

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

**ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**



**NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS**

School of Rural, Surveying and Geoinformatics
Engineering

**GEOINFORMATICS
POST-GRADUATE PROGRAMME**

**ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ
ΣΤΑΘΜΟΥ (MULTISTATION) . ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ**



Μεταπτυχιακή Εργασία

Κολιός Νικόλαος

Επιβλέπων:

Γεώργιος Πανταζής

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Ιούνιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ –
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ
ΠΟΛΥΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ (MULTISTATION).

ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κολιού Νικολάου

Επιβλέπων:

Γεώργιος Πανταζής

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....

(Υπογραφή)

.....

(Υπογραφή)

.....

Αθήνα Ιούνιος 2021

(Υπογραφή)

.....

ΚΟΛΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Αξιωματικός Μηχανικός Αεροπορικών Εγκαταστάσεων

Copyright © Νικόλαος Κολιός, 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής ΕΜΠ κύριο Γεώργιο Πανταζή, αρχικά για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου, για την ανάθεση αυτής της εργασίας. Καθώς προέρχομαι από έναν διαφορετικό κλάδο, η πραγματοποίηση της ενασχόλησής μου με το αντικείμενο του Τοπογράφου Μηχανικού, ήταν μια μεγάλη εμπειρία για εμένα. Τον ευχαριστώ επίσης για την βοήθεια και τις συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της, αλλά και για την επιείκειά του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και δασκάλους που έχω συναντήσει στην ακαδημαϊκή ζωή μου, αλλά ιδιαίτερα αυτούς που συνάντησα την περίοδο μετά την απόκτηση του πρώτου πτυχίου μου, αφού κατάφεραν να με ξυπνήσουν από το λήθαργο της καθημερινής δουλειάς, απαραίτητης μεν, χωρίς αποκόμιση γνώσεων δε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για τον τρόπο που μου έμαθαν να σκέπτομαι και να πράττω, αφού η γνώση δεν μπορεί να στεριώσει χωρίς καμμία ηθική.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου, η οποία αδιαμαρτύρητα υπέμεινε την ιδιορρυθμία μου να απασχολούμαι με αντικείμενα πέραν της μικρής και σημαντικής ζωής μας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Γεωδαισία, ειδικά η Τοπογραφία, είναι μία επιστήμη που ανήκει σε έναν ιδιαίτερο τομέα των θετικών επιστημών, τις τεχνικές επιστήμες. Ιδιαιτερότητα αυτού του τομέα, είναι ότι εξαρτάται από μέσα και εργαλεία, ώστε να καταφέρει να εφαρμόσει τις διάφορες αρχές που διέπουν το κατά περίπτωση αντικείμενο.

Με άλλα λόγια, η εξάρτηση της γεωδαισίας από την τεχνολογία, είναι αναπόφευκτη. Ο τοπογράφος μηχανικός, ως ο χειριστής αυτής της τεχνολογίας, κατέχει έναν διόλου εύκολο ρόλο. Από αυτό, το σύγχρονο περιβάλλον εργασίας, δεν απαιτεί μόνο τη στέρεη θεωρητική γνώση των αρχών και των κανόνων της επιστήμης του, αλλά ταυτόχρονα και την ικανή τεχνογνωσία, ώστε να είναι σε θέση να χειρίζεται τον εξοπλισμό που κυκλοφορεί ανά περίοδο.

Υπό αυτό το πρίσμα, η τεχνολογία του γεωδαιτικού εξοπλισμού έχει σημειώσει ραγδαίες εξελίξεις κατά τα τέλη του 20^{ου} αιώνα, κυρίως μέσω της εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας σε συμβατικά όργανα. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι τα ψηφιακά θεοδόλιχα, οι ψηφιακοί χωροβάτες και προπάντων οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (total stations). Επίσης, από ιστορική σκοπιά, τα τελευταία χρόνια, ο ρυθμός των τεχνολογικών εξελίξεων είναι ασύμμετρα μεγαλύτερος από αυτόν που επικρατούσε παλαιότερα.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω, σε συνδυασμό βέβαια με την εμπορικοποίηση της επιστήμης, είναι οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε νέα όργανα, των οποίων η κατασκευή στηρίζεται στη συνεργασία ενός μεγάλου εύρους επιστημών, των οποίων το αντικείμενο, είναι τις περισσότερες φορές εντελώς άγνωστο στον Τοπογράφο Μηχανικό. Εάν το πρώτο οπτικομηχανικό θεοδόλιχο κατασκευάστηκε από Γεωδαίτη, σήμερα στην κατασκευή των σύγχρονων μηχανημάτων πρωτοστατούν οι επιστήμονες της Ρομποτικής, της Ηλεκτρομηχανικής, της Όρασης Υπολογιστών κ.α.

Ωστόσο, παρόλη τη δύσκολη θέση στην οποία βρίσκεται ο σύγχρονος Τοπογράφος Μηχανικός, όπου για να μπορέσει να επιβιώσει σε ένα σκληρό οικονομικό περιβάλλον, πρέπει να αφομοιώσει απείρως περισσότερη γνώση

από τους προκατόχους του, δεν μπορεί να κατηγορηθεί η Τεχνολογία για αυτό.

Ο γενικότερος προβληματισμός αφορά στην εξέλιξη όλων των συστημάτων μέτρησης και έγκειται στο κατά πόσο μπορεί ένας επιστήμονας να αφομοιώσει όλη την προϋπάρχουσα γνώση και πόσο «βαθιά» μπορεί να είναι αυτή. Από κάποιο σημείο και μετά, ότι κερδίζεται σε «επιφάνεια», χάνεται σε «βάθος». Ενδεχομένως, η χρήση υπερσύγχρονων συστημάτων μέτρησης να απλοποιεί το έργο του νέου τεχνικού επιστήμονα, αλλά μπορεί να δημιουργήσει και σφάλματα, λόγω ελλιπούς τεχνογνωσίας από μέρους του.

Συμπερασματικά, οι τεχνικές επιστήμες, συμπεριλαμβανομένης της Τοπογραφίας, καλούνται να φέρουν αρκετά βαρύτερο φορτίο από όλες τις υπόλοιπες θεωρητικές (και πιο εξειδικευμένες αναπόφευκτα) επιστήμες.

Ο λόγος ύπαρξης εργασιών όπως αυτής που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Γεωπληροφορική», κατευθύνεται προς μία γεφύρωση αυτών των χασμάτων μεταξύ των επιστημών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση τυχόν σφαλμάτων, πάντα όμως από τη σκοπιά του Τοπογράφου Μηχανικού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-------------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | II |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | III |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | V |
| ΠΙΝΑΚΕΣ | VII |
| ΕΙΚΟΝΕΣ | VIII |
| ΣΧΗΜΑΤΑ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ | X |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | XI |
| ABSTRACT | XII |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | |
| 1.1 Ιστορική εξέλιξη οργάνων μέτρησης γωνιών | 3 |
| 1.2 Ιστορική εξέλιξη οργάνων μέτρησης αποστάσεων | 5 |
| 1.3 Ιστορική εξέλιξη ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | |
| 2.1 Περί Σαρωτών Επιφανειών..... | 9 |
| 2.2 Περί Πολυγεωδαιτικών Σταθμών..... | 10 |
| 2.3 Ο Πολυγεωδαιτικός Σταθμός Trimble SX-10..... | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | |
| 3.1 Η μετρολογία στην Ελλάδα | 20 |
| 3.2 Οι μετρολογικοί έλεγχοι των γεωδαιτικών σταθμών, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 17123-3 και ISO 17123-4 | 21 |
| 3.2.1 Ο έλεγχος της μέτρησης των γωνιών σε ένα γεωδαιτικό σταθμό σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-3 | 21 |
| 3.2.2 Ο έλεγχος της μέτρησης των αποστάσεων σε ένα γεωδαιτικό σταθμό σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-4 | 28 |
| 3.3 Η βαθμονόμηση των καμερών του πολυγεωδαιτικού σταθμού.. | 31 |
| 3.4 Πρόταση συμπληρωματικού ελέγχου για πολυγεωδαιτικούς σταθμούς χωρίς ύπαρξη τηλεσκοπίου | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.1 Προσεγγίσεις της σχέσης συστήματος κάμερας – τηλεσκοπίου σε εικονογεωδαιτικούς σταθμούς | 41 |
| 3.4.2 Μία διαφορετική προσέγγιση της σχέσης συστήματος κάμερας – τηλεσκοπίου σε εικονογεωδαιτικούς σταθμούς | 43 |
| 3.4.2.1 Πρόταση Ελέγχου..... | 43 |
| 3.4.2.2 Πρόταση Βαθμονόμησης | 54 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ -ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 72 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 79 |

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1 Η σύγκριση τεσσάρων multistations ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά[12]

Πίνακας 2.2 Η σύγκριση του TLS RTC360 της εταιρίας Leica με τον πολυγεωδαιτικό σταθμό SX-10 της Trimble[13]

Πίνακας 3.1 Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ της απλής και πλήρους διαδικασίας στον έλεγχο των οριζόντιων διευθύνσεων ενός γεωδαιτικού σταθμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO- 17123-3.....[22]

Πίνακας 3.2 Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ της απλής και πλήρους διαδικασίας στον έλεγχο των κατακόρυφων διευθύνσεων ενός γεωδαιτικού σταθμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO- 17123-3.....[26]

ΕΙΚΟΝΕΣ

| | |
|--|------|
| Εικ.1.1 Το γωνιομετρικό όργανο εξάντας..... | [3] |
| Εικ.1.2 Το γωνιομετρικό όργανο μετροτράπεζα..... | [3] |
| Εικ.1.3 Το μηχανικό θεοδόλιχο του Sisson..... | [4] |
| Εικ.1.4 Το οπτικομηχανικό όργανο «Wild T2»..... | [4] |
| Εικ.1.5 Η δίμετρη βάση | [5] |
| Εικ.1.6 Το EDM Distomat DI 10 , προσαρμοσμένο σε θεοδόλιχο | [6] |
| Εικ.1.7 Διάφοροι τύποι Γεωδαιτικών Σταθμών..... | [7] |
| Εικ.2.1 Ο επίγειος σαρωτής επιφανειών FARO Focus 3D..... | [9] |
| Εικ.2.2 Πολυγεωδαιτικοί σταθμοί | [10] |
| Εικ.2.3 Το Tablet T10 της εταιρίας Trimble | [15] |
| Εικ.2.4 Η οθόνη του tablet με το χειρισμό της plummet camera κατά την διαδικασία της κέντρωσης- οριζοντίωσης | [17] |
| Εικ.2.5 Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση rectangle | [17] |
| Εικ.2.6 Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση polygon | [17] |
| Εικ.2.7 Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση horizontal band | [18] |
| Εικ.2.8 Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της πλήρους σάρωσης (full dome) | [18] |
| Εικ.3.1 Η ύπαρξη της τεχνολογίας των αντιδιαμετρικών αναγνώσεων στον σταθμό Trimble SX-10..... | [35] |
| Εικ.3.2 Η επίδραση του σφάλματος του σκοπευτικού άξονα στις οριζόντιες διευθύνσεις | [39] |

- Εικ.3.3 Ο συσχετισμός του προβολικού επιπέδου και του επιπέδου του κάθετου στο τηλεσκόπιο[42]
- Εικ.3.4 Ο σχηματισμός της γωνίας σε περίπτωση εκκεντρότητας , εξαρτάται και από την απόσταση του σημείου στο χώρο[43]
- Εικ.3.5 Η διαδικασία της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας[46]
- Εικ.3.6 Η περιγραφή της σχετικής θέσης των καμερών ως προς τον σκοπευτικό άξονα στο όργανο Trimble SX-10.....[48]
- Εικ.3.7 Η σχέση μεταξύ των συστημάτων της κάμερας, του τηλεσκοπίου και του θεοδόλιχου , μέσω της γνωμονικής προβολής.....[62]

ΣΧΗΜΑΤΑ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- Σχήμα.3.1 Η θέση του σταθμού (0) και των στόχων (1,2,3,4,5) σε μία τυπική διάταξη κατά τον έλεγχο οριζοντίων διευθύνσεων σύμφωνα με το ISO – 17123-3.....[22]
- Σχήμα 3.2 Η διάταξη ελέγχου κατακόρυφων διευθύνσεων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-3[25]
- Σχήμα 3.3 Η διάταξη ελέγχου μέτρησης αποστάσεων (απλή διαδικασία) , σύμφωνα με το πρότυπο ISO-17123-4[29]
- Σχήμα 3.4 Η βάση ελέγχου για τον έλεγχο ύπαρξης μηδενικού σφάλματος , κατά το πρότυπο ISO -17123-4 (απλή διαδικασία)[31]
- Σχήμα 3.5 Περίπτωση εκκεντρότητας και στροφικής απόκλισης προβολικού άξονα από τον ιδανικό άξονα σκόπευσης.....[36]
- Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής προτεινόμενης διαδικασίας ελέγχου.....[74]
- Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ροής προτεινόμενης βαθμονόμησης.....[77]

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μετρολογικών ελέγχων των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, εάν εφαρμοστούν σε έναν εξελιγμένο τύπο τους, τους πολυγεωδαιτικούς σταθμούς (multistations) και ειδικότερα σε αυτούς που δεν διαθέτουν μηχανικό τηλεσκόπιο, παρά μόνο συστήματα καμερών. Συναφώς, προτείνεται μία μεθοδολογία ελέγχου αλλά και βαθμονόμησης τέτοιου είδους ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών.

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από τέσσερα (4) κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση στην εξέλιξη των οργάνων μέτρησης αποστάσεων και γωνιών από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Γίνεται μικρότερη αναφορά στα όργανα που μετρούσαν ξεχωριστά αποστάσεις και γωνίες και μεγαλύτερη αναφορά στα όργανα που τα συνδύαζαν, τους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στους σαρωτές επιφανειών (Laser Scanners), τα χαρακτηριστικά τους καθώς και στους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς που ενσωματώνουν και την τεχνολογία των σαρωτών επιφανειών, τους πολυγεωδαιτικούς σταθμούς (multistations). Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο πολυγεωδαιτικών σταθμών, τον SX-10 της Trimble, όπου παρουσιάζονται τα τεχνικά του χαρακτηριστικά αλλά και η μοναδική στον χώρο ιδιομορφία του, η έλλειψη τηλεσκοπίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην μετρολογία γενικότερα, αλλά ειδικότερα στους μετρολογικούς ελέγχους (κατά ISO) που πραγματοποιούνται στους γεωδαιτικούς σταθμούς. Στη συνέχεια, διερευνάται η καταλληλότητα αυτών των ελέγχων για τον σταθμό SX-10 της Trimble. Τέλος, προτείνεται μια συμπληρωματική μέθοδος ελέγχου αλλά και βαθμονόμησης σταθμών παρόμοιου τύπου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας και σημεία που δεν διερευνήθηκαν σε αυτή την εργασία, τα οποία αποτελούν και προτάσεις για τη βελτίωσή της

Metrological Testing and Calibration of a Multistation. Methodology Proposal

ABSTRACT

The object of the present master's thesis is the theoretical examination of the effectiveness of the metrological testings of total stations, if applied in an advanced type, the multistations and especially in those that do not have a mechanical telescope, but only camera systems. In this regard, a methodology for testing and calibration of such total stations is proposed.

The master's thesis consists of four (4) chapters.

The first chapter provides an overview of the evolution of distance and angle measuring instruments from antiquity to the present day. There is less reference to the instruments that measured distances and angles separately and greater reference to the instruments that combined them, the so-called total stations.

In the second chapter, we refer to Laser Scanners , their characteristics as well as to the total stations that incorporate this technology, the multistations. Next, we refer to a specific model of multistations, the SX-10 of Trimble, we present its technical features but also its unique peculiarity in the field, the lack of a telescope.

In the third chapter, we refer to metrology in general and in particular to the metrological tests (according to ISO) carried out at total stations. Next, the appropriateness of these tests for the Trimble SX-10 station is investigated. Finally, a complementary method of control and calibration of total stations of a similar type is proposed.

In the fourth chapter, points that were not explored in this work are mentioned, which are also suggestions for its improvement, as well as the conclusions of the work.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία έχει επηρεάσει αρκετά τον τομέα της Τοπογραφίας. Μια πληθώρα οργάνων, τα οποία κάποτε λειτουργούσαν με μηχανικές ή οπτικομηχανικές διατάξεις, πλέον λειτουργούν ψηφιακά, τόσο στη διεπαφή χρήστη – συστήματος μέτρησης, όσο και κατά τη διαδικασία των πρωτογενών μετρήσεων. Έτσι, κατασκευάστηκαν ψηφιακά όργανα μέτρησης διευθύνσεων και γωνιών (π.χ. ψηφιακά θεοδόλιχα), ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης μηκών (π.χ. EDM) , ψηφιακά όργανα μέτρησης υψομετρικών διαφορών (ψηφιακοί χωροβάτες) καθώς και ψηφιακά όργανα που μετρούν παραπάνω από ένα πρωτογενές μέγεθος (π.χ. ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί).

Όλη αυτή η τεχνολογία βοήθησε αρκετά το έργο του Τοπογράφου Μηχανικού , ενώ ήταν σε γενικές γραμμές προσιτή. Οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί ωστόσο, είναι αυτοί οι οποίοι περισσότερο εξοικονόμησαν χρόνο (και σε πολλές περιπτώσεις προσωπικό) , τόσο από τις εργασίες πεδίου όσο και από τις απαραίτητες εργασίες γραφείου.

Οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί συνεχίζουν να εξελίσσονται κατά την πρόσφατη 10ετία , ενσωματώνοντας συνεχώς τεχνολογίες που προσανατολίζονται στην λογική του all-inclusive. Έτσι, κυκλοφορούν γεωδαιτικοί σταθμοί που συνδυάζουν τεχνολογίες GNSS και ενσωματώνουν δορυφορικά δεδομένα, σταθμούς που χρησιμοποιούν και κάμερες εκτός του τηλεσκοπίου (χωρογεωδαιτικοί σταθμοί) και προσφάτως, σταθμοί που εκτός των καμερών, συνδυάζουν και την τεχνολογία των σαρωτών επιφανειών (laser scanner). Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται χωροεικονογεωδαιτικοί ή πολυγεωδαιτικοί σταθμοί (multistations).

Λόγω του ότι , αυτά τα όργανα παρουσιάστηκαν πολύ πρόσφατα στην αγορά -τα τελευταία πέντε χρόνια- δεν υπάρχει ακόμα κάποια τυποποιημένη διαδικασία που να υπολογίζει -μετρολογικά- τη θεωρητική ακρίβεια μέτρησης του οργάνου, κάτι το οποίο υπήρχε όσον αφορά στα όργανα παλαιότερης τεχνολογίας. Σε αυτή την εργασία , διερευνάται η καταλληλότητα των προτύπων ελέγχου γωνιών και μηκών για τους

κλασσικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, αυτή τη φορά όμως για τον έλεγχο ενός multistation, με σκοπό τη συμπλήρωση τυχόν κενών , προτείνοντας συμπληρωματικές τεχνικές και μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ

1.1 Ιστορική εξέλιξη οργάνων μέτρησης γωνιών

Τα όργανα μέτρησης γωνιών, ιστορικά περιγράφονται από δύο (2) κύριες κατηγορίες. Από τα παλαιότερα προς τα νεότερα, διακρίνονται σε:

- Μηχανικά / Οπτικομηχανικά Όργανα
- Ψηφιακά Όργανα

Τα πρώτα όργανα μέτρησης γωνιών, κατασκευάστηκαν στις αρχές του 16^{ου} αιώνα και αφορούσαν απλές μηχανικές διατάξεις, οι οποίες υλοποιούσαν έναν οπτικό άξονα και μία διαιρεμένη διάταξη για την ανάγνωση των γωνιών.

Παραδείγματα τέτοιων οργάνων αποτελούν ο εξάντας (Εικ.1.1) και η μετροτράπεζα (Εικ.1.2).

| | |
|---|--|
|  |  |
| Εικ.1.1: Το γωνιομετρικό όργανο εξάντας | Εικ.1.2: Το γωνιομετρικό όργανο μετροτράπεζα |

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανικές πυξίδες, όπου μετρώνται αποκλειστικά οριζόντιες γωνίες, χρησιμοποιώντας τη μαγνητική ιδιότητα του δείκτη της. Οι πυξίδες χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα (υπάρχουν και σε ψηφιακή μορφή) στη Γεωδαισία, για κάποιες αναγνωριστικές εργασίες πεδίου, μικρών απαιτήσεων ακριβείας. [Λάμπρου, Πανταζής, 2011]


Ωστόσο, για εργασίες μεγαλύτερης ακριβείας, καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισε ένα όργανο, των οποίων τα σημερινά όργανα αποτελούν απλώς τη συνέχεια, το **θεοδόλιχο**.

Το θεοδόλιχο είναι ένα όργανο που μετράει οριζόντιες αλλά και κατακόρυφες γωνίες. Διαθέτει τηλεσκόπιο, ενώ ο άξονας σκόπευσής του διέρχεται από το κέντρο του τηλεσκοπίου. Επίσης, περιέχει δύο διαιρεμένους δίσκους για την μέτρηση των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών. Εκτός των ανωτέρω, διαθέτει και σύστημα ανάγνωσης των τιμών των γωνιών.

Στα πρώιμα θεοδόλιχα (διατηρήθηκαν έως τις αρχές του 20^{ου} αιώνα), οι διαιρεμένοι δίσκοι ήταν κατασκευασμένοι από μέταλλο, ενώ το σύστημα ανάγνωσης ήταν μηχανικό (λ.χ. βερνιέρος). Αυτά τα θεοδόλιχα ονομάζονται μηχανικά.

Τα αμέσως μεταγενέστερα θεοδόλιχα, χρησιμοποιούσαν διαιρεμένους δίσκους από γυαλί, ενώ το σύστημα ανάγνωσης ήταν κάποια οπτική (διάταξη (λ.χ. μικρόμετρο). Αυτά τα θεοδόλιχα ονομάζονται οπτικομηχανικά. [Μπαλοδήμος, Λάμπρου, Πανταζής, 2005]

Το πρώτο μηχανικό θεοδόλιχο του οποίου η χρήση, με μικρές παραλλαγές έφτασε έως και τον 20^ο αιώνα, κατασκευάστηκε το 1730 από τον Sisson (Εικ.1.3) [Μπαλοδήμος, Λάμπρου, Πανταζής, 2005], αν και υπήρχε ήδη μια πρώιμη μορφή του, από τον 17^ο αιώνα, με την ονομασία τριγωνομετρικό όργανο. [Ρωσσικόπουλος, 2007]

| | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|
| |  | | |  | |
| Εικ.1.3: Το μηχανικό θεοδόλιχο του Sisson | | | | Εικ.1.4: Το οπτικομηχανικό όργανο «Wild T2» | |

Το πρώτο οπτικομηχανικό θεοδόλιχο κατασκευάστηκε το 1926 από τον Wild και ονομαζόταν «Wild T2» (Εικ.1.4).

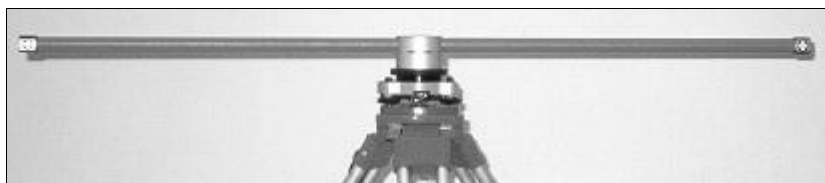
Εξέλιξη των οπτικομηχανικών θεοδόλιχων, ήταν τα ψηφιακά θεοδόλιχα. Η διαφορά τους από τα οπτικομηχανικά, έγκειται στο ότι οι ενδείξεις των «διαιρεμένων» δίσκων λαμβάνονται με ηλεκτρονικές διατάξεις αναγνώρισης προτύπων καθώς επίσης και στο ότι οι αναγνώσεις των γωνιών εμφανίζονται πλέον ψηφιακά (σε οθόνη) στον χρήστη. [Λάμπρου, Πανταζής, 2011]

1.2 Ιστορική εξέλιξη οργάνων μέτρησης αποστάσεων

Τα όργανα μέτρησης αποστάσεων διακρίνονται σε μηχανικά, σε οπτικομηχανικά και σε ηλεκτρομαγνητικά.

Τα μηχανικά όργανα μέτρησης αποστάσεων ,διακρίνονται σε αυτά που καλύπτουν εργασίες περιορισμένης ακριβείας (λ.χ. χρήση σε εργοτάξια) και σε αυτά που χρησιμοποιούνται σε εργασίες μεγαλύτερης ή και υψηλής ακριβείας. Στα πρώτα ανήκουν οι απλές μετροταινίες, οι αλυσίδες κλπ ενώ στα δεύτερα ανήκουν σύρματα από ειδικό αδιάσταλο υλικό (σύρματα Invar). [Βλάχος,2012]

Τα οπτικομηχανικά όργανα μέτρησης αποστάσεων, ήταν όργανα αυξημένης ακριβείας, τα οποία ουσιαστικά χρησιμοποιούσαν παρατηρήσεις γωνιών για την έμμεση μέτρηση των αποστάσεων. Απαραίτητη ήταν μία σταθερά του συστήματος , δηλαδή ένα γνωστό μήκος.[Λάμπρου, Πανταζής, 2011]. Τέτοια όργανα ήταν τα τηλέμετρα και οι δίμετρες βάσεις (Εικ.1.5)



Εικ.1.5: Η δίμετρη βάση

Τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μηκών , κάνουν χρήση της διαφοράς χρόνου ή της διαφοράς φάσης μεταξύ ενός εκπεμπόμενου από αυτά κύματος και του ανακλώμενου που επιστρέφει σε αυτά, έτσι ώστε να υπολογιστεί έμμεσα η απόσταση.

Αρχικά, κατασκευάστηκαν ηλεκτρομαγνητικά όργανα μεγάλου βεληνεκούς μέτρησης, όπως τα τελλουρόμετρα (π.χ. MR1) και τα γεωδίμετρα (π.χ. AGA 6, AGA 8). Η χρήση τους ωστόσο, περιορίστηκε με την έλευση των συστημάτων GNSS. [Λάμπρου, Πανταζής, 2011]

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν όργανα μέτρησης μικρότερου βεληνεκούς (έως περίπου 3 km) , με μικρότερη αβεβαιότητα μέτρησης, τα οποία έγιναν γνωστά ως EDM (Electronic Distance Measurement). Αυτά, είχαν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται σε θεοδόλιχα (Εικ.1.6) και αποτέλεσαν τον πρόδρομο του σημερινού ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού (Total Station).



Εικ.1.6: Το EDM Distomat DI 10, προσαρμοσμένο σε θεοδόλιχο

1.3 Ιστορική εξέλιξη ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών

Το αμέσως επόμενο βήμα από τα επιβατηγά EDM, είναι η δημιουργία ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (Total Station) , δηλαδή EDM ενσωματωμένων σε ψηφιακά θεοδόλιχα (Εικ.1.7). Κάποια βήματα είχαν γίνει ήδη από την δεκαετία του 1970 (π.χ. Reg Elton 14 της εταιρίας Zeiss, γεωδίμετρο 700 της εταιρίας AGA), αλλά η χρήση τους καθιερώθηκε από την δεκαετία του 1990 και έπειτα. [Μπαλοδήμος, Λάμπρου, Πανταζής, 2005]



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικ.1.7: Διάφοροι τύποι Γεωδαιτικών Σταθμών: (α) Leica Flexline TS06 ,(β) Topcon GTS 235,(γ) Trimble 5605,(δ) Sokkia 530RK3

Πέρα από το γεγονός του ότι οι γεωδαιτικοί σταθμοί ενσωματώνουν την τεχνολογία του EDM και του ψηφιακού θεοδόλιχου, διαχρονικά έχουν εξελιχθεί λειτουργίες σε αυτούς, οι οποίες έχουν διευκολύνει το έργο του τοπογράφου μηχανικού και έχουν αυξήσει την ακρίβεια του αποτελέσματος. Ενδεικτικά, παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες από αυτές, κατά το δυνατόν σε χρονολογική σειρά:

- Η αποθήκευση των δεδομένων μέτρησης σε ενσωματωμένη καταγραφική μονάδα, με δυνατότητα τόσο προσπέλασής τους σε πραγματικό χρόνο, όσο και της ενσύρματης μεταφοράς τους σε ψηφιακό αποθηκευτικό χώρο.
- Η ηλεκτρονική υποβοήθηση της διαδικασίας κατακορύφωσης του πρωτεύοντα άξονα του γεωδαιτικού σταθμού (ψηφιακή αεροστάθμη).
- Ο ψηφιακός μηδενισμός της διεύθυνσης αναφοράς.

- Η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών ισοσταθμητών, για τη διόρθωση μικρών αποκλίσεων κατά την κατακορύφωση του πρωτεύοντα άξονα του γεωδαιτικού σταθμού.
- Η δυνατότητα εκτέλεσης βασικών τοπογραφικών υπολογισμών από τον ίδιο το γεωδαιτικό σταθμό, σε πραγματικό χρόνο (π.χ. μετατροπή κεκλιμένης απόστασης σε οριζόντια, επίλυση εμπροσθοτομίας κλπ), γνωστά με την ορολογία COGO.
- Η δυνατότητα μέτρησης μηκών χωρίς ανακλαστήρα (reflectorless).
- Η δυνατότητα ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής κίνησης των μερών του γεωδαιτικού σταθμού (servo και mag drive αντίστοιχα).
- Η αυτοβαθμονόμηση στη μέτρηση αποστάσεων.
- Η δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης στόχου (ATR – Automated Target Recognition) ή και παρακολούθησής του, όπου ο γεωδαιτικός σταθμός εντοπίζει ή και παρακολουθεί αντίστοιχα (εντός συγκεκριμένων ανοχών) τον ανακλαστήρα, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα των τοπογραφικών εργασιών πεδίου.
- Η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου του σταθμού (λειτουργιών, όχι σκόπευσης) κατά την λειτουργία ATR ή την παρακολούθηση κινούμενου ανακλαστήρα, έτσι ώστε ο χειριστής του σταθμού να μπορεί να είναι ταυτόχρονα και στοχοφόρος. Οι σταθμοί αυτοί λέγονται ρομποτικοί (Robotic Total Station).
- Η δυνατότητα λήψης δορυφορικών δεδομένων (GNSS) σε δέκτη ενσωματωμένο στον σταθμό, με δυνατότητα συνδυασμού των δεδομένων αυτών με τις μετρήσεις, από το λογισμικό υποστήριξης του σταθμού. Οι σταθμοί αυτοί λέγονται Smart Total Stations.
- Η ενσωμάτωση μιας ή περισσότερων ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών στο σταθμό, με διαφορετικά επίπεδα χωρικής ανάλυσης και με δυνατότητα λήψης (υπό προϋποθέσεις) μετρητικών εικόνων. Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται εικονογεωδαιτικοί ή IATS (Image Assisted Total Stations). [Λάμπρου, Πανταζής, 2011]

Τέλος, η τελευταία εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών είναι οι χωροεικονογεωδαιτικοί σταθμοί (spatial imaging total stations) ή πολυγεωδαιτικοί (multistations) οι οποίοι θα αναλυθούν ξεχωριστά παρακάτω, αφού αφορούν στο κύριο μέρος αυτής της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΑΡΩΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΥΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

2.1 Περί Σαρωτών Επιφανειών

Οι (επίγειοι) σαρωτές επιφανειών (TLS – Terrestrial Laser Scanners) είναι όργανα που κυκλοφόρησαν στην αγορά περίπου από το 2000 και μετά (Εικ.2.1)

Συνδυάζουν την μέτρηση γωνιών (οριζόντιων και κατακόρυφων) και την μέτρηση αποστάσεων των σημείων μιας επιφάνειας στο χώρο.

Η διαφορά τους με τους γεωδαιτικούς σταθμούς έγκειται στα κάτωθι:

- Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει μόνο τα όρια της επιφάνειας που θα σαρωθεί (ορθότερα, τα όρια ενός πρίσματος στο χώρο). Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, δεν μπορεί να στοχεύσει μεμονωμένα σημεία ενδιαφέροντος.
- Ο ρυθμός καταγραφής των σημείων είναι πάρα πολύ υψηλός σε σχέση ακόμα και με αυτοματοποιημένες λύσεις κίνησης των γεωδαιτικών σταθμών.
- Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων είναι συνήθως μικρότερη από αυτή ενός γεωδαιτικού σταθμού.
- Είναι όργανα με αρκετά μεγαλύτερο βάρος από τους γεωδαιτικούς σταθμούς και συνεπώς δύσκολο να μεταφερθούν σε οποιοδήποτε χώρο.
- Τα σημεία αποτυπώνονται σε ένα αυθαίρετο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα, για κάθε στάση του σταθμού. Συνεπώς, η διαδικασία της κέντρωσης του TLS επί σημείου του εδάφους, δεν υφίσταται.



Εικ.2.1: Ο επίγειος σαρωτής επιφανειών FARO Focus 3D

2.2 Περί Πολυγεωδαιτικών Σταθμών

Οι πολυγεωδαιτικοί σταθμοί (multistations) είναι υβριδικά όργανα μέτρησης, τα οποία συνδυάζουν την τεχνολογία των TLS και των γεωδαιτικών σταθμών. Τα πρώτα μοντέλα αυτών των οργάνων, εμφανίστηκαν στην αγορά από το 2010 και μετά. (Εικ.2.2)



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικ.2.2: Πολυγεωδαιτικοί σταθμοί: (α) Ο σταθμός SX-10 της εταιρίας Trimble (β) Ο σταθμός MS-60 Nona της εταιρίας Leica (γ) Ο σταθμός GTL-1000 της εταιρίας Topcon (δ) Ο σταθμός IS-3 της εταιρίας Topcon

Βέβαια, ο όρος multistation δεν αφορά μία κατηγορία με εντελώς ενιαία χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, ο σταθμός Leica Nona MS60 συνδυάζει τις ιδιότητες ενός σταθμού IATS με αυτές ενός TLS, ενώ ο

σταθμός Trimble SX10 συνδυάζει μεν όλα τα παραπάνω, όμως το τηλεσκόπιο του σταθμού, έχει καταργηθεί.

Η χρήση αυτών των οργάνων, πέρα από τις προφανείς ευκολίες που παρέχει η χρήση ενός αντί δύο οργάνων στο πεδίο, έχει ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα. Μπορεί να προσδιορίσει το νέφος σημείων , το οποίο αποτυπώνει το «TLS» μέρος του οργάνου, σε σύστημα αναφοράς που μπορεί να οριστεί μέσω των μετρήσεων του «Total Station» μέρους του οργάνου. Μάλιστα, στον σταθμό Trimble SX10 υπάρχει και η δυνατότητα απευθείας γεωαναφοράς των νεφών σημείων (εντός του οργάνου, χωρίς μετεπεξεργασία). [Lachat et al, 2017]

Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται η σύγκριση τεσσάρων (4) τέτοιων οργάνων ως προς τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 2.1: Η σύγκριση τεσσάρων multistations ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. (Πηγές: www.trimble.geospatial.com, www.leica.com, www.topcon.com)

| | Topcon IS-3 | Leica MS60 | Trimble SX-10 | Topcon GTL-1000 |
|---|-------------|--------------|-------------------|-----------------|
| έτος Κυκλοφορίας | 2011 | 2015 | 2016 | 2019 |
| Αβεβαιότητα Μέτρησης Γωνιών | 3'' | 1'' | 1'' | 3'' |
| Αβεβαιότητα Μέτρησης Αποστάσεων (EDM) με Ανακλαστήρα | 2mm+2 ppm | 1mm+1.5 ppm | 1mm+1.5 ppm | 1mm+2 ppm |
| Αβεβαιότητα Μέτρησης Αποστάσεων (EDM) χωρίς Ανακλαστήρα | 10mm+10 ppm | 2mm+2 ppm | 2mm+1.5 ppm | 2mm+2 ppm |
| Μέγιστο Βεληνεκές EDM με Ανακλαστήρα | 5000 m | 10000 m | 5500 m | 5000 m |
| Μέγιστο Βεληνεκές EDM χωρίς Ανακλαστήρα | 2000 m | 2000 m | 800 m | 1000 m |
| Ανάλυση Ψηφιακής Κάμερας | 1.3 Mpix | 5 Mpix | 5 Mpix | 5 Mpix |
| Ρυθμός Καταγραφής Σημείων σε λειτουργία Σαρωτή | 20 pts/sec | 1000 pts/sec | 26600 pts/sec | 100000 pts/sec |
| Μέγιστο Βεληνεκές Σάρωσης | 2000 m | 1000 m | 600 m | 70 m |
| Ακρίβεια Σάρωσης 3Δ Σημείου | - | 2mm+2 ppm | 2.5mm (στα 100 m) | 10mm (στα 30m) |

Στον Πίνακα 2.1 μπορούν να παρατηρηθούν καταρχάς σημαντικές διαφορές μεταξύ των οργάνων στον μέγιστο ρυθμό καταγραφής σημείων, κατά τη διαδικασία της σάρωσης. Ο σταθμός SX-10 της Trimble για παράδειγμα, έχει πολύ μεγαλύτερο μέγιστο ρυθμό καταγραφής σημείων από αυτόν της Leica και του Topcon IS-3. Εκτός από τη διαφορετική χρονολογία πρώτης κυκλοφορίας τους, η διαφορά έγκειται στο ότι ο σταθμός SX-10 δεν διαθέτει τηλεσκόπιο. Το τηλεσκόπιο είναι ένα όργανο σημαντικού βάρους σε έναν σταθμό και αυτό δυσχεραίνει την κίνηση των μερών του και την ταχύτητα αποτύπωσης σημείων. Ωστόσο, είναι προφανές ότι ο σταθμός GTL-1000 της Topcon έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν του σταθμού της Trimble. Αυτό παρ όλα

αυτά έχει μία επίπτωση τόσο στην ακρίβεια αποτύπωσης των σημείων , η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτές των υπολοίπων σταθμών όσο και στη μέγιστο βεληνεκές σάρωσης, το οποίο είναι περίπου 70 m , εκεί όπου οι υπόλοιποι τρεις σταθμοί επιτυγχάνουν μέγιστα βεληνεκή σάρωσης από 600 – 2000 m.

Μπορεί γενικότερα να συναχθεί πως όσο περισσότερο ένα multistation «κλίνει» προς έναν γεωδαιτικό σταθμό, τόσο περισσότερο θυσιάζεται ο ρυθμός καταγραφής σημείων στην σάρωση προς το συμφέρον της ακρίβειας αποτύπωσης και το αντίστροφο συμβαίνει με τα multistation που «κλίνουν» προς ένα TLS.

Στον Πίνακα 2.2, παρουσιάζεται η σύγκριση ενός TLS της εταιρίας Leica με τον σταθμό Trimble SX-10 , όσον αφορά στα πεδία της ακρίβειας αποτύπωσης ενός 3Δ σημείου, στο μέγιστο βεληνεκές σάρωσης και στο ρυθμό καταγραφής σημείων.

Πίνακας 2.2: Η σύγκριση του TLS RTC360 της εταιρίας Leica με τον πολυγεωδαιτικό σταθμό SX-10 της Trimble
(Πηγές: www.trimble.geospatial.com, www.leica.com)

| | Leica RTC360 (TLS) | Trimble SX-10 |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| έτος Κυκλοφορίας | 2018 | 2016 |
| Ρυθμός καταγραφής σημείων | 2000000 pts/sec | 26600 pts/sec |
| Μέγιστο βεληνεκές σάρωσης | 130 m | 600 m |
| Ακρίβεια αποτύπωσης 3Δ σημείου | 5.3mm (στα 40 m) | 2.5mm (στα 100 m) |
| Μήκος κύματος ακτινοβολίας | 1550 nm | 1550 nm |

Γενικότερα, οι διαφορές μεταξύ των γεωδαιτικών σταθμών και των σαρωτών επιφανειών, στα πεδία της ακρίβειας των μετρήσεων, του βεληνεκούς μέτρησης και του ρυθμού καταγραφής, προκύπτουν από:

- Τον διαφορετικό τρόπο λειτουργίας και ανάγνωσης των γωνιών (κάτοπτρα σε αντίθεση με αναγνώριση προτύπων σε βαθμονομημένους δίσκους)

- Τα διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας της εκπεμπόμενης ακτίνας
- Τις μεθόδους υπολογισμού της απόστασης (η μέθοδος διαφοράς φάσης εκπεμπόμενης και ανακλώμενης ακτίνας, που χρησιμοποιείται σε αρκετά TLS δίνει πολύ πιο γρήγορα αποτελέσματα από την μέθοδο διαφοράς χρόνου)
- Την επίδραση των σφαλμάτων των μετρήσεων στον τρόπο υπολογισμού του 3D σημείου στο TLS
- Τη διαφορετική ανακλαστικότητα των σημείων του μετρούμενου αντικειμένου

2.3 Ο Πολυγεωδαιτικός Σταθμός Trimble SX-10

Στη συνέχεια και λόγω του ότι το όργανο που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι ο πολυγεωδαιτικός σταθμός Trimble SX-10 , θα γίνει αναφορά στις ιδιαίτερες λειτουργίες του. Αυτές συνοψίζονται στα κάτωθι:

- Ο σταθμός δεν διαθέτει τηλεσκόπιο, παρά μόνο κάμερες.[Lachat et al,2017]. Για αυτό το λόγο, μιας και δεν υπάρχει λόγος σκόπευσης μέσω κάποιου οπτικού συστήματος, ο χειρισμός του (και η σκόπευση σημείων) γίνεται μέσω μιας απομακρυσμένης μονάδας – χειριστηρίου (tablet). (Εικ.2.3). Ούτως ή άλλως , δεν υπάρχει ενσωματωμένη οθόνη στο όργανο , κάτι που βοηθάει επίσης στη μεγάλη ταχύτητα αποτύπωσης σημείων, λόγω μικρότερου συνολικού βάρους του οργάνου. Το χειριστήριο , μπορεί να συνδεθεί είτε μέσω Wi-Fi με τον σταθμό , είτε με ασύρματη σύνδεση μεγάλων αποστάσεων (LRR).[Trimble, Quick Start Guide]



Εικ.2.3: Το Tablet T10 της εταιρίας Trimble. Ένα από τα χειριστήρια (tablets) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον σταθμό SX-10.

- Ο σταθμός ενσωματώνει τρεις (3) κάμερες. Οι δύο από αυτές, με την ονομασία overview και primary, έχουν τον άξονα λήψης τους παράλληλο στον άξονα σκόπευσης του σταθμού, ενώ ο άξονας της τρίτης κάμερας, που ονομάζεται telescope camera, ταυτίζεται (coaxial) με τον σκοπευτικό άξονα του σταθμού. Διαθέτουν το ίδιο μέγεθος αισθητήρα (2592X1944 pix), αλλά η καθεμία έχει διαφορετική εστιακή απόσταση, συνεπώς και διαφορετική χωρική ανάλυση. [Lachat et al,2017]. Αυτές οι τρεις (3) κάμερες, χρησιμοποιούνται για διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή που επιλέγει ο χρήστης, αλλά είναι βαθμονομημένες με τον σκοπευτικό άξονα του σταθμού (και με το ψηφιακό σταυρόνημα σκόπευσης), έτσι ώστε η μετάβαση από τη μία προοπτική ενός σημείου προς την άλλη κατά τη διάρκεια του zoom, να γίνεται χωρίς να απαιτείται επανασκόπευση του ίδιου σημείου από τον χρήστη.
Τέλος, σημειώνεται πως υφίσταται και χονδρική σκόπευση με κλασσικό τηλεσκόπιο, όπως στους περισσότερους γεωδαιτικούς σταθμούς.
- Η χρήση των καμερών, πέρα από την πρωταρχική διαδικασία σκόπευσης ενός σημείου, έχουν και τους εξής ρόλους:
 - Τη δημιουργία «φωτογραφικού κροκί» του πεδίου αποτύπωσης, έχοντας μάλιστα τη δυνατότητα δημιουργίας πανοράματος εικόνων, ρυθμίζοντας και την παράμετρο της επικάλυψης μεταξύ τους

- Του χρωματισμού των νεφών σημείων , επιλέγοντας μάλιστα και την κάμερα από την οποία θα γίνει η δειγματοληψία του χρώματος στα σημεία (ισχύει για τις overview και primary κάμερες) [Lachat et al,2017]
- Η κέντρωση του οργάνου μπορεί να γίνει και αυτή μέσω μιας κάμερας στο τρικόγλιο του οργάνου (plummet camera) (Εικ.2.4)
- Η διαδικασία της σάρωσης επιφανειών (scanning) , υποβοηθείται από τις κάμερες, μέσω μιας διαδραστικής διαδικασίας επιλογής των ορίων του αντικειμένου που θα σαρωθεί. Οι επιλογές της οριοθέτησης σε αυτή την περίπτωση είναι οι κάτωθι:
 - Οριοθέτηση ορθογωνίου (rectangle), όπου σαρώνεται η περιοχή εντός ενός ορθογωνίου, στο οποίο καθορίζονται οι δύο απέναντι κορυφές.(Εικ.2.5)
 - Οριοθέτηση πολυγώνου (polygon), όπου σαρώνεται η περιοχή εντός ενός πολυγώνου, στο οποίο καθορίζονται όλες οι κορυφές. (Εικ.2.6)
 - Οριοθέτηση οριζόντιας περιοχής (horizontal band), όπου σαρώνεται όλη η οριζόντια περιοχή (σε περιστροφή 360°) πάνω ή κάτω από ένα σημείο το οποίο καθορίζεται. (Εικ.2.7)
 - Επιλογή πλήρους σάρωσης (full dome), όπου σαρώνεται όλη περιοχή σε οριζόντια περιστροφή 360° και σε 148° άνωθεν και κάτωθεν του οριζόντιου επιπέδου που περνάει από το κέντρο του σταθμού. Σε αυτή την επιλογή δεν υποδεικνύεται προφανώς κανένα σημείο. (Εικ.2.8) [Trimble,Field Guide]

Σημειώνεται πως στις ανωτέρω περιπτώσεις οριοθέτησης, τα σχήματα (ορθογώνιο και πολύγωνο) είναι απλά προβολές των 3Δ πρισμάτων του χώρου στο επίπεδο της εικόνας.



Εικ.2.4: Η οθόνη του tablet με το χειρισμό της plummet camera κατά την διαδικασία της κέντρωσης- οριζοντίωσης



Εικ.2.5: Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση rectangle



Εικ.2.6: Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση polygon



Εικ.2.7: Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της σάρωσης με οριοθέτηση horizontal band



Εικ.2.8: Η οθόνη του tablet κατά την διαδικασία της πλήρους σάρωσης (full dome)

- Υπάρχει η δυνατότητα της επιλογής της πυκνότητας της σάρωσης του νέφους σημείων σε τέσσερις κατηγορίες, με βάση μια απόσταση αναφοράς στα 10 m ως εξής:
 - Απόσταση σημείων 10mm (Coarse)
 - Απόσταση σημείων 5mm (Standard)
 - Απόσταση σημείων 2mm (Fine)
 - Απόσταση σημείων 1mm (Superfine) [Lachat et al,2017]
- Υπάρχει η δυνατότητα της οπτικοποίησης των νεφών σημείων στην οθόνη- tablet του χειριστή, χωρίς να απαιτείται κάποιο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας

- Τέλος, μία βασική δυνατότητα του σταθμού, είναι η συνένωση μεταξύ διαφόρων νεφών σημείων ενός αντικειμένου, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από διάφορες θέσεις λήψης (scan stations) του σταθμού. Με μία διαδικασία που ονομάζεται direct georeferencing, δεν απαιτείται η συνένωση (και γεωαναφορά) των νεφών με κλασσικές διαδικασίες registration (όπως λ.χ. ο αλγόριθμος ICP) στο πλαίσιο μιας μετεπεξεργασίας, αλλά γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Αυτό βέβαια γίνεται, εφόσον ο σταθμός έχει αποκτήσει ικανή πληροφορία για τον ορισμό ενός συστήματος αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται είτε κεντρώνοντάς τον επί ενός σημείου γνωστών συντεταγμένων, είτε εάν αυτό είναι άγνωστο, τότε μπορεί ο ίδιος ο σταθμός να προσδιορίσει τη θέση του μέσω διάφορων διαδικασιών π.χ. επιλογή επίλυσης εμπροσθοτομίας ή πολλαπλής (free station).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ

3.1 Η μετρολογία στην Ελλάδα

Η μετρολογία , γενικότερα είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη φύση και τις ιδιότητες των μετρήσεων, όπως αυτές εκφράζονται μέσω των οργάνων μέτρησης, την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους, καθώς και τις μονάδες μέτρησής τους.

Χωρίζεται σε τρεις (3) γενικότερους τομείς [Αλεξίου , 2011]:

- Την Επιστημονική Μετρολογία
- Την Βιομηχανική Μετρολογία
- Την Νομική Μετρολογία

Στην εργασία αυτή , θα γίνει αναφορά μόνο στην Βιομηχανική (ή Εφαρμοσμένη) Μετρολογία και συγκεκριμένα στον κλάδο της: Γεωδαιτική Μετρολογία.

Σκοπός της, είναι η εφαρμογή διαδικασιών ελέγχου (και ως κάποιο βαθμό βαθμονόμησης) των γεωδαιτικών οργάνων , ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων που παρέχουν.

Ως μετρολογικός έλεγχος, ορίζεται η στατιστική σύγκριση της αβεβαιότητας μέτρησης του οργάνου μας, με μία προκαθορισμένη τιμή, ενδεικτική της ακρίβειάς του, η οποία δίδεται συνήθως από τον κατασκευαστή του.

Ως βαθμονόμηση , ορίζεται η δημιουργία μιας κλίμακας μέτρησης στο όργανο, η οποία να συνδέεται με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις που αυτό συλλέγει.

Στην Ελλάδα, η μετρολογία εκπροσωπείται από το Ε.Ι.Μ. (Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας) , το οποίο ιδρύθηκε το 1994.

Προς το παρόν, στον κατάλογο υπηρεσιών του ΕΙΜ, δεν περιλαμβάνεται ο έλεγχος ή η βαθμονόμηση των γεωδαιτικών οργάνων. Ωστόσο, υφίστανται διεθνή πρότυπα για αυτές τις διαδικασίες. Αυτά τα πρότυπα, ανήκουν πλέον στα ISO (International Organisation for Standardization) , ενώ έχουν βασιστεί στα παλαιότερα γερμανικά πρότυπα DIN (Deutsches Institut für Normung).

Αυτά τα πρότυπα, καταρχάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σύμφωνα με το ΦΕΚ 708/Β/1998, όπου ο αντίστοιχος ΕΛ.Ο.Τ. (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) , νομιμοποιείται στο να τα εφαρμόζει.

Στη συνέχεια, οι έλεγχοι των γεωδαιτικών οργάνων καθίστανται υποχρεωτικοί, όταν αφορούν μετρητικές εργασίες υψηλής ακρίβειας και είτε καθορίζονται ρητά στα τεύχη διακήρυξης ενός έργου/εργασίας, είτε σε κάθε περίπτωση εμπίπτουν στις διατάξεις του ΦΕΚ 1013/Β/2001, όπου αναφέρεται ότι «...η χρήση μη διακριβωμένων οργάνων δεν επιτρέπεται».

3.2 Οι μετρολογικοί έλεγχοι των γεωδαιτικών σταθμών, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 17123-3 και ISO 17123-4

Τα πρότυπα ISO που αφορούν στους γεωδαιτικούς σταθμούς, περιγράφουν ξεχωριστές διαδικασίες ελέγχου για τη μέτρηση των μηκών (EDM μέρος του σταθμού) και για τη μέτρηση των γωνιών, οριζόντιων και κατακόρυφων.

Το πρότυπο ελέγχου για τη μέτρηση των γωνιών, είναι το ISO 17123-3 και το πρότυπο ελέγχου για τη μέτρηση των μηκών είναι το ISO 17123-4. Τα εν λόγω πρότυπα πλέον περιγράφονται από μία ενιαία κωδική ονομασία, την ISO 17123-5:2018. Ωστόσο, στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιείται η πρότερη κωδική ονομασία.

3.2.1 Ο έλεγχος της μέτρησης των γωνιών σε ένα γεωδαιτικό σταθμό σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-3

Ο έλεγχος της μέτρησης των γωνιών (ακριβέστερα, διευθύνσεων) σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, αφορά θεοδόλιχα, συνεπώς γίνεται διαχωρισμός μεταξύ οριζόντιων και κατακόρυφων διευθύνσεων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αρχικά προσδιορίζεται μία εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του προσδιορισμού μιας διεύθυνσης, η οποία στη συνέχεια αξιολογείται στατιστικά, σύμφωνα με τα δεδομένα της τυπικής απόκλισης της μέτρησης, που δίνεται από τον κατασκευαστή.

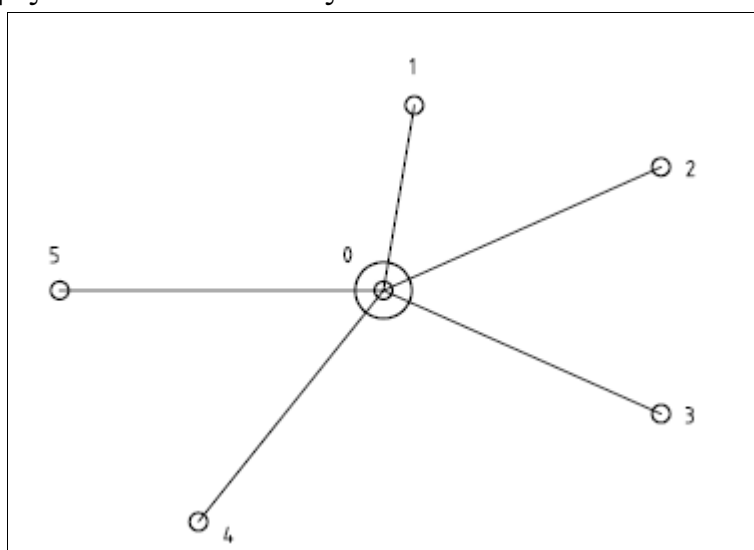
Ο έλεγχος μέτρησης των οριζόντιων διευθύνσεων

Το πρότυπο προτείνει δύο διαδικασίες ελέγχου, την απλή και την πλήρη. Και οι δύο, αφορούν στην σκόπευση ενός αριθμού ευκρινών στόχων,

περίπου στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, σε μία απόσταση από το σταθμό, που κυμαίνεται από 100 – 250m και όσο το δυνατόν κατανεμημένοι (στις μεταξύ τους γωνίες) καλύτερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα.3.1

Η σκόπευση γίνεται σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου, σε έναν αριθμό περιόδων (διαφορετική αφετηρία οριζόντιων διευθύνσεων) και σε έναν αριθμό σειρών μετρήσεων.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο διαδικασιών αφορούν στην διαφοροποίηση των αριθμών των σειρών μετρήσεων και στον αριθμό των στόχων. Όλα αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1



Σχήμα.3.1: Η θέση του σταθμού (0) και των στόχων (1,2,3,4,5) σε μία τυπική διάταξη κατά τον έλεγχο οριζοντίων διευθύνσεων σύμφωνα με το ISO – 17123-3

Πίνακας 3.1: Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ της απλής και πλήρους διαδικασίας στον έλεγχο των οριζοντίων διευθύνσεων ενός γεωδαιτικού σταθμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO- 17123-3

| | Απλή Διαδικασία | Πλήρης Διαδικασία |
|------------------------------|-----------------|-------------------|
| Αριθμός Στόχων (k) | 4 | 5 |
| Αριθμός Σειρών Μετρήσεων (i) | 1 | 4 |
| Αριθμός Περιόδων (j) | 3 | 3 |

Οι υπολογισμοί (για την πλήρη διαδικασία) έχουν ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή των δύο θέσεων τηλεσκοπίου:

$$x_{j,k} = \frac{x_{j,k,I} + x_{j,k,II} \pm 200^{gon}}{2} \quad (3.1)$$

Στη συνέχεια θεωρείται η διεύθυνση του στόχου 1 ως η μηδενική διεύθυνση:

$$x'_{j,k} = x_{j,k} - x_{j,1} \quad j=1,2,3 \quad k=1,\dots,5 \quad (3.2)$$

Στη συνέχεια , υπολογίζονται οι μέσοι όροι των τριών περιόδων για τη σχέση (2):

$$\bar{x}_k = \frac{x'_{1,k} + x'_{2,k} + x'_{3,k}}{3} \quad k=1,\dots,5 \quad (3.3)$$

Υπολογίζεται η κάτωθι διαφορά για κάθε ζεύγος j,k

$$d_{j,k} = \bar{x}_k - x'_{j,k} \quad j=1,2,3 \quad k=1,\dots,5 \quad (3.4)$$

Υπολογίζεται ο μέσος όρος της (4) για πέντε στόχους σε κάθε περίοδο

$$\bar{d}_j = \frac{d_{j,1} + d_{j,2} + d_{j,3} + d_{j,4} + d_{j,5}}{5} \quad j=1,2,3 \quad (3.5)$$

Υπολογίζεται η διαφορά της (4) από την (5) για κάθε στόχο και κάθε περίοδο

$$r_{j,k} = d_{j,k} - \bar{d}_j \quad j=1,2,3 \quad k=1,\dots,5 \quad (3.6)$$

Επαληθεύεται ότι το άθροισμα των (5) σε κάθε περίοδο ισούται με μηδέν, έτσι ώστε να εξαλειφθούν σφάλματα στρογγύλευσης

$$\sum_{k=1}^5 r_{j,k} = 0 \quad j = 1,2,3 \quad (3.7)$$

Σε κάθε σειρά μέτρησης , υπολογίζεται το άθροισμα των τετραγώνων των (6)

$$\sum r_i^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 r_{j,k}^2 \quad (3.8)$$

Οι βαθμοί ελευθερίας για κάθε σειρά μέτρησης είναι

$$v_i = (3 - 1) * (5 - 1) = 8 \quad (3.9)$$

Ενώ η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της μέτρησης

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{v_i}} \quad (3.10)$$

Συνολικά και για τις τέσσερις σειρές μέτρησης, οι βαθμοί ελευθερίας είναι

$$v = 4 * v_i = 32 \quad (3.11)$$

Και η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της μέτρησης

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 \sum r_i^2}{v}} = S_{ISO-THEO-HZ} \quad (3.12)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις , διατηρήθηκε η τυπολογία του ISO 17123-3

Ο στατιστικός έλεγχος γίνεται μεταξύ αυτής της εκτίμησης της τυπικής απόκλισης της μέτρησης και της δεδομένης τιμής του κατασκευαστή σ_0 , κάνοντας χρήση της κατανομής χ^2 .

Έτσι, για επίπεδο εμπιστοσύνης $1-\alpha=0.95$ και βαθμούς ελευθερίας $v=32$, η μηδενική υπόθεση ότι το $s \leq \sigma_0$ δεν μπορεί να απορριφθεί εάν ισχύει ότι:

$$S \leq \sigma_0 * \sqrt{\frac{X^2_{v,1-a}}{v}} \quad (3.13)$$

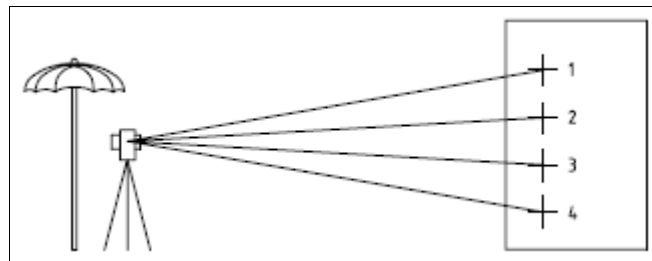
ή απλοποιητικά, για αυτούς του βαθμούς ελευθερίας και αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης :

$$S \leq \sigma_0 * 1.20 \quad (3.14)$$

Ο έλεγχος μέτρησης των κατακόρυφων διευθύνσεων

Κι εδώ το πρότυπο προτείνει αντίστοιχα δύο διαδικασίες ελέγχου, την απλή και την πλήρη. Οι διαδικασίες αυτές αφορούν στην σκόπευση τεσσάρων (4) στόχων , σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου , επί ενός (κατακόρυφου) κτιρίου.

Οι στόχοι πρέπει να απέχουν οριζόντια απόσταση περίπου 50 m από τον σταθμό, θα πρέπει επίσης να είναι σχετικά κατανεμημένοι και να καλύπτουν μία γωνία 30°, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.2: Η διάταξη ελέγχου κατακόρυφων διευθύνσεων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-3

Εδώ , η διαφοροποίηση των δύο διαδικασιών , αφορά μόνο στον αριθμό των σετ μετρήσεων , όπως συνοψίζεται στον Πίνακας 3.2

Πίνακας 3.2: Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ της απλής και πλήρους διαδικασίας στον έλεγχο των κατακόρυφων διευθύνσεων ενός γεωδαιτικού σταθμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO- 17123-3

| | Απλή Διαδικασία | Πλήρης Διαδικασία |
|------------------------------|-----------------|-------------------|
| Αριθμός Στόχων (k) | 4 | 4 |
| Αριθμός Σειρών Μετρήσεων (i) | 1 | 4 |
| Αριθμός Περιόδων (j) | 3 | 3 |

Οι υπολογισμοί (για την πλήρη διαδικασία έχουν ως εξής):

Αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή των δύο θέσεων τηλεσκοπίου:

$$x'_{j,k} = \frac{x_{j,k,I} - x_{j,k,II} + 400^{gon}}{2} \quad (3.15)$$

Στη συνέχεια, εκτιμάται το σφάλμα δείκτη δ_i (ξεχωριστά για κάθε σειρά μέτρησης):

$$\delta_i = \frac{1}{n * t} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 \frac{x_{j,k,I} + x_{j,k,II} - 400^{gon}}{2} \quad (3.16)$$

Το σφάλμα δείκτη που εκτιμάται από όλες τις σειρές μέτρησης είναι:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^4 \delta_i}{4} \quad (3.17)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι μέσοι όροι των τριών περιόδων για τη σχέση (11):

$$\bar{x}_k = \frac{x'_{1,k} + x'_{2,k} + x'_{3,k}}{3} \quad k=1, \dots, 4 \quad (3.18)$$

Υπολογίζεται η κάτωθι διαφορά για κάθε ζεύγος j,k:

$$r_{j,k} = x'_{j,k} - \bar{x}_k \quad j=1,2,3 \quad k=1,\dots,4 \quad (3.19)$$

Επαληθεύεται ότι το άθροισμα των (15) σε όλες τις περιόδους ισούται με μηδέν, έτσι ώστε να εξαλειφθούν σφάλματα στρογγύλευσης:

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 r_{j,k} = 0 \quad (3.20)$$

Σε κάθε σειρά μέτρησης , υπολογίζεται το άθροισμα των τετραγώνων των (15):

$$\sum r_i^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 r_{j,k}^2 \quad (3.21)$$

Οι βαθμοί ελευθερίας για κάθε σειρά μέτρησης είναι

$$v_i = (3 - 1) * 4 = 8 \quad (3.22)$$

Και η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της μέτρησης:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{v_i}} \quad (3.23)$$

Συνολικά και για τις τέσσερις σειρές μέτρησης, οι βαθμοί ελευθερίας είναι:

$$v = 4 * v_i = 32 \quad (3.24)$$

Ενώ η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της μέτρησης:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 \sum r_i^2}{v}} = S_{ISO-THEO-V} \quad (3.25)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις , διατηρήθηκε η τυπολογία του ISO 17123-3

Ο στατιστικός έλεγχος γίνεται πάλι μεταξύ αυτής της εκτίμησης της τυπικής απόκλισης της μέτρησης και της δεδομένης τιμής του κατασκευαστή σ_0 , κάνοντας χρήση της κατανομής χ^2 .

Έτσι, για επίπεδο εμπιστοσύνης $1-\alpha=0.95$ και βαθμούς ελευθερίας $\nu=32$, η μηδενική υπόθεση ότι το $s \leq \sigma_0$ δεν μπορεί να απορριφθεί εάν ισχύει ότι:

$$S \leq \sigma_0 * \sqrt{\frac{X^2_{\nu,1-\alpha}}{\nu}} \quad (3.26)$$

ή απλοποιητικά, για αυτούς του βαθμούς ελευθερίας και αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης :

$$S \leq \sigma_0 * 1.20 \quad (3.27)$$

Αξίζει να παρατηρηθεί, ότι σε αυτή τη διαδικασία, οι περίοδοι (j) που αναφέρονται, δεν εννοούν την διαφορετική γωνιομετρική αφετηρία (όπως ισχύει λ.χ. στις οριζόντιες διευθύνσεις), αλλά ένα είδος σετ μετρήσεων ακόμα, αφού όλες οι κατακόρυφες διευθύνσεις/γωνίες έχουν ως μοναδική αφετηρία (υποθετικά) το ζενίθ. Ωστόσο, μέσω των υπολογισμών, εκτιμάται το σφάλμα δείκτη (δ) και ελέγχεται για το κατά πόσο το σφάλμα δείκτη (δ) είναι μηδενικό ή όχι, κάνοντας χρήση της κατανομής Student.

Έτσι, για επίπεδο εμπιστοσύνης $1-\alpha=0.95$ και βαθμούς ελευθερίας $\nu=32$, η μηδενική υπόθεση ότι το $|\delta| \leq 0$ δεν μπορεί να απορριφθεί εάν ισχύει ότι:

$$|\delta| \leq s_\delta * t_{0.975} \quad (3.28)$$

όπου

$$s_\delta = \frac{s}{\sqrt{12} * \sqrt{4}} \quad (3.29)$$

ή απλοποιητικά για αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας και για αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης:

$$|\delta| \leq s * 0.3 \quad (3.30)$$

3.2.2 Ο έλεγχος της μέτρησης των αποστάσεων σε ένα γεωδαιτικό σταθμό σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-4

Για τον έλεγχο των μετρήσεων των αποστάσεων, το εν λόγω πρότυπο, περιγράφει και εδώ δύο διαφορετικές διαδικασίες: την απλή και την

πλήρη. Στην περίπτωση της μεταπτυχιακής εργασίας, θα εφαρμοστεί η απλή και είναι αυτή που θα περιγραφεί παρακάτω.

Προτού περιγραφεί η διαδικασία ελέγχου, πρέπει να τονιστεί ότι η μέτρηση αποστάσεων με ηλεκτρομαγνητικά μέσα, επηρεάζεται αρκετά από την διάθλαση της ακτινοβολίας και συνεπώς από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο μετρήσεων.

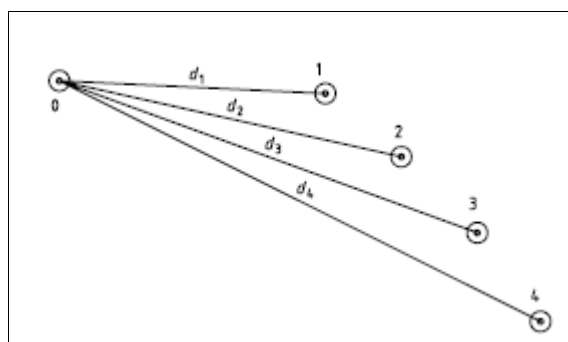
Έτσι, σε κάθε περίπτωση, είτε θα πρέπει μέσω κατάλληλων μοντέλων να γίνουν οι σχετικές ατμοσφαιρικές αναγωγές (κυρίως σε παλαιότερα όργανα) είτε το όργανο θα τις λάβει υπόψη του, αφού όμως ενημερωθεί για αυτές τις συνθήκες.

Ένα άλλο κρίσιμο σημείο, είναι το ότι θα πρέπει να ομοιάζουν με αυτές κατά τις οποίες το όργανο θα χρησιμοποιείται συνήθως.

Η απλή διαδικασία ελέγχου λοιπόν, αφορά μετρήσεις αποστάσεων προς τέσσερις (4) στόχους, σε αποστάσεις που βρίσκονται εντός των ορίων του συνήθους εύρους μετρήσεων του οργάνου (π.χ. από 20 – 200 m).

Τα σημεία τοποθέτησης των στόχων και του οργάνου θα πρέπει να είναι προκαθορισμένα (π.χ. βάθρα) και οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου τοποθέτησης του οργάνου και των σημείων τοποθέτησης των στόχων γνωστές και σε κάθε περίπτωση μετρημένες με όργανο ανώτερης ακρίβειας (όργανο αναφοράς) από το ελεγχόμενο.

Οι αποστάσεις αυτές (αποστάσεις αναφοράς), καθορίζονται ως οι μέσοι όροι τουλάχιστον τριών μετρήσεων από το όργανο αναφοράς, προφανώς ανηγμένων ατμοσφαιρικά. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται μία τυπική διάταξη του πεδίου ελέγχου όπου d_1, d_2, d_3, d_4 ($=\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4$)



Σχήμα 3.3: Η διάταξη ελέγχου μέτρησης αποστάσεων (απλή διαδικασία), σύμφωνα με το πρότυπο ISO-17123-4

Για τον έλεγχο, τοποθετείται το όργανο στην θέση 0 (Σχήμα 3.3). Κάθε ένα από τα τέσσερα μήκη (d_1 , d_2 , d_3 , d_4) μετράται τρεις (3) φορές. Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, γίνεται καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών, έτσι ώστε να γίνει η κατάλληλη αναγωγή.

Ο μέσος όρος των τριών (για κάθε στόχο) ανηγμένων ατμοσφαιρικά μετρήσεων καταγράφεται και συμβολίζεται με $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$

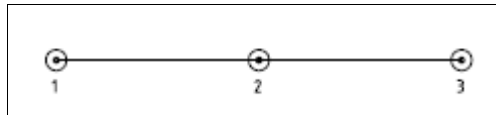
Στη συνέχεια, γίνεται ο στατιστικός έλεγχος, όπου ελέγχεται πλέον η ποσότητα $|\bar{\chi}_j - \chi_j|$, όπου είτε:

- 1) Θα πρέπει να βρίσκεται εντός ενός διαστήματος $(0, +p)$, σύμφωνα με το ISO-4463-1, όπου το p διαφέρει ανάλογα την χρήση του οργάνου είτε
- 2) Θα πρέπει να είναι μικρότερη από την ποσότητα $2.5*s$, όπου όμως το s , είναι η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων αποστάσεων του οργάνου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για το στήσιμο του πεδίου ελέγχου. Σημειώνεται δε, ότι η απόκλιση s , θα πρέπει να έχει εκτιμηθεί σύμφωνα με την πλήρη διαδικασία του ελέγχου μέτρησης των αποστάσεων που περιγράφει το πρότυπο ISO-17123-4.

Εδώ λοιπόν, σημειώνεται ότι δεν ελέγχεται το όργανο μόνο ως προς την εσωτερική του ακρίβεια, αλλά και ως προς την εξωτερική του. Ιδιαίτερα δε, εάν η ακρίβεια του οργάνου αναφοράς είναι αρκετά υψηλή, τότε δυσκολεύει ιδιαίτερα η διαδικασία για το όργανο ελέγχου. Αντίθετα επίσης, ο πλήρης έλεγχος που περιγράφει αυτό το πρότυπο, δεν εξαρτάται από «απόλυτα» μεγέθη αναφοράς, αλλά μόνο από την ονομαστική ακρίβεια που θέτει ο κατασκευαστής.

Κάτι άλλο που πρέπει επίσης να σημειωθεί, είναι το ότι εάν οι διαφορές $\bar{\chi}_j - \chi_j$, έχουν όλες το ίδιο πρόσημο, τότε υπάρχει υποψία ύπαρξης συστηματικού σφάλματος (μηδενικό σφάλμα ή/και σφάλμα κλίμακας). Σε αυτή την περίπτωση ελέγχουμε το όργανο για σφάλμα κλίμακας με συχνόμετρο (εργαστηριακός έλεγχος) και εκτιμούμε το μηδενικό σφάλμα με την εξής διαδικασία:

Κατασκευάζεται μια προσωρινή βάση ευθυγραμμίας (περί τα 50m) τριών στόχων που βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο πάνω σε τρίποδες εξαναγκασμένης κέντρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Η βάση ελέγχου για τον έλεγχο ύπαρξης μηδενικού σφάλματος, κατά το πρότυπο ISO -17123-4 (απλή διαδικασία)

Το μηδενικό σφάλμα (δ) υπολογίζεται ως :

$\delta = d(1,3) - d(1,2) - d(2,3)$, όπου $d(i,j)$ είναι η οριζόντια παρατήρηση της απόστασης μεταξύ των σημείων i και j .

Στην περίπτωση που δεν μπορεί να αναγνωριστεί κάποιο εκ των δύο αυτών συστηματικών σφαλμάτων, το πρότυπο προτείνει να ακολουθηθεί η πλήρης διαδικασία ελέγχου. Ωστόσο, στο πρότυπο δεν δίνονται περαιτέρω οδηγίες για το πότε θεωρείται ή όχι στατιστικά αμελητέο ένα συστηματικό σφάλμα, ώστε να καταφύγουμε στον πλήρη έλεγχο.

3.3 Η βαθμονόμηση των καμερών του πολυγεωδαιτικού σταθμού

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ο σταθμός Trimble SX-10 δεν φέρει τηλεσκόπιο, αλλά τρεις (3) κάμερες, οι οποίες λόγω διαφορετικού FOV/εστιακής απόστασης, σε ίδιο μέγεθος αισθητήρα (2592X1944), δίνουν διαφορετική χωρική ανάλυση η καθεμία.

Προς το παρόν, δεν έχει αναφερθεί καμμία φωτογραμμετρική χρήση των καμερών του σταθμού, αλλά οπωσδήποτε πριν μια τέτοια χρήση, θα ήταν απαραίτητη μια **βαθμονόμησή** τους.

Με τον όρο βαθμονόμηση, ορίζεται ο προσδιορισμός (εκτίμηση) των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού μιας μηχανής. Οι συνήθεις παράμετροι είναι :

c : Η σταθερά της μηχανής ή γεωμετρικά η απόσταση του κέντρου προβολής από το φωτογραφικό επίπεδο

x_o^e, y_o^e : Οι συντ/μένες του πρωτεύοντος σημείου ως προς το σύστημα των εικονοσυντεταγμένων

$K_1, K_2, K_3 \dots$: Οι συντελεστές της ακτινικής διαστροφής του φακού της μηχανής

$P_1, P_2, P_3 \dots$: Οι συντελεστές της εφαπτομενικής διαστροφής του φακού της μηχανής

ar ή λ (Aspect Ratio) : Ο λόγος του μήκους του Pixel κατά τη μία δ/νση προς το λόγο του μήκους του pixel κατά την άλλη δ/νση . (Το Pixel εδώ θεωρείται ορθογωνικό)

sk ή ε (Skewness): Η απόκλιση του σχήματος του pixel από την ορθογωνικότητα (Το pixel εδώ θεωρείται παραλληλόγραμμο).

Η βαθμονόμηση μιας κάμερας μπορεί να γίνει είτε χρησιμοποιώντας ένα πεδίο ελέγχου, είτε με αυτοβαθμονόμηση.

Στην περίπτωση του πεδίου ελέγχου, είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια οι συντεταγμένες κάποιων ευκρινών στόχων (φωτοσταθερά σημεία) , σε ένα (συνήθως αυθαίρετο) γεωδαιτικό σύστημα, ενώ είναι άγνωστος ο εξωτερικός και ο εσωτερικός προσανατολισμός της κάμερας. Ως παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού, θεωρούνται οι τρεις μετατοπίσεις (κατά x, y, z) του κέντρου προβολής της κάμερας και τις τρεις στροφές που παρουσιάζει το σύστημα της εικόνας προς το εξωτερικό γεωδαιτικό σύστημα. Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επισημαίνεται ότι υπάρχουν και πεδία ελέγχου όπου η κάμερα τοποθετείται σε διάταξη τέτοια ώστε ο εξωτερικός προσανατολισμός της, να είναι και αυτός γνωστός, αλλά είναι αρκετά πιο σπάνια περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση γίνεται χρήση των συνθηκών συγγραμμικότητας.

Στην περίπτωση της αυτοβαθμονόμησης, υπάρχουν επίσης κάποια γνωστά φωτοσταθερά σημεία, αλλά λαμβάνονται υπόψη και τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων που λαμβάνει η κάμερα, προφανώς από διαφορετικές θέσεις. Ουσιαστικά είναι μία εφαρμογή της μεθόδου της δέσμης με αυτοβαθμονόμηση.

Ένα μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί [Γεωργόπουλος κ.α., 2010] για περιπτώσεις βαθμονόμησης ψηφιακών καμερών είναι η συνθήκη συγγραμμικότητας , διορθωμένη από τις διάφορες παραμέτρους παραμορφώσεων. Αυτή έχει ως εξής:

$$x^\varepsilon = x_o^\varepsilon - c \frac{A_1}{\Pi} + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_{af} \quad (3.31)$$

$$y^\varepsilon = y_o^\varepsilon - c \frac{A_2}{\Pi} + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_{af} \quad (3.32)$$

όπου

$$A_1 = r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0) \quad (3.33)$$

$$A_2 = r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0) \quad (3.34)$$

$$\Pi = r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0) \quad (3.35)$$

Οι διορθώσεις λόγω ακτινικής διαστρόφης του φακού:

$$\Delta x_r = (x^\varepsilon - x_o^\varepsilon)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \quad (3.36)$$

$$\Delta y_r = (y^\varepsilon - y_o^\varepsilon)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \quad (3.37)$$

Οι διορθώσεις λόγω εφαπτομενικής διαστρόφης του φακού:

$$\Delta x_d = P_1(r^2 + 2(x^\varepsilon - x_o^\varepsilon)^2) + 2P_2(x^\varepsilon - x_o^\varepsilon)(y^\varepsilon - y_o^\varepsilon) \quad (3.38)$$

$$\Delta y_d = 2P_1(x^\varepsilon - x_o^\varepsilon)(y^\varepsilon - y_o^\varepsilon) + P_2(r^2 + 2(y^\varepsilon - y_o^\varepsilon)^2) \quad (3.39)$$

Η διόρθωση της απόκλισης του pixel από την ορθογωνικότητα:

$$\Delta x_{af} = (ar)(y^\varepsilon - y_o^\varepsilon) \quad (3.40)$$

Η διόρθωση της διαφοράς κλίμακας κατά τις δύο διαστάσεις του pixel:

$$\Delta y_{af} = (sk)(y^\varepsilon - y_o^\varepsilon) \quad (3.41)$$

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει πλεονάζων αριθμός παρατηρήσεων και η συνόρθωση είναι επιβεβλημένη. Οι διαδικασίες της συνόρθωσης, επιλογής κατάλληλων προσεγγιστικών παραμέτρων κτλ., αντιμετωπίζονται από λογισμικά (εμπορικά ή ελεύθερα).

Μετά την εκτίμηση των παραμέτρων, εξάγονται συμπεράσματα τόσο για τις εκτιμήσεις των παραμέτρων, όσο και για την ποιότητά τους, μέσω των μεταβλητοτήτων που τις συνοδεύουν.

Ωστόσο, η βαθμονόμηση δεν είναι ένα εντελώς απλό πρόβλημα. Την ακρίβεια (και τη σταθερότητα) της λύσης επηρεάζουν σίγουρα και τα κάτωθι:

- ο αριθμός ομόλογων σημείων
- η γεωμετρία της λήψης
- Η χρήση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου
- η απόσταση λήψης

Έτσι, σε κάθε περίπτωση για περιπτώσεις βαθμονόμησης υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας, ένας συνδυασμός του αριθμού των αναφερόμενων παραμέτρων θα έδινε ένα καλύτερο αποτέλεσμα.

3.4 Πρόταση ελέγχου για πολυγεωδαιτικούς σταθμούς χωρίς ύπαρξη τηλεσκοπίου

Οι έλεγχοι που αναφέρθηκαν στις παραγράφους 3.1 και 3.2, αφορούν σε όργανα στα οποία το τηλεσκόπιο υφίσταται και επιπλέον ο σκοπευτικός άξονας, υλοποιείται φυσικά μέσω του σταυρονήματος στο οπτικό πεδίο του χειριστή.

Σε όργανα όμως, όπως αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην εν λόγω εργασία, η σκόπευση γίνεται μέσω ψηφιακού σταυρονήματος, το οποίο εμφανίζεται στο φωτογραφικό επίπεδο που απεικονίζεται στην LCD οθόνη του χειριστή.

Παρ όλα αυτά, είναι γνωστό ότι ένα μεγάλο μέρος των συστηματικών σφαλμάτων που επιδρούν στις μετρήσεις (και με τη σειρά τους μεταδίδονται στις άγνωστες παραμέτρους μιας τοπογραφικής εργασίας), εξαρτώνται από κατασκευαστικές ατέλειες των οργάνων, οι οποίες θεωρούνται δεδομένες, αλλά ωστόσο στο μεγαλύτερο ποσοστό τους εξαλείφονται μέσω της τεχνικής των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου. Για παράδειγμα, θεωρείται δεδομένο ότι ο πρωτεύοντας άξονας του θεοδόλιχου (άξονας περιστροφής) είναι κάθετος ως προς τον δευτερεύοντα άξονά του (άξονας περιστροφής του τηλεσκοπίου), αλλά η

μη καθετότητά τους, εισάγει το σφάλμα αυτό που στη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστό με την ονομασία collimation error.

Η μη φυσική υλοποίηση του σταυρονήματος και του τηλεσκοπίου σε πολυγεωδαιτικούς σταθμούς όπως ο Trimble SX-10 , δημιουργούν μια αμφιβολία στην αποτελεσματικότητα της τεχνικής των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου. Στην καλύτερη περίπτωση, το ψηφιακό σταυρόνημα, έχει προκύψει από μία διαδικασία βαθμονόμησης όπως αυτές που περιγράφονται στις εργασίες του Walser (2004) ή του Vogel (2006) και συνεπώς χαρακτηρίζεται από μία ακρίβεια. Πέρα από το γεγονός ότι η ακρίβεια αυτή όμως, είναι μία στατιστική ακρίβεια, που επηρεάζεται από πάρα πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. από τις συνθήκες ευκρίνειας και τις αποστάσεις των στόχων κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, οι οποίες διαφοροποιούνται από τις συνθήκες σκόπευσης στο πεδίο εργασιών, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι επίσης ότι το ψηφιακό σταυρόνημα δεν είναι σταθερό στον αισθητήρα, όπως θα ήταν π.χ. ένα εικονόσημα (fiducial) στους παλιότερους αναλογικούς αισθητήρες.

Επίσης, κάτι που πρέπει να μην συγχέεται σε αυτή την περίπτωση , είναι η χρήση της τεχνικής των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου με την ύπαρξη της τεχνολογίας των αντιδιαμετρικών αναγνώσεων στον οριζόντιο κύκλο, το οποίο, υπάρχει μεν σε όλους τους σύγχρονους γεωδαιτικούς σταθμούς – και στον Trimble SX-10 – (Εικ.3.1) ,αλλά συνεισφέρει στην αντιμετώπιση εντελώς διαφορετικών σφαλμάτων, όπως λ.χ. η εκκεντρότητα του οριζόντιου κύκλου σε σχέση με τον άξονα περιστροφής του γεωδαιτικού σταθμού.

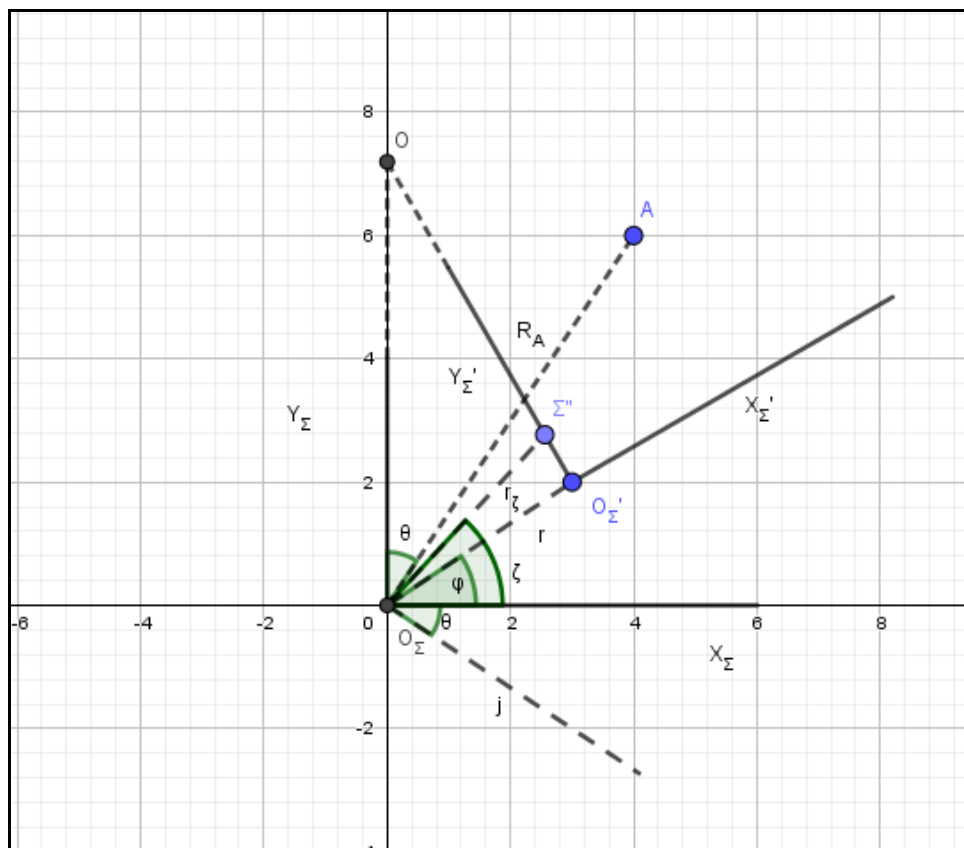
| SURVEY PERFORMANCE | |
|---|---|
| ANGLE MEASUREMENT | |
| Sensor type | Absolute encoder with diametrical reading |
| Angle measurement accuracy ¹ | 1" (0.3 mgon) |
| Angle display (least count) | 0.1" (0.01 mgon) |

Εικ.3.1: Η ύπαρξη της τεχνολογίας των αντιδιαμετρικών αναγνώσεων στον σταθμό Trimble SX-10

Το πρότυπο ελέγχου για τη μέτρηση των γωνιών ISO 17123-3 , αναφέρει ξεκάθαρα ότι οι παρατηρήσεις των γωνιών στις οποίες γίνεται επεξεργασία και στατιστικός έλεγχος εν τέλει, είναι γωνίες απαλλαγμένες

από τα σφάλματα τα οποία απαλείφει η μέθοδος των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου και για αυτό το λόγο, προϋποθέτει ότι αυτή η τεχνική έχει γίνει κανονικά. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο μέρος 4.1 «General/Requirements» της διαδικασίας , όπου «...*The measure of precision of theodolites is expressed in terms of the experimental standard deviation (root mean square error) of a horizontal direction (HZ), observed once in both face positions of the telescope or of a vertical angle (V) observed once in both face positions of the telescope » αλλά και στο μέρος 5.4.1 «Statistical tests/General» , όπου «... *For the interpretation of the results, statistical tests shall be carried out using the experimental standard deviation, s, of a horizontal direction observed in one set in both face positions of the telescope...*» .*

Η τήρηση της διαδικασίας των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου έχει σημασία στην εξωτερική ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας. Αυτό μπορεί να φανεί από το Σχήμα 3.5



Σχήμα 3.5: Περίπτωση εκκεντρότητας και στροφικής απόκλισης προβολικού άξονα από τον ιδανικό άξονα σκόπευσης

Έστω το σύστημα αναφοράς του τηλεσκοπίου , όπου η προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο είναι αντίστοιχα το σύστημα x_{Σ} , y_{Σ} , με κέντρο του συστήματος αναφοράς το O_{Σ} , το οποίο είναι αντίστοιχα η προβολή του κέντρου του συστήματος αναφοράς του τηλεσκοπίου. Η προβολή του σκοπευτικού άξονα στο οριζόντιο επίπεδο είναι ο άξονας y_{Σ} . Θεωρείται αντίστοιχα η προβολή του συστήματος αναφοράς της κάμερας, κατά τα γνωστά, όπου πλέον ο προβολικός άξονας είναι ο $y_{\Sigma'}$. Αυτός ο άξονας θα θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει το «τηλεσκόπιο» για τον χρήστη του πολυγεωδαιτικού σταθμού, όσον αφορά στην σκόπευση οριζόντιων γωνιών. Έστω $O_{\Sigma'}$ η προβολή του προβολικού σημείου της κάμερας στο οριζόντιο επίπεδο και Σ'' σημείο το οποίο βρίσκεται επί του $Y_{\Sigma'}$. Επίσης, έστω r η απόσταση του O_{Σ} από το $O_{\Sigma'}$ και φ η πολική γωνία του $(O_{\Sigma} O_{\Sigma'})$ από τον πολικό άξονα x_{Σ} και r_{ζ} η απόσταση του O_{Σ} από το Σ'' με ζ την αντίστοιχη πολική γωνία του $(O_{\Sigma} O_{\Sigma''})$ από τον πολικό άξονα x_{Σ} . Επίσης , έστω σημείο (O) το οποίο βρίσκεται στην τομή των αξόνων y_{Σ} και $y_{\Sigma'}$ και σημείο (A) το οποίο απέχει απόσταση R_A από το O_{Σ} και πολική γωνία $90-\theta$.

Θεωρώντας τη γωνία $(O_{\Sigma} O A) = \theta$ τότε παρατηρείται ότι: εάν τα δύο συστήματα $O_{\Sigma} x_{\Sigma} y_{\Sigma}$ και $O_{\Sigma'} x_{\Sigma'} y_{\Sigma'}$ θεωρηθούν σταθερά μεταξύ τους , και στραφεί ο άξονας y_{Σ} κατά γωνία θ , αυτό σημαίνει ότι ο πραγματικός άξονας σκόπευσης θα σκοπεύσει το σημείο A και η μέτρηση που θα κατέγραφε ο οριζόντιος κύκλος θα ήταν θ . Επίσης , κατά αυτή τη στροφή το $O_{\Sigma'}$ θα διαγράψει τόξο κύκλου ακτίνας r και η τελική του θέση (II) θα έχει πολική γωνία $\varphi-\theta$ από τον (αρχικό) άξονα x_{Σ} . Το Σ'' θα διαγράψει αντίστοιχα τόξο ακτίνας r_{ζ} και η τελική του θέση (II) θα έχει πολική γωνία $\zeta-\theta$ από τον (αρχικό) άξονα x_{Σ} .

Έτσι πλέον για την κατάσταση (II) ισχύει:

$$x_{O_{\Sigma'}} = r * \cos (\varphi - \theta) \quad (3.42)$$

$$y_{O_{\Sigma'}} = r * \sin (\varphi - \theta) \quad (3.43)$$

$$x_{\Sigma''} = r_{\zeta} * \cos (\zeta - \theta) \quad (3.44)$$

$$y_{\Sigma''} = r_{\zeta} * \sin (\zeta - \theta) \quad (3.45)$$

Τα σημεία (A) , $O_{\Sigma'}$ και Σ'' θα ήταν συνευθειακά στην κατάσταση (II) εάν ίσχυε ότι :

$$r * \cos(\varphi - \theta) - r_{\zeta} * \cos(\zeta - \theta) = \lambda * R_A * \sin\theta \quad (3.46)$$

και αντίστοιχα

$$r * \sin(\varphi - \theta) - r_{\zeta} * \sin(\zeta - \theta) = \lambda * R_A * \cos\theta \quad (3.47)$$

αφού

$$x_A = R_A * \sin\theta \quad (3.48)$$

$$y_A = R_A * \cos\theta \quad (3.49)$$

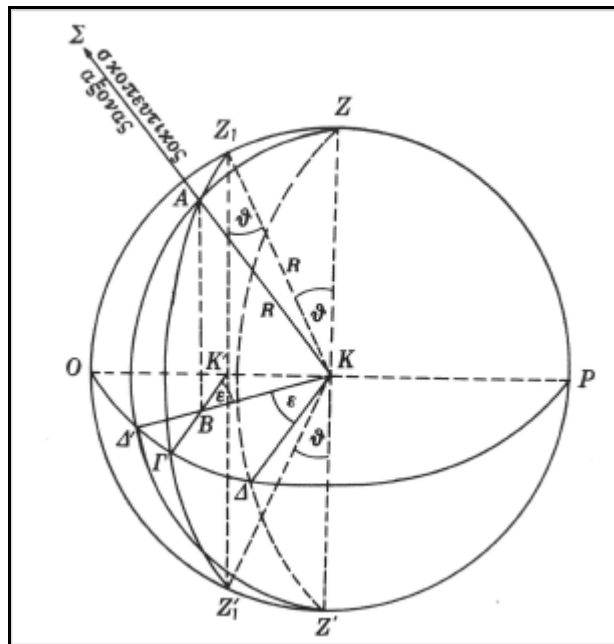
Η σχέση αυτή, δεν ισχύει για τυχαίο σημείο A. Συνεπώς, τα σημεία αυτά, μετά τη στροφή, δεν είναι συνευθειακά. Αυτό σημαίνει επίσης, με τον τρόπο που οργανώθηκε αυτό το παράδειγμα, ότι ακόμα και εάν η αρχή μέτρησης των οριζόντιων γωνιών ήταν η ίδια τόσο για το ιδεατό τηλεσκόπιο και για το τηλεσκόπιο – κάμερα που χρησιμοποιείται (εδώ η αρχή μέτρησης είναι η σκόπευση προς το σημείο (O)) το σημείο που θα καταλάβαινε το τηλεσκόπιο- κάμερα ως τελικό σκοπευόμενο μετά την στροφή κατά γωνία θ δεν θα ήταν το σημείο A, αλλά κάποιο άλλο. Προφανώς όμως, η σωστή σκόπευση θα ήταν αυτή η οποία θα διερχόταν από το σημείο A. Έτσι, με τα παραπάνω αποδείχθηκε ότι αν ο ιδανικός άξονας σκόπευσης (αυτός που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των γωνιών) είναι εκκεντρος και έχει στροφές ως προς το σύστημα της κάμερας, τότε η μέτρηση της οριζόντιας γωνίας δεν αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή της οριζόντιας γωνίας μεταξύ των σημείων που σκοπεύονται από την κάμερα – τηλεσκόπιο. Παρόμοια, μπορεί να αποδειχθεί ότι αν υπάρχει εκκεντρότητα των αξόνων, χωρίς το ένα σύστημα να έχει στροφές σε σχέση με το άλλο, πάλι παρουσιάζεται το ίδιο πρόβλημα.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει εκκεντρότητα, αντίστοιχο πρόβλημα δημιουργείται εάν ο οπτικός άξονας σχηματίζει με τον ιδανικό άξονα του τηλεσκοπίου μία γωνία. Το σφάλμα αυτό, στις οριζόντιες διευθύνσεις ,

είναι το αντίστοιχο του σφάλματος μη καθετότητας του σκοπευτικού επί του δευτερεύοντα άξονα που περιγράφεται στη βιβλιογραφία των κατασκευαστικών σφαλμάτων των θεοδόλιγων (Εικ.3.2), ενώ η τιμή του δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon = \arcsin \left(\frac{\sin\theta}{\cos\nu} \right) \quad (3.50)$$

όπου θ η γωνία που σχηματίζει ο ιδανικός σκοπευτικός άξονας από τον οπτικό και ν η γωνία ύψους ($90^\circ - \zeta$ ενίθια) προς τον εκάστοτε στόχο.



Εικ.3.2: Η επίδραση του σφάλματος του σκοπευτικού άξονα στις οριζόντιες διευθύνσεις (Βλάχος,2012).

Η μόνη περίπτωση, όπου η εκκεντρότητα είναι αποδεκτή, είναι όταν ο άξονας της κάμερας συμπίπτει με τον ιδανικό σκοπευτικό. Η περίπτωση (απόλυτης σύμπτωσης των αξόνων) αναφέρεται στα manuals των κατασκευαστών ως «coaxial». Όταν όμως μόνο οι προβολές των δύο αξόνων στο κάθετο επίπεδο περιστροφής του πρωτεύοντα άξονα του οργάνου ,συμπίπτουν (με την παρουσία εκκεντρότητας) , η περίπτωση είναι προβληματική.

Με αναφορά στο σχήμα 3.5 τώρα πλέον θα είναι: $\varphi = \zeta = 90^\circ$

Συνεπώς

$$r \cdot \sin\theta - r_\zeta \cdot \sin\theta = \lambda \cdot R_A \cdot \sin\theta \rightarrow r - r_\zeta = \lambda \cdot R_A \quad (3.51)$$

και αντίστοιχα

$$r \cdot \cos\theta - r_z \cdot \cos\theta = \lambda \cdot R_A \cdot \cos\theta \rightarrow r - r_z = \lambda \cdot R_A \quad (3.52)$$

,όπου υπάρχει τουλάχιστον ένα λ που ικανοποιεί τις παραπάνω σχέσεις

Φαινομενικά τα σημεία $O_{\Sigma'}$, Σ'' και A είναι συνευθειακά σε αυτή την περίπτωση. Ωστόσο, εδώ εισάγεται ένα σφάλμα. Συγκεκριμένα, η απόσταση r (απόσταση του O_{Σ} από το $O_{\Sigma'}$), εφόσον δεν εξετάζεται η «coaxial» περίπτωση, δεν επηρεάζονται οι οριζόντιες γωνίες, αλλά προφανώς επηρεάζονται οι ζενίθιες, όπως ακριβώς επηρέαζε η εκκεντρότητα που αποδείχθηκε στις σχέσεις (3.42) έως (3.49) τις οριζόντιες. Για αυτό τον λόγο, η μη «coaxial» εκκεντρότητα δεν είναι επιτρεπτή σε όργανα όπου οι σκοπεύσεις γίνονται μέσω οπτικών διατάξεων και επίσης για αυτό το λόγο, στη βιβλιογραφία των σφαλμάτων των θεοδόλιχων, όλα τα σφάλματα θεωρούν ότι ο σκοπευτικός άξονας τέμνεται οπωσδήποτε με τον πρωτεύοντα. Ωστόσο, χωρίς την παρουσία εκκεντρότητας, μπορούν να διαφέρουν κατά μία ζενίθια γωνία.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση του μετρολογικού ελέγχου των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών. Υπάρχει μια βασική διαφορά στη διαδικασία ελέγχου κλασσικών γεωδαιτικών σταθμών σε σχέση με τον έλεγχο ενός οργάνου όπως το Trimble SX-10 και αυτό είναι η μη χρήση στον τελευταίο της τεχνικής των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου. Υπό αυτή την έννοια, ο έλεγχος κατά ISO εκφυλίζεται σε έναν εσωτερικό έλεγχο. Εξηγώντας, εάν το σύστημα κάμερας – ιδανικού τηλεσκοπίου έχει σταθερή σχετική θέση και προσανατολισμό (δηλαδή δεν υπάρχει διαφορική μετατόπιση κατά την εκτέλεση περιστροφών περί τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα άξονα του οργάνου), κάτι αναμένεται από ένα όργανο καλής ποιότητας κατασκευής, τότε η κάμερα θα καταγράψει για τα ίδια σκοπευόμενα σημεία τις ίδιες γωνίες, αλλά ωστόσο λανθασμένες, εάν ισχύουν οι περιπτώσεις της εκκεντρότητας των αξόνων και της στροφής μεταξύ συστημάτων, όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

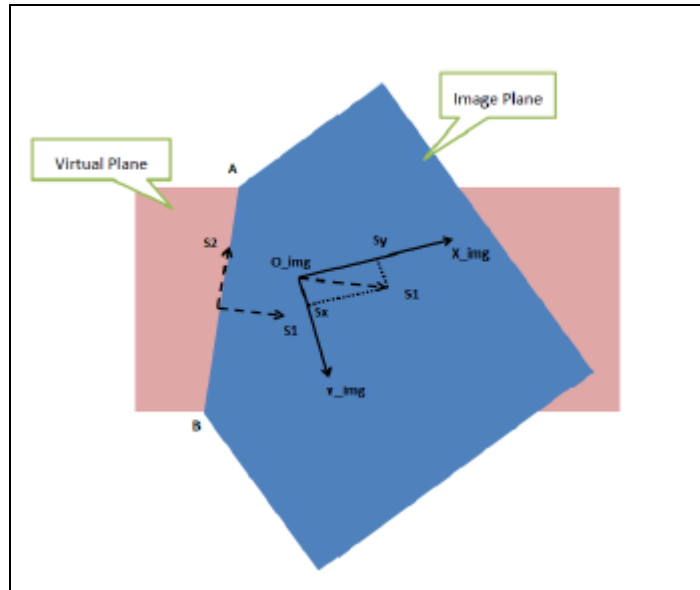
3.4.1 Προσεγγίσεις της σχέσης συστήματος κάμερας – τηλεσκοπίου σε εικονογεωδαιτικούς σταθμούς

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η σχέση κάμερας και «τηλεσκοπίου» σε γεωδαιτικούς σταθμούς, ως σταθερό σύστημα, έχει διερευνηθεί με διάφορους τρόπους.

Οι προσεγγίσεις αυτές, είχαν να κάνουν με το αντικείμενο της **βαθμονόμησης** της κάμερας ως προς τις οριζόντιες και ζενίθιες γωνίες που καταγράφει ένας γεωδαιτικός σταθμός. Συγκεκριμένα, στο να μπορέσουν να αποδοθούν τιμές οριζόντιας και ζενίθιας γωνίας σε κάθε ένα pixel της εικόνας που καταγράφει η κάμερα.

Μία ολοκληρωμένη μέθοδος που επιλύει αυτό το ζήτημα, είναι η μέθοδος του Walser (2004), ο οποίος στηρίχθηκε στην αντίστοιχη μέθοδο των Hurley – Wang (1989) .

Ο Walser στην μέθοδό του, κάνει κάποιες συγκεκριμένες παραδοχές. Καταρχάς υποθέτει ότι δεν υπάρχει εκκεντρότητα μεταξύ των συστημάτων αναφοράς της κάμερας και του τηλεσκοπίου, δηλαδή ότι το προβολικό κέντρο συμπίπτει με την τομή του πρωτεύοντα με τον δευτερεύοντα άξονα του θεοδόλιχου. Η πιο σοβαρή παραδοχή του όμως, είναι πως υποθέτει ότι οποιαδήποτε παραμόρφωση, μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός αφινικού μετασχηματισμού στις μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων του επιπέδου της κάμερας. Ακόμα και σε πιο σύγχρονες δημοσιεύσεις, όπως αυτή των Zhou et al (2017) , οι οποίες χρησιμοποιούν τη μέθοδο του Walser – με μικρές παραλλαγές – αναφέρεται ότι η προβολή ενός αντικειμένου του χώρου στο προβολικό επίπεδο μιας κάμερας, είναι δυνατό να περιγραφεί μέσω ενός αφινικού μετασχηματισμού σε ένα κάθετο επίπεδο στον σκοπευτικό άξονα, μόνο εάν θεωρηθεί ότι αυτοί οι άξονες είναι σχεδόν παράλληλοι. (Εικ.3.3)



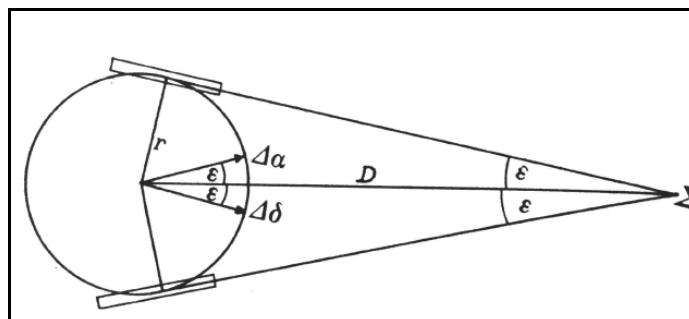
Εικ.3.3: Ο συσχετισμός του προβολικού επιπέδου και του επιπέδου του κάθετου στο τηλεσκόπιο (Zhou et al ,2017)

Αυτού του είδους η θεώρηση, δεν μπορεί να γίνει a priori αποδεκτή, ειδικά από τη στιγμή που όλοι οι βαθμοί ελευθερίας της στροφικής κίνησης μεταξύ των συστημάτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Επίσης, η υπόθεση ότι μόνο μικρές μηχανικές ανοχές θα έχει η παραλληλία αυτών των συστημάτων, είναι αμφίβολη, ειδικά μετά από μία "σκληρή" χρήση του οργάνου και η απουσία φυσικού τηλεσκοπίου, το οποίο θα μπορούσε να μας δείξει μια περίπτωση μεγάλης απόκλισης, συγκρινόμενο με την απεικόνιση της κάμερας, δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο τα πράγματα.

Άλλες μέθοδοι, όπως αυτή του Vogel (2006), μοντελοποιούν κάποια σφάλματα του θεοδόλιχου, καθώς και την **εκκεντρότητα**, διευρύνοντας το μοντέλο των κλασικών εξισώσεων συγγραμμικότητας. Σε αυτή τη μέθοδο, ωστόσο, απαιτείται να είναι γνωστή η απόσταση από το στόχο, το οποίο με τη σειρά του απαιτεί, είτε την κέντρωση του οργάνου σε γνωστό σημείο και την σκόπευση προς ένα άλλο επίσης γνωστό με μεγάλη ακρίβεια, είτε την μέτρηση με EDM από τον ίδιο τον σταθμό. Δυστυχώς και σε αυτή την περίπτωση, γίνεται μία σοβαρή υπόθεση, ότι δηλαδή το EDM του σταθμού μετράει κατά έναν άξονα, ο οποίος συμπίπτει με τον σκοπευτικό.

Γενικότερα, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει και εκκεντρότητα, οι αποκλίσεις των ορθών οριζόντιων γωνιών από τις μετρούμενες, εμπεριέχουν πάντα και την παράμετρο της απόστασης του σημείου από

το κέντρο του σταθμού. Όπως φαίνεται και από την Εικ.3.4, ο σχηματισμός μίας γωνίας στο χώρο (ασχέτως αν ανήκει στο οριζόντιο ή στο κατακόρυφο επίπεδο) εξαρτάται από την απόσταση του ίδιου του σημείου και όχι μόνο από τη διεύθυνσή του.



Εικ.3.4: Ο σχηματισμός της γωνίας σε περίπτωση εκκεντρότητας , εξαρτάται και από την απόσταση του σημείου στο χώρο. (Βλάχος,2012)

3.4.2 Μία διαφορετική προσέγγιση της σχέσης συστήματος κάμερας – τηλεσκοπίου σε εικονογεωδαιτικούς σταθμούς

Στην παρακάτω προτεινόμενη μέθοδο, η σχέση των συστημάτων κάμερας και τηλεσκοπίου, θα έχει διττή μορφή: ενός ελέγχου και μίας βαθμονόμησης. Ο έλεγχος, είναι απαραίτητος για τη διαπίστωση της ορθής σχέσης μεταξύ των δύο συστημάτων, ενώ η βαθμονόμηση, είναι κάτι σαφώς πιο ολοκληρωμένο, αλλά αρκετά θεωρητικό, αφού, εάν η σχέση των δύο συστημάτων διαπιστωθεί ότι είναι εσφαλμένη, είναι προτιμότερο να γίνει εργαστηριακή διόρθωση του οργάνου.

3.4.2.1 Πρόταση Ελέγχου

Στην μέθοδο αυτή, προτείνεται η αξιοποίηση της εικονιστικής πληροφορίας, που λαμβάνεται μέσω των στιγμιότυπων της κάμερας, μία δυνατότητα που ο συγκεκριμένος σταθμός διαθέτει. Προφανώς , είναι ένας έλεγχος ο οποίος δεν μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των τοπογραφικών εργασιών, αλλά πριν από αυτές.

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, πρέπει να διακριθούν δύο βασικές περιπτώσεις με τις υποπεριπτώσεις τους:

1. Να υπάρχει απόσταση της κάμερας και συγκεκριμένα του προβολικού σημείου της κάμερας από το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού. Οι υποπεριπτώσεις είναι οι εξής:
 - α. Ο προβολικός άξονας να συμπίπτει με τον σκοπευτικό, δηλαδή οι άξονες να είναι παράλληλοι και το προβολικό σημείο να κείται επί του σκοπευτικού άξονα. Αυτή είναι η περίπτωση των coaxial καμερών.
 - β. Να μην ισχύει η παραπάνω υπόθεση (ύπαρξη εκκεντρότητας)

2. Να μην υπάρχει απόσταση του προβολικού σημείου της κάμερας από το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού, αλλά να υπάρχει η στροφική απόκλιση της κάμερας από τον ιδανικό σκοπευτικό άξονα. Σημειώνεται εδώ, ότι ενδιαφέρει μόνο η οριζόντια προβολή του προβολικού άξονα της κάμερας. Οι υποπεριπτώσεις είναι οι εξής:
 - α. Η οριζόντια προβολή των δύο αξόνων (σκοπευτικού και προβολικού) να συμπίπτουν.
 - β. Η οριζόντια προβολή των δύο αξόνων (σκοπευτικού και προβολικού) να μην συμπίπτουν (ύπαρξη στροφικής απόκλισης).

Οι παραπάνω υποπεριπτώσεις 1(α) και 2(α), θεωρούνται αποδεκτές γενικότερα. Ωστόσο, κάτι που δεν λαμβάνεται υπόψη, είναι ότι αγνοείται η στροφή του συστήματος της κάμερας περί τον προβολικό άξονα. Σε μία τέτοια περίπτωση, ενώ οι αναγνώσεις των σκοπεύσεων θα ήταν αληθείς, οι υπόλοιποι άξονες της κάμερας δεν θα συνέπιπταν με τους αντίστοιχους (πρωτεύοντα και δευτερεύοντα) του γεωδαιτικού σταθμού. Αυτό, αφενός θα εισήγαγε μία στρεβλή εικόνα του πραγματικού κόσμου, θα έκανε τους χειρισμούς του γεωδαιτικού σταθμού αδύνατους (η οριζόντια κίνηση δεν θα αντιστοιχούσε σε πραγματική οριζόντια σκόπευση και αντίστοιχα για τις ζενίθειες αναγνώσεις) και αφετέρου θα ήταν αδύνατη η χρήση οποιουδήποτε εικονοστοιχείου της κάμερας, πέραν του πρωτεύοντος σημείου, για εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας. Κάτι αντίστοιχο στα κλασικά θεοδόλιχα θα ήταν το σφάλμα μη κατακορυφότητας του

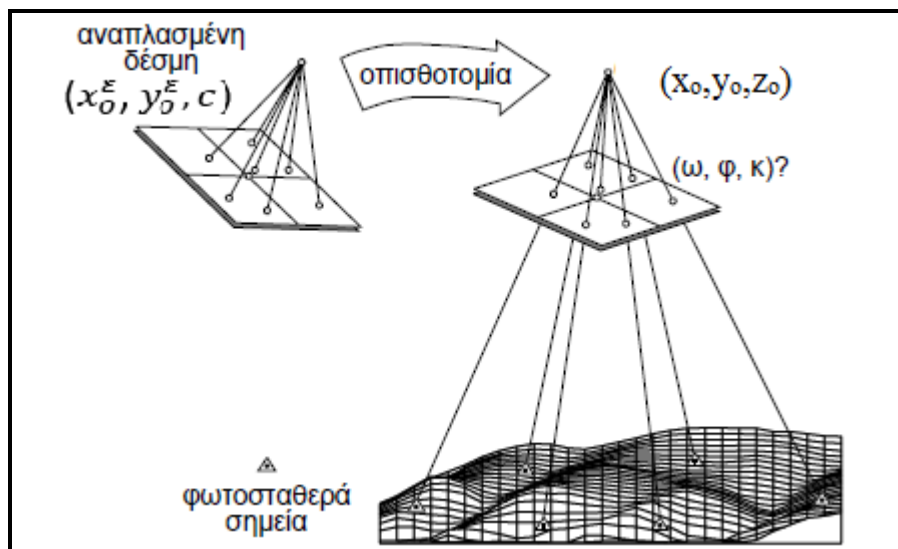
νήματος του τηλεσκοπίου. Συνεπώς οι παραπάνω περιπτώσεις και υποπεριπτώσεις διαφοροποιούνται πλέον ως εξής:

1. Να υπάρχει απόσταση της κάμερας και συγκεκριμένα του προβολικού σημείου της κάμερας από το κέντρο περιστροφής του οργάνου. Οι υποπεριπτώσεις είναι οι εξής:
 - α. Ο προβολικός άξονας να συμπίπτει με τον σκοπευτικό , δηλαδή οι άξονες να είναι παράλληλοι και το προβολικό σημείο να κείται επί του σκοπευτικού άξονα και οι εναπομείναντες άξονες των δύο συστημάτων να συμπίπτουν επίσης. Αυτή είναι η περίπτωση των coaxial καμερών.
 - β. Να μην ισχύει η παραπάνω υπόθεση (ύπαρξη εκκεντρότητας)
2. Να μην υπάρχει απόσταση του προβολικού σημείου της κάμερας από το κέντρο περιστροφής του οργάνου, αλλά να υπάρχει η στροφική απόκλιση της κάμερας από τον ιδανικό σκοπευτικό άξονα. Οι υποπεριπτώσεις είναι οι εξής:
 - α. Όλοι οι άξονες των δύο συστημάτων να συμπίπτουν.
 - β. Τα δύο συστήματα να διαφέρουν μόνο κατά μία στροφή περί τον δευτερεύοντα άξονα του τηλεσκοπίου. (Υπαρξη αποδεκτής στροφικής απόκλισης)
 - γ. Τίποτα από τα παραπάνω (Υπαρξη μη αποδεκτής στροφικής απόκλισης)

Στα ανωτέρω, αποδεκτές είναι οι καταστάσεις 1(α), 2(α) και 2(β). Προς χάριν συντομίας η περίπτωση (1) θα ονομάζεται εφεξής ύπαρξη εκκεντρότητας , η περίπτωση (1α) αποδεκτή εκκεντρότητα και η (1β) μη αποδεκτή εκκεντρότητα.

Αρχικά, θα πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση (1). Εάν αυτή δεν υφίσταται, τότε η διαδικασία θα συνεχιστεί με τον έλεγχο ύπαρξης της περίπτωσης (2). Ο έλεγχος της περίπτωσης (1), απαιτεί την ύπαρξη πεδίου ελέγχου, με στόχους ευκρινείς, γνωστών συντεταγμένων σε ένα 3D καρτεσιανό σύστημα αναφοράς. Επίσης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κάμερα της οποίας η σχέση με το ιδανικό τηλεσκόπιο ελέγχεται, να είναι βαθμονομημένη. Έτσι το πρώτο βήμα σε αυτόν τον έλεγχο, είναι η βαθμονόμηση σύμφωνα με την παράγραφο 3.3.

Το επόμενο βήμα, είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας, μέσω του κατάλληλου πεδίου ελέγχου, ώστε κάθε φορά που γίνεται μία περιστροφή του ιδανικού τηλεσκοπίου (μία μέτρηση γωνίας, είτε οριζόντιας, είτε ζενίθιας), να παρατηρείται η συμπεριφορά του προβολικού κέντρου της κάμερας. Η φωτογραμμετρική οπισθοτομία (εικ. 3.5) είναι η αναλυτική διαδικασία, όπου προσδιορίζονται οι παράμετροι εξωτερικού προσανατολισμού μιας κάμερας, δηλαδή η θέση (x_0, y_0, z_0) του προβολικού σημείου στο χώρο, και ο προσανατολισμός του συστήματος της εικόνας στο χώρο, μέσω των εσωτερικών στρωφών μετασχηματισμού (Cardan), σε σχέση με το επιθυμητό σύστημα αναφοράς (εδώ, αυτό του πεδίου ελέγχου).



Εικ.3.5: Η διαδικασία της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας (Πέτσα,2000 & Ιδία Επεξεργασία)

Για τη διαδικασία, θα χρησιμοποιηθούν οι πλήρεις εξισώσεις συγγραμμικότητας, συμπεριλαμβανομένων και των συμπληρωματικών διορθωτικών όρων των παραμορφώσεων του φακού, που έχουν εκτιμηθεί κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης της μηχανής (παράγραφος 3.3).

Το κατάλληλο πεδίο ελέγχου πρέπει να παράσχει σε κάθε θέση του «ιδανικού» τηλεσκοπίου ικανό αριθμό εικόνων των φωτοσταθερών, έτσι ώστε να προκύψει συνορθωμένη λύση για την οπισθοτομία και επίσης καλή κατανομή των φωτοσταθερών, ώστε η λύση να θεωρείται αντιπροσωπευτική. Ακόμη ένα σημείο προσοχής, είναι να τεθεί η

ρύθμιση των καμερών σε μη αυτόματη εστίαση και ειδικότερα στην εστίαση που χρησιμοποιήθηκε όταν βαθμονομήθηκε, έτσι ώστε να μην υπάρχει περιθώριο μεταβολής της σταθεράς του φακού.

Σύμφωνα με την μέθοδο που προτείνεται για αυτή την περίπτωση σε αυτή την εργασία, από τις παραμέτρους εξωτερικού προσανατολισμού, ενδιαφέρουν μόνο οι παράμετροι θέσης των προβολικών κέντρων και όχι οι παράμετροι στροφής. Αυτό εξηγείται ως ακολούθως: εάν υπάρχει εκκεντρότητα μεταξύ των ανωτέρω συστημάτων, τότε σε δύο θέσεις σκόπευσης με το ιδανικό τηλεσκόπιο θα υπάρχουν δύο θέσεις προβολικών κέντρων. Αυτό οφείλεται στο ότι αυτά τα δύο συστήματα κινούνται πλέον ως ένα σώμα και ως εκ τούτου, η κίνηση του προβολικού σημείου της κάμερας θα καταγράφεται πάνω σε έναν κύκλο, ο οποίος θα βρίσκεται σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο το κάθετο στον πρωτεύοντα άξονα του θεοδόλιχου. Όντως, εάν δεν υπήρχε εκκεντρότητα, τότε σε οποιαδήποτε κίνηση του ιδανικού τηλεσκοπίου, το προβολικό σημείο θα συνέπιπτε με το σημείο τομής του πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα του θεοδόλιχου και συνεπώς θα έμενε το ίδιο.

Η εκκεντρότητα των δύο συστημάτων μπορεί να εκτιμηθεί, επίσης, σκοπεύοντας κατ' ελάχιστον τρία σημεία, αλλά αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

Εφόσον λοιπόν, το προβολικό κέντρο διαφέρει από σκόπευση σε σκόπευση σημαντικά, τότε μπορεί να θεωρηθεί πως μεταξύ των συστημάτων ιδανικής σκόπευσης (καταγραφής της γωνίας) και σκόπευσης μέσω της κάμερας, υπάρχει εκκεντρότητα και ως εκ τούτου, εφόσον υπάρχει και στροφική απόκλιση, ο γεωδαιτικός σταθμός είναι ακατάλληλος για οποιαδήποτε εργασία με απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας. Σημειώνεται επίσης, ότι αυτός ο έλεγχος θα πρέπει να έχει προηγηθεί του ελέγχου γωνιών σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17123-3, έτσι ώστε πλέον ο έλεγχος να έχει και υπόσταση εξωτερικού ελέγχου και όχι μόνο εσωτερικού.

Ωστόσο, κάτι που δημιουργεί προβληματισμό, είναι το ότι σε κάποια όργανα, οι κατασκευαστές περιγράφουν τις θέσεις των καμερών ως προς τον σκοπευτικό άξονα, ακόμα και παράλληλα, υπονοώντας κάποια εκκεντρότητα, η οποία, πιθανότατα να έχει πολύ μικρή τιμή, αλλά παρ' όλα αυτά, να είναι υπαρκτή. Για παράδειγμα, η primary και overview

κάμερες του Trimble SX-10 περιγράφονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή ως «Parallel to Measurement Axis» , σε αντίθεση με την telescope camera που περιγράφεται από τον κατασκευαστή ως coaxial με τον ιδανικό άξονα του τηλεσκοπίου. (Εικ.3.6) Διαπιστώθηκε ωστόσο, ότι η εκκεντρότητα, ακόμα και σε κατάσταση παραλληλίας με τον σκοπευτικό άξονα, δημιουργεί σφάλματα στη μέτρηση των γωνιών.

| Calibrated cameras | | Yes |
|--------------------------------------|--|------------------------------|
| Overview Camera | | |
| Position | | Parallel to measurement axis |
| One pixel corresponds to | | 20 mm @ 50 m |
| Primary Camera | | |
| Position | | Parallel to measurement axis |
| One pixel corresponds to | | 4.4 mm @ 50 m |
| Telescope Camera | | |
| Position | | Coaxial |
| Focusing | | Automatic, manual |
| Focusing distance | | 1.7 m to infinity |
| One pixel corresponds to | | 0.88 mm @ 50 m |
| Pointing precision (std dev 1 sigma) | | 1" (HA: 1.5 cc, VA: 2.7 cc) |

Εικ.3.6: Η περιγραφή της σχετικής θέσης των καμερών ως προς τον σκοπευτικό άξονα στο όργανο Trimble SX-10

Έτσι, το μόνο λογικό ενδεχόμενο, είναι να έχει προηγηθεί μία βαθμονόμηση της κάμερας (στην λογική του Vogel όπως συζητήθηκε ανωτέρω) της οποίας η ορθότητα όμως, δεν θεωρείται δεδομένη μετά από οποιαδήποτε χρήση του οργάνου και θα μπορούσε να ελεγχθεί μόνο συγκρίνοντας απόλυτα μεγέθη: Μέτρηση οριζόντιας και ζενίθειας γωνίας, μεταξύ φωτοσταθερών σημείων από κεντρωμένο όργανο σε **γνωστό σημείο** του ίδιου δικτύου.

Στην γενικότερη περίπτωση, ωστόσο , οποιαδήποτε εκκεντρότητα εισάγει σφάλμα στις μετρήσεις.

Εφόσον αποκλειστεί η περίπτωση (1), σημαίνει ότι η ακτίνα της εκκεντρότητας είναι σχεδόν μηδενική (οι θέσεις του προβολικού σημείου ταυτίζονται κατά την περιστροφή της άντυγας), συνεπώς οι μόνες πραγματικές διαφορές μεταξύ της ιδανικής σκόπευσης και της σκόπευσης μέσω κάμερας, θα είναι στροφικές, οπότε για την διαπίστωσή τους ή όχι, θα γίνει ο έλεγχος της περίπτωσης (2).

Ένας έλεγχος των στροφικών αποκλίσεων μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων , δεν αντιμετωπίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία (πέρα από τις διαδικασίες βαθμονόμησης που αναφέρθηκαν παραπάνω). Αυτό εξηγείται από το γεγονός του ότι ως τώρα, οι κάμερες χρησιμοποιούνταν

από τα διάφορα όργανα (εικονογεωδαιτικούς σταθμούς), περισσότερο ως εργαλεία για documentation μιας τοπογραφικής εργασίας και όχι για απευθείας σκόπευση. Για παράδειγμα, ο σταθμός MS-60 Nova της Leica, δίνει τη δυνατότητα για σκόπευση μέσω κάμερας, αλλά διατηρεί και το τηλεσκόπιο. Αυτό δεν είναι τυχαίο. Στην αντιμετώπιση των σφαλμάτων ρύθμισης των θεοδόλιχων, οι στροφικές διαφορές (αλλά και αυτή της εκκεντρότητας του τηλεσκοπίου), διαπιστώνονται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περίπτωση, αλλά αντιμετωπίζονται με τη μέθοδο των σκοπεύσεων σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου, όπου η φυσική παρουσία του τηλεσκοπίου είναι απαραίτητη. Ενδεχομένως, και ο οπτικός άξονας της κάμερας μπορεί να χρησιμεύει ως σταυρόνημα τηλεσκοπίου (αν τον γνωρίζαμε με μεγάλη ακρίβεια) αλλά οποιαδήποτε βαθμονόμηση κάμερας – ιδανικού τηλεσκοπίου θα αχρήστευε αυτή την επιλογή.

Ο έλεγχος που προτείνεται εδώ, κάνει χρήση της εικονιστικής πληροφορίας που μας παρέχεται.

Συνοπτικά, αυτός ο έλεγχος περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Περιστροφή του οργάνου στον ορίζοντά του ($Z=100g$)
- 2) Υπολογισμός της σχετικής θέσης των καμερών μέσω ενός «σχετικού προσανατολισμού» με δεσμεύσεις.
- 3) Έλεγχος των αξόνων των δύο συστημάτων, ώστε να ικανοποιούν μια λογική – φυσική συνθήκη.
- 4) Επανάληψη της διαδικασίας για σταθερό πλέον H_z και μεταβλητό V .

Αναλυτικότερα:

- 1) Ορίζεται το σύστημα T (Ιδανικό Τηλεσκόπιο), όπου Z_T είναι ο σκοπευτικός άξονας με κατεύθυνση αντίθετη προς το σκοπευόμενο σημείο, x_T είναι ο άξονας περιστροφής του «ιδανικού τηλεσκοπίου» (δευτερεύοντα άξονας) και y_T είναι ο άξονας που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα. Εξυπακούεται ότι εάν $H_z=0$ και $V=0$, τότε ο y_T ταυτίζεται με τον πρωτεύοντα άξονα του οργάνου. Ξεκινώντας από την θέση $H_z=0$ και $V=0$, περιστρέφεται ο γεωδαιτικός σταθμός μόνο κατά H_z . Σε κάθε θέση, χρειάζεται να σκοπεύονται μέσω της κάμερας, αρκετά ομόλογα σημεία με την προηγούμενη.

2) Ορίζεται το σύστημα 1: (Σύστημα της εικόνας στην αρχική θέση του ιδανικού τηλεσκοπίου), όπου ισχύουν οι γνωστές συνθήκες ορισμού του συστήματος εικόνας από την Φωτογραμμετρία

Ορίζεται το σύστημα 2: Σύστημα της εικόνας κατά την επόμενη θέση του ιδανικού «σκοπευτικού» άξονα.

Οι συνθήκες συγγραμμικότητας που θα ισχύουν για σημείο του χώρου A στην 1^η εικόνα θα είναι:

$$\chi_A^{1\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r_{11} \cdot (x_A - x_0) + r_{12} \cdot (y_A - y_0) + r_{13} \cdot (z_A - z_0)}{r_{31} \cdot (x_A - x_0) + r_{32} \cdot (y_A - y_0) + r_{33} \cdot (z_A - z_0)} \quad (3.53)$$

και

$$y_A^{1\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r_{21} \cdot (x_A - x_0) + r_{22} \cdot (y_A - y_0) + r_{23} \cdot (z_A - z_0)}{r_{31} \cdot (x_A - x_0) + r_{32} \cdot (y_A - y_0) + r_{33} \cdot (z_A - z_0)} \quad (3.54)$$

ενώ για την 2^η εικόνα θα είναι:

$$\chi_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r'_{11} \cdot (x_A - x_0) + r'_{12} \cdot (y_A - y_0) + r'_{13} \cdot (z_A - z_0)}{r'_{31} \cdot (x_A - x_0) + r'_{32} \cdot (y_A - y_0) + r'_{33} \cdot (z_A - z_0)} \quad (3.55)$$

και

$$y_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r'_{21} \cdot (x_A - x_0) + r'_{22} \cdot (y_A - y_0) + r'_{23} \cdot (z_A - z_0)}{r'_{31} \cdot (x_A - x_0) + r'_{32} \cdot (y_A - y_0) + r'_{33} \cdot (z_A - z_0)} \quad (3.56)$$

αντίστοιχα, όπου τα $\chi_A^{1\varepsilon^*}, \chi_A^{2\varepsilon^*}, y_A^{1\varepsilon^*}, y_A^{2\varepsilon^*}$ είναι οι εικονοσυντεταγμένες της εικόνας του σημείου A ανηγμένες στο πρωτεύον σημείο της εικόνας ($x_o^\varepsilon, y_o^\varepsilon$), αλλά και διορθωμένες από τις διάφορες παραμορφώσεις, όπως αυτές εκτιμήθηκαν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του κεφαλαίου 3.3.

Σημειώνεται ότι οι συντεταγμένες του προβολικού σημείου των εικόνων δεν συμβολίζεται ξεχωριστά για κάθε εικόνα, αφού θεωρείται ότι λόγω μη εκκεντρότητας, το προβολικό σημείο της κάμερας είναι ακίνητο και συνεπώς κοινό και στις δύο εικόνες.

Έστω ότι το εξωτερικό σύστημα αναφοράς, είναι αυτό της 1^{ης} εικόνας, τότε είναι $k_1, \phi_1, \omega_1 = (0, 0, 0)$ και $(x_0, y_0, z_0)^1 = (x_0, y_0, z_0)^2 = (0, 0, 0)$.

Συνεπώς , οι σχέσεις (3.53) και (3.54) γίνονται:

$$\chi_A^{1\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{x_A}{z_A} \quad \text{ή} \quad \chi_A = -\frac{\chi_A^{1\varepsilon^*} \cdot z_A}{c} \quad (3.57)$$

$$y_A^{1\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{y_A}{z_A} \quad \text{ή} \quad y_A = -\frac{y_A^{1\varepsilon^*} \cdot z_A}{c} \quad (3.58)$$

ενώ οι σχέσεις (3.55) και (3.56) γίνονται:

$$\chi_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r'_{11} \cdot x_A + r'_{12} \cdot y_A + r'_{13} \cdot z_A}{r'_{31} \cdot x_A + r'_{32} \cdot y_A + r'_{33} \cdot z_A} \quad (3.59)$$

$$y_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{r'_{21} \cdot x_A + r'_{22} \cdot y_A + r'_{23} \cdot z_A}{r'_{31} \cdot x_A + r'_{32} \cdot y_A + r'_{33} \cdot z_A} \quad (3.60)$$

Αντικαθιστώντας τις (5) και (6) στις (7) και (8) έχουμε:

$$\chi_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{\chi_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{11} + y_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{12} - c \cdot r'_{13}}{\chi_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{31} + y_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{32} - r'_{33} \cdot c} \quad (3.61)$$

$$y_A^{2\varepsilon^*} = -c \cdot \frac{\chi_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{21} + y_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{22} - c \cdot r'_{23}}{\chi_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{31} + y_A^{1\varepsilon^*} \cdot r'_{32} - r'_{33} \cdot c} \quad (3.62)$$

Προκύπτει έτσι σε μία σχέση που δεν περιέχει τις συντεταγμένες χώρου του σημείου A αλλά περιέχει τα στοιχεία r_{ij} του πίνακα στροφής της δεύτερης εικόνας ως προς το σύστημα αναφοράς, τις εικονοσυντεταγμένες (με τις διορθώσεις όπως αναφέρθηκε παραπάνω) ενός ομόλογου σημείου και την εστιακή απόσταση που παραμένει σταθερή μεταξύ των περιστροφών της κάμερας.

Οι άγνωστοι - τα στοιχεία r_{ij} - είναι 9 , αλλά οι στροφές μεταξύ των δύο συστημάτων εικόνας είναι 3 (ω, ϕ, κ). Για αυτή την περίπτωση, ισχύουν οι δεσμεύσεις μεταξύ των r_{ij} (Πέτσα, 2000) ως εξής:

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \quad (3.63)$$

$$r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1 \quad (3.64)$$

$$r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2 = 1 \quad (3.65)$$

$$r_{11} \cdot r_{21} + r_{12} \cdot r_{22} + r_{13} \cdot r_{23} = 0 \quad (3.66)$$

$$r_{11} \cdot r_{31} + r_{12} \cdot r_{32} + r_{13} \cdot r_{33} = 0 \quad (3.67)$$

$$r_{21} \cdot r_{31} + r_{22} \cdot r_{32} + r_{23} \cdot r_{33} = 0 \quad (3.68)$$

Συνεπώς πλέον, σε κάθε ομόλογο σημείο αντιστοιχούν $n=2$ εξισώσεις και $m=9$ αγνώστους με $k=6$ δεσμεύσεις, συνεπώς απαιτείται τουλάχιστον ακόμα ένα ομόλογο σημείο, κάτι που θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε συνορθωμένη λύση. Καλό είναι ωστόσο, η λύση αυτή να χρησιμοποιεί αρκετά ομόλογα σημεία, ώστε να περιορίσει : α) τυχόν τυχαία σφάλματα στις σκοπεύσεις και κυρίως β) τις πολλαπλές λύσεις που ενδέχεται να προκύψουν, λόγω της χρήσης μη γραμμικών εξισώσεων τόσο στις εξισώσεις παρατήρησης, όσο και στις δεσμεύσεις.

Κατά τη συνόρθωση, θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των μικτών εξισώσεων/γενική περίπτωση και εκεί θα πρέπει οι ποσότητες $\chi_A^{1\varepsilon*}$, $y_A^{1\varepsilon*}$ κλπ να αναλυθούν περαιτέρω, σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχουν υπολογιστεί στη βαθμονόμηση της μηχανής, έτσι ώστε να εισαχθούν στο μοντέλο, μόνο οι πραγματικές παρατηρήσεις, οι οποίες είναι οι εικονοσυντεταγμένες. Οι παράμετροι της βαθμονόμησης θα εισαχθούν ως σταθερές.

3) Από τη συνόρθωση του συστήματος, θα έχουν εκτιμηθεί τα στοιχεία r_{ij} και από εκεί οι γωνίες ω', ϕ', κ' . Αυτές θα είναι και οι εσωτερικές γωνίες περιστροφής που έχει το σύστημα της δεύτερης εικόνας ως προς το σύστημα της πρώτης εικόνας. Στην ουσία, ορίστηκε η ανωτέρω διαδικασία ως «σχετικός προσανατολισμός» με δεσμεύσεις, επειδή εκτιμάται η σχετική θέση δύο καμερών (σχετικός προσανατολισμός), χωρίς όμως να υπάρχει βάση (δέσμευση ίδιου προβολικού σημείου εμμέσως στις εξισώσεις). Έτσι, από το σημείο αυτό, μπορεί να αξιοποιηθεί το γεγονός ότι τα συστήματα ιδανικού τηλεσκοπίου και κάμερας είναι σταθερά και να χρησιμοποιηθεί μία λογική συνθήκη, η οποία θα ίσχυε εάν τα δύο αυτά συστήματα συνέπιπταν. Αυτή η συνθήκη προφανώς είναι το ότι ιδανικά θα έπρεπε $\phi' = Hz$, αφού βρισκόμαστε σε δύο θέσεις στον ορίζοντα του οργάνου. Ακόμα όμως και να εξασφαλιστεί αυτή τη συνθήκη (μέσα σε κάποια στατιστικά όρια), ωστόσο θα πρέπει να αποκλεισθεί και μία άλλη περίπτωση: Την περίπτωση ο προβολικός άξονας να διαφέρει κατά μία

οριζόντια γωνία από τον σκοπευτικό. Υπενθυμίζεται ότι το σφάλμα μη καθετότητας του δευτερεύοντα στον σκοπευτικό – περί αυτού πρόκειται – στον ορίζοντα του οργάνου εισάγει ίσο σφάλμα στις οριζόντιες διευθύνσεις, συνεπώς μηδενικό σφάλμα στις οριζόντιες γωνίες. Ωστόσο, μεταξύ δύο οποιονδήποτε άλλων θέσεων διαφορετικής ζενίθειας γωνίας, θα υπήρχε σφάλμα στις αναγνώσεις των οριζόντιων γωνιών.

4) Για αυτό το λόγο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται εξ αρχής πλέον, με κίνηση μόνο κατά τον κατακόρυφο άξονα. Τελειώνοντας αυτό το βήμα, η λογική συνθήκη που θα πρέπει να ελεγχθεί, θα είναι η ω' (να μην συγχέεται με την ω' που εκτιμήθηκε κατά τον πρώτο έλεγχο) να είναι ίση με τη V .

Τότε, εφόσον και οι δύο αυτές συνθήκες ισχύουν, τα δύο συστήματα, του «ιδανικού» τηλεσκοπίου και της κάμερας, συμπίπτουν. Έτσι, εάν ο έλεγχος αυτός είναι επιτυχής, τότε η περίπτωση των συστημάτων μας είναι η πλήρης ταύτιση των αξόνων των δύο συστημάτων. Ωστόσο, θεωρήθηκε ως αποδεκτή και η περίπτωση τα δύο συστήματα να διαφέρουν μόνο κατά μία στροφή περί τον δευτερεύοντα άξονα του τηλεσκοπίου. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, θα ίσχυε προφανώς $\omega' \neq Hz$, αλλά $\omega' = V$.

Ακόμη μία εξαίρεση που θα πρέπει να σημειωθεί, είναι η περίπτωση ύπαρξης coaxial εκκεντρότητας. Για αυτή την περίπτωση, εφόσον υπολογιστεί απόσταση μεταξύ του κέντρου του γεωδαιτικού σταθμού και του προβολικού κέντρου, θα πρέπει υποχρεωτικά να εφαρμοστεί η μέθοδο βαθμονόμησης που περιγράφεται στην ενότητα 3.4.2.2. (μέχρι ενός σημείου που θα περιγραφεί εκεί). Αυτό γίνεται γιατί ο (κλασικός πλέον, λόγω ύπαρξης φωτογραμμετρικής βάσης) σχετικός προσανατολισμός, δεν μπορεί να διαχωρίσει μεταξύ της περίπτωσης coaxial εκκεντρότητας με παράλληλους άξονες με το σύστημα του τηλεσκοπίου, από μία οποιαδήποτε άλλη εκκεντρότητα με άξονες παράλληλους με το σύστημα του τηλεσκοπίου.

Για αυτόν τον έλεγχο δεν απαιτείται η γνώση φωτοσταθερών/σημείων αναφοράς σε γνωστό 3D καρτεσιανό σύστημα. Πράγματι, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (3.61) και (3.62), οι θεωρητικές πραγματικές συντεταγμένες του ομόλογου σημείου, απαλείφονται. Είναι όμως

μείζονος σημασίας το ότι θα πρέπει αυτά τα σημεία να είναι σε μεγάλο βαθμό αναγνωρίσιμα στις εικόνες (κάτι που επιβάλλει ίσως κατασκευασμένους στόχους εν αντιθέσει με φυσικά σημεία) και επιπλέον, να βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις και οριζόντια επίπεδα, ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο πολλαπλότητας λύσεων που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ωστόσο, υπενθυμίζεται ότι για την ανάγκη του ελέγχου της περίπτωσης με εκκεντρότητα είναι απαραίτητη η γνώση σημείων αναφοράς σε απόλυτες 3D καρτεσιανές συντεταγμένες.

Ολοκληρώνοντας τον έλεγχο αυτό είναι γνωστό εάν ο έλεγχος των γωνιών που θα ακολουθήσει για αυτό τον σταθμό έχει και υπόσταση εξωτερικού ελέγχου, ή αφορά και μόνο την εσωτερική ακρίβεια των μετρήσεων του σταθμού. Από τη στιγμή που διαπιστωθεί ότι οι παραπάνω έλεγχοι είναι επιτυχείς, τότε η διαδικασία των ελέγχων συνεχίζεται κατά τα γνωστά. Αν όχι όμως, τότε υπάρχουν δύο επιλογές: α) Να συγκριθούν απόλυτα μεγέθη, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω: δηλαδή μέτρηση οριζόντιας και ζενίθιας γωνίας, μεταξύ φωτοσταθερών σημείων από γεωδαιτικό σταθμό τοποθετημένο σε **γνωστό σημείο** του ίδιου δικτύου ουσιαστικά ελέγχοντας μία υποθετική βαθμονόμηση του κατασκευαστή στο γεωδαιτικό σταθμό ή β) να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητη βαθμονόμηση.

Παρακάτω, θα προταθεί μία ενδεχόμενη θεωρητική βαθμονόμηση του οργάνου, ως επέκταση του ελέγχου που προτάθηκε ήδη.

3.4.2.2 Πρόταση Βαθμονόμησης

Η μέθοδος βαθμονόμησης που θα προταθεί παρακάτω, αφορά και τις δύο περιπτώσεις προβλημάτων:

- α) Την περίπτωση μόνο στροφικής απόκλισης των δύο συστημάτων, όπως περιγράφηκε και παραπάνω.
- β) Την περίπτωση ύπαρξης και εκκεντρότητας.

Η τελευταία περίπτωση είναι ωστόσο αρκετά θεωρητική και αρκετά χρονοβόρα υπολογιστικά, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για μία εκτεταμένη χρήση του οργάνου. Αναφέρεται παρ' όλα αυτά για λόγους πληρότητας.

Βαθμονόμηση όταν υπάρχει μόνο στροφική απόκλιση

Για την βαθμονόμηση στην περίπτωση (α), θα χρησιμοποιηθεί ευρέως το σύμβολο R_i^j . Αυτό θα συμβολίζει τον 3D πίνακα στροφής, εσωτερικών στροφών Cardan που θα μετασχηματίζει ένα διάνυσμα θέσεως από το σύστημα i στο σύστημα j ως εξής:

$$r^j = R_i^j * r^i \quad (3.69)$$

όταν αυτά τα δύο συστήματα διαφέρουν μόνο στροφικά και δεν υπάρχει μετάθεση μεταξύ τους.

Έστω σύστημα A το σύστημα του ιδανικού τηλεσκοπίου και B το σύστημα της κάμερας, όπως αυτά ορίστηκαν στον έλεγχο στροφικής απόκλισης που προτάθηκε.

Εφόσον αυτά τα συστήματα είναι σταθερά μεταξύ τους, τότε για κάθε σημείο στο χώρο, θα ισχύει:

$$r^A = R_B^A * r^B \quad (3.70)$$

όπου το R_B^A θα είναι σταθερό.

Έστω επίσης μία αρχική θέση I (ιδανικά το σημείο Hz=0, V=0 του ιδανικού τηλεσκοπίου). Για αυτή τη θέση, θα θεωρηθεί ότι το εξωτερικό σύστημα αναφοράς (0) συμπίπτει με το σύστημα A, άρα

$$R_0^A = I \quad (3.71)$$

Συνεπάγεται επίσης ότι

$$R_B^A = R_B^0 \quad (3.72)$$

Από τα παραπάνω επίσης, θα ισχύει ότι

$$(r^A)_I = (R_B^A)_I * (r^B)_I \quad (3.73)$$

Έστω τώρα, μία επόμενη θέση II του συστήματος του ιδανικού τηλεσκοπίου, όπου είναι γνωστές οι γωνίες Hz και V, δηλαδή είναι γνωστό το R_{AI}^{AII} , με τη βοήθεια πάντα των χαρακτηριστικών ορισμού του συστήματος.

Για αυτή την κατάσταση II, θα ισχύουν τα εξής:

$$(r^A)_{II} = R_{AI}^{AII} \cdot (r^A)_I \quad (3.74)$$

$$(r^A)_{II} = (R_B^A)_{II} \cdot (r^B)_{II} \quad (3.75)$$

$$(r^B)_{II} = R_{BI}^{BII} \cdot (r^B)_I \quad (3.76)$$

Από (3.73) και (3.74) προκύπτει:

$$(r^A)_{II} = R_{AI}^{AII} \cdot (R_B^A)_I \cdot (r^B)_I \quad (3.77)$$

Εφόσον R_B^A είναι σταθερό, τότε

$$(R_B^A)_I = (R_B^A)_{II} \quad (3.78)$$

Έτσι, από (3.77) και (3.78) προκύπτει:

$$(r^A)_{II} = (R_B^A)_I \cdot (r^B)_{II} \quad (3.79)$$

Και από (3.76) και (3.79):

$$(r^A)_{II} = (R_B^A)_I \cdot R_{BI}^{BII} \cdot (r^B)_I \quad (3.80)$$

Έτσι τελικά, από (3.77) και (3.80) προκύπτει:

$$R_{AI}^{AII} \cdot (R_B^A)_I \cdot (r^B)_I = (R_B^A)_I \cdot R_{BI}^{BII} \cdot (r^B)_I \quad (3.81)$$

συνεπώς

$$R_{AI}^{AII} \cdot (R_B^A)_I = (R_B^A)_I \cdot R_{BI}^{BII} \quad (3.82)$$

Στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων (3.82), οι άγνωστες παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι τα στοιχεία r_{ij} του πίνακα R_B^A .

Θα μπορούσαν να υπολογισθούν προφανώς και οι γωνίες της στροφικής απόκλισης μεταξύ των δύο συστημάτων αυτών, αλλά με τα στοιχεία r_{ij} του πίνακα R_B^A , ο μετασχηματισμός $r^A = R_B^A \cdot r^B$, ορίζεται πλήρως.

Οι υπόλοιποι πίνακες υπολογίζονται ως εξής:

Ο πίνακας R_{AI}^{AII} με τη βοήθεια των γωνιών H_z και

Ο πίνακας R_{BI}^{BII} με τη βοήθεια του ιδιότυπου «σχετικού προσανατολισμού» που αναλύθηκε και στον αντίστοιχο έλεγχο.

Επίσης, για την λύση αυτού του συστήματος, απαιτούνται οι εξισώσεις-δεσμεύσεις (3.63) έως (3.68) που αναφέρθηκαν.

Κάτι που πρέπει να σημειωθεί, είναι ότι οι λύσεις του συστήματος που προκύπτουν από τη σχέση (3.82) είναι στη γενική περίπτωση άπειρες, δηλαδή προκύπτουν περισσότεροι του ενός πίνακες R_B^A . Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό μπορεί να αρθεί με την κίνηση του τηλεσκοπίου σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Έτσι π.χ. θα μπορούσε η πρώτη κίνηση του τηλεσκοπίου να γίνεται στον ορίζοντα του οργάνου ($V=0$) και η δεύτερη να γίνεται διατηρώντας την διεύθυνση Hz σταθερή.

Ακόμα κι έτσι, ωστόσο, υπάρχει η περίπτωση να υπάρχουν πλέον δύο λύσεις. Αυτές προκύπτουν, επειδή η σχέση (3.82) είναι μία αλγεβρική σχέση και δεν μπορεί να διακρίνει εάν ο πίνακας R_B^A είναι πίνακας στροφής. Έτσι, μία από τις λύσεις οδηγεί σε σύστημα δεξιόστροφο, ενώ η άλλη σε σύστημα αριστερόστροφο. Μπορούμε να αποκλείσουμε τη μία λύση, του αριστερόστροφου συστήματος, εάν χρησιμοποιηθεί η δέσμευση ότι $\det(R_B^A) > 0$ (συγκεκριμένα ίση με 1). Η δέσμευση αυτή, προφανώς ισχύει, εάν το αρχικό μας σύστημα (το A) είναι δεξιόστροφο. Το ότι η $\det(R_B^A) = 1$, μπορεί να αποδειχθεί ως εξής:

Εφόσον πρόκειται για πίνακα στροφής, μπορεί να προκύψει, σύμφωνα με το θεώρημα του Euler, από τρεις διαδοχικές στροφές γύρω από τους τρεις άξονες, όπως αλλάζουν αυτοί κάθε φορά. Έτσι $R_B^A = R_z \cdot R_y \cdot R_x$. Έστω θ η στροφή περί τον άξονα x. Τότε $\det(R_x) = \cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$. Κάνοντας χρήση της ιδιότητας των οριζουσών όπου $\det(a \cdot b \cdot c) = \det(a) \cdot \det(b) \cdot \det(c)$, τότε προφανώς $\det(R_B^A) = 1$. Εάν τηρηθεί μία τέτοια διαδικασία, η λύση είναι μονοσήμαντη.

Προφανώς η πλεονάζουσα πληροφορία, θα δινόταν με περισσότερους πίνακες R_{Ai}^{Ai+1} και R_{Bi}^{Bi+1} , δηλαδή περισσότερες θέσεις σκόπευσης του ιδανικού τηλεσκοπίου. Ωστόσο, οι άγνωστοι παράμετροι, δηλαδή τα στοιχεία του πίνακα R_B^A , θα έμεναν τα ίδια, αφού η σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων είναι σταθερή. Στην περίπτωση των συνορθώσεων, ως προσεγγιστικές τιμές των στοιχείων του πίνακα R_B^A , μπορούν να

θεωρηθούν οι μηδενικές τιμές, ότι δηλαδή τα δύο συστήματα συμπίπτουν στροφικά.

Η αξία του αποτελέσματος αυτής της βαθμονόμησης, εκτός από τη διαπίστωση της μικρής ή μεγάλης – αναλόγως την εφαρμογή – στροφικής απόκλισης μεταξύ των συστημάτων, είναι οι παρακάτω δύο πρακτικές εφαρμογές:

1) Η περίπτωση όπου ενδιαφέρει να είναι γνωστή η θέση των σημείων που «αληθώς» σκόπευε το σύστημα του ιδανικού τηλεσκοπίου και

2) Η αντίστροφη περίπτωση, όπου ενδιαφέρει η «αληθής» οριζόντια και ζενίθεια γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του σημείου αναφοράς του οργάνου (σημείο τομής του πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα) και των δύο σημείων που σκοπεύσαμε μέσω της κάμερας.

Προφανώς, η 1^η περίπτωση, δεν έχει τόσο μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, αλλά ωστόσο, θα εξεταστεί και αυτή.

Μεθοδολογία 1^{ης} περίπτωσης

Αρχικά, μετά τη βαθμονόμηση, είναι γνωστός ο πίνακας στροφής R_B^A . Επίσης, αφού είναι γνωστές οι αρχικές εικόνες μέσω των οποίων σκοπεύθηκαν τα σημεία ενδιαφέροντος, είναι δυνατόν με τις μεθόδους ψηφιακής επανασύστασης μιας εικόνας, να εξαχθεί η μετασχηματισμένη εικόνα, η οποία θα αντιστοιχεί στην εικόνα που θα υπήρχε εάν τα δύο συστήματα συνέπιπταν στροφικά.

Στη συνέχεια, αφού η κάμερα έχει βαθμονομηθεί εσωτερικά (βλέπε κεφάλαιο 3.3.), το σημείο όπου ο μετασχηματισμένος προβολικός άξονας θα τέμνει το επίπεδο της μετασχηματισμένης εικόνας, θα είναι το σημείο ενδιαφέροντος. Αντίστοιχα στην επόμενη εικόνα που θα απεικονίζει το δεύτερο σημείο που ολοκληρώνει τη σκόπευση.

Σε αυτή την εργασία, δεν θα αναλυθούν περαιτέρω οι διαδικασίες ψηφιακής επανασύστασης, λόγω του ότι το θέμα είναι αρκετά διαδεδομένο. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία της επανασύστασης, το c θα πρέπει να παραμείνει το ίδιο με αυτό που εκτιμήθηκε κατά τη διαδικασία της εσωτερικής βαθμονόμησης. Επίσης, εφόσον για την επανασύσταση χρησιμοποιηθεί ο έμμεσος

μετασχηματισμός (από τη μετασχηματισμένη στην αρχική), λόγω της αλλαγής του μεγέθους της εικονοψηφίδας (μεγέθους εικόνας), για την εύρεση του πρωτεύοντος σημείου της μετασχηματισμένης εικόνας (το οποίο είναι σε κάθε λήψη το σημείο ενδιαφέροντος), προτείνεται να ακολουθηθεί η εξής διαδικασία:

α) Υπολογισμός των τεσσάρων άκρων της αρχικής εικόνας σε σύστημα εικονοσυντεταγμένων με αρχή το πρωτεύον σημείο της και με μονάδα μέτρησης το pixel της.

β) Μετασχηματισμός των τεσσάρων άκρων της αρχικής εικόνας, μέσω του πίνακα R_B^A στα τέσσερα άκρα της μετασχηματισμένης εικόνας, σε αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες με κέντρο το πρωτεύον σημείο της μετασχηματισμένης. (Χρήση της ίδιας μονάδας μέτρησης pixel της αρχικής εικόνας).

γ) Ψηφιακή επανασύσταση μετασχηματισμένης εικόνας με μονάδα μέτρησης τα pixel της παλιάς. (Η δέσμευση αυτή ισοδυναμεί με την χρήση μιας μηχανής μεγαλύτερου ανοίγματος από την αρχική, αλλά της ίδιας χωρικής ανάλυσης).

δ) Υπολογισμός των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου της μετασχηματισμένης εικόνας στο σύστημα pixel της: η συντεταγμένη j (pixel κατά τον άξονα x του συστήματος της εικόνας) θα ισούται με την απόλυτη τιμή του \min (κάτω αριστερή γωνία, πάνω αριστερή γωνία) των τετμημένων της μετασχηματισμένης εικόνας, ενώ η συντεταγμένη i (pixel κατά τον άξονα y του συστήματος της εικόνας) θα ισούται με το \max (πάνω αριστερή γωνία, πάνω δεξιά γωνία) των τεταγμένων της.

Μεθοδολογία 2^{ης} περίπτωσης

Σε αυτή την περίπτωση, η πρακτική σημασία είναι πολύ μεγαλύτερη, λόγω του ότι, αυτό που ενδιαφέρει εξαρχής, ήταν οι γωνίες που σχηματίζονταν μεταξύ των σημείων που σκοπεύθηκαν μέσω της κάμερας.

Αρχικά, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, θα μετασχηματισθούν οι ομόκεντρες εικόνες, χρησιμοποιώντας τον πίνακα στροφής R_B^A , και με

c αυτό που εκτιμήθηκε κατά τη διαδικασία της εσωτερικής βαθμονόμησης.

Ακολουθεί η επεξεργασία χρησιμοποιώντας μόνο αυτές τις εικόνες. Τα σημεία που ενδιαφέρουν, λόγω του ότι τα δύο συστήματα (ιδανικού τηλεσκοπίου – κάμερας) δεν συμπίπτουν, δεν θα είναι τα πρωτεύοντα σημεία των μετασχηματισμένων εικόνων. Θα είναι κάποια ωστόσο, που θα μπορούν να αναγνωριστούν από τον χρήστη.

Αφού αναγνωριστούν αυτά τα σημεία, στη συνέχεια γίνεται η αναγωγή στις γωνίες στο χώρο (Hz και V) μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού της γνωμονικής προβολής.

Η προβολή αναφέρεται ως γνωμονική, λόγω του ότι είναι αζιμουθιακή μεν (προβαλλόμενη σε επίπεδο), πλάγια (όχι πολική, αφορά οποιαδήποτε διεύθυνση) και έχει ως ακτίνα προβολής το κέντρο της σφαίρας.

Όντως, σύμφωνα με τον (Snyder,1987) και τους (Ehrhart, Lienhart, 2017), η οριζόντια και ζενίθεια γωνία μεταξύ δύο σημείων από το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού, σε αυτή την περίπτωση (όπου δηλαδή τα δύο συστήματα συμπίπτουν), είναι:

$$Hz_T = Hz + \arctan \left(\frac{u \cdot \text{sinc}}{\rho \cdot \text{cosec} \cdot \sin V + v \cdot \text{sinc} \cdot \cos V} \right) \quad (3.83)$$

$$V_T = \arccos \left(\text{cosec} \cdot \cos V - \frac{v \cdot \text{sinc} \cdot \sin V}{\rho} \right) \quad (3.84)$$

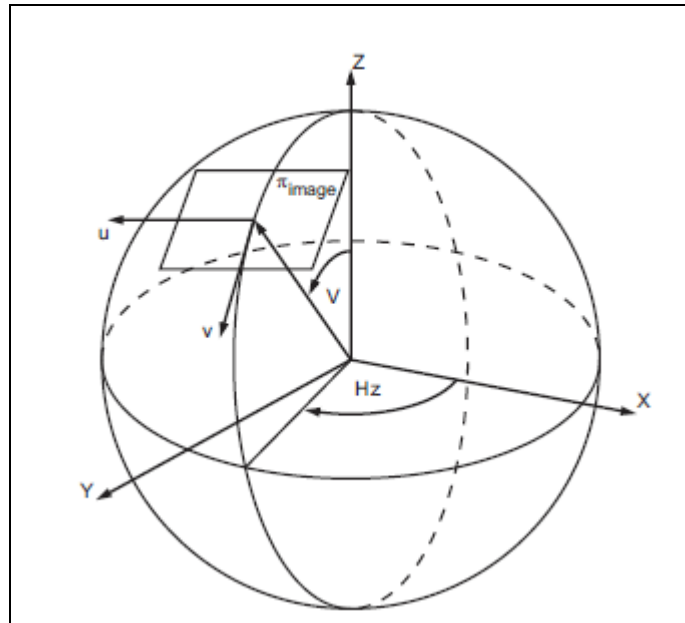
όπου στις παραπάνω σχέσεις

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.85)$$

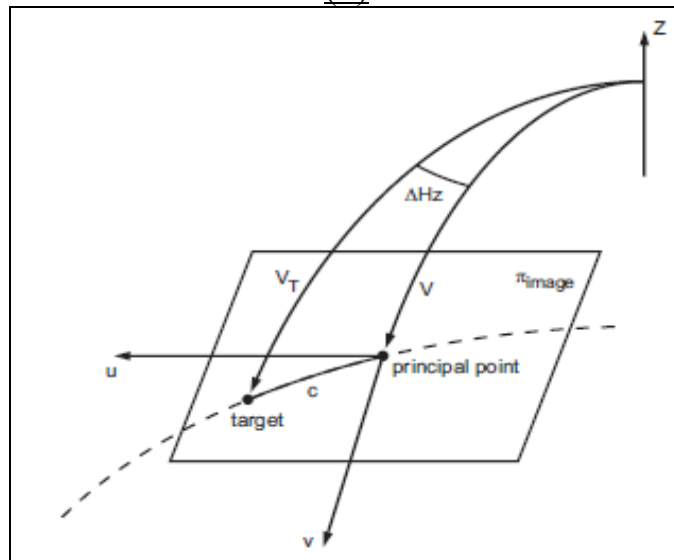
$$c = \arctan \left(\frac{\rho}{c} \right) \quad (3.86)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, οι εικονοσυντεταγμένες u και v είναι οι διορθωμένες, που σημαίνει ότι θα πρέπει αυτές που έχουν αναγνωστεί στην εικόνα (u' και v'), να διορθωθούν με τους όρους των παραμορφώσεων που έχουν εκτιμηθεί κατά τη διαδικασία της εσωτερικής βαθμονόμησης. Οι εικονοσυντεταγμένες αυτές επίσης, έχουν προσανατολισμό παράλληλο με το σύστημα pixel της εικόνας. Επίσης, c είναι η εστιακή απόσταση (όπως εκτιμήθηκε και αυτή από την εσωτερική

βαθμονόμηση) και H_z , V είναι οι γωνίες, οριζόντια και ζενίθεια αντίστοιχα, που έχει διαγράψει το ιδανικό τηλεσκόπιο (Εικ.3.7), ενώ H_{z_T} και V_T είναι οι γωνίες που αντιστοιχούν στο σημείο ενδιαφέροντος . Κάτι που επίσης θα πρέπει να σημειωθεί, είναι ότι αρχή του συστήματος των εικονοσυντεταγμένων είναι το πρωτεύον σημείο της μετασχηματισμένης εικόνας, το οποίο θα εντοπιστεί με τον τρόπο που αναφέρθηκε στη μεθοδολογία της 1^{ης} περίπτωσης.



(α)



(β)

Εικ.3.7: (α): Η σχέση μεταξύ των συστημάτων της κάμερας, του τηλεσκοπίου και του θεοδόλιχου, μέσω της γωνιακής προβολής. (β): Λεπτομέρεια (Lienhart,Ehrhart,2017)

Βαθμονόμηση όταν υπάρχει στροφική απόκλιση και εκκεντρότητα

Το πρόβλημα στις περιπτώσεις όπου συμπεριλαμβάνεται και η εκκεντρότητα, είναι, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ότι οι αληθείς τιμές των γωνιών μεταξύ δύο σημείων, εξαρτώνται και από την απόσταση του οργάνου από αυτά τα σημεία.

Για την αρχική βαθμονόμηση αυτής της περίπτωσης, θα απαιτηθούν ευκρινείς στόχοι (φωτοσταθερά), των οποίων οι συντεταγμένες είναι προσδιορισμένες σε ένα 3D καρτεσιανό σύστημα του χώρου, το οποίο μπορεί να είναι και αυθαίρετο. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- α) Σκόπευση στον ορίζοντα του οργάνου, σε τρεις τουλάχιστον διαφορετικές θέσεις (τρεις τουλάχιστον διαφορετικές οριζόντιες διευθύνσεις).
- β) Εύρεση, για κάθε θέση, μέσω φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας, των συντεταγμένων του σημείου προβολής στο 3D σύστημα του χώρου.
- γ) Εφόσον τα προβολικά κέντρα δεν παρουσιάζουν διαφορική μετακίνηση ως προς το κέντρο περιστροφής της άντυγας, θα σχηματίζουν έναν κύκλο στον 3D χώρο. Εύρεση του κέντρου του κύκλου, με την παρακάτω προτεινόμενη διαδικασία. (Εδώ αναλύεται με τον ελάχιστο αριθμό σκοπεύσεων, δηλαδή 3, αλλά το μαθηματικό μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί σε μοντέλο συνόρθωσης και για πλεονάζουσες παρατηρήσεις):

- i) Αρχικά προσδιορίζεται το επίπεδο όπου κείνται αυτά τα προβολικά κέντρα (A,B,Γ) κατά τα γνωστά από την αναλυτική γεωμετρία, δηλαδή καθορίζονται οι παράμετροι $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ της εξίσωσης

$$\alpha * x_i + \beta * y_i + \gamma * z_i + \delta = 0, \text{ όπου } i=A,B,\Gamma \dots$$

- ii) Σχηματίζεται το σύστημα των παρακάτω εξισώσεων:

$$(x_A - x_o)^2 + (y_A - y_o)^2 + (z_A - z_o)^2 = R^2 \quad (3.87)$$

$$(x_B - x_o)^2 + (y_B - y_o)^2 + (z_B - z_o)^2 = R^2 \quad (3.88)$$

$$(x_\Gamma - x_o)^2 + (y_\Gamma - y_o)^2 + (z_\Gamma - z_o)^2 = R^2 \quad (3.89)$$

$$\alpha * x_o + \beta * y_o + \gamma * z_o + \delta = 0 \quad (3.90)$$

Στο παραπάνω σύστημα, τα $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ είναι γνωστά από το βήμα (i). Οι τρεις πρώτες εξισώσεις μπορούν να εξηγηθούν με δύο τρόπους. Είτε θα αναφέρονται στην εξίσωση της ακτίνας του κύκλου που κείται είτε στην εξίσωση μίας σφαίρας. Η πρώτη θεώρηση είναι ξεκάθαρη και αποτελεί την επέκταση μίας 3D απόστασης με την επιπλέον δέσμευση ότι οι αποστάσεις ενός κύκλου από το κέντρο προς τα σημεία της περιφέρειάς του, ως ακτίνες, είναι ίσες. Η δεύτερη θεώρηση αφορά στην εύρεση της σφαίρας εκείνης, όπου το κέντρο της βρίσκεται πάνω στο επίπεδο των τριών σημείων, και συνεπώς σε αυτή την περίπτωση, το κέντρο της σφαίρας με το κέντρο του κύκλου ταυτίζονται. Κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται το κέντρο του 3D κύκλου (x_o, y_o, z_o) , πάνω στην περιφέρεια του οποίου βρίσκονται τα Α, Β, Γ. Ενδεικτικά το σύστημα των εξισώσεων, λόγω του ότι είναι μη γραμμικό, μπορεί να λυθεί εύκολα με την εξής διαδικασία:

Αναπτύσσοντας τις σχέσεις (3.87) έως (3.89) προκύπτει:

$$ΑΠ - 2x_A x_o - 2y_A y_o - 2z_A z_o + \text{Νουμ}1 = 0 \quad (3.91)$$

$$ΑΠ - 2x_B x_o - 2y_B y_o - 2z_B z_o + \text{Νουμ}2 = 0 \quad (3.92)$$

$$ΑΠ - 2x_\Gamma x_o - 2y_\Gamma y_o - 2z_\Gamma z_o + \text{Νουμ}3 = 0 \quad (3.93)$$

$$\text{Όπου } \text{Νουμ}1 = x_A^2 + y_A^2 + z_A^2, \text{Νουμ}2 = x_B^2 + y_B^2 + z_B^2$$

$$\text{Νουμ}3 = x_\Gamma^2 + y_\Gamma^2 + z_\Gamma^2 \quad (3.94)$$

$$ΑΠ = x_o^2 + y_o^2 + z_o^2 - R^2 \quad (3.95)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις (3.91) και (3.92) προκύπτει μία γραμμική πλέον εξίσωση της μορφής:

$$f(x_o, y_o, z_o) = 0 \text{ αφού τα } x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B \text{ είναι γνωστά.}$$

Αντίστοιχα αφαιρώντας κατά μέλη τις (3.92) και (3.93) προκύπτει μία εξίσωση της μορφής $g(x_o, y_o, z_o) = 0$. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας και την εξίσωση του επιπέδου (3.90) που είναι

ήδη της μορφής $h(x_o, y_o, z_o) = 0$ και γραμμική , προκύπτει πλέον ένα σύστημα 3X3 γραμμικών εξισώσεων, που επιλύεται εύκολα.

δ) Βρίσκεται η εξίσωση της 3D ευθείας που διέρχεται από το (x_o, y_o, z_o) και είναι κάθετη στο επίπεδο $\alpha * x_o + \beta * y_o + \gamma * z_o + \delta = 0$

ε) Επαναλαμβάνονται τα βήματα (α) έως (δ) , αλλά αυτή τη φορά , σκοπεύοντας τρεις τουλάχιστον στόχους με δεσμευμένη την οριζόντια κίνηση του οργάνου (δηλαδή Hz=σταθ.) και αλλαγή μόνο της ζενίθειας γωνίας του ιδανικού τηλεσκοπίου.

στ) Στο τέλος του βήματος (ε) , θα προκύπτει ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις δύο 3D ευθειών. Αυτές οι ευθείες δεν είναι όμως τυχαίες. Υπό την βασική προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει διαφορική μετακίνηση στο όργανο, κάθε σημείο επάνω στο όργανο εκτελεί περιστροφή περί ενός άξονα. Εάν λοιπόν διαχωριστεί η κίνηση του οργάνου σε οριζόντια και κατακόρυφη, τότε κάθε σημείο θα εκτελεί περιστροφή περί του πρωτεύοντα άξονα και στη συνέχεια περί του δευτερεύοντα. Ένα τέτοιο σημείο είναι και το προβολικό κέντρο μιας κάμερας. Για αυτό το λόγο, μέσω της κίνησης του προβολικού κέντρου, υλοποιήθηκαν οι άξονες του οργάνου.

Στην πρώτη επίλυση των ανωτέρω βημάτων από το (α) έως (δ) , υλοποιήθηκε η εξίσωση του πρωτεύοντα άξονα του οργάνου. Στη δεύτερη επίλυση, υλοποιήθηκε η εξίσωση του δευτερεύοντα άξονα του οργάνου. Το σημείο τομής αυτών των δύο ευθειών του χώρου, ισοδυναμεί λοιπόν με το σημείο τομής του πρωτεύοντα με τον δευτερεύοντα άξονα, το οποίο είναι και το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού, το σημείο από το οποίο υπολογίζονται όλες οι διευθύνσεις. Συνεπώς , σε αυτό το βήμα, υπολογίζεται το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού, ως τομή των δύο 3D ευθειών. Σημειώνεται πως επειδή στην όλη διαδικασία υπεισέρχονται τυχαία σφάλματα, οι 3D ευθείες θα είναι γενικότερα ασύμβατες (ωστόσο με μικρές αποκλίσεις) και ως εκ τούτου , δεν θα τέμνονται στο χώρο.

Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, αφού μάλιστα σε αυτή την περίπτωση , ύστερα από την

ανάλυση σε παραμετρική μορφή, προκύπτουν τρεις εξισώσεις με δύο αγνώστους, οι οποίες θα είναι ήδη γραμμικές.

ζ) Στη συνέχεια, με την αντίστοιχη μεθοδολογία της βαθμονόμησης της στροφικής απόκλισης που αναφέρθηκε παραπάνω, υπολογίζεται ο πίνακας στροφής R_C^T μεταξύ των συστημάτων T (ιδανικό τηλεσκόπιο) και C (Κάμερα). Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται αυτός ο συμβολισμός αντί του R_B^A που χρησιμοποιήθηκε στην στροφική απόκλιση, ώστε να διαχωριστούν οι δύο περιπτώσεις. Η περίπτωση αυτή διαφοροποιείται ελαφρά από την αντίστοιχη αποκλειστικά της στροφικής απόκλισης, αφού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ιδιότυπος «σχετικός προσανατολισμός» που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4.2.1, αφού εδώ υπάρχει και βάση μεταξύ δύο εικόνων. Έτσι, στο αντίστοιχο βήμα, θα χρησιμοποιηθεί ο κλασσικός σχετικός προσανατολισμός για τον προσδιορισμό των στροφών μεταξύ των εικόνων.

Έτσι, στο τέλος προκύπτει μία σχέση της μορφής

$$(r_A)^T = (r_{c,0})^T + R_C^T \cdot (r_A)^C \quad (3.96)$$

Σε αυτό το σημείο, μπορεί να ολοκληρωθεί ο έλεγχος του προηγούμενου κεφαλαίου 3.4.2.1. Εάν λοιπόν, ο πίνακας R_C^T είναι ο μοναδιαίος, αλλά και το $(r_{c,0})^T$ είναι της μορφής $(0,0,z)$, τότε η εκκεντρότητα είναι μορφής coaxial και είναι αποδεκτή, αφού το προβολικό σημείο κείται επί του σκοπευτικού άξονα και δεν υπάρχει στροφική απόκλιση. Αν τα παραπάνω δεν ισχύουν αθροιστικά, τότε η εκκεντρότητα δεν είναι αποδεκτή και εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία.

Η σχέση (3.96) είναι η θεμελιώδης σχέση που θα συνδέει τα συστήματα του ιδανικού τηλεσκοπίου και της κάμερας, όπως έχουν οριστεί αρχικά στη μέθοδο βαθμονόμησης. Τα $(r_A)^T$ και $(r_A)^C$ είναι τα διανύσματα θέσεως για κάποιο σημείο A, στο σύστημα του ιδανικού τηλεσκοπίου και της κάμερας αντίστοιχα. Το $(r_{c,0})^T$ είναι το διάνυσμα θέσεως του προβολικού κέντρου της κάμερας στο σύστημα του ιδανικού τηλεσκοπίου.

Η σχέση (3.96) είναι πολύ σημαντική, για το λόγο του ότι είναι πλέον εφικτός, ασχέτως εκκεντρότητας και στροφικής απόκλισης των συστημάτων T και C, ο υπολογισμός των «πραγματικών» γωνιών αλλά και της απόστασης ενός σημείου από το κέντρο του γεωδαιτικού σταθμού, με μόνη προϋπόθεση η εικόνα του σημείου να εμφανίζεται σε δύο φωτογραφίες. Συγκεκριμένα, δεν απαιτείται καν η ύπαρξη μιας μετρητικής διάταξης, όπως ενός EDM, όπως στις περιπτώσεις του Vogel (2006).

Έστω λοιπόν ότι ενδιαφέρει η μέτρηση της οριζόντιας διεύθυνσης, της ζενίθειας διεύθυνσης και ενδεχομένως του μήκους ενός σημείου A του χώρου. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

i) Υπολογίζεται η ποσότητα

$(r_{c,0})^T$. Από ιδιότητες πρόσθεσης

διανυσμάτων ισχύει ότι :

$$(r_{T,0})^X = (r_{c,0})^X + R_C^X \cdot (r_{T,0})^C \rightarrow$$

$$R_C^X \cdot (r_{T,0})^C = (r_{T,0})^X - (r_{c,0})^X \rightarrow$$

$$(r_{T,0})^C = R_X^C \cdot ((r_{T,0})^X - (r_{c,0})^X)$$

Επειδή όμως: $(r_{T,0})^C = -R_T^C \cdot (r_{c,0})^T$, τότε τελικά

$$(r_{c,0})^T = -R_C^T \cdot R_X^C \cdot ((r_{T,0})^X - (r_{c,0})^X) \quad (3.97)$$

Στη σχέση (38) (3.97) όλες οι ποσότητες στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης είναι γνωστές. Σημειώνεται ότι το σύστημα X είναι το 3D σύστημα του χώρου όπου είναι γνωστά τα φωτοσταθερά.

ii) Ο πίνακας R_C^T είναι σταθερός και

γνωστός από τη διαδικασία

της βαθμονόμησης της στροφικής απόκλισης. Σημειώνεται ωστόσο ότι κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος ο πίνακας R_{C1}^{C2} θα βρεθεί μέσω του κλασσικού σχετικού προσανατολισμού.

iii) Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ποσότητας $(r_A)^C$.

Επειδή αυτή η διαδικασία αποτελείται από πολλά στάδια, αρχικά καλό είναι να γίνει αναφορά στις παθητικές και ενεργές στροφές. Ως παθητική στροφή, ορίζεται η στροφή ενός συστήματος αναφοράς ως προς ένα σταθερό σημείο του χώρου. Αντίθετα, ως ενεργητική στροφή, ορίζεται η στροφή ενός σημείου μαζί με την στροφή του αρχικού συστήματος αναφοράς. Έστω σημείο q στο χώρο και επίσης τα συστήματα αναφοράς A και B , όπου το B έχει προκύψει από την στροφή του A . Έτσι, για τις παθητικές στροφές, θα είναι:

$$(r_q)^B = R_A^B * (r_q)^A \quad (3.98)$$

Έστω τώρα, ότι το σημείο q , εάν μετακινούνταν και αυτό μαζί με την στροφή του A , θα μεταφερόταν σε μία νέα θέση q' . Προφανώς θα ισχύει:

$$(r_q')^B = (r_q)^A \quad (3.99)$$

$$\text{αλλά επειδή } (r_q')^A = R_A^B \cdot (r_q')^B \quad (3.100)$$

, τελικά είναι

$$(r_q')^A = (R_A^B)' \cdot (r_q)^A \quad (3.101)$$

Έτσι, η στροφή του προβολικού κέντρου της κάμερας κατά τη στροφή του συστήματος του ιδανικού τηλεσκοπίου θα είναι:

$$(r_{c,0}')^T = R_T^T \cdot (r_{c,0})^T \quad (3.102)$$

Συνεπώς, η βάση μεταξύ των δύο καμερών, εκφρασμένη στο σύστημα T θα είναι:

$$((r_{c,0}') - (r_{c,0}))^T = (R_{T'}^T - I) \cdot (r_{c,0})^T \quad (3.103)$$

, ενώ εκφρασμένη στο σύστημα C είναι:

$$((r_{c,0}') - (r_{c,0}))^C = R_C^C \cdot (R_{T'}^T - I) \cdot (r_{c,0})^T \quad (3.104)$$

Στην παραπάνω σχέση, στο δεύτερο σκέλος είναι πλέον όλα γνωστά , εκτός από την ποσότητα $R_{T'}^T$.

Ο υπολογισμός του πίνακα αυτού, που αφορά τον σχετικό πίνακα στροφής μεταξύ του αρχικού συστήματος T του τηλεσκοπίου και του τελικού συστήματος T' γίνεται ως εξής:

Θεωρείται ως αρχική (A) θέση του τηλεσκοπίου αυτή με μετρήσεις διευθύνσεων Hz=0 και V=0. Επίσης μία ενδιάμεση (E) θέση όπου οι μετρήσεις διευθύνσεων είναι Hz=E και V=E. Τέλος , μία τελική θέση (T) όπου οι μετρήσεις διευθύνσεων είναι Hz=T και V=T. Γίνεται αντιληπτό , ότι θα ήταν λάθος να θεωρηθεί ότι ένα διάνυσμα θέσης στην τελική θέση θα προέκυπτε από το γινόμενο $R(T) \cdot r(E)$ και αυτό γιατί οι γωνίες Hz και V δεν είναι οι γωνίες στροφής από μια τυχαία θέση του τηλεσκοπίου σε κάποια άλλη, αλλά από ένα σταθερό σύστημα , όπου ο άξονας X είναι ο πρωτεύοντας άξονας του θεοδόλιχου, ο άξονας Z είναι ο σκοπευτικός άξονας (με αντίθετη φορά από αυτή που δείχνει προς το σκοπευόμενο σημείο) και ο άξονας Y συμπληρώνει το 3D δεξιόστροφο σύστημα. Έτσι, για να βρεθεί λ.χ. ο πίνακα στροφής μεταξύ της θέσης (E) και (T) :

$$R_A^E = R_{(V=E)} \cdot R_{(Hz=E)} \quad (3.105)$$

και

$$R_A^T = R_{(V=T)} \cdot R_{(Hz=T)} \quad (3.106)$$

και επειδή

$$R_A^T = R_E^T \cdot R_A^E \quad (3.107)$$

, τελικά

$$R_E^T = R_A^T \cdot (R_A^E)' \quad (3.108)$$

Συνεπώς

$$R_T^T = R_A^T \cdot (R_A^T)' \quad (3.109)$$

όπου A η αρχική θέση του συστήματος (Hz=0 και V=0).

Έως τώρα, προσδιορίστηκε η βάση μεταξύ των προβολικών σημείων των καμερών που προκύπτουν από δύο διαφορετικές σκοπεύσεις του ιδανικού τηλεσκοπίου, συναρτήσει των γωνιών Hz και V.

Το επόμενο βήμα, είναι να βρεθεί το σημείο που ενδιαφέρει στο χώρο, ως ομόλογο μεταξύ δύο εικόνων, για τις οποίες όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν προσδιοριστεί και επιπλέον έχει επιλυθεί ο σχετικός προσανατολισμός τους. Από την εύρεση του σημείου δεσμεύεται ο προσανατολισμός και η θέση της πρώτης εικόνας ως (0,0,0,0,0,0). Η θέση της δεύτερης εικόνας (στο σύστημα της πρώτης) θα ισούται με τη βάση που προσδιορίστηκε παραπάνω, ενώ ο προσανατολισμός της θα ισούται με τις σχετικές γωνίες που υπολογίστηκαν από τον σχετικό προσανατολισμό. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται εμπροσθοτομικά το σημείο στο χώρο, στο σύστημα της πρώτης εικόνας.

Έτσι, τελικά υπολογίζεται το $(r_A)^C$.

Τελειώνοντας αυτή τη διαδικασία, αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στη σχέση (37) (3.96), είναι δυνατός ο υπολογισμός του $(r_A)^T$.

Από εκεί, η αναγωγή στο σύστημα του γεωδαιτικού σταθμού (όχι του τηλεσκοπίου) γίνεται χρησιμοποιώντας την τελική σχέση:

$$(r_A)^\theta = R_T^\theta * (r_A)^T \quad (3.110)$$

όπου προφανώς, ανάλογα με τις συμβάσεις των αξόνων που χρησιμοποιήθηκαν στον ορισμό του T, θα χρησιμοποιηθεί μόνο η γωνία Hz και V.

Τέλος , οι διευθύνσεις H_z και z (ζενίθεια) που μας ενδιαφέρουν, βρίσκονται εύκολα από τις σχέσεις:

$$H_z = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.111)$$

και

$$z = \arccos\left(\frac{z}{x^2+y^2+z^2}\right) \quad (3.112)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας , διερευνήθηκε η εφαρμογή των ελέγχων που μπορούν να γίνουν σε πολυγεωδαιτικούς σταθμούς και ειδικότερα σε αυτούς όπου το τηλεσκόπιο έχει αντικατασταθεί από ένα σύστημα καμερών (χαρακτηριστικό παράδειγμα στην αγορά, είναι ο σταθμός Trimble SX-10).

Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η καταλληλότητα των ελέγχων ISO για τις οριζόντιες και ζενίθιες γωνίες για το είδος του γεωδαιτικού σταθμού που προαναφέρθηκε και διαπιστώθηκε ότι οι έλεγχοι αυτοί υπολείπονται κάποιων διαδικασιών, που θα τους καταστήσουν ρεαλιστικούς. Στη συνέχεια, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας αφορούσε στην πρόταση ενός νέου ελέγχου, ο οποίος θα πρέπει να γίνεται πριν τον έλεγχο ISO , ο οποίος βασίζεται στην εκμετάλλευση της εικονιστικής πληροφορίας των καμερών του σταθμού. Παράλληλα, παρουσιάστηκε και η αντίστοιχη μέθοδος βαθμονόμησής του, σε περίπτωση που ο έλεγχος αποτύχει και ο χρήστης επιθυμεί την ορθή λειτουργία του σταθμού.

Ωστόσο, η εργασία αυτή , δεν καλύπτει τα παρακάτω σοβαρά ερωτήματα που εγείρονται για την υιοθέτηση της προτεινομένης μεθόδου, τα οποία ενδεικτικά είναι:

- 1) Η διερεύνηση της ακρίβειας των μεγεθών που προκύπτουν από τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αξιοποιούνται διαδικασίες της φωτογραμμετρίας , όπως η οπισθοτομία , η εμπροσθοτομία, ο σχετικός προσανατολισμός και ακόμα περισσότερο τεχνικές της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, όπως η ψηφιακή επανασύσταση εικόνας. Η θεωρητική ακρίβεια όμως αυτών των μεθόδων, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί αν δεν θεωρηθούν κάποιες παραδοχές, όπως π.χ. ο αριθμός και η κατανομή των σημείων σκόπευσης , των ομόλογων σημείων κτλ. , ενώ το πλήθος των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτές, είναι αρκετά μεγάλο,

ώστε να την καθιστά μη πρακτική. Αντιθέτως, ο εμπειρικός προσδιορισμός της ακρίβειας αυτής της μεθόδου, με την πραγματοποίηση μετρήσεων σε πεδίο ελέγχου και χρήση checkpoints, θα είχε περισσότερη πρακτική σημασία, αφού θα ήταν δυνατόν να ελεγχθούν σημαντικοί παράμετροι, όπως λ.χ. η απόσταση σκόπευσης των στόχων και των ομόλογων σημείων (όπου θα διαπιστώνονταν και η καταλληλότητα η μη χρήσης όχι μόνο εσωτερικού αλλά και εξωτερικού πεδίου ελέγχου).

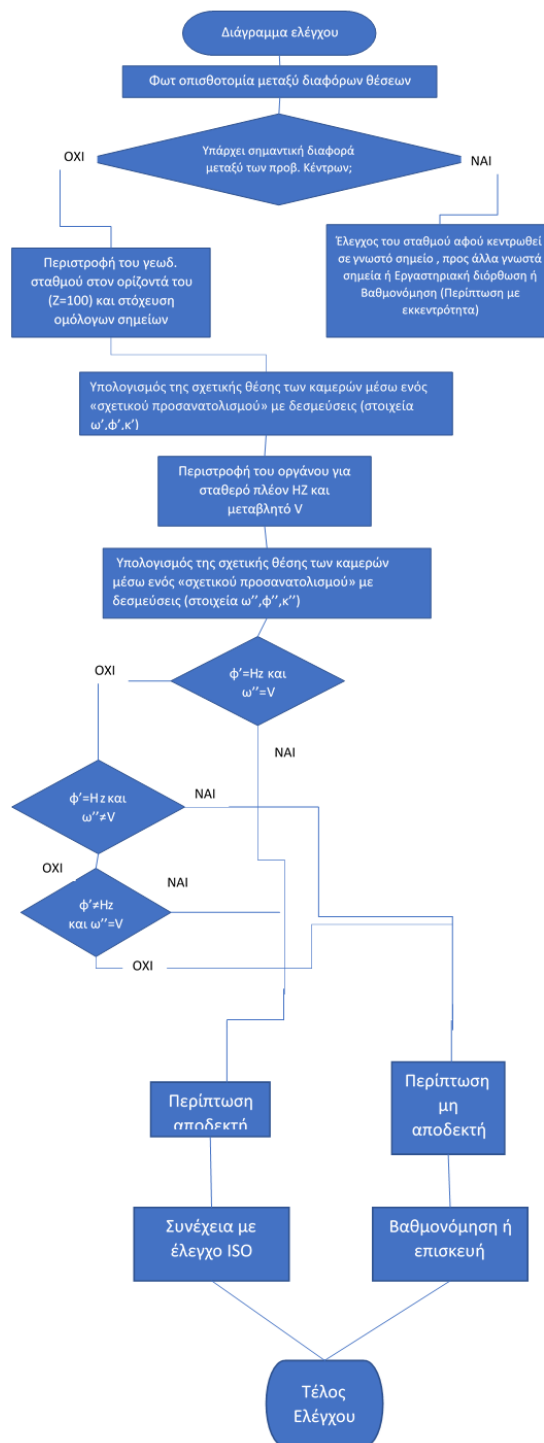
2) Το γεγονός του μικρού ανοίγματος των καμερών του πολυγεωδαιτικού σταθμού (ειδικά της telescope κάμερας) , προϋποθέτει, για τη σκόπευση των ομόλογων σημείων που χρησιμοποιεί η μέθοδος, πυκνό πεδίο στόχων. Η δε διαδικασία της βαθμονόμησης, προϋποθέτει την ύπαρξη ενδιάμεσων σκοπεύσεων , ώστε να υπάρξει εμπροσθοτομία ,κάτι το οποίο δυσχεραίνει την γρήγορη σκόπευση, ειδικά σε στόχους με μεγάλη απόκλιση διευθύνσεων.

3) Τέλος, οι διαδικασίες του ελέγχου και τη βαθμονόμησης σε αυτή την εργασία, προϋποθέτουν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, τόσο φωτογραμμετρικών διαδικασιών όσο και αριθμητικών , όπως η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό , για να μπορέσει να θεωρηθεί η μέθοδος , όχι μόνο θεωρητική αλλά και ρεαλιστική, είναι απαραίτητη η σύνταξη αντίστοιχων κωδίκων και ρουτίνων σε λογισμικά, έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιεί τη μέθοδο σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Τα παραπάνω, αποτελούν παράλληλα και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση και βελτίωση της μεθόδου.

Ενδεικτικά, λόγω του μεγέθους και της πολυπλοκότητας των υπολογισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρατίθενται στη συνέχεια δύο διαγράμματα ροής, τα οποία συνοψίζουν τη μέθοδο που προτάθηκε σε αυτή την εργασία.

Το πρώτο διάγραμμα (Σχήμα Σχήμα 4.1) αφορά στη διαδικασία του ελέγχου και το δεύτερο (Σχήμα Σχήμα 4.2) αφορά στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Και στα δύο διαγράμματα, υπάρχει το σημείο μετά από το οποίο, ο έλεγχος γωνιών ISO μπορεί να συνεχιστεί.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης διαδικασίας ελέγχου πολυγεωδαιτικού σταθμού

Συλλογή στοιχείων από προηγούμενο έλεγχο/A:
σύστημα ιδανικού τηλεσκοπίου , B: σύστημα
κάμερας

ΟΧΙ

Εκκεντρότητα υπάρχει;

ΝΑΙ

Σκόπευση τηλεσκοπίου σε δύο επίπεδα (ενδεικτικά:
(i) ορίζοντας του οργάνου και (ii) Hz=σταθερό)

Υπολογισμός πίνακα R_{AI}^{AII} με τη βοήθεια των
γωνιών Hz,V

Υπολογισμός πίνακα R_{BI}^{BII} με τη βοήθεια του
ιδιότυπου «σχετικού προσανατολισμού»

Λύση συστήματος σχέσεων $R_{AI}^{AII} \cdot (R_B^A)_I = (R_B^A)_I \cdot R_{BI}^{BII}$,
δεσμεύσεων (3.63-3.68) και αποκλεισμός λύσης με $\det(R_B^A) < 0$

Υπολογισμός των τεσσάρων άκρων της αρχικής εικόνας σε σύστημα
εικονοσυντεταγμένων με αρχή το πρωτεύον σημείο της και με
μονάδα μέτρησης το pixel της

Μετασχηματισμός των τεσσάρων άκρων της αρχικής εικόνας, μέσω του
πίνακα R_B^A και c αυτό που εκτιμήθηκε κατά τη διαδικασία της
εσωτερικής βαθμονόμησης , στα τέσσερα άκρα της μετασχηματισμένης
εικόνας, σε αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες με κέντρο το πρωτεύον
σημείο της μετασχηματισμένης

Ψηφιακή επανασύσταση μετασχηματισμένης εικόνας με μονάδα μέτρησης
τα pixel της παλιάς.

Υπολογισμός των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου της
μετασχηματισμένης εικόνας στο σύστημα pixel της: η συντεταγμένη j
(pixel κατά τον άξονα x του συστήματος της εικόνας) θα ισούται με την
απόλυτη τιμή του \min (κάτω αριστερή γωνία, πάνω αριστερή γωνία)
των τετμημένων της μετασχηματισμένης εικόνας , ενώ η συντεταγμένη
i (pixel κατά τον άξονα y του συστήματος της εικόνας) θα ισούται με το
 \max (πάνω αριστερή γωνία, πάνω δεξιά γωνία) των τεταγμένων της

Αναγωγή στις ορθές διευθύνσεις Hz και V μέσω του αντίστροφου
μετασχηματισμού της γνωμονικής προβολής (Σχέσεις 3.83-3.86)

Συνεχίζω με έλεγχο ISO

Υπαρξη πεδίου ελέγχου

Σκόπηση στον ορίζοντα του οργάνου ($V=0$) σε τρεις τουλάχιστον διαφορετικές θέσεις

Εύρεση , για κάθε θέση, μέσω φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας, των συντεταγμένων του σημείου προβολής στο 3D σύστημα του χώρου και Προσδιορισμός της εξίσωσης του επιπέδου των σημείων

Σχηματισμός των εξισώσεων (3.90-3.95) και εύρεση των (x_0, y_0, z_0)

Προσδιορισμός της εξίσωσης 3D ευθείας που διέρχεται από από το (x_0, y_0, z_0) και είναι κάθετη στο επίπεδο $\alpha * x_0 + \beta * y_0 + \gamma * z_0 + \delta = 0$

Επανάληψη των βημάτων αλλά με σκόπηση σε τρεις τουλάχιστον στόχους με δεσμευμένη την οριζόντια κίνηση του οργάνου. Εύρεση παρομοίως 3D ευθείας.

Εύρεση με MET του σημείου «τομής» των ευθειών

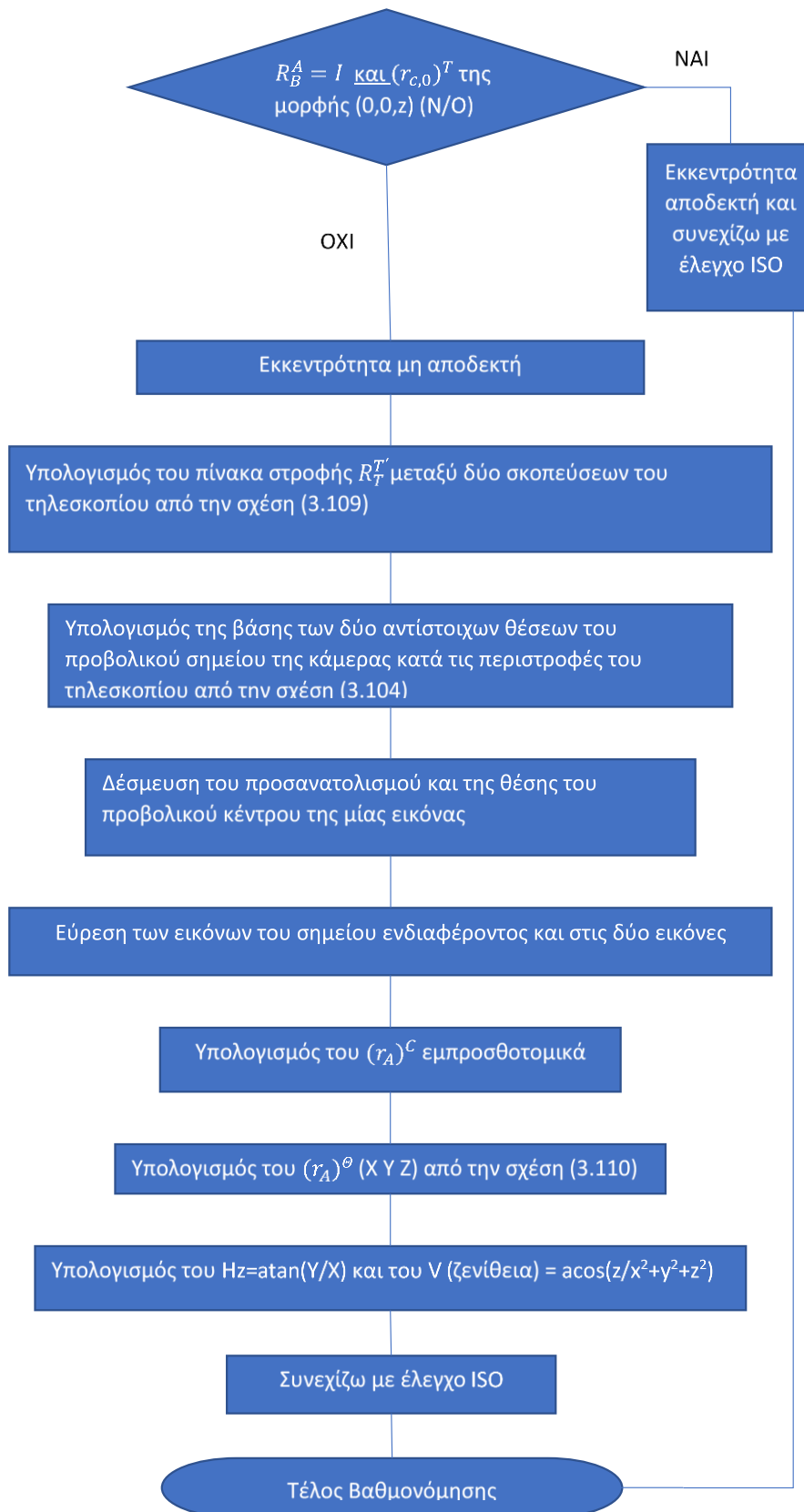
Σκόπηση τηλεσκοπίου σε δύο επίπεδα (ενδεικτικά: (i) ορίζοντας του οργάνου και (ii) H_z =σταθερό)

Υπολογισμός πίνακα R_{AI}^{AII} με τη βοήθεια των γωνιών H_z, V

Υπολογισμός πίνακα R_{BI}^{BII} με τη βοήθεια κλασσικού σχετικού προσανατολισμού

Λύση συστήματος σχέσεων $R_{AI}^{AII} \cdot (R_B^A)_I = (R_B^A)_I \cdot R_{BI}^{BII}$, δεσμεύσεων (3.63-3.68) και αποκλεισμός λύσης με $\det(R_B^A) < 0$

Υπολογισμός ποσότητας $(r_{c,0})^T$ από σχέση (3.97)



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης βαθμονόμησης

Ανακεφαλαιώνοντας, η σημασία της μεθόδου ελέγχου και βαθμονόμησης που προτάθηκε, έγκειται στο κάτωθι:

Οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί νέας τεχνολογίας (πολυγεωδατικοί/εικονογεωδατικοί), ενδέχεται στο μέλλον να μην διαθέτουν τηλεσκόπιο. Ίσως αυτή τη στιγμή ο μόνος γεωδαιτικός σταθμός που ανήκει σε αυτή την κατηγορία να είναι ο SX-10 της Trimble, αλλά δεδομένων των πλεονεκτημάτων ταχύτητας καταγραφής που προσφέρει αυτή η τεχνολογία, είναι πολύ πιθανό όλο και περισσότεροι γεωδαιτικοί σταθμοί να ακολουθήσουν αυτό το παράδειγμα.

Οι εργασίες που απασχολούν όμως ειδικά τους Τοπογράφους Μηχανικούς, απαιτούν όχι μόνο την ταχύτητα αποτύπωσης αλλά και την αρκετά μεγάλη ακρίβεια των παρατηρήσεων. Για το λόγο αυτό, απαιτείται και για αυτή την κατηγορία γεωδαιτικών σταθμών, η ύπαρξη ελέγχων οι οποίοι θα διασφαλίζουν την ακρίβεια του παραγόμενου αποτελέσματος.

Εως τώρα, δεν υπάρχει κάποιος σχετικός έλεγχος για αυτές τις περιπτώσεις, πέρα από τον έλεγχο ISO για τις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, που αφορά όμως σε ολοκληρωμένους γεωδατικούς σταθμούς συμβατικής τεχνολογίας. Ο έλεγχος αυτός, ωστόσο, εισάγει συστηματικά σφάλματα, τα οποία τον καθιστούν αναποτελεσματικό.

Λαμβάνοντας υπόψη, την ύπαρξη σταθερών καμερών επί του σταθμού, η μέθοδος που προτάθηκε μέσω αυτής της εργασίας, συσχετίζει την εικονιστική με την μη εικονιστική πληροφορία που διαθέτει ένας τέτοιος σταθμός και μπορεί να ελέγξει εάν ο σταθμός είναι ικανός να προχωρήσει σε έναν έλεγχο ISO, ή εφόσον ο αρχικός έλεγχος δεν πληρείται, να συνεχίσει με την μέθοδο βαθμονόμησης που προτάθηκε παραπάνω. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εν λόγω μέθοδος, κάνει ελάχιστες παραδοχές, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν εικονιστική πληροφορία, έτσι ώστε, μετά την βαθμονόμηση, οποιοδήποτε εναπομένον σφάλμα, θα έχει το χαρακτήρα είτε του τυχαίου είτε του χονδροειδούς σφάλματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. *"Εφαρμοσμένη Γεωδαισία"*, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2011
2. Τσούλης Δ., *"Εισαγωγή στην Τοπογραφία"*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2010
3. Μπαλοδήμος Δ.Δ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., *" Η εξέλιξη των επίγειων συμβατικών γεωδαιτικών οργάνων τον 20^ο αιώνα στην Ελλάδα"*, Παρουσίαση στο συνέδριο *"Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα"*, Θεσσαλονίκη, 2005
4. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Μπαλλής Β., *" Το Πρότυπο Εξωτερικό Πεδίο Ελέγχου και Διακρίβωσης Ολοκληρωμένων Γεωδαιτικών Σταθμών"*, 6^ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα , 2016
5. Πανταζής Γ., *" Τα Εργαστήρια Διακρίβωσης Γεωδαιτικών Οργάνων στην Ελλάδα. Το Παρόν και το Μέλλον"*, 6^ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα , 2016
6. Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Νικολίτσας Κ., *" Πρόταση Μεθοδολογίας Βαθμονόμησης της Ψηφιακής Κάμερας Εικονογεωδαιτικού Σταθμού"*, 3^ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας, Λάρνακα , 2010
7. Αλεξίου Α., *" Εφαρμογή Του Προτύπου ISO 17123-4 Σε Εσωτερική Βάση. Δημιουργία Ευέλικτης Εξωτερικής Βάσης Μετρολογικού Ελέγχου Μηκών"*, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας Ε.Μ.Π, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2011
8. Βλάχος Δ., *"Όργανα και Μέθοδοι Μετρήσεων"* , Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα, 2012
9. Καλτσίκης Χ.Ι., Φωτίου Α., *"Γενική Τοπογραφία"* , Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη ,1990

10. E. Lachat., T. Landes, P. Grussenmeyer, "*Investigation of a Combined Surveying and Scanning Device: The Trimble SX-10 Scanning Total Station*", Icube Laboratory, Photogrammetry and Geomatics Group, National Institute of Applied Sciences (INSA), Strassburg, 2017
11. Y. Zhou, A. Wagner, T. Wunderlich, P. Wasmeier, "*Calibration Method for IATS and Application in Multi – Target Monitoring using Coded Targets*", Journal of Applied Geodesy, 2017
12. B. Walser, "*Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*", PhD Thesis, ETH- Zurich, 2004
13. Stathas D., Pantazis G., Lambrou E., "*Testing a laser scanner in comparison with a specific total station in Land Surveys*", 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Βιέννη, 2005
14. Erhart M., Lienhart W., "*Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites*", Journal of Surveying Engineering, 2017
15. ISO 17123-3:2001, "*Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments —Part 3: Theodolites*"
16. ISO 17123-4:2001, "*Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments —Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)*"
17. Lambrou E., Pantazis G., "*Laboratorial tests of digital theodolites*", International Symposium της FIG, "Modern technologies, education and professional practice in Geodesy and related fields", Σόφια ,2004
18. Trimble, "*Trimble SX-10 Brochure: Getting to know the Trimble SX10 Scanning Total Station -Inside and Out*"
19. Trimble, "*Trimble SX-10 Scanning Total Station Datasheet*"

20. Trimble, "Trimble SX-10 Field Guide: SX10 Scanning Total Station: In-Field Calibration"
21. Trimble, "Trimble SX-10 Field Guide "
22. Trimble, "Trimble SX-10 Product Bulletin: Trimble SX10 Scanning Total Station Plummet Camera"
23. Trimble, "Trimble SX-10 Scanning Total Station Quick Start Guide "
24. Trimble, "Trimble SX-10 Product Bulletin: Camera Calibration Check Procedure for SX10"
25. E. Lachat., T. Landes, P. Grussenmeyer, " *First Experiences with The Trimble SX10 Scanning Total Station for Building Facade Survey*", 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Nafplio, 2017
26. A. Weber, T. Lerch, " *Comparing workflow and point cloud outputs of the Trimble SX10 TLS and senseFly eBee Plus drone*", FIG Congress, Istanbul, 2018
27. Leica, "Leica Nova MS-60 White Paper ", 2020
28. Leica, "Leica MS-60/TS-60 User Manual "
29. Topcon, "GTL-1000 series Laser Scanner Total Station Instruction Manual "
30. Topcon, "GTL-1000 series Laser Scanner Total Station Brochure "
31. Vogel, M., " *Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen*". PhD thesis, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany ,2006.
32. Huang, Y. D., Harley, I., " *Calibration of close-range photogrammetric stations using a free network bundle adjustment*". In:

Gruen, A., Kahmen, H. (Eds.), *Optical 3-D Measurement Techniques*
Wichmann, Karlsruhe, Germany, 1989

33. Πέτσα, Ε., "*Θεμελιώδεις έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*" , Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, ΤΕΙ Αθήνας, Τμήμα Τοπογραφίας, 2000.
34. Snyder, J. P. (1987). "*Map projections—A working manual.*" Paper 1395, U. S. Geological Survey, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
35. Lienhart, W. , Ehrhart, M. , "*Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites*" , *Journal of Surveying Engineering*, Volume 143, Issue 2, 2017
36. Ρωσσικόπουλος, Δ., "*Η μέθοδος του τριγωνισμού: Από την Πυθαγόρεια Τριάδα στα Συστήματα Αναφοράς των Τεσσάρων Διαστάσεων*" , ΤΕΕ, Περιοδικό Τεχνολογία, Τεύχος 334, 2007