης αποστάσεων. Για να διατηρηθεί ακρίβεια ± 1 ppm στη μέτρηση της απόστασης, η θερμοκρασία πρέπει να είναι γνωστή με ακρίβεια ± 1 βαθμό $^{\circ}\text{C}$ και η πίεση με ακρίβεια ± 3 mb. Ευτυχώς τέτοια φαινόμενα έχουν ερευνηθεί αρκετά και οι όποιες επιδράσεις μπορούν να διορθωθούν, είτε διατηρώντας το μετρητικό περιβάλλον σε επιθυμητές συνθήκες είτε χρησιμοποιώντας αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης για να γνωρίζουμε τις μεταβολές.

Η καμπύλωση των οπτικών ακτίνων εξ' αιτίας τοπικών θερμικών ανωμαλιών είναι ένας μικρότερης σημασίας παράγοντας. Από τη Φυσική είναι γνωστό ότι το φως ταξιδεύει σε ευθύγραμμο. Αυτό ισχύει μόνο σε ένα ομογενές περιβάλλον, όπου η πυκνότητα και σύσταση του μέσου μεταφοράς είναι ομοιογενής. Καθώς όμως η πυκνότητα της ατμόσφαιρας αλλάζει, προκαλείται καμπύλωση των οπτικών ακτίνων και άρα του σημείου σκόπευσης. Λόγω της μεγάλης δυσκολίας να παραμετροποιηθούν και να μοντελοποιηθούν τέτοιες συνιστώσες, ενδείκνυται να αποφεύγονται σκοπεύσεις σε περιοχές όπου μεγάλες οριζόντιες ή κάθετες θερμικές ανωμαλίες, όπως π.χ. σε περιοχές γύρω από σωλήνες που μεταφέρουν πολύ ζεστά ρευστά.

Όλοι οι παραπάνω λόγοι τελικά, επιβάλλουν όσο το δυνατόν πιο ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ LEICA TDA 5005 ΚΑΙ TCA 1800 (LEICA_GEOSYSTEMS)

4.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικών σταθμών

4.1.1. Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005

Ένα από τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι ο γεωδαιτικός σταθμός TDA 5005 της εταιρείας Leica Geosystems. Αποτελεί μέρος της σειράς TPS 5000, κατασκευασμένη ειδικά για βιομηχανική γεωδαισία. Τα υπόλοιπα όργανα που συμπληρώνουν την οικογένεια είναι το Total Station TDM 5005 και τα ψηφιακά θεοδόλιχα TM 5005, TM 5100, TM 5100A. Και τα τρία όργανα είναι τα νεότερα μοντέλα των αρχικών TDM 5000, TDA 5000 και TM 5000. Η σειρά TPS 5000 περιλαμβάνει τα καλύτερα και ακριβέστερα όργανα που κατασκευάζει η εταιρεία Leica σε σχέση με τα υπόλοιπα όργανα της.



Σχήμα 4.1: Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.1: Total station Leica TDA 5005 [www.leica-geosystems.com]

Το TDA 5005 παρέχει υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων, είναι πλήρως ψηφιακό και διαθέτει υψηλής ποιότητας οπτικά στοιχεία. Η απόδοση (ανάγνωση) των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών γίνεται με $0.1''$ ενώ η ακρίβεια των

οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών είναι 1.5° (σύμφωνα με DIN 18723). Εάν θεωρήσουμε ως συνηθισμένες αποστάσεις της βιομηχανικής γεωδαισίας τα 10 m έως τα 60 m, η παραπάνω ακρίβεια μεταφράζεται σε γραμμικό σφάλμα 0.024 mm και 0.141 mm αντίστοιχα. Η ελάχιστη ανάγνωση στη μέτρηση αποστάσεων είναι 0.01 mm ενώ η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων είναι $1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ (σύμφωνα με DIN 18723). Η μέγιστη απόσταση μέτρησης με άριστες συνθήκες είναι 3500/5000 m (1 ή 3 πρίσματα αντίστοιχα). Επιπλέον μπορούν να οριστούν παράμετροι που μεταβάλλουν την απόσταση ώστε αυτή να διορθώνεται (όπως θερμοκρασία, πίεση, διάθλαση, χαρτογραφική παραμόρφωση, καμπυλότητα γης κ.α.). Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μέτρησης με μικρότερη ακρίβεια προκειμένου να μειώνεται ο χρόνος μέτρησης κάθε απόστασης.

Διαθέτει διπλό αντισταθμιστή εύρους 7° με ακρίβεια μέτρησης αποκλίσεων, άρα και ακρίβεια των διορθώσεων 1° . Ακόμη διαθέτει κυκλική αεροστάθμη ευαισθησίας $4\prime/2 \text{ mm}$ ενώ δεν διαθέτει σωληνωτή αλλά ηλεκτρονική αεροστάθμη με ευαισθησία $2''$. Αυτό σημαίνει ότι με βάση τη σχέση $\delta\alpha = i \tan u \sin a$, η μεταβολή των οριζόντιων γωνιών για $i=2''$ για $u=20^{\circ}$, $a=90^{\circ}$ θα είναι $0,73''$. Σε γραμμικό μέγεθος ενός σημείου, αυτό μεταφράζεται σε μεταβολή 0.21 mm για απόσταση 60 m. Η μεταβολή αυτή μειώνεται περαιτέρω λόγω της λειτουργίας του αντισταθμιστή. Επίσης διαθέτει πολλές δυνατότητες αυτοελέγχου.

Το τηλεσκόπιο του έχει αντικειμενικό φακό 42 mm και ικανότητα μεγέθυνσης 32x. Αυτό σημαίνει ότι, χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό τύπο $\delta^{\circ} = 37,5 / d = 37,5 / 4,2 = 8,929^{\circ}$, η διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου είναι $8,929^{\circ}$. Δηλαδή, σε αποστάσεις των 10 m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0,14 mm ενώ σε αποστάσεις 60 m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0,84 mm.

Μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω θύρας RS232 ή να αποθηκεύσει τα μετρούμενα στοιχεία σε κάρτα PCMCIA (4500-36000 σημεία). Έχει τη δυνατότητα να εκτελεί διάφορα προγράμματα (οπισθοτομίας, χάραξης, έκκεντρης στάσης, κ.α.) ή να δημιουργήσει ο χρήστης δικά του προγράμματα. Οι κοχλίες μικρομετακίνησης είναι ατέρμονοι και ρυθμίζονται από το χρήστη. Διαθέτει επίσης σερβομηχανισμούς για τη ρομποτική του λειτουργία (μπορεί να εκτελεί την αλλαγή από I θέση σε II θέση τηλεσκοπίου χωρίς τη βοήθεια του χρήστη).

Μπορεί να συνδεθεί με συσκευή ραδιο-ζεύξης (*radio link*) και να λειτουργήσει από ένα μόνο χρήστη που θα βρίσκεται στο στυλεό του στόχου. Επίσης το TDA 5005 διαθέτει δυνατότητα αυτόματης αναγνώριση στόχου (ATR). Με αυτή τη λειτουργία του και το αντίστοιχο κατάλληλο στόχο, το όργανο μπορεί να βρίσκει μόνο του την ακριβή θέση του στόχου εφ' όσον έχει οριστεί μια συγκεκριμένη περιοχή. Σε συνέχεια αυτής της δυνατότητας, μπορεί να ακολουθεί ένα κινούμενο στόχο για ορισμένο εύρος ταχύτητας και να παίρνει μετρήσεις σε κάθε παύση κίνησης (stop & go). Η λειτουργία του ATR βασίζεται στην χρήση μιας κάμερας CCD στο όργανο. Η συσκευή στέλνει μια ακτίνα laser και κατά την επιστροφή της ελέγχει κατά πόσο αποκλίνει από το κέντρο της κάμερας CCD, επιβάλλοντας τις ανάλογες διορθώσεις ή κινώντας τους σερβομηχανισμούς. Η ακρίβεια του ATR στην επιφάνεια του στόχου είναι 1-3 mm από το κέντρο του στόχου και εξαρτάται από την απόσταση. Η ακρίβεια τοποθέτησης του ATR είναι 1.5^{cc}, όσο δηλαδή η ακρίβεια του οργάνου που είναι και η ακρίβεια μετακίνησης των σερβομηχανισμών (αυτό ισχύει σε άριστες συνθήκες και για μήκος >200 m). Η ακρίβεια του ATR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές συνθήκες, την απόσταση του στόχου, το είδος και την κατάσταση του στόχου και από τη συχνότητα βαθμονόμησης του ATR.

Στη συνέχεια δίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού Leica TDA 5005 :

| | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Απόδοση οριζόντιων & κατακόρυφων | 0,1 ^{cc} |
| Ακρίβεια οριζόντιων & κατακόρυφων | 1,5 ^{cc} |
| Απόδοση αποστάσεων | 0,01 mm |
| Ακρίβεια αποστάσεων | 1 mm + 2 ppm |
| Μέγιστη απόσταση μέτρησης | 3500/5000 m (1 / 3 πρίσματα) |
| Εύρος διπλού αντισταθμιστή | 7 ^c |
| Ακρίβεια διπλού αντισταθμιστή | 1 ^c |
| Ευαισθησία κυκλικής αεροστάθμης | 4'/2 mm |
| Ευαισθησία ηλεκτρονικής αεροστάθμης | 2" |
| Διάμετρος αντικειμενικού φακού | 42 mm |
| Ικανότητα μεγέθυνσης | 32x |
| Μέγιστη ακρίβεια ATR | 1,5 ^{cc} |
| Εύρος μέτρησης με ATR | έως 1000 m |
| Διάρκεια λειτουργίας με 1 μπαταρία | 600 μετρήσεις γωνιών & αποστάσεων |

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά TDA 5005 [www.leica-geosystems.com]
Table 4.1: Technical specifications of TDA 5005 [www.leica-geosystems.com]

4.1.2. Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800

Το δεύτερο από τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία είναι ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 της εταιρείας Leica Geosystems. Αποτελεί μέρος της σειράς System 2000. Η σειρά System 2000 αποτελείται από όργανα που κατασκευάζει η εταιρεία Leica, όπως το TCA 1800 και τα TC2003/TCA2003, και είναι γεωδαιτικοί σταθμοί για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.



Σχήμα 4.2: Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.2: Total station Leica TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]

Ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων, είναι πλήρως ψηφιακό και έχει υψηλής ποιότητας οπτικά στοιχεία. Η απόδοση των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών γίνεται με 1° ενώ η ακρίβεια των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών είναι 3° . Η ελάχιστη ανάγνωση στη μέτρηση αποστάσεων είναι 0.1 mm ενώ η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων είναι $1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Η μέγιστη απόσταση μέτρησης με ένα πρίσμα, με ιδανικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι 2500 m. Επιπλέον, μπορούν να οριστούν ατμοσφαιρικές παράμετροι όπως θερμοκρασία, πίεση, διάθλαση, συντελεστής χαρτογραφικής παραμόρφωσης κ.α. Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μέτρησης με μικρότερη ακρίβεια προκειμένου να μειώνεται ο χρόνος μέτρησης κάθε απόστασης.

Διαθέτει κυκλική αεροστάθμη ευαισθησίας 4'2 mm, ενώ δεν διαθέτει σωληνωτή αλλά ηλεκτρονική αεροστάθμη με ευαισθησία 2". Το τηλεσκόπιο του έχει αντικειμενικό φακό 42 mm με ικανότητα μεγέθυνσης 30x.

Μπορεί να συνδεθεί με H/Y μέσω θύρας RS232 ή να αποθηκεύσει τα μετρούμενα στοιχεία σε κάρτα PCMCIA (4500-36000 σημεία). Έχει τη δυνατότητα να εκτελεί διάφορα προγράμματα (οπισθοτομίας, χάραξης, έκκεντρης στάσης, κ.α.), καθώς και να δημιουργήσει ο χρήστης δικά του προγράμματα. Οι κοχλίες μικρομετακίνησης είναι ατέρμονοι και ρυθμίζονται από το χρήστη για το ποιος θα είναι για τις κατακόρυφες ή οριζόντιες γωνίες. Επίσης διαθέτει σερβομηχανισμούς για τη ρομποτική του λειτουργία (εκτελεί την αλλαγή από I θέση σε II θέση τηλεσκοπίου χωρίς τη βοήθεια του χρήστη).

Επίσης ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 διαθέτει μηχανισμό αυτόματης αναγνώρισης στόχου (ATR). Με αυτή τη λειτουργία του και τον κατάλληλο στόχο, το όργανο μπορεί να βρίσκει μόνο του την ακριβή θέση του στόχου εφ' όσον έχει οριστεί μια συγκεκριμένη περιοχή διερεύνησης. Η ακρίβεια του μηχανισμού ATR στην επιφάνεια του στόχου είναι 1-3 mm από το κέντρο του στόχου και εξαρτάται από την απόσταση μέτρησης. Η ακρίβεια του ATR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές συνθήκες, την απόσταση του στόχου, το είδος και την κατάσταση του στόχου και από τη συχνότητα ελέγχου και βαθμονόμησης του ATR.

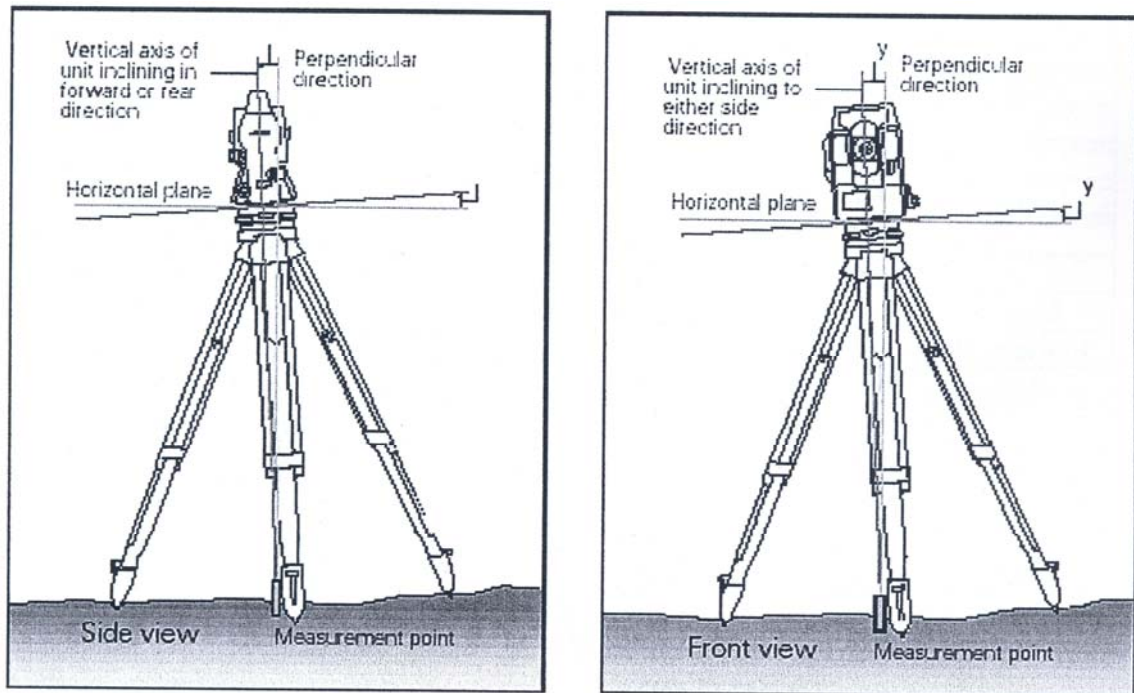
Στον πίνακα 4.2 δίνονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού TCA 1800 :

| | |
|--|-----------------------------------|
| Απόδοση οριζόντιων & κατακόρυφων Γωνιών | 1 ^{cc} |
| Ακρίβεια οριζόντιων & κατακόρυφων Γωνιών | 3 ^{cc} |
| Απόδοση αποστάσεων | 0,1 mm |
| Ακρίβεια αποστάσεων | 1 mm + 2 ppm |
| Μέγιστη απόσταση μέτρησης | 2500 m (1 πρίσμα) |
| Ευαισθησία κυκλικής αεροστάθμης | 4'2 mm |
| Ευαισθησία ηλεκτρονικής αεροστάθμης | 2" |
| Διάμετρος αντικειμενικού φακού | 42 mm |
| Ικανότητα μεγέθυνσης | 30x |
| Μέγιστη ακρίβεια ATR | 1 mm μέχρι 200 m |
| Εύρος μέτρησης με ATR | έως 1000 m |
| Διάρκεια λειτουργίας με 1 μπαταρία | 400 μετρήσεις γωνιών & αποστάσεων |

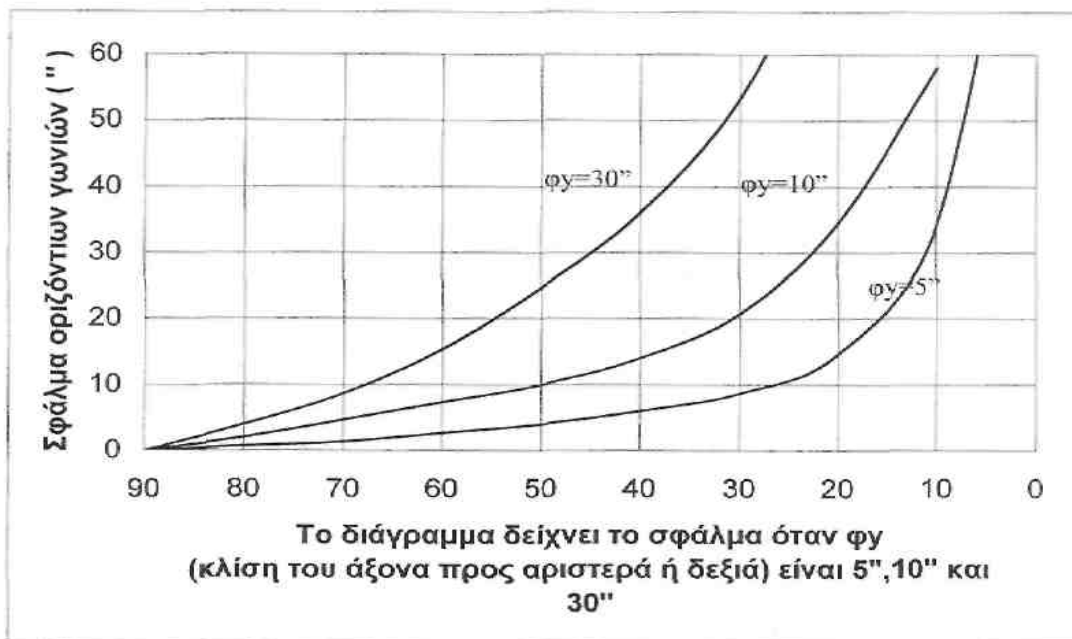
Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]
Table 4.2: Technical specifications of TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]

4.2. Διαδικασίες αυτοελέγχου των γεωδαιτικών σταθμών

Στην προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου τέσσερα επισημάνθηκε η μεγάλη σημασία που έχει ο συχνός έλεγχος των οργάνων. Για παράδειγμα, στο επόμενο γράφημα φαίνεται η επίδραση του σφάλματος της κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα στις οριζόντιες γωνίες.



Σχήμα 4.3: Απόκλιση φ, γ του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' από την κατακόρυφο [Γκουντινάκος Γ, 2004]
 Figure 4.3: φ, γ deviation between ΠΠ' axis and vertical axis [Goudinakos G, 2004]



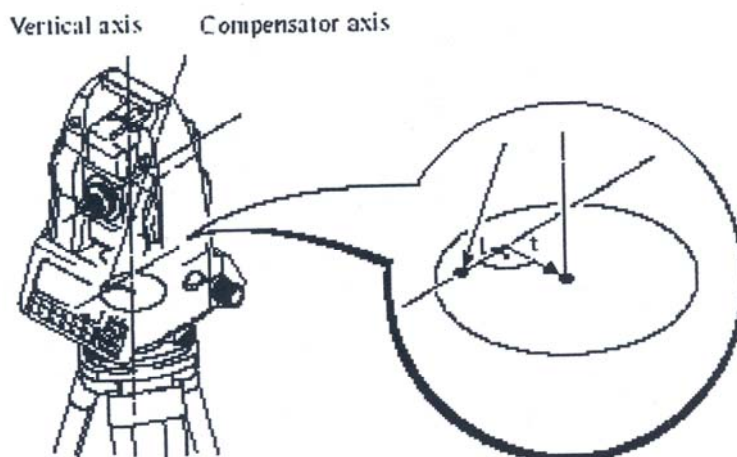
Σχήμα 4.4: Επίδραση απόκλισης φ, γ του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' από την κατακόρυφο [Γκουντινάκος Γ, 2004]

Figure 4.4: Impact of φ, γ deviation between ΠΠ' axis and vertical axis [Goudinakos G, 2004]

Με βάση το σκεπτικό αυτό, η κατασκευάστρια εταιρεία παρέχει τη δυνατότητα αυτοελέγχου των γεωδαιτικών σταθμών. Μετρώντας αντίστοιχες αποκλίσεις, έπειτα επιβάλλει διορθώσεις στις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες. Αυτές οι δυνατότητες δεν απαλλάσσουν το όργανο όμως από τις βαθμονομήσεις στις οποίες πρέπει να υποβάλλεται. Από τη στιγμή που το όργανο βρίσκεται σε σταθερή θέση, έχει οριζοντιωθεί με επιμέλεια και υπάρχει προστασία από τον ήλιο για αποφυγή διαφορικών μεταβολών, μπορούν να γίνουν οι έλεγχοι όπως περιγράφεται στη συνέχεια :

4.2.1. Έλεγχος κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ'

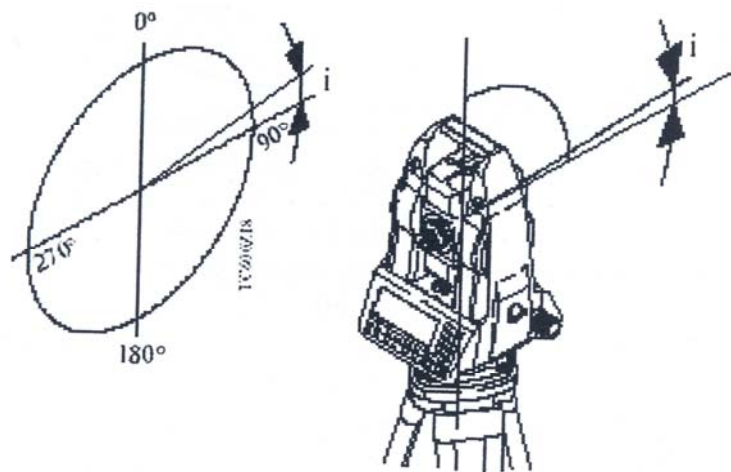
Χρησιμοποιώντας τον αντισταθμιστή υπολογίζονται οι αποκλίσεις (l, t) του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' από το κανονικό σημείο της φυσαλίδας οριζοντίωσης. Στη συνέχεια οι αποκλίσεις αυτές εισάγονται ως διορθώσεις στις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες.



Σχήμα 4.5: Έλεγχος κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 4.5: Vertical control procedure of ΠΠ' axis [Goudinacos G, 2004]

4.2.2. Έλεγχος της μηδενικής ανάγνωσης του κατακόρυφου κύκλου

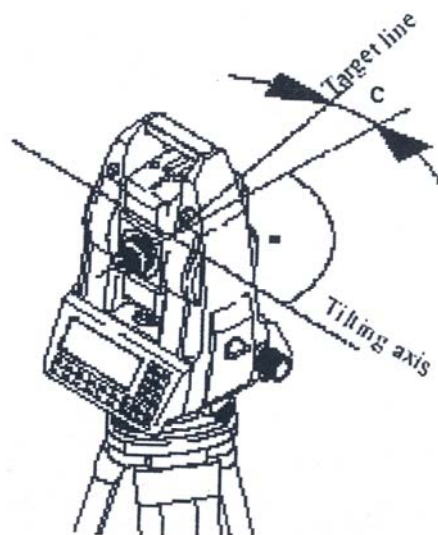
Ελέγχεται εάν η μηδενική ένδειξη του κατακόρυφου δίσκου συμπίπτει με το πρωτεύοντα άξονα του οργάνου. Υπολογίζεται η αντίστοιχη απόκλιση (i) και εισάγεται σαν διόρθωση στις κατακόρυφες γωνίες.



Σχήμα 4.6: Έλεγχος της μηδενικής ανάγνωσης του κατακόρυφου κύκλου [Γκουντινάκος Γ, 2004]
 Figure 4.6: Zero-readout control of vertical angle reading circle [Goudinakos G, 2004]

4.2.3. Έλεγχος καθετότητας της σκοπευτικής γραμμής ΣΣ' ως προς τον δευτερεύοντα άξονα ΔΔ'

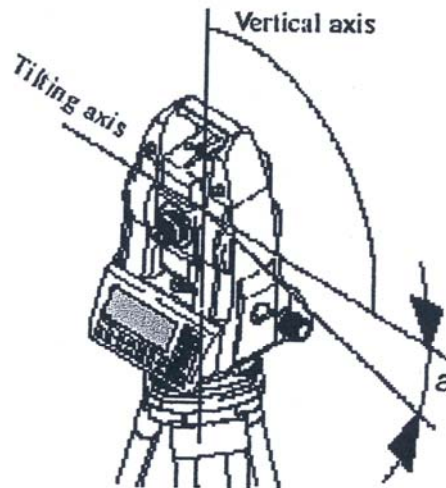
Ελέγχεται κατά πόσο η γραμμή σκόπευσης είναι κάθετη ως προς τον άξονα περιστροφής του τηλεσκοπίου (άξονας ΔΔ'). Υπολογίζεται η αντίστοιχη απόκλιση (c) και εισάγεται ως διόρθωση στις οριζόντιες γωνίες. Το σφάλμα στη μέτρηση των κατακόρυφων γωνιών είναι αμελητέο και αγνοείται.



Σχήμα 4.7: Έλεγχος καθετότητας της σκοπευτικής γραμμής ΣΣ' ως προς τον δευτερεύοντα άξονα ΔΔ' [Γκουντινάκος Γ, 2004]
 Figure 4.7: Vertical control of target line ΣΣ' and tilting axis ΔΔ' [Goudinakos G, 2004]

4.2.4. Έλεγχος καθετότητας του δευτερεύοντος άξονα ΔΔ' ως προς τον πρωτεύοντα άξονα ΠΠ'.

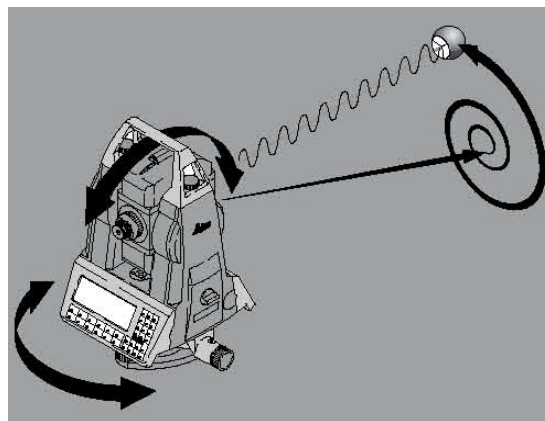
Ελέγχεται αν ο άξονας περιστροφής του τηλεσκοπίου (άξονας ΔΔ') είναι κάθετος ως προς τον άξονα περιστροφής του οργάνου (άξονας ΠΠ'). Υπολογίζεται η αντίστοιχη απόκλιση (a) και εισάγεται σαν διόρθωση στις οριζόντιες γωνίες.



Σχήμα 4.8: Έλεγχος καθετότητας του δευτερεύοντος άξονα ΔΔ' ως προς τον πρωτεύοντα άξονα ΠΠ' [Γκουντινάκος Γ, 2004]
Figure 4.8: Vertical control of tilting axis ΔΔ' and vertical axis ΠΠ' [Goudinakos G, 2004]

4.2.5. Έλεγχος ATR

Ελέγχεται κατά πόσο το κέντρο της σκοπευτικής γραμμής συμπίπτει με το κέντρο της κάμερας CCD, υπολογίζονται οι αποκλίσεις σε μορφή γωνιακών μεγεθών, κατακόρυφων και οριζόντιων και εισάγονται ως διορθώσεις στη διαδικασία του ATR.



Σχήμα 4.9: Λειτουργία ATR για εύρεση του κέντρου του στόχου [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.9: Automatic Target Recognition function (ATR) [www.leica-geosystems.com]

Οι έλεγχοι που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2 πρέπει οπωσδήποτε να γίνονται πριν από κάθε εργασία ακριβείας, πριν τη πρώτη χρήση, μετά από μεγάλες μεταφορές ή περιόδους εργασίας και μετά από μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, καλό είναι οι δύο πρώτοι έλεγχοι να γίνονται πριν από κάθε εργασία, ο τρίτος και ο τέταρτος έλεγχος να γίνονται μια φορά το μήνα, ο έλεγχος ATR να γίνεται μια φορά το μήνα ή όποτε αλλάζεται το πρίσμα και μια βαθμονόμηση του οργάνου να εκτελείται από το κατασκευαστή μια φορά το χρόνο.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να γίνονται οι έλεγχοι αλλά να μην επιβάλλονται οι διορθώσεις στις γωνίες ή ο αντισταθμιστής να παραμένει τελείως κλειστός (χρήση του οργάνου σε κεκλιμένη βάση). Πάντως η δυνατότητα υπολογισμού και εισαγωγής διορθώσεων έχει κάποια όρια. Όταν αυτά ξεπερνιούνται συστήνεται, αντί διόρθωσης να γίνεται έλεγχος από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Γενικά οι έλεγχοι απαιτούν μεγάλες αποστάσεις (~100 m) ή μεγάλες κατακόρυφες γωνίες (60°, 70°) που είναι να δύσκολο να υλοποιηθούν εργαστηριακά. Πολλές φορές εκτελούνται σε μικρότερες αποστάσεις. Για αυτό μερικές σημαντικές μετρήσεις καλό είναι να γίνονται σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου, αυξάνοντας έτσι και την ακρίβεια των παρατηρήσεων.

4.3. Παρελκόμενα Γεωδαιτικών Σταθμών Leica TDA 5005 και TCA 1800

4.3.1. Στόχοι

Προκειμένου να επιτευχθούν οι ονομαστικές ακρίβειες των μετρήσεων, εκτός από ιδανικές συνθήκες είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται και ειδικοί στόχοι, οι οποίοι συνδυάζονται με το γεωδαιτικό σταθμό. Για τους γεωδαιτικούς σταθμούς TDA 5005 και TCA 1800, εκτός από διάφορα άλλα παρελκόμενα, υπάρχουν τρία βασικά είδη στόχων:

- κλασικό κυκλικό πρίσμα και πρίσμα 360°
- ανακλαστικοί επίπεδοι στόχοι (retro-reflective targets) με μαγνητικά στηρίγματα. Μόνο το συγκεκριμένο είδος στόχων χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα διπλωματική.
- ο στόχος CCR που είναι μικρό σφαιρικό μεταλλικό πρίσμα, του οποίου ένας δακτύλιος είναι κομμένος και έχει στο εσωτερικό του ένα τρισσορθογώνιο κάτοπτρο



Σχήμα 4.10: Στόχοι που χρησιμοποιούνται με τα Leica TDA5005 και TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]

Figure 4.10: Targets used with Leica TDA 5005 and TCA 1800 [www.leica-geosystems.com]

Για όλους τους στόχους είναι γνωστή η γεωμετρία τους έτσι ώστε να γίνονται οι όποιες διορθώσεις για να αναφέρεται το κάθε σημείο στη πραγματική του θέση και όχι σε αυτήν που μετράται. Ειδικά ο στόχος CCR είναι ιδιαίτερα ακριβής στην υλοποίηση του σημείου, με πολύ καλά μετρημένες διαστάσεις και μεγάλη ευχρηστία στην μέτρηση επιφανειών. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, μεγάλο ρόλο στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αλλά και στη ταχύτητα εκτέλεσης μιας εργασίας, έχει και η γωνία με την οποία στοχεύει τον στόχο ο γεωδαιτικός σταθμός. Δηλαδή, σημαντικό ρόλο παίζει και το εύρος της γωνίας μέσα στα όρια της οποίας μπορεί ένας γεωδαιτικός σταθμός να στοχεύσει επιτυχώς κάθε στόχο. Στον πίνακα 4.3 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στόχων :

| Στόχος | Σταθερά συστήματος «όργανο-στόχος» | Εύρος γωνίας μέτρησης | Ακρίβεια υλοποίησης σημείου | Απόσταση που επιτυγχάνει την ακρίβεια |
|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| CCR 1,5" | 34,9 mm | H _z =10° V±20° | 0,2 mm | <600 m |
| Αυτοκολ. ταινίες 20x20 mm | 34,4 mm | ±42° | 0,5 mm | <50 m |
| Αυτοκολ. ταινίες 40x40 mm | 34,4 mm | ±42° | 0,5 mm | 20-120 m |
| Αυτοκολ. ταινίες 60x60 mm | 34,4 mm | ±42° | 0,5 mm | 60-180 m |
| Πρίσμα GPH1P | 0 mm | ±30° | 0,3 mm | <2500 m |
| Μίνι πρίσμα GMP101 | 17,5 mm | ±30° | 0,5 mm | <1000 m |
| Πρίσμα 360° | 23,1 mm | H _z 360° V±27° | 2 mm | <1300 m |
| Μίνι πρίσμα 360° | 30,0 mm | H _z 360° V±27° | 1,5 mm | <500 m |

Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά στόχων [Γκουντινάκος Γ, 2004]

Table 4.3: Target specifications [Goudinakos G, 2004]

Η ακρίβεια της μέτρησης αποστάσεων χρειάζεται προσοχή όταν χρησιμοποιούνται οι αυτοκόλλητοι στόχοι. Λόγω του επίπεδου σχήματος τους δεν ισχύει απόλυτα η επιστροφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως στα τρισσορθογώνια πρίσματα. Όταν το επίπεδο του αυτοκόλλητου στόχου παρουσιάζει γωνία σε σχέση με την ευθεία όργανο-στόχος, η επιστροφή του σήματος μειώνεται. Ο κατασκευαστής δηλώνει ότι όταν η γωνία αυτή είναι 45° υπάρχει απόκλιση στη μέτρηση αποστάσεων μέχρι και 3 mm.

4.3.2. Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας

Πρόκειται για ειδικούς τρίποδες με μεγαλύτερο βάρος και μεγαλύτερη σταθερότητα από τους κοινούς τρίποδες, έτσι ώστε να μην μπορούν να μετακινηθούν εύκολα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Διαθέτουν ειδικό μηχανισμό για τη ρύθμιση του ύψους του οργάνου.



Σχήμα 4.11: Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.11: Industrial Geodesy tripod [www.leica-geosystems.com]

4.3.3. Hidden point bar

Πρόκειται για ειδική ράβδο με μαγνητική βάση και στο μήκος της ανά συγκεκριμένα διαστήματα (συνήθως ανά 10 cm) φέρει ανακλαστικούς στόχους. Έτσι μέσω ειδικού λογισμικού αρκεί τα δύο όργανα να σκοπεύσουν δύο από τους πέντε στόχους της ράβδου ώστε να υπολογιστεί το «κρυμμένο» σημείο που ζητείται.



Σχήμα 4.12: Ράβδος εντοπισμού κρυμμένου σημείου [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.12: Hidden point bar [www.leica-geosystems.com]

4.3.4. Προσοφθάλμιο με laser

Πρόκειται για ειδική διάταξη που τοποθετείται στο προσοφθάλμιο του γεωδαιτικού σταθμού. Μέσω της διάταξης αυτής υλοποιείται ο σκοπευτικός άξονας του οργάνου με μια δέσμη laser. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα στους γεωδαιτικούς σταθμούς να σκοπεύουν

ταυτόχρονα το ίδιο σημείο με μεγάλη ακρίβεια, καθώς το όργανο με το προσοφθάλμιο laser υλοποιεί το σημείο πάνω στην επιφάνεια που μετρούνταν και το άλλο όργανο σκοπεύει απευθείας τη σημειακή κουκίδα που δημιουργείται από τη δέσμη laser.



Σχήμα 4.13: Προσοφθάλμιο με laser [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.13: Laser Eyepiece [www.leica-geosystems.com]

4.3.5. Ράβδος κλίμακας

Πρόκειται για ειδική ράβδο με γνωστό μήκος με πολύ μεγάλη ακρίβεια, που χρησιμοποιείται προκειμένου να δοθεί κλίμακα στο αυθαίρετο γεωδαιτικό δίκτυο που δημιουργείται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Η ράβδος αυτή τοποθετείται σε κοινό τοπογραφικό τρίποδα.



Σχήμα 4.14: Ράβδος κλίμακας [www.leica-geosystems.com]
Figure 4.14: Scale bar [www.leica-geosystems.com]

Τέλος, αναφέρεται η χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή εφοδιασμένου με το λογισμικό Axyz και με τις κατάλληλες θύρες επικοινωνίας στις οποίες συνδέονται οι δύο γεωδαιτικοί σταθμοί, καθώς και τα απαραίτητα καλώδια για να επιτευχθεί η συνδεσιμότητα αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ AXIS XYZ (LEICA_GEOSYSTEMS)

5.1. Γενικά

Το λογισμικό Axyz αποτελεί εξειδικευμένο λογισμικό βιομηχανικής γεωδαισίας που συνεργάζεται με γεωδαιτικούς σταθμούς της εταιρείας Leica Geosystems. Στην υπόψη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε για να διεξαχθεί η μέθοδος της πολλαπλής αλλά και της απλής εμπροσθοτομίας. Το λογισμικό αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον Windows. Οι δυνατότητες που προσφέρει είναι πολλές τόσο σε «on-line» όσο και σε «off-line» επεξεργασία. Κατά την πρώτη περίπτωση το πρόγραμμα μπορεί να υποστηρίξει από 1 έως 16 γεωδαιτικούς σταθμούς ή από 1 έως 9 Laser trackers ταυτόχρονα. Μέσα στο πλήθος εργασιών που μπορεί να εκτελέσει το συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο, ενδεικτικά αναφέρονται οι πιο σημαντικές:

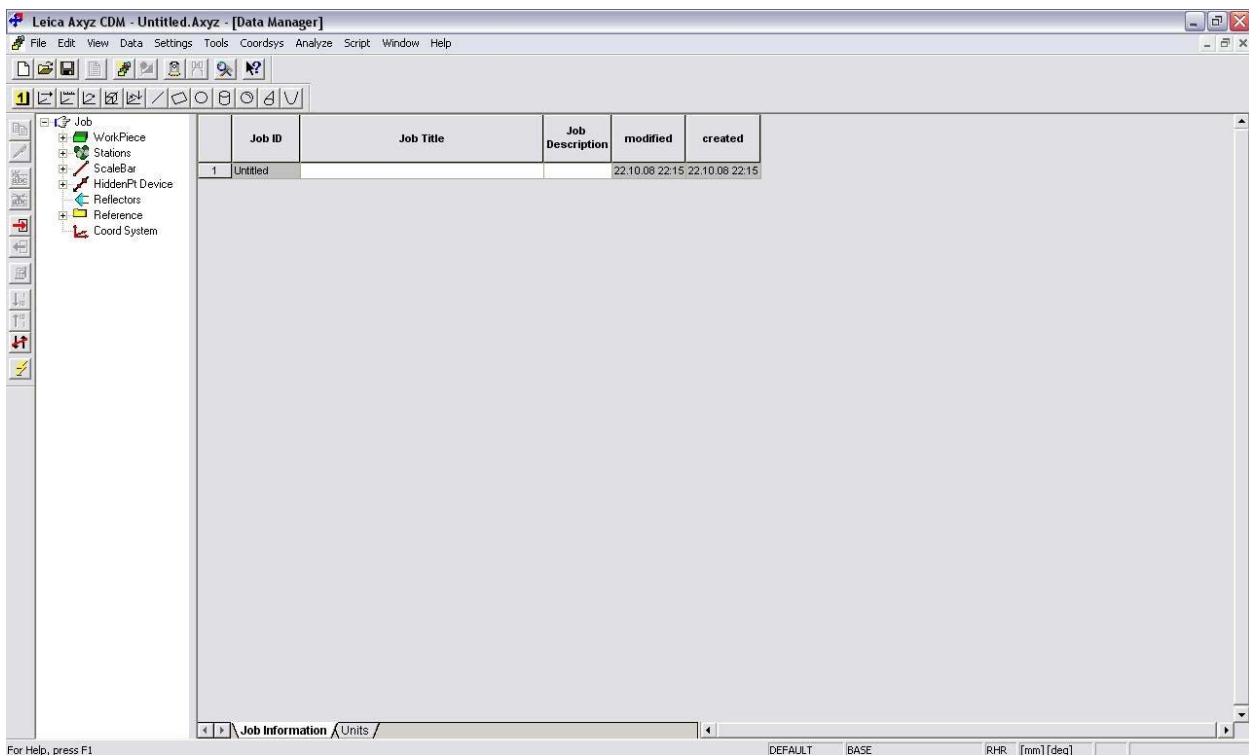
- ο ορισμός και προσανατολισμός των συστημάτων αναφοράς (προσανατολισμός, κλίμακα, μετάθεση κτλ)
- η εκτέλεση γεωμετρικών υπολογισμών (τομή μαθηματικών στοιχείων, προσδιορισμός συντεταγμένων σημείων με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, υπολογισμός γωνιών και μηκών κ.α.)
- η προσαρμογή βέλτιστου γεωμετρικού σχήματος στα δεδομένα μέσω υπολογισμών ελαχίστων τετραγώνων (γραμμή, επίπεδο, κύκλος, σφαίρα, κύλινδρος, κώνος, παραβολοειδές).

5.2. Δομή λογισμικού

Αναφορικά με τη δομή του λογισμικού Axyz v1.4.3, αποτελείται από ένα βασικό υποπρόγραμμα και μία σειρά δευτερευόντων υποπρογραμμάτων. Το πρώτο ονομάζεται Core Data Module (CDM). Εδώ γίνονται οι γενικές ρυθμίσεις, οι μαθηματικοί υπολογισμοί και οι διάφορες εργασίες (γεωμετρικές προσαρμογές, διαχειρίσεις των

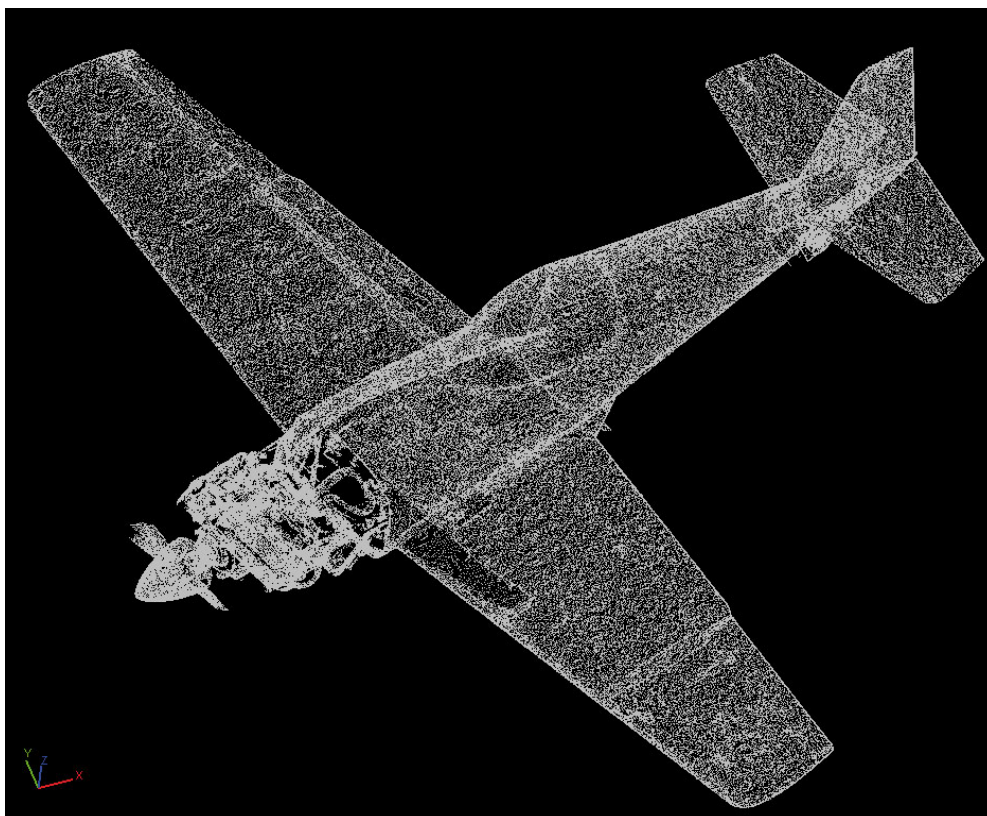
συστημάτων αναφοράς, γεωμετρικοί υπολογισμοί), ενώ εκτελεί και τα «scripts» (αυτοματοποίηση και διαχωρισμός συγκεκριμένων σταθερών διαδικασιών σε βήματα).

Το κυριότερο από τα υποπρογράμματα είναι η επιλογή «Data Manager» (DM) που βρίσκεται σε άμεση συνεργασία με το CDM. Αυτό είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της βάσης δεδομένων. Μέσω αυτού, εισάγονται και εξάγονται δεδομένα, υπολογισμένα στοιχεία, δείκτες ποιότητας των στοιχείων και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία αφορά όλα τα προηγούμενα. Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα αφορούν κατά κύριο λόγο την επικοινωνία και απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (on-line σύνδεση) ενός γεωδαιτικού σταθμού, πολλών θεοδολίχων, πολλών θεοδολίχων και γεωδαιτικών σταθμών και πολλών Laser trackers.



Σχήμα 5.1: Το υποπρόγραμμα Data Manager του λογισμικού Axyz
Figure 5.1: Data Manager module of the Axyz software

Το υποπρόγραμμα του προσανατολισμού (Orientation Module) δεν αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι του λογισμικού, αλλά συνυπάρχει στα υποπρογράμματα. Παρόλα αυτά είναι αυτόνομο και ασχολείται μόνο με το προσανατολισμό των οργάνων. Επίσης, υπάρχουν υποπρογράμματα για την αμφίδρομη επικοινωνία οργάνων-λογισμικού, για τη γραφική αναπαράσταση των δεδομένων σε μορφή CAD, για τη δημιουργία εντολών του χρήστη, για την ασύρματη ζεύξη οργάνων-λογισμικού και για τη δημιουργία έτοιμων αναφορών των εργασιών.



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα απεικόνισης μετρημένων σημείων σε μορφή CAD [www.leica-geosystems.com]
Figure 5.2: Example of measured points in CAD form [www.leica-geosystems.com]

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει για τη μέθοδο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Axyz v1.4.3 κατά τη διαδικασία συνόρθωσης με τα ελάχιστα τετράγωνα, καθώς και για την ποιοτική πληροφορία που παρέχεται. Όταν ζητείται ο υπολογισμός κάποιου γεωμετρικού στοιχείου ή προσδιορισμός ενός σχήματος με την προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας, το υποπρόγραμμα CDM συγκεντρώνει τα αρχικά δεδομένα και αν είναι περισσότερα από τα απαραίτητα, τότε εκτελεί απευθείας την υπολογιστική διαδικασία με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (MET). Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό ενός κύκλου απαιτούνται τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων της περιφέρειάς του. Σε περίπτωση που υπάρχει επιπλέον πληροφορία (π.χ. περισσότερα σημεία ή η μετρημένη ακτίνα κτλ) το πρόγραμμα εκτελεί τη διαδικασία της συνόρθωσης και υπολογίζει τις αποκλίσεις από τον προσαρμοσμένο κύκλο.

Κατά την εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων στην επίλυση ενός γεωμετρικού προβλήματος προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής χρησιμοποίησης ή όχι βαρών. Ουσιαστική σημασία έχει η διαδικασία της ανισοβαρούς επίλυσης η οποία και επιλέγεται στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι επιλύσεις με ισοβαρείς εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν οι ακρίβειες των μετρημένων μεγεθών δεν είναι γνωστές ή είναι

περίπου ίσες ή για σύγκριση της λύσης με κάποιο άλλο πρόγραμμα. Στις επιλύσεις αυτές χρησιμοποιείται ο δείκτης μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) που δίνεται από τη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{r}} \quad (5.1)$$

οπού v_i τα υπόλοιπα των συντεταγμένων των σημείων (pointing errors), N : ο αριθμός των μετρήσεων, r : ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος.

Το RMS (Root Mean Square) αποτελεί το συνολικό μέσο όρο των υπολοίπων στο χώρο που εκφράζεται ανά άξονα, στο επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Οι συνιστώσες αυτές είναι τα RMS_x , RMS_y , RMS_z . Το total RMS ορίζεται ως εξής:

$$RMS_{total} = \sqrt{RMS_x^2 + RMS_y^2 + RMS_z^2} \quad (5.2)$$

5.2.1. Το υποπρόγραμμα προσανατολισμού (Orientation Module)

Σε περίπτωση χρήσης δύο ή περισσότερων θεοδόλιχων, αυτά μπορούν να προσανατολιστούν μέσω διαδικασιών ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος Hansen και της αυτοσκόπευσης (είτε με ακριβή σκόπευση είτε με χονδρική σκόπευση), μέσω οριζόντιας πολλαπλής οπισθοτομίας σε γνωστά σημεία ενώ στη περίπτωση τρίτου ή και πλέον θεοδόλιχου, αυτό μπορεί να ενταχθεί είτε με σκόπευση σε προηγούμενη στάση και ένα κοινό σημείο (ευθυγράμμιση οπτικών αξόνων), είτε μετρώντας από τη νέα στάση τη γωνία προς τις δυο άλλες στάσεις.

Στη περίπτωση χρήσης των γεωδαιτικών σταθμών η σύνδεση των στάσεων σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς μπορεί να γίνει μέσω τριών ή περισσότερων κοινών σημείων. Τα κοινά αυτά σημεία μπορεί να προϋπάρχουν ή μπορεί να έχουν μετρηθεί εκείνη τη στιγμή. Με τη μέτρηση προϋπαρχόντων σημείων αυτόματα κάθε στάση εντάσσεται στο σύστημα των μετρημένων σημείων.

Κάθε ανεξάρτητος σταθμός προτού προσανατολιστεί, εκτελεί μετρήσεις σε ένα τοπικό ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς με αρχή το κέντρο του οργάνου και τυχαίο προσανατολισμό. Δεν είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα ο προσανατολισμός και μετά να

συνεχιστούν οι μετρήσεις προς τα υπόλοιπα σημεία. Ωστόσο, για να υπολογιστούν συντεταγμένες σημείων πρέπει πρώτα να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός του προσανατολισμού και των θέσεων του δικτύου και έπειτα να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των απλών σημείων.

Τις αντίστοιχες μετρήσεις τις παίρνει το υποπρόγραμμα του προσανατολισμού και βγάζει αποτελέσματα χρησιμοποιώντας συνόρθωση κατά δέσμες. Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο συνόρθωσης τα αποτελέσματα που βγαίνουν είναι οι θέσεις των στάσεων καθώς και οι συντεταγμένες των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό σε τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς. Δηλαδή, οι άγνωστοι δεν αφορούν μόνο τις στάσεις αλλά και τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για το προσανατολισμό. Στο *Axyz* οι άγνωστοι παράμετροι κάθε στάσης είναι έξι. Οι 3 συντεταγμένες *X, Y, Z* αλλά και οι 3 γωνίες προσανατολισμού ω, ϕ, κ των αξόνων του τοπικού συστήματος αναφοράς σε σχέση με το βασικό σύστημα αναφοράς (που έχει αρχή τη πρώτη στάση). Εξηγώντας περιγραφικά τη συνόρθωση κατά δέσμες, θα λέγαμε ότι παίρνονται οι μετρημένες δέσμες οπτικών ακτίνων και υπόκεινται σε μετατοπίσεις και στροφές στο χώρο ώστε οι ομόλογες ακτίνες να τέμνονται κατά το δυνατόν καλύτερα στα σημεία σύνδεσης και σε περίπτωση σημείων με γνωστές συντεταγμένες να διέρχονται ακριβώς από αυτά. Μέσω αυτών των μεταβολών προκύπτουν τελικά οι συντεταγμένες και οι στροφές των στάσεων και των σημείων (μόνο συντεταγμένες).

Η μέθοδος πλεονεκτεί δεδομένου ότι στηρίζεται σε μια καθαρά αναλυτική διαδικασία, η οποία είναι ακριβής και δίνει τη δυνατότητα της ευκολότερης εξάλειψης συστηματικών σφαλμάτων. Ωστόσο το μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι δημιουργούμενες πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις και ιδιαίτερα οι δύσκολες τεχνικές προγραμματισμού που απαιτούνται καθώς δημιουργούνται συστήματα προς επίλυση με πολύ μεγάλους πίνακες στοιχείων.

Αφού προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των στάσεων, το «Orientation Module» παίρνει τις μετρήσεις προς κάθε σημείο και εφαρμόζει τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για να προσδιορίσει την καλύτερη θέση του σημείου. Σε περίπτωση που προστεθεί κάποια επιπλέον μέτρηση για ένα γνωστό σημείο, αυτό επαναπροσδιορίζεται εφαρμόζοντας ελάχιστα τετράγωνα μέσω της λειτουργίας «single point solution».

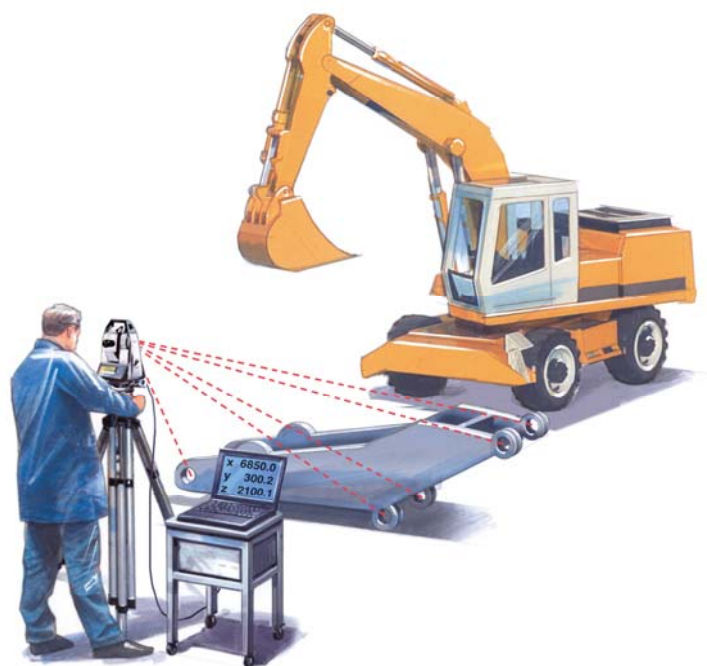
5.3. Παραδείγματα εφαρμογής

Παραδείγματα εφαρμογής της χρήσης του πακέτου Leica Axyz σε συνεργασία γεωδαιτικούς σταθμούς ή με Laser trackers εντοπίζονται στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη διαστασιολόγηση ή στον έλεγχο μερών κατασκευών.

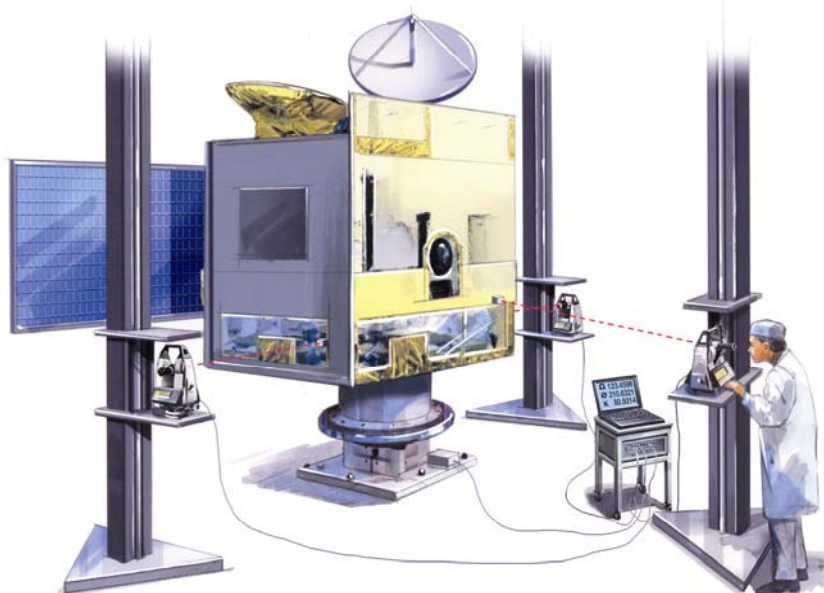
Σχετικά με τη χρησιμότητα του λογισμικού αναφέρεται ενδεικτικά το στέλεχος της εταιρείας Boeing/McDonnell Douglas του τομέα Space and Defense Division στο διαφημιστικό φυλλάδιο του λογισμικού Axyz **“Flexibility at its best in assembly and inspect”** : « Ο συνδυασμός της χρήσης του λογισμικού αυτού με τα Laser tracker ή τους γεωδαιτικούς σταθμούς της εταιρείας Leica_Geosystems στους τομείς της συναρμολόγησης, της επιθεώρησης καθώς και σε άλλους τομείς της παραγωγής, έχει δώσει τη δυνατότητα να μειωθεί κατά πολύ ο κύκλος των εργασιών, το κόστος και έχει βελτιστοποιήσει την απόδοσή τους, καθιστώντας ικανούς αυτούς που εργάζονται στον υπόψη τομέα να αναλάβουν σχεδόν οποιαδήποτε εργασία ». [Πηγή www.leica-geosystems.com]



Σχήμα 5.3: Έλεγχος σκελετού αυτοκινήτου της BMW με χρήση Laser tracker συνδεδεμένου με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com]
Figure 5.3: Bmw chassis control using Laser tracker on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]



Σχήμα 5.4: Έλεγχος τμημάτων μηχανημάτων με χρήση γεωδαιτικού σταθμού συνδεδεμένου με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com]
Figure 5.4: Machine parts control using Total station on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]



Σχήμα 5.5: Έλεγχος ρύθμισης δορυφόρου της NASA με χρήση δικτύου γεωδαιτικών σταθμών συνδεδεμένων με Η/Υ εφοδιασμένο με το Axyz [www.leica-geosystems.com]
Figure 5.5: NASA satellite structure control using Total stations network on-line with Axyz-equipped PC [www.leica-geosystems.com]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

6.1. Περιγραφή εξοπλισμού

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έγιναν προπαρασκευαστικά πειραματικές μετρήσεις για την εξοικείωση με τα όργανα και την σύνδεση σε πραγματικό χρόνο με τον υπολογιστή, καθώς και με το λογισμικό πακέτο Axyz και το υποπρόγραμμά του «Orientation Manager», ώστε στη συνέχεια να ληφθούν οι οριστικές μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε μικρότερο χρόνο.

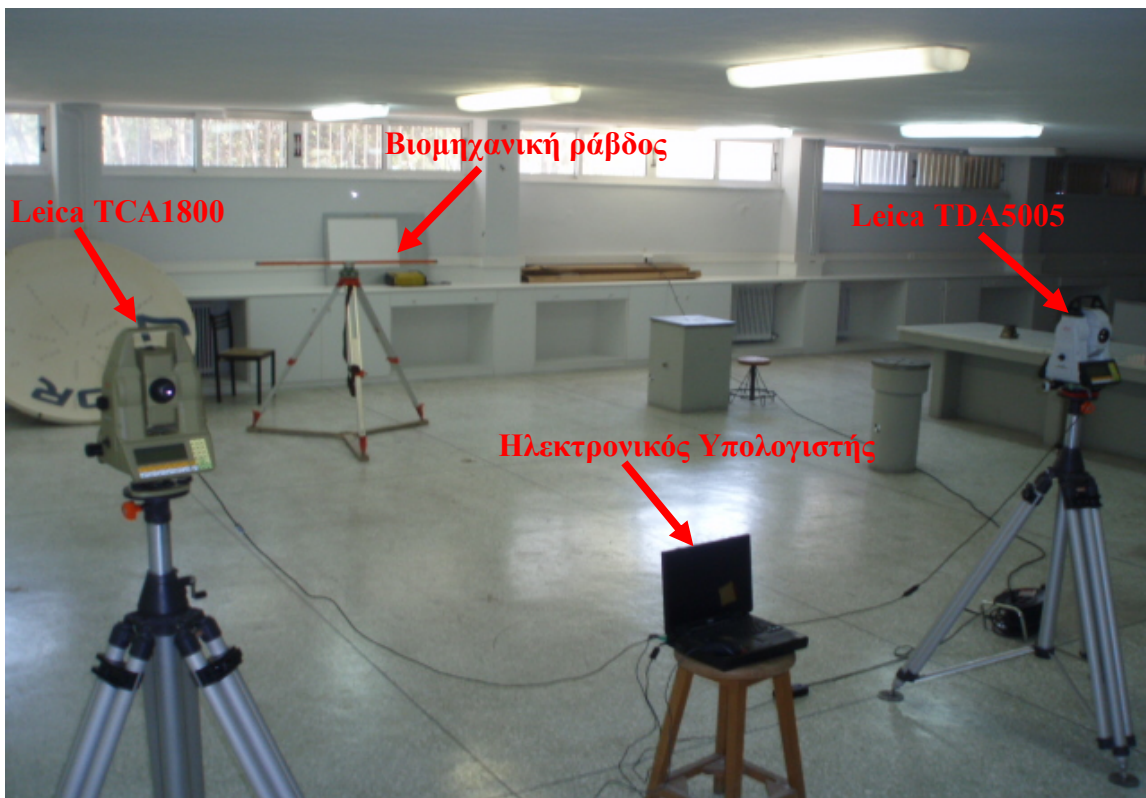
Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός ως εξής :

- Ένας γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005
- Ένας γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800
- Δύο τρίποδες βιομηχανικής γεωδαισίας
- Μία βιομηχανική ράβδος κλίμακας
- Ένας απλός τοπογραφικός τρίποδας ο οποίος τοποθετήθηκε πάνω σε ειδική βάση (αράχνη)
- Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό (Leica Axyz v1.4.3)
- Τα κατάλληλα καλώδια ώστε να συνδεθεί ο υπολογιστής με τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς
- Μία διάταξη προσοφθάλμιου εφοδιασμένο με laser και ροοστάτη για τη βέλτιστη αξιοποίηση της δέσμης laser που προσαρμόστηκε στο ένα από τα δύο όργανα
- Ειδική μαύρη βάση με προσαρτημένο σε αυτή κωνικό στόχο
- Μετροταινία

6.2. Διαμόρφωση πειραματικής διάταξης και διεξαγωγή μετρήσεων

Αρχικά τοποθετήθηκαν τα δύο όργανα πάνω στους ειδικούς τρίποδες βιομηχανικής γεωδαισίας, οι οποίοι είναι πιο βαριοί και με σταθερό άνοιγμα των ποδιών τους, ώστε να παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Μεταξύ τους τοποθετήθηκε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και με τα κατάλληλα καλώδια συνδέθηκε με τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς. Απέναντί τους τοποθετήθηκε η βιομηχανική ράβδος κλίμακας πάνω σε έναν μεταλλικό τρίποδα που στηρίζονταν σε ειδική βάση (αράχνη) ώστε να μην μετακινείται.

Ολοκληρώνοντας τα παραπάνω βήματα δημιουργήθηκε ένα σύστημα οργάνων – βιομηχανικής ράβδου κλίμακας – ηλεκτρονικού υπολογιστή έτσι ώστε μέσα από τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν να δοθούν συντεταγμένες στις στάσεις που τοποθετήθηκαν τα δύο όργανα. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1 :



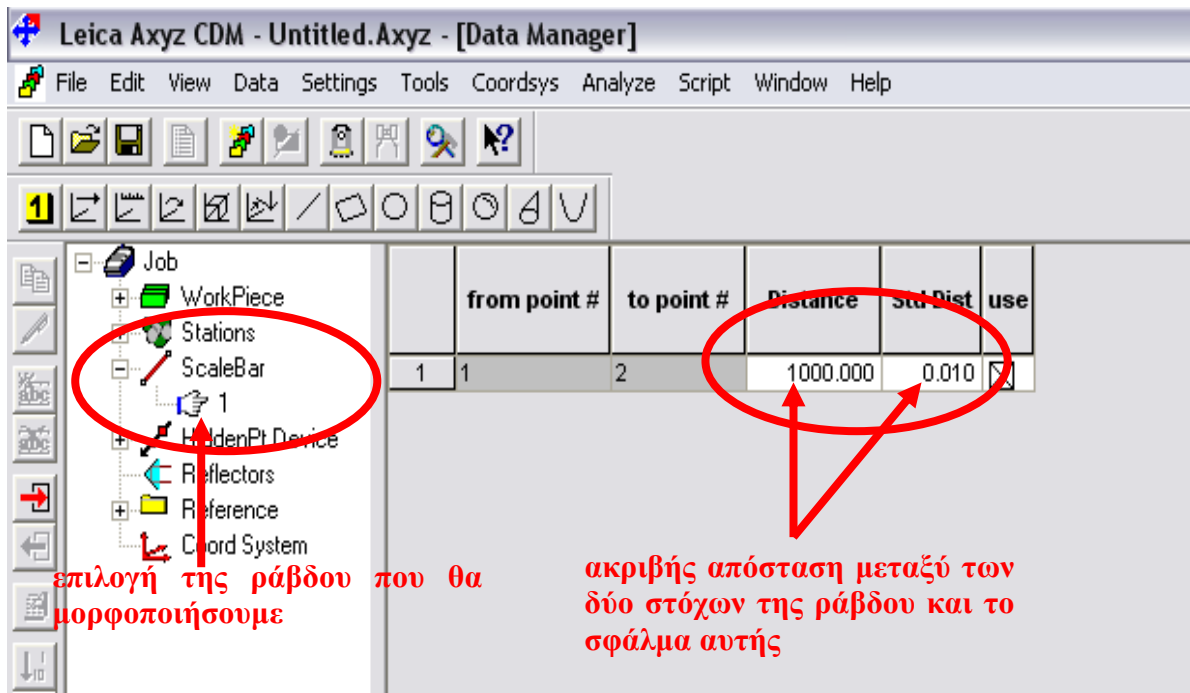
Σχήμα 6.1: Διάταξη γεωδαιτικών σταθμών, ηλεκτρονικού υπολογιστή και βιομηχανικής ράβδου
Figure 6.1: Total stations, computer and scale bar setup

Αφού συνδέθηκαν τα όργανα με τον Η/Υ έγινε εκκίνηση του προγράμματος Leica Axyz και μέσα από αυτό της εφαρμογής «Theodolite Manager» που επιτρέπει το χειρισμό των οργάνων από τον υπολογιστή. Κατόπιν μέσα από την επιλογή «Station» του μενού «Setup» ορίστηκαν οι δύο στάσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα δύο όργανα. Σημειώνεται

ότι ο ορισμός των θυρών του υπολογιστή στις οποίες συνδέθηκαν τα δύο όργανα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή ώστε να επιτευχθεί επικοινωνία οργάνου – υπολογιστή. Το πρόγραμμα όρισε τη μία από τις δύο στάσεις σαν την αρχή των αξόνων του τοπικού δικτύου που θα δημιουργούνταν από τα δύο όργανα και κατόπιν ακολούθησαν οι απαιτούμενες ενέργειες ώστε να δοθούν συντεταγμένες και στη δεύτερη στάση.

Προκειμένου να προκύψουν οι συντεταγμένες της δεύτερης στάσης έπρεπε αρχικά τα δύο όργανα να προσανατολιστούν μεταξύ τους ώστε να συμπίπτουν οι οπτικές ακτίνες των δύο γεωδαιτικών σταθμών. Πρώτα, αλληλοσκοπεύθηκαν μεταξύ τους τα δύο όργανα, το ένα από αυτά εστίασε στο άπειρο και από το άλλο σκόπευσε το σταυρόνημα του πρώτου. Στη συνέχεια επιτεύχθηκε αυτό τα όργανα μηδενίστηκαν, χωρίς όμως να είναι υποχρεωτικό αυτό. Καθώς επρόκειτο για την πρώτη φορά που εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη διαδικασία θεωρήθηκε σωστό να γίνει μια απλή ακολουθία ελέγχου για να διαπιστωθεί η ορθότητα και ακρίβεια της αλληλοσκόπευσης των δύο οργάνων. Γι' αυτό το λόγο αφαιρέθηκε το όργανο της μιας στάσης από το τρικόχλιό του, τοποθετήθηκε σε αυτό ένας κωνικός στόχος, που η μύτη του κώνου υλοποιεί επακριβώς τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής του οργάνου, και σκοπεύτηκε από το δεύτερο όργανο. Κατόπιν συγκρίνοντας την ανάγνωση της οριζόντιας γωνίας, σκοπεύοντας τη μύτη του κωνικού στόχου, με αυτή που είχαμε από πριν διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία ήταν επιτυχής. Τέλος, αφαιρέθηκε ο κωνικός στόχος και επανατοποθετήθηκε στο τρικόχλιο το όργανο και επαναλήφθηκε η διαδικασία της αλληλοσκόπευσης. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την εφαρμογή «Accurate Collimation» από την επιλογή «Orientation» το πρόγραμμα καταχώρησε τις αναγνώσεις των γωνιών από τα δύο όργανα σε πρώτη και δεύτερη θέση.

Το επόμενο βήμα ήταν η χρησιμοποίηση της ειδικής ράβδου κλίμακας της βιομηχανικής γεωδαισίας ώστε με μετρήσεις από τα δύο όργανα προς τους στόχους που υπάρχουν στα δύο άκρα αυτής να δοθεί κλίμακα στο τοπικό δίκτυο και συνεπώς να προκύψουν οι συντεταγμένες της δεύτερης στάσης. Έτσι μέσα από την εφαρμογή «Scale bar» που βρίσκεται στο μενού Orientation ανοίχτηκε ένα παράθυρο διαλόγου από το πρόγραμμα που καθοδηγεί το χρήστη. Καταγράφηκαν έτσι οι κατακόρυφες και οριζόντιες αναγνώσεις των γωνιών μεταξύ οργάνων και στόχων της ράβδου σε πρώτη θέση. Σημειώνεται ότι για την σωστή αργότερα επίλυση του δικτύου θα πρέπει να οριστεί στην αρχική σελίδα του προγράμματος (Βλέπε Σχήμα 6.2) η ακριβής απόσταση μεταξύ των δύο στόχων της ράβδου και το σφάλμα αυτής.



Σχήμα 6.2: Ορισμός του μήκους της ράβδου κλίμακας και το σφάλμα της στο λογισμικό Axyz
 Figure 6.2: Definition of the scale bar's length and associated error

Το τελευταίο βήμα για την επίλυση του τοπικού δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής «Orient Network» από το μενού «Orientation». Εκεί επιλέχτηκε, ποια στοιχεία από αυτά που μετρήθηκαν προηγουμένως, θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για να επιλύσει το δίκτυο και τελικά επιλύθηκε το δίκτυο και δόθηκαν συντεταγμένες στη δεύτερη στάση. Η μορφή των συντεταγμένων της δεύτερης στάσης εφόσον στην πρώτη στάση έχουν δοθεί οι συντεταγμένες (0,0,0) θα είναι (0,S,Z) ή ((S,0,Z) αναλόγως με το πώς έχουν οριστεί οι άξονες του δικτύου) με S την απόσταση μεταξύ των δύο οργάνων.

Για έναν πρώτο χονδρικό έλεγχο των αποτελεσμάτων μετρήθηκε με την μετροταινία η απόσταση των δύο οργάνων και συγκρίθηκε με το αποτέλεσμα που είχε δώσει για το ίδιο μήκος το λογισμικό. Αφού οι τιμές ήταν χονδρικά ίδιες για να ελεγχθεί η ορθότητα των συντεταγμένων των στάσεων του συστήματος λήφθηκαν ξανά μετρήσεις προς τους δύο στόχους της ειδικής ράβδου κλίμακας και από τις συντεταγμένες που προέκυψαν υπολογίστηκε η μεταξύ τους απόσταση, η οποία είναι γνωστή από τον κατασκευαστή με μεγάλη ακρίβεια ($1305,540 \pm 0,002$ mm). Η ράβδος μετρήθηκε στην αρχική της θέση, καθώς και σε μια δεύτερη τυχαία και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την απόσταση μεταξύ των δύο στόχων αυτής είναι 1305,818 mm και 1306,122 mm αντίστοιχα για τις δύο θέσεις. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι πολύ μικρή και έτσι η μεθοδολογία θεωρείται αποδεκτή.

6.3. Προβλήματα που προέκυψαν

Το πρόβλημα εντοπίστηκε στη διαδικασία σύνδεσης των οργάνων με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή ώστε να υπάρξει μεταφορά των δεδομένων. Το πρόγραμμα Axyz από κατασκευής του είναι ρυθμισμένο να εντοπίζει τα όργανα που είναι συνδεδεμένα με τον υπολογιστή, εφόσον αυτά είναι συνδεδεμένα σε συνεχόμενα αριθμημένες θύρες επικοινωνίας COM (π.χ. 1,2,3... ή 4,5,6.... και όχι 1,4,7,.....). Έτσι το πρόγραμμα αναγνωρίζοντας την πρώτη θύρα επικοινωνίας ελέγχει την αμέσως επόμενη και αν δεν εντοπίσει κάποιο όργανο συνδεδεμένο σε αυτή σταματάει τον έλεγχο και δεν διερευνά τις υπόλοιπες. Μη γνωρίζοντας αυτή την παράμετρο τα όργανα συνδέθηκαν σε τυχαίες θύρες και το πρόγραμμα αναγνώριζε μόνο το ένα από αυτά κάνοντας αδύνατη τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Μετά από συνεννόηση με τον αντιπρόσωπο της Leica στην Ελλάδα βρέθηκε η λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Από τη Διαχείριση Συσκευών που βρίσκεται στην καρτέλα Υλικό της εφαρμογής Σύστημα του Πίνακα Ελέγχου των Windows στην επιλογή Θύρες (COM & LPT) ελέγχουμε τις θύρες στις οποίες έχουμε συνδέσει τα όργανα. Αν αυτές δεν είναι συνεχόμενες εκτελώντας «δεξί κλικ» στην θύρα που έχουμε συνδέσει το όργανο επιλέγουμε την επιλογή «Ιδιότητες». Στη συνέχεια, από την καρτέλα «Ρυθμίσεις θυρών» επιλέγουμε «Για προχωρημένους...» και στο κάτω μέρος του νέου παραθύρου που ανοίγει στην πτυσσόμενη λίστα Αριθμός θύρα COM επιλέγουμε τον αριθμό της θύρας στον οποίο θέλουμε ο υπολογιστής να «βλέπει» το συγκεκριμένο όργανο αρκεί αυτή να μη χρησιμοποιείται. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε ένα από τα όργανα που είναι συνδεδεμένα στον υπολογιστή οπότε είναι συνετό εξ αρχής να επιλέγεται η ομάδα των συνεχόμενων μη χρησιμοποιούμενων θυρών COM του υπολογιστή. Κατόπιν αφού είναι γνωστοί οι αριθμοί των θυρών που είναι συνδεδεμένα τα όργανα αρκεί να γίνει εκκίνηση του προγράμματος Leica Axyz και μέσα από αυτό της εφαρμογής «Theodolite Manager». Κατόπιν μέσα από την επιλογή «General Settings» της επιλογής «Setup» ορίζεται στην καρτέλα «Serial Ports» ο αριθμός της πρώτης, από τη σειρά των συνεχόμενων θυρών επικοινωνίας COM που θα πρέπει να ελέγξει το πρόγραμμα και ο συνολικός αριθμός των οργάνων που είναι συνδεδεμένα στον υπολογιστή ώστε να γίνει έλεγχος στον ανάλογο αριθμό θυρών που ακολουθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΝΟΜΕΩΝ Υ/Β

7.1. Η Βιομηχανική Γεωδαισία σε Εφαρμογές Ναυπηγικής

Η Βιομηχανική Γεωδαισία δημιουργήθηκε προκειμένου να εκτελούνται γεωδαιτικές εργασίες σε πεδίο περιορισμένης έκτασης, χρησιμοποιώντας όργανα και ακολουθώντας μεθόδους υψηλών ακριβειών. Από την πληθώρα των εφαρμογών που μπορεί να εφαρμοστεί η Βιομηχανική Γεωδαισία, και που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1 και στον Πίνακα 1.1, η υπόψη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον τομέα της Ναυπηγικής.

Στον τομέα αυτό χρησιμοποιείται κατά κόρον η Βιομηχανική Γεωδαισία λόγω των απαιτήσεων υψηλής ακρίβειας, του μεγάλου μεγέθους των αντικειμένων που εξετάζονται και του περιορισμένου χώρου μέσα στον οποίο γίνονται οι μετρήσεις (τα πλοία ή υποβρύχια μπαίνουν σε ειδικές πλατφόρμες εκτός θαλάσσης για να γίνουν οι οποιεσδήποτε εργασίες σε αυτά). Γι' αυτό το λόγο αποτελεί το καταλληλότερο εργαλείο, που σε συνεργασία με τα νέας τεχνολογίας όργανα που αναπτύσσουν οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο, μπορεί να δώσει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Η ακρίβεια που απαιτείται στις πιο πολλές από τις συνήθεις εργασίες του τομέα της ναυπηγικής είναι της τάξης των δεκάτων του χιλιοστού. Τέτοιες εργασίες αφορούν:

- στον γεωμετρικό έλεγχο της γραμμής πλεύσης των πλοίων
- στον γεωμετρικό έλεγχο των οπλικών συστημάτων των πλοίων του πολεμικού ναυτικού ως προς την σωστή τοποθέτησή τους πάνω στο κατάστρωμα και την ακρίβεια των ρίψεών τους
- στον γεωμετρικό έλεγχο της κυκλικότητας των νομέων ενός υποβρυχίου πριν αλλά και μετά το πέρας των εργασιών που εκτελούνται σε αυτούς πριν τη μεταξύ τους συγκόλληση
- στην ακριβή τοποθέτηση των διαφόρων τμημάτων του υποβρυχίου πάνω στο σκελετό του καθώς και σε άλλες εργασίες.

7.2. Το πρόγραμμα Κατασκευής Υ/Β στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε.

Το πρόγραμμα, στο οποίο εντάσσεται το υποβρύχιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του ελέγχου της κυκλικότητας των νομέων του στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, εκπονείται από τα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. με την κωδική ονομασία Class 214 Program. Το υπόψη πρόγραμμα αναλήφθηκε από τα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. το έτος 2000 και περιλαμβάνει την κατασκευή τεσσάρων υποβρυχίων τύπου 214. Σύμφωνα με το πρόγραμμα το αρχέτυπο υποβρύχιο του συγκεκριμένου τύπου, με την ονομασία «ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΗΣ», κατασκευάστηκε στη Γερμανία από τη μητρική εταιρεία «ThyssenKrupp Marine Systems», στον επιχειρησιακό όμιλο της οποίας ανήκουν τα Ελληνικά Ναυπηγεία και η κατασκευή των υπόλοιπων τριών ξεκίνησε το 2002 στον Τομέα Κατασκευής Υποβρυχίων στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. στο Σκαρामαγκά Αττικής. Η κατασκευή και των τριών υποβρυχίων, ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας των μηχανικών μερών τους και των οπλικών συστημάτων και η παράδοσή τους στο Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2010 και θα απασχολήσει περισσότερους από 650 εργαζόμενους.



Σχήμα 7.1: Χώρος Τομέα Κατασκευής Υποβρυχίων στα Ελληνικά Ναυπηγεία [www.hellanic-shipyards.gr]
Figure 7.1: Submarine Building Section at the Hellenic Shipyards [www.hellanic-shipyards.gr]

Τα υποβρύχια τύπου 214 πλεονεκτούν σε σχέση με μεγαλύτερα υποβρύχια άλλων τύπων σε επιχειρήσεις όπου απαιτείται ευκολία στην πραγματοποίηση κινήσεων ακριβείας σε περιορισμένο χώρο. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου είναι :

- δυνατότητα αυξημένου χρονικού διαστήματος παραμονής κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας χάρη στη χρήση κυψελών καυσίμων για την προώθηση του υποβρυχίου.
- δυνατότητα κατάδυσης σε μεγάλα βάθη και εν γένει καλύτερη απόδοση χάρη στον ειδικά σχεδιασμένο και κατασκευασμένο σκελετό των υποβρυχίων του τύπου 214 και χάρη στα υπερσύγχρονα συστήματα εντοπισμού αλλά και τα οπλικά συστήματα τα οποία φέρουν.

- περιορισμένου ίχνους ηχητικές, θερμικές και μαγνητικές υπογραφές προκειμένου να μην εντοπίζονται εύκολα από τα εχθρικά πλοία.

Σημειώνεται ότι εκτός από την εταιρεία Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε., που είναι ο κύριος ανάδοχος του προγράμματος, στην προσπάθεια δραστηριοποιούνται και άλλες τρεις ελληνικές εταιρείες. Πρόκειται για τις εταιρείες ΜΕΤΚΑ, η οποία έχει αναλάβει εργασίες που σχετίζονται με την κατασκευή τμημάτων του σκελετού των υποβρυχίων, την εταιρεία ΓΕΡΜΑΝΟΣ Α.Ε. που εφοδιάζει τα υποβρύχια με μπαταρίες και την εταιρεία ΜΟΤΟΜΑΡΙΝΕ που κατασκευάζει μέρη του συστήματος GRP. Επίσης, άλλες μικρότερες ελληνικές εταιρείες έχουν αναλάβει εργασίες μικρότερης κλίμακας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποβρυχίων τύπου 214 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1:

| | |
|--|----------------------|
| Συνολικό μήκος | περίπου 65 m |
| Ύψος | περίπου 13 m |
| Διάμετρος υπό πίεση σκελετού | περίπου 6.3 m |
| Εκτόπισμα | περίπου 1700 τόνοι |
| Πλήρωμα | 27 (+8) |
| Υλικό κατασκευής υπό πίεση σκελετού | Φερομαγνητικό ατσάλι |
| Μηχανή προώθησης | PERMASYN |
| Σύστημα κυψελών καυσίμου | PEM |
| Υπερσύγχρονα συστήματα Σόναρ και Οπλικού Ελέγχου | |
| Υπερσύγχρονα συστήματα Πλοήγησης και Επικοινωνίας | |
| 8 τορπιλοσωλίνες στην πλώρη του υποβρυχίου που είναι ικανοί να εκτοξεύσουν κάθε τύπο τορπίλης και 4 από αυτούς είναι εξοπλισμένοι με ειδικά οπικά συστήματα για την εκτόξευση πυραύλων | |

Πίνακας 7.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά υποβρυχίων τύπου 214 [www.hellinic-shipyards.gr]
Table 7.1: Principle Characteristics of 214 class submarines [www.hellinic-shipyards.gr]



Σχήμα 7.2: Υποβρύχιο τύπου 214 κατά τη διαδικασία καθέλκυσης [www.hellinic-shipyards.gr]
Figure 7.2: Submarine Class 214 at launch time [www.hellinic-shipyards.gr]

7.3. Εφαρμοζόμενες Διαδικασίες Γεωδαιτικής Παρακολούθησης

Κάθε υποβρύχιο πριν πάρει την τελική του μορφή αποτελείται από ένα σύνολο κυλίνδρων, τους νομείς, οι οποίοι συγκολλούνται μεταξύ τους. Πρόκειται για κυλινδρικές κατασκευές που για μεγαλύτερη αντοχή στο εσωτερικό τους φέρουν κυκλικούς δοκούς (δακτυλίδια) πάχους περίπου 30 cm, συγκολλημένες επάνω στο σώμα του κυλίνδρου ανά τακτά διαστήματα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατασκευής, πριν ενωθούν οι νομείς λαμβάνουν χώρα ορισμένες διεργασίες που αφορούν την τοποθέτηση των δεξαμενών του υποβρυχίου, των βάσεων των διαφόρων συστημάτων πλοήγησης και εντοπισμού, καθώς και των βάσεων των διαφόρων οπλικών συστημάτων. Ωστόσο, αυτές οι διεργασίες μεταβάλλουν ελαφρά την κυκλικότητα των διατομών των νομέων αυτών, λόγω του βάρους των εγκαταστάσεων που τοποθετούνται μέσα τους αλλά και λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση. Αυτές οι απειροελάχιστες παραμορφώσεις σε συνθήκες υψηλών πιέσεων, για τα βάθη που θα κινηθεί το υποβρύχιο, δημιουργούν κίνδυνο αστοχίας του.



Σχήμα 7.3: Νομείς υποβρυχίου κατά τη συγκόλληση [www.hellinic-shipyards.gr]
Figure 7.3: Submarine hull parts during the welding procedure [www.hellinic-shipyards.gr]

Για το λόγο αυτό επιβάλλεται ο επιτακτικός έλεγχος της κυκλικότητας της διατομής κάθε νομέα όταν αυτός έρχεται από το εργοστάσιο και ο προσδιορισμός του βέλτιστου σχήματος (κύκλος) που εκφράζει τη διατομή αλλά και αμέσως μετά τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο νομέα, πριν ακριβώς τη στιγμή της συγκόλλησης των νομέων μεταξύ τους. Για να γίνει αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιούνται συνήθως 20 έως 24

προσημασμένα και αριθμημένα σταθερά σημεία στην περιφέρεια της διατομής κάθε νομέα.

Η διαδικασία που χρησιμοποιείται στο υπόψη πρόγραμμα στηρίζεται στη μέθοδο της οπισθοτομίας, καθώς ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 που χρησιμοποιείται δεν έχει εγκατεστημένο το λογισμικό πακέτο Axyz. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως 6 έως 8 σημεία γνωστών συντεταγμένων από το δίκτυο σημείων γνωστών συντεταγμένων που υπάρχει στους χώρους των Ναυπηγείων. Στη συνέχεια, με γνωστές τις συντεταγμένες του σημείου που έχει τοποθετηθεί το όργανο, διεξάγεται η μέθοδος των τοποσταθερών με μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μαγνητικοί στόχοι που τοποθετούνται στην περιφέρεια του νομέα. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφονται οι μετρήσεις για τα προσημασμένα σημεία της περιφέρειας και στη συνέχεια αφαιρώντας την κάρτα μνήμης του οργάνου, ακολουθεί η επεξεργασία σε υπολογιστή εφοδιασμένο με το λογισμικό Axyz.

Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και επίπονη καθώς για κάθε επιμέρους εργασία κατά την οποία απαιτείται η μετακίνηση του οργάνου πρέπει να επαναλαμβάνεται η διαδικασία της οπισθοτομίας. Για εργασίες που απαιτείται η μέτρηση σημείων και η άμεση εξαγωγή αποτελεσμάτων ώστε να γίνουν οι απαραίτητες διορθωτικές μετακινήσεις σε αντικείμενα που τοποθετούνται πάνω στο υποβρύχιο (π.χ. υδρόφωνα) θα πρέπει να πραγματοποιείται κυκλικά η διαδικασία: Μέτρηση → Επεξεργασία → Επίδοση διορθώσεων στο αρμόδιο συνεργείο επιβολής διορθώσεων → Επανάληψη μέτρησης, και ούτω καθεξής, έως ότου επιτευχθούν τα επιδιωκόμενα όρια ακρίβειας. Όταν δε, οι εργασίες δεν λαμβάνουν χώρα την ίδια μέρα ή σε διαφορετικές φάσεις της μέρας θα πρέπει να αφαιρείται το όργανο από τον τρίποδα και αυτός να παραμένει στο ίδιο σημείο, για να μην επαναλαμβάνεται η διαδικασία της οπισθοτομίας. Η διαδικασία αυτή εγκυμονεί τον κίνδυνο μετακίνησής του, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνονται έτσι οι εργασίες πεδίου.

7.4. Αντικείμενο Εργασίας και Οργάνωση Μετρήσεων – Μετρήσεις πεδίου

Όπως επισημάνεται στην εισαγωγή, το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά στην εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων. Ειδικότερα της μεθόδου της εμπροσθοτομίας με χρήση δύο γεωδαιτικών σταθμών, ταυτόχρονα συνδεδεμένων με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να ιδρυθεί από τα δύο όργανα αυθαίρετο δίκτυο, να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο και να δοθούν αμέσως αποτελέσματα μέσω του

υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή δεν προϋποθέτει τη διαδικασία της οπισθοτομίας. Κατά συνέπεια οι απαιτούμενες εργασίες γίνονται πιο εύκολα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Επίσης, στα αποτελέσματα των συντεταγμένων των σημείων της περιφέρειας του νομέα που μετρώνται δεν υπεισέρχεται το σφάλμα από τον προσδιορισμό των συντεταγμένων της στάσης του οργάνου με την οπισθοτομία.

Μετά από συνεννόηση με τον υπεύθυνο του Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων στα Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε. και εφόσον είχαν ολοκληρωθεί με επιτυχία οι προπαρασκευαστικές εργασίες, όπως αυτές περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 7, ώστε να υπάρχει μια σχετική εξοικείωση με τα όργανα και τη διαδικασία της μεθόδου, ορίστηκε σαν ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων η Τρίτη 10 Ιουνίου 2008. Για τη διάρκεια των μετρήσεων τέθηκαν στη διάθεσή μας από τον υπεύθυνο του Τομέα, εκτός από τα σχετικά έγγραφα για την είσοδο στο χώρο και την άδεια του εισαγωγής του εξοπλισμού, και ο υπεύθυνος Τοπογράφος Μηχανικός του Τομέα με το βοηθητικό προσωπικό.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- ένας γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005
- ένας γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800
- ένας τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας (τον δεύτερο που χρειαζόταν τον παρείχε ο υπεύθυνος τοπογράφος)
- μία βιομηχανική ράβδος απόδοσης κλίμακας
- ένας απλός τρίποδας
- ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό (Leica Axyz v1.4.3)
- τα κατάλληλα καλώδια ώστε να συνδεθεί ο υπολογιστής με τα δύο όργανα
- μια ομάδα προσοφθάλμιου εφοδιασμένο με laser και ροοστάτη για τη βέλτιστη αξιοποίηση της δέσμης laser που προσαρμόστηκε στο ένα από τα δύο όργανα
- συσσωρευτής ηλεκτρικού ρεύματος (μπαταρία) για το προσοφθάλμιο και απαραίτητα καλώδια σύνδεσης

Η πειραματική – μετρητική διάταξη στο χώρο υποβρυχίων φαίνεται στο σχήμα 7.4:



Σχήμα 7.4: Διάταξη εξοπλισμού στο χώρο των Ελληνικών Ναυπηγείων
Figure 7.4: Instruments setup at Hellenic Shipyards

Σε πρώτη φάση έγιναν οι απαραίτητες προπαρασκευαστικές διεργασίες, όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 7. Ειδικότερα, αφού οριζοντιώθηκαν τα όργανα, έγινε η σύνδεση καθενός τους με τον Η/Υ και η αναγνώρισή τους από το πρόγραμμα Axyz. Ως στάση Σ1 ορίστηκε η θέση του οργάνου TCA 1800, όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος 7.4 και ως στάση Σ2 ονομάστηκε από το πρόγραμμα η θέση του οργάνου TDA 5005, στο κέντρο του σχήματος 7.4. Κατόπιν, ακολούθησε η διαδικασία αυτοσκόπευσης των δύο οργάνων και ο μηδενισμός της οριζόντιας γωνίας του ενός ως προς το άλλο. Τελικά, έγιναν οι απαραίτητες από το πρόγραμμα μετρήσεις προς την ράβδο απόδοσης κλίμακας, η οποία είχε τοποθετηθεί σε τρίποδα απέναντι από τα δύο όργανα (στα αριστερά του σχήματος 7.4). Προκειμένου να δοθούν συντεταγμένες στη στάση Σ2, έγινε η επίλυση του δικτύου, δεδομένου ότι η στάση Σ1 ορίστηκε από το πρόγραμμα ως η αρχή των αξόνων του τοπικού δικτύου που δημιουργήθηκε. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες που προέκυψαν για τις δύο στάσεις μετά την επίλυση του δικτύου.

| Station | Sensor type | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | Std X (mm) | Std Y (mm) | Std Z (mm) |
|---------|-------------|----------|--------|--------|------------|------------|------------|
| 1 | TCA 1800 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 2 | TDA 5005 | 3960.151 | 0.004 | 98.057 | 0.022 | 0.059 | 0.021 |

Πίνακας 7.2: Συντεταγμένες των στάσεων
Table 7.2: Stations coordinates



Σχήμα 7.5: Σύστημα αναφοράς καρτεσιανών συντεταγμένων όπως ορίζεται από το Axyz
 Figure 7.5: Cartesian Coordinates System as it is set by Axyz

Στη συνέχεια, προκειμένου να πραγματοποιηθεί έλεγχος της σωστής επίλυσης του δικτύου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προς τους δύο στόχους της ράβδου απόδοσης κλίμακας, έτσι ώστε από τις συντεταγμένες που θα προέκυπταν να επαληθευόταν το μήκος της. Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες που προέκυψαν, το μήκος που υπολογίστηκε από αυτές αλλά και το ακριβές μήκος της ράβδου απόδοσης κλίμακας.

| Point ID | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | Std X (mm) | Std Y (mm) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|---------------------------|----------|-----------|-------------|----------------------|------------|------------|-----------------|
| bar1 | 1247.863 | -5276.314 | -17.879 | 0.023 | 0.061 | 0.021 | 26.2096 |
| bar2 | 2552.165 | -5219.108 | -18.285 | 0.022 | 0.059 | 0.021 | 82.7708 |
| Υπολογισμένο μήκος ράβδου | | | 1305.556 mm | Ακριβές μήκος ράβδου | | | 1305.540 mm |

Πίνακας 7.3: Συντεταγμένες των στόχων της ράβδου απόδοσης κλίμακας, υπολογισμένο και ακριβές μήκος
 Table 7.3: Scale bar targets coordinates, calculated and accurate length

Ακολούθησαν τρεις σειρές μετρήσεων, όπως περιγράφεται στη συνέχεια :

- μετρήσεις και καταγραφή σε πραγματικό χρόνο μόνο οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών και με τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς συνδεδεμένους με τον H/Y σε 21 προσημασμένα σημεία από τα 24 που συνολικά υπάρχουν στην περιφέρεια της διατομής του νομέα.
- μετρήσεις και καταγραφή σε πραγματικό χρόνο μόνο οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών και με τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς συνδεδεμένους με τον H/Y για 10 σημεία στην πρώτη εσωτερική κυκλική δοκό στήριξης στο εσωτερικό του νομέα.
- μετρήσεις και καταγραφή σε πραγματικό χρόνο οριζόντιων και κατακόρυφων

γωνιών αλλά και αποστάσεων με χρήση του γεωδαιτικού σταθμού TDA 5005 που ήταν συνδεδεμένο με τον Η/Υ για δέκα προσημασμένα σημεία της περιφέρειας της διατομής του νομέα.

Σημειώνεται ότι, για τις πρώτες δύο σειρές των μετρήσεων καθώς είχαν την ίδια αρχή χρησιμοποιήθηκε και για λόγους ευκολίας κοινό αρχείο μετρήσεων στο λογισμικό Axyz, καθώς νέο αρχείο θα προϋπέθετε εξαρχής πραγματοποίηση των προπαρασκευαστικών εργασιών, όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 7. Για την τρίτη σειρά μετρήσεων δημιουργήθηκε νέο αρχείο δεδομένων.

7.4.1. Πρώτη σειρά μετρήσεων (I)

Έχοντας ιδρύσει το τοπικό δίκτυο, με τη βοήθεια ενός μέλους του βοηθητικού προσωπικού, του υπευθύνου Τοπογράφου του Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων, ο οποίος υποδείκνυε ακριβώς με τη μύτη ενός καρφιού τα προσημασμένα σημεία στην περιφέρεια της διατομής του νομέα και τα φώτιζε ώστε να διακρίνονται πιο εύκολα, ξεκίνησε η πρώτη σειρά μετρήσεων. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων προσαρμόστηκε στον γεωδαιτικό σταθμό TDA 5005 ειδικό προσοφθάλμιο με την ικανότητα εκπομπής ακτίνας laser σε κάθε σημείο που σκοπεύεται. Με τον τρόπο αυτό γινόταν πρώτα η σκόπευση από αυτό το όργανο και στη συνέχεια ο παρατηρητής του δεύτερου οργάνου στόχευε την κουκίδα που υλοποιούσε η δέσμη laser πάνω στο μετρούμενο σημείο. Αυτή η διαδικασία έχει το πλεονέκτημα ότι δεν τοποθετείται κάποιος στόχος πάνω στο ζητούμενο σημείο, ώστε να εισάγεται σφάλμα στα αποτελέσματα από μη ακριβή κέντρωση του στόχου πάνω υπόψη στο σημείο αλλά και το σφάλμα στόχευσης στο στόχο. Το ζητούμενο σημείο υλοποιείται ακριβώς από τη σημειακή κουκίδα που δημιουργείται από την πρόσπτωση της δέσμης laser πάνω στον νομέα και το δεύτερο όργανο σκοπεύει απευθείας την κουκίδα αυτή λαμβάνοντας έτσι μέτρηση στο επιθυμητό σημείο. Κατά τη διάρκεια της πρώτης σειράς μετρήσεων δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα. Εξαίρεση αποτελεί το γεγονός ότι δεν ήταν δυνατόν να σκοπευτούν και από τα δύο όργανα τρία από τα προσημασμένα σημεία της διατομής του νομέα, καθώς γύρω του είχε τοποθετηθεί ικρίωμα για να πραγματοποιηθούν κάποιες εργασίες σε αυτόν. Οι εργασίες αυτές ήταν πολύ μικρής κλίμακας και δεν θεωρήθηκε ότι μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία των μετρήσεων. Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζεται η πρώτη σειρά μετρήσεων. Ως αναφορά τα περιεχόμενα των στηλών των πινάκων είναι:

- Point ID: όνομα σημείου
- R, H, Z: κυλινδρικές συνταγμένες σημείου
- Std X, Std Y, Std Z: τυπικά σφάλματα καρτεσιανών συντεταγμένων
- Mean error: πρόκειται για τη μεταβλητότητα του σφάλματος προσδιορισμού της θέσης του κάθε σημείου, από το πλήθος των γεωδαιτικών σταθμών που χρησιμοποιούνται (δύο στην υπόψη διπλωματική εργασία) και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$mean\ error = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i)^2}{r \sigma^2} \quad (7.1)$$

u_i = το υπόλοιπο της κάθε συντεταγμένης του σημείου από την καλύτερη τιμή της

σ = το τυπικό σφάλμα της κάθε συντεταγμένης του σημείου (X,Y,Z)

N = το πλήθος των σετ μετρήσεων για τον προσδιορισμό του σημείου

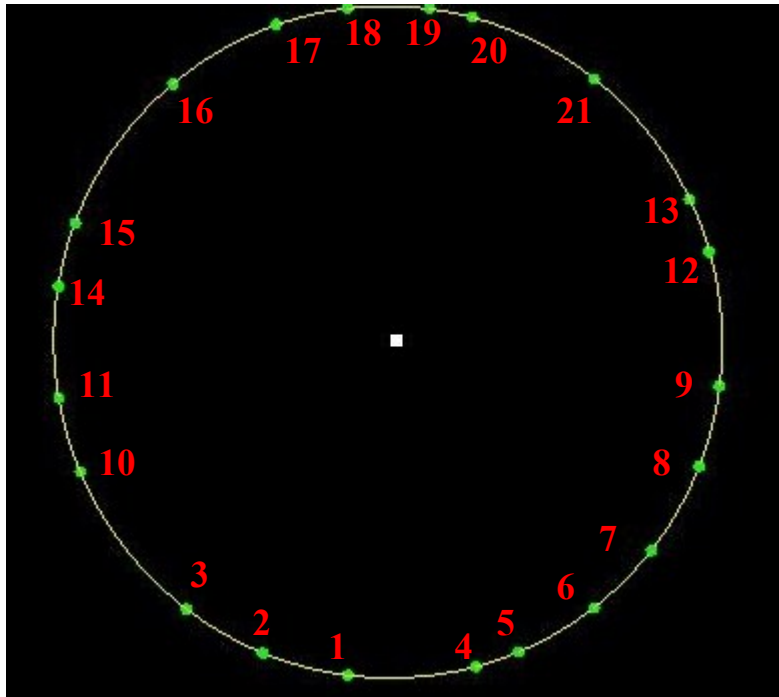
r = ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος

| Point ID | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | Std X (mm) | Std Y (mm) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|----------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| perif1 | 3392.050 | -12064.942 | 2174.566 | 0.055 | 0.283 | 0.068 | 5.1962 |
| perif2 | 4182.354 | -12042.699 | 2383.429 | 0.067 | 0.288 | 0.072 | 19.3733 |
| perif3 | 4885.431 | -12037.198 | 2790.018 | 0.080 | 0.295 | 0.081 | 0.2831 |
| perif4 | 2200.973 | -12082.199 | 2251.001 | 0.046 | 0.280 | 0.068 | 28.6671 |
| perif5 | 1805.833 | -12086.922 | 2384.548 | 0.046 | 0.280 | 0.071 | 0.2973 |
| perif6 | 1101.040 | -12099.986 | 2792.233 | 0.050 | 0.282 | 0.079 | 90.3113 |
| perif7 | 564.172 | -12103.777 | 3321.206 | 0.055 | 0.285 | 0.090 | 2.7031 |
| perif8 | 116.084 | -12113.631 | 4098.435 | 0.062 | 0.288 | 0.107 | 77.5436 |
| perif9 | -76.251 | -12116.409 | 4836.401 | 0.065 | 0.289 | 0.123 | 109.4171 |
| perif10 | 5857.708 | -12020.399 | 4065.530 | 0.102 | 0.306 | 0.112 | 34.5373 |
| perif11 | 6051.125 | -12014.827 | 4748.134 | 0.107 | 0.308 | 0.129 | 28.5729 |
| perif12 | 9.180 | -12114.010 | 6077.676 | 0.063 | 0.288 | 0.151 | 51.6782 |
| perif13 | 185.198 | -12113.952 | 6561.593 | 0.061 | 0.287 | 0.161 | 73.1567 |
| perif14 | 6045.608 | -12012.221 | 5775.850 | 0.107 | 0.308 | 0.154 | 42.0886 |
| perif15 | 5886.177 | -12014.635 | 6359.704 | 0.103 | 0.305 | 0.167 | 45.1886 |
| perif16 | 4971.129 | -12031.534 | 7643.554 | 0.082 | 0.294 | 0.192 | 20.1776 |
| perif17 | 4008.929 | -12046.726 | 8187.029 | 0.064 | 0.286 | 0.199 | 64.8085 |
| perif18 | 3339.699 | -12059.756 | 8339.997 | 0.054 | 0.283 | 0.201 | 5.9911 |
| perif19 | 2583.129 | -12072.271 | 8331.513 | 0.048 | 0.281 | 0.199 | 19.8995 |
| perif20 | 2190.899 | -12078.748 | 8251.811 | 0.046 | 0.280 | 0.197 | 45.1911 |
| perif21 | 1061.898 | -12096.019 | 7677.000 | 0.050 | 0.282 | 0.184 | 13.9799 |

Πίνακας 7.4: Πρώτη σειρά μετρήσεων

Table 7.4: First set of measurements

Στο Σχήμα 7.6 δίνεται το σκαρίφημα με τις θέσεις των μετρημένων σημείων πάνω στην περιφέρεια του νομέα.



Σχήμα 7.6: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων πρώτης σειράς μετρήσεων
 Figure 7.6: Point locations measured during the first set of measurements

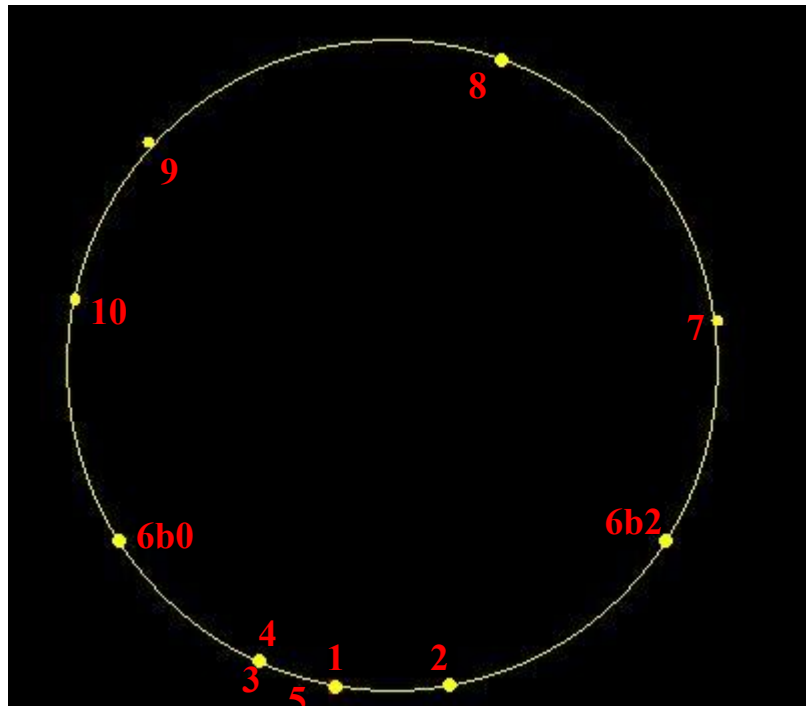
7.4.2. Δεύτερη σειρά μετρήσεων (II)

Προκειμένου να γίνει ένας σχετικός έλεγχος επαναληψιμότητας της διαδικασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη σειρά μετρήσεων όπου ακολουθώντας ανάλογη διαδικασία, μετρήθηκαν δώδεκα σημεία στην περιφέρεια του πρώτου, προς το μέρος των οργάνων, δακτυλίου από αυτούς που τοποθετούνται στο εσωτερικό του νομέα για μεγαλύτερη αντοχή στις πιέσεις. Αν η προηγούμενη διαδικασία είχε γίνει σωστά, θα πρέπει αυτοί οι δακτύλιοι να έχουν διατομή με περιφέρεια που θα διαγράφει κύκλο ομόκεντρο με τον αντίστοιχο κύκλο της περιφέρειας του νομέα και με ακτίνα μικρότερη κατά ≈ 30 cm. Ορισμένα από τα σημεία, κυρίως αυτά που ήταν στο κάτω μέρος του δακτυλίου στήριξης, καθώς δεν ήταν ορατά από τα δύο όργανα, μετρήθηκαν με τη βοήθεια της ράβδου εύρεσης κρυμμένου σημείου (hidden point bar). Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών υπολογίστηκαν από το λογισμικό αυτόματα, λαμβάνοντας μέτρηση σε δύο από τους πέντε στόχους της ράβδου και εισάγοντας στο πρόγραμμα τις ακριβείς αποστάσεις αυτών των στόχων από την ακίδα στο άκρο της. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης σειράς μετρήσεων αφορούσε κάποια μικρά λάθη κατά τη σκόπευση και την καταγραφή των μετρήσεων που επηρέασαν το τελικό αποτέλεσμα. Στον πίνακα 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης σειράς μετρήσεων :

| Point ID | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | Std X (mm) | Std Y (mm) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|-------------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| es_perif1 | 3500.521 | -12785.635 | 2401.673 | 0.077 | 0.362 | 0.095 | 0.0000 |
| es_perif1 | 3494.885 | -12790.663 | 2499.048 | 0.058 | 0.289 | 0.073 | 9.9882 |
| es_perif1 | 3471.823 | -12811.237 | 2897.484 | 0.058 | 0.290 | 0.080 | 9.3842 |
| es_perif2 | 3224.476 | -11908.154 | 2960.031 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif2 | 3471.836 | -12811.335 | 2897.506 | 0.060 | 0.319 | 0.086 | 27.2389 |
| es_perif3 | 3817.988 | -12461.762 | 2830.617 | 3.865 | 3.457 | 1.321 | 0.0000 |
| es_perif3 | 3494.774 | -12789.311 | 2893.318 | 0.060 | 0.318 | 0.085 | 472.1268 |
| es_perif3 | 3471.892 | -12812.500 | 2897.757 | 0.060 | 0.319 | 0.086 | 26.7211 |
| es_perif4 | 3812.164 | -12456.714 | 2829.398 | 3.882 | 3.347 | 1.308 | 0.0000 |
| es_perif4 | 3494.761 | -12789.735 | 2893.409 | 0.060 | 0.318 | 0.085 | 470.3332 |
| es_perif4 | 3472.336 | -12813.263 | 2897.931 | 0.060 | 0.319 | 0.086 | 29.1573 |
| es_perif5 | 3510.890 | -12751.965 | 2405.681 | 0.174 | 0.782 | 0.170 | 0.0000 |
| es_perif5 | 3488.794 | -12787.013 | 2688.345 | 0.059 | 0.302 | 0.079 | 7754227.34 |
| es_perif5 | 3472.427 | -12812.974 | 2897.724 | 0.059 | 0.303 | 0.083 | 37.7919 |
| es_perif6 | 1358.000 | -11986.606 | 2435.890 | 0.005 | 0.001 | 0.003 | 0.0000 |
| es_perif7 | 125.491 | -12095.390 | 5624.155 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.0000 |
| es_perif8 | 1952.230 | -12138.503 | 8018.000 | 0.005 | 0.001 | 0.002 | 0.0000 |
| es_perif9 | 5136.663 | -12019.686 | 7214.057 | 0.003 | 0.001 | 0.004 | 0.0000 |
| es_perif10 | 5790.204 | -11970.062 | 5831.160 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.0000 |
| es_perif6b0 | 5408.847 | -12719.801 | 3701.690 | 0.089 | 0.298 | 0.098 | 306.0187 |
| es_perif6b2 | 1137.430 | -12023.153 | 3150.154 | 0.004 | 0.001 | 0.003 | 0.0000 |

Πίνακας 7.5: Δεύτερη σειρά μετρήσεων
Table 7.5: Second set of measurements

Στο Σχήμα 7.7 δίνεται το σκαρίφημα με τις θέσεις των μετρημένων σημείων πάνω στην περιφέρεια του εσωτερικού δακτυλίου στήριξης.



Σχήμα 7.7: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων πρώτης σειράς μετρήσεων
Figure 7.7: Point locations measured during the first set of measurements

7.4.3. Τρίτη σειρά μετρήσεων (III)

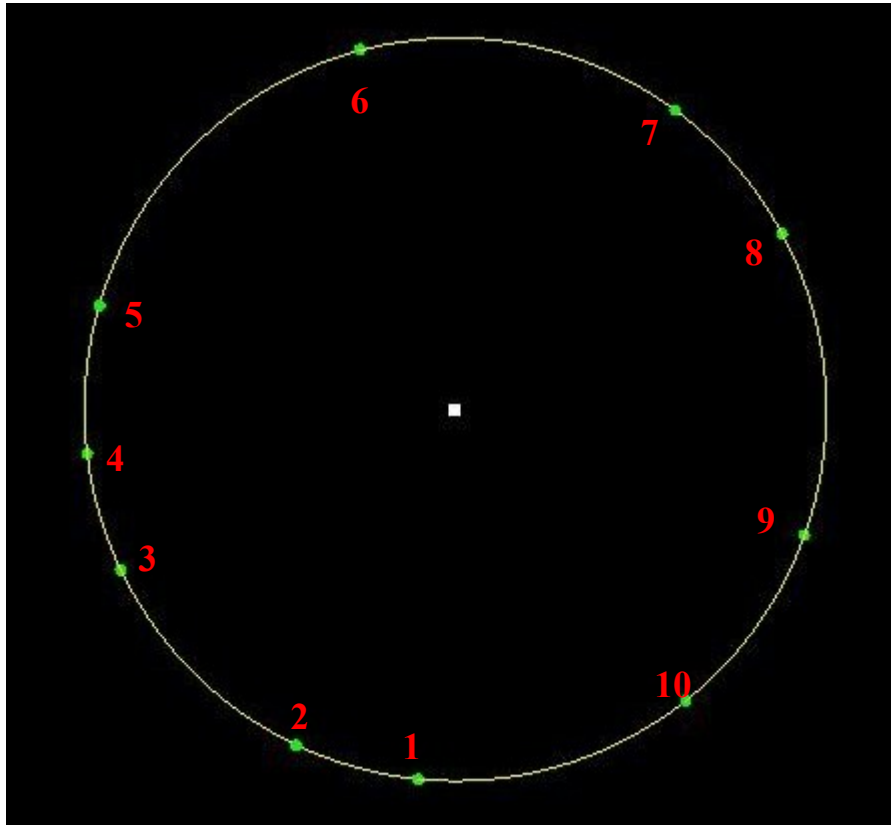
Η τρίτη σειρά μετρήσεων έγινε προκειμένου να υπάρχει μια καταρχήν σύγκριση με την μεθοδολογία που πραγματοποιείται από τους εργαζόμενους στον Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στις μετρήσεις αυτές ο γεωδαιτικός σταθμός TDA 5005 ήταν συνδεδεμένος με τον Η/Υ και έδινε απευθείας συντεταγμένες. Επίσης, η στάση του γεωδαιτικού σταθμού δεν εντάχθηκε στο δίκτυο με σημεία γνωστών συντεταγμένων που υπάρχει στο ναυπηγείο, με τη διαδικασία της οπισθοτομίας, αλλά μέσω του προγράμματος ορίστηκε ως η αρχή των αξόνων ενός τοπικού αυθαίρετου δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα ήταν απαλλαγμένα από το σφάλμα της διαδικασίας της οπισθοτομίας και τα αποτελέσματα ήταν διαθέσιμα σε πολύ λιγότερο χρόνο. Οι μετρήσεις που έγιναν προς 10 από τα προσημασμένα σημεία της περιφέρειας του νομέα, περιελάμβαναν και μέτρηση της απόστασης οργάνου – στόχου. Οπότε, ήταν απαραίτητη η χρήση μαγνητικών στόχων που τοποθετούνται στο σημείο που μετράται. Το είδος των στόχων που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό ο ανακλαστικός στόχος είναι τοποθετημένος κάθετα προς την επιφάνεια πάνω στην οποία τοποθετείται. Η ακτίνα του νέου κύκλου που θα δημιουργηθεί από αυτά τα σημεία θα είναι μικρότερη, από αυτή που βρέθηκε μετά την πρώτη σειρά μετρήσεων, κατά τρία εκατοστά μήκος που αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ του κέντρου του ανακλαστικού στόχου και του σημείου που υλοποιείται από αυτόν. Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζεται η δεύτερη σειρά μετρήσεων :

| Point ID | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | Std X (mm) | Std Y (mm) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|----------|-----------|------------|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| 5001 | -5994.462 | -10500.503 | 2094.221 | 0.492 | 0.856 | 0.182 | 1.0000 |
| 5002 | -5081.140 | -10936.097 | 2370.245 | 0.417 | 0.890 | 0.203 | 1.0000 |
| 5003 | -3764.983 | -11567.398 | 3815.392 | 0.302 | 0.908 | 0.306 | 1.0000 |
| 5004 | -3512.589 | -11690.045 | 4773.903 | 0.275 | 0.892 | 0.370 | 1.0000 |
| 5005 | -3597.212 | -11645.351 | 5998.732 | 0.272 | 0.858 | 0.446 | 1.0000 |
| 5006 | -5533.193 | -10719.444 | 8125.470 | 0.385 | 0.739 | 0.562 | 1.0000 |
| 5007 | -7888.588 | -9592.687 | 7636.482 | 0.544 | 0.660 | 0.528 | 1.0000 |
| 5008 | -8692.603 | -9209.199 | 6616.600 | 0.611 | 0.647 | 0.468 | 1.0000 |
| 5009 | -8868.942 | -9125.420 | 4129.217 | 0.665 | 0.684 | 0.316 | 1.0000 |
| 5010 | -7988.613 | -9546.559 | 2751.741 | 0.629 | 0.750 | 0.225 | 1.0000 |

Πίνακας 7.6: Τρίτη σειρά μετρήσεων

Table 7.6: Third set of measurements

Στο Σχήμα 7.8 δίνεται το σκαρίφημα με τις θέσεις των μετρημένων σημείων πάνω στην περιφέρεια του νομέα.



Σχήμα 7.8: Σκαρίφημα μετρημένων σημείων τρίτης σειράς μετρήσεων
Figure 7.8: Point locations measured during the third set of measurements

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

8.1. Στάδια επεξεργασίας

Όπως προκύπτει στο Κεφάλαιο 7, οι διαδικασίες αποτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν (δύο γεωδαιτικοί σταθμοί σε «on-line» σύνδεση με Η/Υ) μειώνει κατά πολύ το χρόνο που απαιτείται για να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων. Η επεξεργασία των δεδομένων που πραγματοποιήθηκε κατά την υπόψη διπλωματική εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη, ανάλογα με το αντικείμενο που μελετάται σε κάθε μέρος. Το πρώτο αντικείμενο επεξεργασίας αφορά την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης του κάθε σημείου στο χώρο για κάθε σειρά μετρήσεων. Το δεύτερο αντικείμενο επεξεργασίας αφορά τον έλεγχο της κυκλικότητας του νομέα και χωρίζεται σε τρία επιμέρους στάδια :

- προσδιορισμός του βέλτιστου κύκλου (συντεταγμένες κέντρου και ακτίνα) χρησιμοποιώντας όλα τα μετρημένα σημεία για καθεμιά από τις τρεις σειρές μετρήσεων
- προσδιορισμός του βέλτιστου κύκλου για τις σειρές μετρήσεων I και III, πραγματοποιώντας επιλύσεις με διαφορετικό κάθε φορά πλήθος σημείων. Για τη σειρά I χρησιμοποιήθηκαν 6, 9, 12, 15 και 18 σημεία, αντίστοιχα για κάθε επίλυση και για τη σειρά τρία 5, 7 και 9
- προσδιορισμός του βέλτιστου κύκλου για τις σειρές μετρήσεων I και III, χρησιμοποιώντας αρχικά πέντε συνδυασμούς από τρία τυχαία σημεία αλλά με καλή γεωμετρία πάνω στην περιφέρεια του νομέα και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας δύο συνδυασμούς από πέντε σημεία με δυσμενή γεωμετρία (όλα στο πάνω μέρος του νομέα ή όλα στο κάτω).

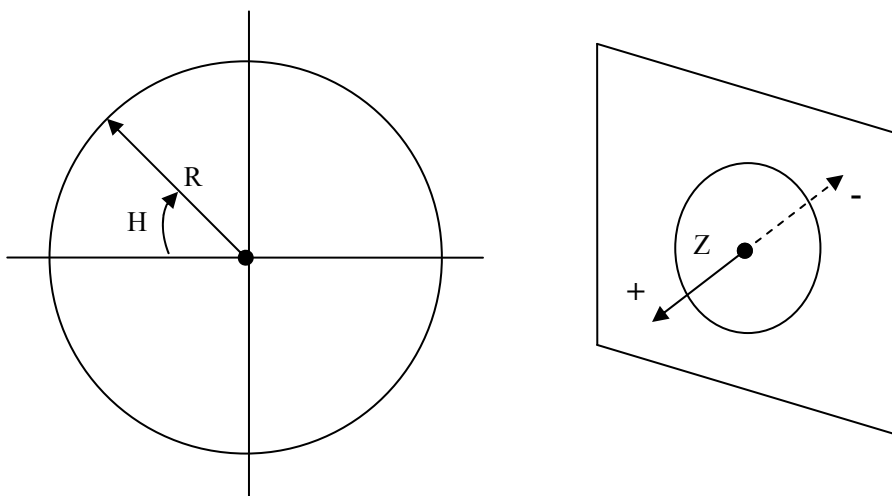
Το τρίτο αντικείμενο επεξεργασίας αφορά τον έλεγχο της επιπεδότητας των σημείων της Ιης και της ΙΙης σειράς μετρήσεων, προκειμένου να ανιχνευτεί η αποχή του κάθε σημείου από το επίπεδο που ορίζεται από τα μετρημένα σημεία.

Στο δεύτερο και το τρίτο μέρος επεξεργασίας, προκειμένου να υπολογιστεί ο βέλτιστος κύκλος για κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή «Circle Best-Fit» του

προγράμματος Axyz που εντοπίζεται στην γραμμή εργαλείων. Μέσα από την εφαρμογή αυτή επιλέχθηκαν τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε σειρά μετρήσεων για να υπολογιστούν οι βέλτιστοι κύκλοι.

Σχετικά με το πρώτο στάδιο του δεύτερου μέρους επεξεργασίας πρέπει να τονιστεί ότι ενώ στην περίπτωση της Ιης και της ΙΙης σειράς των μετρήσεων υπολογίστηκαν οι βέλτιστοι κύκλοι χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία που είχαν μετρηθεί, στην περίπτωση της ΙΙης σειράς μετρήσεων λόγω των προβλημάτων με τη χρήση της hidden point bar κάποια σημεία αποκλειστήκαν από την τελική επίλυση. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία του υπολογισμού των βέλτιστων κύκλων, έγινε μετατροπή του συστήματος αναφοράς, ώστε οι συντεταγμένες των μετρημένων σημείων να μετατραπούν από καρτεσιανές (X,Y,Z) σε κυλινδρικές (R,H,Z).

Το νέο σύστημα αναφοράς που εξυπηρετεί καλύτερα την ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1 και ορίζεται με βάση το κέντρο του κύκλου που δημιουργείται από τα σημεία που μετρήθηκαν κατά την Ιη σειρά μετρήσεων.



Σχήμα 8.1: Σύστημα αναφοράς κυλινδρικών συντεταγμένων (δεξιόστροφο)
Figure 8.1: Cylindrical Coordinate System (clockwise)

Η συντεταγμένη R εκφράζει την απόσταση (σε mm) του κάθε σημείου από το κέντρο του κύκλου, δηλαδή το μήκος της ακτίνας που αντιστοιχεί για το κάθε σημείο. Η συντεταγμένη H εκφράζει το μέγεθος (σε μοίρες), της δεξιόστροφης γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της ακτίνας που είναι παράλληλη με τον άξονα X, όπως είχε οριστεί από το λογισμικό για τις καρτεσιανές συντεταγμένες, και της ακτίνας που ενώνει το κέντρο του κύκλου με οποιοδήποτε άλλο σημείο της περιφέρειας. Η συντεταγμένη Z

εκφράζει την απόσταση (σε mm) του κάθε σημείου από το επίπεδο που ορίζει ο κύκλος που δημιουργείται από τα σημεία που μετρήθηκαν.

8.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

8.2.1. Ακρίβεια εντοπισμού

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της ακρίβειας του προσδιορισμού της θέσης του κάθε σημείου, σε κάθε σειρά μετρήσεων, από τους Πίνακες 7.4, 7.5 και 7.6 απομονώθηκαν οι στήλες Std X, Std Y και Std Z. Με βάση αυτές τις στήλες, που περιέχουν τα τυπικά σφάλματα των συντεταγμένων του κάθε σημείου, υπολογίστηκε η μέση τιμή του τυπικού σφάλματος της κάθε συντεταγμένης για το σύνολο των μετρημένων σημείων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.

Σημειώνεται ότι από τη 1η σειρά χρησιμοποιήθηκαν, μόνο για αυτό το στάδιο επεξεργασίας, μόνο τα σημεία για τον προσδιορισμό των οποίων μετρήθηκε και απόσταση από τα δύο όργανα, για να διαπιστωθεί το επιπλέον σφάλμα που εισάγει αυτή η επιπλέον παράμετρος στα τελικά αποτελέσματα.

| Σειρά μετρήσεων | Μέσες τιμές τυπικών σφαλμάτων | | |
|-----------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| | σ_x (mm) | σ_y (mm) | σ_z (mm) |
| 1 | $0,067 \pm 0,005$ | $0,289 \pm 0,002$ | $0,134 \pm 0,011$ |
| 2 | $0,113 \pm 0,031$ | $0,480 \pm 0,152$ | $0,121 \pm 0,025$ |
| 3 | $0,459 \pm 0,139$ | $0,788 \pm 0,170$ | $0,308 \pm 0,087$ |

Πίνακας 8.1: Σύγκριση ακρίβειας μεθόδων 3D προσδιορισμού θέσης
Table 8.1: Comparison of 3D measurement methods

Όπως διαπιστώνεται, η εισαγωγή του παράγοντα της απόστασης στα δεδομένα που μετρούνται σε μια σειρά μετρήσεων, μειώνει την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου στο χώρο. Αυτή η μείωση της ακρίβειας είναι μικρότερης κλίμακας όταν χρησιμοποιούνται δύο όργανα ταυτόχρονα. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις γίνονται από ένα μόνο όργανο, η ασάφεια του προσδιορισμού θέσης σχεδόν τριπλασιάζεται.

8.2.2. Έλεγχος κυκλικότητας

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 8.1, πριν εξαχθούν τα αποτελέσματα του δεύτερου και του τρίτου μέρους της διαδικασίας της επεξεργασίας έγινε μετατροπή του συστήματος

αναφοράς, ώστε οι συντεταγμένες των μετρημένων σημείων να μετατραπούν από καρτεσιανές (X,Y,Z) σε κυλινδρικές (R,H,Z).

Αυτή η μετατροπή έγινε καθώς το κυλινδρικό σύστημα αναφοράς εξυπηρετεί καλύτερα την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι η συντεταγμένη R δίνει το μήκος της ακτίνας του κύκλου στο συγκεκριμένο σημείο, κάνοντας έτσι εύκολη τη διαπίστωση της αποχής από την ακτίνα του βέλτιστου κύκλου, η συντεταγμένη H δίνει τη θέση του σημείου στην περιφέρεια του νομέα και η συντεταγμένη Z δίνει την αποχή του κάθε σημείου από το βέλτιστο επίπεδο που ορίζει ο κύκλος.

Στους Πίνακες 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται οι κυλινδρικές συντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν πάνω στην περιφέρεια του νομέα κατά την Ιη σειρά μετρήσεων, καθώς και αυτές των σημείων της Ιης σειράς που μετρήθηκαν στην περιφέρεια του πρώτου εσωτερικού δακτυλίου στήριξης μέσα στον νομέα. Στον πίνακα 8.4 εμφανίζονται οι κυλινδρικές συντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της ΙΙης σειράς μετρήσεων.

Καθώς οι μετρήσεις της Ιης και της Ιης σειράς μετρήσεων έγιναν με την ίδια διαδικασία, χρησιμοποιήθηκε ένα αρχείο και οι συντεταγμένες θα μπορούσαν να εμφανίζονται και σε έναν κοινό πίνακα. Ένας άλλος λόγος που θα δικαιολογούσε αυτή τη συγχώνευση είναι για να γίνει καλύτερα η σύγκριση μεταξύ των δύο κύκλων που θα σχηματιστούν (θα πρέπει να είναι ομόκεντροι και με διαφορά ακτίνας ίση με το πάχος του δακτυλίου).

Τα στοιχεία της Ιης σειράς μετρήσεων έχουν μπροστά στο όνομα το πρόθεμα « es_ » που δηλώνει ότι πρόκειται για τον εσωτερικό δακτύλιο. Επίσης, σημειώνεται ότι, το σημείο cent1 είναι το κέντρο του κύκλου της περιφέρειας του νομέα, ενώ cent2 είναι το κέντρο του κύκλου από τις μετρήσεις στον εσωτερικό δακτύλιο στήριξης.

Στον Πίνακα 8.4 που εμφανίζονται τα δεδομένα της ΙΙης σειράς μετρήσεων, ως center έχει ονομαστεί το κέντρο του κύκλου που δημιουργήθηκε από τις συγκεκριμένες μετρήσεις.

| Point ID | R (mm) | H (deg) | Z (mm) | Std R (mm) | Std H (deg) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|----------|----------|----------|--------|------------|-------------|------------|-----------------|
| cent1 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 | 0.878 | 0.0522 | 0.632 | 0.0000 |
| perif1 | 3103.241 | 270.0000 | -4.286 | 0.065 | 0.0010 | 0.284 | 5.1962 |
| perif2 | 3105.278 | 285.1362 | 4.637 | 0.058 | 0.0014 | 0.289 | 19.3733 |
| perif3 | 3105.033 | 300.1653 | -1.823 | 0.050 | 0.0018 | 0.296 | 0.2831 |
| perif4 | 3104.140 | 247.8265 | -1.673 | 0.067 | 0.0009 | 0.280 | 28.6671 |
| perif5 | 3103.995 | 240.1214 | 0.141 | 0.065 | 0.0010 | 0.280 | 0.2973 |
| perif6 | 3103.999 | 225.0467 | -1.351 | 0.059 | 0.0014 | 0.282 | 90.3113 |
| perif7 | 3103.702 | 211.0997 | 3.560 | 0.051 | 0.0017 | 0.284 | 2.7031 |
| perif8 | 3100.722 | 194.4710 | 0.796 | 0.047 | 0.0021 | 0.287 | 77.5436 |
| perif9 | 3098.468 | 180.3382 | 0.854 | 0.058 | 0.0024 | 0.288 | 109.4171 |
| perif10 | 3100.354 | 330.1238 | -1.934 | 0.063 | 0.0025 | 0.308 | 34.5373 |
| perif11 | 3099.028 | 343.2672 | 0.054 | 0.085 | 0.0026 | 0.310 | 28.5729 |
| perif12 | 3097.041 | 157.1678 | 1.185 | 0.096 | 0.0025 | 0.288 | 51.6782 |
| perif13 | 3099.211 | 147.6340 | -1.947 | 0.114 | 0.0024 | 0.286 | 73.1567 |
| perif14 | 3096.898 | 2.3630 | 2.223 | 0.123 | 0.0025 | 0.309 | 42.0886 |
| perif15 | 3097.620 | 13.5770 | 2.174 | 0.145 | 0.0024 | 0.307 | 45.1886 |
| perif16 | 3103.209 | 43.0371 | -0.089 | 0.188 | 0.0016 | 0.295 | 20.1776 |
| perif17 | 3105.547 | 63.5440 | 0.524 | 0.201 | 0.0010 | 0.287 | 64.8085 |
| perif18 | 3107.172 | 76.2342 | -1.398 | 0.202 | 0.0009 | 0.283 | 5.9911 |
| perif19 | 3106.634 | 90.2240 | -1.262 | 0.196 | 0.0010 | 0.281 | 19.8995 |
| perif20 | 3105.281 | 97.6134 | -1.141 | 0.190 | 0.0012 | 0.280 | 45.1911 |
| perif21 | 3100.484 | 121.1749 | 0.756 | 0.161 | 0.0019 | 0.282 | 13.9799 |

Πίνακας 8.2: Δεδομένα πρώτης και δεύτερης σειράς μετρήσεων
Table 8.2: Data from the first and second set of measurements

| Point ID | R (mm) | H (deg) | Z (mm) | Std R (mm) | Std H (deg) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|-------------|----------|----------|----------|------------|-------------|------------|-----------------|
| cent2 | 74.913 | 94.9971 | -665.127 | 64.992 | 60.5773 | 51.362 | 0.0000 |
| es_perif1 | 2893.440 | 272.4703 | -726.809 | 0.097 | 0.0014 | 0.362 | 0.0000 |
| es_perif1 | 2796.545 | 272.6959 | -731.792 | 0.069 | 0.0012 | 0.290 | 9.9882 |
| es_perif1 | 2400.617 | 273.8085 | -752.182 | 0.075 | 0.0015 | 0.290 | 9.3842 |
| es_perif2 | 2303.878 | 268.4390 | 154.876 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif2 | 2400.598 | 273.8088 | -752.280 | 0.080 | 0.0015 | 0.319 | 27.2389 |
| es_perif3 | 2555.990 | 281.2796 | -408.507 | 1.035 | 0.0873 | 3.522 | 0.0000 |
| es_perif3 | 2409.315 | 274.3332 | -730.640 | 0.079 | 0.0015 | 0.318 | 472.1268 |
| es_perif3 | 2400.359 | 273.8109 | -753.446 | 0.080 | 0.0015 | 0.319 | 26.7211 |
| es_perif4 | 2555.314 | 281.1489 | -403.362 | 1.045 | 0.0876 | 3.412 | 0.0000 |
| es_perif4 | 2409.222 | 274.3332 | -731.065 | 0.079 | 0.0015 | 0.318 | 470.3332 |
| es_perif4 | 2400.272 | 273.8218 | -754.217 | 0.080 | 0.0015 | 0.319 | 29.1573 |
| es_perif5 | 2891.336 | 272.6973 | -693.318 | 0.183 | 0.0030 | 0.784 | 0.0000 |
| es_perif5 | 2609.249 | 273.2922 | -728.137 | 0.074 | 0.0014 | 0.303 | 7754227.34 |
| es_perif5 | 2400.495 | 273.8230 | -753.929 | 0.078 | 0.0015 | 0.304 | 37.7919 |
| es_perif6 | 3256.024 | 232.5007 | 107.902 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif7 | 2892.408 | 165.2373 | 18.092 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif8 | 2955.815 | 103.2818 | -56.778 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif9 | 2905.697 | 35.0965 | 9.211 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif10 | 2856.927 | 4.3208 | 48.616 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif6b0 | 2860.641 | 319.7990 | -693.548 | 0.052 | 0.0024 | 0.299 | 306.0187 |
| es_perif6b2 | 2803.684 | 221.1925 | 74.679 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |
| es_perif6b3 | 2803.759 | 221.1804 | 76.226 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0000 |

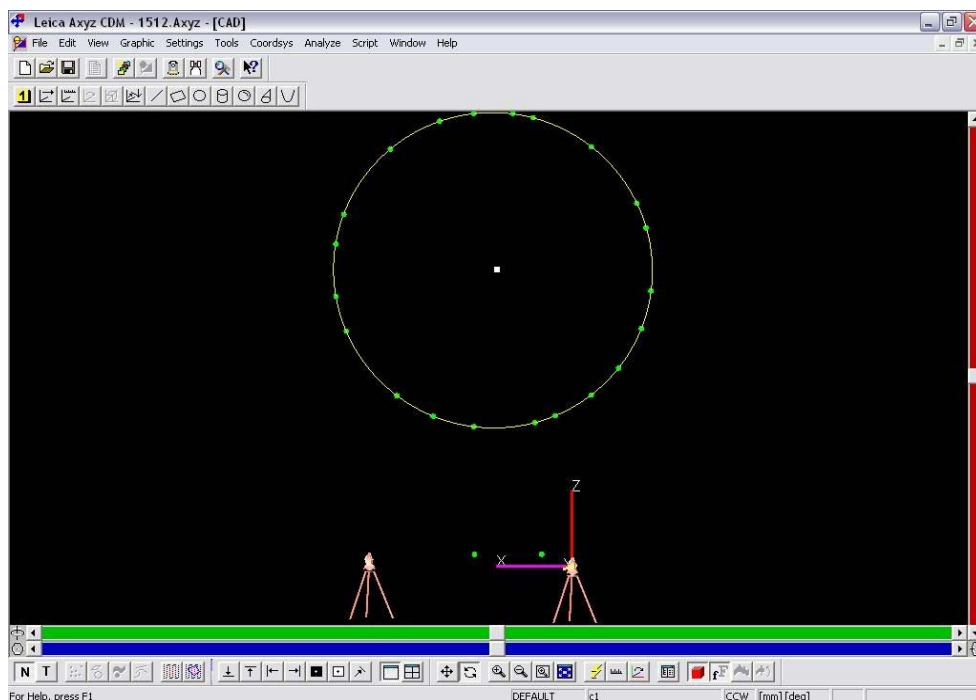
Πίνακας 8.3 Δεδομένα δεύτερης σειράς μετρήσεων
Table 8.3: Data from the second set of measurements

| Point ID | R (mm) | H (deg) | Z (mm) | Std R (mm) | Std H (deg) | Std Z (mm) | Mean Error (mm) |
|----------|----------|----------|--------|------------|-------------|------------|-----------------|
| 5001 | 3073.428 | 90.0000 | -0.211 | 0.187 | 0.0016 | 0.983 | 1.0000 |
| 5002 | 3074.092 | 70.3530 | -1.398 | 0.181 | 0.0021 | 0.981 | 1.0000 |
| 5003 | 3071.473 | 31.3006 | 0.358 | 0.067 | 0.0062 | 0.946 | 1.0000 |
| 5004 | 3068.796 | 12.5787 | 2.280 | 0.116 | 0.0072 | 0.921 | 1.0000 |
| 5005 | 3068.257 | 349.4829 | -1.237 | 0.255 | 0.0074 | 0.888 | 1.0000 |
| 5006 | 3078.546 | 290.6013 | -0.425 | 0.536 | 0.0034 | 0.830 | 1.0000 |
| 5007 | 3071.043 | 239.4165 | -0.370 | 0.547 | 0.0030 | 0.828 | 1.0000 |
| 5008 | 3069.312 | 213.9363 | 0.476 | 0.462 | 0.0054 | 0.845 | 1.0000 |
| 5009 | 3069.461 | 165.9737 | 0.445 | 0.195 | 0.0074 | 0.902 | 1.0000 |
| 5010 | 3073.484 | 134.0727 | 0.083 | 0.068 | 0.0061 | 0.946 | 1.0000 |
| center | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.251 | 0.0673 | 0.856 | 0.0000 |

Πίνακας 8.4: Δεδομένα τρίτης σειράς μετρήσεων
Table 8.4: Data from the third set of measurements

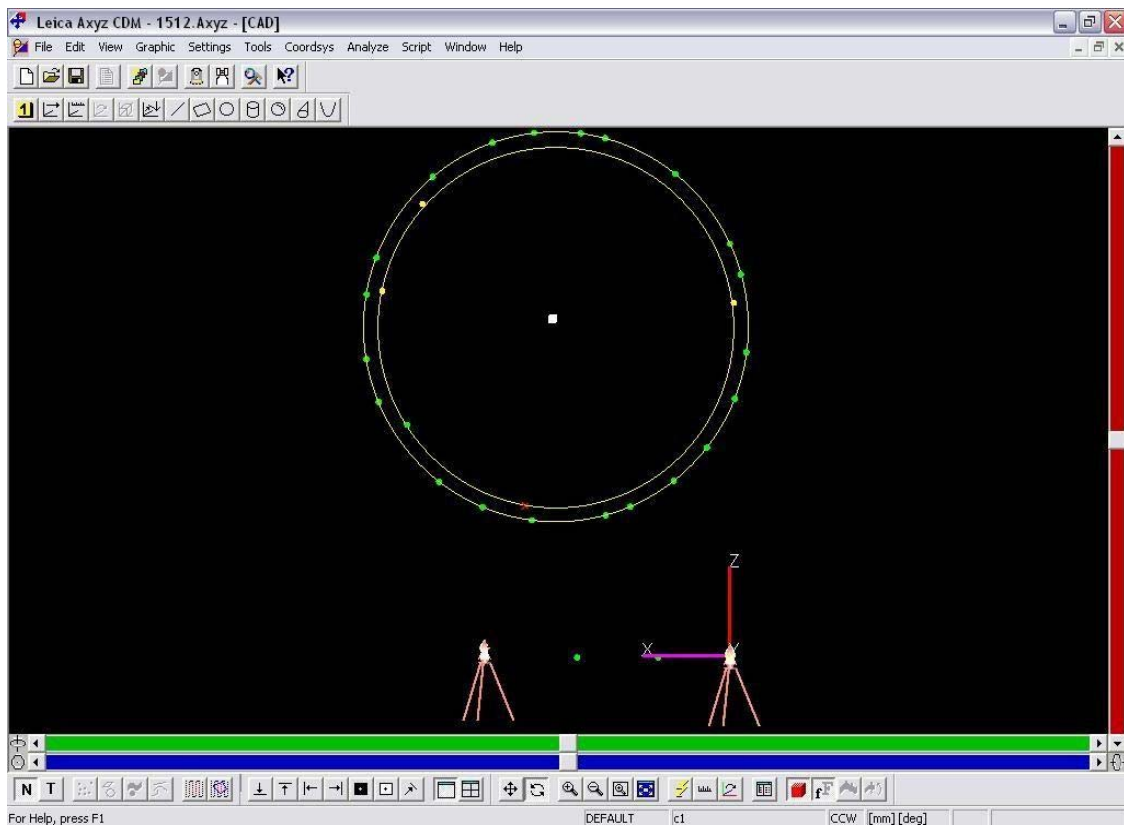
8.2.2.A Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση όλων των μετρημένων σημείων

Χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία που είχαν μετρηθεί κατά την 1η σειρά μετρήσεων, υπολογίστηκε από την εφαρμογή «Circle Best-Fit» ο βέλτιστος κύκλος με κέντρο cent1(2993.780, -12065.729, 5252.146) ή (0,0,0) σε κυλινδρικές συντεταγμένες που έχει μηδενικές συντεταγμένες γιατί ορίστηκε ως η αρχή του συστήματος αναφοράς των κυλινδρικών συντεταγμένων των μετρημένων σημείων για τις δύο πρώτες σειρές μετρήσεων και ακτίνα 3102.236 mm. Στο Σχήμα 8.2 εμφανίζεται σε μορφή CAD ο κύκλος αυτός μαζί με τα σημεία που περιλήφθηκαν κατά τον προσδιορισμό του μέσα από την εφαρμογή «Graphic Viewer CAD» του προγράμματος Axyz.



Σχήμα 8.2: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD του βέλτιστου κύκλου της πρώτης σειράς μετρήσεων
Figure 8.2: Best-fit circle for the first set of measurements in CAD form

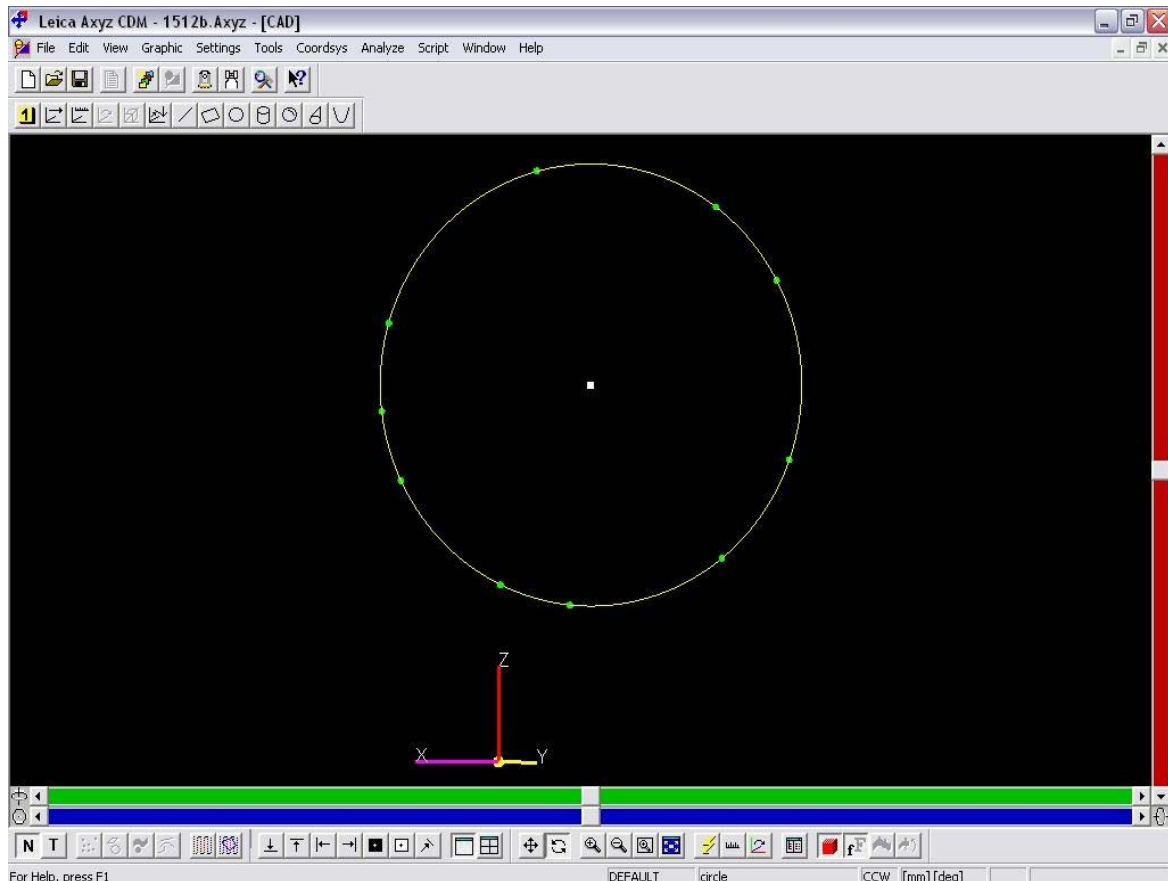
Για τη 11η σειρά μετρήσεων χρησιμοποιώντας το ίδιο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη σειρά μετρήσεων προκειμένου να γίνει και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο αυτών πρώτων σειρών, υπολογίστηκε ο βέλτιστος κύκλος με κέντρο cent2(2988.850, -12730.994, 5325.663) ή (74.913,94.9971,-665.127) σε κυλινδρικές συντεταγμένες και ακτίνα 2817.884 mm. Σημειώνεται ότι στην επίλυση δεν χρησιμοποιήθηκαν το σημείο es_perif6 που η συντεταγμένη R₆ που αντιστοιχεί σε αυτό είναι υπερβολικά μεγάλη (μεγαλύτερη από την ακτίνα του νομέα) και es_perif2 που κατά τον υπολογισμό του μετρήθηκε μόνο ο ένας στόχος της hidden point bar αντί για δύο. Οι συντεταγμένες του κέντρου, λαμβάνοντας υπόψη και τα προβλήματα που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τη hidden point bar θεωρούνται ανεκτά σωστές. Σύμφωνα με αυτές το κέντρο του βέλτιστου κύκλου, που περιλαμβάνει καλύτερα τα σημεία της 11ης σειράς μετρήσεων, είναι ≈ 75 mm μακρύτερα από το κέντρο του βέλτιστου κύκλου που είχε υπολογιστεί προηγουμένως για την πρώτη σειρά μετρήσεων, κατά τη διεύθυνση της ακτίνας που αντιστοιχεί σε γωνία περίπου 95° και ότι βρίσκεται $\approx 66,5$ cm πιο πίσω από το επίπεδο που ορίζει ο βέλτιστος κύκλος της πρώτης σειράς μετρήσεων. Στο Σχήμα 8.3 εμφανίζεται σε μορφή CAD ο κύκλος αυτός μαζί με τον αντίστοιχο της πρώτης σειράς για αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων:



Σχήμα 8.3: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD των βέλτιστων κύκλων των δύο πρώτων σειρών μετρήσεων

Figure 8.3: Best-fit circle for the first two sets of measurements in CAD form

Χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία που μετρήθηκαν στην ΙΙΙη σειρά μετρήσεων υπολογίστηκε ο βέλτιστος κύκλος με κέντρο center(-6258.552, -10373.614, 5153.652) ή (0,0,0) σε κυλινδρικές συντεταγμένες, που έχει μηδενικές συντεταγμένες γιατί ορίστηκε ως η αρχή του συστήματος αναφοράς των κυλινδρικών συντεταγμένων των μετρημένων σημείων και ακτίνα 3071.785 mm. Στο Σχήμα 8.4 εμφανίζεται σε μορφή CAD ο βέλτιστος κύκλος των μετρήσεων της ΙΙΙης σειράς :



Σχήμα 8.4: Σχηματική αναπαράσταση σε μορφή CAD του βέλτιστου κύκλου της τρίτης σειράς μετρήσεων
Figure 8.4: Best-fit circle for the third set of measurements in CAD form

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους του ελέγχου της κυκλικότητας, σχετικά με αυτά της Ιης σειράς μετρήσεων και ιδιαίτερα το μέγεθος της ακτίνας του βέλτιστου κύκλου, δεδομένου ότι οι συντεταγμένες του κέντρου επιλέχθηκαν ως η αρχή του συστήματος αναφοράς, εκτιμήθηκε από τον υπεύθυνο Τοπογράφο Μηχανικό ιδιαίτερα ακριβές καθώς ήταν πολύ μικρή η απόκλιση του από τις προδιαγραφές που δίνει ο κατασκευαστής των νομέων. Η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου που αντιστοιχεί στις μετρήσεις της Ιης σειράς δεν ήταν ακριβής, καθώς αν προστεθεί σε αυτή και το εύρος του δακτυλίου στήριξης, που είναι ≈ 30 cm, γίνεται 3117.884 mm, που έχει διαφορά από την ακτίνα της πρώτης σειράς ίση με 15.648 mm. Η διαφορά στο μέγεθος της ακτίνας αλλά

και η απόκλιση του κέντρου κατά ≈ 75 mm οφείλονται κυρίως στα λάθη που έγιναν κατά τις μετρήσεις με τη hidden point bar και στο γεγονός ότι ο αριθμός των σημείων που μετρήθηκαν λόγω μη αμοιβαίας ορατότητας και από τα δύο όργανα αλλά και η γεωμετρία τους δεν ήταν ικανοποιητικά ούτως ώστε να παραχθούν τα ακριβέστερα δυνατά αποτελέσματα.

Επίσης, σημειώνεται ότι από τα ναυπηγεία λόγω απορρήτου σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις δεν δόθηκε η ακριβής τιμή κανενός μεγέθους που αφορούσε προδιαγραφές του νομέα (ακριβής ακτίνα περιφέρεια νομέα, απόσταση του πρώτου δακτυλίου στήριξης από την αρχή του νομέα και ακριβής ακτίνα ή ακριβές πάχος των δακτυλίων στήριξης), γι' αυτό και αναφέρονται πάντα με τη λέξη «περίπου».

Τέλος, για την IIIη σειρά μετρήσεων, καθώς η απόσταση του κέντρου του ανακλαστικού στόχου και του σημείου που υλοποιείται από αυτόν σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία είναι 3 cm η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου γίνεται 3101.785 mm και διαφέρει μόνο κατά 0.451 mm από της ακτίνα που είχε υπολογιστεί κατά την πρώτη σειρά μετρήσεων και είχε χαρακτηριστεί σχεδόν ταυτόσημη με αυτή που δίνεται από τον κατασκευαστή των νομέων. Τα παραπάνω αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8.5:

| Σειρά μετρήσεων | | Πρώτη | Δεύτερη | Τρίτη |
|--|--------------------------------|---|--|---|
| Κέντρο | Καρτεσιανές συντεταγμένες (mm) | X = 2993.780 Y = -12065.729 Z = 5252.146 | X = 2988.850 Y = -12730.994 Z = 5325.663 | X = -6258.552 Y = -10373.614 Z = 5153.652 |
| | Κυλινδρικές συντεταγμένες | R=0 mm H=0 degrees Z=0 mm (αρχή του συστήματος αναφοράς) | R=74.913 mm H=94.9971 degrees Z=-665.127 mm (σε σχέση με το κέντρο της πρώτης σειράς) | R=0 mm H=0 degrees Z=0 mm (αρχή του συστήματος αναφοράς) |
| Ακτίνα (διορθωμένη) | | 3102.236 mm | 3117.884 mm | 3101.785 mm |
| Τυπικό σφάλμα ακτίνας | | 0.632 mm | 51.355 mm | 0.856 mm |
| Διαφορά ακτίνας (σε σχέση με την πρώτη σειρά) | | — | 15.648 mm | 0.451 mm |
| Σχολιασμός ακρίβειας (από τον υπεύθυνο τοπογράφο των ναυπηγείων) | | Ιδιαίτερα ακριβής | Σχετικά ακριβής (λόγω των λαθών που έγιναν) | Ιδιαίτερα ακριβής |

Πίνακας 8.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών σειρών μετρήσεων

Table 8.5: Comparison between the results of the three sets of measurements

8.2.2.B Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση διαφορετικού πλήθους σημείων

Περνώντας στο δεύτερο μέρος της επεξεργασίας, που σχετίζεται με τον έλεγχο της κυκλικότητας του νομέα του υποβρυχίου, έγιναν επιπρόσθετα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του πλήθους των σημείων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κύκλου που αντιστοιχεί στην περιφέρεια του νομέα, μια σειρά επιλύσεων μέσω της εφαρμογής «Circle Best-Fit» για 7, 9, 12, 15 και 18 σημεία της πρώτης σειράς μετρήσεων και για 5, 7 και 9 της τρίτης σειράς. Τα σημεία που επιλέχθηκαν είχαν καλή γεωμετρία πάνω στο νομέα ώστε να επηρεάζονται τα αποτελέσματα μόνο από τον παράγοντα του πλήθους των παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή για τα σημεία της Ιης σειράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.6 ενώ για τα σημεία της ΙΙης σειράς στον Πίνακα 8.7. Σημειώνεται ότι και για τις δύο περιπτώσεις οι συντεταγμένες των κέντρων των βέλτιστων κύκλων είναι με βάση το κέντρο του βέλτιστου κύκλου που είχε προκύψει από την επίλυση με όλα τα σημεία για κάθε σειρά μετρήσεων. Επίσης αναφέρεται ότι στις ακτίνες των βέλτιστων κύκλων του Πίνακα 8.7 έχει προστεθεί η απόσταση του κέντρου του στόχου από το σημείο που υλοποιούσε (3 cm).

| Αριθμός σημείων που χρησιμοποιήθηκαν | Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | Κέντρο βέλτιστου κύκλου (X, Y, Z) (mm) (R, H, Z) (mm, degrees, mm) | Ακτίνα (mm) | Τυπικό σφάλμα ακτίνας (mm) |
|--------------------------------------|---|--|-------------|----------------------------|
| 6 | 5, 7, 10, 13, 16, 20 | (2993.515, -12066.038, 5252.343) (0.334, 136.5599, -0.305) | 3102.581 | 1.103 |
| 9 | 2, 5, 8, 10, 12, 15, 16, 17, 20 | (2994.180, -12064.962, 5252.252) (0.426, 7.1001, 0.761) | 3102.073 | 1.030 |
| 12 | 2, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 20 | (2993.412, -12064.867, 5251.577) (0.670, 230.7760, 0.869) | 3102.070 | 0.893 |
| 15 | 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 20 | (2993.818, -12065.350, 5252.200) (0.948, 196.1520, 0.130) | 3102.197 | 0.807 |
| 18 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 | (2993.934, -12065.813, 5251.909) (0.282, 295.3748, -0.086) | 3102.315 | 0.725 |

Πίνακας 8.6: Επιλύσεις για τα σημεία της πρώτης σειράς μετρήσεων
Table 8.6: Solutions for the first set of measurements

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8.6 φαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση η ακτίνα είναι πολύ κοντά σε αυτήν που πρόκυψε από την επίλυση με όλα τα μετρημένα σημεία. Σχετικά με το τυπικό σφάλμα ισχύει ότι όσο μεγαλώνει ο αριθμός των σημείων που χρησιμοποιούνται στην επίλυση τόσο μικραίνει αυτό.

| Αριθμός σημείων που χρησιμοποιήθηκαν | Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | Κέντρο βέλτιστου κύκλου (X, Y, Z) (mm) (R, H, Z) (mm, degrees, mm) | Ακτίνα (mm) | Τυπικό σφάλμα ακτίνας (mm) |
|--------------------------------------|-----------------------------|---|-------------|----------------------------|
| 5 | 1, 3, 5, 7, 9 | (-6258.744, -10373.256, 5152.035) (1.650, 106.9214, -0.240) | 3100.539 | 0.783 |
| 7 | 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9 | (-6258.532, -10373.301, 5151.383) (2.272, 98.4152, -0.291) | 3100.649 | 0.564 |
| 9 | 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 | (-6258.761, -10373.678, 5154.184) (0.556, 258.6541, 0.148) | 3101.541 | 0.913 |

Πίνακας 8.7: Επιλύσεις για τα σημεία της τρίτης σειράς μετρήσεων

Table 8.7: Solutions for the third set of measurements

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8.7 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των σημείων που χρησιμοποιούνται στην επίλυση τόσο πλησιάζει η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου, την αντίστοιχη τιμή που είχε υπολογιστεί χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία. Σχετικά με τα τυπικά σφάλματα όσο αυξάνουν τα μετρημένα σημεία και εισάγει το καθένα ένα επιπλέον σφάλμα λόγω μέτρησης της απόστασης, είναι λογικό να μεγαλώνει και το τυπικό σφάλμα. Το γεγονός ότι για την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν 7 σημεία, το τυπικό σφάλμα ελαττώθηκε μπορεί να οφείλεται στη γεωμετρία των σημείων (μικρότερες αποστάσεις από το όργανο για τα σημεία που προστέθηκαν).

8.2.2.C Εύρεση βέλτιστων κύκλων με χρήση συνδυασμών από τρία σημεία με καλή γεωμετρία αλλά και από πέντε σημεία με δυσμενή γεωμετρία

Τέλος στο τρίτο μέρος της επεξεργασίας, που σχετίζεται με τον έλεγχο της κυκλικότητας του νομέα του υποβρυχίου, έγιναν επιπρόσθετα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας των σημείων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κύκλου που αντιστοιχεί στην περιφέρεια του νομέα, μια σειρά επιλύσεων μέσω της εφαρμογής «Circle Best-Fit» για πέντε διαφορετικές τριάδες σημείων για κάθε μία από τις σειρές I και III των μετρήσεων, προσέχοντας τα σημεία που επιλέχτηκαν κάθε φορά να έχουν καλή γεωμετρία. Για να εξεταστεί και η αντίθετη περίπτωση εφαρμόστηκαν επιπλέον δύο επιλύσεις του βέλτιστου κύκλου για κάθε μία από τις δύο σειρές μετρήσεων όπου τα σημεία ήταν στη μια περίπτωση όλα στο πάνω μέρος του νομέα και στην άλλη περίπτωση όλα στο κάτω. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή για τα σημεία της πρώτης σειράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.8 ενώ για τα σημεία της τρίτης σειράς στον Πίνακα 8.9. Όπως και στο δεύτερο μέρος του ελέγχου κυκλικότητας έτσι και εδώ ισχύει ότι, οι συντεταγμένες των κέντρων των βέλτιστων κύκλων είναι με βάση το κέντρο του βέλτιστου κύκλου που είχε προκύψει από την επίλυση με όλα τα σημεία για κάθε σειρά μετρήσεων και ότι στις ακτίνες των βέλτιστων κύκλων της τρίτης

σειράς έχει προστεθεί η απόσταση του κέντρου του στόχου από το σημείο που υλοποιούσε (3 cm).

| Πρώτη σειρά μετρήσεων | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|--|--|--|--|
| | | Σημεία με καλή γεωμετρία | | | | |
| Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | | 1, 12, 15 | 3, 9, 17 | 5, 14, 21 | 7, 10, 19 | 8, 10, 18 |
| Κέντρο | Καρτεσιανές συντεταγμένες (mm) | X=2994.296 Y=-12065.481 Z=5247.670 | X=2998.312 Y=-12065.831 Z=5253.177 | X=2990.578 Y=-12064.742 Z=5249.640 | X=2991.428 Y=-12065.645 Z=5254.910 | X=2993.622 Y=-12066.484 Z=5256.997 |
| | Κυλινδρικές συντεταγμένες (mm, deg, mm) | R=4.506 H=269.2494 Z=0.241 | R=4.645 H=5.4507 Z=-0.178 | R=4.053 H=210.8233 Z=1.042 | R=3.628 H=123.0139 Z=0.122 | R=4.853 H=84.6481 Z=-0.754 |
| Ακτίνα (mm) | | 3098.738 | 3103.094 | 3100.461 | 3103.584 | 3102.371 |
| Τυπικό σφάλμα (mm) | | 0.113 | 0.110 | 0.111 | 0.110 | 0.113 |
| Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα της | | | 3101.650 ± 0.901 mm | | | |
| | | Σημεία με δυσμενή γεωμετρία | | | | |
| Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | | 1, 2, 4, 5, 6 (κάτω) | | | 16, 17, 18, 19, 20 (πάνω) | |
| Κέντρο | Καρτεσιανές συντεταγμένες (mm) | X = 994.735 Y = -12038.111 Z = 5258.340 | | | X = 2995.431 Y = -12067.616 Z = 5272.522 | |
| | Κυλινδρικές συντεταγμένες (mm, deg, mm) | R=6.367 H=69.7718 Z=27.595 | | | R=20.439 H=78.0841 Z=-1.925 | |
| Ακτίνα (mm) | | 3110.177 | | | 3086.338 | |
| Τυπικό σφάλμα (mm) | | 19.355 | | | 6.346 | |
| Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα της | | | | 3098.258 ± 11.920 mm | | |

Πίνακας 8.8: Έλεγχος της επίδρασης της γεωμετρίας των σημείων της πρώτης σειράς μετρήσεων στην επίλυση του βέλτιστου κύκλου

Table 8.8: Control of the affection of the first set of measurements geometry on the best-fit circle solution

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8.8 φαίνεται ότι στην περίπτωση της χρήσης τριών σημείων με καλή γεωμετρία η διαφορά στην μέση ακτίνα από την ακτίνα που είχε προκύψει από την ακτίνα που είχε υπολογιστεί χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία είναι 0.586 mm και το τυπικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο και αυτό κατά 0.150 mm. Στην περίπτωση της χρήσης σημείων με δυσμενή γεωμετρία φαίνεται από τον Πίνακα 8.8, ότι η αντίστοιχη διαφορά της ακτίνας είναι σαφώς μεγαλύτερη καθώς είναι 3.527 mm, όπως επίσης σαφώς μεγαλύτερο είναι και το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής της ακτίνας, καθώς είναι μεγαλύτερο κατά 11.288 mm.

| Τρίτη σειρά μετρήσεων | | | | | | |
|---------------------------------|--|---|---|---|---|---|
| | | Σημεία με καλή γεωμετρία | | | | |
| Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | | 1, 5, 8 | 2, 5, 7 | 2, 6, 10 | 3, 6, 9 | 4, 7, 10 |
| Κέντρο | Καρτεσιανές συντεταγμένες (mm) | X=-6259.286 Y=-10372.952 Z=5150.230 | X=-6260.892 Y=-10371.493 Z=5150.085 | X=-6257.570 Y=-10373.578 Z=5156.109 | X=-6257.355 Y=-10374.373 Z=5159.339 | X=-6260.953 Y=-10373.310 Z=5152.169 |
| | Κυλινδρικές συντεταγμένες (mm,deg, mm) | R=3.551 H=110.9477 Z=-0.281 | R=4.677 H=135.7796 Z=-0.904 | R=2.606 H=294.9828 Z=-0.456 | R=5.858 H=289.3727 Z=0.170 | R=2.734 H=152.6185 Z=0.763 |
| Ακτίνα (mm) | | 3100.112 | 3102.150 | 3105.947 | 3102.689 | 3100.892 |
| Τυπικό σφάλμα (mm) | | 0.338 | 0.377 | 0.351 | 0.338 | 0.337 |
| Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα της | | | 3102.358 ± 1.006 mm | | | |
| | | Σημεία με δυσμενή γεωμετρία | | | | |
| Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν | | 1, 2, 3, 9, 10 (κάτω) | | | 4, 5, 6, 7, 8 (πάνω) | |
| Κέντρο | Καρτεσιανές συντεταγμένες (mm) | X=-6258.557 Y=-10374.725 Z=5147.830 | | | X=-6256.975 Y=-10375.938 Z=5163.862 | |
| | Κυλινδρικές συντεταγμένες (mm,deg, mm) | R= 5.841 H=90.8049 Z=1.003 | | | R=10.494 H=288.8357 Z=1.418 | |
| Ακτίνα (mm) | | 3098.385 | | | 3095.934 | |
| Τυπικό σφάλμα (mm) | | 1.045 | | | 2.050 | |
| Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα της | | | 3097.160 ± 1.226 mm | | | |

Πίνακας 8.9: Έλεγχος της επίδρασης της γεωμετρίας των σημείων της τρίτης σειράς μετρήσεων στην επίλυση του βέλτιστου κύκλου

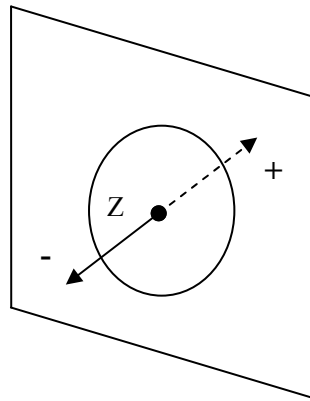
Table 8.9: Control of the affection of the third set of measurements geometry on the best-fit circle solution

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8.9 φαίνεται ότι στην περίπτωση της χρήσης τριών σημείων με καλή γεωμετρία η διαφορά στην μέση ακτίνα από την ακτίνα που είχε προκύψει από την ακτίνα που είχε υπολογιστεί χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία είναι 0.573 mm και το τυπικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο και αυτό κατά 0.269 mm. Στην περίπτωση της χρήσης σημείων με δυσμενή γεωμετρία φαίνεται από τον Πίνακα 8.8, ότι η αντίστοιχη διαφορά της ακτίνας είναι σαφώς μεγαλύτερη καθώς είναι 4.625 mm, όπως επίσης μεγαλύτερο είναι και το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής της ακτίνας, καθώς είναι μεγαλύτερο κατά 0.370 mm, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όπως στην περίπτωση των σημείων με δυσμενή γεωμετρία της πρώτης σειράς μετρήσεων.

8.2.3. Έλεγχος επιπεδότητας

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος της επιπεδότητας, όπου εφαρμόστηκε ένα βέλτιστο επίπεδο με χρήση όλων των σημείων που μετρήθηκαν κατά την πρώτη και την IIIη σειρά

μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή του λογισμικού Axyz «Plane Best-Fit». Το σύστημα αναφοράς στο οποίο εντάσσεται το επίπεδο που δημιουργείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.5.



Σχήμα 8.5: Σύστημα αναφοράς βέλτιστου επιπέδου
Figure 8.5: Plane Best-Fit Reference System

Οι ανοχές των σημείων από το επίπεδο, όπως προέκυψαν από το λογισμικό Axyz φαίνονται στον Πίνακα 8.10 για τα σημεία της πρώτης σειράς μετρήσεων και στον Πίνακα 8.11 για τα σημεία της τρίτης σειράς μετρήσεων.

| Σημείο | Αποχή (mm) | Σημείο | Αποχή (mm) | Σημείο | Αποχή (mm) |
|--------|------------|---------|------------|---------|------------|
| perif1 | 4.286 | perif8 | -3.560 | perif15 | -2.174 |
| perif2 | -4.637 | perif9 | -0.854 | perif16 | 0.089 |
| perif3 | 1.823 | perif10 | 1.934 | perif17 | -0.524 |
| perif4 | 1.673 | perif11 | -0.054 | perif18 | 1.398 |
| perif5 | -0.141 | perif12 | -1.185 | perif19 | 1.262 |
| perif6 | 1.351 | perif13 | 1.947 | perif20 | 1.141 |
| perif7 | -0.796 | perif14 | -2.223 | perif21 | -0.756 |

Πίνακας 8.10: Αποχές σημείων πρώτης σειράς από το βέλτιστο επίπεδο
Table 8.10: Distances between the first set of measurements and the best-fitted plane

| Σημείο | Αποχή (mm) | Σημείο | Αποχή (mm) |
|--------|------------|---------|------------|
| perif1 | 0.211 | perif6 | 0.425 |
| perif2 | 1.398 | perif7 | 0.370 |
| perif3 | -0.358 | perif8 | -0.476 |
| perif4 | -2.280 | perif9 | -0.445 |
| perif5 | 1.237 | perif10 | -0.083 |

Πίνακας 8.11: Αποχές σημείων τρίτης σειράς από το βέλτιστο επίπεδο
Table 8.11: Distances between the third set of measurements and the best-fitted plane

Παρατηρώντας τις τιμές των Πινάκων 8.10 και 8.11 με αυτές της στήλης Z των Πινάκων 8.2 και 8.4 που περιλαμβάνουν τις κυλινδρικές συντεταγμένες αυτών των σημείων, φαίνεται ότι οι τιμές συμπίπτουν αλλά με διαφορετικά πρόσημα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο βέλτιστος κύκλος που εφαρμόστηκε για κάθε σειρά μετρήσεων και στον οποίο βασίζονται οι κυλινδρικές συντεταγμένες, είναι στην ουσία και το βέλτιστο επίπεδο που ορίζεται από τα μετρημένα σημεία. Το γεγονός στο οποίο οφείλεται το ότι τα πρόσημα είναι αντίθετα έχει να κάνει με τον τρόπο που ορίζει το σύστημα αναφοράς το λογισμικό Axyz. Συμπληρωματικά αναφέρονται τα τυπικά σφάλματα των αποχών των παραπάνω σημείων όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό Axyz και είναι 2.026 mm για τα σημεία της πρώτης σειράς μετρήσεων και 0.980 mm για τα σημεία της τρίτης σειράς μετρήσεων.

Η μέση τιμή των αποχών των σημείων της Ιης σειράς είναι 0.000 mm και η τυπική της απόκλιση 0.205 mm, ενώ η μέση τιμή των αποχών των σημείων της ΙΙης σειράς είναι 0.0001 mm και η τυπική της απόκλιση 0.107 mm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει συνεισφέρει ουσιαστικά στην ανάπτυξη όλο και περισσότερων εφαρμογών που σχετίζονται με αντικείμενα που απαιτούν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται εφαρμογές που αφορούν στη διαστασιολόγηση βιομηχανικών προϊόντων – παραγώγων. Ακολουθώντας αυτή την αλματώδη ανάπτυξη, η επιστήμη της εφαρμοσμένης γεωδαισίας αναπτύσσει νέες μεθόδους μετρήσεων ή προσαρμόζει τις ήδη υπάρχουσες πάνω στα νέες εξελίξεις, ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση των τεχνολογικών καινοτομιών που οδηγούν στην επίτευξη μεγαλύτερων ακριβειών και ολοκληρωμένων προϊόντων.

Σε σχέση με τις υπόλοιπες εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες 3Δ προσδιορισμού θέσης και διαστασιολόγησης, μηχανικές ή οπτικές, κλασσικές ή σύγχρονες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά συγκεκριμένων εφαρμογών, η χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών παρουσιάζεται ιδιαίτερα ανταγωνιστική απέναντι σε μεθόδους που πραγματοποιούνται με τη χρήση σαρωτών laser ή laser trackers, είτε απέναντι σε μεθοδολογίες που εφαρμόζονται φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Όταν δε, η χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών εφαρμόζεται με χρήση της μεθόδου της πολλαπλής εμπροσθοτομίας αποδεικνύεται σαν μια ιδιαίτερα αξιόπιστη επιλογή για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Η μέτρηση αποκλειστικά γωνιών και όχι αποστάσεων, με βάση τις δυνατότητες των σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών μπορεί να δώσει αποτελέσματα ακριβείας (της τάξης του δέκατου του χιλιοστού). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος απόκτησης τέτοιων γεωδαιτικών σταθμών μαζί με τα κατάλληλα παρελκόμενα αλλά και η ανάγκη καταρτισμένων χειριστών.

Από τη χρήση των γεωδαιτικών σταθμών Leica TDA 5005 και TCA 1800 επαληθεύτηκε ο υψηλός βαθμός παραγωγικότητας των σύγχρονων αυτών γεωδαιτικών σταθμών. Επίσης, διαπιστώθηκε το γεγονός ότι ο χειρισμός τους απαιτεί άτομα έμπειρα και καταρτισμένα, έτσι ώστε να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το πλήθος των δυνατοτήτων του (π.χ. χρήση της λειτουργίας ATR) και να έρθει σε πέρας η εκτελούμενη εργασία χωρίς προβλήματα και ελλείψεις. Η ταχύτητα διεκπεραίωσης της εργασίας με τους δύο αυτούς γεωδαιτικούς σταθμούς μειώνεται κατά πολύ όταν είναι συνδεδεμένοι με H/Y για

μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο μέσω του λογισμικού Axyz. Στηρίζεται έτσι η άποψη ότι αυτοί οι δύο γεωδαιτικοί σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία με εφαρμογές Βιομηχανικής Γεωδαισίας, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, χάρη στην υψηλή ακρίβεια με την οποία παρέχονται οι γωνίες και οι αποστάσεις.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στο χώρο του Τομέα Παραγωγής Υποβρυχίων, ιδιαίτερη αναφορά έγινε και σχετικά με τη χρονική διάρκεια που κράτησαν οι μετρήσεις καθώς και για τις τρεις σειρές μετρήσεων απαιτήθηκε μισή εργάσιμη ημέρα, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου που χρειάστηκαν οι προπαρασκευαστικές διαδικασίες σύνδεσης των οργάνων με τον υπολογιστή, ίδρυσης του τοπικού δικτύου αλλά και εύρεσης του βέλτιστου κύκλου για κάθε σειρά μετρήσεων ώστε να σχολιαστούν τα αποτελέσματα και από τον υπεύθυνο τοπογράφο. Επίσης, έτυχε σχολιασμού το γεγονός ότι δεν ορίστηκαν οι συντεταγμένες των στάσεων των οργάνων με τη διαδικασία της οπισθοτομίας αλλά ιδρύθηκε τοπικό αυθαίρετο δίκτυο, γεγονός που επιτρέπει να τοποθετείται το όργανο σε οποιοδήποτε σημείο είναι καλύτερο για να διεξαχθούν οι μετρήσεις στο νομέα, χωρίς να απαιτείται ορατότητα σε σημεία γνωστών συντεταγμένων που περιέπλεκε την όλη διαδικασία.

Σχετικά με την επεξεργασία γύρω από τον υπολογισμό της ακρίβειας του εντοπισμού της θέσης των μετρημένων σημείων διαπιστώνεται ότι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται χρήση δύο οργάνων και μετρούνται μόνο γωνίες είναι ακριβέστερη από τη διαδικασία που χρησιμοποιούνται δύο όργανα και μετρούνται γωνίες και αποστάσεις ή από τη διαδικασία που γίνεται χρήση ενός οργάνου και μετρούνται γωνίες και αποστάσεις. Το συμπέρασμα που απορρέει από αυτή τη διαπίστωση είναι ότι παρά τις εξελίξεις στην κατασκευή γεωδαιτικών σταθμών ειδικότερα σε ότι αφορά τη μέτρηση αποστάσεων, η επιπλέον αυτή μέτρηση όσο ακριβής και αν είναι εισάγει επιπλέον σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα.

Σχετικά με την επεξεργασία γύρω από τον έλεγχο της κυκλικότητας του νομέα, στην επεξεργασία και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων των τριών σειρών μετρήσεων, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στην πρώτη και στην τρίτη σειρά μετρήσεων, γιατί όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια κατά τη διάρκεια της δεύτερης σειράς μετρήσεων υπήρξαν λάθη που επηρέασαν τα αποτελέσματα.

Στο μέρος του προσδιορισμού του βέλτιστου κύκλου χρησιμοποιώντας όλα τα μετρημένα σημεία τα αποτελέσματα κρίθηκαν και από τον υπεύθυνο τοπογράφο ιδιαίτερα ακριβή, δεδομένου ότι η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου για τα σημεία της περιφέρειας ήταν σχεδόν ταυτόσημη με αυτή που δίνεται από τον κατασκευαστή του νομέα, κρίνονται οι δύο αυτές σειρές επιτυχείς από άποψη ακρίβειας. Στο τμήμα του προσδιορισμού του βέλτιστου κύκλου χρησιμοποιώντας διαφορετικό πλήθος σημείων, προκειμένου να διερευνηθεί το πόσο επηρεάζει το πλήθος των σημείων που χρησιμοποιούνται στην επίλυση τα τελικά αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση που μετρούνται μόνο γωνίες, όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων αυξάνεται και η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Τέλος, στο κομμάτι του προσδιορισμού του βέλτιστου κύκλου με χρήση σημείων με καλή γεωμετρία, συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία των σημείων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κύκλου είναι καθοριστικός παράγοντας για την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Σχετικά με την επεξεργασία αναφορικά με τον έλεγχο της επιπεδότητας του νομέα έγινε η προσαρμογή ενός επιπέδου στα σημεία που είχαν μετρηθεί κατά την Ιη και την ΙΙη σειρά μετρήσεων. Από αυτόν τον έλεγχο προέκυψε το συμπέρασμα ότι το βέλτιστο επίπεδο που μπορεί να οριστεί από τα σημεία μια σειράς μετρήσεων ταυτίζεται πλήρως με το επίπεδο που ορίζεται από τον βέλτιστο κύκλο για τα ίδια σημεία. Έτσι δεν είναι απαραίτητο να γίνεται ξεχωριστά αυτός ο έλεγχος, καθώς οι αποχές των σημείων από το βέλτιστο επίπεδο, ταυτίζονται με αυτές των σημείων από το επίπεδο του βέλτιστου κύκλου και παρουσιάζονται στη στήλη της συντεταγμένης Z του συστήματος των κυλινδρικών συντεταγμένων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ




ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ LEICA TDA 5005

Το υπόψη παράρτημα περιλαμβάνει τα βασικά βήματα που απαιτείται να ακολουθήσει κάποιος προκειμένου να πραγματοποιήσει κάποιες στοιχειώδεις εργασίες με τον γεωδαιτικό σταθμό Leica TDA 5005. Σε περίπτωση όμως περαιτέρω εκμάθησης απαιτείται χρόνος, ειδικά αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για πιο περίπλοκες εφαρμογές.

Καταρχήν σχετικά με τη λειτουργία της οριζοντίωσης του οργάνου, εφόσον οριζοντιωθεί χονδρικά με χρήση της οπτικής αεροστάθμης, ενεργοποιείται ο γεωδαιτικός σταθμός και επιλέγεται το πλήκτρο κάτω από F3 (απεικονίζει μια αεροστάθμη). Με τη διαδικασία αυτή εμφανίζεται στην οθόνη η ηλεκτρονική αεροστάθμη ακριβείας. Ο γεωδαιτικός σταθμός οριζοντιώνεται με ρύθμιση των τρικόχλιων. Στη συνέχεια κάνοντας έναν πρώτο διαχωρισμό σχετικά με τον τρόπο που μπορεί να λειτουργήσει το συγκεκριμένο όργανο μπορούμε να διαχωρίσουμε την περίπτωση της απλής λειτουργίας μετρήσεων του οργάνου, οπότε οι μετρήσεις θα καταγράφονται από τον παρατηρητή σε σχετικό έντυπο ή στην καταγραφική μνήμη που διαθέτει το όργανο και στην περίπτωση της «on-line» λειτουργίας του οργάνου, οπότε χρησιμοποιείται το λογισμικό Axyz που είναι εγκατεστημένο στο όργανο. Για αυτή τη λειτουργία απαιτείται η σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή που να είναι και αυτός εφοδιασμένος με το λογισμικό Axyz. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται απευθείας στον Η/Υ. Στη συνέχεια θα εξεταστούν και οι δύο περιπτώσεις λειτουργίας.

➤ **Απλή λειτουργία μετρήσεων (off-line – καταγραφή στην κάρτα μνήμης)**

Αν ο παρατηρητής πρόκειται να καταγράψει ο ίδιος σε έντυπο τις μετρήσεις αρκεί αφού ενεργοποιηθεί το όργανο, να επιλέξει «MEAS» που αντιστοιχεί στο πλήκτρο F6 για να ξεκινήσει τις μετρήσεις. Μετά, σκοπεύοντας το σημείο ενδιαφέροντος χρησιμοποιεί μόνο την επιλογή «DIST» που αντιστοιχεί στο πλήκτρο F2 ώστε το όργανο να υπολογίσει την απόσταση οργάνου – στόχου.

Σε περίπτωση που ενδιαφέρει η καταγραφή των μετρήσεων στην κάρτα μνήμης που διαθέτει το όργανο θα πρέπει, να προηγηθεί έλεγχος για να διαπιστωθεί το μέσο καταγραφής που χρησιμοποιείται. Αυτός ο έλεγχος γίνεται μέσω του μενού «SETUP» που ανοίγει πατώντας το πλήκτρο F5 και αφού επιλεγεί στην πτυσσόμενη λίστα «REC. DEVICE» η επιλογή «MEMORY CARD», επιλέγοντας το πλήκτρο ENTER () ή CONT (κάτω από το F5), στη συνέχεια θα πρέπει στην γραμμή της οθόνης που βρίσκεται

από κάτω να επιλέξει το αρχείο εντός της κάρτα μνήμης στο οποίο θα αποθηκευτούν οι μετρήσεις. Τα αρχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί και περιέχουν μετρήσεις εμφανίζονται έχοντας δίπλα στο όνομά τους ένα «τικ» (✓). Κατόπιν, είναι σημαντικό να επιλεγεί εκ νέου το πλήκτρο «CONT» ώστε να «κλειδώσει» η επιλογή μέσου καταγραφής. Τη δεύτερη φορά που θα επιλεγεί το πλήκτρο «CONT», το όργανο δέχεται το μέσο καταγραφής που τέθηκε. Διαφορετικά, αν από το μενού «SETUP» επιλεγεί κατευθείαν το πλήκτρο «ESC» για επιστροφή στο κυρίως μενού το όργανο θα επιστρέψει αυτόματα στο προηγούμενο μέσο που επιλεγμένο. Κατόπιν έχοντας επιλέξει επιτυχώς (προσέχοντας την προηγούμενη επισήμανση) θα πρέπει να επιλεγεί το πλήκτρο «ESC» για επιστροφή στο μενού «SETUP» και άλλη μια φορά για επιστροφή στο κυρίως μενού.

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή του πλήκτρου F6, δηλαδή της επιλογής «MEAS» ούτως ώστε να μπει το όργανο στη διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων. Εδώ ο παρατηρητής θα έχει τη δυνατότητα επιλέγοντας την πρώτη γραμμή της οθόνης και πατώντας το πλήκτρο «αNUM» (F6) να δώσει όνομα στα σημεία που πρόκειται να καταγραφούν στη μνήμη. Μπορεί να δώσει ένα όνομα ακολουθούμενο από τον αριθμό ένα (1) (σε μία λέξη χωρίς κενά π.χ. shmeio1 ή με κάτω παύλα π.χ. shmeio_1) οπότε, το πρόγραμμα θα συνεχίσει με το ίδιο όνομα και αλλάζοντας τον αύξοντα αριθμό να καταγράφει τα σημεία που θα μετρηθούν στη συνέχεια ή αν ο παρατηρητής το επιθυμεί σε οποιαδήποτε φάση να αλλάξει όνομα χρησιμοποιώντας πάλι στο τέλος τον αριθμό ένα (1). Συμβουλεύεται η μη χρήση του αριθμού μηδέν (0) στο τέλος του ονόματος καθώς το λογισμικό του γεωδαιτικού σταθμού δεν το αναγνωρίζει ως αύξοντα αριθμό σειράς σημείων και δημιουργείται πρόβλημα στην ακολουθία των μετρήσεων.

Αφού ολοκληρωθεί το προηγούμενο βήμα ο παρατηρητής μπορεί να μηδενίσει την ανάγνωση της οριζόντιας γωνίας του οργάνου σκοπεύοντας στο επιθυμητό σημείο μηδενισμού και επιλέγοντας το πλήκτρο «Hz0» (F5). Είναι έτσι έτοιμος να περάσει στην καθαυτού διαδικασία των μετρήσεων. Σκοπεύοντας καθένα από τα σημεία ενδιαφέροντος έχει τη δυνατότητα καταγραφής των αναγνώσεων μόνο της οριζόντιας και της κατακόρυφης γωνίας επιλέγοντας το πλήκτρο «REC» (F3) ή αυτών μαζί με την ανάγνωση του υπολογισμού της απόστασης οργάνου – στόχου με την επιλογή «ALL» που αντιστοιχεί στο πλήκτρο F1. Στο τέλος, αφού έχουν καταγραφεί οι μετρήσεις για όλα τα ζητούμενα σημεία αρκεί να συνδεθεί το όργανο με το καλώδιο που το συνοδεύει με υπολογιστή εφοδιασμένο με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να εισαχθούν σε αυτόν οι

καταγεγραμμένες μετρήσεις και να επακολουθήσει η επεξεργασία τους ή να αφαιρεθεί η κάρτα μνήμης του οργάνου και μέσω ειδικού αναγνώστη καρτών μνήμης να γίνει η διαδικασία της μεταφοράς των δεδομένων.

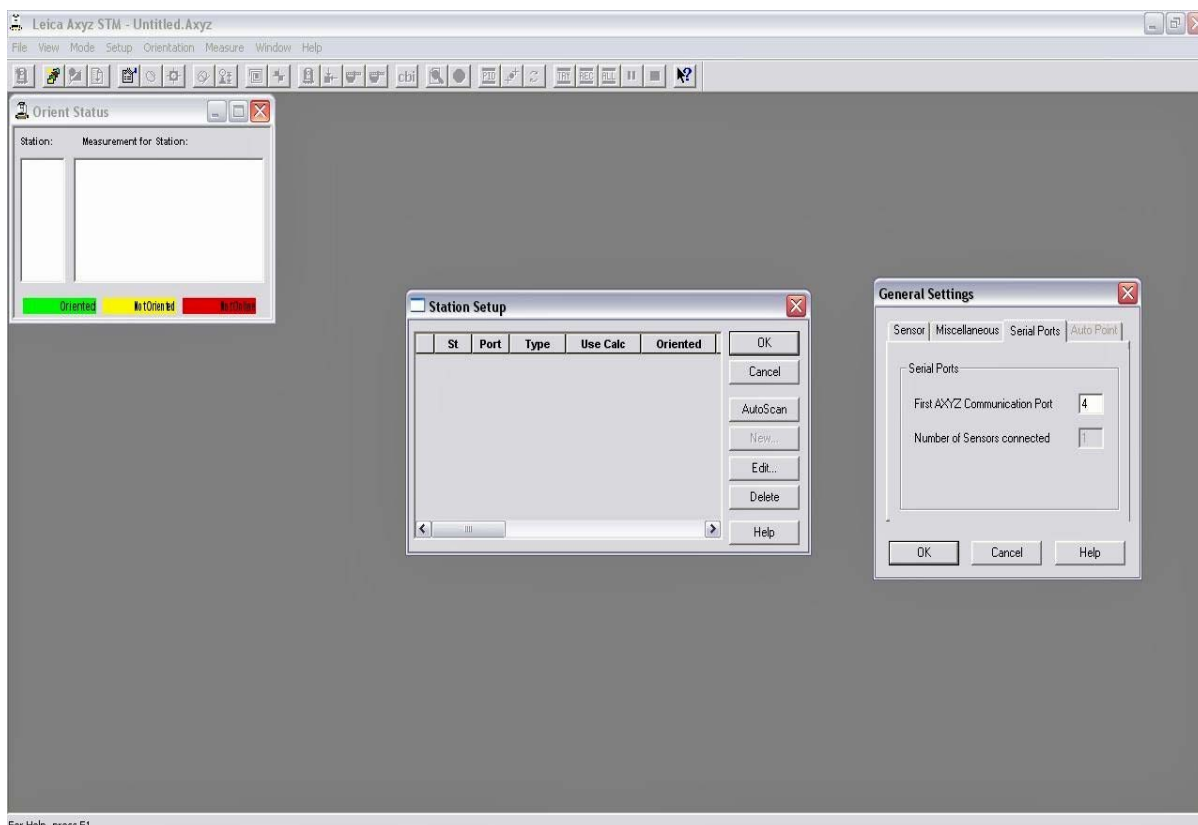
➤ **Λειτουργία οργάνου συνδεδεμένο με Η/Υ («on-line» – καταγραφή στον Η/Υ)**

Προϋπόθεση της συγκεκριμένης λειτουργίας του οργάνου είναι η εγκατάσταση του λογισμικού Axyz τόσο στο λογισμικό του οργάνου ως επιπρόσθετο εργαλείο λειτουργίας, όσο και στον Η/Υ με τον οποίο θα συνδεθεί το όργανο και η ύπαρξη του «κλειδιού» χρήσης του λογισμικού για τον Η/Υ (USB Stick ή 18-pin σειριακό κλειδί). Εφόσον τηρούνται οι προϋποθέσεις αυτές ο παρατηρητής θα πρέπει να ακολουθήσει τα ακόλουθα βήματα για να ξεκινήσει τη διαδικασία των μετρήσεων:

- Ενεργοποίηση του γεωδαιτικού σταθμού και μέσα από το κύριο μενού του, ακολουθείται το βήμα που περιγράφηκε για την επιλογή του κατάλληλου μέσου αποθήκευσης, μόνο που σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται σαν μέσο το RS232 καλώδιο. Συνοπτικά επαναλαμβάνεται η διαδικασία : F5 («SETUP») → Επιλογή μέσου αποθήκευσης (RS232) → «ENTER» → Δεν χρειάζεται ορισμός αρχείο καθώς αυτό γίνεται από το Axyz στον υπολογιστή → «CONT» → «ESC» (Επιστροφή στο μενού «SETUP») → «ESC» (Επιστροφή στο κύριο μενού)
- Στη συνέχεια, από το κύριο μενού γίνεται η επιλογή της εντολής «Axyz COMM.» που ενεργοποιεί το πρόγραμμα επικοινωνίας στο γεωδαιτικό σταθμό. Κατόπιν, στον Η/Υ γίνεται εκκίνηση του λογισμικού Axyz και μέσα από αυτό της εφαρμογής «Theodolite Manager» που επιτρέπει το χειρισμό των οργάνων από τον Η/Υ.
- Από τη «Διαχείριση Συσκευών» που βρίσκεται στην καρτέλα «Υλικό» της εφαρμογής «Σύστημα» του «Πίνακα Ελέγχου» των Windows στην επιλογή «Θύρες (COM & LPT)» ελέγχουμε τη θύρα στην οποία έχει συνδεθεί το καλώδιο του οργάνου και μέσα από την επιλογή «General Settings» του μενού «Setup» (στο Axyz) ορίζεται στην καρτέλα «Serial Ports» ο αριθμός της θύρας επικοινωνίας COM που θα πρέπει να ελέγξει το πρόγραμμα για να εντοπίσει το όργανο.
- Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός της στάσης στην οποία βρίσκεται το όργανο μέσα από την επιλογή «Station» του μενού «Setup». Εφόσον το όργανο αναγνωριστεί επιτυχώς από το λογισμικό, θα αντιδράσει και θα περάσει από την ανενεργή οθόνη

που εμφανίζει πριν σε κατάσταση μετρήσεων.

- Οι επιλογές καταγραφής των δεδομένων είναι όμοια με την «off-line» διαδικασία μόνο που εδώ οι εντολές δίνονται, αφού σκοπευτεί το σημείο, μέσα από το πρόγραμμα του υπολογιστή. Έτσι εφόσον ανοιχτεί το παράθυρο διαλόγου «PID» επιλέγοντας το αντίστοιχο κουμπί στη γραμμή εργαλείων ισχύει ότι : πατώντας «ALL» καταγράφονται γωνίες και αποστάσεις ενώ πατώντας «REC» μόνο γωνίες.
- Αν χρησιμοποιείται πρίσμα για τις μετρήσεις υπάρχει η δυνατότητα της ενεργοποίησης ενός χρήσιμου εργαλείου που διαθέτει το TDA 5005. Πρόκειται για το πρόγραμμα «ATR» που εφόσον σκοπευτεί χονδρικά το πρίσμα, χρησιμοποιεί τους σερβομηχανισμούς που διαθέτει ο γεωδαιτικός σταθμός ώστε να εντοπίσει και να πάρει μέτρηση ακριβώς στο κέντρο του πρίσματος. Το πρόγραμμα αυτό ενεργοποιείται από το αντίστοιχο κουμπί στη γραμμή εργαλείων πριν ανοιχτεί το παράθυρο διαλόγου μετρήσεων «PID».



Σχήμα: Η εφαρμογή Theodolite Manager με τις επιλογές Station και General Settings
Figure: Theodolite Manager module with Station and General Settings setups

Πλέον το όργανο είναι έτοιμο να αρχίσει τη διαδικασία των μετρήσεων με καταγραφή και επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο αφού το πρόγραμμα δίνει για κάθε σημείο που μετράται κατευθείαν τις συντεταγμένες του (εκτός από τα μετρημένα μεγέθη).

Σημειώνεται τέλος, ότι αν σε οποιαδήποτε στιγμή ο παρατηρητής θελήσει να εξέλθει από το πρόγραμμα Axyz, ως αναφορά το όργανο και όχι τον υπολογιστή, θα πρέπει να τερματίσει τη λειτουργία του οργάνου, πατώντας δύο φορές το πλήκτρο «ON\OFF» και να το ενεργοποιηθεί εκ νέου. Δυνατότητα απευθείας εξόδου από το πρόγραμμα στο κυρίως μενού δεν υπάρχει.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Γεωδαιτικά όργανα και μέθοδοι μέτρησης γωνιών και μηκών**
Μπαλοδήμος Δ.Δ. , Σταθάς Δ.
ΕΜΠ 1993
2. **Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας**
Κεφάλαιο «Γεωδαιτικές Μετρήσεις Ακριβείας» - Μπαλοδήμος, Λάμπρου, Πανταζής
Κεφάλαιο «Βιομηχανική Γεωδαισία» - Δογγούρης
ΕΜΠ 2005
3. **Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις I**
Αγάτζα-Μπαλοδήμου Α. Μ.
ΕΜΠ 2000
4. **Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις II**
Αγάτζα-Μπαλοδήμου Α. Μ.
ΕΜΠ 2003
5. **Axyz Theodolite Modules : Software Reference Manual, Hardware Installation Manual**
Manual προγράμματος Axyz, Συγγραφέας Dr. Stephen Kyle
Leica Geosystems 2000
6. **TPS – System 5000 - en**
Εγχειρίδιο γεωδαιτικού σταθμού Leica TDA 5005
Leica Geosystems
7. **TPS – System 1000**
Ελληνική απόδοση του εγχειρίδιου χρήσης γεωδαιτικού σταθμού Leica TCA 1800
από την INFOTOP A.E.
Έκδοση 2.1, 1997
8. **Διπλωματική εργασία: «Έλεγχος ευθυγράμμισης επιταχυντή ηλεκτρονίων με
χρησιμοποίηση του λογισμικού συστήματος Βιομηχανικής Γεωδαισίας
MANCAT»**
Δουμάς Α – Παπαγούνα Μ.
ΕΜΠ 1998
9. **Διπλωματική εργασία: «Σύγκριση συστημάτων Βιομηχανικής Γεωδαισίας μέσω
των λογισμικών Axyz v1.4 και CYCLONE 5.1»**
Μπακόπουλος Γ.
ΕΜΠ 2006

10. **Διπλωματική εργασία: «Ο Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 – Εργαστηριακοί έλεγχοι – Συνδυασμένη χρήση με το λογισμικό Βιομηχανικής Γεωδαισίας Axyz»**
Γκουντινάκος Γ.
ΕΜΠ 2004
11. **Close Range Measurement and 3D Modeling**
Halim SETAN and Mohd Sharuddin IBRAHIM, Malaysia
1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering
Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004
12. **STATE OF THE ART OF 3D MEASUREMENT SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AND ENGINEERING APPLICATIONS**
Mark R. Shortis and Clive Fraser
21st International Congress of FIG
Brighton, U.K., 19 – 25 July 1998
13. www.leica-geosystems.com
14. www.hellinic-shipyards.gr