



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

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ
ΕΙΚΟΝΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ V10



Αναστάσιος-Γραμματάς Καμπούρης

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα Οκτώβριος 2015



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

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ
ΕΙΚΟΝΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ V10

Διπλωματική Εργασία

του

Αναστάσιου-Γραμματά Καμπούρη

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Ευαγγελία Λάμπρου
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Πανταζής
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Οκτώβριος 2015

(Υπογραφή)

.....
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ-ΓΡΑΜΜΑΤΑΣ ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναστάσιος-Γραμματάς Καμπούρης, 2015

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 τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αφιερώνεται στο φίλο και συνάδελφο
Ορέστη Σπηλιόπουλο, που μας άφησε νωρίς
τον Απρίλιο του 2011.
Καλό Ταξίδι...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά το τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους αναπληρωτές καθηγητές της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ κα. **Ευαγγελία Λάμπρου** και κ. **Γιώργο Πανταζή** για τη διατύπωση και την ανάθεση ενός τόσο πρωτότυπου, ενδιαφέροντος, απαιτητικού και πολύπλευρου θέματος.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν να πειραματιστώ με νέες τεχνολογίες και την ελευθερία να λάβω αποφάσεις. Οι κριτικές παρεμβάσεις τους και η καθοδήγησή τους σε συνδυασμό με τη συνέπεια και το παιδαγωγικό τους ήθος δημιούργησαν ένα περιβάλλον που ήταν ικανό να ξεπεράσει όλες εκείνες τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν στα διάφορα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία **Geotech ΕΠΕ** για τη διάθεση και την παροχή του εξοπλισμού και για την ελασικότητά τους ως προς το χρόνο. Επιπλέον οφείλω και θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. **Σόλωνα Κιτσινέλη** ΑΤΜ ΕΜΠ για την παρουσίαση και επίδειξη του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος V10 όπως ακόμα και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να το εκφράσω και να το αφιερώσω στους γονείς μου **Θεοδώρα** και **Κωνσταντίνο** που χωρίς τις θυσίες τους και την αμέριστη υποστήριξή τους δεν θα ήμουν σε θέση να ολοκληρώσω τις σπουδές μου σε αυτό το επίπεδο και να εκπληρώσω τους στόχους μου. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το στενό μου φιλικό και συναδελφικό περιβάλλον για τη συμπαράσταση και την κατανόηση στα άγχη και τις αγωνίες μου όλα αυτά τα χρόνια.

Αναστάσιος-Γραμματάς Καμπούρης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται τόσο από την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας και τη διάδοση της πληροφορίας, όσο από τη στροφή της οικονομίας στους όρους της βιώσιμης ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο αυτό η παρεμβατικότητα της ανθρώπινης δραστηριότητας αποκλιμακώνεται και ο κατασκευαστικός τομέας τείνει περισσότερο στη διαχείριση και συντήρηση των υπαρχουσών υποδομών παρά στην υλοποίηση νέων μεγάλων τεχνικών έργων.

Στις προκλήσεις και τις ανάγκες που επιβάλλει η πραγματικότητα ο τοπογράφος μηχανικός κρίνεται ο καταλληλότερος για την παραγωγή και τη διαχείριση της γεωχωρικής πληροφορίας. Ταυτόχρονα είναι αυτός που θα δώσει λύσεις σε σύγχρονα προβλήματα διαφορετικής σημαντικότητας και κλίμακας με μεθόδους γεωπληροφορικής. Επίσης ο γεωδαίτης μηχανικός είναι ο μόνος που έχει το επιστημονικό υπόβαθρο να μελετήσει την κινηματική συμπεριφορά και την παραμόρφωση φυσικών σχηματισμών και τεχνικών έργων με έναν αξιόπιστο τρόπο στο χώρο των τριών διαστάσεων.

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι μία νέα πρωτοποριακή λύση που έρχεται να προστεθεί στη "φαρέτρα" του τοπογράφου μηχανικού για τη συλλογή, επεξεργασία και διάδοση της γεωχωρικής και ειδικότερα της γεωμετρικής πληροφορίας. Το σύστημα V10 προσφέρει ταχύτητα, σταθερότητα και αξιοπιστία ενώ δημιουργεί ένα υπόβαθρο που οπτικοποιεί το αντικείμενο μελέτης και αποθηκεύει την τριδιάστατη γεωμετρική του πληροφορία για μία δεδομένη χρονική στιγμή.

Η ευχέρεια του εικονοσυστήματος V10 στον υπολογισμό γεωδαιτικών συντεταγμένων και στην κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων έδωσε το έναυσμα για τη διατύπωση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας του συστήματος V10 γίνεται τόσο σε μετρολογικό επίπεδο όσο σε εφαρμοστικό με τη διεξαγωγή γεωμετρικών τεκμηριώσεων σε τεχνητές κατασκευές. Τα συμπεράσματα εξάγονται από τη σύγκριση των γεωμετρικών παραγώγων και της συνολικής διαδικασίας του V10 σε σχέση με άλλες μεθόδους και εξοπλισμό που μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	IX
ΕΙΚΟΝΕΣ	XI
ΠΙΝΑΚΕΣ	XIV
ΣΧΗΜΑΤΑ	XV
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XIX
ABSTRACT	XXI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	3
1.1 Γενικά	3
1.2 Μέθοδοι Συλλογής Τριδιάστατης Πληροφορίας	4
1.2.1 Τοπομετρική Μέθοδος	5
1.2.2 Γεωδαιτική Μέθοδος	5
1.2.3 Φωτογραμμετρική Μέθοδος	6
1.2.4 Επίγειοι Σαρωτές Επιφανειών	7
1.3 Εξέλιξη των Επίγειων Φωτομηχανών και των Ολοκληρωμένων Γεωδαιτικών Σταθμών	9
1.4 Αντικείμενο της Εργασίας	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΤΟ ΕΙΚΟΝΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ V10	15
2.1 Γενικά	15
2.2 Αρχή Λειτουργίας του Συστήματος V10	15
2.3 Προϋποθέσεις Ορθής Λειτουργίας και Ακρίβεια	19
2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	35
2.5 Το Λογισμικό Πεδίου Trimble Access	46

2.6 Το Λογισμικό Γραφείου Trimble Business Center	49
2.6.1 Είδη Σημείων Τριγωνισμού του V10	52
2.6.2 Επίγειος Τριγωνισμός στο TBC	56
2.6.3 Φωτογραμμετρικές Παρατηρήσεις στο TBC και Ακρίβεια	76
2.6.4 Επεξεργασία Πανοραμάτων	81
2.6. Διαλειτουργικότητα TBC και Sketch Up Pro	82
2.7 Εφαρμογές με το V10	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΑΜΕΡΩΝ ΤΟΥ V10	89
3.1 Γενικά	89
3.2 Βαθμονόμηση και Διακρίβωση του V10 Κατά την Κατασκευή.....	90
3.3 Εφαρμογή Βαθμονόμησης του V10	93
3.3.1 Επίλυση με το Λογισμικό Calibration CCD	98
3.3.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΩΝ	107
4.1 Αποτύπωση Όψης Κτιρίου	107
4.1.1 Κλασσική Μέθοδος	109
4.1.2 Αποτύπωση με το Σύστημα V10	121
4.1.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων.....	130
4.2 Αποτύπωση Μνημείου.....	141
4.2.1 Συνδυασμός Γεωδαιτικής και Φωτογραμμετρικής Μεθόδου .	143
4.2.2 Αντιμετώπιση με το Σύστημα V10	146
4.2.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	151
4.3 Αποτύπωση Δεξαμενής Αποθήκευσης Καυσίμων	156
4.3.1 Σάρωση με χρήση του εικονοσταθμού Trimble VX.....	162
4.3.2 Μέτρηση με το V10.....	168
4.3.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	172
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	181

5.1 Συμπεράσματα.....	181
5.2 Προτάσεις	188
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	191
ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ	195
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	197

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 2.1 Κλίμακα των εικόνων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου για το V10.....	21
Διάγραμμα 2.2 Η ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου και με την ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων	23
Διάγραμμα 2.3 Μέσο σφάλμα της συντεταγμένης Z σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου για κανονική διάταξη εικόνων και διαφορετικές βάσεις λήψης	26
Διάγραμμα 2.4 Ακρίβεια γεωδαιτικών συντεταγμένων από κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων με βάση λήψης 15m.	27
Διάγραμμα 2.5 Ακρίβεια γεωδαιτικών συντεταγμένων από κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων με βάση λήψης 25m	27
Διάγραμμα 2.6 Ισχύς του σχήματος σε σχέση με τη γωνία τομής	34
Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα μη κανονικοποιημένης ακτινικής διαστροφής του συστήματος V10 για την τρίτη και τέταρτη κάμερα.....	103
Διάγραμμα 4.1 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.	132
Διάγραμμα 4.2 Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.	133
Διάγραμμα 4.3 Ιστόγραμμα της κατά y μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.	133
Διάγραμμα 4.4 Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς	

	το αντίστοιχο τεταρτημόριο για το διάγραμμα της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.....	134
Διάγραμμα 4.5	Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού	135
Διάγραμμα 4.6	Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.	136
Διάγραμμα 4.7	Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.....	137
Διάγραμμα 4.8	Ιστόγραμμα της κατά y μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.....	138
Διάγραμμα 4.9	Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο για το διάγραμμα της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού	138
Διάγραμμα 4.10	Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού	140
Διάγραμμα 4.11	Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.	152
Διάγραμμα 4.12	Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.	152
Διάγραμμα 4.13	Ιστόγραμμα της κατά y μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.	153
Διάγραμμα 4.14	Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο.	153
Διάγραμμα 4.15	Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της ανατολικής όψης του Θησείου.....	155
Διάγραμμα 4.16	Ιστόγραμμα οριζόντιας μεταβολής των 89 σημείων λεπτομέρειας του συστήματος V10 σε mm.....	180

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1	Στερεοκάμερα C120 και C12 της εταιρείας Wild με έτη κυκλοφορίας 1968 και 1933 αντίστοιχα.	9
Εικόνα 1.2	Φωτοθεοδόλιχο P31 της εταιρείας Wild με έτος κυκλοφορίας 1972.....	10
Εικόνα 1.3	Η πανοραμική μηχανή Ladybug 5 της εταιρεία Topcon, μόνη της και σε επανδρωμένο όχημα τριδιάστατης χαρτογράφησης.	11
Εικόνα 1.4	Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX της εταιρείας Trimble.	12
Εικόνα 1.5	Το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 με επιβατηγό δέκτη GNSS.	13
Εικόνα 2.1	Το σύστημα V10 σε σύζευξη με το χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX σε λειτουργία autolock.	18
Εικόνα 2.2	Το σύστημα V10 σε σύζευξη με τον επιβατηγό δέκτη GNSS R10.	18
Εικόνα 2.3	Το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10.....	35
Εικόνα 2.4	Επιβατηγοί αισθητήρες Θέσης του συστήματος V10, αριστερά ο δέκτης GNSS R10 και δεξιά πρίσμα 360° για ρομποτικό ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό.....	36
Εικόνα 2.5	Εξωτερικά μέρη της κεφαλής του V10.....	37
Εικόνα 2.6	Εσωτερικό κεφαλής V10.....	37
Εικόνα 2.7	Λήψεις του συστήματος V10 χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) την τεχνική HDR.....	42
Εικόνα 2.8	Άκρη απορρόφησης κραδασμών του V10.....	46
Εικόνα 2.9	Χειριστήριο Trimble TSC3 αριστερά και Trimble Tablet PC (model 2) δεξιά.....	47
Εικόνα 2.10	Βασική απεικόνιση (display) της εφαρμογής γενικής τοπογράφησης του λογισμικού Trimble Access.....	48
Εικόνα 2.11	Ολοκλήρωση και ανασκόπηση της λήψης του πανοράματος και των εικόνων.....	49
Εικόνα 2.12	Σημεία λήψης του V10 σε κάτοψη στο λογισμικό TBC.....	51
Εικόνα 2.13	Τριδιάστατη περιήγηση στο TBC στις εικόνες του πανοράματος του V10.....	51
Εικόνα 2.14	Εξωτερικό πεδίο λήψης με τοποθετημένους τεχνητούς στόχους.....	54
Εικόνα 2.15	Σημεία ελέγχου τριγωνισμού του V10.	56

Εικόνα 2.16	Παράθυρο χειροκίνητου επίγειου τριγωνισμού στο TBC και εστίαση με τη βοήθεια του "Pixel Picker"	68
Εικόνα 2.17	Καρτέλα αποτελεσμάτων της εφαρμογής "Adjust Photo Stations" του TBC.....	70
Εικόνα 2.18	Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος α.....	71
Εικόνα 2.19	Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος β.....	72
Εικόνα 2.20	Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος γ.....	73
Εικόνα 2.21	Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος δ.....	74
Εικόνα 2.22	Καρτέλα ιδιοτήτων των σημείων λήψης στο TBC.....	75
Εικόνα 2.23	Παράθυρο της εφαρμογής "Measure Photo Point" στο TBC.....	76
Εικόνα 2.24	Ίχνος της επιπολικής γραμμής κ" στη δεύτερη εικόνα κατά την μέτρηση ενός σημείου	77
Εικόνα 2.25	Πίνακας με στοιχεία των φωτογραμμετρικών σημείων.....	79
Εικόνα 2.26	Πίνακας με τις παραμέτρους και τα υπόλοιπα της επίλυσης της εμπροσθοτομίας κάθε σημείου.....	80
Εικόνα 2.27	Αβεβαιότητα παρατήρησης ενός τεχνητού στόχου με υπερέκθεση.....	81
Εικόνα 2.28	Παράθυρο της εφαρμογής "Process Panoramas"	82
Εικόνα 2.29	Τριδιάστατη σχεδίαση στο Sketch Up από τις εικόνες του V10.....	83
Εικόνα 2.30	Ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος στο TBC για την εξαγωγή αρχείου .skp.....	83
Εικόνα 2.31	Θέαση των πανοραμάτων του V10 με την εντολή Igloo view στο Sketch Up.....	84
Εικόνα 2.32	Φωτορεαλιστική υφή του μοντέλου στο Sketch Up από τις εικόνες του V10.....	84
Εικόνα 2.33	Τριδιάστατο μοντέλο στο Sketch Up από τις εικόνες του V10 με υψηλό βαθμό λεπτομερειών.....	85
Εικόνα 2.34	Αποτύπωση γέφυρας στο TBC με δεδομένα του V10.....	86
Εικόνα 2.35	Τριδιάστατο μοντέλο γέφυρας από μετρήσεις του V10.....	86
Εικόνα 2.36	Λήψη του V10 σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.....	87
Εικόνα 2.37	Παρακολούθηση ρωγμής σε ορυχείο με το σύστημα του V10.....	87
Εικόνα 2.38	Δημιουργία ισουψών καμπυλών και επιφανειών σε ορυχείο με το σύστημα του V10.....	88
Εικόνα 3.1	Διακρίβωση των αισθητήρων του V10 εργαστηριακά.....	90

Εικόνα 3.2 Θάλαμος βαθμονόμησης του συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10	91
Εικόνα 3.3 Κέντρα των τεχνητών στόχων σε πρότυπο σκακιέρας.	92
Εικόνα 3.4 Εσωτερικό τριδιάστατο πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.	94
Εικόνα 3.5 Εξωτερικό τριδιάστατο πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.	95
Εικόνα 3.6 Παράθυρο του λογισμικού "Calibraton CCD"	101
Εικόνα 4.1 Απόσπασμα επεξεργασμένου πανοράματος στο TBC του συστήματος V10 της όψης Λαμπαδαρίου.....	109
Εικόνα 4.2 Ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός TPS 1201+ της εταιρείας Leica κατά τις εργασίες υπαίθρου.....	110
Εικόνα 4.3 Αυτοσχέδια πεδίου από την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.....	111
Εικόνα 4.4 Μπάρες βαθμολόγησης της αυτόματης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.....	123
Εικόνα 4.5 Μπάρες βαθμολόγησης της χειροκίνητης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.....	127
Εικόνα 4.6 Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά του Θησείου, οπισθόδομος και νότια όψη.....	142
Εικόνα 4.7 Ορθοφωτογραφία ανατολικής όψης του ναού του Ηφαίστου.....	144
Εικόνα 4.8 Μπάρες βαθμολόγησης του επίγειου τριγωνισμού για την αποτύπωση του ναού του Ηφαίστου από το TBC.	147
Εικόνα 4.9 Κατηγορίες δεξαμενών από αριστερά: σφαιρική, κατακόρυφη κυλινδρική, οριζόντια κυλινδρική.	156
Εικόνα 4.10 Δεξαμενή P-8736 στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων Ασπροπύργου.....	160
Εικόνα 4.11 Ο γεωδαιτικός χωροεικονοσταθμός VX της εταιρείας Trimble	162
Εικόνα 4.12 Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX κατά τη σάρωση.....	166
Εικόνα 4.13 Η τελική επιφάνεια της δεξαμενής έπειτα από διορθώσεις στο λογισμικό Geomagic.....	168
Εικόνα 4.14 Εργασίες πεδίου για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.	170

Εικόνα 4.15 Μπάρες βαθμολόγησης από την τελική επίλυση του επίγειου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της δεξαμενής P-7836.....	171
---	-----

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1 Τα συνολικά αποτελέσματα των 13 επιλύσεων της βαθμονόμησης των καμερών του V10 με τα τυπικά τους σφάλματα.	105
Πίνακας 4.1 Μέγιστη αβεβαιότητα των σημείων λεπτομέρειας σε σχέση με την κλίμακα εκτύπωσης του διαγράμματος.	107
Πίνακας 4.2 Αβεβαιότητες προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων αναφοράς.....	114
Πίνακας 4.3 Αβεβαιότητες προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας.....	114
Πίνακας 4.4 Πίνακας στατιστικών στοιχείων των στάσεων λήψης της αυτόματης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.	123
Πίνακας 4.5 Πίνακας στατιστικών στοιχείων των στάσεων λήψης της χειροκίνητης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.....	127
Πίνακας 4.6 Αβεβαιότητες προσδιορισμού της περιμέτρου και της ακτίνας σε σχέση με το μήκος της περιφέρειας της δεξαμενής.....	159
Πίνακας 4.7 Γεωδαιτικές συντεταγμένες των στάσεων αναφοράς σε μέτρα για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.	164
Πίνακας 4.8 Πίνακας με τα ύψη των οριζόντιων τομών των δακτυλίων της δεξαμενής P-8736 με τον αντίστοιχο αριθμό σημείων από τις δύο διαδικασίες.....	176
Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα των επιλύσεων προσαρμογής κύκλου με τα δεδομένα του V10 σε m.	176
Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα των επιλύσεων προσαρμογής κύκλου με τα δεδομένα του VX σε m.....	176
Πίνακας 4.11 Σύγκριση των παραμέτρων από τις δύο μεθοδολογίες σε mm.....	178

Πίνακας 4.12 Η μέση τιμή της οριζόντιας μεταβολής των σημείων λεπτομέρειας του συστήματος V10 σε mm ανά δακτύλιο.....	180
---	-----

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1 Εμπροσθοτομία στο χώρο από ζεύγος εικόνων σε κανονική διάταξη	16
Σχήμα 2.2 Γεωμετρικές σχέσεις εικόνας αντικειμένου κανονικής διάταξης.....	20
Σχήμα 2.3 Διαφοροποιήσεις στη σημειακή κλίμακα της εικόνας από εκτροπές λόγω αναγλύφου.....	22
Σχήμα 2.4 Διαφοροποιήσεις στις μέσες κλίμακες των εικόνων του πανοράματος	22
Σχήμα 2.5 Κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων.....	24
Σχήμα 2.6 Προοπτικές απεικονίσεις με ένα, δύο και τρία σημεία φυγής.....	28
Σχήμα 2.7 Ελάχιστη γωνία παρατήρησης επίπεδου αντικειμένου και μέγιστη βάση λήψης μεταξύ δύο στάσεων του συστήματος V10	29
Σχήμα 2.8 Γεωμετρικοί τόποι ίδιας γωνίας τομής των ακτίνων κατά την εφαρμογή εμπροσθοτομιών από δύο γνωστά σημεία.....	31
Σχήμα 2.9 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για δύο στάσεις λήψης.....	31
Σχήμα 2.10 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για τέσσερις στάσεις λήψης.....	32
Σχήμα 2.11 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για οχτώ στάσεις λήψης.	32
Σχήμα 2.12 Τριαξονικό ελλειψοειδές σφάλματος σημείου από την εμπροσθοτομία στο χώρο δύο ομόλογων ακτίνων.	33
Σχήμα 2.13 Γωνιακό εύρος και προσανατολισμός των κεντρικών καμερών του συστήματος V10	38
Σχήμα 2.14 Οριζόντιο οπτικό πεδίο του V10 και οριζόντιες επικαλύψεις	39
Σχήμα 2.15 Κατακόρυφο οπτικό πεδίο του V10.....	39

Σχήμα 2.16	Κατακόρυφο οπτικό πεδίο του V10 εκφρασμένο γωνιακά ..	40
Σχήμα 2.17	Χωρική ανάλυση εικονοστοιχείου του V10 σε απόσταση 10m.....	41
Σχήμα 2.18	Απόκλιση της κεφαλής του V10 από το σημείο λήψης στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του χρήστη	43
Σχήμα 2.19	Διάταξη της ηλεκτρονικής πλακέτας των αισθητήρων του V10	45
Σχήμα 2.20	Θέσεις Gruber για το σχετικό προσανατολισμό δύο	52
Σχήμα 2.21	Κατανομή των σημείων σύνδεσης στη δέσμη του πανοράματος	53
Σχήμα 2.22	Κατανομή φωτοσταθερών σημείων του συστήματος V10...	55
Σχήμα 2.23	Η γωνία dk του άξονα λήψης της κάμερας 4 ως προς το σύστημα αναφοράς του V10	59
Σχήμα 2.24	Η θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου του V10 ως προς το σημείο λήψης από τις μετρήσεις των αισθητήρων των κλίσεων.....	60
Σχήμα 2.25	Παράθυρο αναφοράς σε μεθόδους επιφανειακής συνταύτισης σημείων σύνδεσης.....	66
Σχήμα 2.26	Περιπτώσεις αποκρύψεων σε επίγεια λήψη.....	67
Σχήμα 2.27	Πύκνωση των στάσεων λήψης με δίπολα δίμετρης βάσης λήψης.....	67
Σχήμα 2.28	Επιπολικό επίπεδο	78
Σχήμα 3.1	Σχηματική παράσταση της επίδρασης της ακτινικής διαστροφής των φακών	89
Σχήμα 3.2	Σχηματική παράσταση της εμπροσθοτομίας στο χώρο από βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης.	95
Σχήμα 3.3	Οριζοντιογραφία των λήψεων του ολοκληρωμένου συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 σε σχέση με το εξωτερικό πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ.	97
Σχήμα 3.4	Οριζοντιογραφία των λήψεων του ολοκληρωμένου συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 σε σχέση με το εσωτερικό πεδίο ελέγχου της αίθουσας Y23 της ΣΑΤΜ.....	98
Σχήμα 4.1	Η θέση της όψης του κτιρίου Λαμπαδαρίου σε χαρτογραφικό υπόβαθρο της Google.....	108
Σχήμα 4.2	Στάσεις αναφοράς για τη φωτογραμμετρική και γεωδαιτική αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.....	111

Σχήμα 4.3	Διάγραμμα όψης Λαμπαδαρίου από γεωδαιτική διαδικασία.	119
Σχήμα 4.4	Έλεγχος του ταυτόσημου των διαγραμμάτων της όψης και της γενικής οριζοντιογραφίας από γεωδαιτική διαδικασία.	120
Σχήμα 4.5	Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων λήψης και της όψης του Λαμπαδαρίου.....	121
Σχήμα 4.6	Φωτογραμμετρικό δίκτυο αυτόματου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.	122
Σχήμα 4.7	Πύκνωση του δικτύου των στάσεων λήψης για την αποτύπωση της όψης Λαμπαδαρίου.	125
Σχήμα 4.8	Φωτογραμμετρικό δίκτυο χειροκίνητου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου	126
Σχήμα 4.9	Σύγκριση του διαγράμματος της γεωδαιτικής διαδικασίας με αυτό της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού (αριστερά) και της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού (δεξιά).....	128
Σχήμα 4.10	Σύγκριση των διαγραμμάτων της γεωδαιτικής διαδικασίας με της φωτογραμμετρικής για αυτόματο (αριστερά) και χειροκίνητο (δεξιά) τριγωνισμό.	129
Σχήμα 4.11	Υφιστάμενο πολυγωνομετρικό δίκτυο.....	143
Σχήμα 4.12	Το επίπεδο της ανατολικής όψης σε σχέση με τη κάτοψη του ναού.	144
Σχήμα 4.13	Τελικό διάγραμμα ανατολικής όψης.....	145
Σχήμα 4.14	Στάσεις λήψης με το σύστημα του V10.....	146
Σχήμα 4.15	Φωτογραμμετρικό δίκτυο επίγειου τριγωνισμού για την αποτύπωση του ναού του Ηφαίστου με το σύστημα V10. .	148
Σχήμα 4.16	Σημεία λεπτομέρειας της ανατολικής όψης του ναού του Ηφαίστου από το TBC με το σύστημα V10 σε σχέση με το υπάρχον διάγραμμα.	150
Σχήμα 4.17	Κατακόρυφες και οριζόντιες τομές για την παρακολούθηση παραμορφώσεων σε κατακόρυφη κυλινδρική δεξαμενή.....	158
Σχήμα 4.18	Στάσεις αναφοράς για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.	163

Σχήμα 4.19 Το νέφος σημείων από τη σάρωση του VX σε τέσσερις διαφορετικές προβολές (ορθή, αξονομετρική και δύο πλάγιες).	167
Σχήμα 4.20 Το νέφος σημείων του VX καθαρισμένο σε τέσσερις διαφορετικές προβολές (ορθή, αξονομετρική και δύο πλάγιες).	167
Σχήμα 4.21 Το δίκτυο των στάσεων λήψης του V10 για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.....	169
Σχήμα 4.22 Το φωτογραμμετρικό δίκτυο του V10 για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736 σε τρεις διαφορετικές κλίμακες.	171
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα της πρώτης οριζόντιας τομής (ring1).....	179

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 στην υλοποίηση γεωδαιτικών αποτυπώσεων. Η διερεύνηση της νέας αυτής τεχνολογίας και μεθοδολογίας επιχειρήθηκε στο πλαίσιο του επιστημονικού ελέγχου.

Η εργασία αποσκοπεί στη διαπίστωση της γενικότερης χρήσης του συστήματος, τις εφαρμογές που δύναται να αντιμετωπίσει, με τις αντίστοιχες επιδόσεις του και τη σύγκρισή του με άλλες μεθόδους. Η εργασία συνοψίζεται από τα εξής πέντε κεφάλαια:

- **Στο πρώτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στις ανάγκες και τους λόγους της γεωμετρικής τεκμηρίωσης φυσικών σχηματισμών και τεχνικών έργων. Παράλληλα διεξάγεται μια ανασκόπηση στις διαφορετικές μεθόδους συλλογής τριδιάστατης πληροφορίας και μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη του φωτογραμμετρικού και γεωδαιτικού εξοπλισμού.
- **Στο δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος V10 και οι αρχές λειτουργίας του. Επιπλέον πραγματοποιείται διεξοδική αναφορά στα λογισμικά που υποστηρίζουν το εικονοσύστημα σε επίπεδο πεδίου και γραφείου και στις δυνατότητες που αυτά προσφέρουν στην αντιμετώπιση της αποτύπωσης.
- **Στο τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται η διαδικασία διακρίβωσης του οργάνου από τον κατασκευαστή ενώ πραγματοποιείται η εργαστηριακή βαθμονόμηση δύο ψηφιακών καμερών του εικονοσυστήματος V10 στα τριδιάστατα πεδία ελέγχου της ΣΑΤΜ για τον έλεγχο της μετρητικής τους ικανότητας.
- **Στο τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά οι γεωδαιτικές εφαρμογές που επιχειρήθηκαν με το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 και αφορούν στην αποτύπωση και τεκμηρίωση:
 - της όψης ενός κτιρίου
 - τμήματος ενός μνημείου
 - μιας κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμων.

Οι εν λόγω εργασίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα και με άλλες μεθόδους και εξοπλισμό για την σύγκριση των γεωμετρικών τους παραγώγων.

- **Στο πέμπτο κεφάλαιο** συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των εφαρμογών σε σχέση με το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 ενώ προτείνονται ζητήματα που χρήζουν περισσότερης διερεύνησης.

Το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι ιδιαίτερα φιλικό στο χρήστη προσφέροντας μια αναλογία ταχύτητας, σταθερότητας και ακρίβειας. Παράλληλα μπορεί να μειώσει αισθητά το χρόνο εργασιών πεδίου, αυξάνοντας όμως τις απαραίτητες στάσεις αναφοράς και το χρόνο εργασιών γραφείου.

Τα γεωμετρικά παράγωγα του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τηρώντας τις απαραίτητες προϋποθέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων και διαγραμμάτων οριζόντιων και κατακόρυφων τομών για μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:50. Δηλαδή η ακρίβεια που παρέχει στη μέτρηση γεωδαιτικών συντεταγμένων σε μία βελτιστοποιημένη διαδικασία είναι της τάξης του $\pm 1\text{cm}$.

Τέλος η σταθερότητα των γεωμετρικών δεδομένων του V10 δίνει τη δυνατότητα της στατιστικής τους επεξεργασίας. Έτσι από την προσαρμογή φωτογραμμετρικά μετρημένων σημείων σε περιφέρεια κύκλου προσδιορίστηκε ακτίνα ονομαστικής τιμής 11.5m με ακρίβεια της τάξης των $\pm 5\text{mm}$, σύμφωνα με τους απαραίτητους στατιστικούς ελέγχους.

Assessment of the Three-Dimensional Integrated Camera System V10 Imaging Rover

ABSTRACT

The object of this thesis is the assessment of the three-dimensional integrated camera system V10 imaging rover on the implementation of geodetic surveys. The exploration of this new technology and methodology is being conducted within the framework of scientific check and research.

This thesis aims to determine the general use of the system, the applications it is capable of accomplishing and its performance respectively. Furthermore, the V10 imaging rover is being contrasted with different methodologies and equipment. This thesis is summarized by the following five chapters:

- **The first chapter** refers to the needs and reasons for the development of geometric documentations to natural formations and technical structures. Alongside a short overview of the different collecting methods for the three-dimensional information are presented as well as a brief review of the evolution of photogrammetric and geodetic instrumentation.
- **The second chapter** presents analytically all the technical features of the V10 imaging rover and its operation principles. In addition, an in depth reference to both the field and office software of the system is reported, along with the capabilities they offer for the conduction of the survey.
- **The third chapter** describes the calibration process that is carried out by the manufacturer as long as the laboratory calibration process which was conducted for two of the 12 digital cameras of the V10 camera head. The experiment took place in an indoor and an external 3D calibration fields which are sighted in the school of rural and surveying engineering, for the justification of the camera's metering ability.

- **The fourth chapter** presents in detail all the geodetic applications that were carried out with the V10 imaging rover and involved in surveying and documenting:
 - a building facade
 - a part of a monument
 - a vertical cylindrical fuel storage tank.

These applications took place in parallel with different methods and equipment so as to compare their geometric derivatives and deliverables.

- **The fifth chapter** summarizes all the final conclusions and deductions of the overall use of the V10 imaging rover as well as some suggestions and proposals about issues that were considered to be in the need of further exploration.

Therefore the V10 imaging rover is particularly user-friendly and provides speed, stability and accuracy respectively. At the same time it is able to significantly reduce the time of field work although, there is an increase in the necessary reference stations and office work time.

The geometric derivatives of the V10 in compliance with its essential qualifications can be used to construct three-dimensional models and diagrams of horizontal and vertical sections with a maximum print scale of 1:50. The accuracy that is being provided for the measurements of geodetic coordinates in an optimized process is of the order of ± 1 cm.

Finally, the stability of the geometric data of V10 enables the statistical processing of it. So by adjusting measured points on a circumference with nominal radius value of 11.5m, according to the necessary statistical tests, the V10 was able to measure it with an uncertainty of only ± 5 mm.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής εξέλιξη των συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού και των επίγειων γεωδαιτικών σταθμών έχει διαμορφώσει ένα νέο πλαίσιο στις δραστηριότητες του τοπογράφου μηχανικού. Μερικές από αυτές άπτονται στη μελέτη δυναμικών φαινομένων όπως είναι η παρακολούθηση (monitoring) της κινηματικής συμπεριφοράς φυσικών σχηματισμών και τεχνικών έργων και η μέτρηση των παραμορφώσεων (deformation) τους κατά μέγεθος και διεύθυνση.

Ακόμη η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και ειδικότερα των γραφικών και σχεδιαστικών τους δυνατοτήτων αυξάνει συνεχώς τη ζήτηση για τριδιάστατη πληροφορία. Έτσι η ανάγκη για την κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων συνεχώς αυξάνεται όπως και οι απαιτήσεις σε θέματα ορθότητας, πληρότητας και ακρίβειας των γεωμετρικών και φωτορεαλιστικών παραγώγων. Οι εν λόγω εφαρμογές εκτείνονται σε ένα πλήθος από διαφορετικούς κλάδους όπως είναι οι κατασκευές, οι μεταφορές, η βιομηχανία αλλά και η προστασία και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Το έτος 2014 κυκλοφόρησε εμπορικά το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 της εταιρείας Trimble, το οποίο αποτελεί μια νέα τεχνολογία και μεθοδολογία αντιμετώπισης γεωδαιτικών αποτυπώσεων. Ο τρόπος λειτουργίας του στηρίζεται τόσο στην επιστήμη της γεωδαισίας όσο και σε αυτήν της φωτογραμμετρίας. Το σύστημα V10 προσφέρει μια αναλογία ταχύτητας και ακρίβειας στην μέτρηση αντικειμένων και την κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Στο πλαίσιο του επιστημονικού ελέγχου και ενδιαφέροντος διατυπώθηκε το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος V10 σε γεωδαιτικές εφαρμογές. Η διερεύνηση των δυνατοτήτων και επιδόσεων του οργάνου πραγματοποιείται από εξειδικευμένες τοπογραφικές αποτυπώσεις που ξεφεύγουν από το πλαίσιο των κλασικών δυσδιάστατων τοπογραφικών διαγραμμάτων μικρής κλίμακας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 Γενικά

Η γεωδαισία είναι η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο τον προσδιορισμό των διαστάσεων και του σχήματος της γης καθώς και του πεδίου βαρύτητάς της. Οι επιμέρους κλάδοι της περιλαμβάνουν ένα μεγάλο πλήθος από διαφορετικές εφαρμογές, οι οποίες πέραν του θεωρητικού τους υποβάθρου στηρίζονται σε μετρήσεις και υπολογισμούς, που ως επί τω πλείστον διεξάγονται από επίγεια γεωδαιτικά όργανα.

Η ακατάπαυστη εξέλιξη της τεχνολογίας των δύο τελευταίων δεκαετιών και πιο συγκεκριμένα των υπολογιστικών συστημάτων και των μεθοδολογιών και ακριβειών μέτρησης έχει διευρύνει το εύρος και την ανάπτυξη των γεωδαιτικών εφαρμογών και αποτυπώσεων. Οι εφαρμογές αυτές έχουν ως κύριο στόχο τον προσδιορισμό της θέσης και του σχήματος αντικειμένων ή τμημάτων της φυσικής γήινης επιφάνειας για τη σύνταξη γεωμετρικών παραγώγων.

Ένα μέρος των γεωδαιτικών αποτυπώσεων αποτελεί η γεωμετρική τεκμηρίωση τεχνητών και φυσικών κατασκευών η οποία ανήκει στον επιστημονικό χώρο της εφαρμοσμένης και τεχνικής γεωδαισίας.

Με τον όρο **“γεωμετρική τεκμηρίωση”** νοείται η καταγραφή της θέσης, του σχήματος, της μορφής και του μεγέθους της κατασκευής για μία δεδομένη χρονική στιγμή, στο χώρο των τριών διαστάσεων [Πανταζής Γ., 2005].

Οι λόγοι της γεωμετρικής τεκμηρίωσης ποικίλουν ανάλογα με τη φύση του προς αποτύπωση αντικειμένου και τους τελικούς χρήστες ή μελετητές. Έτσι είτε πρόκειται για ένα φυσικό σχηματισμό είτε για ένα ανθρώπινο τεχνικό έργο ο σκοπός της τεκμηρίωσης μπορεί να σχετίζεται με την πρόληψη, τον εντοπισμό αστοχιών ή αποκλίσεων ή φθορών, τον προσδιορισμό παραμορφώσεων ή μετακινήσεων, την υλοποίηση σχεδίων του αντικειμένου ως κατασκευασθέν, την προστασία και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς κ.α [Λάμπρου, Πανταζής 2010].

Η γεωμετρική τεκμηρίωση αποτελεί ένα διεπιστημονικό εργαλείο και υπόβαθρο για τη διεξαγωγή μελετών ευρύτερων και διαφορετικών ειδικοτήτων. Παράλληλα συντελεί στην ανάλυση φαινομένων, στην εκτίμηση καταστάσεων και κινδύνων ενώ πλαισιώνει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Ειδικότερα σήμερα που ο δυτικός πολιτισμός έχει αποδεχθεί και προάγει τους όρους της βιώσιμης ανάπτυξης, λόγω της κλιματικής αλλαγής και των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η κατασκευή νέων μεγάλων τεχνικών έργων θα αποκλιμακώνεται. Ταυτόχρονα η συντήρηση, επιθεώρηση, παρακολούθηση και τεκμηρίωση των ήδη υφιστάμενων κατασκευών, μελλοντικά θα αυξάνεται δίνοντας πρωταγωνιστικό ρόλο στον τοπογράφο μηχανικό σε κατασκευαστικό και μελετητικό επίπεδο.

1.2 Μέθοδοι Συλλογής Τριδιάστατης Πληροφορίας

Οι προδιαγραφές της γεωμετρικής τεκμηρίωσης καθορίζουν τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό και τις ακολουθούμενες μεθοδολογίες οι οποίες περιγράφονται σε ένα γενικό πλαίσιο στο παρόν υποκεφάλαιο. Όπως όλες οι τοπογραφικές αποτυπώσεις έτσι και η γεωμετρική τεκμηρίωση ακολουθεί τα εξής τρία ευρύτερα στάδια [Λάμπρου, Πανταζής, 2010]:

- Εργασίες πεδίου (γεωδαιτικές μετρήσεις, φωτογραφικές λήψεις, σαρώσεις κ.α.),
- Εργασίες γραφείου (επιλύσεις, συνορθώσεις, υπολογισμοί, στατιστικοί έλεγχοι, απόδοση)
- Έλεγχος των γεωμετρικών παραγώγων (επιπλέον γεωδαιτικές μετρήσεις, τοπομετρήσεις).

Η ακρίβεια και η ορθότητα της γεωμετρικής τεκμηρίωσης επηρεάζεται από την αντίστοιχη αβεβαιότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας. Στις περισσότερες εφαρμογές γεωμετρικής τεκμηρίωσης οι κλίμακες που επιδιώκονται είναι ιδιαίτερα μεγάλες (για παράδειγμα 1:50) ορίζοντας υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας σε ενιαίο βαθμό.

Αυτό που αξίζει να επισημανθεί είναι ότι παρά τις διαφορετικές μεθόδους συλλογής τριδιάστατης πληροφορίας το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς την πληρότητα και την ορθότητα της γεωμετρικής τεκμηρίωσης αλλά και ως προς το ισοζύγιο χρόνου και κόστους δίνεται από συνδυασμούς μεθοδολογιών.

1.2.1 Τοπομετρική Μέθοδος

Η τοπομετρική μέθοδος βασίζεται σε απλές μετρητικές διατάξεις όπως η τυπική μετροταινία, το αλφαδολάστιχο, το κλισιόμετρο, η πυξίδα, το νήμα της στάθμης και τα τελευταία χρόνια το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ευρέως διαδεδομένη στους αρχιτέκτονες για την κατασκευή σχεδίων και διαγραμμάτων από τοπομετρήσεις αποστάσεων, διαγωνίων, κλίσεων και υψομετρικών διαφορών [Τοκμακίδης, 2004].

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος αλλά και το γεγονός ότι αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τον έλεγχο διαγραμμάτων.

Τα μειονεκτήματα της είναι ότι κάθε σημείο χρειάζεται να είναι προσβάσιμο, ενώ οι μετρήσεις είναι σημειακές και ασυσχέτιστες αφού δεν υλοποιούνται σε κοινό σύστημα αναφοράς.

1.2.2 Γεωδαιτική Μέθοδος

Η γεωδαιτική μέθοδος συναντάται στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία και ως τοπογραφική ή κλασσική μέθοδος τεκμηρίωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε επίγειες μετρήσεις ψηφιακών και αναλογικών γεωδαιτικών οργάνων όπως δέκτες GNSS, θεοδόλιχα, χωροβάτες και ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί.

Τα τελικά παράγωγα αφορούν σε διαγράμματα οριζόντιων και κατακόρυφων τομών ή την κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων. Οι προδιαγραφές της γεωδαιτικής τεκμηρίωσης, πέραν από το κόστος και το χρόνο, ορίζεται από την μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης των διαγραμμάτων η οποία ορίζει και την αβεβαιότητα προσδιορισμού των σημείων λεπτομέρειας [Πανταζής Γ., 2005].

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας καθορίζει τις επιλογές: του χρησιμοποιούμενου γεωδαιτικού εξοπλισμού (ακρίβεια μέτρησης), τις μεθόδους πύκνωσης των στάσεων αναφοράς (πολυγωνομετρία, τριγωνισμός) και τη διαδικασία μέτρησης των σημείων λεπτομέρειας (πολικές συντεταγμένες, εμπροσθοτομία).

Τα πλεονεκτήματα της γεωδαιτικής διαδικασίας είναι η υψηλή ακρίβεια που επιτυγχάνεται στο προσδιορισμό των σημείων χωρίς αυτά να είναι απαραίτητα προσιτά, το ενιαίο σύστημα αναφοράς, ο συσχετισμός των μετρήσεων και ο στατιστικός τους έλεγχος για τον υπολογισμό συστηματικών σφαλμάτων και χρονοδοειδών λαθών.

Αντίστοιχα τα μειονεκτήματά της οφείλονται στην απαιτητική οργάνωση των εργασιών πεδίου στις οποίες απαιτείται αυξημένος χρόνος και κόπος, που σε συνδυασμό με τον ακριβό γεωδαιτικό εξοπλισμό αυξάνουν το κόστος της τεκμηρίωσης. Επιπλέον η συγκεκριμένη μέθοδος κρίνεται ασύμφορη όταν το προς αποτύπωση αντικείμενο έχει αυξημένο βαθμό λεπτομερειών (λιθοδομές, ψηφιδωτά, γλυπτά) ή ακόμη και ακατάλληλη (τοιχογραφίες, λιθογραφίες) για αντικείμενα που δεν μπορούν να σχεδιασθούν από διακριτά σημεία [Πατιάς Π., 2008].

1.2.3 Φωτογραμμετρική Μέθοδος

Οι γεωμετρική τεκμηρίωση με φωτογραμμετρικές μεθόδους βασίζεται σε λήψεις φωτογραφιών κυρίως από επίγειες μετρητικές και μη μετρητικές μηχανές αλλά και από εναέριες λήψεις με μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή ακόμη και το συνδυασμό τους. Στις δύο αυτές περιπτώσεις το κοινό χαρακτηριστικό είναι ότι η μέση κλίμακα των εικόνων είναι μεγάλη (για παράδειγμα 1:200) άρα και η απόσταση λήψης είναι μικρή.

Τα παράγωγα των φωτογραμμετρικών μεθόδων ποικίλουν δηλαδή μπορεί να είναι είτε διανυσματικά σχέδια (φωτογραμμετρική απόδοση) από τη μέτρηση σημείων ή ακόμη νέφη σημείων από αλγορίθμους πυκνής ψηφιακής συνταύτισης είτε εικονιστικά προϊόντα όπως ανηγμένες εικόνες, μωσαϊκά, ορθοφωτογραφίες, αναπτύγματα επιφανειών είτε τριδιάστατα μοντέλα με φωτορεαλιστική υφή.

Τα πλεονεκτήματα της φωτογραμμετρικής μεθόδου είναι η επίτευξη ενιαίας ακρίβειας που βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την πληρότητα

του σχεδίου. Αυτό οφείλεται στη συνέχεια των αντικειμένων και την αποφυγή της διακριτοποίησης τους, τόσο στα εικονιστικά προϊόντα όσο και στις διεικονικές αποδόσεις [Πατιάς Π., 2008]. Η εισαγωγή υφής στα μοντέλα είναι ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου.

Τα πρωτογενή δεδομένα της φωτογραμμετρίας, δηλαδή οι λήψεις, από μόνες τους αποτελούν μια οπτική τεκμηρίωση του αντικειμένου στο χρόνο. Επιπλέον η αποτύπωση είναι έμμεση δηλαδή το αντικείμενο μπορεί να είναι δυσπρόσιτο ή απρόσιτο. Ειδικότερα όταν το αντικείμενο είναι πολύπλοκο η τεκμηρίωση του από εικονιστικά προϊόντα μειώνει ιδιαίτερα το κόστος της διαδικασίας της τεκμηρίωσης γιατί ελαχιστοποιεί την εργασία στο πεδίο.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι στηρίζεται σε μετρήσεις από άλλες διαδικασίες όπως γεωδαιτικές μετρήσεις για την μέτρηση φωτοσταθερών σημείων, δεδομένα σάρωσης για την παραγωγή ορθοεικόνων ή τοπομετρικές μετρήσεις αποστάσεων για την εισαγωγή κλίμακας σε τριδιάστατα μοντέλα που παράγονται μόνο από εικόνες. Επίσης η μέθοδος χρειάζεται αυξημένη υπολογιστική ισχύ.

1.2.4 Επίγειοι Σαρωτές Επιφανειών

Οι σαρώσεις επιφανειών από σαρωτές επαφής (τύπου γέφυρας, ρομποτικοί βραχίονες) και laser χειρός προορίζονται για μεγάλης κλίμακας (τάξη μεγέθους μm) προτυποποιήσεις μηχανολογικών μερών συναρμολογημάτων και εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής. Αντίστοιχα οι σαρωτές μη επαφής με ενεργητικές μεθόδους όπως η συμβολομετρία (lidar, sar) αναφέρονται σε μικρής κλίμακας γεωεφαρμογές (ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων κ.α.) από εναέρια μέσα.

Οι σαρώσεις για επίγειες τοπογραφικές εφαρμογές όπως οι γεωμετρικές τεκμηριώσεις γίνονται τόσο με παθητικές μεθόδους από εικόνες που εμπίπτουν στον επιστημονικό χώρο της φωτογραμμετρίας (π.χ. dense matching, σαρωτές δομημένου φωτός¹) όσο και με ενεργητικές μεθόδους laser που απασχολεί το παρόν εδάφιο. Τα όργανα ενεργητικής απεικόνισης (εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) λοιπόν, δηλαδή οι επίγειοι σαρωτές επιφανειών (terrestrial laser scanners),

¹ Οι σαρωτές δομημένου φωτός κατατάσσονται στις ενεργητικές μεθόδους όμως αντιμετωπίζονται φωτογραμμετρικά.

ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες [Συμεωνίδης Π., 2007]:

- Χρόνος πτήσης παλμού ή κύματος (time of flight),
- Διαφορά φάσης (phase shift),
- Τριγωνισμός (triangulation).

Οι επίγειοι σαρωτές επιφανειών τοποθετούνται σε στάσεις αναφοράς και σε σχέση με το γωνιακό τους βήμα μετρούν δεκάδες χιλιάδες έως εκατομμύρια σημείων λεπτομέρειας. Οι τελικές τους μετρήσεις αφορούν στις τριδιάστατες συντεταγμένες (x, y, z) του κάθε σημείου μαζί με μία τιμή i που αντιστοιχεί στην ένταση του ανακλώμενου σήματος ή του χρώματος. Σε μία εφαρμογή επίγειας σάρωσης η τοποθέτηση τεχνητών ανακλαστικών στόχων κρίνεται απαραίτητη για τη σύνδεση των διαφορετικών νεφών και τον προσανατολισμό τους στο χώρο.

Η διαδικασία της σάρωσης ως εργασία γραφείου συνεχίζεται και ολοκληρώνεται με τη συρραφή των διαφορετικών νεφών, τη συνένωσή τους (ή καλύτερα την πλεγματοποίηση τους) και την τελική μοντελοποίηση. Βέβαια σε ενδιάμεσα στάδια αφαιρείται η περιττή πληροφορία, διορθώνονται λάθος συνενώσεις ενώ οι επιφάνειες εξομαλύνονται [Χ. Ιωαννίδης, 2014]

Τα πλεονεκτήματα των επίγειων σαρωτών αφορούν στην ταχύτητα με την οποία έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν ένα τεράστιο όγκο δεδομένων στο πεδίο με έμμεσο τρόπο, ειδικά για περιπτώσεις πολύπλοκων και ακανόνιστων σχημάτων. Επιπλέον η πληροφορία τους δεν είναι μόνο χωρική αλλά και χρωματική. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων από τους επίγειους σαρωτές είναι ιδιαίτερα υψηλή ($>\pm 10\text{mm}$) αλλά για μικρές αποστάσεις σάρωσης [Pantazis G. et al, 2013]..

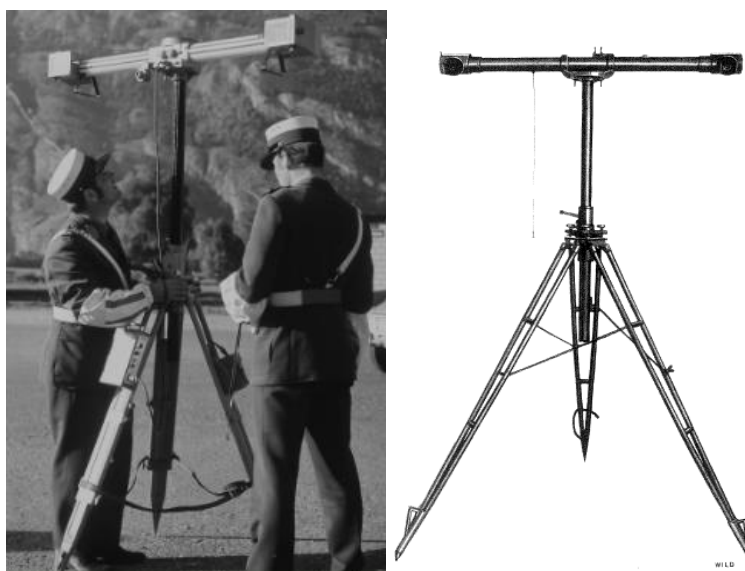
Τα μειονεκτήματα της μεθόδου οφείλονται καταρχάς στην μεγάλη υπολογιστική ισχύ που είναι απαραίτητη για το όγκο των δεδομένων της σάρωσης. Επίσης το κόστος των επίγειων σαρωτών είναι ιδιαίτερα υψηλό ενώ το μεγάλο βάρος τους δυσχεραίνει τη χρήση τους στο πεδίο σε συνδυασμό με τη χρήση H/Y που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητη. Τέλος δεν είναι δυνατή η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η εξέλιξη των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών με τη δημιουργία ρομποτικών χωροεικονογεωδαιτικών σταθμών (2005) έδωσε τη δυνατότητα σαρώσεων από τα νέα αυτά όργανα. Εν συντομία οι σαρώσεις που πραγματοποιούν σε σχέση με τους επίγειους σαρωτές είναι καλύτερης ακρίβειας ($>\pm 5\text{mm}$), μικρότερες σε όγκο δεδομένα και σε μεγαλύτερο χρόνο, όμως τα νέφη είναι a-priori σε κοινό σύστημα αναφοράς και ως εκ τούτου δε χρειάζεται η συρραφή τους (aligning) [Pantazis G. et al, 2013].

1.3 Εξέλιξη των Επίγειων Φωτομηχανών και των Ολοκληρωμένων Γεωδαιτικών Σταθμών

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη των επίγειων γεωδαιτικών σταθμών και φωτογραμμετρικών οργάνων η οποία οδήγησε στη δημιουργία του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10.

Μια αρχική τομή στην τεχνολογία των επίγειων μετρητικών φωτομηχανών ήταν οι στερεοκάμερες κυρίως από τις εταιρείες Wild και Zeis όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1 Στερεοκάμερα C120 και C12 της εταιρείας Wild με έτη κυκλοφορίας 1968 και 1933 αντίστοιχα. [<http://www.wild-herbrugg.com/photogrammetry1.htm>, 9/20115]

Οι συγκεκριμένες κατασκευές καθόριζαν μια σταθερή και γνωστή διάταξη των φωτομηχανών (κανονική), δηλαδή η βάση λήψης και ο

προσανατολισμός τους ήταν υπολογισμένος με μεγάλη ακρίβεια [Kraus K., 2010].

Οι στερεοκάμερες όμως δημιουργούσαν προβλήματα καθώς μείωναν τις επιλογές του λόγου της βάσης λήψης προς την απόσταση αντικειμένου, η οποία είναι καθοριστική στη φωτογραμμετρία, λόγω του περιορισμού της καθορισμένης τους διάταξης.

Τη λύση έδωσαν τα φωτοθεοδόλιχα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2. Τα συγκεκριμένα όργανα είχαν τη δυνατότητα κέντρωσης και οριζοντίωσης ενώ ταυτόχρονα μετρούσαν τον προσανατολισμό του άξονα λήψης σε σχέση με το πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα τους [Kraus K., 2010].



Εικόνα 1.2 Φωτοθεοδόλιχο P31 της εταιρείας Wild με έτος κυκλοφορίας 1972. [<http://www.wild-heerbrugg.com/photogrammetry1.htm>, 9/2015]

Σήμερα η επιτομή της τεχνολογίας των επίγειων μετρητικών μηχανών βρίσκεται στα πανοραμικά συστήματα καμερών υψηλής ανάλυσης, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 1.3. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες CCD προορίζονται κυρίως για τη δημιουργία φωτορεαλιστικά τριδιάστατων χαρτογραφικών απεικονίσεων, όπως είναι η εφαρμογή street view στο χαρτογραφικό υπόβαθρο της Google.

Οι λήψεις τους αφορούν τόσο σε μεμονωμένες φωτογραφίες όσο και σε βιντεοσκοπήσεις από όχημα. Στο όχημα είναι εγκατεστημένοι αισθητήρες κλίσεων όπως και δέκτες GNSS για τη δορυφορική

πλοήγηση και καταγραφή της θέσης τους οχήματος στο χρόνο, άρα και της κάμερας, μέσω αδρανειακών συστημάτων GPS/INS.



*Εικόνα 1.3 Η πανοραμική μηχανή Ladybug 5 της εταιρεία Topcon, μόνη της και σε επανδρωμένο όχημα τριδιάστατης χαρτογράφησης.
[<http://www.directionsmag.in/articles/georeferenced-street-view-what-it-is-and-how-to-create-one/362196>, 9/2015]*

Όσον αφορά στους γεωδαιτικούς σταθμούς, τη δεκαετία του 1950 κάνουν την εμφάνιση τους τα πρώτα ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μήκους (EDM). Με το πέρασμα του χρόνου τα κοινά θεοδόλιχα αντικαθίστανται από τους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς (total station) όπου πλέον η ανάγνωση και καταγραφή των μετρήσεων γίνεται ψηφιακά. Στις αρχές του 1990 κατασκευάζεται το πρώτο όργανο που έχει τη δυνατότητα να μετρά μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα [Λάμπρου, Πανταζής, 2010].

Η επαναστατική αυτή εφαρμογή ενσωματώνεται εμπορικά στους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς στις αρχές του 21^{ου} αιώνα ανοίγοντας νέους ορίζοντες στις γεωδαιτικές εφαρμογές. Έτσι σήμερα με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί έχουν γίνει "έξυπνοι", ρομποτικοί, σερβοκινούμενοι κ.α. διαθέτοντας ένα πλήθος εφαρμογών που διευκολύνουν, επιταχύνουν και αναπτύσσουν τις εργασίες υπαίθρου.

Η τελευταία εξέλιξη αφορά στους ρομποτικούς εικονοσταθμούς και στους χωροεικονογεωδαιτικούς σταθμούς, εικόνα 1.4. Μερικές από τις εφαρμογές των οργάνων αυτών αφορούν σε σερβοκίνηση, σε αυτόματη ανίχνευση και παρακολούθηση στόχου, σε τηλεχειρισμό τους και

σκόπευση σημείων από απόσταση, στη λήψη μετρητικών εικόνων από ενσωματωμένους αισθητήρες CCD, στη σάρωση επιφανειών με επιλογή γωνιακού βήματος κ.α.



*Εικόνα 1.4 Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX της εταιρείας Trimble.
[www.trimble.com]*

1.4 Αντικείμενο της Εργασίας

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.5, είναι ένα πρωτοποριακό όργανο για τη διεξαγωγή και την αντιμετώπιση τοπογραφικών αποτυπώσεων. Το σύστημα συνδυάζει τόσο δεδομένα θέσης όσο και μετρητικές εικόνες για την εξαγωγή των γεωμετρικών παραγώγων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση του εικονοσυστήματος V10 στο πλαίσιο του επιστημονικού ελέγχου. Η αξιολόγηση του πραγματοποιείται μέσω εργασιών περιορισμένου πεδίου και εφαρμογές τεχνικής γεωδαισίας όπως ακόμα και με την μετρολογική διακρίβωση των καμερών του.



Εικόνα 1.5 Το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 με επιβατηγό δέκτη GNSS. [<http://www.trimble.com/Survey/Trimble-V10-Imaging-Rover.aspx>, 9/2015]

Η διερεύνηση που υλοποιείται σε σχέση με την νέα αυτή τεχνολογία έχει ως στόχο αρχικά την κατανόηση των αρχών λειτουργίας της και τους τρόπους συλλογής και επεξεργασίας της μετρητικής πληροφορίας.

Στη συνέχεια ελέγχονται οι δυνατότητες και επιδόσεις του συστήματος σε θέματα χρήσης του, ακρίβειας των γεωμετρικών παραγώγων και αποδοτικότητας ως προς το ισοζύγιο κόστους και χρόνου. Τα συμπεράσματα εξάγονται από τη διεξαγωγή εξειδικευμένων τοπογραφικών εργασιών με διαφορετικές μεθοδολογίες και εξοπλισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΕΙΚΟΝΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ V10

2.1 Γενικά

Το “V10 Imaging Rover” της εταιρείας Trimble συμβατικά στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα αναφέρεται ως εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10. Το εν λόγω σύστημα παρουσιάστηκε πρώτη φορά στο συνέδριο INTERGEO στο Έσσεν της Γερμανίας τον Οκτώβριο του 2013 και κυκλοφόρησε εμπορικά στις αρχές του 2014.

Το V10 είναι ένα ολοκληρωμένο εικονοσύστημα δώδεκα ψηφιακών καμερών το οποίο συλλέγει πανοραμικές φωτογραφίες 360° μοιρών από τη θέση που τοποθετείται. Οι λήψεις των πανοραμάτων αυτών αποσκοπούν στην οπτική τεκμηρίωση και μέτρηση του περιβάλλοντα χώρου που επιλέγει ο χρήστης (Trimble V10 Datasheet).

Η τεχνολογία του συστήματος κινείται στους επιστημονικούς χώρους της γεωδαισίας, της φωτογραμμετρίας και της όρασης υπολογιστών.

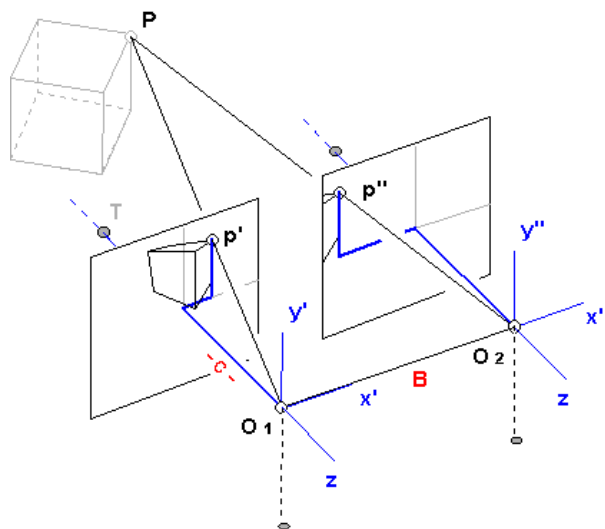
Η πρωτοπορία του έγκειται στη ταχύτητα με την οποία δύναται να συλλέγει τα δεδομένα στο πεδίο καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζει το σχεδιασμό και την επίλυση της φωτογραμμετρικής διαδικασίας και εν τέλει της αποτύπωσης.

2.2 Αρχή Λειτουργίας του Συστήματος V10

Η αρχή λειτουργίας του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι η γνωστή φωτογραμμετρική τομή η οποία πραγματοποιείται απλούστατα με την εμπροσθοτομία στο χώρο τουλάχιστον δύο ομόλογων ακτίνων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Δηλαδή, για την εξαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων ενός σημείου λεπτομέρειας, του προς αποτύπωση χώρου ή αντικειμένου, είναι απαραίτητο αυτό να παρατηρείται από τουλάχιστον δύο εικόνες/πανοράματα. Καθώς όπως είναι γνωστό κάθε φωτογραφική

μηχανή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα όργανο που καταγράφει διευθύνσεις [Γεωργόπουλος κ.α., 2010].



Σχήμα 2.1 Εμπροσθοτομία στο χώρο από ζεύγος εικόνων σε κανονική διάταξη. [<http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/3/3.html> (4/2015)]

Οι εικόνες που συνθέτουν τα πανοράματα αποτελούν κεντρικές προβολές στις δύο διαστάσεις του τριδιάστατου χώρου. Για την εξαγωγή λοιπόν, της τριδιάστατης μετρητικής πληροφορίας από τουλάχιστον δύο εικόνες προϋποτίθεται να είναι γνωστά τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού τους.

Τα στοιχεία του **εσωτερικού προσανατολισμού** των ψηφιακών καμερών του συστήματος, δηλαδή της σταθεράς c , της θέσης του πρωτεύοντος σημείου (x_0, y_0) , της χαρακτηριστικής καμπύλης ακτινικής διαστρόφης του φακού (Δr) και της αφινικότητας (γεωμετρική αλλοίωση του εικονοστοιχείου) θεωρούνται γνωστά από τον κατασκευαστή και εμπεριέχονται στο λογισμικό υποστήριξης [Γεωργόπουλος Α. κ.α., 2010].

Στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών με εργαστηριακή διαδικασία, για τον καθορισμό του μοντέλου εκείνου της κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα την εσωτερική γεωμετρία των συγκεκριμένων ψηφιακών καμερών, τον έλεγχο της σταθερότητας τους και της σύγκρισής τους με αυτά του κατασκευαστή.

Όσον αφορά τα στοιχεία του **εξωτερικού προσανατολισμού**, δηλαδή τις γεωδαιτικές συντεταγμένες (X_0, Y_0, Z_0) του προβολικού κέντρου και τις στροφές του άξονα λήψης (ω, ϕ, κ) σε σχέση με το σύστημα αναφοράς,

αρχικά αξίζει να τονιστεί ότι αντιμετωπίζονται ενιαία για κάθε σημείο λήψης.

Μολονότι οι παράμετροι αυτοί για την κάθε θέση λήψης είναι 6 για κάθε μία από τις 12 φωτογραφίες (72 παράμετροι εξωτερικού προσανατολισμού ανά πανόραμα), η γνωστή σχετική θέση των καμερών του συστήματος επιτρέπει είτε να μετριοούνται είτε να επιλύονται ενιαία. Με τη γνώση λοιπόν, 6 παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού μίας εικόνας, στην πραγματικότητα υπολογίζονται 72 παράμετροι. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα των πανοραμάτων να συνθέτονται αυτόματα χωρίς την εμπλοκή του χρήστη.

Στη συνέχεια ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής και τον τρόπο αντιμετώπισης που επιλέγεται, το εικονοσύστημα V10 σε συνδυασμό με το λογισμικό υποστήριξής του, προσφέρει διάφορους τρόπους για τον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού και κατά συνέπεια της επίλυσης του φωτογραμμετρικού τριγωνισμού. Επειδή οι προσεγγίσεις της διαδικασίας ποικίλουν και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο, στο παρόν εδάφιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στη συνηθέστερη διαδικασία που αποτελεί και την πρωτοτυπία λειτουργίας του συστήματος.

Σε αυτήν το εικονοσύστημα V10 καλείται να συλλέξει πανοράματα αφού τοποθετείται σε σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες τους είτε έχουν υπολογιστεί σε προγενέστερη διαδικασία μετρήσεων είτε μετριοούνται σε πραγματικό χρόνο παράλληλα με τις λήψεις.

Στη δεύτερη περίπτωση είναι απαραίτητη η χρήση και άλλων οργάνων που λειτουργούν σε σύζευξη με το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 και αφορούν είτε ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό με επιβατηγό πρίσμα στο στυλεό του V10 εικόνα 2.1, είτε επιβατηγό δέκτη GNSS στο στυλεό του V10 εικόνα 2.2.

Οι συντεταγμένες των στάσεων, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μετριοούνται με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων (περίπτωση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού) ή με κινηματικό δορυφορικό εντοπισμό πραγματικού χρόνου (περίπτωση δέκτη GNSS), οδηγούν στον υπολογισμό των συντεταγμένων του προβολικού κέντρου. Ταυτόχρονα δύο αισθητήρες κλίσεων μετρούν την απόκλιση της κατακορύφωσης του

V10 σε δύο κάθετους άξονες και μία μαγνητική πυξίδα συμπληρώνει τον προσανατολισμό τόσο των αξόνων των αισθητήρων κλίσεων όσο και των ιδίων των πανοραμάτων.



Εικόνα 2.1 Το σύστημα V10 σε σύζευξη με το χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX σε λειτουργία autolock. [trimble v10 imaging rover user applications brochure]



Εικόνα 2.2 Το σύστημα V10 σε σύζευξη με τον επιβατηγό δέκτη GNSS R10. [trimble v10 imaging rover user applications brochure]

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διόρθωση των συντεταγμένων του προβολικού κέντρου στην πραγματική τους θέση αλλά και ο υπολογισμός προσωρινών τιμών για τις τρεις στρόφες (ω , φ , κ) των αξόνων λήψης, που γίνεται από τους αισθητήρες μέτρησης κλίσεων. Οι τελικές τιμές τους υπολογίζονται κατά την επίλυση του τριγωνισμού.

Η διαδικασία που περιγράφηκε πραγματοποιείται ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση εμπροσθοτομιών στο χώρο για τον υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας.

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να επισημανθεί πως η διαδικασία αποδεσμεύεται από την ύπαρξη σημείων γνωστών συντεταγμένων πάνω στο αντικείμενο (φωτοσταθερών) καθώς ο ρόλος τους αντικαθίσταται από τα γνωστά σημεία λήψης.

Τέλος ένα συνηθισμένο πρόβλημα της φωτογραμμετρίας που αφορά στην εξεύρεση προσωρινών τιμών για τους αγνώστους του τριγωνισμού, αποκαθίσταται από τις πρωτογενείς μετρήσεις των αισθητήρων του εικονοσυστήματος.

Έτσι, ενώ η αρχή λειτουργίας του συστήματος V10 είναι φαινομενικά η απλή εμπροσθοτομία, η πορεία που ακολουθείται για την επίτευξή της συνδυάζει ένα πλήθος διαφορετικών και σύγχρονων τεχνολογιών οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Παρατηρείται λοιπόν, πως η λειτουργικότητα του V10 είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη της τεχνολογίας στο διεπιστημονικό κλάδο της γεωπληροφορικής.

Τέλος κάποια παραδείγματα που παρουσιάζουν ομοιότητες στην αρχή λειτουργίας τους με αυτή του V10 όπως είναι οι πρόσθετες μετρήσεις των προβολικών κέντρων σε αδρανειακό σύστημα GPS/INS κατά την πτήση αεροφωτογραφήσεων, διατεταγμένα συστήματα τοποθέτησης ψηφιακών καμερών για την δέσμευση σταθερής βάσης λήψης (zscan, Zeiss SMK40), κινητά συστήματα τριδιάστατης χαρτογράφησης με πανοραμική βιντεοσκόπηση και δορυφορική πλοήγηση.

2.3 Προϋποθέσεις Ορθής Λειτουργίας και Ακρίβεια

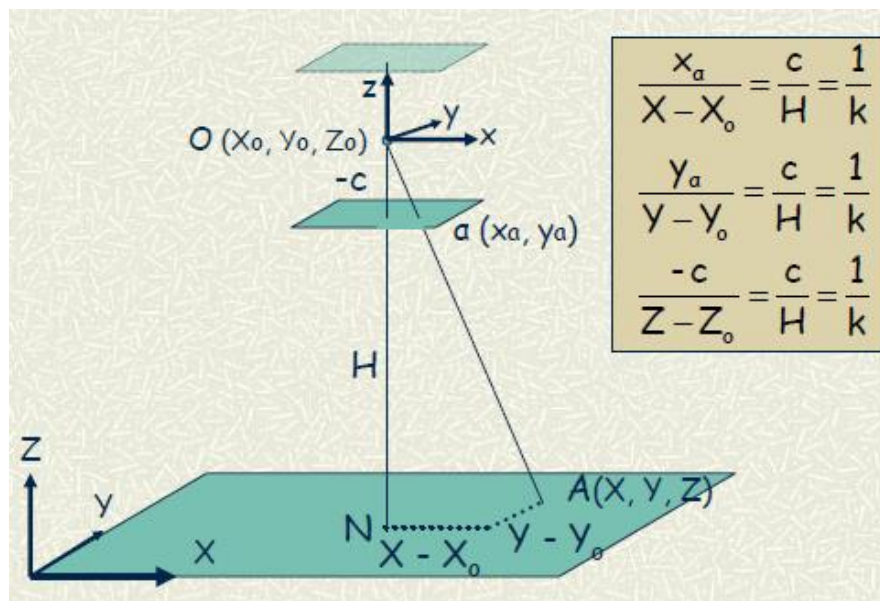
Η αξιοπιστία και η ποιότητα της μετρητικής πληροφορίας που εξάγεται από τις εικόνες των πανοραμάτων, θέτει μια σειρά από όρους και προϋποθέσεις για την επίτευξη του επιθυμητού και ορθού

αποτελέσματος. Βέβαια αξίζει να τονιστεί ότι σε αντίθεση από τον κλασικό σχεδιασμό μιας επίγειας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης, το σύστημα V10 απαλλάσσει το μελετητή από την εξέταση και επιλογή μίας σειράς παραμέτρων.

Οι παράμετροι αυτοί αφορούν στα μαθηματικά μοντέλα και στους αλγορίθμους επίλυσης, στα τεχνικά χαρακτηριστικά των καμερών, στη διαδικασία βαθμονόμησης τους και στον έλεγχο των οπτικών παραμέτρων.

Στόχος του V10 είναι να αποτελεί μια ολοκληρωμένη, εμπορική λύση για τον επαγγελματία, οπότε οι παράμετροι αυτοί του παρέχονται είτε καθορισμένοι είτε επιλυμένοι από τον κατασκευαστή.

Η πρώτη παράμετρος που καθορίζει την ακρίβεια της αποτύπωσης είναι η κλίμακα των εικόνων ή ακριβέστερα η μέση κλίμακα των εικόνων.



Σχήμα 2.2 Γεωμετρικές σχέσεις εικόνας αντικειμένου κανονικής διάταξης.
[Γεωργόπουλος Α.]

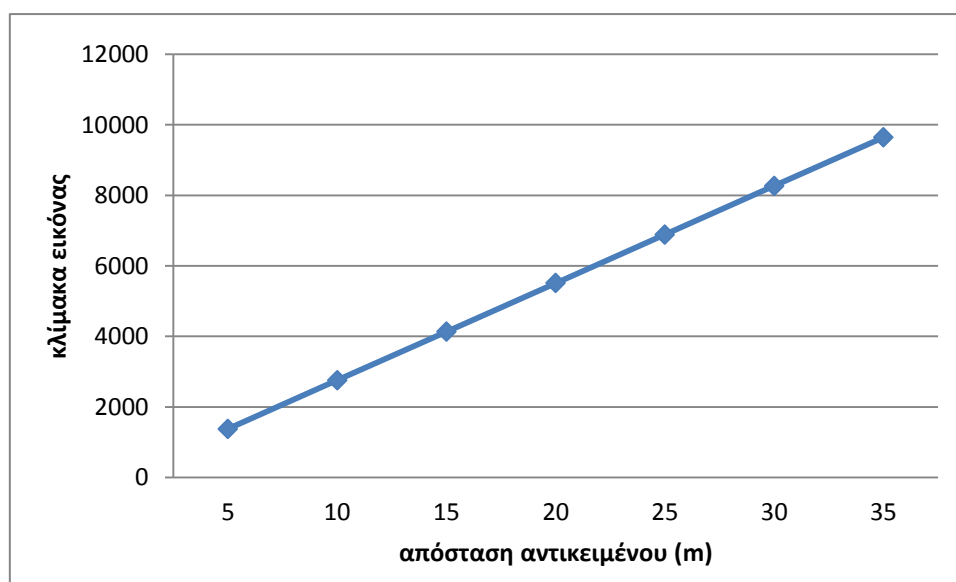
Στις επίγειες εφαρμογές η κλίμακα διαμορφώνεται από την απόσταση του αντικειμένου και τη σταθερά c της μηχανής. Θεωρώντας μια αυστηρά κατακόρυφη λήψη (στη βιβλιογραφία συναντάται ως κανονική διάταξη), όπου το σύστημα εικονοσυντεταγμένων είναι παράλληλο με το γεωδαιτικό και άρα ο πίνακας στροφής είναι μοναδιαίος, εξάγονται οι παραπάνω γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ εικόνας και αντικειμένου από τη

συνθήκη συγγραμμικότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 [Kraus K., 2010].

Όπου με μικρά γράμματα συμβολίζονται οι εικονοσυνεταγμένες, με κεφαλαία οι γεωδαιτικές συντεταγμένες, c η σταθερά της μηχανής, H απόσταση του αντικειμένου και $1/k$ η κλίμακα.

Αντιλαμβάνεται κανείς ότι όσο η απόσταση από το αντικείμενο μειώνεται η κλίμακα αυξάνεται. Αντίστοιχα όμως μειώνεται η περιοχή κάλυψης και αυξάνεται η ακρίβεια των μετρήσεων.

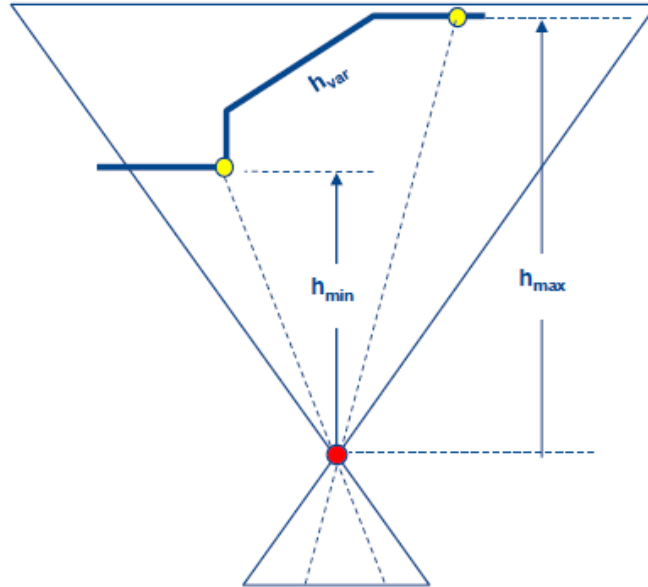
Δεδομένου ότι το V10 έχει καθορισμένη σταθερά $c=3.63\text{mm}$ υπολογίζονται οι αντίστοιχες κλίμακες των εικόνων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου όπως παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.1.



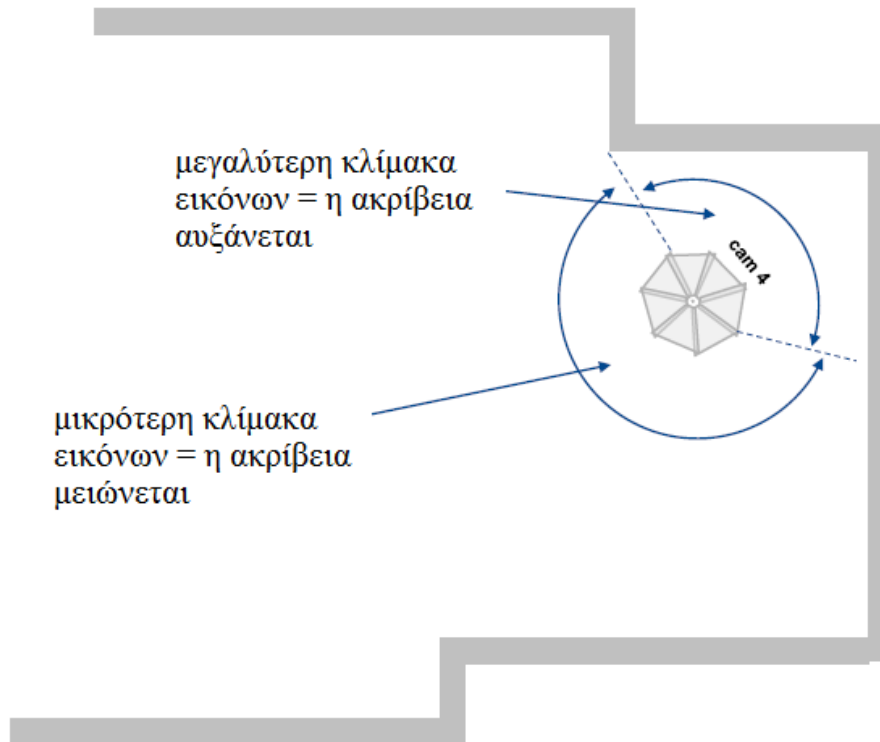
Διάγραμμα 2.1 Κλίμακα των εικόνων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου για το V10.

Στη πράξη βέβαια τα δύο συστήματα αναφοράς δεν είναι ποτέ ακριβώς παράλληλα και τα αντικείμενα δεν είναι επίπεδα αλλά έχουν ανάγλυφο. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι εικόνες δεν έχουν ενιαία κλίμακα αλλά σημειακή, λόγω των εκτροπών που δημιουργεί το ανάγλυφο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 [Πέτσα, 2000].

Αντίστοιχα οι εικόνες που συνθέτουν τα πανοράματα έχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην κλίμακα λόγω του διαφορετικού τους προσανατολισμού όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.3 Διαφοροποιήσεις στη σημειακή κλίμακα της εικόνας από εκτροπές λόγω αναγλύφου. [V10 technical overview]



Σχήμα 2.4 Διαφοροποιήσεις στις μέσες κλίμακες των εικόνων του πανοράματος. [V10 technical overview]

Κατά το επίπεδο X-Y μίας αυστηρά κατακόρυφης λήψης λοιπόν, θεωρώντας πως τα μόνα μεγέθη που έχουν σφάλμα είναι αυτά των εικοσυντεταγμένων (x, y) και από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων

[Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009] στις πρώτες δύο γεωμετρικές σχέσεις εικόνας αντικειμένου (2.1) εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις για τα μέσα σφάλματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων X, Y όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.3) και (2.4) [Kraus K., 2010].

$$\frac{x}{X - X_0} = \frac{y}{Y - Y_0} = \frac{c}{H} = \frac{1}{k} \quad (2.1)$$

Αντίστοιχα αν το προβολικό κέντρο της εικόνας θεωρηθεί πως βρίσκεται στη θέση $(0, 0)$ του συστήματος αναφοράς οι σχέσεις (2.1) γίνονται:

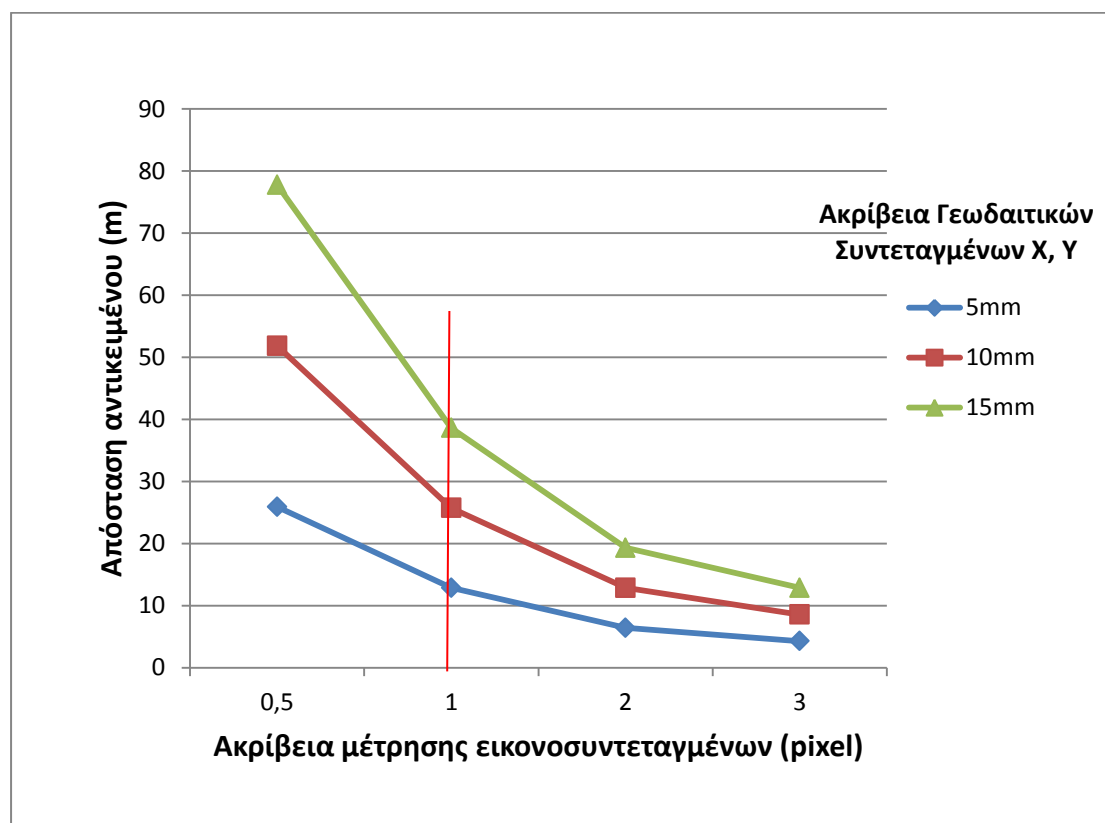
$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{c}{H} = \frac{1}{k} \quad (2.2)$$

Και από νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στη σχέση (2.2):

$$\sigma_X = \sigma_x \frac{H}{c} = \sigma_x \cdot k \quad (2.3)$$

$$\sigma_Y = \sigma_y \frac{H}{c} = \sigma_y \cdot k \quad (2.4)$$

Όπου $\sigma_x = \sigma_y$ και άρα $\sigma_X = \sigma_Y$.

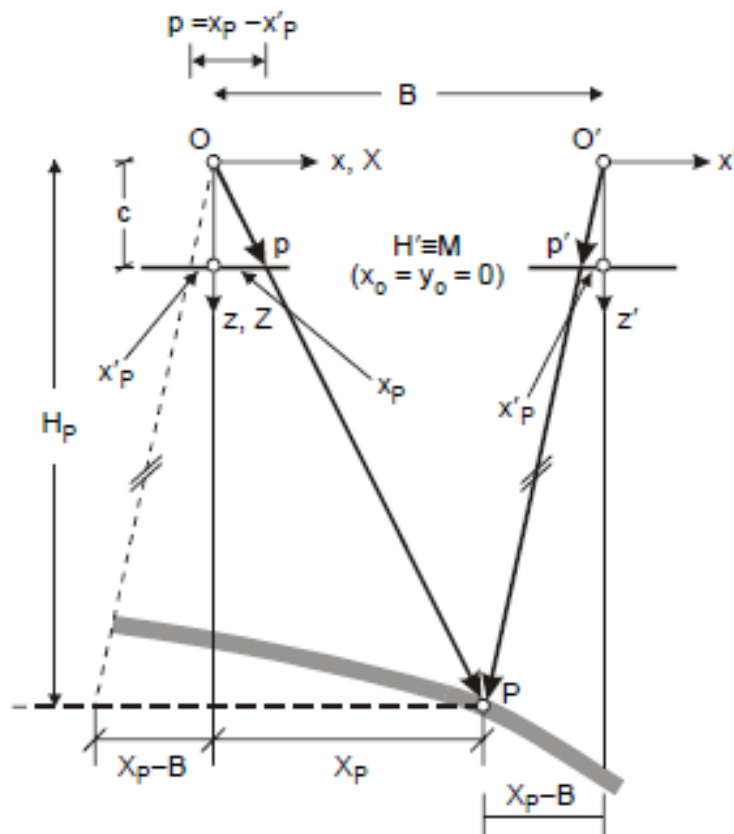


Διάγραμμα 2.2 Η ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου και με την ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων. [V10 technical overview]

Σύμφωνα με τις συμβάσεις που έγιναν αποδεικνύεται ότι η ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων X, Y είναι ανάλογη της κλίμακας των εικόνων, δηλαδή ανάλογη της απόστασης του αντικειμένου. Στο διάγραμμα 2.2 περιγράφεται η ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου και με την ακρίβεια μέτρησης των εικοσυντεταγμένων.

Αν θεωρηθεί πως οι εικονοσυντεταγμένες μετριοούνται με ακρίβεια της τάξης του ενός εικονοστοιχείου, τότε η κόκκινη γραμμή δείχνει κάποιες κρίσιμες αποστάσεις ανάλογα με την ακρίβεια που επιδιώκεται για τα σημεία λεπτομέρειας.

Ο υπολογισμός της τρίτης διάστασης (Z) προϋποθέτει την λήψη δύο εικόνων όπως έχει προαναφερθεί. Έτσι για δύο αυστηρά κατακόρυφες λήψεις, όπου οι δύο εικόνες διαφέρουν μόνο κατά τον άξονα x μια απόσταση B που καλείται βάση λήψης (κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων), χρησιμοποιείται η εξίσωση της κατά x παράλλαξης.



Σχήμα 2.5 Κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων. [Πέτσα, 2000]

Η χ παράλλαξη (p_χ) αναφέρεται στην κατά χ αλγεβρική διαφορά των εικονοσυντεταγμένων ενός ομόλογου σημείου που όσο πιο κοντά βρίσκεται στη μηχανή τόσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπισή του στις εικόνες [Πέτσα, 2000]. Επειδή πλέον ο άγνωστος είναι η συντεταγμένη Z , η απόσταση του αντικειμένου H αντικαθίσταται με τη Z συντεταγμένη στην εξίσωση (2.5).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι στις επίγειες φωτογραμμετρικές εφαρμογές και στην ανάλυση που πραγματοποιείται σε αυτό το κεφάλαιο ο άξονας Z των γεωδαιτικών συντεταγμένων αντιστοιχεί στο βάθος του πεδίου. Δηλαδή ο άξονας Z είναι κάθετος σε σχέση με το επίπεδο της εικόνας.

Από την εξίσωση της παράλλαξης και τη σχέση (2.1):

$$P_\chi = \chi_1 - \chi_2 \rightarrow P_\chi = -\frac{Bc}{H} \rightarrow Z = -\frac{Bc}{P_\chi} \quad (2.5)$$

Όπου $H=Z-Z_0 \rightarrow H=Z$.

Από νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στη σχέση (2.5):

$$\sigma_Z = \frac{Bc}{P_\chi^2} \sigma_{P_\chi} = \frac{Z^2}{Bc} \sigma_{P_\chi} = k \frac{Z}{B} \sigma_{P_\chi} \quad (2.6)$$

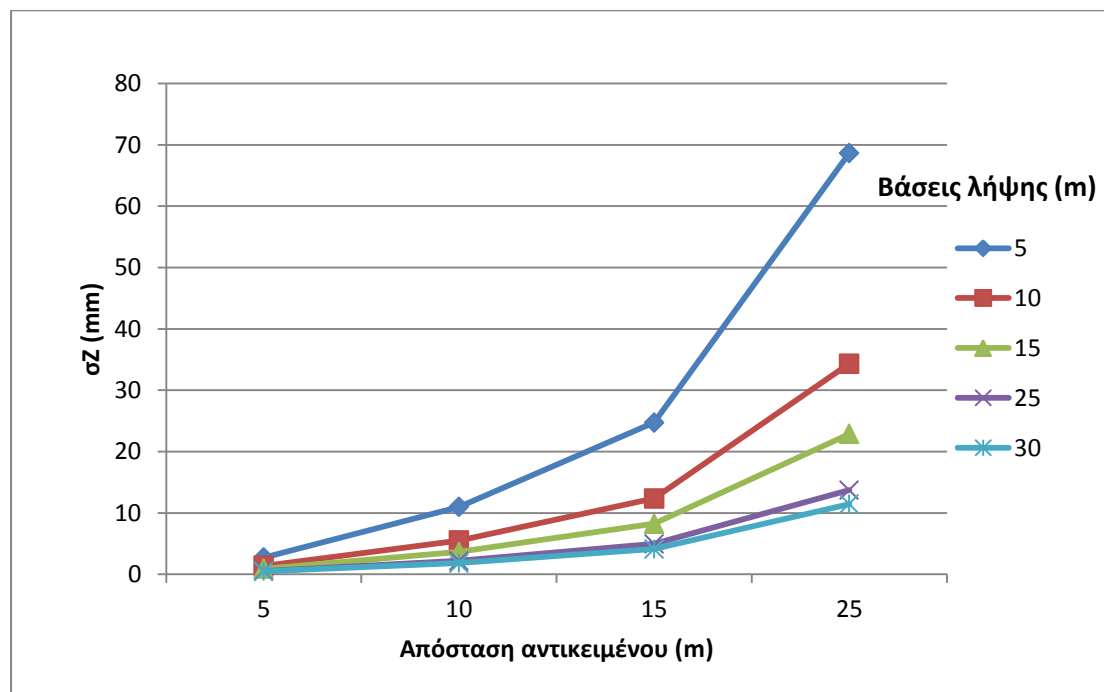
όπου $\sigma_{P_\chi} = \sqrt{2} \sigma_\chi$

Από τη σχέση (2.6) φαίνεται πως και κατά την τρίτη διάσταση το μέσο σφάλμα είναι ευθέως ανάλογο της κλίμακας της εικόνας και αντιστρόφως ανάλογο του λόγου βάσης λήψης προς την απόσταση αντικειμένου [Kraus K., 2010].

Διαφορετικά το μέσο σφάλμα της τρίτης διάστασης είναι ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης του αντικειμένου και αντιστρόφως ανάλογο της βάσης λήψης. Στο διάγραμμα (2.3) που ακολουθεί φαίνονται τα μέσα σφάλματα της συντεταγμένης Z για 5 διαφορετικές βάσεις λήψης σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου θεωρώντας πως η ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων είναι της τάξης του ενός εικονοστοιχείου.

Από τη μελέτη της κανονικής διάταξης τόσο της μίας εικόνας όσο και του ζεύγους, είναι αντιληπτό πως η ακρίβεια των συντεταγμένων X , Y

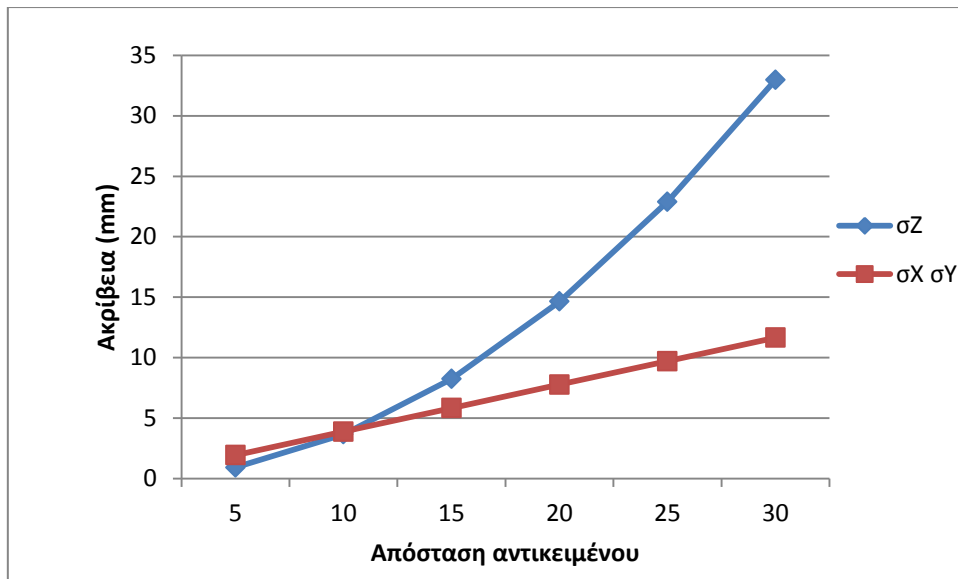
είναι ανάλογη της μέσης κλίμακας των εικόνων ή αλλιώς της απόστασης του αντικειμένου. Παράλληλα η ακρίβεια της συντεταγμένης Z είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης και αντιστρόφως ανάλογη της βάσης λήψης [Kraus K., 2010].



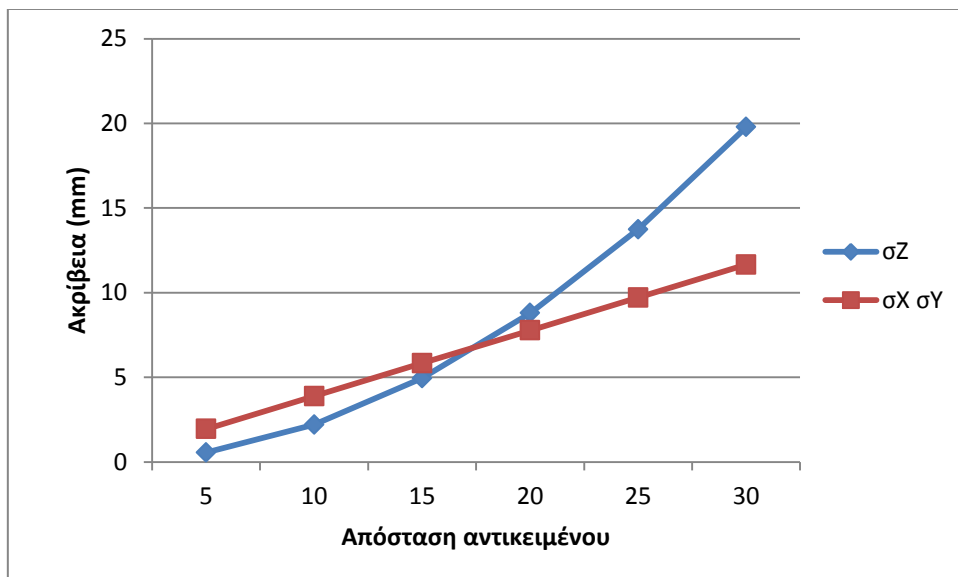
Διάγραμμα 2.3 Μέσο σφάλμα της συντεταγμένης Z σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου για κανονική διάταξη εικόνων και διαφορετικές βάσεις λήψης. [V10 technical overview]

Το ζήτημα που προκύπτει λοιπόν, είναι η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους για τη βάση λήψης ώστε τα αποτελέσματα και στις τρεις διαστάσεις να είναι ομοιογενή όσον αφορά στην ακρίβεια τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως καθώς η βάση λήψης ξεπερνά τα 10m όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στα διαγράμματα 2.4, 2.5.

Από τα διαγράμματα αυτά (2.4, 2.5) συμπεραίνεται ότι η ακρίβεια των συντεταγμένων X , Y υπερτερεί σε σχέση με την Z . Βέβαια αυτό που αξίζει να τονιστεί είναι πως τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κανονική διάταξη εικόνων, θεωρώντας τα περισσότερα μεγέθη χωρίς σφάλμα. Δηλαδή στην πράξη τα σφάλματα είναι σημαντικά μεγαλύτερα και οι παράμετροι που εμπλέκονται για τον υπολογισμό τους είναι περισσότεροι.



Διάγραμμα 2.4 Ακρίβεια γεωδαιτικών συντεταγμένων από κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων με βάση λήψης 15m. [V10 technical overview]

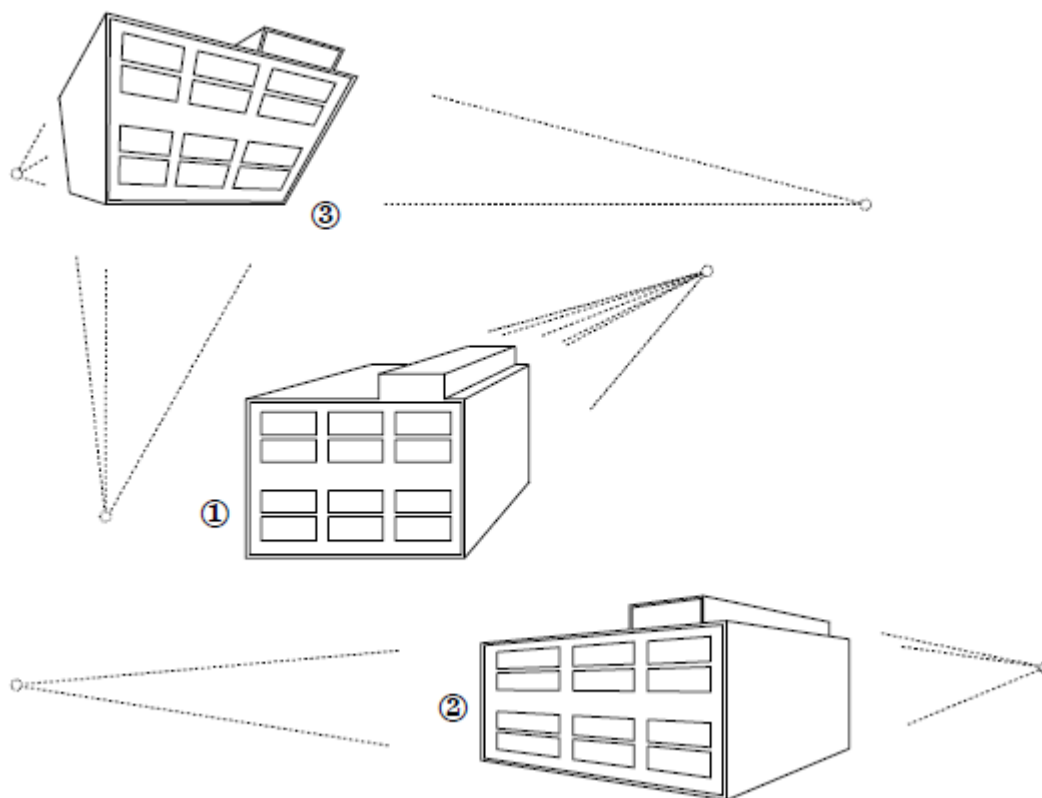


Διάγραμμα 2.5 Ακρίβεια γεωδαιτικών συντεταγμένων από κανονική διάταξη ζεύγους εικόνων με βάση λήψης 25m. [V10 technical overview]

Ακόμη το σύστημα αναφοράς που περιγράφηκε δεν προσανατολίζει τον άξονα Z παράλληλα με το διάνυσμα της βαρύτητας, όπως πραγματοποιείται στις συνήθεις εναέριες λήψεις και την πλειοψηφία των τοπογραφικών εφαρμογών, αλλά κάθετα σε αυτό και παράλληλο με το βάθος του πεδίου.

Στην περίπτωση του V10 ο άξονας Z είναι παράλληλος με το διάνυσμα της βαρύτητας γεγονός που στην πράξη βελτιώνει την υψομετρική ακρίβεια έναντι της οριζοντιογραφικής.

Στη συνέχεια ένας απλός κανόνας για τη λήψη μετρητικών φωτογραφιών, ως προς ένα επίπεδο αντικείμενο (όπως για παράδειγμα μια όψη κτιρίου), είναι ο περιορισμός του μεγέθους της γωνία πρόσπτωσης κατά την σκόπευση ενός σημείου. Αυτό συμβαίνει διότι όσο η γωνία πρόσπτωσης μικραίνει (δηλαδή η παρατήρηση τείνει προς ένα σημείο φυγής) τόσο οι διακριτικές δομές του αντικειμένου χάνουν την σαφήνεια τους και οι παραμορφώσεις μεγαλώνουν όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.6 [Πέτσα, 2000].

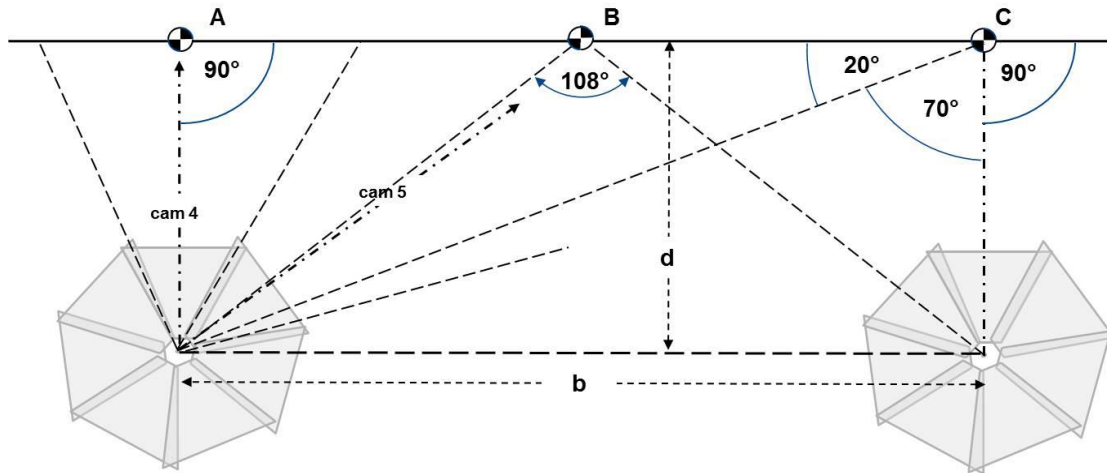


Σχήμα 2.6 Προοπτικές απεικονίσεις με ένα, δύο και τρία σημεία φυγής.
[Πέτσα, 2000]

Η σύμβαση αυτή διαμορφώνει τη μέγιστη βάση λήψης (οριζόντια απόσταση) μεταξύ δύο στάσεων λήψης του V10 με τη γωνία πρόσπτωσης να περιορίζεται σε ελάχιστη τιμή στις 20° μοίρες. Κατά το κατακόρυφο επίπεδο ο κανόνας αυτός ισχύει πάντα λόγω της διάταξης των καμερών. Στη σχέση (2.7) και το σχήμα 2.7 που ακολουθούν με b

συμβολίζεται η βάση λήψης και με d η απόσταση της στάσης λήψης από το επίπεδο αντικείμενο σε γενική οριζοντιογραφία.

$$b = \frac{d}{\tan 20^\circ} = 2.75 \cdot d \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.7 Ελάχιστη γωνία παρατήρησης επίπεδου αντικειμένου και μέγιστη βάση λήψης μεταξύ δύο στάσεων του συστήματος V10. [V10 technical overview]

Στο σχήμα 2.7 οι γωνίες παρατήρησης από τις δύο στάσεις κυμαίνονται μεταξύ των σημείων A και C με τιμές από 20° έως 90° μοίρες και αντίστοιχες γωνίες τομής από 70° έως 108° μοίρες. Αν η βάση b ήταν διπλάσια της απόστασης τότε τα αντίστοιχα γωνιακά μεγέθη θα ήταν 27° - 90° για τις γωνίες πρόσπτωσης και 68° - 90° για τις γωνίες τομής

Άρα ένας συμβατικός κανόνας για την οριζόντια διαμόρφωση των στάσεων λήψης του V10 είναι πως ο λόγος της βάσης λήψης προς την απόσταση του αντικείμενου ορίζεται να είναι μικρότερος από 2.5 χωρίς βέβαια αυτό να είναι δεσμευτικό.

Στην εμπροσθοτομία μία παράμετρος που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο είναι η γεωμετρία της τομής, ανεξαρτήτως του μεγέθους που επιλέγεται για τη βάση λήψης. Η καλύτερη περίπτωση είναι όταν οι ομόλογες ακτίνες τέμνονται κάθετα μεταξύ τους (γωνία τομής 90° μοιρών) οπότε και τα σφάλματα ισομοιράζονται και η έλλειψη σφάλματος του αγνώστου σημείου, ως προς την οριζοντιογραφία, τείνει προς τον κύκλο σφάλματος (ο κύκλος σφάλματος δημιουργείται για γωνία τομής 90° μοιρών και ίσες πλευρές του τριγώνου/ισοσκελές).

Οι δυσμενείς περιπτώσεις που δημιουργούν μεγάλη αβεβαιότητα ως προς τη θέση του άγνωστου σημείου είναι δύο.

Η πρώτη περίπτωση συναντάται όταν η γωνία τομής είναι ιδιαίτερα οξεία είτε επειδή το σημείο απομακρύνεται αρκετά από τη βάση λήψης είτε λόγω μεγάλης εκκεντρότητας από τη βάση b.

Η δεύτερη περίπτωση συναντάται για ιδιαίτερα αμβλείες γωνίες, όταν δηλαδή η απόσταση του αντικειμένου μικραίνει και πλησιάζει προς τη βάση λήψης.

Ο κατασκευαστής γνωρίζοντας πως από την ποιότητα του υπολογισμού των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού μπορεί να αναγνωρίζει διευθύνσεις με αβεβαιότητα του ± 1 εικονοστοιχείου, που γωνιακά εκφράζεται σε $\pm 0.39\text{mrad}$, προτείνει συμβατικά κάποια όρια για τις γωνίες τομής των εμπροσθοτομιών.

Έτσι ορίζονται κάποιες περιοχές βέλτιστης εμπροσθοτομίας ώστε οι γωνίες τομής να είναι μικρότερες των 30° μοιρών και μεγαλύτερες των 150° μοιρών. Τα όρια που περιβάλλουν την τελική περιοχή βέλτιστης εμπροσθοτομίας περιγράφονται από την αφαίρεση δύο γεωμετρικών τόπων. Οι γεωμετρικοί τόποι των σημείων που διατηρούν σταθερή τη γωνία τομής από δύο γνωστά σημεία, όπως φαίνονται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 2.8, αντιστοιχούν σε κύκλους με τη βάση λήψης b να αποτελεί τις διάφορες χορδές των κύκλων αυτών.

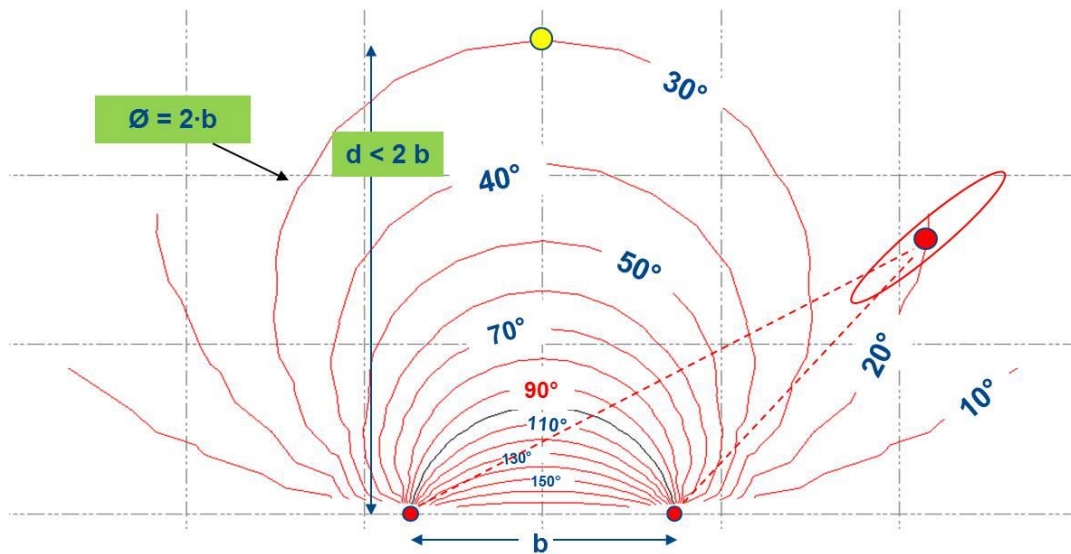
Με την καμπύλη των 30° ως άνω όριο και την καμπύλη των 150° μοιρών ως κάτω όριο διαμορφώνεται τόσο η περιοχή για βέλτιστες τομές μεταξύ δύο στάσεων, πράσινο χρώμα του σχήματος 2.9, όσο και κάποια όρια του λόγου της βάσης λήψης προς την απόσταση του αντικειμένου. Τα όρια αυτά μέσω απλής τριγωνομετρίας δημιουργούν την ανισότητα (2.8) η οποία περιορίζει τη βάση λήψης b σε σχέση με την απόσταση d του σημείου.

$$0.54d \leq b \leq 7,46d. \quad (2.8)$$

Σύμφωνα όμως με προηγούμενο κανόνα που αναφέρθηκε το άνω όριο της ανισότητας ορίζεται στα $2.5d$ επομένως η τελική σχέση για το λόγο βάσης λήψης προς απόσταση αντικειμένου εκφράζεται από την ανισότητα (2.9).

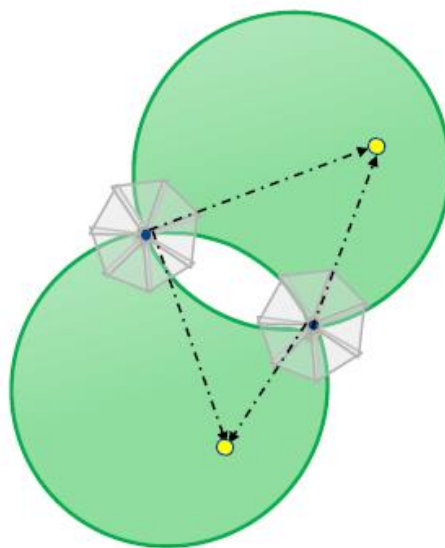
$$0.5d \leq b \leq 2.5d.$$

(2.9)

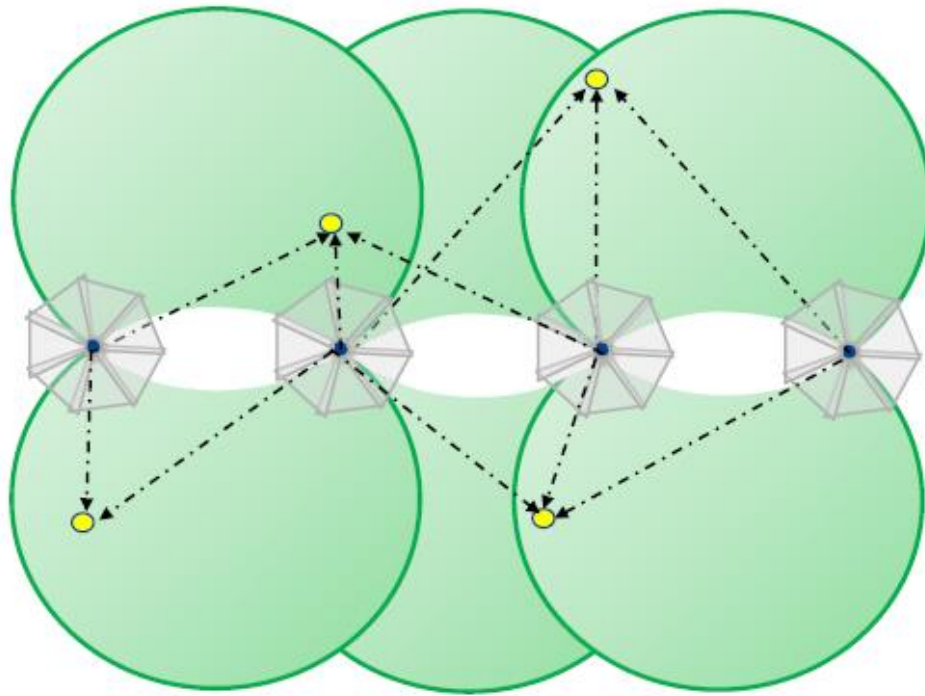


Σχήμα 2.8 Γεωμετρικοί τόποι ίδιας γωνίας τομής των ακτίνων κατά την εφαρμογή εμπροσθοτομιών από δύο γνωστά σημεία. [V10 technical overview]

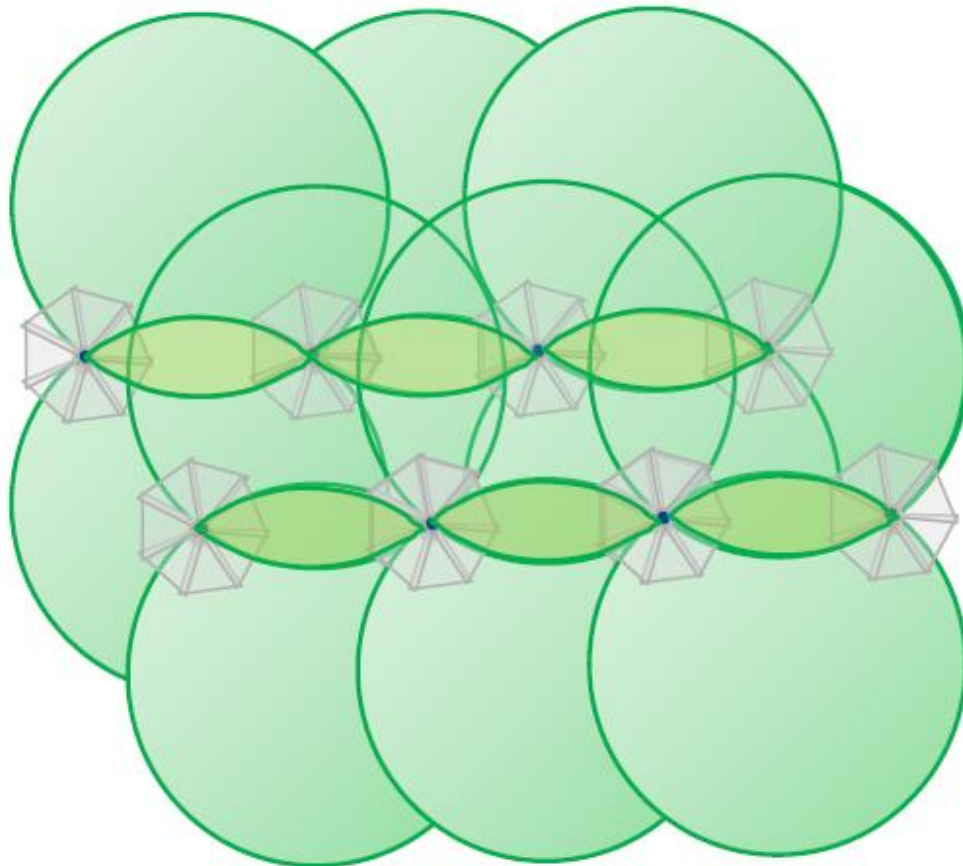
Οι παραπάνω κανόνες βοηθούν το χρήστη του V10 να αντιμετωπίσει το σχεδιασμό μιας εφαρμογής τόσο σε επίπεδο γραφείου όσο και διαισθητικά στο πεδίο. Στα σχήματα 2.9, 2.10 και 2.11 παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα οι βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας από τη διαμόρφωση δύο, τεσσάρων και οχτώ στάσεων λήψης.



Σχήμα 2.9 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για δύο στάσεις λήψης. [V10 technical overview]



Σχήμα 2.10 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για τέσσερις στάσεις λήψης. [V10 technical overview]

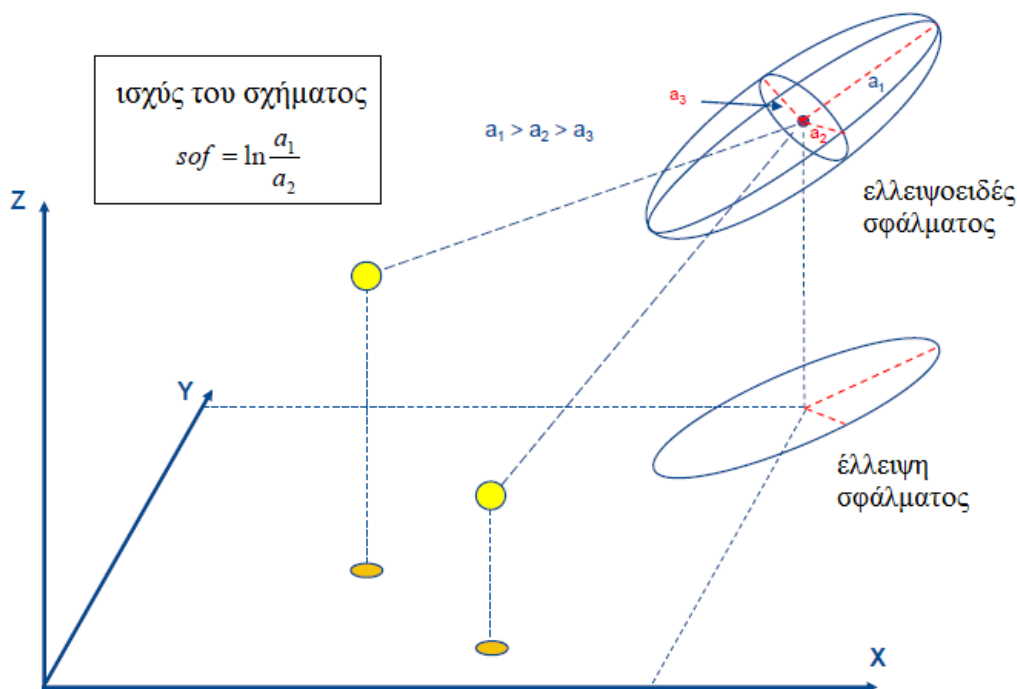


Σχήμα 2.11 Βέλτιστες περιοχές εμπροσθοτομίας για οχτώ στάσεις λήψης. [V10 technical overview]

Βέβαια ένα αντικείμενο δεν είναι πάντα προσιτό, ούτε όλα τα μέρη του είναι ορατά και μετρήσιμα με την ίδια ποιότητα. Ειδικά όταν για τον υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων ενός σημείου εμπλέκονται περισσότερες από δύο ομόλογες ακτίνες τότε χρειάζεται να υπάρχει ένας δείκτης που να χαρακτηρίζει τη γεωμετρία της τομής ή διαφορετικά την επίλυση από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Είναι γνωστό από τη θεωρία σφαλμάτων πως η αβεβαιότητα της θέσης ενός σημείου, από την εμπροσθοτομία στο χώρο ομόλογων ακτίνων, εκφράζεται στον τριδιάστατο χώρο από το τριαξονικό ελλειψοειδές σφάλματος και στο οριζόντιο επίπεδο από την έλλειψη σφάλματος [Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009]. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας δείκτης που ονομάζεται ισχύς του σχήματος (sof=strength of figure).

Μαθηματικά ορίζεται από το φυσικό λογάριθμο του λόγου των δύο μεγάλων ημιαξόνων του ελλειψοειδούς, ή από τον μεγάλο ημιάξονα προς το μικρό από την έλλειψη σφάλματος στο οριζόντιο επίπεδο. Στο σχήμα 2.12 φαίνονται η τομή δύο ομόλογων ακτίνων από γνωστά σημεία, το ελλειψοειδές σφάλματος στις τρεις διαστάσεις, η προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο και η μαθηματική έκφραση του δείκτη της ισχύς του σχήματος.



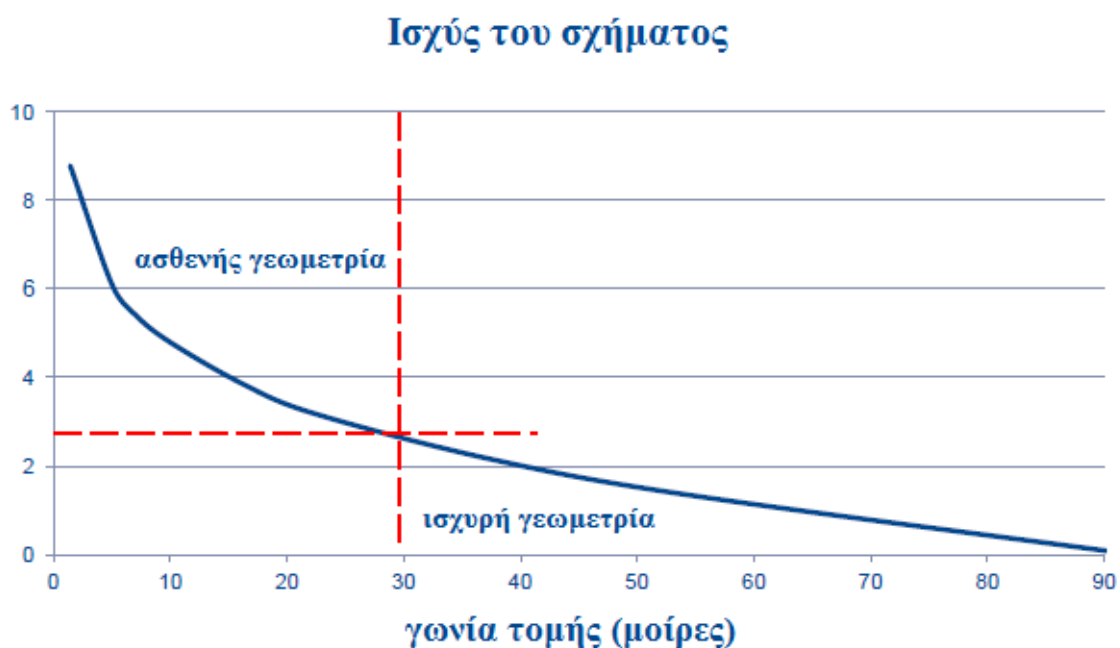
Σχήμα 2.12 Τριαξονικό ελλειψοειδές σφάλματος σημείου από την εμπροσθοτομία στο χώρο δύο ομόλογων ακτίνων.

Ο δείκτης της ισχύος του σχήματος, σχέση (2.10), αυξάνεται όσο η γεωμετρία τη τομής γίνεται χειρότερη ενώ μηδενίζεται στην ιδανική περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η καλύτερη περίπτωση είναι όταν η περιοχή του σφάλματος εμπίπτει σε κύκλο σφάλματος κατά την οριζοντιογραφία. Οπότε ο λόγος των ημιαξόνων ισούται με τη μονάδα και ο φυσικός λογάριθμος με το μηδέν.

$$sof = \ln \frac{a_1}{a_2} \quad (2.10)$$

Η ασθενής γεωμετρία του σχήματος επέρχεται όταν ο δείκτης ξεπερνάει την τιμή 2.63, δηλαδή ο μεγάλος ημιάξονας γίνεται περίπου 14 φορές ο μικρός. Η τιμή αυτή προκύπτει από τον προηγούμενο κανόνα που θέτει ως ελάχιστη γωνία τομής τις 30° μοίρες και αντίστοιχα ως μέγιστη τιμή τις 150° (στις 150° μοίρες η έλλειψη είναι όμοια αλλά μικρότερη και στραμμένη κατά 90° μοίρες σε σχέση με αυτή των 30° μοιρών).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καμπύλη του δείκτη σε σχέση με τη γωνία τομής και το όριο μεταξύ ισχυρής και ασθενούς γεωμετρίας με κόκκινο χρώμα.

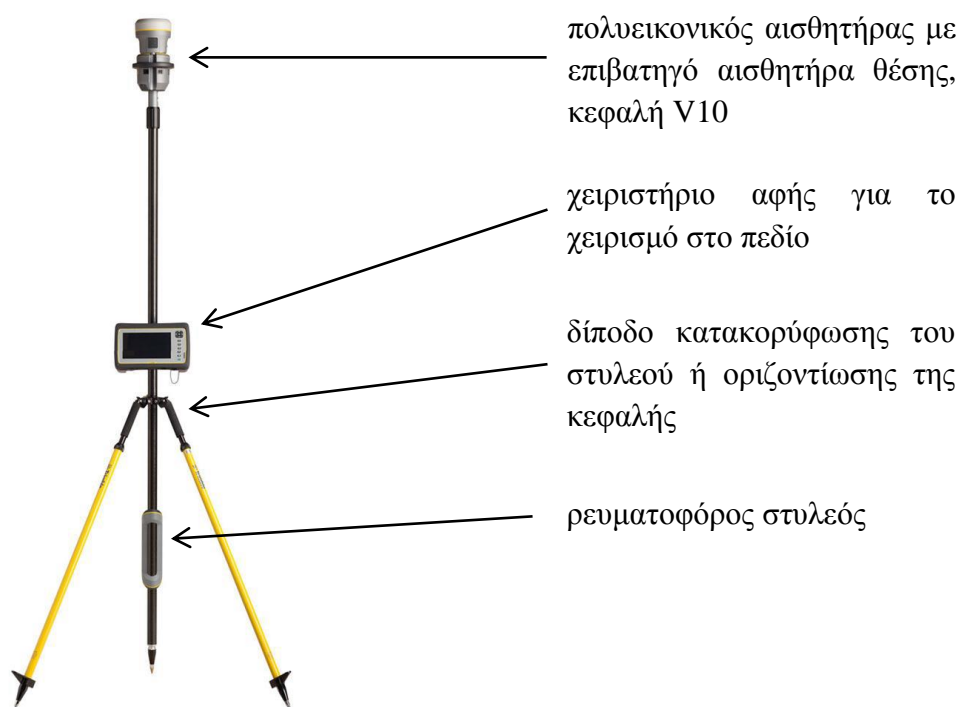


Διάγραμμα 2.6 Ισχύς του σχήματος σε σχέση με τη γωνία τομής. [V10 technical overview]

2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Κύριο μέρος του συστήματος V10 είναι ο στυλεός του, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ανθρακόνηματα ενώ παράλληλα διαπερνάται εσωτερικά από ρεύμα. Στην πάνω κορυφή του στυλεού τοποθετείται η κεφαλή του V10, δηλαδή ο πολυεικονικός αισθητήρας, που είναι το μόνο μέρος που τροφοδοτείται από το στυλεό και ολοκληρώνεται επιβατηγά με αισθητήρα θέσης, δηλαδή δέκτη GNSS ή πρίσμα 360° [<http://trl.trimble.com/>].

Επιπλέον επί του στυλεού τοποθετείται χειριστήριο αφής με εγκατεστημένο κατάλληλο λογισμικό για τον χειρισμό του συστήματος στο πεδίο και δίποδο για τη σταθερότητα και την κατακορύφωσή του (ή αλλιώς για την οριζοντίωση των αισθητήρων). Ακολουθεί η εικόνα 2.3 με τα βασικά μέρη του συστήματος.



Εικόνα 2.3 Το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10. [V10 technical overview]

Το εικονοσύστημα V10 έχει τη δυνατότητα να συλλέγει πανοράματα είτε λειτουργώντας μόνο του είτε με πλήρη ενσωμάτωση κάποιου επιβατηγού αισθητήρα θέσης. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση αυτή πραγματοποιείται με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος, που παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος της εικόνας 2.4, είναι η λειτουργία σε σύζευξη με τους δορυφορικούς δέκτες GNSS της σειράς R της Trimble (R4, R6, R8, R10). Ο δεύτερος τρόπος αφορά την τοποθέτηση πρίσματος 360° και τη λειτουργία σε σύζευξη με οποιοδήποτε ρομποτικό ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό της σειράς S της Trimble (S3, S6, S8, VX).

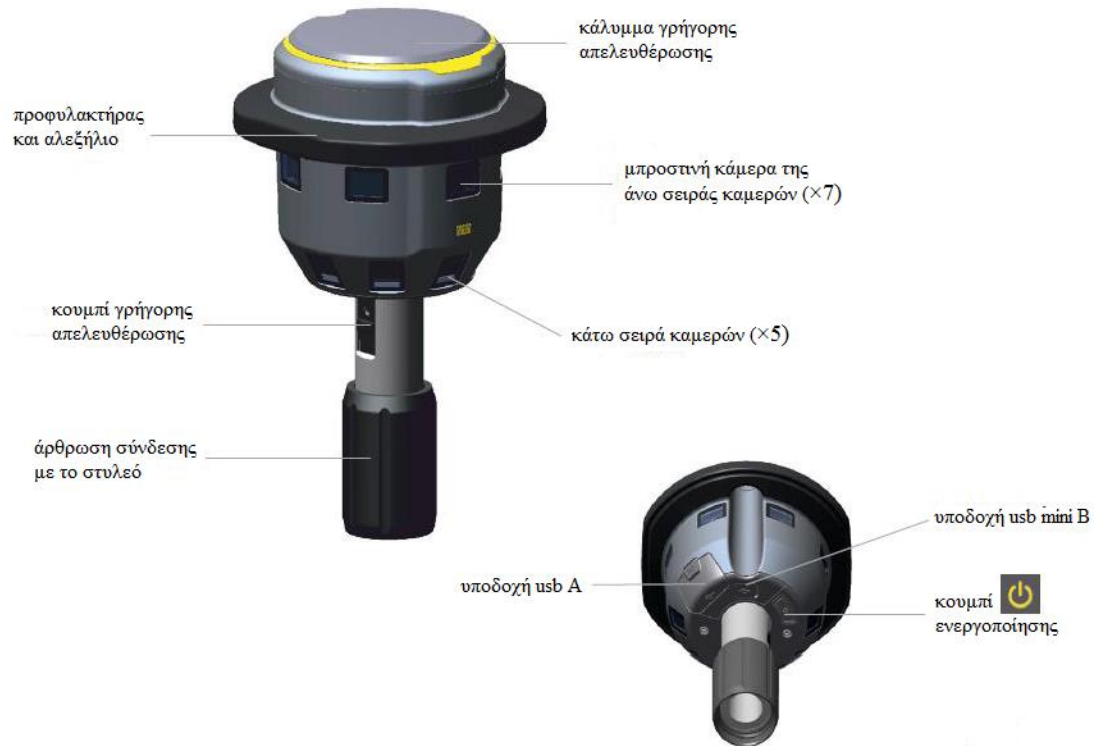


Εικόνα 2.4 Επιβατηγοί αισθητήρες Θέσης του συστήματος V10, αριστερά ο δέκτης GNSS R10 και δεξιά πρίσμα 360° για ρομποτικό ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό. [V10 technical overview]

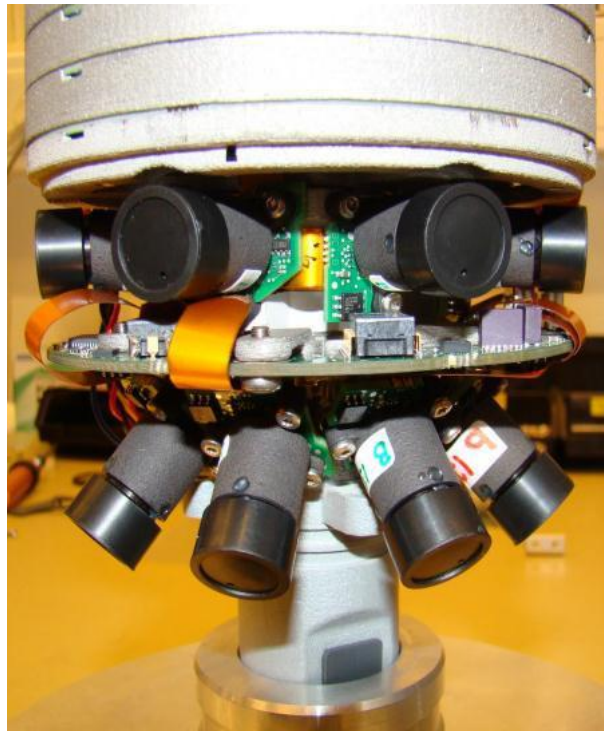
Η κεφαλή του V10 εκτός από τις 12 κάμερες περιλαμβάνει εξωτερικά μια άρθρωση για την σύνδεση της με το στυλεό, ένα μοχλό γρήγορης απελευθέρωσης του προστατευτικού καλύμματος ή του αισθητήρα θέσης, πλήκτρο ενεργοποίησης-απενεργοποίησης, υποδοχή usb και usb mini καθώς και προστατευτικό περίβλημα για την προστασία της τόσο από τις ακτίνες του ηλίου όσο και σε περίπτωση πτώσης. Τα παραπάνω μέρη παρουσιάζονται αναλυτικά στην εικόνα 2.5.

Όσον αφορά το εσωτερικό της κεφαλής του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10, εικόνα 2.6, αυτή περιέχει μια σειρά αισθητήρων που λειτουργούν σε συνεργασία με τις 12 βαθμονομημένες κάμερες, όπως αισθητήρες κλίσεων, μαγνητική πυξίδα, γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρο. Η ανάλυση της κάθε κάμερας είναι 5MP. Δεδομένου αυτού ένα πανόραμα που λαμβάνεται έχει συνολική ανάλυση 60MP

(12cam×5Mp) και το μέγεθός του κυμαίνεται μεταξύ 10~20Mb σε μορφή αρχείου .jpg.



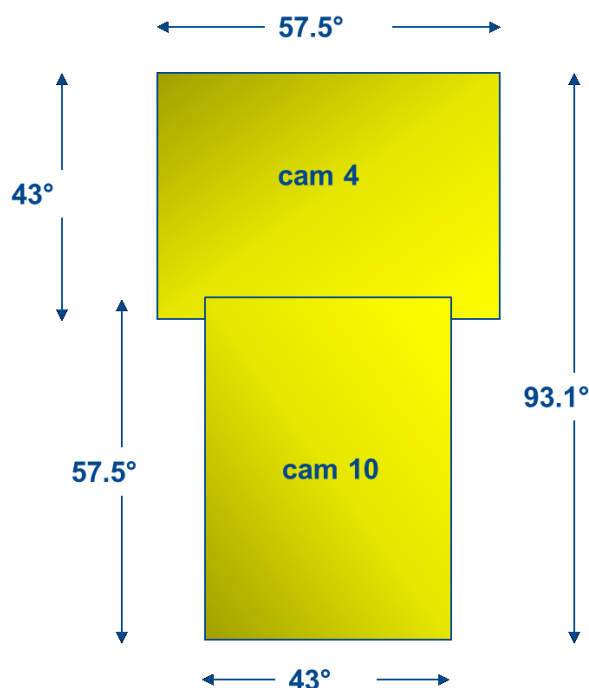
Εικόνα 2.5 Εξωτερικά μέρη της κεφαλής του V10. [V10 technical overview]



Εικόνα 2.6 Εσωτερικό κεφαλής V10. [V10 technical overview]

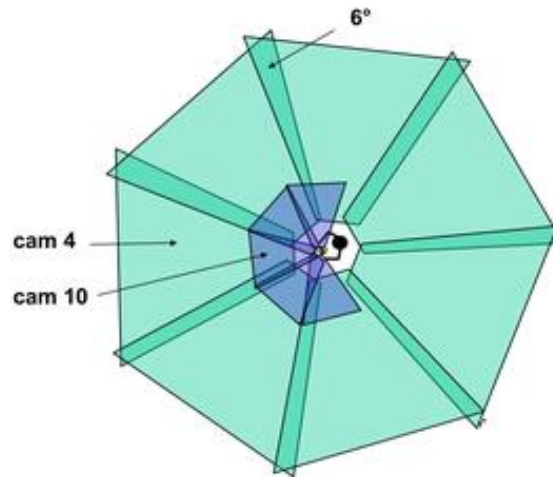
Οι κάμερες του V10 χωρίζονται σε δύο σειρές, την άνω που αποτελείται από 7 κάμερες και την κάτω που αποτελείται από 5 κάμερες. Η άνω σειρά στην ουσία συλλαμβάνει το πανόραμα σε $360^{\circ} \times 43^{\circ}$ μοίρες ενώ η κάτω σειρά εμπλουτίζει την πληροφορία του χώρου που βρίσκεται μπροστά στο χρήστη σε $210^{\circ} \times 57.5^{\circ}$ κεκλιμένες προς τα κάτω.

Σύμφωνα με τη διάταξη του συστήματος οι κεντρικές κάμερες είναι η τέταρτη για την άνω σειρά και η δέκατη για την κάτω σειρά ενώ η διαφορά στο κατακόρυφο γωνιακό εύρος της κάθε σειράς έγκειται στον προσανατολισμό τους, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13.



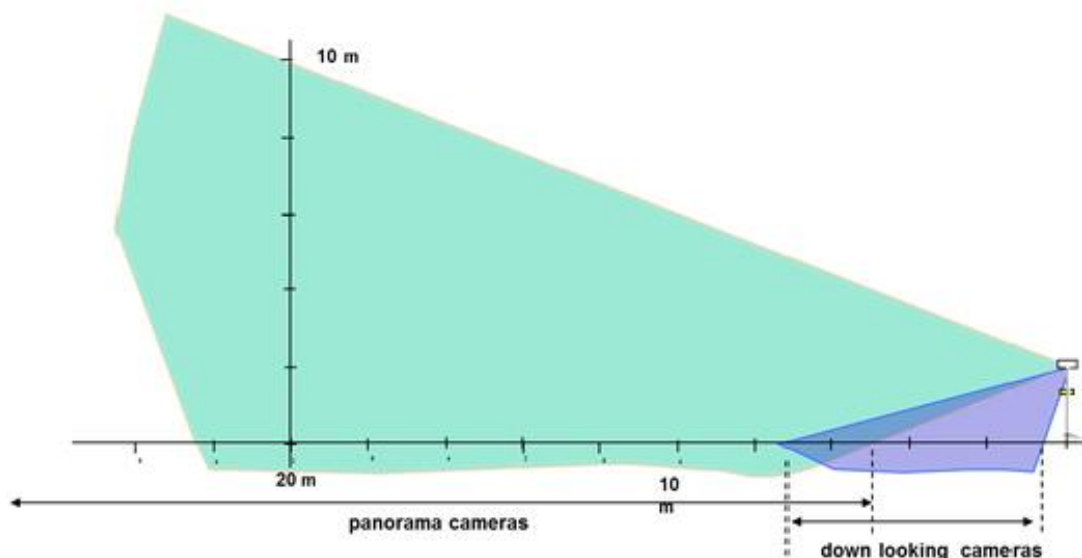
Σχήμα 2.13 Γωνιακό εύρος και προσανατολισμός των κεντρικών καμερών του συστήματος V10 [<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>, 4/2015]

Επιπλέον από το σχήμα 2.13 φαίνεται ότι υπάρχει μία κατακόρυφη επικάλυψη των εικόνων της τάξης των 7.4° μοιρών, δηλαδή 17% για την άνω σειρά και 13% για την κάτω. Αντίστοιχη επικάλυψη υπάρχει και κατά την οριζόντια διάταξη των καμερών, όπου για την άνω σειρά είναι 6° μοίρες δηλαδή 10% και για την κάτω σειρά 3.6° μοίρες δηλαδή 8%. Το σχήμα 2.14 δείχνει το οριζόντιο οπτικό πεδίο που συλλαμβάνει το σύστημα V10 με τις αντίστοιχες επικαλύψεις που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.14 Οριζόντιο οπτικό πεδίο του V10 και οριζόντιες επικαλύψεις
[\http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/, 4/2015]

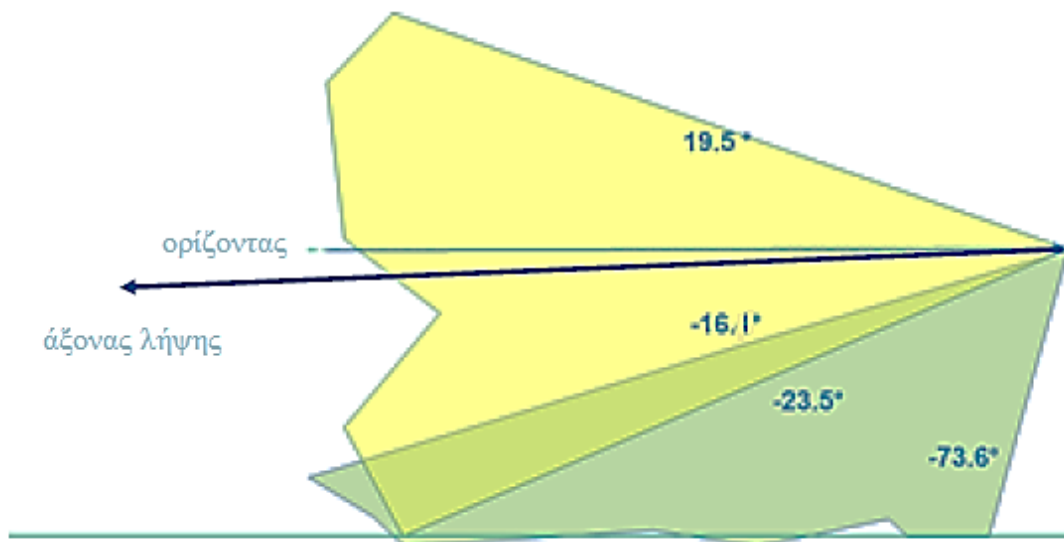
Με ανάλογο τρόπο διαμορφώνεται το κατακόρυφο οπτικό πεδίο που συλλέγει ο V10. Η ορατότητα λοιπόν της άνω σειράς, που συμβολίζεται με γαλάζιο χρώμα στο σχήμα που ακολουθεί, ξεκινάει από απόσταση 5m σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και θεωρητικά εκτείνεται ως στο άπειρο, ενώ υψομετρικά φτάνει στα δέκα μέτρα σε μία οριζόντια απόσταση 20m. Η ορατότητα της κάτω σειράς, που συμβολίζεται με μωβ χρώμα, ξεκινάει σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο από τα 0.6m και τελειώνει στα 6.6m όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 Κατακόρυφο οπτικό πεδίο του V10.
[\http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/, 4/2015]

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να επισημανθεί ότι οι άξονες λήψης της άνω σειράς καμερών τοποθετούνται και αυτοί κεκλιμένοι σε σχέση με τον ορίζοντα. Το μέγεθος της απόκλισης για μία αυστηρά κατακόρυφη λήψη είναι της τάξης των 2° μοιρών προς τα κάτω ή αλλιώς εκφρασμένη ως ζενίθια γωνία είναι της τάξης των 92° μοιρών, για μία καλύτερη κάλυψη σε συνδυασμό με τις κάτω κάμερες.

Αντίστοιχα η ζενίθια γωνία των αξόνων λήψης της κάτω σειράς διαμορφώνεται στις 134.85° μοίρες. Στο σχήμα 2.16 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατακόρυφη διάταξη του οπτικού πεδίου των καμερών, εκφρασμένο σε γωνίες ως προς τον ορίζοντα που έχει μηδενική τιμή, όπως και ο προσανατολισμός του άξονα λήψης της άνω σειράς.

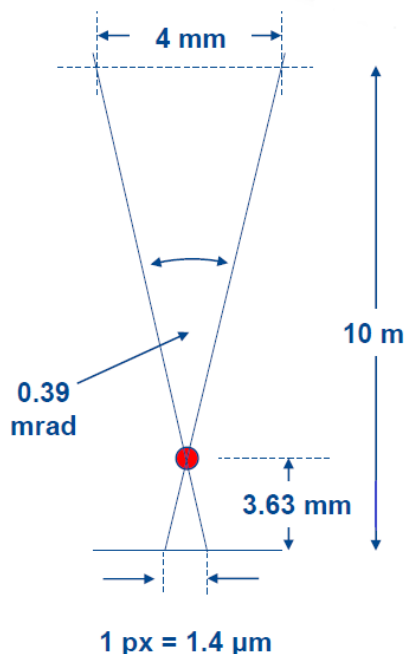


Σχήμα 2.16 Κατακόρυφο οπτικό πεδίο του V10 εκφρασμένο γωνιακά [<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>, 4/2015]

Το σύνολο των 12 καμερών χαρακτηρίζεται από τις ίδιες τεχνικές παραμέτρους όσον αφορά την κατασκευή τους και την εσωτερική τους γεωμετρία. Οι φακοί των καμερών του συστήματος είναι τύπου f-theta, η εστίαση παραμένει σταθερή, η θερμοκρασία αντισταθμίζεται ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται φίλτρο υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η σταθερά των φωτομηχανών διαμορφώνεται στα 3.63mm.

Ο αισθητήρας CCD των καμερών έχει μέγεθος $3.67\text{mm} \times 2.74\text{mm}$ με αντίστοιχο format της εικόνας στα 2592×1944 εικονοστοιχεία, ορίζοντας έτσι το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel) στα $1.41\mu\text{m}$.

Ο συνδυασμός του μεγέθους του εικονοστοιχείου και της σταθεράς της μηχανής δημιουργεί ένα γωνιακό εύρος της τάξης των 0.39mrad, το οποίο για μια αυστηρά κατακόρυφη λήψη και σε απόσταση 10m ισοδυναμεί σε χωρική ανάλυση 4mm, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.17.



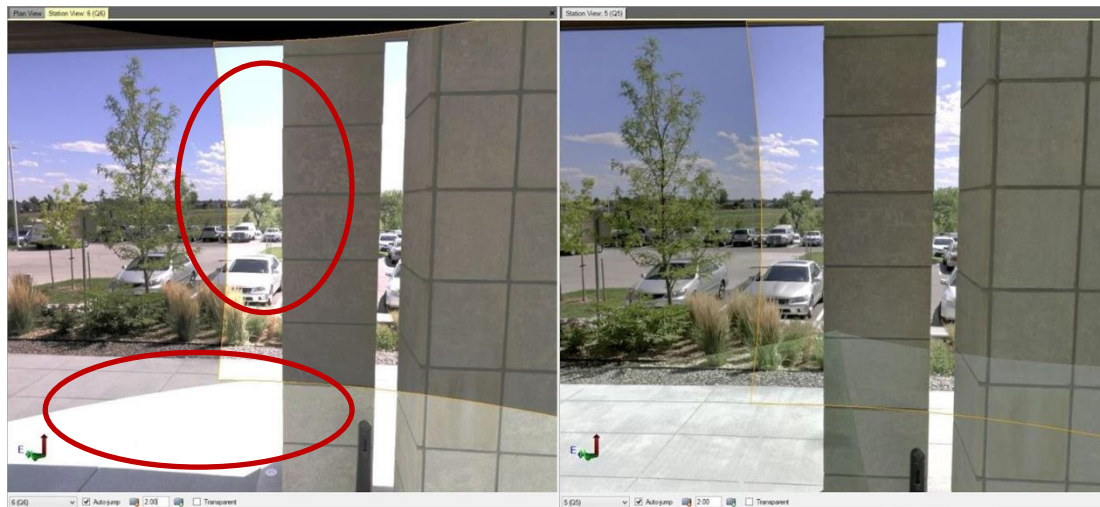
Σχήμα 2.17 Χωρική ανάλυση εικονοστοιχείου του V10 σε απόσταση 10m.
[<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>, 4/2015]

Η διακρίβωση των καμερών του V10 πραγματοποιείται από τον κατασκευαστή και τα στοιχεία του εσωτερικού τους προσανατολισμού περιέχονται στο λογισμικό υποστήριξης. Οι βαθμονομήσεις των καμερών είναι καλύτερες του 1 εικονοστοιχείου με σταθερότητα της τάξης των 2 εικονοστοιχείων, γεγονός που θα αναλυθεί διεξοδικότερα στο τρίτο κεφάλαιο.

Η λειτουργία της έκθεσης των καμερών κατά τη διαδικασία των λήψεων πραγματοποιείται αυτόματα όπως και η ισορροπία του λευκού χρώματος. Επιπλέον από τα τέλη του 2014 είναι διαθέσιμη και η τεχνική δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους (HDR-high dynamic range imagery) γεγονός που βελτιώνει σημαντικά τόσο τις σκιασμένες όσο και τις τονισμένες από την υπερέκθεση περιοχές.

Η συγκεκριμένη τεχνική βέβαια, δεν ήταν διαθέσιμη κατά το χρόνο εκτέλεσης των εφαρμογών της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην εικόνα 2.7 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η επίπτωση της τεχνικής

δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους, σε εφαρμογές εξωτερικού πεδίου χρησιμοποιώντας το εικονοσύστημα V10.



Εικόνα 2.7 Λήψεις του συστήματος V10 χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) την τεχνική HDR.

[<https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/search.w?searchType=exhibitor&showAllResults=true#loadSearch-searchPhrase=v10&searchType=session&tc=1&sortBy=&p=&i%2811964%29=>, 4/2015]

Το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς τους αισθητήρες που περιέχονται στην κεφαλή του, εκτός βέβαια από τις 12 κάμερες του. Οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι οι αισθητήρες κλίσεων (tilt sensors) και η μαγνητική πυξίδα.

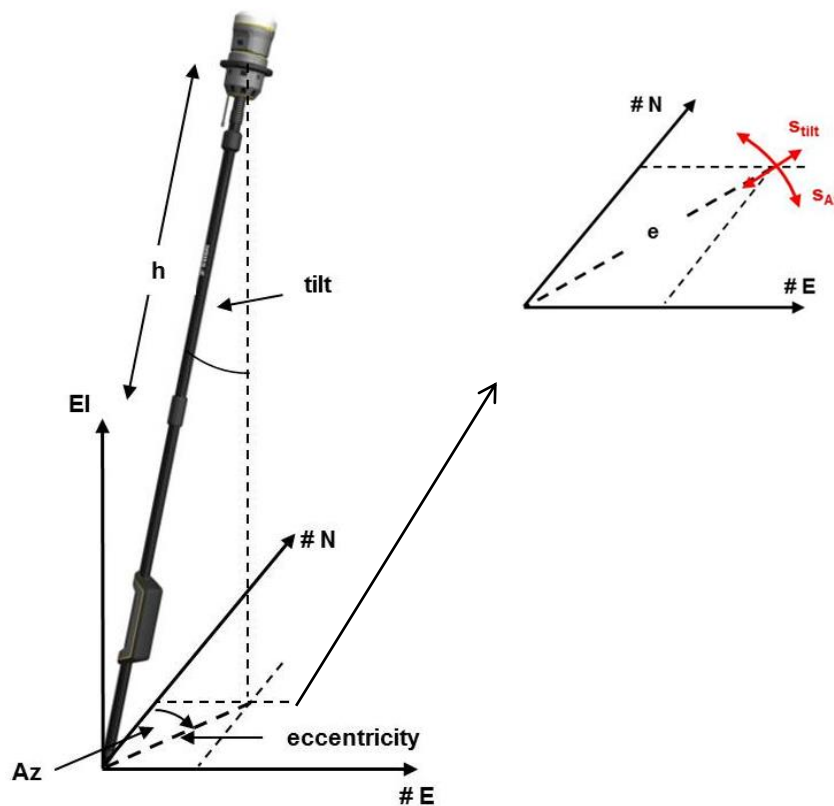
Οι αισθητήρες των κλίσεων μετρούν την απόκλιση του στυλεού από την κατακόρυφο σε δύο κάθετους οριζόντιους άξονες σε ένα εύρος 0° - 15° μοιρών, με ακρίβεια της τάξης των $\pm 0.03^{\circ} = \pm 1'48'' = \pm 33.3\text{mgon}$, που αντιστοιχεί σε $\pm 1\text{mm}$ απόκλιση στα 2m ύψους του στυλεού, ενώ η απόδοση τους είναι της τάξης $0.01^{\circ} = 36''$. Η μαγνητική πυξίδα μετράει πρωτογενώς το μαγνητικό αζιμούθιο, στο σύστημα συντεταγμένων του συστήματος άρα και τον προσανατολισμό των αξόνων των κλίσεων, με ακρίβεια της τάξης της $\pm 1^{\circ}$.

Ο συνδυασμός των μετρήσεων των αισθητήρων που αναφέρθηκαν ενισχύει πολλαπλά την λειτουργία του V10. Προσανατολίζει τα διαφορετικά πανοράματα μεταξύ τους ανεξαρτήτως γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό ακόμη και σε τοπικό

αυθαίρετο σύστημα αναφοράς υπάρχει μια κοινή αρχή ώστε να λειτουργήσει ο αλγόριθμος ψηφιακής συνταύτισης και να λυθεί αυτόματα ο τριγωνισμός.

Έπειτα υπολογίζει προσεγγιστικές τιμές για τις τρεις στροφές ω , φ , κ του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε πανοράματος αντίστοιχα ως προς τους άξονες X , Y , Z που αποτελεί ένα από τα κλασικά φωτογραμμετρικά προβλήματα. Οι αισθητήρες των κλίσεων μετρούν έμμεσα τις γωνίες ω , φ ενώ η μαγνητική πυξίδα υπολογίζει έμμεσα την προσεγγιστική τιμή της γωνίας κ .

Με δεδομένα τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου λήψης και το ύψος του φωτογραμμετρικού κέντρου του V10, οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου κάθε πανοράματος μπορούν να αντικατασταθούν στον τριγωνισμό ως προς τις στροφές ω , φ , κ . Έτσι οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου του τριγωνισμού μειώνονται και παράλληλα η διαδικασία απαλλάσσεται από την ύπαρξη φωτοσταθερών σημείων.



Σχήμα 2.18 Απόκλιση της κεφαλής του V10 από το σημείο λήψης στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του χρήστη.
 [http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-22/, 5/2015]

Με τον τρόπο αυτό οι μετρήσεις στο πεδίο απλοποιούνται καθώς δε χρειάζεται να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατακορύφωση του συστήματος εφόσον τοποθετείται πάνω στο σημείο λήψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18.

Επιπλέον το μέγεθος της εκκεντρότητας e του σχήματος 2.18 μετράται αποκλειστικά από του αισθητήρες των κλίσεων και ο υπολογισμός του δεν μπορεί να γίνει καλύτερα (s_{tilt}) από $\pm 1.5\text{mm} \approx \sqrt{2} * 1\text{mm}$. Ενώ η γωνία διεύθυνσης A_Z υπολογίζεται από τη μέτρηση του μαγνητικού αζιμούθιου άρα η αβεβαιότητα (s_{AZ}) της είναι κατ'ελάχιστο της τάξης $\pm 1^\circ$.

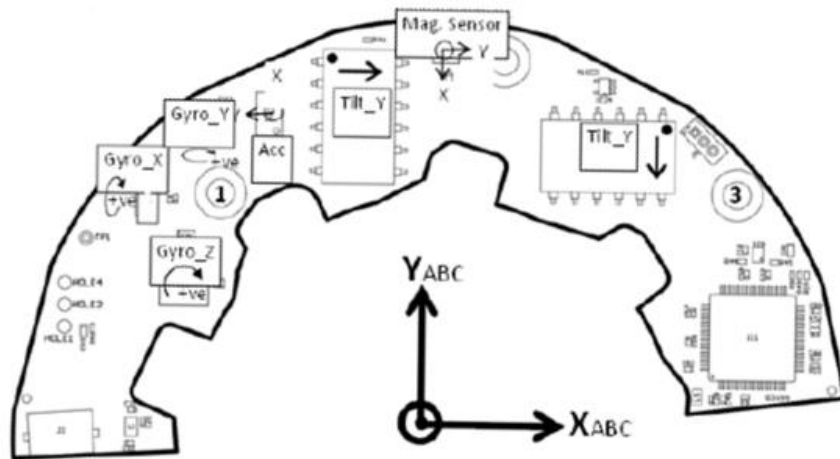
Αυτό που χρειάζεται να επισημανθεί είναι πως οι μετρήσεις της μαγνητικής πυξίδας είναι πολύ εύκολο να αλλοιωθούν από μεταλλικά αντικείμενα του περιβάλλοντα χώρου όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα και κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με κίνδυνο η αβεβαιότητα της γωνίας A_Z να αυξηθεί.

Παρόλα αυτά το τελικό αποτέλεσμα μένει ανεπηρέαστο καθώς οι μετρήσεις των αισθητήρων χρησιμοποιούνται μόνο ως προσεγγιστικές τιμές για την επίλυση του τριγωνισμού. Επιτυγχάνοντας τελικώς πολύ καλύτερες ακρίβειες από αυτές που μετρούνται πρωτογενώς.

Επιπρόσθετα, όταν το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς χρησιμοποιεί κάποια χαρτογραφική προβολή, δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί η γωνιακή απόκλιση βορρά τετραγωνισμού-μαγνητικού βορρά για την περιοχή μελέτης.

Ακόμα υπάρχουν κάποιοι αισθητήρες, σχήμα 2.19, που λειτουργούν συμπληρωματικά. Αυτοί είναι ένα επιταχυνσιόμετρο, που λειτουργεί σε τρεις άξονες και μετράει τον προσανατολισμό της κεφαλής του συστήματος, μεταφέροντας οποιαδήποτε γωνία μεταξύ 0° - 180° στο διάνυσμα της βαρύτητας, με ακρίβεια $\pm 1^\circ$ μοίρας.

Τέλος στο εσωτερικό της κεφαλής περιέχονται 3 γυροσκόπια, ένα για κάθε άξονα των τριών διαστάσεων. Αυτά ενισχύουν το μαγνητικό αζιμούθιο ενώ ανιχνεύουν περιστροφικές κινήσεις κατά τη λειτουργία της έκθεσης των καμερών επιστρέφοντας σχετικό μήνυμα για την επανάληψη της λήψης. Όλοι οι αισθητήρες του συστήματος βαθμονομούνται σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων των καμερών.



Σχήμα 2.19 Διάταξη της ηλεκτρονικής πλακέτας των αισθητήρων του V10.
[\[http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/, 4/2015\]](http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/)

Το συνολικό βάρος του V10 υπολογίζεται στα 5.7kg όταν λειτουργεί αυτόνομα και 6.8kg με τον επιβατηγό δέκτη GNSS R10.

Οι 2 μπαταρίες του V10 είναι τοποθετημένες στην κάτω άκρη του στυλεού, ώστε το βάρος να διαμοιράζεται σε όλο το μήκος για μια εργονομικότερη ισορροπία. Η ονομαστική τάση των μπαταριών ανέρχεται στα 7.4V ενώ η χωρητικότητά τους στις 3.7Ah. Έτσι, το σύστημα σε πλήρη φόρτιση παρέχει αυτονομία για τη λήψη 700 πανοραμάτων σε περίπου 8 ώρες.

Επιπλέον το V10 προστατεύεται τόσο από το νερό και τη σκόνη (IP54) όσο από πτώσεις και κραδασμούς. Ο σχεδιασμός του λοιπόν, διατηρεί ανεπηρέαστα τα στοιχεία της βαθμονόμησης και διακρίβωσής του ανάλογα με την καταπόνηση που δέχεται. Αρχικά το προστατευτικό περίβλημα που αναφέρθηκε προστατεύει το σύστημα σε περίπτωση πτώσης από τα δύο μέτρα σε τσιμέντο.

Οι κατακόρυφες τοποθετήσεις, που αποτελούν και τη συνηθέστερη καταπόνηση κατά τη λειτουργία του V10 στο πεδίο, προκαλούν χτυπήματα και τραντάγματα στο σώμα του συστήματος. Αυτά αποσβένονται έως και 4 φορές, από ένα μηχανισμό απορρόφησης κραδασμών στην κάτω άκρη του στυλεού, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8 Άκρη απορρόφησης κραδασμών του V10.

[<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>, 4/2015]

Ο μηχανισμός απορρόφησης κραδασμών εξασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία του περιφερόμενου εικονολήπτη για 100000 κατακόρυφες πτώσεις από ύψος 5cm ή αντίστοιχα για 100 κατακόρυφες πτώσεις από ύψος 30cm.

Από εκεί και πέρα η βαθμονόμηση του συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 επηρεάζεται και χρειάζεται να επαναληφθεί.

Στην πρώτη περίπτωση η επιβράδυνση που επιδρά στο σώμα του εικονοσυστήματος σε μία πτώση υπολογίζεται εργαστηριακά στα 15g ενώ στη δεύτερη περίπτωση στα 100g. Η συγκεκριμένη τεχνική εκτός του ότι προστατεύει την ορθή λειτουργία του συστήματος, διευκολύνει το χειριστή κατά τη χρήση του [<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>].

2.5 Το Λογισμικό Πεδίου Trimble Access

Ο χειρισμός στο πεδίο, του συστήματος V10, πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού Trimble Access, το οποίο είναι σε θέση να χειρίζεται πλήθος γεωδαιτικών οργάνων της ομώνυμης εταιρείας. Η μονάδα ελέγχου αφορά

είτε το χειριστήριο αφής Trimble PC (model 2), είτε το χειριστήριο Trimble TSC3, ακολουθεί η εικόνα 2.9 με τις δύο μονάδες.



Εικόνα 2.9 Χειριστήριο Trimble TSC3 αριστερά και Trimble Tablet PC (model 2) δεξιά. [http://www.trimble.com/Survey, 5/2015]


Το συγκεκριμένο λογισμικό ενσωματώνει ένα πλήθος διαφορετικών εφαρμογών και δυνατοτήτων ανάλογα με το είδος της εργασίας (για παράδειγμα οδοποιία, ορυχεία, παρακολούθηση παραμορφώσεων κ.τ.λ.). Όσο αφορά το ολοκληρωμένο σύστημα V10 αυτό χειρίζεται μέσω της εφαρμογής γενικής τοπογράφησης (general survey).

Αρχικά δίνεται ένα όνομα για την εργασία που πρόκειται να πραγματοποιηθεί, η οποία θα είναι και η ονομασία του τελικού αρχείου σε μορφή <<ονομασία>>.job.

Στη συνέχεια επιλέγεται το σύστημα αναφοράς ενώ δίνεται η δυνατότητα διόρθωσης της απόκλισης του μαγνητικού βορρά από τον βορρά τετραγωνισμού της προβολής.

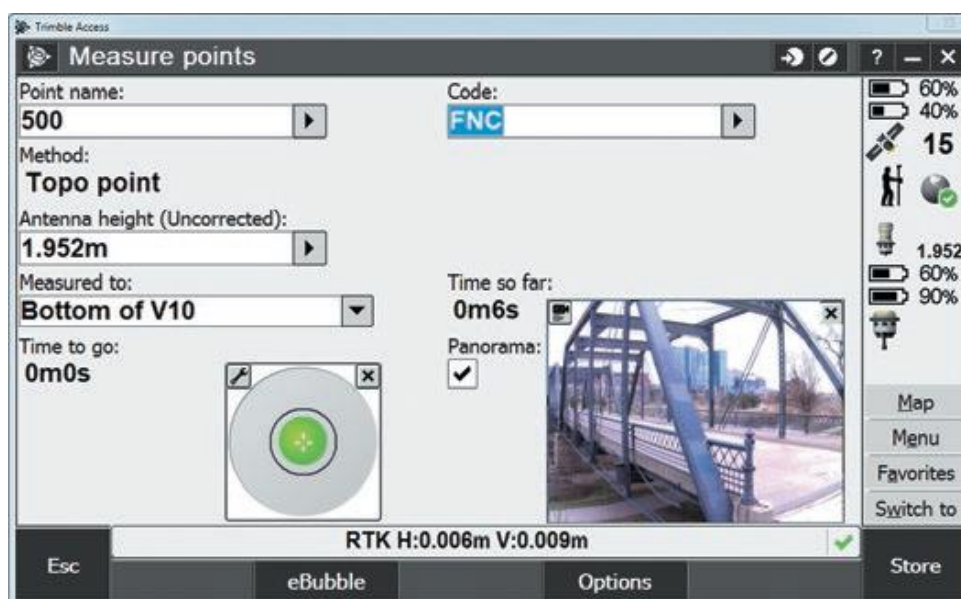
Σε επόμενο στάδιο επιλέγεται ο τρόπος μέτρησης των σημείων λήψης, που όπως έχει προαναφερθεί γίνεται σε πραγματικό χρόνο σε διασύνδεση με επιπλέον όργανα είτε για συμβατική τοπογράφηση με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό είτε για δορυφορικό κινηματικό εντοπισμό πραγματικού χρόνου με δέκτη GNSS εισάγοντας το αντίστοιχο ύψος κεραίας/στόχου μέσω της ίδιας εφαρμογής.

Στην περίπτωση που τα σημεία έχουν μετρηθεί σε προγενέστερο χρόνο δίνεται η δυνατότητα να επιλεγούν από λίστα ή να πληκτρολογηθούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τους στο πεδίο.

Αντίστοιχα αν μετρηθούν σε μεταγενέστερο χρόνο το μόνο που επιλέγεται πριν τη λήψη είναι το όνομα του σημείου και ο κωδικός του που αφορά συνήθως κάποιο χαρακτηριστικό του. Ακόμα ενεργοποιείται η τεχνική δημιουργίας εικόνων δυναμικού εύρους (HDR) και εμφανίζεται το σύμβολο  HDR στην οθόνη.

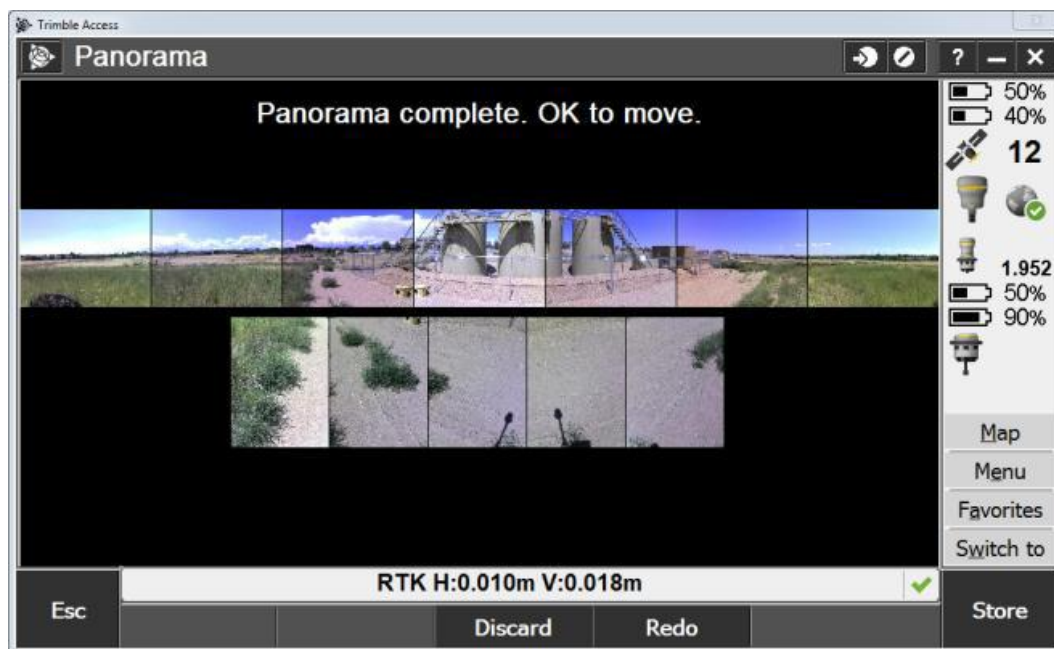
Ανεξαρτήτως λοιπόν με τη διαδικασία που έχει επιλεγεί για την μέτρηση των σημείων ο χρήστης τοποθετεί το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 στο σημείο λήψης, τον κατακορυφώνει με τη βοήθεια της ψηφιακής αεροστάθμης και του δίποδου στήριξης και προσανατολίζει την κεντρική κάμερα της κεφαλής (cam4) προς το αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Έπειτα το σημείο μετράται ή εισάγεται ή αφήνεται χωρίς προσδιορισμό των συντεταγμένων του και το σύστημα είναι πλέον σε θέση να πραγματοποιήσει τη λήψη του πανοράματος. Στην εικόνα 2.10 που ακολουθεί φαίνεται η βασική απεικόνιση της εφαρμογής της γενικής τοπογράφησης που δείχνει την ψηφιακή αεροστάθμη, το οπτικό πεδίο της κεντρικής κάμερας, τα χαρακτηριστικά του σημείου και της μεθόδου μέτρησης.



Εικόνα 2.10 Βασική απεικόνιση (display) της εφαρμογής γενικής τοπογράφησης του λογισμικού Trimble Access. [V10 technical overview]

Με την επιλογή του πλήκτρου έναρξης το πανόραμα λαμβάνεται και μετά από λίγα δευτερόλεπτα εμφανίζεται στην οθόνη της μονάδας χειρισμού όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11. Σε αυτό το στάδιο είναι δυνατό να ελεγχθεί κάθε εικόνα ξεχωριστά.



Εικόνα 2.11 Ολοκλήρωση και ανασκόπηση της λήψης του πανοράματος και των εικόνων. [V10 technical overview]

Εφόσον το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό οι εικόνες αποθηκεύονται (πλήκτρο store) αλλιώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται (πλήκτρο redo). Σε περίπτωση που τα γυροσκόπια ανιχνεύσουν περιστροφικές κινήσεις της κεφαλής, εμφανίζεται στην οθόνη σχετικό μήνυμα και η λήψη χρειάζεται να επαναληφθεί.

Τα τελικά δεδομένα που εξάγονται από το λογισμικό είναι το αρχείο της εργασίας σε μορφή job και ο φάκελος των εικόνων σε μορφή jpeg.

Τέλος αυτό που χρειάζεται να επισημανθεί είναι πως το λογισμικό παρέχει στο χειριστή αυτοματοποιημένες φωνητικές ειδοποιήσεις από εξωτερικό ομιλητή.

2.6 Το Λογισμικό Γραφείου Trimble Business Center

Το λογισμικό πακέτο TBC (Trimble Business Center) περιλαμβάνει ένα πλήθος από διαφορετικές ενότητες εφαρμογών που αποσκοπούν στην επίλυση, επεξεργασία, σχεδιασμό και μεταφορά γεωχωρικών δεδομένων

που συλλέγονται από τα γεωδαιτικά όργανα και τον τεχνολογικό εξοπλισμό της ομώνυμης εταιρείας.

Μερικές από αυτές τις εφαρμογές του προγράμματος είναι η επίλυση δορυφορικών βάσεων, ταχυμετρίας, γεωδαιτικών δικτύων, αεροτριγωνισμού κ.α. Στο πλαίσιο αυτό παρέχεται ξεχωριστή ενότητα για τη ροή εργασιών του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10.

Οι κύριες λειτουργίες που προσφέρει η εν λόγω ενότητα είναι:

- η επίλυση του τριγωνισμού του δικτύου των πανοραμάτων
- η μέτρηση σημείων ενδιαφέροντος
- η δημιουργία ενιαίων πανοραμικών εικόνων
- η εξαγωγή των παραγόμενων δεδομένων για λογισμικά τύπου CAD και GIS.

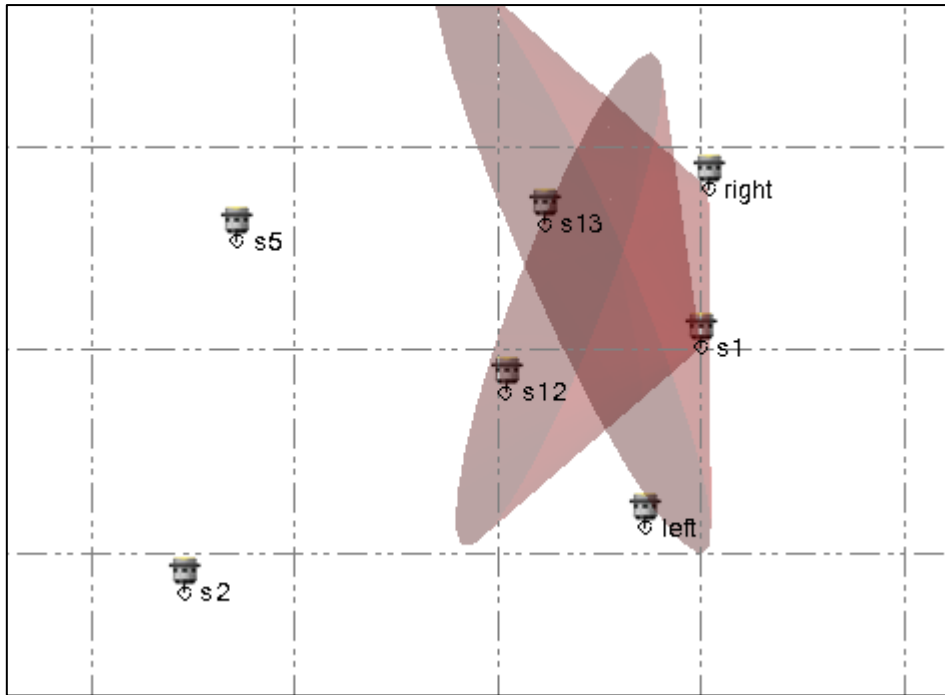
Στην πορεία για το τελικό αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται σχεδόν όλοι οι γνωστοί φωτογραμμετρικοί αλγόριθμοι ενώ οι διαφορετικές επιλογές που προσφέρει το λογισμικό επηρεάζουν εν γένει τον τρόπο αντιμετώπισης της αποτύπωσης, όπως για παράδειγμα τη διαμόρφωση των στάσεων λήψης και το πλήθος τους.

Ακολουθούν κάποιες βασικές λειτουργίες του λογισμικού σε σχέση με το εικονοσύστημα V10.

Αρχικά δημιουργείται μια καινούργια εργασία στο TBC (new project) και επιλέγονται ως μονάδες μετρήσεις τα μέτρα με την επιλογή "metric". Με την εντολή "import" εισάγεται στο TBC το αρχείο <<ονομασία.job>> που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή "General Survey" του λογισμικού Trimble Access στο πεδίο.

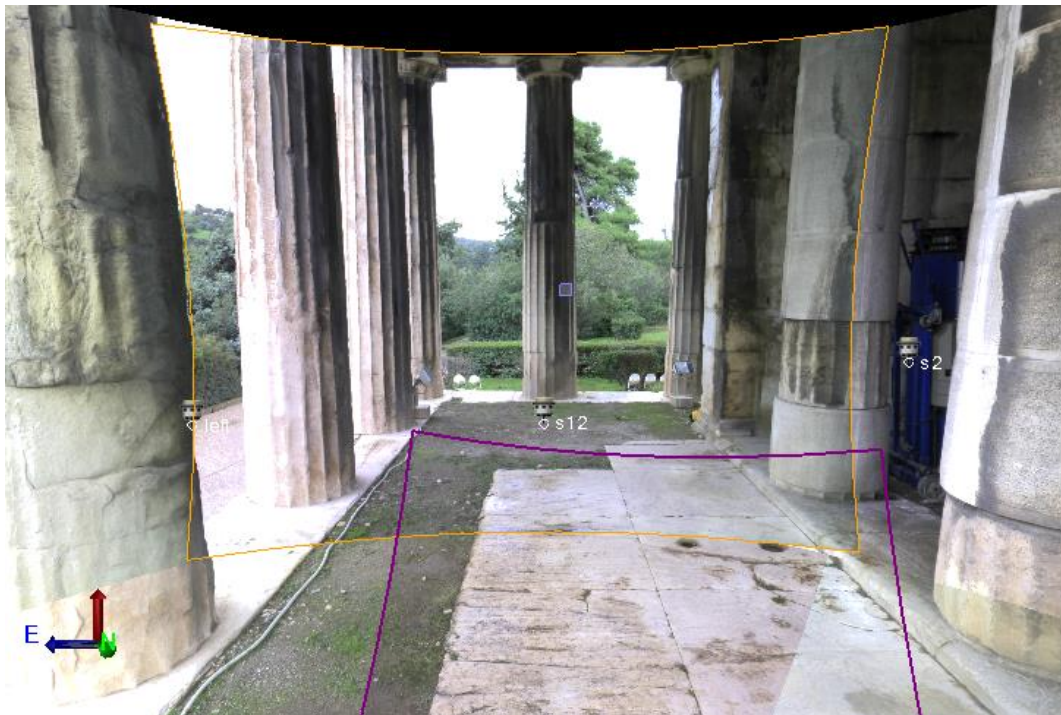
Έτσι εμφανίζονται στο παράθυρο της κάτοψης (plan view), εικόνα 2.12, τα σημεία λήψης με την ονομασία τους και σύμβολο της κεφαλής του V10.

Με την επιλογή ενός σημείου λήψης και την εντολή "New Station View" ανοίγει ένα νέο παράθυρο όπου είναι δυνατή η περιήγηση στις εικόνες του πανοράματος που επιλέχθηκε, εικόνα 2.13. Η περιήγηση πραγματοποιείται στις τρεις διαστάσεις με τις βοηθητικές εντολές "pan" και "zoom".



Εικόνα 2.12 Σημεία λήψης του V10 σε κάτοψη στο λογισμικό TBC.

Ο προσανατολισμός και το γωνιακό εύρος της θέασης που πραγματοποιεί ο χρήστης, αντίστοιχα ως προς τις δύο βοηθητικές εντολές στο παράθυρο "Station View", παρουσιάζεται στο παράθυρο της κάτοψης με κόκκινο χρώμα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.13 Τριδιάστατη περιήγηση στο TBC στις εικόνες του πανοράματος του V10.

Αυτό που χρειάζεται να τονιστεί είναι πως κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό TBC ο προσανατολισμός των πανοραμάτων στο χώρο γίνεται σε σχέση με τις πρωτογενείς μετρήσεις των αισθητήρων. Εφόσον το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας από τις εικόνες η ροή εργασιών συνεχίζεται με την επίλυση του επίγειου τριγωνισμού.

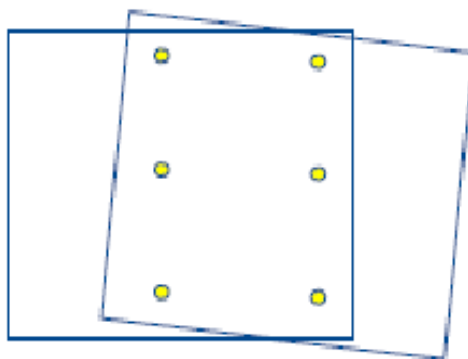
2.6.1 Είδη Σημείων Τριγωνισμού του V10

Τα σημεία που εμπλέκονται στην επίλυση του επίγειου τριγωνισμού των πανοραμάτων του V10 είναι τριών ειδών: σημεία σύνδεσης (tie points), φωτοσταθερά σημεία (control points) και σημεία ελέγχου (check points). Από αυτές τις τρεις κατηγορίες οι δύο πρώτες είναι οι περισσότερο κρίσιμες καθώς τα σημεία ελέγχου χρησιμοποιούνται μονάχα για τον έλεγχο του αποτελέσματος.

- Σημεία σύνδεσης

Τα σημεία σύνδεσης είναι άγνωστων γεωδαιτικών συντεταγμένων, δηλαδή κάθε ένα σημείο σύνδεσης προσθέτει τρεις αγνώστους στη συνόρθωση του τριγωνισμού. Τα στοιχεία που μετρούνται σε αυτά είναι οι εικονοσυντεταγμένες τους από τουλάχιστον δύο εικόνες /πανοράματα.

Σκοπός των σημείων σύνδεσης είναι να συσχετίσουν τις δέσμες των ακτίνων μεταξύ τους ώστε να τέμνονται όπως κατά τη στιγμή της λήψης. Οι αλληλοτομίες των σημείων σύνδεσης χρειάζεται να πληρούν τις προϋποθέσεις που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3 ενώ κάποιες ακόμη κρίσιμες παράμετροι αφορούν στον αριθμό τους και στην κατανομή τους.

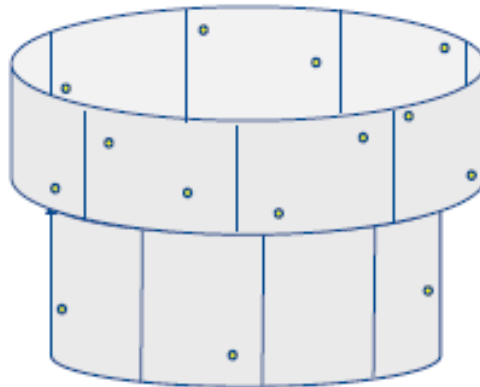


Σχήμα 2.20 Θέσεις Gruber για το σχετικό προσανατολισμό δύο εικόνων.
[V10 technical overview]

Στην κλασική φωτογραμμετρία η μία δέσμη αποτελείται από μία εικόνα και οι βέλτιστες θέσεις για τα σημεία σύνδεσης είναι οι γνωστές θέσεις Gruber, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.20.

Όσον αφορά το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 η μία δέσμη αποτελείται και από τις δώδεκα εικόνες του πανοράματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της γνωστής σχετικής θέσης των καμερών του συτήματος που προκύπτει από τη βαθμονόμηση του και επιτρέπει την αυτόματη σύνθεση των πανοραμάτων χωρίς σημεία σύνδεσης.

Παρόλα αυτά η κατανομή των σημείων σύνδεσης χρειάζεται να γίνεται τόσο οριζόντια στις διαφορετικές εικόνες όσο και κατακόρυφα ώστε να βελτιώνεται και να ισχυροποιείται η επίλυση. Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται μια καλή κατανομή των σημείων σύνδεσης σε όλο το εύρος της δέσμης του πανοράματος.



Σχήμα 2.21 Κατανομή των σημείων σύνδεσης στη δέσμη του πανοράματος.
[V10 technical overview]

Το πλήθος των σημείων σύνδεσης σχετίζεται με το είδος της επίλυσης του τριγωνισμού, δηλαδή με τον αριθμό των αγνώστων, όπως και με το βαθμό ελευθερίας της λύσης του.

Η παράμετρος του πλήθους των σημείων σύνδεσης θα εξεταστεί παρακάτω.

Σε χώρους όπου η υφή των εικόνων δεν έχει έντονες εναλλαγές και ουσιαστικά δεν υπάρχουν χαρακτηριστικά σημεία ή χαρακτηριστικές δομές του αντικειμένου που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία σύνδεσης τοποθετούνται τεχνητοί στόχοι.

Στην εικόνα 2.14 έχουν τοποθετηθεί τεχνητοί ανακλαστικοί στόχοι ασπρόμαυρου χρώματος για να σκοπευθούν και να χρησιμοποιηθούν ως σημεία σύνδεσης.

Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται σε περιοχές με έντονη βλάστηση ή σε περιοχές όπου το πεδίο είναι ανοιχτό χωρίς έντονο ανάγλυφο με αποτέλεσμα να φωτογραφίζεται η γραμμή του ορίζοντα και ένα μεγάλο μέρος της εικόνας να αποτελείται από τον ουρανό (ή αντίστοιχα από σύννεφα).



Εικόνα 2.14 Εξωτερικό πεδίο λήψης με τοποθετημένους τεχνητούς στόχους. [V10 technical overview]

Η μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων των σημείων σύνδεσης που εμπλέκονται στην επίλυση του τριγωνισμού πραγματοποιείται στο λογισμικό TBC με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος είναι η γνωστή χειροκίνητη διαδικασία εξεύρεσης και σκόπευσης των σημείων σύνδεσης, που είναι ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα.

Ο δεύτερος τρόπος αφορά σε αυτόματη διαδικασία, μέσω αλγορίθμου ψηφιακής συνταύτισης εικόνων που θα αναλυθεί παρακάτω.

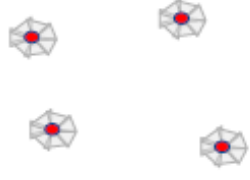
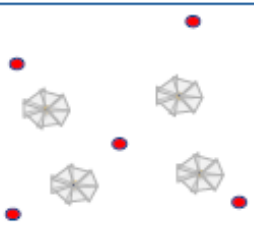

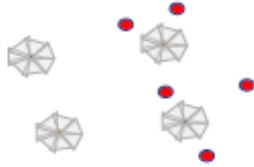
- Φωτοσταθερά σημεία

Τα φωτοσταθερά σημεία (control points) είναι σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων. Σκοπός τους είναι αφενός να συσχετίσουν τα πανοράματα μεταξύ τους αλλά η κύρια χρησιμότητάς τους είναι να μεταδώσουν τη γεωμετρική πληροφορία του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς στο φωτογραμμετρικό δίκτυο [Γεωργόπουλος Α.].

Φωτοσταθερά σημεία μπορούν να είναι είτε τεχνητοί στόχοι, είτε χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο αντικείμενο ή στον περιβάλλοντα χώρο, είτε τα σημεία λήψης. Η επιλογή τους είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον τρόπο επίλυσης του τριγωνισμού.

Η πρωτοπορία τους συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι ότι αξιοποιεί τα σημεία λήψης ως φωτοσταθερά σημεία χωρίς αυτά να είναι παρατηρήσιμα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις μετρούνται οι εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών σημείων από τουλάχιστον δύο εικόνες /πανοράματα.

Η κατανομή των φωτοσταθερών σημείων, είτε αυτά αφορούν στα σημεία λήψεις είτε σε προσημασμένα ή χαρακτηριστικά σημεία στις εικόνες, χρειάζεται να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το φωτογραμμετρικό δίκτυο να ισχυροποιείται γεωμετρικά. Για το λόγω αυτό χρειάζεται να αποφεύγεται η γραμμική διαμόρφωση των στάσεων λήψης ή η συγκέντρωση των φωτοσταθερών σημείων σε περιορισμένο χώρο.

	Στάσεις Λήψης	Προσημασμένα ή Χαρακτηριστικά Σημεία
Ισχυρή Γεωμετρία		
Ασθενής Γεωμετρία		

Σχήμα 2.22 Κατανομή φωτοσταθερών σημείων του συστήματος V10. [V10 technical overview]

- Σημεία Ελέγχου
Τα σημεία ελέγχου (check points) είναι γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων που υπολογίζονται με οποιαδήποτε γνωστή μεθοδολογία. Αποτελούνται είτε από προσημασμένα σημεία με τεχνητούς στόχους είτε από χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο αντικείμενο ή στον περιβάλλοντα χώρο.

Τα σημεία αυτά δεν χρησιμοποιούνται ως φωτοσταθερά για την επίλυση του δικτύου. Οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες επαναυπολογίζονται ως φωτογραμμετρικές εμπροσθοτομίες αφού λυθεί ο τριγωνισμός.



Εικόνα 2.15 Σημεία ελέγχου τριγωνισμού του V10. [V10 technical overview]

Οι διαφορές που προκύπτουν στα ζεύγη των γεωδαιτικών συντεταγμένων από τις δύο μεθόδους χρησιμοποιούνται για να εξεταστεί η ποιότητα της επίλυσης του τριγωνισμού και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στον προσδιορισμό των σημείων λεπτομέρειας.

2.6.2 Επίγειος Τριγωνισμός στο TBC

Η επίλυση του δικτύου του επίγειου τριγωνισμού σε οποιαδήποτε εφαρμογή του V10, πραγματοποιείται στο λογισμικό TBC με τη μέθοδο της δέσμης (bundle adjustment). Η συνόρθωση κατά δέσμες αποτελεί σήμερα τη συνηθέστερη μέθοδο και ως μοναδιαίο στοιχείο θεωρείται η δέσμη των ακτίνων της μιας εικόνας.

Στην περίπτωση του V10, όπως έχει προαναφερθεί, ως μοναδιαίο στοιχείο θεωρείται το πανόραμα και όχι η εικόνα. Δηλαδή το πανόραμα των δώδεκα εικόνων από μια στάση λήψης αποτελεί μία δέσμη, λόγω της αυτόματης σύνθεσης του που προκύπτει από τη βαθμονόμηση του εικονοσυστήματος.

Είναι γνωστό πως η εξίσωση συνθήκης στη συνόρθωση κατά δέσμες είναι η συνθήκη συγγραμμικότητας, σχέση 2.11. Η συγκεκριμένη συνθήκη ορίζει ότι η θέση του προβολικού κέντρου, η θέση του σημείου

στην εικόνα και η θέση του σημείου στο χώρο κείνται επ'ευθείας. Ο προσανατολισμός της ευθείας αυτής συσχετίζεται με τον προσανατολισμό του άξονα λήψης της εικόνας [Πέτσα, 2000].

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

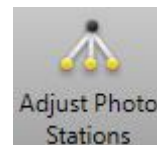
Οι εξισώσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας (2.11) είναι λυμένες ως προς τις εικονοσυντεταγμένες x, y οι οποίες θεωρούνται διορθωμένες ως προς το πρωτεύον σημείο, την ακτινική και έκκεντρη διαστρόφη των φακών και την αφηνικότητα του εικονοστοιχείου. Οι διορθώσεις αυτές, που αφορούν στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, γίνονται αυτόματα στο λογισμικό TBC σε κάθε ζεύγος εικονοσυντεταγμένων που μετράται.

Τα στοιχεία r_{ij} της σχέσης (2.11) αποτελούν μέρη του ορθοκανονικού 3×3 πίνακα στροφής R στις τρεις διαστάσεις, σχέση (2.12). Ουσιαστικά αναφέρονται στη διεύθυνση του άξονα λήψης της δέσμης, ή διαφορετικά στις στροφές του συτήματος της εικόνας ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Με X, Y, Z συμβολίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου που παρατηρείται και με X_0, Y_0, Z_0 οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου.

$$R = R_\omega R_\varphi R_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Η επίλυση του επίγειου τριγωνισμού ξεκινά με την εντολή "Adjust Photo Stations" από την καρτέλα "V10 Workflow" του λογισμικού TBC. Η συγκεκριμένη εντολή ανοίγει αντίστοιχα ένα παράθυρο με τρεις καρτέλες που αφορούν:



- στην επιλογή του μαθηματικού μοντέλου
- στους τρόπους μέτρησης των σημείων σύνδεσης
- στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

➤ Επιλογή Μαθηματικού Μοντέλου

Η πρώτη καρτέλα έχει την ονομασία "Setup Type" και σε αυτήν γίνεται μία επιλογή που αφορά στο είδος της εγκατάστασης των πανοραμάτων ως προς τα σημεία λήψης γεγονός που καθορίζει το μαθηματικό μοντέλο και ειδικότερα το διάνυσμα των αγνώστων. Η προεπιλογή σε αυτήν την καρτέλα, κατά την εισαγωγή μιας νέας εργασίας του συστήματος, είναι πάντα "Raw Sensor Values" από την οποία όμως δεν προκύπτει επίλυση.

Αυτό σημαίνει ότι τα πανοράματα αρχικά τοποθετούνται στα σημεία λήψης σε σχέση με τις πρωτογενής τιμές των αισθητήρων, δηλαδή το μετρημένο μαγνητικό αζιμούθιο και τις μετρημένες αποκλίσεις από την κατακόρυφο. Η επίλυση του τριγωνισμού πραγματοποιείται με τις υπόλοιπες τρεις επιλογές που εξετάζονται παρακάτω ξεχωριστά.

- **Azimuth Only**

Με την επιλογή "Azimuth Only" διορθώνεται μόνο ο οριζόντιος προσανατολισμός των πανοραμάτων, δηλαδή η τιμή της μαγνητικής πυξίδας ενώ όλες οι άλλες παράμετροι θεωρούνται γνωστές.

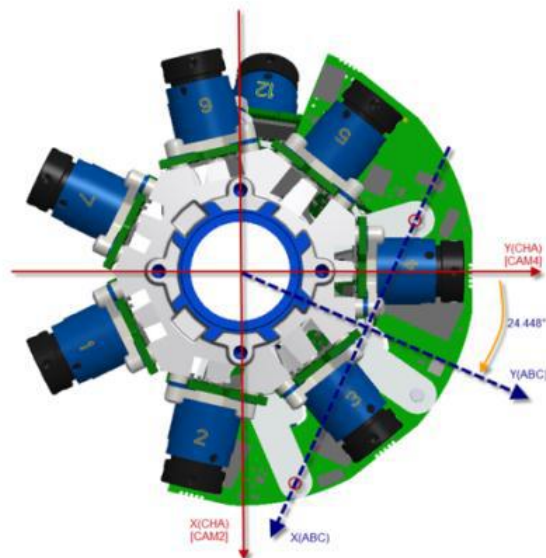
Έτσι κάθε πανόραμα εισάγει στο μοντέλο της συνόρθωσης έναν άγνωστο που πιθανότατα πρόκειται για την γωνία κ , η οποία εκφράζει την αριστερόστροφη γωνία που χρειάζεται να στραφεί το σύστημα συντεταγμένων της κεφαλής του V10 ώστε να ταυτιστεί με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Το σύστημα λύνεται με δύο σημεία σύνδεσης ανά πανόραμα ενώ προτείνονται τέσσερα και περισσότερα για μια πιο ευσταθή λύση με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Κάθε σημείο σύνδεσης εισάγει τρεις αγνώστους στην επίλυση που αφορούν στις γεωδαιτικές τους συντεταγμένες.

Ένα σύστημα λοιπόν, δυο πανοραμάτων με δύο σημεία σύνδεσης θα είχε οχτώ αγνώστους, όπως παρουσιάζεται στο διάνυσμα της σχέσης 2.13, με οχτώ εξισώσεις, που πρόκειται για τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις των εικονοσυντεταγμένων των σημείων σύνδεσης από τη συνθήκη συγγραμμικότητας

$$x = [\kappa_1 \quad \kappa_2 \quad X_1 \quad Y_1 \quad Z_1 \quad X_2 \quad Y_2 \quad Z_2]^T \quad (2.13)$$

Βέβαια αυτό δεν σημαίνει ότι οι υπόλοιπες παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού είναι γνωστές αλλά παραμετροποιούνται σε σχέση με την γωνία κ και τις πρωτογενείς μετρήσεις στο πεδίο. Η δυνατότητα αυτή έγκειται στην υψηλή ακρίβεια μέτρησης των αποκλίσεων από την κατακόρυφη θέση. Αναλυτικότερα, όπως έχει προαναφερθεί οι σχετικές θέσεις των καμερών είναι γνωστές ως προς το εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του V10. Δηλαδή για το κάθε ένα από τα 12 συστήματα εικονοσυντεταγμένων των καμερών είναι γνωστά τα στοιχεία του εξωτερικού του προσανατολισμού στο εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του V10 ή διαφορετικά είναι γνωστές οι 3 μεταθέσεις του προβολικού κέντρου κάθε κάμερας (dX_i , dY_i , dZ_i) και οι 3 στροφές του άξονα λήψης ($d\omega_i$, $d\phi_i$, $d\kappa_i$), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23 Η γωνία $d\kappa$ του άξονα λήψης της κάμερας 4 ως προς το σύστημα αναφοράς του V10. [V10 technical overview]

Άρα εφόσον υπολογιστεί η μετάθεση και η στροφή του εσωτερικού συστήματος συντεταγμένων του V10 σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, στη συνέχεια υπολογίζονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού όλων των καμερών για μία στάση λήψης.

Το μέτρο του διανύσματος της μετάθεσης, του συστήματος του V10 σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, είναι γνωστό καθώς υλοποιείται στο χώρο από τον στυλεό του. Δηλαδή από την κάτω άκρη του στυλεού που τοποθετείται πάνω στο σημείο λήψης

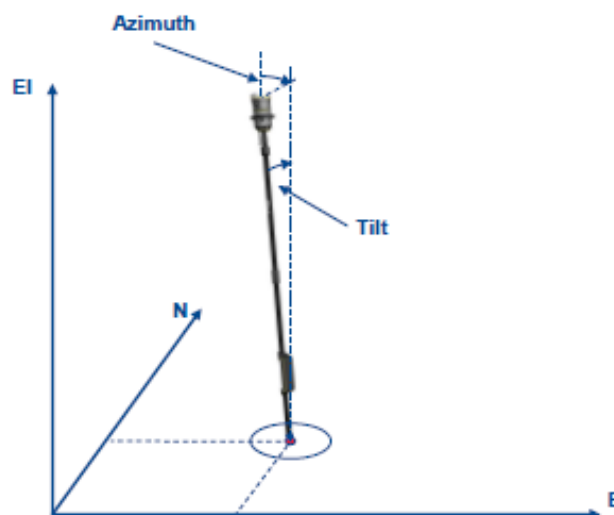
έως το ύψος του φωτογραμμετρικού κέντρου που υλοποιεί την αρχή του εσωτερικού συστήματος του V10.

Η απόσταση αυτή ορίζεται h στο παρόν υποκεφάλαιο και υπολογίζεται εργαστηριακά με μεγάλη ακρίβεια στα 2.061m.

Αντίστοιχα η οριζόντια απόσταση μεταξύ του φωτογραμμετρικού κέντρου και του σημείου λήψης, η οποία έχει αναφερθεί ως εκκεντρότητα (e) στο υποκεφάλαιο 2.4 και στο σχήμα 2.18, μπορεί εύκολα να υπολογισθεί σύμφωνα με τη σχέση (2.14) από τις μετρήσεις των αισθητήρων των κλίσεων ω, φ ως προς τους άξονες X, Y του εσωτερικού συστήματος του V10, και της απόστασης h με ακρίβεια της τάξης $\pm 1.5\text{mm}$ δηλαδή σε πολλές περιπτώσεις καλύτερα από την αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης.

$$e = \sqrt{h^2 \sin^2 \varphi + h^2 \sin^2 \omega} \quad (2.14)$$

Η εκκεντρότητα e και η απόσταση h δημιουργούν ένα ορθογώνιο τρίγωνο, η προβολή του οποίου στο οριζόντιο επίπεδο διαμορφώνει ένα γεωμετρικό τόπο που αντιστοιχεί σε κύκλο για όλες τις τιμές της γωνίας κ όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24. Ο κύκλος αυτός δείχνει τις υποψήφιες οριζόντιες θέσεις του φωτογραμμετρικού κέντρου του V10 και άρα τους άπειρους συνδυασμούς των γωνιών ω, φ του εσωτερικού συστήματος αναφοράς.



Σχήμα 2.24 Η θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου του V10 ως προς το σημείο λήψης από τις μετρήσεις των αισθητήρων των κλίσεων. [V10 technical overview]

Η τελική γωνία κ_i ενός πανοράματος, που προκύπτει από την επίλυση της συνόρθωσης, διαμορφώνει τις τελικές γωνίες ω_i, ϕ_i που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των σημείων λεπτομέρειας. Επιπλέον με τον τρόπο αυτό ορίζεται η οριζοντιογραφική θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου και άρα των προβολικών κέντρων των καμερών στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Υψομετρικά η γωνία κ δεν εμπλέκεται στον υπολογισμό παρά μόνο οι πρωτογενείς μετρήσεις των αισθητήρων, η απόσταση h και η συντεταγμένη Z του σημείου λήψης.

Επομένως οι εξισώσεις συνθήκης μετασχηματίζονται ώστε να περιλαμβάνουν δύο μετασχηματισμούς σε ένα βήμα. Αρχικά από το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, στο εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του V10 και έπειτα στο σύστημα συντεταγμένων κάθε εικόνας.

Οι εξισώσεις όμως δεν είναι γραμμικές ως προς τους αγνώστους οπότε απαιτείται γραμμικοποίηση κατά Taylor σε διαφορικά α΄τάξης και προσωρινές τιμές για τις γωνίες κ και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης. Το γεγονός αυτό εύκολα επιλύεται με την πρωτογενή μέτρηση της μαγνητικής πυξίδας. Το μαθηματικό μοντέλο σε μορφή πινάκων έχει την μορφή της σχέσης 2.15 [Αγατζιά Μπαλοδήμου, 2009].

$$A dx = dl + u \quad (2.15)$$

$$x = x_0 + dx \quad (2.16)$$

$$x = [\kappa_1 \quad \dots \quad \kappa_i \quad X_1 \quad Y_1 \quad Z_1 \quad \dots \quad Z_j]^T \quad (2.17)$$

Όπου A είναι ο πίνακας σχεδιασμού των αγνώστων, dx είναι οι διορθώσεις των αγνώστων σε σχέση με τις προσωρινές τιμές, dl είναι η διαφορά των μετρημένων εικονοσυντεταγμένων από τις εικονοσυντεταγμένες που υπολογίζονται σε σχέση με τις προσωρινές τιμές.

Έτσι η συνόρθωση με τη μέθοδο κατά δέσμες ανάγεται σε μία επαναληπτική διαδικασία που σταματάει όταν η λύση του διανύσματος x (σχέσεις 2.16, 2.17) συγκλίνει.

- **Full Orientation**

Με την επιλογή "Full Orientation" (πλήρης προσανατολισμός) διορθώνεται τόσο ο οριζόντιος όσο και ο κατακόρυφος προσανατολισμός των πανοραμάτων δηλαδή οι τιμές της μαγνητικής πυξίδας και των αισθητήρων των κλίσεων. Τα στοιχεία που σταθεροποιούνται αφορούν μόνο τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων λήψης.

Με τον τρόπο αυτό το κάθε πανόραμα εισάγει στο μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης τρεις αγνώστους που αφορούν στις στροφές ω , ϕ , κ . Έτσι ο ελάχιστος αριθμός σημείων σύνδεσης που επιλύει το σύστημα είναι 6 ανά πανόραμα ενώ ο βέλτιστος αριθμός που προτείνεται είναι 8 και περισσότερα.

Για παράδειγμα ένα σύστημα 2 πανοραμάτων με 6 σημεία σύνδεσης έχει 24 αγνώστους που αφορούν στις 6 στροφές, 3 για κάθε πανόραμα, και στις 18 γεωδαιτικές συντεταγμένες, 3 για κάθε σημείο σύνδεσης.

Παράλληλα οι συνολικές εξισώσεις που μορφώνονται από την συνθήκη συγγραμμικότητας είναι 24 με τα μετρημένα στοιχεία να αποτελούν τις εικονοσυντεταγμένες. Αντίστοιχα το διάλυμα των αγνώστων έχει τη μορφή της εξίσωσης 2.18.

$$x = [\omega_1 \quad \phi_1 \quad \kappa_1 \quad \omega_2 \quad \phi_2 \quad \kappa_2 \quad X_1 \quad Y_1 \quad Z_1 \quad \dots \quad Y_6 \quad Z_6]^T \quad (2.18)$$

Οι εξισώσεις και σε αυτήν την περίπτωση εμπεριέχουν δυο μετασχηματισμούς, από το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, στο εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του συστήματος και στη συνέχεια στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας.

Η διαφορά έγκειται ότι η θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου ενός πανοράματος, άρα και η θέση των προβολικών κέντρων των εικόνων, συσχετίζονται με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου λήψης ως προς τις τρεις στροφές ω_i , ϕ_i , κ_i και την απόσταση h .

Ουσιαστικά οι διορθώσεις από τις τρεις στροφές ορίζουν τη θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου.

Το σύστημα βέβαια δεν είναι γραμμικό ως προς τους αγνώστους και απαιτείται γραμμικοποίηση και εξεύρεση προσωρινών τιμών. Η προσωρινή τιμή της γωνίας κ μπορεί να προσδιοριστεί από την πρωτογενή μέτρηση της μαγνητικής πυξίδας, ενώ αντίστοιχα για

τις γωνίες ω , ϕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ποσότητα e και η απόσταση h σε συνδυασμό με το μαγνητικό αζιμούθιο για ταχύτερη σύγκλιση της λύσης.

Από την έκδοση του TBC 3.40 και μετά δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής στον επίγειο τριγωνισμό κατά δέσμες φωτοσταθερών σημείων και τοπομετρικά μετρημένων αποστάσεων.

Τα φωτοσταθερά σημεία πέραν του ότι μεταδίδουν τη γεωμετρική πληροφορία του γεωδαιτικού δικτύου αναφοράς, παρατηρούνται φωτογραμμετρικά χωρίς να εισάγουν αγνώστους στο σύστημα. Με τον τρόπο αυτό το φωτογραμμετρικό δίκτυο ενισχύεται και οι βαθμοί ελευθερίας αυξάνονται αφού οι διορθώσεις από τις εξισώσεις τους αφορούν εξολοκλήρου τους αγνώστους των εμπλεκόμενων πανοραμάτων.

Οι τοπομετρικές μετρήσεις αφορούν μετρημένες αποστάσεις μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων του αντικειμένου που μπορεί να έχουν προκύψει από οποιαδήποτε γνωστή μέθοδο. Οι παρατηρήσεις αυτές πιθανότατα εισάγονται στην επίλυση ως δεσμεύσεις που κάθε μια προσθέτει έναν βαθμό ελευθερίας. Το πρόβλημα με αυτόν τον τρόπο ανάγεται στη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων με δεσμεύσεις και παίρνει τη μορφή συστήματος εξισώσεων των σχέσεων 2.19 [Αγατζά Μπαλοδήμου, 2009], [Ιωαννίδης X.].

$$\begin{aligned} A dx &= dl + u \\ C dx &= w \end{aligned} \quad (2.19)$$

Όπου C είναι ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων στις εξισώσεις των δεσμεύσεων και w η διαφορά των σταθερών όρων από τις προσωρινές τιμές.

Οι άγνωστοι που εμπλέκονται στις εξισώσεις των δεσμεύσεων αφορούν στις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης.

- **Standard Resection**

Με την επιλογή "Standard Resection" (τυπική οπισθοτομία) διορθώνεται τόσο ο προσανατολισμός των πανοραμάτων όσο και η θέση τους στο χώρο.

Όπως πραγματοποιείται σε μια κλασσική φωτογραμμετρική διαδικασία.

Αυτό σημαίνει ότι κάθε πανόραμα εισάγει 6 καθοριστικές παραμέτρους στο διάλυμα των αγνώστων που αφορούν στα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i} , ω_i , φ_i , κ_i .

Η συγκεκριμένη επιλογή, στην περίπτωση που τα σημεία λήψης είναι γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, μπορεί να λυθεί αποκλειστικά με σημεία σύνδεσης.

Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης όπως και οι πρωτογενής μετρήσεις των αισθητήρων χρησιμοποιούνται μόνο για τον προσδιορισμό των προσωρινών τιμών των αγνώστων. Το σύστημα λύνεται με 12 σημεία σύνδεσης ανά πανόραμα ενώ προτείνονται 14 και περισσότερα, με καθένα από τα οποία να εισάγει τρεις αγνώστους στην επίλυση.

Οι διορθώσεις λοιπόν των αγνώστων σε μια επανάληψη της συνόρθωσης κατά δέσμες αφορούν τόσο στις τρεις στροφές όσο και στη θέση του φωτογραμμετρικού κέντρου του V10.

Ταυτόχρονα το σύστημα της συνόρθωσης μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση φωτοσταθερών σημείων, που παρατηρούνται φωτογραμμετρικά, και δεσμεύσεις από τοπομετρικές μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων.

Η επιλογή Standard Resection λειτουργεί και στην περίπτωση που τα σημεία λήψης είναι άγνωστων γεωδαιτικών συντεταγμένων, δηλαδή όταν το σύστημα V10 χρησιμοποιείται ως μια τυπική ψηφιακή κάμερα.

Όμως σε αυτό το σενάριο η χρήση μετρημένων φωτοσταθερών σημείων στο πεδίο, τα οποία είναι ορατά από τα πανοράματα, γίνεται απαραίτητη.

Αυτό που αξίζει να επισημανθεί και για τις τρεις περιπτώσεις επίλυσης του τριγωνισμού, είναι πως οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων λήψης χρησιμοποιούνται είτε ως σταθεροί όροι, είτε για τον προσδιορισμό προσωρινών τιμών των αγνώστων. Δηλαδή δεν εμπλέκονται στην επίλυση ως παρατηρήσεις.

Το γεγονός αυτό συμπεραίνεται από τον τρόπο υπολογισμού των παρατηρήσεων, των αγνώστων και των βαθμών ελευθερίας.

Επιπλέον για τον ίδιο λόγο το μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης χρησιμοποιεί τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων. Εναλλακτικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο συνδυασμένης επίλυσης

τριγωνισμού με τη γενικευμένη μέθοδο συνόρθωσης που θα είχε τη μορφή της σχέσης 2.20. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι συντεταγμένες των σημείων λήψης χρησιμοποιούνται ως παρατηρήσεις και ο κανονικός πίνακας N διαμορφώνεται σε block-διαγώνιο πίνακα με περιθώριο [Ιωαννίδης Χ.].

$$Ax + Bu = w \quad (2.20)$$

Βέβαια τα εμπορικά λογισμικά πακέτα όπως το TBC είναι κλειστού κώδικα και τα μαθηματικά μοντέλα των επιλύσεων όπως και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν δεν είναι γνωστοί ούτε δημοσιοποιημένοι.

➤ Τρόπος Μέτρησης των Σημείων Σύνδεσης

Το επόμενο βήμα στην επίλυση του επίγειου τριγωνισμού στο TBC αφορά στον τρόπο μέτρησης των σημείων σύνδεσης.

Όπως έχει προαναφερθεί, αυτό μπορεί να γίνει είτε με αυτόματη διαδικασία είτε με χειροκίνητη. Η δεύτερη καρτέλα του παραθύρου "Adjust Photo Stations" έχει την ονομασία "Automatic" και αφορά στην αυτόματη διαδικασία ενώ η τρίτη καρτέλα έχει την ονομασία "Manual" και αφορά στην χειροκίνητη.

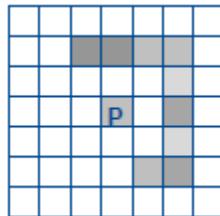
Η επιλογή αυτή είναι ένας γενικότερος προβληματισμός του χρήστη ενώ έχει άμεση σχέση με τη διαμόρφωση των στάσεων λήψης. Παρόλα αυτά το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στην επίλυση για συνδυασμό των σημείων σύνδεσης από τις δύο διαδικασίες.

Η **αυτόματη διαδικασία** προσδιορισμού σημείων σύνδεσης βασίζεται σε αλγορίθμους ψηφιακής συνταύτισης και μάλιστα σε συνδυασμό τους. Η τυπική ροή εργασιών που ακολουθεί το TBC για την εξεύρεση ομολογιών ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων με συγκεκριμένη δομή.
Αρχικά ανιχνεύονται χαρακτηριστικά σημεία που ακολουθούν συγκεκριμένα πρότυπα (feature based matching) στις γειτονικές περιοχές των εικονοστοιχείων τους.
2. Συνταύτιση των χαρακτηριστικών σημείων σε διαφορετικές εικόνες.

Κατόπιν πραγματοποιείται η συνταύτιση των σημείων του πρώτου βήματος στις διαφορετικές εικόνες μέσω επιφανειακής μεθόδου συνταύτισης (area based matching) και πιθανότατα με ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση ως μέτρο ομοιότητας.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω ενός υποπίνακα που αποτελεί τη μάσκα ή αλλιώς το παράθυρο αναφοράς, σχήμα 2.25, το οποίο "κινείται" ως προς έναν άλλον πίνακα που αποτελεί το παράθυρο αναζήτησης, το οποίο αποτελεί μέρος του πανοράματος. Μέσω διαδοχικών αφαιρέσεων σε όλες τις πιθανές θέσεις του παραθύρου αναφοράς στο παράθυρο αναζήτησης, ανιχνεύεται η θέση με τη μέγιστη σύγκλιση από την οποία προκύπτει η συνταύτιση - ομολογία ενός σημείου.



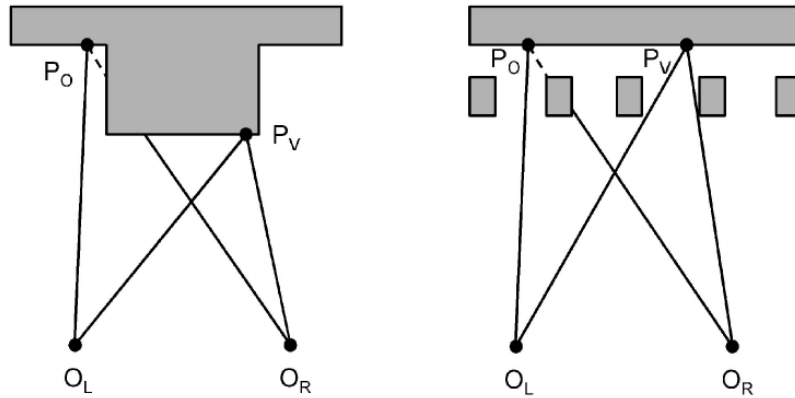
Σχήμα 2.25 Παράθυρο αναφοράς σε μεθόδους επιφανειακής συνταύτισης σημείων σύνδεσης. [V10 technical overview]

3. Ανίχνευση σφαλμάτων και έλεγχος λανθασμένων συνταυτίσεων.

Σε αυτό το βήμα εξαλείφονται τα λάθος σημεία σύνδεσης μέσω της εφαρμογής "blunder detection" του TBC. Αυτό συμβαίνει κατά τη συνόρθωση των δεσμών πιθανότατα μέσω γεωμετρικών δεσμεύσεων ή εναλλακτικά με κάποιο συντελεστή συσχέτισης.

Ο αυτόματος φωτοτριγωνισμός λειτουργεί αποδοτικότερα σε περιπτώσεις αεροφωτογραφίσεων, όπου οι βάσεις λήψης διατηρούνται μικρές σε σχέση με την απόσταση του αντικειμένου, παρά σε εφαρμογές επίγειων λήψεων με μεγάλες βάσεις λήψεων και έντονη εκτροπή λόγω αναγλύφου [Μαλτέζος Ε., 2013].

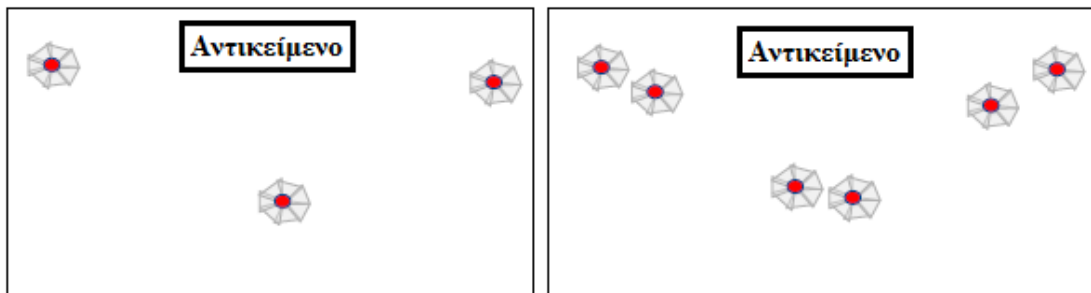
Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των έντονων αποκρύψεων, σχήμα 2.26, των σκιάσεων, των κινούμενων αντικειμένων (π.χ. αυτοκίνητα), των ραδιομετρικών μεταβολών μεταξύ ομόλογων σημείων, και της έντονης εναλλαγής της μέσης κλίμακας των εικόνων.



Σχήμα 2.26 Περιπτώσεις αποκρύψεων σε επίγεια λήψη. [Myron Z. et al, 2003]

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών και την αποδοτικότητα της αυτόματης διαδικασίας του επίγειου τριγωνισμού προτείνεται η πύκνωση των στάσεων λήψης από δίπολα, με μικρή βάση λήψης της τάξης των 2m όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.27.

Με τον τρόπο αυτό η ανίχνευση ομολογιών γίνεται ευκολότερη για τους αλγορίθμους ψηφιακής συνταύτισης καθώς οι γωνίες τομής μικραίνουν σε μέγεθος και έτσι αποφεύγονται οι αποκρύψεις, οι διαφορές στην κλίμακα των εικόνων και οι ραδιομετρικές μεταβολές. Αυξάνοντας τον αριθμό των στάσεων λήψης στο διπλάσιο.



Σχήμα 2.27 Πύκνωση των στάσεων λήψης με δίπολα δίμετρης βάσης λήψης. [V10 technical overview].

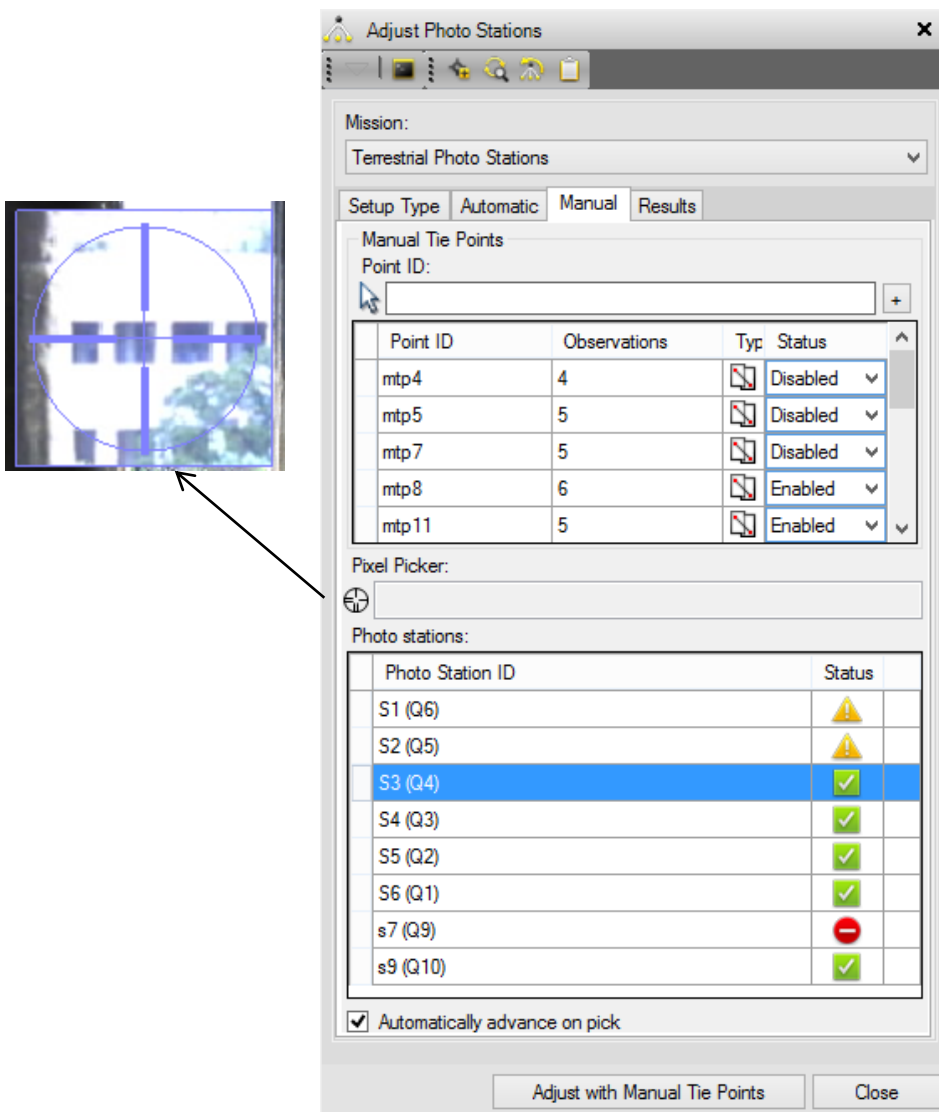
Τα σημεία σύνδεσης που προσδιορίζονται με αυτόματη διαδικασία είναι μειωμένης ακρίβειας, όμως το μεγάλο πλήθος τους επιτυγχάνει τη σύγκλιση της συνόρθωσης με πολύ καλά αποτελέσματα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου του αυτόματου φωτοτριγωνισμού, είναι ότι απαιτείται αυξημένος αριθμός πανοραμάτων, μεγάλη υπολογιστική

ισχύ ενώ η διασπορά των σημείων στο χώρο δεν μπορεί να ελεγχθεί αφού εμφανίζονται κατά σμήνη σε περιοχές με έντονη εναλλαγή της υψής.

Η χειροκίνητη διαδικασία προσδιορισμού σημείων σύνδεσης αφορά αποκλειστικά στην κριτική σκέψη, χωρική αντίληψη και εμπειρία του χρήστη. Αποτελεί μία επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά για το οριζόντιο γωνιακό εύρος των δεδομένων του V10 που είναι πανοραμικό.

Ο χειριστής πρέπει να ανιχνεύσει ομόλογα σημεία, διαμοιρασμένα σε καίριες θέσεις τόσο οριζοντιογραφικά όσο και κατακόρυφα, να τα σκοπεύσει με την ίδια ποιότητα σε διαφορετικές εικόνες και να τηρήσει ταυτόχρονα όλες τις γεωμετρικές προϋποθέσεις που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3.



Εικόνα 2.16 Παράθυρου χειροκίνητου επίγειου τριγωνισμού στο TBC και εστίαση με τη βοήθεια του "Pixel Picker".

Η τοποθέτηση τεχνητών στόχων για παράδειγμα διευκολύνει τη διαδικασία, όμως περισσότερα στοιχεία για τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις στο TBC θα αναπτυχθούν στην ενότητα 2.6.3.

Αρχικά εισάγεται το όνομα του σημείου σύνδεσης και επιλέγεται το θεματικό επίπεδο (layer) που θα σχεδιαστεί. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του "Pixel Picker" εικόνα 2.16, που πρόκειται ουσιαστικά για ένα παράθυρο μεγέθυνσης με σταυρόνημα, πραγματοποιείται η εστίαση και η παρατήρηση του σημείου σύνδεσης από όσα πανοράματα είναι αυτό ορατό.

Η επιλογή "Automatically advance on pick" πρόκειται ουσιαστικά για έναν αυτοματισμό που αρχίζει να λειτουργεί αφού μετρηθούν μερικά σημεία σύνδεσης. Με την πραγματοποίηση της σκόπευσης ενός σημείου ο αυτοματισμός εμφανίζει στην οθόνη το επόμενο πανόραμα προσανατολισμένο στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Ανάλογα με το μαθηματικό μοντέλο που έχει επιλεγεί για την επίλυση, δηλαδή τον ελάχιστο και βέλτιστο αριθμό σημείων σύνδεσης, και τις παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από κάθε σημείο λήψης διαμορφώνεται η ένδειξη της στήλης "Status" της εικόνας 2.16. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα σημεία λήψης τα οποία δεν έχουν αρκετές παρατηρήσεις για να λυθούν οι άγνωστοι, με κίτρινο χρώμα συμβολίζονται αυτά που έχουν τις ελάχιστες και με πράσινο χρώμα αυτά που έχουν τις βέλτιστες και περισσότερες.

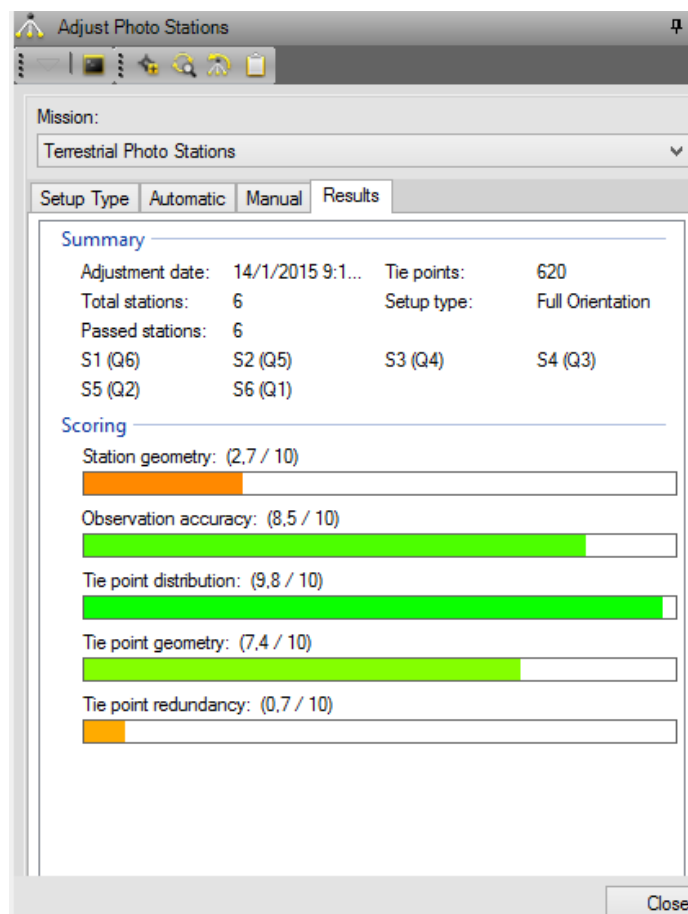
Όταν πλέον όλα τα σημεία λήψης αποκτήσουν την ένδειξη του πράσινου συμβόλου ο τριγωνισμός μπορεί να επιλυθεί.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χειροκίνητη διαδικασία είναι ότι ο αριθμός των πανοραμάτων μειώνεται (ακόμα και στο μισό αφού δεν χρειάζονται δίπολα), τα σημεία σύνδεσης μετρούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια, σε μικρότερο πλήθος, ενώ ελέγχεται η διασπορά τους. Παράλληλα μειώνεται ο χρόνος υπολογισμού της επίλυσης ενώ η εφαρμογή του "blunder detection" απαλείφει από τη διαδικασία σημεία σύνδεσης με κακή γεωμετρία και σημεία λήψης με αδύναμη λύση.

➤ Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Τριγωνισμού

Με την επίλυση του επίγειου τριγωνισμού κατά δέσμες με οποιαδήποτε τρόπο, εμφανίζεται στην τέταρτη καρτέλα με την ονομασία "results" μία

πρώτη αξιολόγηση της διαδικασίας, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17 Καρτέλα αποτελεσμάτων της εφαρμογής "Adjust Photo Stations" του TBC.

Τα στοιχεία της περιλαμβάνονται επίσης στο φύλλο αναφοράς του επίγειου τριγωνισμού με τη μέθοδο της δέσμης (terrestrial bundle adjustment report). Άρα η ανάλυση των αποτελεσμάτων της επίλυσης συνεχίζεται σε σχέση με το φύλλο αναφοράς που περιέχει περισσότερα στοιχεία.

Η αναφορά του επίγειου τριγωνισμού στο TBC στην πρώτη πινακίδα περιέχει κάποιες πληροφορίες σχετικά με το αρχείο της εργασίας και το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Στη συνέχεια υπό τον τίτλο "Summary" αναφέρεται ο αριθμός των σημείων λήψης και των σημείων σύνδεσης, το είδος της εγκατάστασης των πανοραμάτων, ενώ ακολουθεί πίνακας με τα σημεία λήψης που

επιλύθηκαν με επιτυχία με την ένδειξη "Passed stations" και αντίστοιχα αυτά που απέτυχαν με την ένδειξη "Failed stations".

Project file data		Coordinate System	
Name:	C:\Users\USER\Desktop\Διπλωματική \section_auto_orientation\section_test.vce	Name:	Scale Only
Size:	3 MB	Datum:	
Modified:	23/1/2015 4:48:22 μμ (UTC:2)	Zone:	
Time zone:	Χειμερινή ώρα GTB	Geoid:	
Reference number:		Vertical datum:	
Description:			

Terrestrial Bundle Adjustment Report

Summary

Adjustment date:	14/1/2015 9:10:45 μμ	Number of tie points:	620
Number of stations:	6	Station setup type:	Full Orientation

Passed stations: 6					
S1 (Q6)	S2 (Q5)	S3 (Q4)	S4 (Q3)	S5 (Q2)	S6 (Q1)

Εικόνα 2.18 Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος α.

Έπειτα υπό τον τίτλο "Scoring", εικόνα 2.19, εμφανίζονται πέντε μπάρες που αξιολογούν τη συνόρθωση κατά δέσμες σε σχέση με πέντε διαφορετικές παραμέτρους με άριστα το δέκα και αντίστοιχη χρωματική διαβάθμιση ανάλογα με την τιμή. Το κίτρινο και το πορτοκαλί χρώμα δείχνει αδυναμία ενώ το πράσινο χρώμα δείχνει ισχύ.

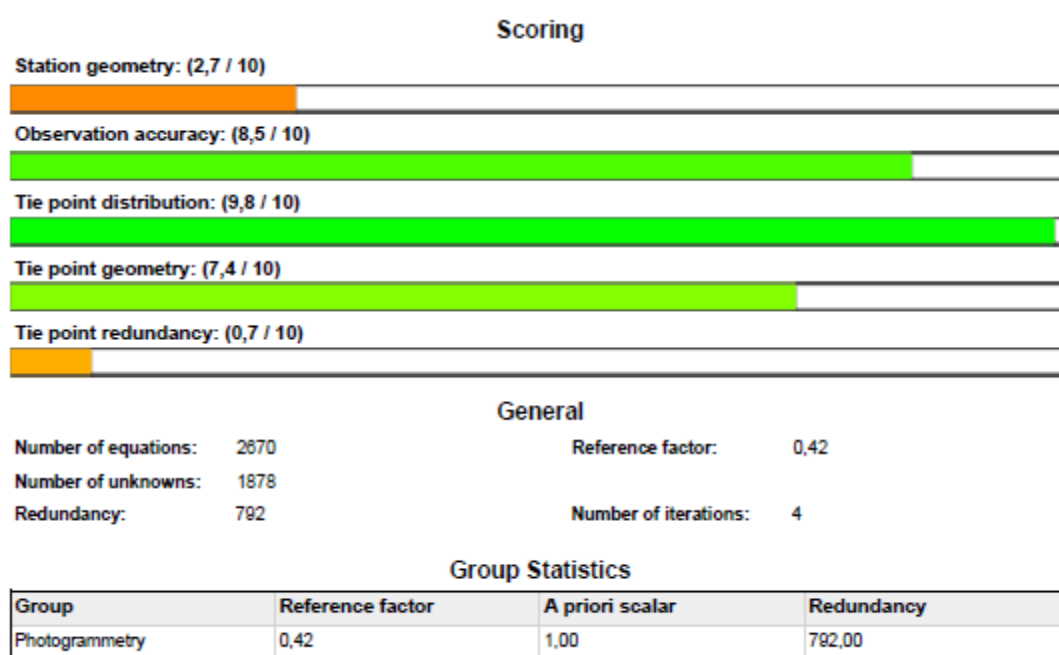
Η πρώτη μπάρα αφορά στη γεωμετρία του δικτύου των στάσεων λήψης και πιο συγκεκριμένα στις γωνίες θλάσης από μία στάση λήψης προς τις γειτονικές της. Αυτός ο δείκτης μειώνεται αισθητά όταν οι στάσεις λήψης διαμορφώνονται συνευθειακά, δηλαδή όταν οι γωνιακές σχέσεις των στάσεων δεν έχουν εναλλαγές δυσχεραίνοντας έτσι τη γεωμετρία του φωτογραμμετρικού δικτύου.

Η δεύτερη μπάρα αναφέρεται στο τυπικό σφάλμα της ακρίβειας μέτρησης των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων των σημείων σύνδεσης. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται σε σχέση με τα υπόλοιπα των εξισώσεων παρατήρησης και είναι ο σημαντικότερος και ο κρισιμότερος δείκτης της συνόρθωσης.

Οι τρεις επόμενες μπάρες αφορούν στα σημεία σύνδεσης αντίστοιχα ως προς τη διανομή τους στο χώρο, τη γεωμετρία των τομών σε συνδυασμό με τη θέση τους και τη συμμετοχή τους στο βαθμό ελευθερίας. Επεξηγηματικά για την 5^η μπάρα, στην περίπτωση που όλα τα σημεία

σύνδεσης παρατηρούνται από όλα τα σημεία λήψης ο βαθμός ελευθερίας μεγιστοποιείται και βαθμολογείται με 10/10.

Υπό τον τίτλο "General" παρουσιάζονται ο αριθμός των εξισώσεων παρατήρησης, το πλήθος των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων και ο βαθμός ελευθερίας (Redundancy). Ο δείκτης "Reference factor" αφορά στο λόγο των a-posteriori προς των a-priori μετρήσεων χωρίς όμως να διευκρινίζεται αν πρόκειται για το τυπικό σφάλμα ή τη μεταβλητότητα της μονάδας βάρους ή για κάποιο άλλο μέγεθος



Εικόνα 2.19 Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος β

Οι επόμενοι τρεις πίνακες της αναφοράς του φωτοτριγωνισμού, εικόνα 2.20, περιέχουν στοιχεία σε σχέση με τις στάσεις λήψης. Ο πίνακας "Station Connections" δείχνει το πλήθος των σημείων σύνδεσης ανά στάση λήψης όπως και το πλήθος των σημείων σύνδεσης που είναι κοινά από άλλες στάσεις λήψης.

Ο πίνακας "Station Statistics" δείχνει για την κάθε στάση λήψης την αξιολόγηση της γεωμετρίας της σε σχέση με τις γειτονικές της, τη κατανομή των σημείων σύνδεσης που παρατηρεί τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα καθώς και το βαθμό ελευθερίας που εισάγονται στην επίλυση από τις παρατηρήσεις της.

Station Connections

Total Tie Points	Station	Shared Tie Points @ Connected Station
115	S5 (Q2)	2 @ S1 (Q6), 2 @ S2 (Q5), 16 @ S3 (Q4), 40 @ S4 (Q3), 115 @ S6 (Q1)
115	S6 (Q1)	1 @ S1 (Q6), 2 @ S2 (Q5), 35 @ S3 (Q4), 38 @ S4 (Q3), 115 @ S5 (Q2)
122	S2 (Q5)	2 @ S6 (Q1), 2 @ S5 (Q2), 97 @ S4 (Q3), 101 @ S3 (Q4), 122 @ S1 (Q6)
122	S1 (Q6)	1 @ S6 (Q1), 2 @ S5 (Q2), 66 @ S4 (Q3), 94 @ S3 (Q4), 122 @ S2 (Q5)
167	S4 (Q3)	38 @ S6 (Q1), 40 @ S5 (Q2), 66 @ S1 (Q6), 97 @ S2 (Q5), 167 @ S3 (Q4)
167	S3 (Q4)	16 @ S5 (Q2), 35 @ S6 (Q1), 94 @ S1 (Q6), 101 @ S2 (Q5), 167 @ S4 (Q3)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
S1 (Q6)	1,87 / 10	10,00 / 10	123,8
S2 (Q5)	1,74 / 10	10,00 / 10	135,7
S3 (Q4)	4,29 / 10	9,75 / 10	182,6
S4 (Q3)	5,12 / 10	9,53 / 10	180,2
S5 (Q2)	1,55 / 10	10,00 / 10	81,7
S6 (Q1)	1,65 / 10	10,00 / 10	88,1

Station Status

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
S1 (Q6)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S2 (Q5)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S3 (Q4)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S4 (Q3)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S5 (Q2)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S6 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled

Εικόνα 2.20 Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος γ.

Αντίστοιχα ο τελευταίος πίνακας με την ονομασία "Station Status" παρουσιάζει στις δύο πρώτες στήλες για κάθε στάση λήψης το μαθηματικό μοντέλο και την επιτυχία ή την αποτυχία της επίλυσης του. Η τρίτη στήλη με την ονομασία "Position" δείχνει αν ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των στάσεων. Η τέταρτη στήλη με την ονομασία "orientation" δείχνει αν ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται οι πρωτογενής μετρήσεις της μαγνητικής πυξίδας και των αισθητήρων των κλίσεων.

Το τελευταίο κομμάτι της αναφοράς περιλαμβάνει αρχικά ένα δείκτη που δείχνει το μέσο όρο των παρατηρήσεων ανά σημείο σύνδεσης, δηλαδή από πόσα πανοράματα μετρίεται κάθε σημείο, όπως και τον αριθμό των χειροκίνητων σημείων που δεν πληρούσαν τις προϋποθέσεις ορθότητας και απαλείφθηκαν από τη διαδικασία.

Στη συνέχεια υπό τον τίτλο "Tie Point Back Projections", εικόνα 2.21, παρουσιάζεται ένας πίνακας με το τυπικό σφάλμα από τα υπόλοιπα των

φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων μετρημένο σε εικονοστοιχεία (pixel). Η πρώτη γραμμή του πίνακα αναφέρεται σε ελεύθερο δίκτυο συνόρθωσης δηλαδή πιθανότατα σε ένα μαθηματικό μοντέλο που δεν συσχετίζεται με τη γεωμετρία του γεωδαιτικού δικτύου αναφοράς και ως εκ τούτου δεν έχει κλίμακα.

Αντίστοιχα η δεύτερη και σημαντικότερη γραμμή του πίνακα αναφέρεται σε επίλυση με "περιορισμούς" ως προς το γεωδαιτικό δίκτυο και πως αυτό εκφράζεται γραμμικά σε απόσταση 10m. Το συγκεκριμένο σφάλμα είναι αυτό που θα μεταδίδεται σε όλες τις μετέπειτα μετρητικές διαδικασίες μετά τον φωτοτριγωνισμό. Η τελευταία γραμμή αναφέρεται στην μέγιστη απόκλιση των υπολοίπων και πως αυτή εκφράζεται γραμμικά σε απόσταση 10m.

Tie Point Statistics		
Observations per point:	2,15	Disabled manual observations: 0
Tie Point Back Projections		
Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,37	
Standard deviation (constrained)	0,70	0,002 m
Maximum deviation (constrained)	6,90	0,023 m

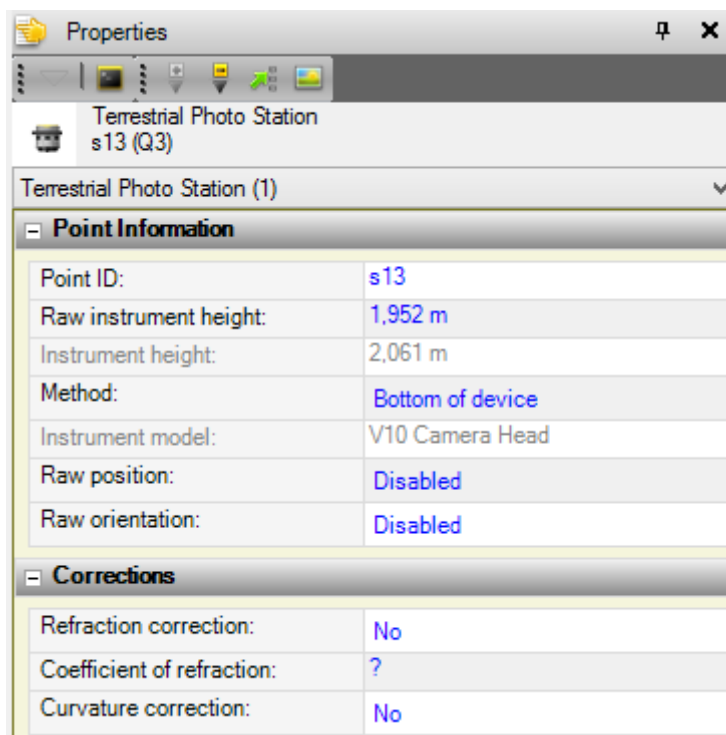
Εικόνα 2.21 Αναφορά επίγειου τριγωνισμού στο TBC μέρος δ.

Στην περίπτωση που η διαδικασία είναι χειροκίνητη η αναφορά του επίγειου τριγωνισμού συνεχίζει με έναν ακόμα πίνακα που περιέχει την ακρίβεια υπολογισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων σύνδεσης. Αυτό γίνεται και για τις τρεις διαστάσεις με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ενώ παρουσιάζεται και η τιμή της ισχύος του σχήματος. Αντίστοιχα αν έχουν παρατηρηθεί φωτοσταθερά σημεία υπάρχει ένας ακόμα πίνακας όπου περιέχονται τα υπόλοιπα τους.

Στην περίπτωση που η αυτόματη διαδικασία αποτύχει εν μέρει, δηλαδή κάποια πανοράματα δεν καταφέρουν να επιλυθούν, τότε το δίκτυο των σημείων σύνδεσης μπορεί να πυκνωθεί χειροκίνητα. Έτσι εντάσσονται στο φωτογραμμετρικό δίκτυο όλες οι στάσεις λήψης και ο τριγωνισμός επιλύεται εκ νέου.

Επιπλέον σε πολλές περιπτώσεις οι πρωτογενής μετρήσεις της μαγνητικής πυξίδας και οι παράμετροι της θέσης των σημείων λήψης χρειάζεται να απενεργοποιηθούν. Αυτό γίνεται είτε όταν το γεωδαιτικό

σύστημα αναφοράς είναι τοπικό αυθαίρετο έτσι ώστε τα πανοράματα να μην εξαναγκάζονται σε λάθος προσανατολισμό, είτε επειδή η μαγνητική πυξίδα επηρεάζεται έντονα από μεταλλικά αντικείμενα του περιβάλλοντα χώρου με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα της μέτρησης να αυξάνεται.



Εικόνα 2.22 Καρτέλα ιδιοτήτων των σημείων λήψης στο TBC.

Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται αυτόματα όταν χρειάζεται από την εφαρμογή αναγνώριση λαθών "Blunder Detection" αυξάνοντας όμως τον υπολογιστικό χρόνο και τον όγκο των περιττών δεδομένων. Διαφορετικά η απενεργοποίηση των παραμέτρων που περιγράφηκε μπορεί να γίνει μέσω της επιλογής (Selection) του κάθε σημείου λήψης και το άνοιγμα την καρτέλας των ιδιοτήτων (Properties) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.22.

Παράλληλα από τη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούν να ενεργοποιηθούν οι διορθώσεις λόγω της ατμοσφαιρικής διάθλασης και της καμπυλότητας της γης, επειδή οι λήψεις είναι οριζόντιες. Αν και στις περισσότερες εφαρμογές του V10 οι αποστάσεις που επιλέγονται είναι μικρές με αποτέλεσμα οι διορθώσεις αυτές να είναι αμελητέες. Αντίστοιχα σε εφαρμογές εσωτερικών χώρων οι διορθώσεις αυτές δεν είναι αναγκαίες.

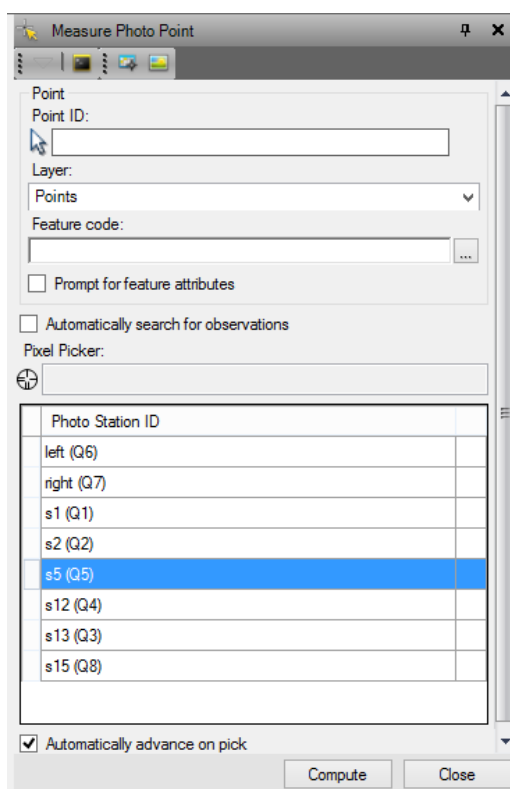
Από την έκδοση 3.50 του TBC δίνεται η δυνατότητα ομαδοποίησης των σημείων λήψης και επίλυσης του φωτοτριγωνισμού ξεχωριστά για κάθε

ομάδα πανοραμάτων. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά περιοχές μιας εφαρμογής που δεν μπορούν να έχουν κοινά σημεία σύνδεσης όπως για παράδειγμα ένας ανισόπεδος κόμβος ή ο εσωτερικός χώρος ενός κτιρίου με τον εξωτερικό.

Τέλος αυτό που αξίζει να τονιστεί σε σχέση με τον επίγειο τριγωνισμό του V10 είναι πως η ποιότητα του αποτελέσματος βασίζεται περισσότερο στη γεωμετρική διάταξη του φωτογραμμετρικού δικτύου παρά στους βαθμούς ελευθερίας. Το γεγονός αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά ανάμεσα στην αυτόματη και τη χειροκίνητη διαδικασία όπου ο ίδιος αριθμός πανοραμάτων λύνεται καλύτερα με μερικές δεκάδες χειροκίνητων σημείων σύνδεσης παρά με εκατοντάδες αυτόματων σημείων σύνδεσης.

2.6.3 Φωτογραμμετρικές Παρατηρήσεις στο TBC και Ακρίβεια

Με το πέρας μιας επιτυχημένης επίλυσης του επίγειου τριγωνισμού στο λογισμικό πακέτο TBC ο χρήστης είναι σε θέση να εξάγει μετρητική πληροφορία. Δηλαδή να υπολογίσει τις συντεταγμένες για οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο του αντικειμένου μέσα στο μοντέλο.



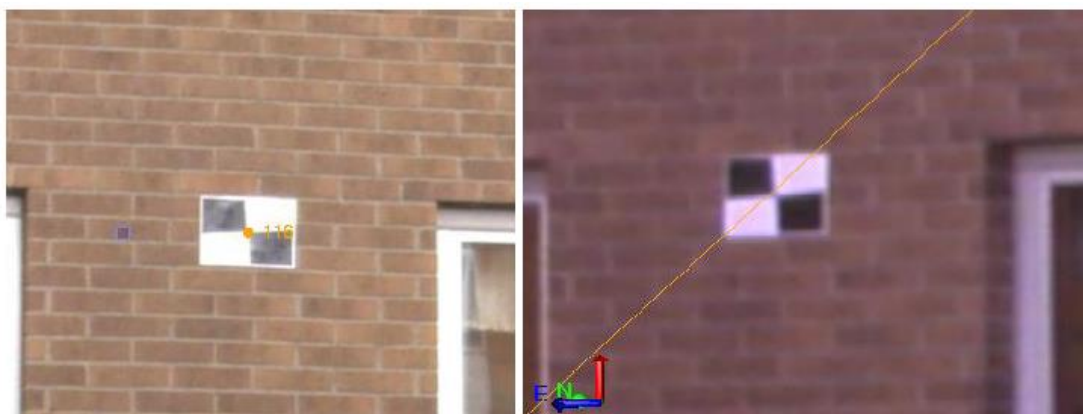
Εικόνα 2.23 Παράθυρο της εφαρμογής "Measure Photo Point" στο TBC.

Η κύρια λειτουργία για τη μέτρηση σημείων του αντικειμένου είναι η εφαρμογή "Measure Photo Point" το παράθυρο της οποίας φαίνεται στην εικόνα 2.23, που ουσιαστικά εκτελεί πολλαπλές εμπροσθοτομίες.

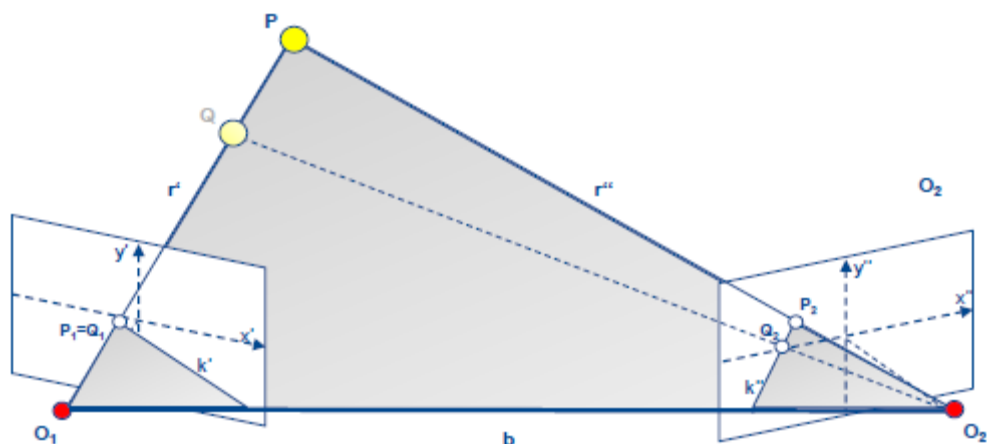
Η διαδικασία της παρατήρησης είναι όμοια με αυτήν που περιγράφηκε στη χειροκίνητη διαδικασία του τριγωνισμού. Δηλαδή εισάγεται η ονομασία του σημείου, επιλέγεται το θεματικό επίπεδο (layer) που θα σχεδιαστεί και με τις εντολές "pan" και "zoom" και το σταυρόνημα του "pixel picker" πραγματοποιείται η σκόπευση του σημείου από τουλάχιστον δύο πανοράματα όπου είναι ορατό και με την εντολή "compute" πραγματοποιείται ο υπολογισμός των γεωδαιτικών του συντεταγμένων.

Εφόσον πραγματοποιείται η πρώτη παρατήρηση από μια εικόνα προς το σημείο ενδιαφέροντος, το TBC εμφανίζει το ίχνος του επιπολικού επιπέδου στην εικόνα του επόμενου πανοράματος όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.24. Αυτό γίνεται ώστε να διευκολύνεται ο χρήστης στην πραγματοποίηση της εστίασης και της σκόπευσης του σημείου στις επόμενες παρατηρήσεις.

Το επιπολικό επίπεδο υλοποιείται στο χώρο από τις θέσεις των προβολικών κέντρων των εικόνων και τη θέση του σημείου ενδιαφέροντος στο χώρο των τριών διαστάσεων [Πέτσα, 2000]. Η τομή του επιπολικού επιπέδου με τα επίπεδα των εικόνων σχηματίζει σε αυτές τις επιπολικές γραμμές k' , k'' , όπως υποδεικνύεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.28.



Εικόνα 2.24 Ίχνος της επιπολικής γραμμής k'' στη δεύτερη εικόνα κατά την μέτρηση ενός σημείου. [V10 technical overview]



Σχήμα 2.28 Επιπολικό επίπεδο. [V10 technical overview]

Παράλληλα η εφαρμογή "Measure Photo Point" παρέχει την επιλογή "Automatically search for observations" που πραγματοποιείται από το παράθυρο της εικόνας 2.23. Η συγκεκριμένη λειτουργία συναντάται με τον όρο "Virtual DR" και ουσιαστικά πρόκειται για μέθοδο ψηφιακής συνταύτισης με το πρότυπο να διαμορφώνεται από την σκόπευση του χρήστη.

Δηλαδή ο χρήστης πραγματοποιεί την πρώτη παρατήρηση και στη συνέχεια η εφαρμογή αναζητεί ομολογίες στα υπόλοιπα πανοράματα για να λύσει την εμπροσθοτομία. Η χρήση βέβαια της συγκεκριμένης λειτουργίας χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή γιατί δεν είναι πάντοτε αποδοτική με αποτέλεσμα να εισάγονται μεγάλα σφάλματα στις γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου.


Εναλλακτικά από την έκδοση του TBC 3.40 και μετά ο χρήστης μπορεί να ορίσει ένα επίπεδο στο χώρο και να συνεχίσει τις παρατηρήσεις μονοσκοπικά. Για παράδειγμα σε μια όψη κτιρίου μπορεί να οριστεί ένα επίπεδο σε σχέση με τα άκρα της όψης ή καλύτερα το περίγραμμά της και τα ανοίγματα όπως όλα τα σημεία λεπτομέρειας να παρατηρηθούν μονοσκοπικά

Αντίστοιχα αν η υψομετρική πληροφορία ενός σημείου δεν είναι άμεσου ενδιαφέροντος είτε δεν είναι δυνατή η εξεύρεση ομολογίας κατά το κατακόρυφο επίπεδο, δίνεται η δυνατότητα επίλυσης των παρατηρήσεων μόνο οριζοντιογραφικά. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα για αυτήν τη λειτουργία αποτελούν οι κατακόρυφοι στύλοι (κολώνες ΔΕΗ/ΟΤΕ, φωτιστικά σώματα κτλ).

Με την έκδοση του TBC 3.50 έχει εισαχθεί η λειτουργία δημιουργίας νέφους σημείων. Το γεγονός αυτό υλοποιείται με μέθοδο πυκνής συνταύτισης σημείων όπου βρίσκονται ομολογίες για όλα τα εικονοστοιχεία των πανοραμάτων και όχι μόνο για διακριτά ή «πρόσφορα» σημεία. Έτσι ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει επιφάνειες, να υπολογίσει όγκους κ.α.

Με την εντολή "Points" εμφανίζεται στην οθόνη ένας πίνακας που περιέχει όλα τα σημεία της εργασίας με την ονομασία τους και την τριάδα των γεωδαιτικών τους συντεταγμένων. Αντίστοιχα με την εντολή "Photo Point" εμφανίζονται δύο πίνακες που περιέχουν δεδομένα και στατιστικά στοιχεία για τα σημεία που έχουν υπολογιστεί φωτογραμμετρικά.

Ο πρώτος πίνακας με την ονομασία "Photogrammetry Points" (εικόνα 2.25) περιλαμβάνει στην πρώτη στήλη την ονομασία του σημείου. Στη δεύτερη στήλη παρουσιάζεται αν είναι η επίλυση της εμπροσθοτομίας του συγκεκριμένου σημείου είναι αποδεκτή ή αν υπάρχει αδυναμία. Η τρίτη στήλη περιέχει τον αριθμό των παρατηρήσεων που συμμετέχουν στον προσδιορισμό των συντεταγμένων του σημείου.

Η τέταρτη στήλη παρουσιάζει την τιμή του δείκτη της ισχύος του σχήματος. Τα σημεία με αδύναμη επίλυση συμβολίζονται με  κίτρινη σημαία και αυτό συμβαίνει είτε επειδή η τιμή της ισχύος του σχήματος είναι μεγαλύτερη από 2.63 είτε το γωνιακό υπόλοιπο κάποιας παρατήρησης είναι μεγαλύτερο από 2' πρώτα λεπτά της μοίρας.

Photogrammetry Points				
Point ID	Status	Number of Observatio	Strength of Figur	
1	Flagged	2	1,314	
2	Resolved	2	1,308	
3	Resolved	2	0,994	
4	Flagged	2	0,984	

Εικόνα 2.25 Πίνακας με στοιχεία των φωτογραμμετρικών σημείων.

Ο δεύτερος πίνακας με την ονομασία "Observations", εικόνα 2.26, συμπληρώνεται σε σχέση με το κάθε σημείο που επιλέγεται στον προηγούμενο πίνακα. Η πρώτη στήλη του αφορά στα σημεία της παρατήρησης, δηλαδή το σημείο λήψης και το σημείο λεπτομέρειας. Η δεύτερη στήλη περιέχει τις γωνίες διεύθυνσης από τα σημεία λήψης σε μοίρες εξηκονταδικής μορφής. Η τρίτη και τέταρτη στήλη περιέχει την

οριζόντια απόσταση και υψομετρική διαφορά αντίστοιχα. Η πέμπτη και η έκτη στήλη αφορούν στα υπόλοιπα της επίλυσης εκφρασμένα σε γωνιακά μεγέθη μοιρών εξηκονταδικής μορφής κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα.

Observations					
Observation ID	Azimuth	H. Distance	V. Distance	H. Residual	V. Residual
▶ s1-2 (P470)	330°58'49"	9,001	1,361	0°00'11"	0°01'21"
right-2 (P471)	271°21'13"	4,755	1,379	0°00'11"	0°01'21"

Εικόνα 2.26 Πίνακας με τις παραμέτρους και τα υπόλοιπα της επίλυσης της εμπροσθοτομίας κάθε σημείου.

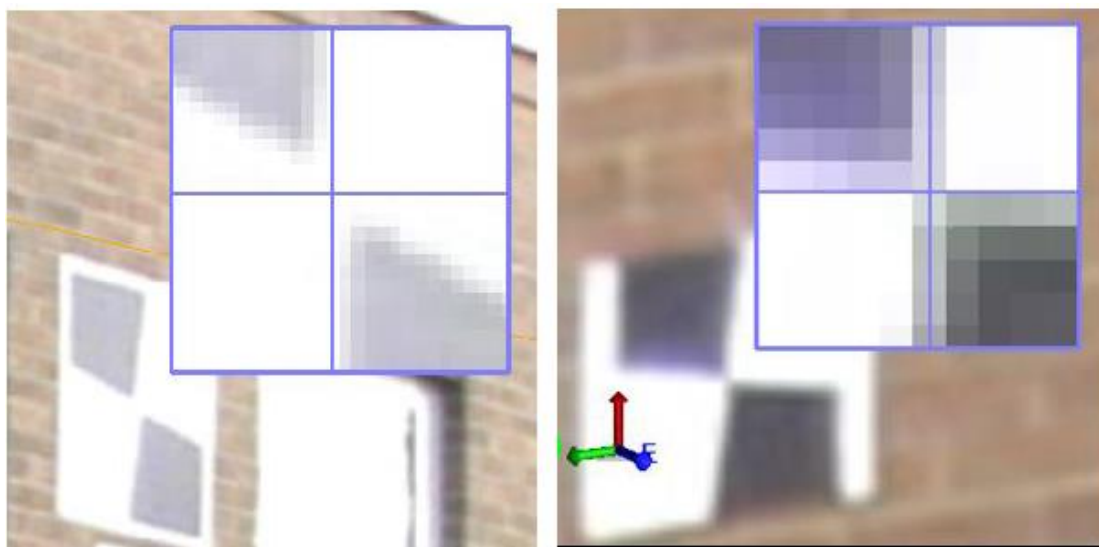
Η ακρίβεια των σημείων λεπτομέρειας που υπολογίζονται από το σύστημα του V10, επηρεάζεται από μία σειρά παραγόντων οι περισσότεροι από τους οποίους έχουν αναφερθεί. Επιγραμματικά λοιπόν η ακρίβεια εξαρτάται από:

- Τη διαμόρφωση των στάσεων λήψης και το πλήθος τους και πιο συγκεκριμένα από το λόγο της βάσης λήψης προς την απόσταση του αντικειμένου.
- Την ακρίβεια της βαθμονόμησης των καμερών και των αισθητήρων του συστήματος του V10.
- Την ακρίβεια μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης.
- Τη διαθεσιμότητα, το πλήθος και τη διασπορά φωτοσταθερών σημείων πάνω στο αντικείμενο και την ακρίβεια υπολογισμού των γεωδαιτικών τους συντεταγμένων.
- Την ακρίβεια μέτρησης των αισθητήρων του V10.
- Τον αριθμό, την κατανομή στο χώρο και το είδος (τεχνητοί στόχοι ή φυσικά αντικείμενα, αυτόματα ή χειροκίνητα) των σημείων σύνδεσης).
- Την ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων μέσα στο μοντέλο.

Η τελευταία παράμετρος σχετικά με την ακρίβεια σκόπευσης και ορισμού των σημείων, δηλαδή της μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων, εξαρτάται από την εμπειρία του χρήστη, την ποιότητα των εικόνων και τη δομή του σημείου που σκοπεύεται.

Η ποιότητα των εικόνων εξαρτάται από την ευκρίνεια, το φωτισμό, τη φωτεινότητα, την αντίθεση και την ανάλυση.

Έτσι τα κύρια προβλήματα που προκύπτουν σε σχέση με την ποιότητα των εικόνων είναι οι περιοχές με σκιάσεις και αντίστοιχα οι υπερεκτεθειμένες περιοχές. Στην εικόνα 2.27 παρουσιάζεται η αβεβαιότητα της παρατήρησης ενός τεχνητού στόχου όταν υπάρχει υπερέκθεση (αριστερά) και όταν η έκθεση είναι φυσιολογική (δεξιά). Βέβαια τα συγκεκριμένα προβλήματα αντιμετωπίζονται επαρκώς με την τεχνική δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους HDR.



Εικόνα 2.27 Αβεβαιότητα παρατήρησης ενός τεχνητού στόχου με υπερέκθεση. [V10 technical overview]

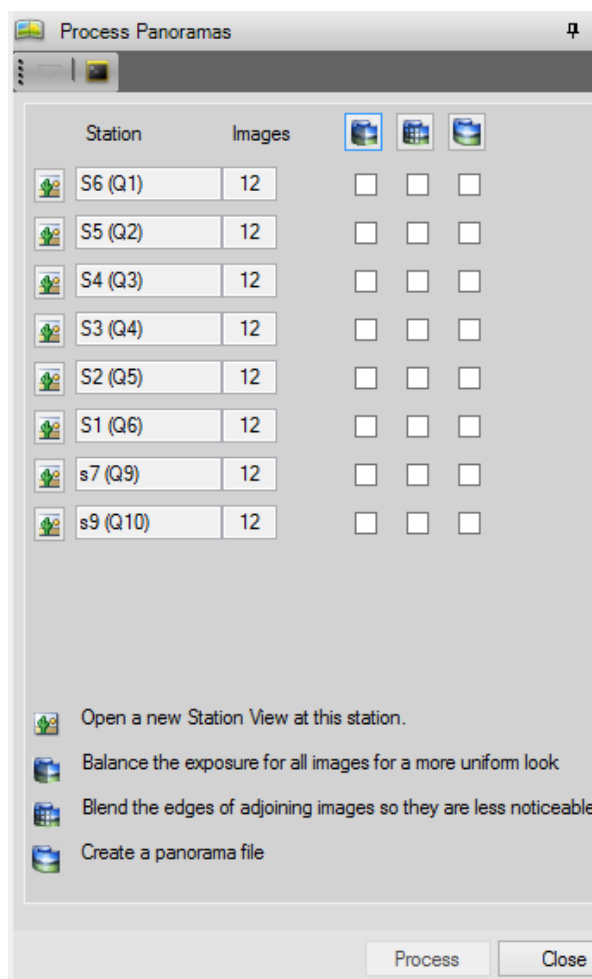
2.6.4 Επεξεργασία Πανοραμάτων

Το λογισμικόTBC παρέχει επίσης τη δυνατότητα επεξεργασίας των πανοραμάτων μέσα από την εφαρμογή "Process Panoramas" όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.28.

Οι λειτουργίες της εφαρμογής αφορούν στην επιλογή των φωτογραφιών, στην εξισορρόπηση της έκθεσης και την αφαίρεση των ακμών των συνενωμένων φωτογραφιών.

Οι παραγόμενες εικόνες μπορούν να εξαχθούν σε μορφή αρχείου .jpeg ή .html ή με γεωαναφορά στην εφαρμογή "Google Earth" σε μορφή αρχείου .kmz. Οι συγκεκριμένες εικόνες παρέχουν την εύκολη διάχυση της πληροφορίας της οπτικής τεκμηρίωσης του αντικειμένου και του

περιβάλλοντα χώρου τόσο ανάμεσα σε επαγγελματίες ενδιαφερόμενους όσο και σε μη επαγγελματίες.

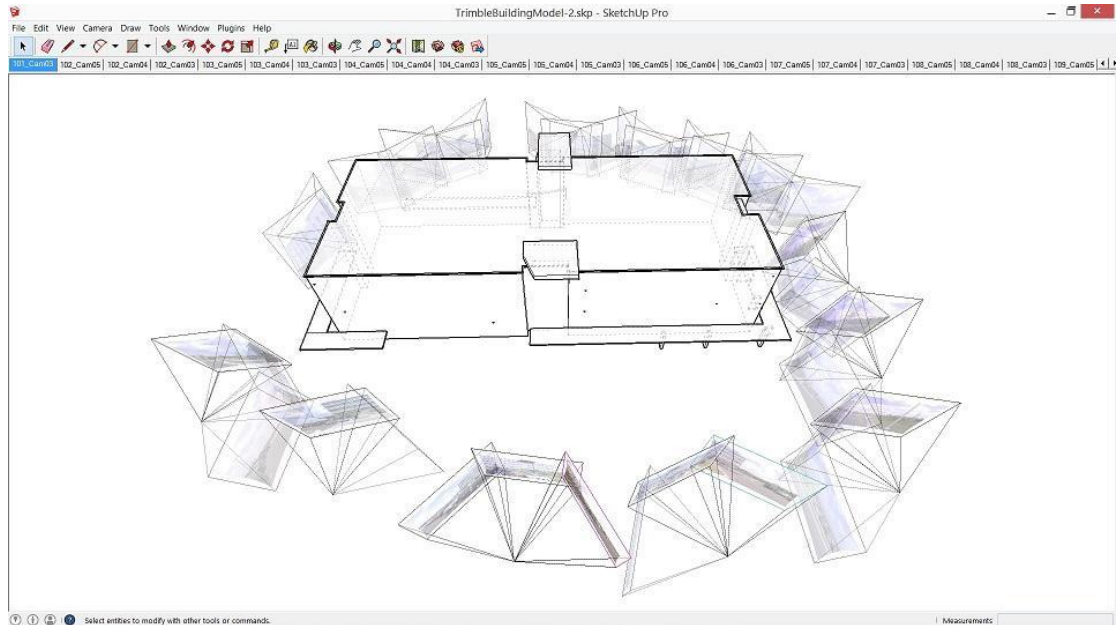


Εικόνα 2.28 Παράθυρο της εφαρμογής "Process Panoramas".

2.6. Διαλειτουργικότητα TBC και Sketch Up Pro

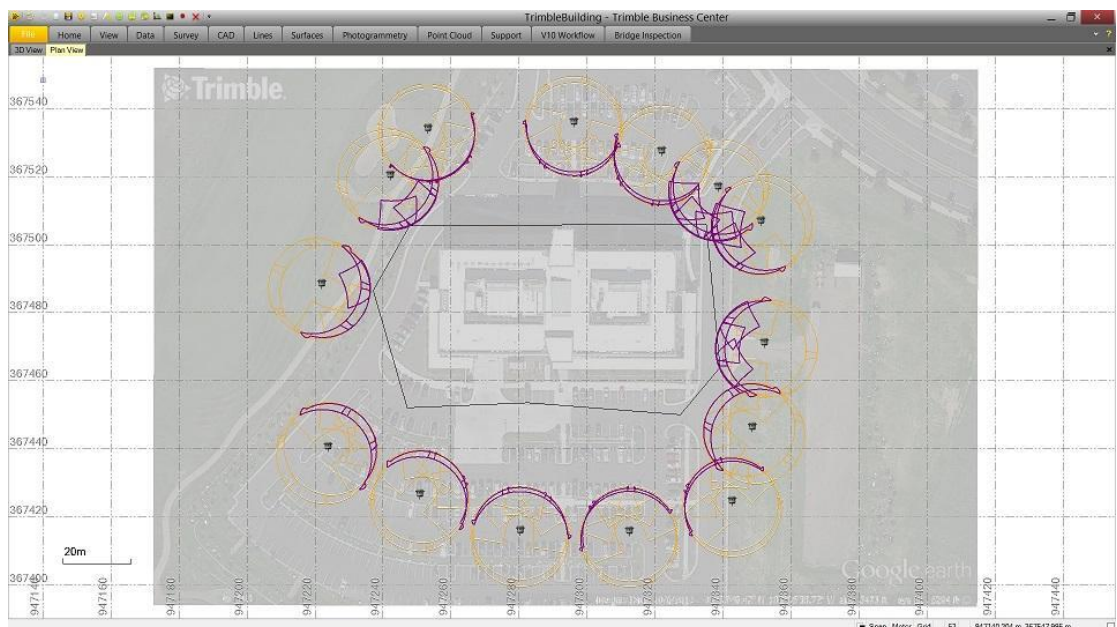
Το Sketch Up Pro είναι ένα λογισμικό πακέτο τριδιάστατης σχεδίασης που έχει αναπτυχθεί από την Google και στη συνέχεια από την Trimble. Από την έκδοση του TBC 3.40 και του Sketch Up Pro 2015 παρέχεται η δυνατότητα απευθείας εισαγωγής των προσανατολισμένων πανοραμάτων του V10 στο περιβάλλον του Sketch Up και τη σχεδίαση 3D μοντέλων από τις εικόνες όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 2.29.

Αρχικά ορίζεται ένα πολύγωνο στο TBC που περιέχει την περιοχή ενδιαφέροντος με τα φωτογραμμετικά υπολογισμένα σημεία που θα αποτελέσουν τους οδηγούς του σχεδιαστή σε σχέση με το ύψος και το πλάτος του αντικειμένου ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.30.



Εικόνα 2.29 Τριδιάστατη σχεδίαση στο Sketch Up από τις εικόνες του V10. [<http://sketchupdate.blogspot.gr/2014/11/using-trimble-vision-images-to-create.html>]

Με τον τρόπο αυτό εξάγεται ένα αρχείο σε μορφή .skp το οποίο περιέχει χαρακτηριστικά σημεία και τα σημεία λήψης με τις προσανατολισμένες φωτογραφίες που περιλαμβάνουν το πολύγωνο. Έτσι οι εικόνες με την περιττή πληροφορία δεν συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία.



Εικόνα 2.30 Ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος στο TBC για την εξαγωγή αρχείου .skp. [<http://sketchupdate.blogspot.gr/2014/11/using-trimble-vision-images-to-create.html>]

Με το άνοιγμα του αρχείου στο περιβάλλον του Sketch Up εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά σημεία και τα σημεία λήψης με τις εικόνες. Με την εντολή θέασης " Igloo view", όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.31, ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί στις εικόνες των διαφορετικών πανοραμμάτων και να ξεκινήσει τη σχεδίαση.



Εικόνα 2.31 Θέαση των πανοραμμάτων του V10 με την εντολή Igloo view στο Sketch Up. [<http://sketchupdate.blogspot.gr/2014/11/using-trimble-vision-images-to-create.html>]

Στη συνέχεια με τη επιλογή μιας επιφάνειας και την εντολή "Project" το τριδιάστατο μοντέλο έχει τη δυνατότητα να αποκτήσει φωτορεαλιστική υφή, εικόνα 2.32.



Εικόνα 2.32 Φωτορεαλιστική υφή του μοντέλου στο Sketch Up από τις εικόνες του V10. [<http://sketchupdate.blogspot.gr/2014/11/using-trimble-vision-images-to-create.html>]

Ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει το τελικό τριδιάστατο μοντέλο σε όποιο βαθμό λεπτομέρειας επιθυμεί, προσδίδοντας στα διαφορετικά υλικά κατάλληλα χρώματα. Στην εικόνα 2.33 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας.



*Εικόνα 2.33 Τριδιάστατο μοντέλο στο Sketch Up από τις εικόνες του V10 με υψηλό βαθμό λεπτομερειών.
[<https://www.youtube.com/watch?v=5Yc0KmDVZpY>]*

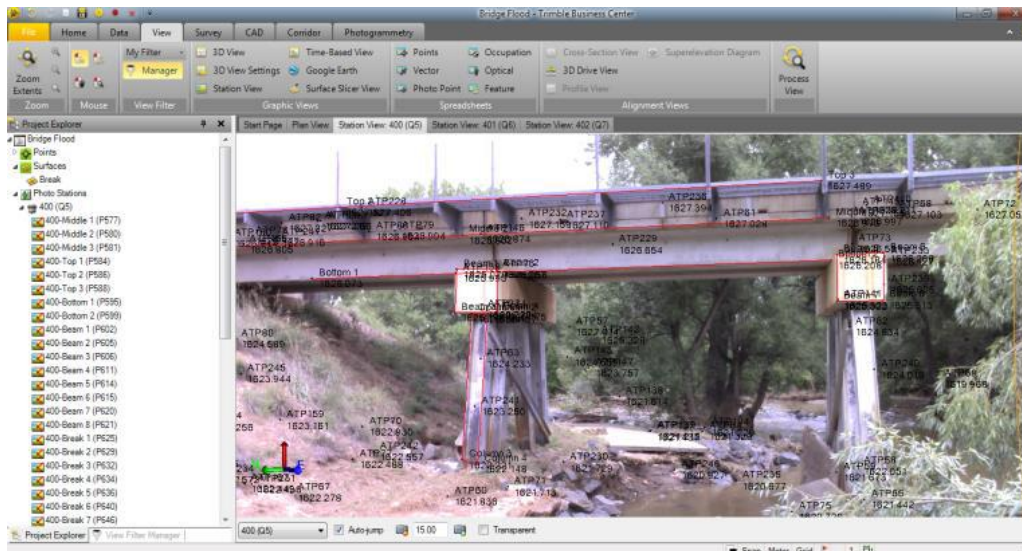
2.7 Εφαρμογές με το V10

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 ανταποκρίνεται στην εκτέλεση πλήθους εφαρμογών τοπογραφικών και μη τοπογραφικών.

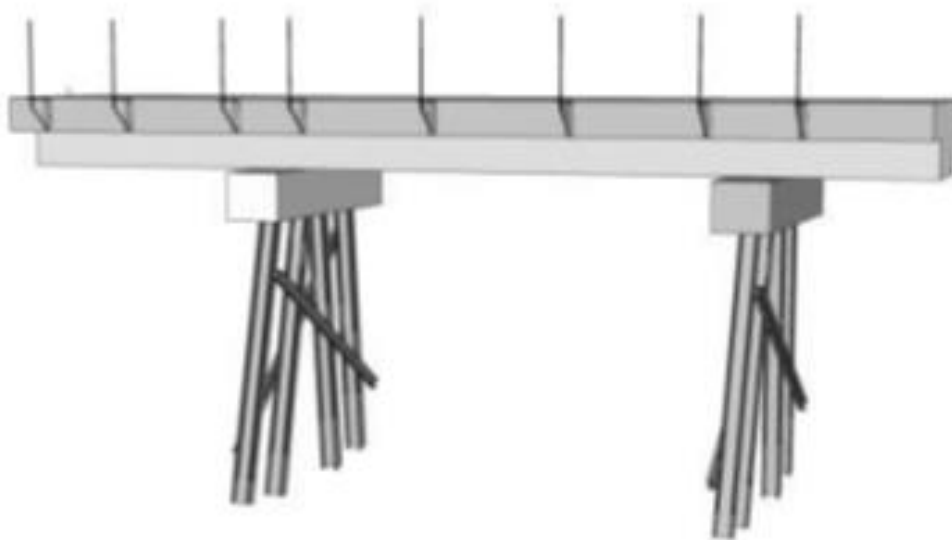
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα επισημανθούν αναφορικά ορισμένα πεδία εφαρμογών με παραδείγματα που αποτυπώνουν το εύρος της λειτουργικότητας του εικονοσυστήματος.

Ένα πρώτο παράδειγμα αφορά στην επιθεώρηση αστικών υποδομών όπως είναι οι γέφυρες όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 2.34 και 2.35. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα του V10 προσφέρει τόσο την οπτική όσο και την γεωμετρική τεκμηρίωση της κατασκευής και του περιβάλλοντα χώρου.

Τα τελικά παράγωγα είναι τα ως κατασκευασθέν σχέδια (as-built), το τριδιάστατο μοντέλο της κατασκευής μαζί με πίνακες σημασιολογικών δεδομένων (semantic) και οι φωτογραφίες του αντικειμένου της κατασκευής για τη δεδομένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 2.34 Αποτύπωση γέφυρας στο TBC με δεδομένα του V10.
 [https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/sessionDetail.wv?SESSION_ID=6811]



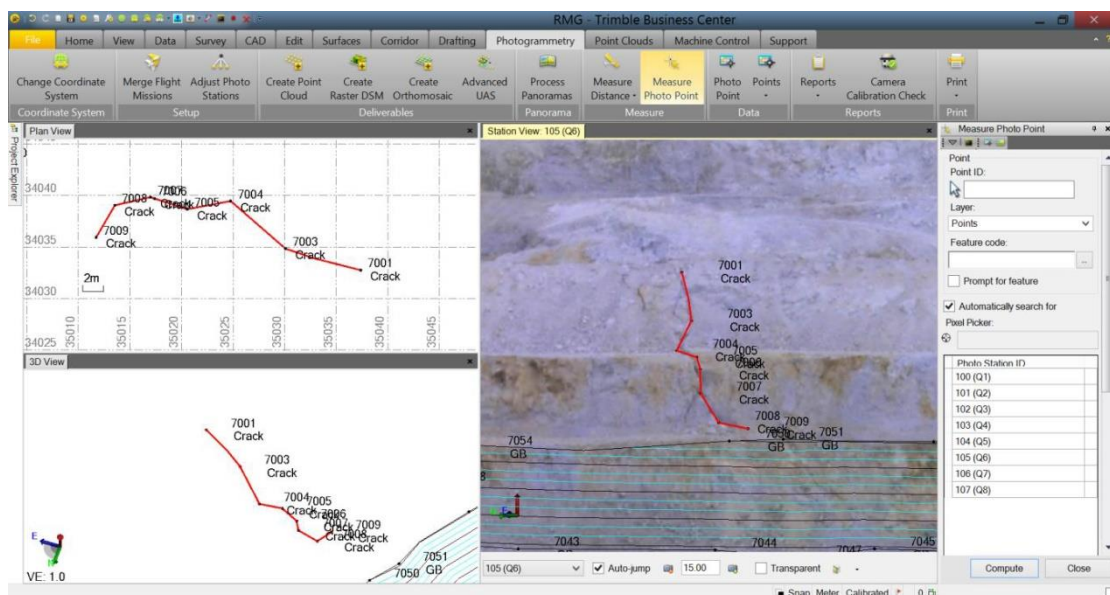
Εικόνα 2.35 Τριδιάστατο μοντέλο γέφυρας από μετρήσεις του V10.
 [https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/sessionDetail.wv?SESSION_ID=6811]

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις πετροχημικών, εικόνα 2.36. Το πλεονέκτημα του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 σε περιβάλλοντα με υψηλή επικινδυνότητα είναι η ταχύτητα συλλογής δεδομένων χωρίς ο χρήστης να προσεγγίζει τα αντικείμενα, που είναι αγωγοί, δίκτυα σωληνώσεων, βάνες, φλάντζες, αντλίες κ.α.

Τα παράγωγα σε αυτές τις εφαρμογές ποικίλουν ανάλογα με το είδος της εργασίας, δηλαδή μπορούν να είναι είτε τα ως κατασκευασθέν σχέδια (as-built), είτε τοπογραφικά διαγράμματα των εγκαταστάσεων, είτε οι φωτογραφίες για την οπτική τεκμηρίωση του εξοπλισμού, είτε τα διαγράμματα της μηκτομής ενός αγωγού ή ενός "pipe rack".



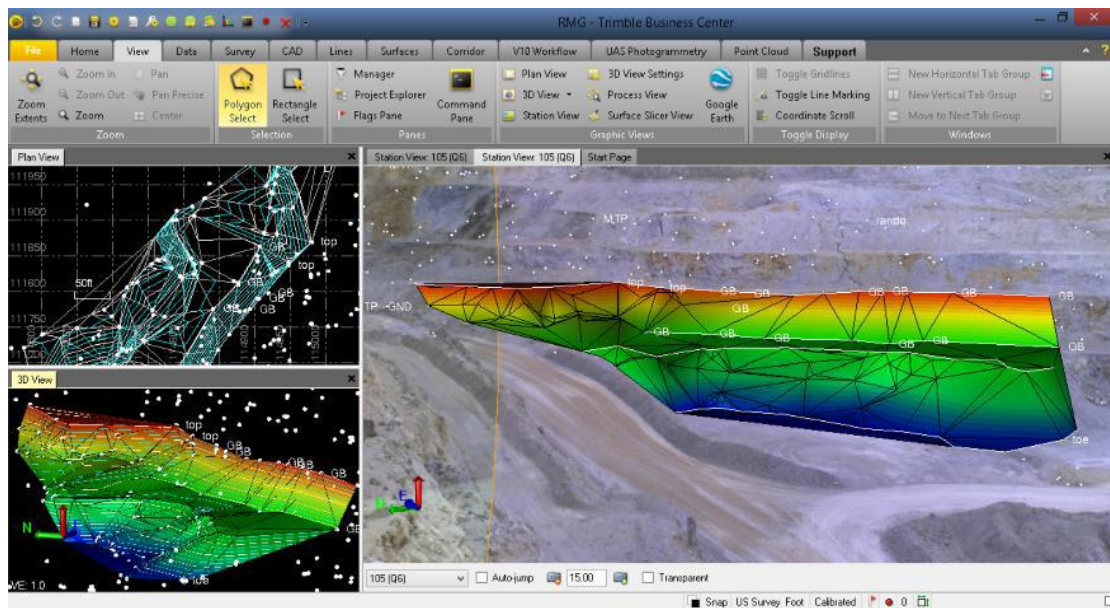
Εικόνα 2.36 Λήψη του V10 σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.
[https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/sessionDetail.wv?SESSION_ID=6741]



Εικόνα 2.37 Παρακολούθηση ρωγμής σε ορυχείο με το σύστημα του V10.
[https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/sessionDetail.wv?SESSION_ID=6954]

Το τρίτο παράδειγμα αφορά σε εφαρμογές ορυχείων και εξορύξεων. Στην εικόνα 2.37 παρουσιάζεται η παρακολούθηση της εξέλιξης ρωγμάτωσης του πετρώματος με παρατηρήσεις του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10.

Αντίστοιχα στην εικόνα 2.38 παρουσιάζεται η δημιουργία ισοϋψών καμπυλών και επιφανειών του ορυχείου από μετρητικές διαδικασίες του V10. Αυτά τα δεδομένα για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό όγκων σε διαφορετικές χρονικές φάσεις εργασιών.



Εικόνα 2.38 Δημιουργία ισοϋψών καμπυλών και επιφανειών σε ορυχείο με το σύστημα του V10.

[https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com/connect/sessionDetail.ww?SESSION_ID=6954]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΑΜΕΡΩΝ ΤΟΥ V10

3.1 Γενικά

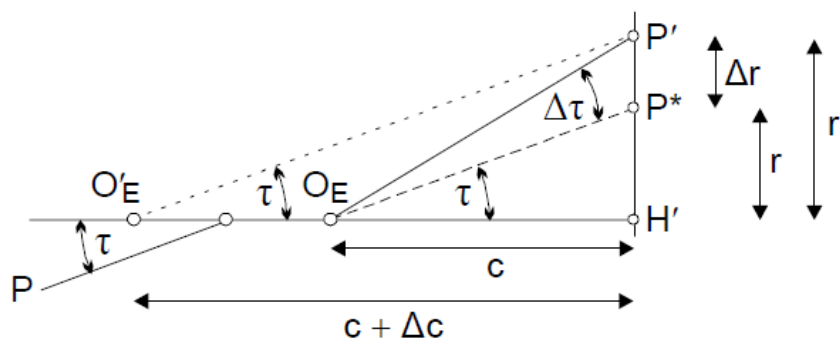
Οι φωτογραφικές μηχανές αποτελούν το μετρητικό εργαλείο στις διάφορες φωτογραμμετρικές εφαρμογές ή καλύτερα το όργανο που καταγράφει διευθύνσεις.

Για το λόγο αυτό η γνώση της μετρολογικής συμπεριφοράς τους κρίνεται απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας των γεωμετρικών παραγώγων [Γεωργόπουλος Α. κ.α., 2010].

Η γεωμετρία των φωτομηχανών περιγράφεται από το μαθηματικό μοντέλο της κεντρικής προβολής. Με τη διαδικασία της βαθμονόμησης αναζητούνται οι αποκλίσεις και η συμπεριφορά της μηχανής σε σχέση με το γεωμετρικό μοντέλο που την περιγράφει.

Η βαθμονόμηση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού δηλαδή της σταθεράς της μηχανής (c) ή της βαθμονομημένης εστιακής απόστασης, της θέσης του πρωτεύοντος σημείου στο εστιακό επίπεδο (x_0, y_0) και το μέγεθος της ακτινικής διαστρόφης (Δr) [Δραγωνάκης Γ. κ.α., 2014].

Η ακτινική διαστρόφη προκαλεί διαφοροποιήσεις στη σημειακή κλίμακα ή διαφορετικά διαφοροποιήσεις στην σταθερά της μηχανής c κάθε σημείου επειδή το μέγεθος της γωνίας πρόσπτωσης αλλάζει κατά την έξοδο της από το φακό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Σχηματική παράσταση της επίδρασης της ακτινικής διαστρόφης των φακών. [Πέτσα, 2000]

Η μεταβολή της κλίμακας που οφείλεται στην ακτινική διαστρόφη είναι ενιαία για κάθε ακτινική απόσταση στην εικόνα λόγω της εκ περιστροφής κατασκευής των φακών και εκφράζεται από το πολυώνυμο περιττών δυνάμεων της ακτίνας $\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots$ (Brown 1968).

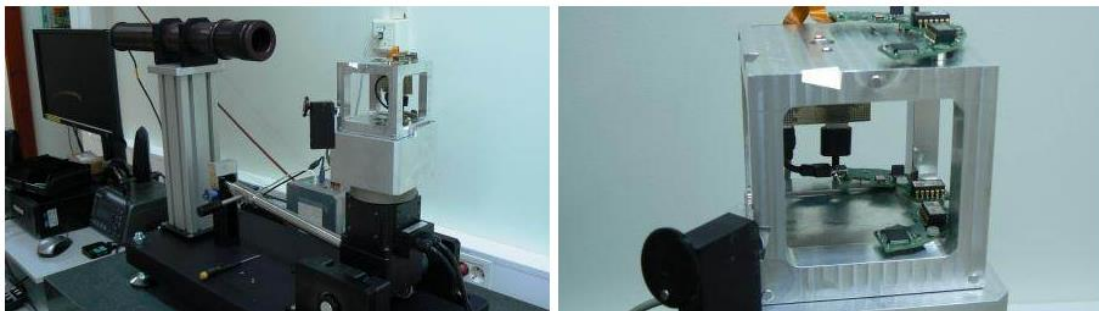
Μια ακόμη γεωμετρική παραμόρφωση των οπτικών ακτίνων που οφείλεται στους φακούς, αλλά είναι μικρότερη και λιγότερο σημαντική από αυτή της ακτινικής διαστρόφης, είναι αυτή της ασύμμετρης ή έκκεντρης διαστρόφης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδυναμία κέντρωσης των φακών κατά μήκος του οπτικού άξονα και εκφράζεται τόσο με ακτινικές όσο και με εφαπτομενικές μετατοπίσεις [Δραγωνάκης Γ. κ.α., 2014].

3.2 Βαθμονόμηση και Διακρίβωση του V10 Κατά την Κατασκευή

Το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 βαθμονομείται εργαστηριακά κατά την κατασκευή τόσο για τις παραμέτρους των αισθητήρων του όσο και για τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των 12 καμερών του σε σχέση με το εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων.

Οι παράμετροι που υπολογίζονται για τους αισθητήρες κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης αφορούν σε :

- συντελεστές κλίμακας
- αποκλίσεις από την ορθογωνικότητα
- εκκεντρότητες
- θέση και προσανατολισμό σε σχέση με το κέντρο της κεφαλής του V10



*Εικόνα 3.1 Διακρίβωση των αισθητήρων του V10 εργαστηριακά.
[<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>]*

Για τη διαδικασία της διακρίβωσης των αισθητήρων χρησιμοποιείται ένας κύβος ακριβείας ο οποίος τοποθετείται πάνω σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα που έχει τη δυνατότητα να αποκλίνει από την κατακόρυφο. Η πλακέτα των αισθητήρων που πρόκειται να βαθμονομηθεί τοποθετείται στο επάνω μέρος του κύβου ενώ στο εσωτερικό του τοποθετείται η πλακέτα αναφοράς όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται μετρήσεις για τρεις διαφορετικές διευθύνσεις του κύβου και διάφορες κλίσεις αυτού. Ο ευθυγραμμιστής (collimator) που φαίνεται αριστερά στην εικόνα 3.1 χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την προσαρμογή του κεκλιμένου επιπέδου της πλατφόρμας, εναλλάσσοντας τον κύβο με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό.

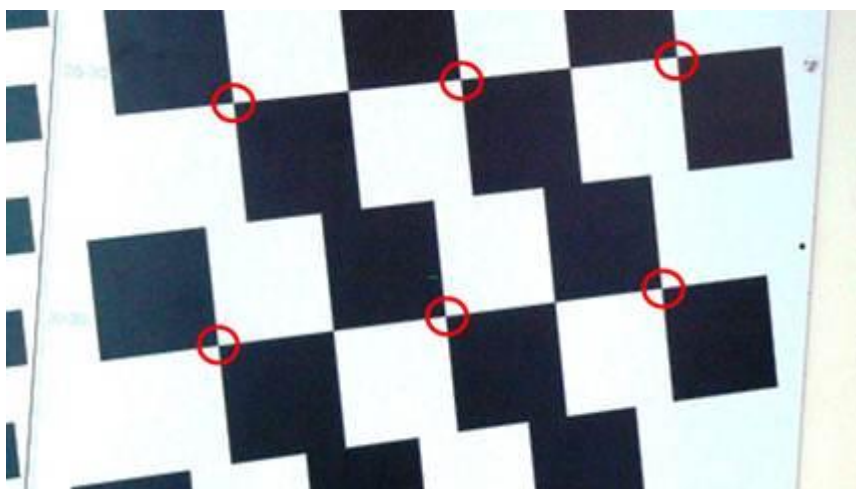
Η διακρίβωση των καμερών του συστήματος πραγματοποιείται σε θάλαμο βαθμονόμησης. Το V10 τοποθετείται σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα στο κέντρο του θαλάμου όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2. Ο θάλαμος είναι επενδυμένος με ασπρόμαυρους τεχνητούς στόχους η διάταξη των οποίων ακολουθεί πρότυπο σκακιέρας.



Εικόνα 3.2 Θάλαμος βαθμονόμησης του συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10. [<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>]

Οι στόχοι είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές αποστάσεις στους τοίχους και το πάτωμα του θαλάμου. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των κέντρων των τεχνητών στόχων έχουν υπολογιστεί σε προγενέστερο χρόνο, με μεγάλη ακρίβεια με χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού.

Από τη θέση που τοποθετείται το σύστημα του V10 λαμβάνονται 38 πανοράματα με διαδοχική περιστροφή κατά $360^{\circ}/38=9.47^{\circ}$ μοιρών. Έπειτα πραγματοποιούνται οι μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων των κέντρων των τεχνητών στόχων με αυτόματες μεθόδους ψηφιακής συνταύτισης σημείων σε όλα τα πανοράματα.



*Εικόνα 3.3 Κέντρα των τεχνητών στόχων σε πρότυπο σκακιέρας.
[<http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>]*

Στους συνολικά 1040 στόχους πραγματοποιούνται αυτόματα περισσότερες από 30000 μετρήσεις από τις εν δυνάμει 39520. Από αυτές χρησιμοποιούνται 4200 παρατηρήσεις από τις 280 συνολικές φωτογραφίες, ώστε να δημιουργηθεί μια ισοκατανομή των στόχων σε σχέση με το πεδίο ελέγχου.

Το μαθηματικό μοντέλο της επίλυσης αφορά σε μέθοδο της δέσμης με αυτοβαθμονόμηση. Δηλαδή οι τεχνητοί στόχοι έχουν το ρόλο φωτοσταθερών σημείων και ως εξίσωση συνθήκης χρησιμοποιείται η συνθήκη συγγραμμικότητας.

Οι άγνωστες παράμετροι υπολογίζονται σε ενιαία συνόρθωση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για κάθε μία από τις δώδεκα εικόνες κάθε πανοράματος, δηλαδή για κάθε μία από τις δώδεκα κάμερες.

Οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι κάθε εικόνας-κάμερας διαμορφώνονται ως εξής αντίστοιχα για τα:

Στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού:

- εικοσυντεταγμένες πρωτεύοντος σημείου
- σταθερά της μηχανής
- παράμετροι του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής των φακών ως τον 7° σταθερό όρο
- παράμετροι της ασύμμετρης διαστροφής των φακών κατά μέγεθος και διεύθυνση

Στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, σε σχέση με το κέντρο της κεφαλής του V10:

- γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου κάθε κάμερας στις τρεις διαστάσεις
- οι τρεις στροφές του άξονα λήψης κάθε εικόνας σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς

Το μέγιστο υπόλοιπο στις εξισώσεις συνθήκης από αυτή τη διαδικασία είναι μικρότερο από 1 εικονοστοιχείο ενώ η τυπική απόκλιση της μονάδας βάρους είναι μικρότερη από 0.3 εικονοστοιχεία.

Επιπλέον μετά από αυτή τη διαδικασία έχουν υπολογιστεί οι σχετικές θέσεις και στροφές των καμερών σε σχέση με το κέντρο της κεφαλής του V10. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα των πανοραμάτων να συνθέτονται αυτόματα.

3.3 Εφαρμογή Βαθμονόμησης του V10

Στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων σε θέματα μετρολογίας και διακρίβωσης επίγειων φωτομηχανών, έχουν αναπτυχθεί δύο τριδιάστατα πεδία ελέγχου.

Το εσωτερικό πεδίο ελέγχου είναι εγκατεστημένο στην αίθουσα Υ23 του κτιρίου Λαμπαδαρίου και αποτελείται από 131 συνολικά σημεία κυκλικών τεχνητών στόχων.

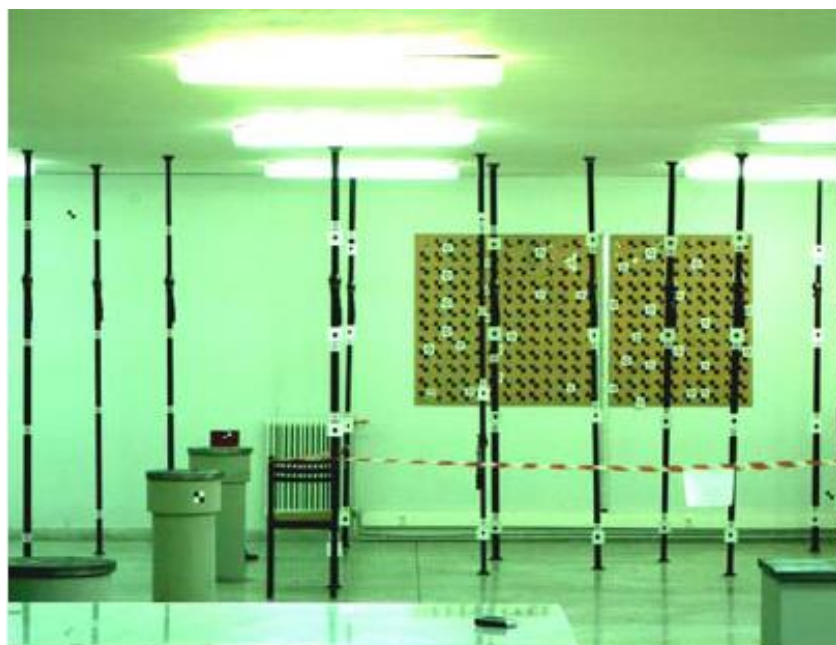
Από αυτά τα 30 βρίσκονται διατεταγμένα σε δύο πινακίδες, τα υπόλοιπα 93 σε 16 κατακόρυφους στύλους και τα 8 σε ειδικές μεταλλικές κατασκευές στην οροφή της αίθουσας όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4.

Το συγκεκριμένο πεδίο εξυπηρετεί τη βαθμονόμηση φωτομηχανών για λήψεις με απόσταση εστίασης μικρότερης των 12m [Γεωργόπουλος Α. κ.α., 2010].

Αντίστοιχα το εξωτερικό πεδίο ελέγχου βρίσκεται εγκατεστημένο στη ανατολική όψη του κτιρίου Α της ΣΑΤΜ. Αποτελείται από 44 κυκλικούς τεχνητούς στόχους ομοιόμορφα κατανομημένους σε τρία επίπεδα της όψης του κτιρίου όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.5.

Το εν λόγω πεδίο χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση φωτομηχανών για λήψεις με απόσταση εστίασης μεγαλύτερης των 12m.

Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες (X_i , Y_i , Z_i) των τεχνητών στόχων, τόσο του εσωτερικού πεδίου όσο και του εξωτερικού, προσδιορίστηκαν σε τοπικό σύστημα αναφοράς από το κέντρο Μετρολογίας του τομέα Τοπογραφίας. Σε κάθε ένα πεδίο ορίσθηκε τοπικό γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων σε σχέση με δύο βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης.

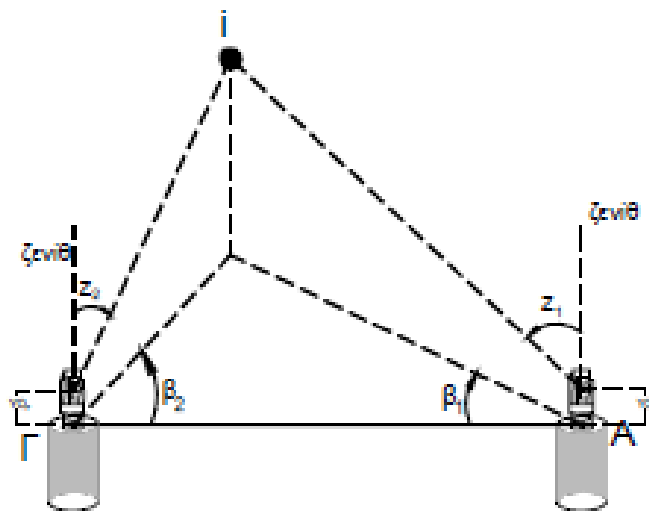


Εικόνα 3.4 Εσωτερικό τριδιάστατο πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.



Εικόνα 3.5 Εξωτερικό τριδιάστατο πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αφορά στην εμπροσθοτομία στο χώρο με μετρήσεις οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών από τα δύο επιλεγμένα βάθρα, με τη χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών πρώτης τάξης όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Σχηματική παράσταση της εμπροσθοτομίας στο χώρο από βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης.

Οι τελικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των τεχνητών στόχων προέκυψαν από την επίλυση τριδιάστατου δικτύου με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων, χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης αυτές των οριζόντιων και ζενίθιων γωνιών. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία

απαλλάσσεται από μετρήσεις μηκών και η ακρίβεια προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων βελτιώνεται.

Οι μετρήσεις του εξωτερικού πεδίου ελέγχου πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2012 με τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό TM 30 της εταιρίας Leica ο οποίος παρέχει γωνιακή ακρίβεια μέτρησης $\pm 0.5'' = \pm 1.5''$. Έτσι οι τελικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων προέκυψαν με αβεβαιότητα της τάξης των $\pm 0.1\text{mm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 0.5\text{mm}$ υψομετρικά.

Αντίστοιχα οι μετρήσεις του εσωτερικού πεδίου ελέγχου πραγματοποιήθηκαν τον Μάρτιο του 2014 με τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό TDM 5005 της εταιρίας Leica ο οποίος παρέχει γωνιακή ακρίβεια μέτρησης $\pm 0.5'' = \pm 1.5''$. Έτσι οι τελικές συντεταγμένες έχουν αβεβαιότητες της τάξης των $\pm 0.2\text{mm}$ κατά τον άξονα X, $\pm 0.05\text{mm}$ κατά τον άξονα Y και $\pm 0.05\text{mm}$ κατά τον άξονα Z.

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10, όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, θεωρητικά έχει σχεδιασθεί για αποστάσεις εστίασης από 0.1m έως το άπειρο. Βέβαια στην πράξη οι κρισιμότερες αποστάσεις εστίασης κυμαίνονται μεταξύ 10-20m. Το γεγονός αυτό δίνει πλεονέκτημα στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου για την βαθμονόμηση των ψηφιακών καμερών του συστήματος που αντιστοιχεί στις πραγματικές συνθήκες των εργασιών του V10.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 25 λήψεις με το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10, 20 στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου και 5 στο εσωτερικό.

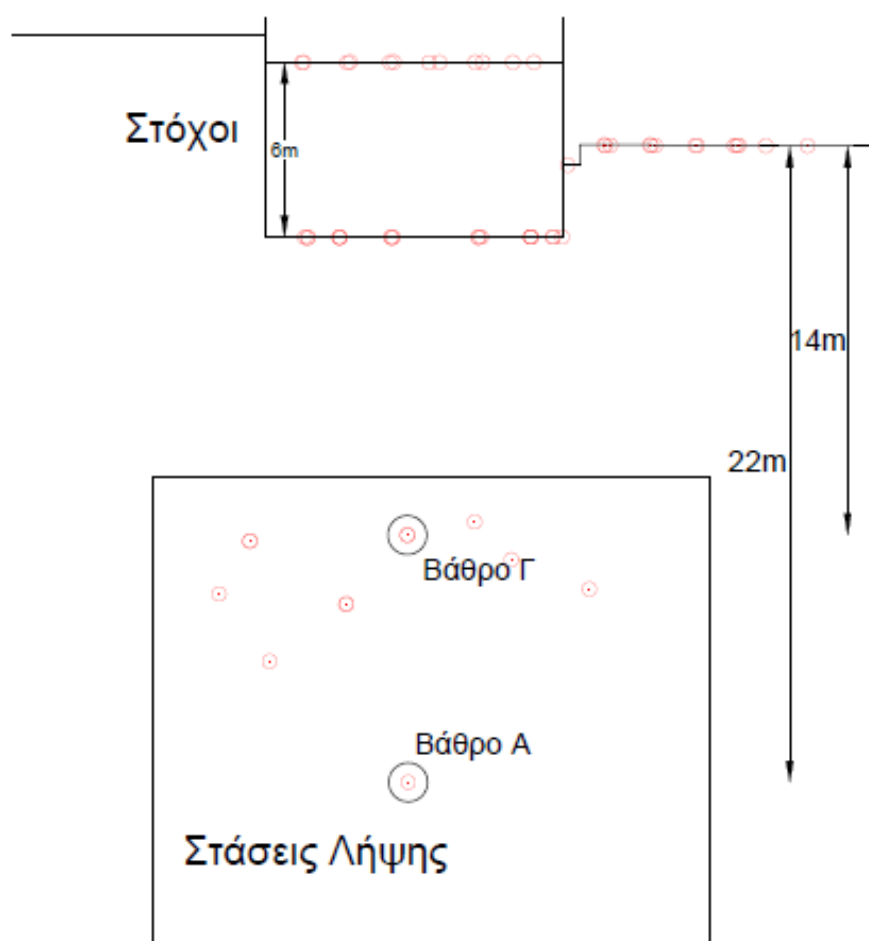
Πρωτεύοντας στόχος για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, συνεπώς και των λήψεων, αποτελούσε η ενδεικτική βαθμονόμηση της κεντρικής κάμερας (cam 4) του V10 και δευτερευόντως της τρίτης κάμερας (cam3).

Η επιλογή να βαθμονομηθούν μόνο οι δύο αυτές κάμερες του συστήματος V10 πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά προκειμένου να αξιολογηθεί η σταθερότητα και η επαναληπτικότητα των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού τους και εν τέλει της μετρητικής τους ικανότητας.

Από τα 25 συνολικά πανοράματα που λήφθηκαν τελικά αξιοποιήθηκαν 13 φωτογραφίες από αυτά. Καθώς οι υπόλοιπες φωτογραφίες δεν

εξυπηρετούσαν τη διαδικασία ενώ παράλληλα διαπιστώθηκε αδυναμία επίλυσης τους με το συγκεκριμένο λογισμικό.

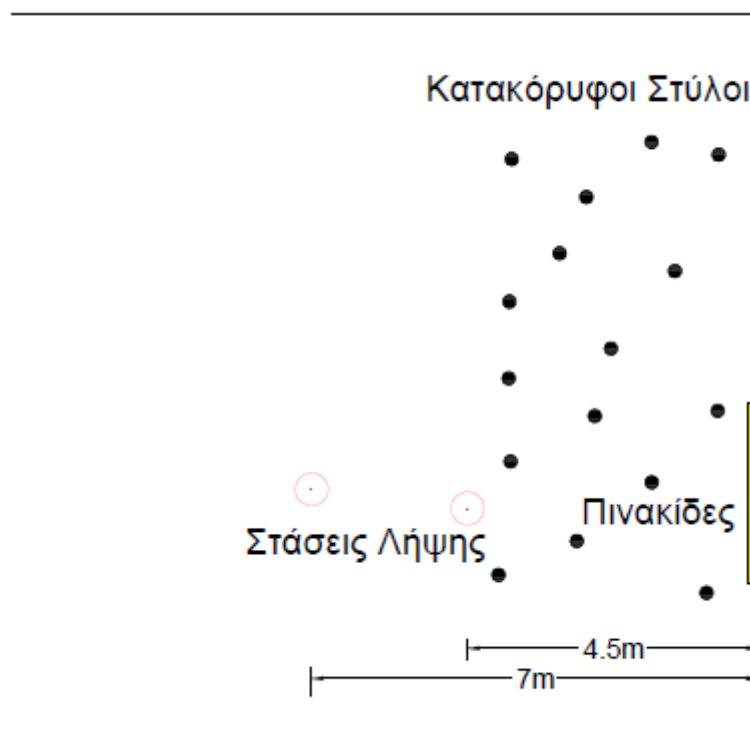
Οι 11 φωτογραφίες από τις 13 που επιλύθηκαν, πραγματοποιήθηκαν στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου. Οι 8 αφορούν στην τέταρτη και κεντρική κάμερα του συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 και οι 2 στην τρίτη κάμερα. Οι αποστάσεις εστίασης των λήψεων αυτών κυμαίνονται μεταξύ 12-20m όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Οριζοντιογραφία των λήψεων του ολοκληρωμένου συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 σε σχέση με το εξωτερικό πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ.

Αντίστοιχα 2 επιτυχημένες επιλύσεις αφορούσαν φωτογραφίες που πραγματοποιήθηκαν στο εσωτερικό πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ.

Η μια λήψη έγινε με την τέταρτη κάμερα από απόσταση 7m ενώ η δεύτερη λήψη έγινε με την τρίτη κάμερα του V10 από απόσταση 4.5m, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Οριζοντιογραφία των λήψεων του ολοκληρωμένου συστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 σε σχέση με το εσωτερικό πεδίο ελέγχου της αίθουσας Y23 της ΣΑΤΜ.

3.3.1 Επίλυση με το Λογισμικό Calibration CCD

Ο υπολογισμός των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού της τέταρτης και της τρίτης κάμερας του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό "Calibration CCD". Το εν λόγω λογισμικό αναπτύχθηκε στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας (Σαμαρά 2004) του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ ΕΜΠ σε περιβάλλον Matlab.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη βαθμονόμηση της εκάστοτε κάμερας αφορά σε ενιαία συνόρθωση κατά δέσμες με αγνώστους τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας. Ως εξίσωση παρατήρησης χρησιμοποιεί τη συνθήκη συγγραμμικότητας ενώ ο προσδιορισμός προσεγγιστικών

τιμών των αγνώστων πραγματοποιείται μέσω του Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) 11 παραμέτρων [Γεωργόπουλος Α. κ.α., 2010].

Οι άγνωστοι της βαθμονόμησης που υπολογίζονται με το λογισμικό "Calibration CCD" είναι η σταθερά της μηχανής (c), οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου ($\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$), οι δύο πρώτοι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστρόφης ($\delta r = \mathbf{K}_1 r^3 + \mathbf{K}_2 r^5$), οι συντελεστές της συνάρτησης της ασύμμετρης παραμόρφωσης ($P(r) = (\mathbf{P}_1^2 + \mathbf{P}_2^2)^{1/2} r^2$) και οι αφινικές παραμορφώσεις των εικονοστοιχείων ως προς δύο παραμέτρους:

- λ : για τη διαφοροποίηση στην κλίμακα του άξονα y των εικονοσυντεταγμένων θεωρώντας την κλίμακα του άξονα x ως μοναδιαία.
- ϵ : για την γωνιακή απόκλιση του άξονα y από την καθετότητα ως προς τον άξονα x .

Παράλληλα με τις 9 παραμέτρους που περιγράφηκαν το πρόγραμμα υπολογίζει και τους 6 αγνώστους του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας, 3 για τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου και 3 για τις στρόφες του άξονα λήψης ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Έτσι οι εξισώσεις παρατήρησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{A_1}{\Pi} + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_{af} \\ y &= y_0 - c \frac{A_2}{\Pi} + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_{af} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Όπου με A_1, A_2 συμβολίζονται οι αριθμητές και με Π ο παρανομαστής της σχέσης 2.11, ενώ οι τρεις τελευταίοι αφορούν σε διορθώσεις των εικονοσυντεταγμένων λόγω της ακτινικής διαστρόφης, της ασύμμετρης παραμόρφωσης και των αφινικών παραμορφώσεων σύμφωνα με τις σχέσεις 3.2, 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \\ \Delta y_r &= (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= P_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y_d &= 2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}\Delta x_{af} &= \varepsilon(y - y_0) \\ \Delta y_{af} &= \lambda(y - y_0)\end{aligned}\quad (3.4)$$

Το λογισμικό για να πραγματοποιήσει την επίλυση χρειάζεται ως εισαγωγή δύο αρχεία ASCII που περιέχουν τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων και αντίστοιχα τις εικονοσυντεταγμένες τους.

Οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων μετρήθηκαν στο λογισμικό πακέτο Autocad, με κατάλληλη μεγέθυνση ώστε το μοναδιαίο στοιχείο να ισούται με 1 εικονοστοιχείο και παράλληλη τοποθέτηση της αρχής των αξόνων στην πάνω αριστερή γωνία της εικόνας [Σαμαρά Α., 2004].

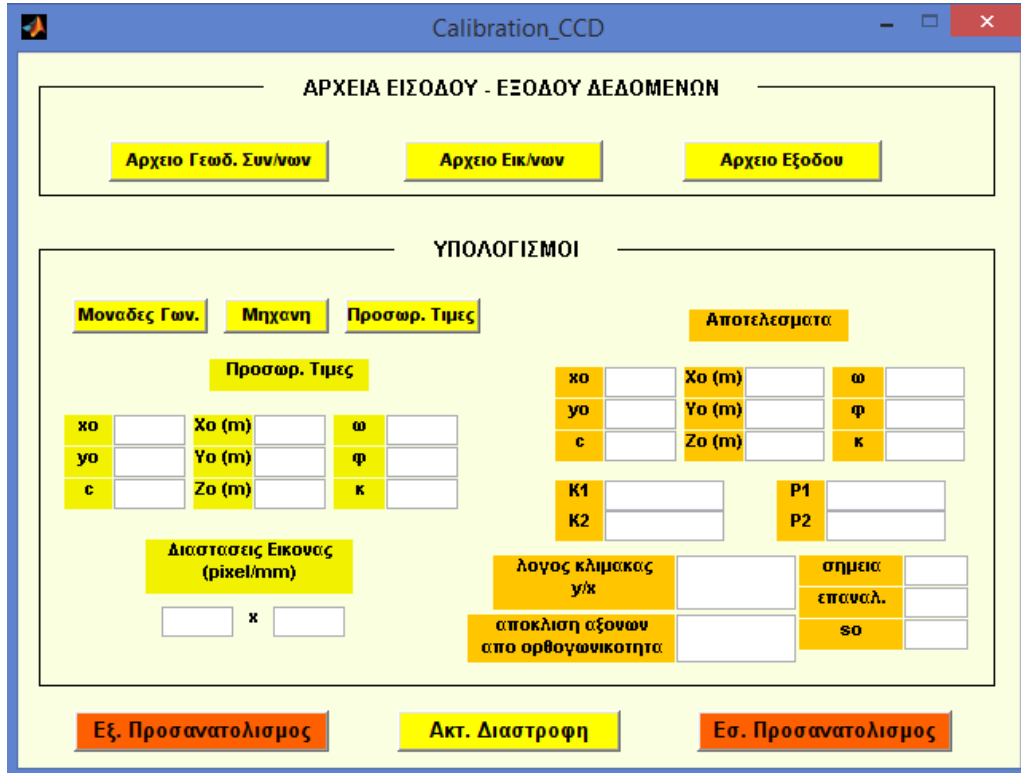
Επιπλέον για να είναι επιτυχής η σύγκλιση του αλγορίθμου και να μπορέσει να λυθεί η βαθμονόμηση, το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς χρειάζεται να στραφεί ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες γωνιακές αποκλίσεις με το σύστημα της εικόνας και να γίνουν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί.

Η γωνία στροφής για το κάθε πεδίο ελέγχου υπολογίστηκε μέσω προσαρμογής ευθείας σε ένα μικρό δείγμα σημείων στο περιβάλλον του Matlab μέσω βασικών εφαρμογών του λογισμικού. Αυτό έγινε επειδή το επιθυμητό αποτέλεσμα δεν είναι η εξεύρεση της βέλτιστης ευθείας αλλά η απαλοιφή μεγάλων γωνιακών αποκλίσεων μεταξύ των δύο συστημάτων, δηλαδή της εικόνας και του συστήματος αναφοράς.

Στη συνέχεια στο ίδιο πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε η στροφή των γεωδαιτικών συντεταγμένων με αρχείο εισόδου τύπου ASCII. Ο κώδικας που συντάχθηκε με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι στροφές και οι μετασχηματισμοί των γεωδαιτικών συντεταγμένων των δύο πεδίων ελέγχου περιλαμβάνεται στο παράρτημα.

Με τα πρώτα τρία πλήκτρα του λογισμικού "Calibration CCD" ορίζονται τα αρχεία εισόδου και το αρχείο εξόδου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6. Έπειτα με τα επόμενα τρία πλήκτρα επιλέγονται οι γωνιακές μονάδες, ο τύπος της φωτομηχανής και ο υπολογισμός προσωρινών τιμών των αγνώστων.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το πλήκτρο “Εσ. Προσανατολισμός” ενώ με την εισαγωγή των διαστάσεων της εικόνας το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει το διάγραμμα της μη κανονικοποιημένης ακτινικής διαστρόφης.



Εικόνα 3.6 Παράθυρο του λογισμικού “Calibraton CCD”.

3.3.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η διαδικασία της βαθμονόμησης για την κεντρική κάμερα (cam 4) του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκε από 10 διαφορετικές επιλύσεις με μέσο a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους $\sigma_0 = \pm 0.35$ εικονοστοιχείων. Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων για τις 9 παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού με τις αβεβαιότητες προσδιορισμού τους είναι:

$$c = 2592.2 \pm 3 \text{ pixel} = 3.629 \pm 0.004 \text{ mm}$$

$$x_0 = 1285.5 \pm 5.8 \text{ pixel}$$

$$y_0 = 976.5 \pm 5.1 \text{ pixel}$$

$$K_1 = -5.21 \times 10^{-08} \pm 1 \times 10^{-09}$$

$$K_2 = -4.53 \times 10^{-15} \pm 4 \times 10^{-16}$$

$$P_1 = 1.22 \times 10^{-08} \pm 4 \times 10^{-07}$$

$$P_2 = 1.42 \times 10^{-07} \pm 3 \times 10^{-07}$$

$$\varepsilon = -0^g.0767 \pm 0^g.0004g$$

$$\lambda = 1.0004 \pm 0.0005$$

Αντίστοιχα η βαθμονόμηση της τρίτης κάμερας του V10 πραγματοποιήθηκε από τρεις διαφορετικές επιλύσεις με μέσο a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους της τάξης των $\sigma_0 = \pm 0.37$ εικονοστοιχείων. Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων για τις 9 παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού με τις αβεβαιότητες προσδιορισμού τους είναι:

$$c = 2589.6 \pm 2.2 \text{ pixel} = 3.625 \pm 0.003 \text{ mm}$$

$$x_0 = 1292.2 \pm 5 \text{ pixel}$$

$$y_0 = 976 \pm 4 \text{ pixel}$$

$$K_1 = -5.19 \times 10^{-08} \pm 1 \times 10^{-09}$$

$$K_2 = -4.63 \times 10^{-15} \pm 3 \times 10^{-16}$$

$$P_1 = 7.62 \times 10^{-08} \pm 3 \times 10^{-07}$$

$$P_2 = 3.39 \times 10^{-08} \pm 3 \times 10^{-07}$$

$$\varepsilon = -0^{\circ}.0491 \pm 0^{\circ}.0003$$

$$\lambda = 0.9999 \pm 0.0003$$

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα ότι οι κάμερες παρουσιάζουν επαναληπτικότητα και σταθερότητα τόσο στις διαφορετικές επιλύσεις όσο και μεταξύ τους για όλες τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού εκτός από τους συντελεστές της ασύμμετρης παραμόρφωσης.

Αυτό φαίνεται έντονα από τις τιμές της σταθεράς της μηχανής που και στις 13 επιλύσεις συγκλίνει στα 3.63mm (με μέγεθος εικονοστοιχείου στα 1.4 μ m) με αβεβαιότητα της τάξης μερικών μ m. Ακόμη η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην τιμή που δίνει πάγια ο κατασκευαστής.

Αντίστοιχα το πρωτεύον σημείο υπολογίζεται με ακρίβεια της τάξης μερικών μόνο εικονοστοιχείων και με σταθερότητα στις διαφορές επιλύσεις. Δηλαδή οι διαφορές που προκύπτουν στις τιμές των εικονοσυντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου δεν είναι στατιστικά σημαντικές σε σχέση με την αβεβαιότητα προσδιορισμού τους. Ακόμα αν ορισθεί το σύστημα εικονοσυντεταγμένων στο κέντρο της εικόνας τότε οι τιμές του πρωτεύοντος σημείου κάθε κάμερας σε εικονοστοιχεία γίνονται:

$$\text{cam}_4(-10.5, -4.5)$$

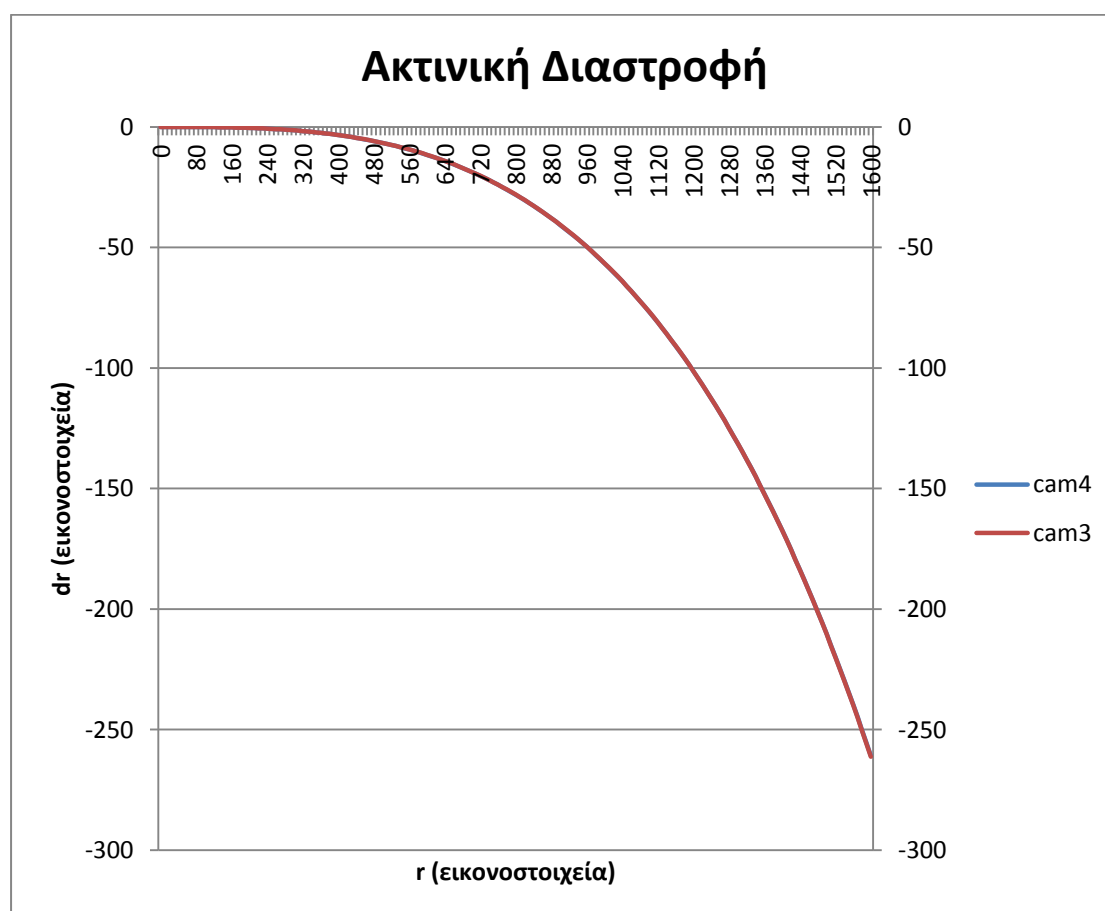
$$\text{cam}_3(-3.8, -4)$$

Επιπλέον όσον αφορά την ακτινική διαστρόφη των φακών παρατηρείται ότι έχει μεγάλες τιμές ιδιαίτερα στα άκρα της εικόνας, γεγονός που ήταν αναμενόμενο λόγω της ευρυγωνικότητας των φακών. Παρόλα αυτά

παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα σε όλα τα υπολογισθέντα πολυώνυμα με μικρή αβεβαιότητα προσδιορισμού.

Το αποτέλεσμα αυτό παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα 3.1 όπου αξίζει να επισημανθεί πως οι διαφορές των δύο πολυωνύμων των δύο διαφορετικών καμερών είναι της τάξης των 0.02 pixel για ακτίνα μικρότερη των 500 pixel, 0.05 pixel για ακτίνα μικρότερη των 1000 pixel, δηλαδή στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας (με μέγεθος καρτέ 2592×1944 pixel).

Ενώ η διαφορά τους φτάνει το 0.1pixel σε ακτίνα 1300 pixel,δηλαδή μονάχα στις περιοχές των 4 γωνιών της εικόνας, με μέγιστη διαφορά αυτή των 0.4 pixel καθώς η ακτίνα φτάνει στις μέγιστες ενεργές τιμές της.



Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα μη κανονικοποιημένης ακτινικής διαστροφής του συστήματος V10 για την τρίτη και τέταρτη κάμερα.

Αυτό που προκαλεί προβληματισμό είναι οι διαφορετικές τιμές που προκύπτουν στους συντελεστές της συνάρτησης της ασύμμετρης

παραμόρφωσης. Αλλά κυρίως στο γεγονός ότι οι αβεβαιότητες τους είναι μεγαλύτερες από τα ίδια τα μεγέθη ακόμη και μεγαλύτερης τάξης. Παρόλα αυτά το συνολικό της μέγεθος παραμένει μικρό, δηλαδή 0.1-0.2 pixel κατά μέση τιμή.

Επιπρόσθετα όσον αφορά στις αφινικές παραμορφώσεις τα ίδια τα μεγέθη όπως και οι αβεβαιότητες προσδιορισμού τους είναι μικρές. Δηλαδή οι κλίμακες των αξόνων είναι στατιστικά ασήμαντες και μπορούν να θεωρηθούν μοναδιαίες.

Το γωνιακό μέγεθος ε της απόκλισης της ορθογωνικότητας των αξόνων (που εκφράζεται από την εφαπτομένη τους) είναι της τάξης των 7° κατά μέση τιμή. Αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της γωνίας ε είναι της τάξης των 15° που γραμμικά ως προς το μέγεθος του εικονοστοιχείου ($1.4\mu\text{m}$) εκφράζεται σε $0.003\mu\text{m}$ και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Επιπλέον από τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού και πιο συγκεκριμένα από τις γωνίες ω και κ δίνεται μια εκτίμηση για την κατακορύφωση του συστήματος V10 στο πεδίο, σε σχέση με την ψηφιακή αεροστάθμη. Έτσι προσθέτοντας στην γωνία ω την επίκλιση της κάμερας ($2^\circ = 2^{\text{s}}.2222$) η μέση τιμή στα απόλυτα μεγέθη των γωνιών $|\omega+2^\circ|$, $|\kappa|$ υπολογίζεται στα 27° για κάθε άξονα του οριζόντιου επιπέδου.

Αυτό που χρειάζεται να τονιστεί είναι πως το μέγεθος της σταθερότητας δεν προσδιορίζεται από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε. Αυτό που υπολογίζεται αποτελεί μια εκτίμηση του μοντέλου της κεντρικής προβολής που εκφράζει την κάθε κάμερα αντίστοιχα.

Ακολουθεί ο πίνακας 3.1 με τα αποτελέσματα όλων των παραμέτρων των 13 επιλύσεων που προέκυψαν από το λογισμικό Calibration CCD μαζί με τα τυπικά τους σφάλματα.

λίψη	σημεί	επαναλήψεις	σ0	χ0	γ0	z0	ω	φ	κ	χ0	γ0	c	k1	k2	p1	p2	ε	λ
free2_cm43_cam4	22	7	0,37	17,1572	10,9048	-14,7560	-2,3000	-2,4851	0,3590	1284,8311	979,1667	2587,8941	-5,30159E-08	-4,43412E-15	2,08428E-07	4,2692E-07	-0,15204	1,00000
				0,0073	0,0042	0,0206	0,0034	0,0029	0,0008	7,7125	8,7844	3,9557	1,58455E-09	3,92786E-16	6,64494E-07	5,88317E-07	0,00074	0,00087
free_cm43_cam4	23	6	0,28	18,2292	10,9103	-16,5810	-2,2429	-5,3642	0,2771	1285,4468	974,7721	2595,5602	-5,29381E-08	-4,371E-15	1,37671E-07	7,68213E-09	-0,06489	1,00002
				0,0034	0,0022	0,0094	0,0018	0,0017	0,0004	4,3888	4,4913	2,4475	8,75045E-10	2,95392E-16	2,85736E-07	2,86316E-07	0,00031	0,00033
free2_cm4_cam4	30	8	0,34	27,3306	10,9052	-15,9391	-2,2100	4,0923	0,6417	1297,3381	975,3670	2592,2869	-5,2062E-08	-4,37594E-15	-2,70627E-07	6,33653E-08	-0,04981	1,00045
				0,0033	0,0030	0,0117	0,0014	0,0018	0,0002	4,7799	3,5698	2,9021	1,08497E-09	4,56229E-16	2,94909E-07	2,22139E-07	0,00031	0,00030
free3_cm4_cam4	38	8	0,41	30,0440	10,8642	-14,9198	-2,4669	13,0538	0,9816	1290,0083	981,2680	2589,2922	-5,07264E-08	-4,82194E-15	-2,48404E-07	-8,76126E-09	-0,05381	1,00006
				0,0055	0,0038	0,0164	0,0012	0,0019	0,0003	4,8068	3,1292	3,3956	7,79933E-10	3,43309E-16	2,93576E-07	1,70597E-07	0,00030	0,00029
free3_cm43_cam4	22	7	0,44	18,9120	10,8456	-12,4002	-2,2228	8,2274	0,8278	1269,3830	974,0879	2594,3034	-5,55447E-08	-4,05245E-15	1,75824E-06	7,25307E-07	-0,24521	1,00073
				0,0082	0,0065	0,0387	0,0058	0,0046	0,0007	12,4928	14,4054	6,2824	2,60658E-09	5,22418E-16	1,27346E-06	1,02055E-06	0,00139	0,00170
free4_cm4_cam4	30	6	0,26	23,7109	10,9678	-16,7988	-2,2353	-8,1229	0,1582	1289,1447	979,8786	2590,4854	-5,07868E-08	-4,92133E-15	-1,99483E-07	2,34755E-07	-0,06773	1,00124
				0,0019	0,0020	0,0078	0,0010	0,0013	0,0001	3,2715	2,6697	1,9854	7,46519E-10	3,92314E-16	2,10284E-07	1,60678E-07	0,00022	0,00021
free5_cm4_cam4	28	14	0,35	21,5910	10,8567	-14,4111	-2,4413	-24,4309	-0,5076	1280,1288	975,5537	2587,3278	-5,00502E-08	-4,99039E-15	-1,73404E-07	4,34825E-08	-0,00549	1,00077
				0,0032	0,0024	0,0121	0,0013	0,0021	0,0007	5,3094	4,2122	2,7505	7,07131E-10	2,96622E-16	3,37916E-07	1,72249E-07	0,00038	0,00034
free5_cm43_cam4	27	7	0,36	21,5667	10,8528	-14,3842	-2,0975	12,8630	0,8836	1274,9216	970,2468	2599,1676	-5,27913E-08	-4,32069E-15	2,77465E-07	-1,21336E-08	-0,11061	0,99955
				0,0027	0,0028	0,0134	0,0023	0,0024	0,0003	6,4582	5,7869	2,2820	1,19406E-09	3,3403E-16	4,62613E-07	3,80853E-07	0,00053	0,00060
in_cm4_cam4	70	7	0,29	-22,2231	10,8328	-25,5227	-2,2142	-0,1446	0,4088	1294,0348	975,0299	2592,9906	-5,04982E-08	-4,9401E-15	-9,25447E-08	-1,8189E-07	0,00517	1,00041
				0,0003	0,0003	0,0011	0,0006	0,0010	0,0001	2,6780	1,4694	0,6701	4,5448E-10	2,12498E-16	1,67001E-07	9,90407E-08	0,00014	0,00014
A_cam4	33	6	0,36	26,0417	11,9738	-17,2518	-2,6360	6,1596	0,1327	1289,4413	979,3548	2592,9511	-5,23549E-08	-4,11374E-15	-1,78934E-07	1,25195E-07	-0,02271	1,00077
				0,0023	0,0024	0,0075	0,0010	0,0013	0,0001	3,4489	2,7322	1,9993	8,06242E-10	3,55592E-16	2,25975E-07	1,64352E-07	0,00024	0,00022
free_cm32_cam3	22	6	0,40	18,2307	10,9100	-16,5972	-2,0899	-2,6926	0,2054	1287,8805	977,5666	2589,1282	-5,25268E-08	-4,58749E-15	1,04652E-07	2,48194E-07	-0,07171	0,99938
				0,0048	0,0032	0,0140	0,0026	0,0024	0,0005	6,2839	6,6655	3,3856	1,20005E-09	3,79684E-16	4,2948E-07	4,33197E-07	0,00049	0,00054
free4_cm3_cam3	32	6	0,40	23,7050	10,9684	-16,7925	-1,9704	-6,3432	-0,1032	1301,9760	976,2037	2590,1108	-5,04477E-08	-5,26311E-15	6,46616E-08	1,22803E-07	-0,03714	1,00007
				0,0028	0,0028	0,0088	0,0012	0,0016	0,0002	4,0457	3,0122	2,4283	7,61522E-10	3,13847E-16	2,59012E-07	1,82192E-07	0,00028	0,00027
in2_cm3_cam3	50	6	0,30	-21,9312	10,8241	-27,9210	-2,1620	-5,2598	-0,0711	1286,7478	974,3095	2589,6756	-5,28358E-08	-4,02868E-15	5,93404E-08	-2,69181E-07	-0,03845	1,00035
				0,0003	0,0002	0,0008	0,0009	0,0017	0,0001	4,5390	2,2294	0,8988	6,36248E-10	3,02302E-16	2,65239E-07	1,51104E-07	0,00021	0,00022

Πίνακας 3.1 Τα συνολικά αποτελέσματα των 13 επιλύσεων της βαθμονόμησης των καμερών του V10 με τα τυπικά τους σφάλματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΩΝ

4.1 Αποτύπωση Όψης Κτιρίου

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των γεωδαιτικών οργάνων και η βελτίωση των ακριβειών μέτρησης των τελευταίων δύο δεκαετιών έχει ανοίξει νέα πεδία εφαρμογών για τον Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό προσφέροντας αυξημένη και ενιαία ακρίβεια στα γεωμετρικά παράγωγα. Ένα από αυτά τα πεδία αποτελούν οι αποτυπώσεις σε μεγάλες κλίμακες για τη γεωμετρική τεκμηρίωση φυσικών ή τεχνητών κατασκευών.

Με τον όρο γεωμετρική τεκμηρίωση εννοείται η καταγραφή της θέσης, του μεγέθους και του σχήματος της κατασκευής στο χώρο των τριών διαστάσεων για μια δεδομένη χρονική στιγμή [Πανταζής Γ, 2005]. Οι εφαρμογές αυτές εντάσσονται στον επιστημονικό κλάδο της τεχνικής και εφαρμοσμένης γεωδαισίας ενώ αποτελούν εργασίες περιορισμένου πεδίου.

Οι προδιαγραφές και η ποιότητα τέτοιων εργασιών προκύπτουν σήμερα από τη μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης των παραγόμενων διαγραμμάτων αφού κάθε ένα από αυτά μπορεί να εκτυπωθεί σε διαφορετικές κλίμακες. Η μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης ορίζεται ως η μεγαλύτερη κλίμακα που είναι ικανή να καλύψει την αβεβαιότητα των σημείων λεπτομέρειας της αποτύπωσης και να οδηγήσει παράλληλα στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και μεθόδου [Λάμπρου, Πανταζής, 2010].

Κλίμακα Εκτύπωσης	Αβεβαιότητα (σχ, σγ, σz)
1:100	±25mm
1:50	±13mm
1:25	±6mm
1:10	±3mm
1:5	±1mm

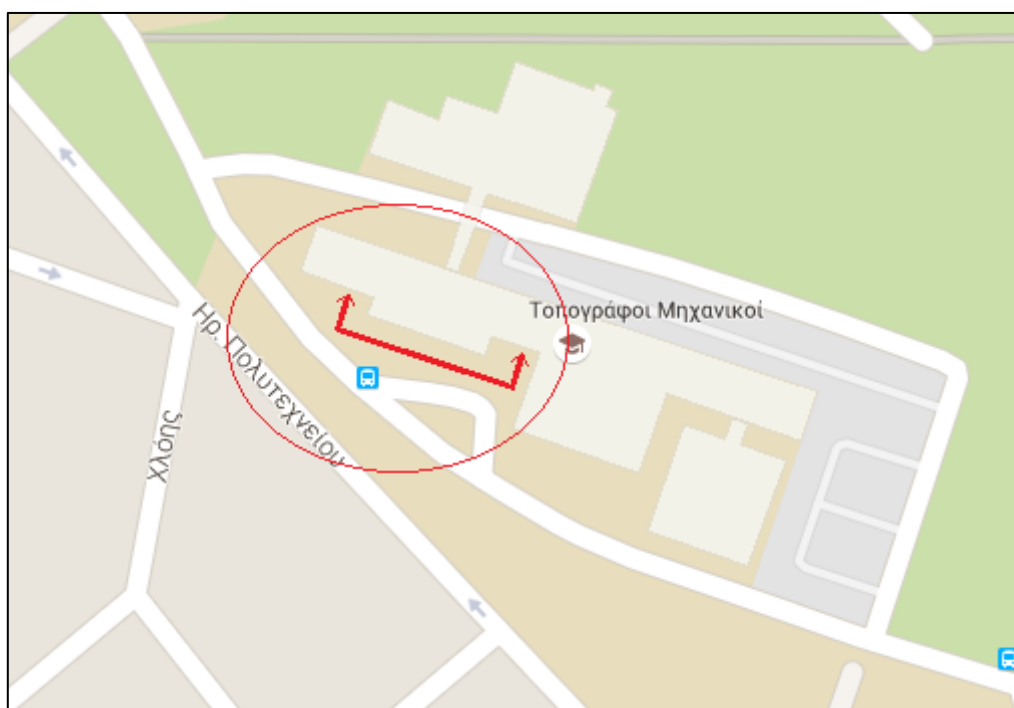
Πίνακας 4.1 Μέγιστη αβεβαιότητα των σημείων λεπτομέρειας σε σχέση με την κλίμακα εκτύπωσης του διαγράμματος.

Άρα σύμφωνα με την μέγιστη διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού ($\pm 0.25\text{mm}$) και την κλίμακα εκτύπωσης μορφώνεται ο πίνακας 4.1 ο οποίος υποδεικνύει τα όρια της αβεβαιότητας των σημείων

λεπτομέρειας σε σχέση με την αντίστοιχη κλίμακα εκτύπωσης, με συνηθέστερη να είναι αυτή των 1:50.

Η πρώτη εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι αρχιτεκτονικού κυρίως ενδιαφέροντος και πρόκειται ουσιαστικά για την αποτύπωση όψης κτιρίου. Τα τελικά γεωμετρικά παράγωγα και αντικείμενα σύγκρισης αφορούν σε διαγράμματα της όψης που προέκυψαν από διαφορετικό εξοπλισμό και μεθοδολογίες.

Η όψη που αποτυπώθηκε βρίσκεται στο νότιο τμήμα του κτιρίου Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 4.1. Η συγκεκριμένη όψη επιλέχθηκε επειδή ο περιβάλλοντας χώρος διαθέτει τις προδιαγραφές ώστε να πληρούνται τα κριτήρια ορθής λειτουργίας του εικονοσυστήματος V10 όπως αυτά περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.1 Η θέση της όψης του κτιρίου Λαμπαδαρίου σε χαρτογραφικό υπόβαθρο της Google. [<https://www.google.gr/maps/>]

Δηλαδή υπήρχε αρκετός ελεύθερος χώρος για να αναπτυχθεί ένα δίκτυο στάσεων λήψης με τις κατάλληλες αναλογίες βάσης λήψης προς απόσταση αντικειμένου. Χωρίς παράλληλα να υπάρχουν αποκρύψεις από

κινητά αντικείμενα (π.χ. αυτοκίνητα) ή βλάστηση, ενώ το τοπίο είχε έντονη εναλλαγή της υψής για εξεύρεση σημείων σύνδεσης και επίλυση του φωτοτριγωνισμού όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην πανοραμική εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Απόσπασμα επεξεργασμένου πανοράματος στο TBC του συστήματος V10 της όψης Λαμπαδαρίου.

Η όψη αρχικά αποτυπώθηκε με την κλασική γεωδαιτική μέθοδο με τη χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που έχει τη δυνατότητα να μετρά μήκη χωρίς ανακλαστήρα. Στη συνέχεια αποτυπώθηκε με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο TBC από τις λήψεις του συστήματος V10 και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση στη γεωμετρική μεταβολή των διαγραμμάτων.

4.1.1 Κλασική Μέθοδος

Η κλασική μέθοδος αναφέρεται σε γεωδαιτική διαδικασία με χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που διεξάγει μετρήσεις οριζόντιων και ζενίθιων γωνιών και κεκλιμένων μηκών με ανακλαστήρα ή χωρίς ανακλαστήρα (reflectorless). Τα σημεία λεπτομέρειας της αποτύπωσης υπολογίζονται είτε πολικά είτε με εμπροσθοτομία στο χώρο. Η μέθοδος για κάθε είδους εφαρμογή ακολουθεί τα εξής βήματα [Λάμπρου, Πανταζής, 2010]:

- Αναγνώριση του αντικειμένου και προετοιμασία αυτοσχέδιων υπαίθρου.
- Ανάπτυξη τριδιάστατων γεωδαιτικών δικτύων στο χώρο του αντικειμένου.
- Αποτύπωση των σημείων λεπτομέρειας.
- Αναλυτική επεξεργασία των μετρήσεων.

- Ψηφιακή απόδοση των διαγραμμάτων απεικόνισης της γεωμετρικής τεκμηρίωσης.
- Έλεγχος της ορθότητας του γεωμετρικού παράγωγου.

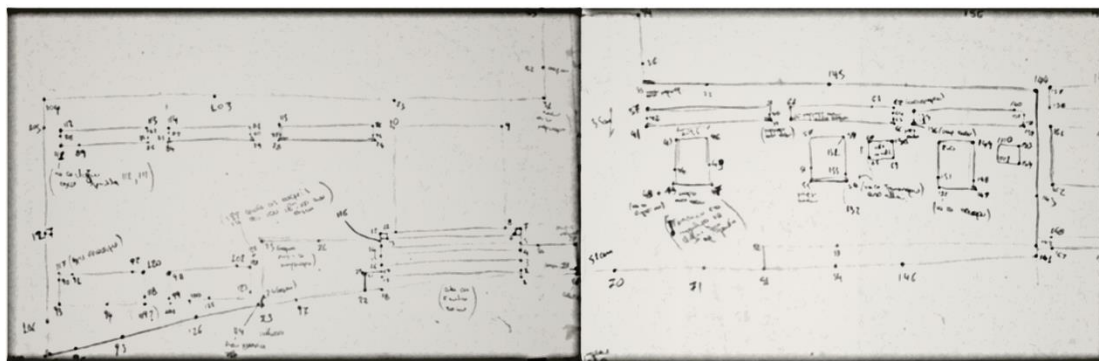
Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση μέρους της Νοτιοανατολικής όψης του Λαμπαδαρίου, αφορά στον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό TPS 1201+ της εταιρείας Leica αλλά και σε παρελκόμενά του, όπως τρίποδες, τρικόχλια και ειδικούς ανακλαστήρες όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός TPS 1201+ της εταιρείας Leica κατά τις εργασίες υπαίθρου.

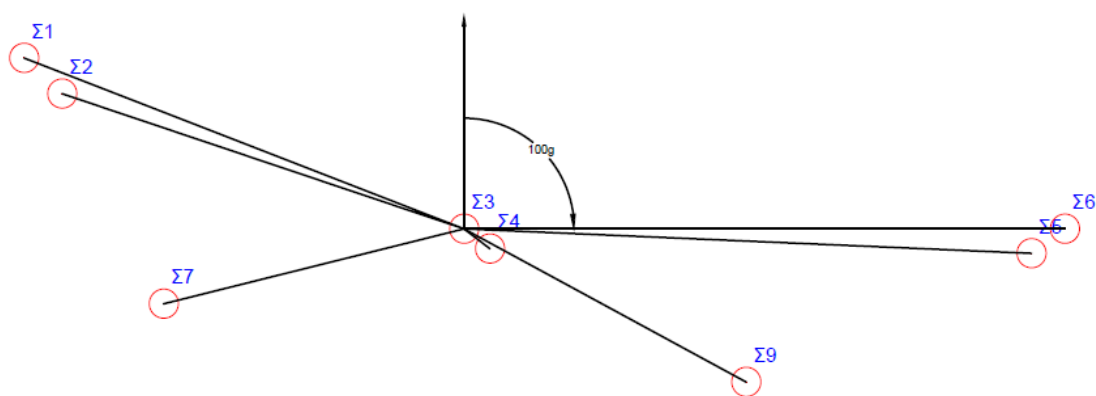
Το συγκεκριμένο όργανο έχει τη δυνατότητα να μετράει γωνιακά μεγέθη με ακρίβεια $\pm 1'' = \pm 3''$. Επιπλέον μετράει μήκη είτε με τη χρήση

ανακλαστήρα με ακρίβεια $\pm 1\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$ είτε χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα με ακρίβεια $\pm 2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$. Αυτό που χρειάζεται να επισημανθεί για τις δυνατότητες του συγκεκριμένου οργάνου σε σχέση με την εφαρμογή είναι ότι διαθέτει δέσμη ακτίνας "laser" τόσο για την κέντρωση του οργάνου όσο και για τη σκόπευση των σημείων λεπτομέρειας.



Εικόνα 4.3 Αυτοσχέδια πεδίου από την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Μετά την πραγματοποίηση της αναγνώρισης του αντικειμένου και τη σύνταξη των αυτοσχέδιων υπαίθρου (εικόνα 4.3) εκτιμήθηκε ότι το σύνολο των σημείων λεπτομέρειας της όψης μπορούσε να μετρηθεί από τρεις στάσεις αναφοράς. Οι δύο από αυτές παράλληλα θα υλοποιούν το τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς της αποτύπωσης ενώ θα αποτελούν και κορυφές του δικτύου φωτοτριγωνισμού του εικονοσυστήματος V10.



Σχήμα 4.2 Στάσεις αναφοράς για τη φωτογραμμετρική και γεωδαιτική αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Για τις ανάγκες τόσο της γεωδαιτικής διαδικασίας όσο και της φωτογραμμετρικής σημάνθηκαν με ημιμόνιμο τρόπο 8 στάσεις με

ατσάλινα καρφιά. Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, σχήμα 4.2, επιλέγεται να είναι τοπικό αυθαίρετο ώστε να μην μεταδίδεται η χαρτογραφική παραμόρφωση στη γεωμετρική πληροφορία.

Η αρχή του συστήματος αναφοράς υλοποιείται από τη στάση Σ3 με συντεταγμένες $x, y, H=(100m, 100m, 10m)$ και ο προσανατολισμός του από τη γωνία διεύθυνσης $\alpha_{\Sigma 3 \Sigma 6}=100^{\circ}$ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των στάσεων προέκυψαν με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων και των τριών τριπόδων από τη στάση Σ1 με μηδενισμό στη Σ6.

Αντίστοιχα με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων προσδιορίστηκαν το σύνολο των γεωδαιτικών συντεταγμένων των 165 σημείων λεπτομέρειας της όψης. Τα 110 από τα οποία μετρήθηκαν από τη στάση Σ1 με μηδενισμό στη στάση Σ6, τα 39 από τη στάση Σ6 αντίστοιχα με μηδενισμό στη στάση Σ1 και τα υπόλοιπα 16 από τη Σ2 με μηδενισμό στη Σ3.

Οι μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού προς τις στάσεις αναφοράς αφορούν σε οριζόντιες γωνίες, ζενίθιες γωνίες, κεκλιμένα μήκη με τη χρήση ανακλαστήρα ενώ παράλληλα μετράται με μετροταινία το ύψος οργάνου και το ύψος στόχου. Η διαφορά στις μετρήσεις που γίνονται προς τα σημεία λεπτομέρειας είναι ότι το ύψος στόχου μηδενίζεται ενώ τα κεκλιμένα μήκη μετρούνται με εφαρμογή της λειτουργίας μέτρησης αποστάσεων χωρίς ανακλαστήρα.

Οι μαθηματικές σχέσεις της μεθόδου των πολικών συντεταγμένων από τη στάση Σ προς ένα σημείο i προσδιορίζονται από το 1^ο θεμελιώδες πρόβλημα σχέση (4.1), (4.2) και τον τύπο της τριγωνομετρικής υψομετρίας, σχέση (4.3). Στη σχέση της τριγωνομετρικής υψομετρίας δεν συμπεριλαμβάνονται οι διορθώσεις λόγω της ατμοσφαιρικής διάθλασης και της καμπυλότητας της γης επειδή οι αποστάσεις είναι μικρές και άρα οι συγκεκριμένες διορθώσεις είναι αμελητέες.

$$x_i = x_{\Sigma} + D_{\Sigma i} \sin z_{\Sigma i} \sin \alpha_{\Sigma i} \quad (4.1)$$

$$y_i = y_{\Sigma} + D_{\Sigma i} \sin z_{\Sigma i} \cos \alpha_{\Sigma i} \quad (4.2)$$

$$H_i = H_{\Sigma} + D_{\Sigma i} \cos z_{\Sigma i} + Y_{O_{\Sigma}} - Y_{\Sigma i} \quad (4.3)$$

Όπου $\alpha_{\Sigma i}$ είναι η γωνία διεύθυνσης της πλευράς Σi που δίνεται από το τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα της σχέσης (4.4) με Σ' τη στάση μηδενισμού.

$$\alpha_{\Sigma i} = \alpha_{\Sigma' \Sigma} + \beta_{\Sigma' \Sigma i} + 200^g - k400^g \quad (4.4)$$

Οι αβεβαιότητες προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων και των σημείων λεπτομέρειας υπολογίζονται από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις (4.1), (4.2) και (4.3) ως εξής [Λάμπρου, Πανταζής, 2010]:

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\sigma_{x\Sigma}^2 + \sigma_{\kappa}^2 + (\sin z_{\Sigma i} \sin \alpha_{\Sigma i})^2 \sigma_{D\Sigma i}^2 + (D_{\Sigma i} \cos z_{\Sigma i} \sin \alpha_{\Sigma i})^2 \left(\frac{\sigma_{z\Sigma i}}{\rho_{cc}}\right)^2 + (D_{\Sigma i} \sin z_{\Sigma i} \cos \alpha_{\Sigma i})^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha\Sigma i}}{\rho_{cc}}\right)^2} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{yi} = \sqrt{\sigma_{y\Sigma}^2 + \sigma_{\kappa}^2 + (\sin z_{\Sigma i} \cos \alpha_{\Sigma i})^2 \sigma_{D\Sigma i}^2 + (D_{\Sigma i} \cos z_{\Sigma i} \cos \alpha_{\Sigma i})^2 \left(\frac{\sigma_{z\Sigma i}}{\rho_{cc}}\right)^2 + (-D_{\Sigma i} \sin z_{\Sigma i} \sin \alpha_{\Sigma i})^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha\Sigma i}}{\rho_{cc}}\right)^2} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{zi} = \sqrt{\sigma_{z\Sigma}^2 + (\cos z_{\Sigma i})^2 \sigma_{D\Sigma i}^2 + (D_{\Sigma i} \sin z_{\Sigma i})^2 \left(\frac{\sigma_{z\Sigma i}}{\rho_{cc}}\right)^2 + \sigma_{Y0}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2} \quad (4.7)$$

Όπου το σφάλμα μέτρησης του ύψους οργάνου και στόχου εκτιμήθηκε στο $\pm 1\text{mm}$ ενώ με σ_{κ} συμβολίζεται το σφάλμα της "laser" κέντρωσης του οργάνου στον έναν άξονα, το οποίο στο σύνολο του δίνεται από τον κατασκευαστή $\pm 1.5\text{mm}$ για 1.5m ύψος, και ισούται με:

$$\sigma_{\kappa} = \pm \frac{1.5\text{mm}}{\sqrt{2}} = \pm 1.06\text{mm} \approx \pm 1\text{mm} \quad (4.8)$$

Ακόμη το σφάλμα της γωνίας διεύθυνσης της στάσης αναφοράς προς το σημείο υπολογίζεται συναρτήσει του σφάλματος της γωνίας διεύθυνσης της στάσης μηδενισμού και το σφάλμα μέτρησης των γωνιακών διευθύνσεων του οργάνου άρα η σχέση (4.4) από νόμο μετάδοσης σφαλμάτων γίνεται:

$$\sigma_{\alpha\Sigma i} = \sqrt{\sigma_{\Sigma' \Sigma}^2 + \sigma_{\beta_{\Sigma' \Sigma i}}^2} = \sqrt{\sigma_{\Sigma' \Sigma}^2 + 2\sigma_{\delta}^2} \quad (4.9)$$

Αντίστοιχα το σφάλμα της γωνίας διεύθυνσης $\sigma_{\Sigma \Sigma}$ υπολογίζεται από νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στη συνάρτηση του τόξου εφαπτομένης ($\arctan=dx/dy$) ως εξής:

$$\sigma_{\alpha\Sigma'} = \sqrt{\left(-\frac{y_{\Sigma} - y_{\Sigma'}}{S_{\Sigma'\Sigma}}\right)^2 \sigma_{x_{\Sigma'}}^2 + \left(\frac{x_{\Sigma} - x_{\Sigma'}}{S_{\Sigma'\Sigma}}\right)^2 \sigma_{y_{\Sigma'}}^2 + \left(\frac{y_{\Sigma} - y_{\Sigma'}}{S_{\Sigma'\Sigma}}\right)^2 \sigma_{x_{\Sigma}}^2 + \left(-\frac{x_{\Sigma} - x_{\Sigma'}}{S_{\Sigma'\Sigma}}\right)^2 \sigma_{y_{\Sigma}}^2} \quad (4.10)$$

Τα αποτελέσματα των αβεβαιοτήτων προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων αναφοράς και των σημείων λεπτομέρειας προέκυψαν με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου του "Excel" και τις σχέσεις (4.5) έως (4.10) και παρουσιάζονται στους πίνακες 4.2, 4.3.

Στάσεις	σ _x	σ _y	σ _H
Σ1	±1.3mm	±1.2mm	±1.4mm
Σ2	±1.3mm	±1.1mm	±1.4mm
Σ3	-	-	-
Σ4	±1.3mm	±1.2mm	±1.9mm
Σ5	±1.3mm	±1.3mm	±1.4mm
Σ6	±1.3mm	±0.9mm	±1.4mm
Σ7	±1.3mm	±1.2mm	±1.4mm
Σ9	±1.3mm	±1.2mm	±1.4mm

Πίνακας 4.2 Αβεβαιότητες προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων αναφοράς.

-	σ _x	σ _y	σ _H
μέγιστη τιμή	±2.6mm	±2.6mm	±1.9mm
μέσος όρος	±2.0mm	±2.0mm	±1.3mm

Πίνακας 4.3 Αβεβαιότητες προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας.

Από τον πίνακα 4.3 τα σημεία λεπτομέρειας μπορούν να θεωρηθούν ομοιογενή ως προς τις αβεβαιότητες των συντεταγμένων τους.

Στη συνέχεια για την απόδοση του διαγράμματος της όψης τα σημεία λεπτομέρειας χρειάζεται να στραφούν ώστε το ίχνος της όψης να γίνει παράλληλο με κάποιον οριζοντιογραφικό άξονα συντεταγμένων και ταυτόχρονα να μετασχηματιστούν. Με τον τρόπο αυτό το διάγραμμα της όψης σχεδιάζεται σε ορθή προβολή και παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι κατοπτρικές και προβολικές παραμορφώσεις της γεωμετρικής πληροφoρίας.

Η γωνία στροφής λοιπόν υπολογίζεται από την προσαρμογή της βέλτιστης ευθείας στο οριζόντιο επίπεδο σε σχέση με τα σημεία της όψης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ειδικότερα η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αφορά στη γενική μέθοδο συνόρθωσης. Με τη

συγκεκριμένη μέθοδο υπολογίζονται απευθείας οι παράμετροι ενδιαφέροντος χωρίς να δεσμεύονται μετρημένα μεγέθη [Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009].

Για την επίλυση της συνόρθωσης χρησιμοποιήθηκαν 116 σημεία της όψης, δηλαδή αφαιρέθηκαν από τη διαδικασία τα άνω και κάτω προβαλλόμενα σημεία για τη βελτίωση του αποτελέσματος.

Ως εξίσωση συνθήκης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της ευθείας στο επίπεδο, σχέση (4.11). Άρα ο αριθμός των ανεξάρτητων παραμέτρων διαμορφώνεται στα $m_0=2$ δηλαδή όσες και οι παράμετροι a, b της εξίσωσης της ευθείας, ο αριθμός των εξισώσεων συνθήκης στα $c=116$ και αντίστοιχα ο βαθμός ελευθερίας στα $r=c-m_0=114$.

$$y_i = ax_i + b \quad (4.11)$$

Το διάνυσμα των αγνώστων είναι πίνακας στήλη της μορφής $x=[a, b]^T$. Η σχέση (4.11) όμως δεν είναι γραμμική ως προς τους αγνώστους οπότε χρειάζεται να γίνει γραμμικοποίηση των αγνώστων αναπτύσσοντας τη σχέση σε σειρά κατά Taylor των διαφορικών πρώτης τάξης ως εξής:

$$x_i d\hat{a} + d\hat{b} + a_0 x_i + b_0 - y_i = 0 \quad (4.12)$$

Όπου $a_0 x_i + b_0 = y_0$.

Μετά τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων το σύστημα σε μορφή πινάκων έχει την παρακάτω μορφή:

$$Ad\hat{x} + Bu = k - Bl \rightarrow Ad\hat{x} + Bu = w \quad (4.13)$$

Όπου A_2^{116} : ο πίνακας των συντελεστών των παραμέτρων

B_{232}^{116} : ο πίνακας των συντελεστών των μετρήσεων

$d\hat{x}_1^2$: οι διορθώσεις των καλύτερων τιμών των παραμέτρων

l_1^{232} : το διάνυσμα των μετρήσεων

u_1^{232} : το διάνυσμα των υπολοίπων των μετρήσεων

k_1^{116} : το διάνυσμα των σταθερών όρων

w_1^{116} : το διάνυσμα των σφαλμάτων κλεισίματος

Ο πίνακας A κατασκευάζεται από τους δύο πρώτους όρους της σχέσης (4.12) και ως εκ τούτου στην πρώτη του στήλη περιέχει τις μετρήσεις των x ενώ η δεύτερη στήλη του περιέχει μονάδες:

$$A = \begin{vmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

Ο πίνακας B κατασκευάζεται από τον τρίτο και πέμπτο όρο της σχέσης (4.12) και περιέχει την προσωρινή τιμή της εφαπτομένης της ευθείας α_0 και την αρνητική μονάδα στα αντίστοιχα x, y των μετρήσεων:

$$B = \begin{vmatrix} \alpha_0 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \alpha_0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

Ο πίνακας στήλη k των σταθερών όρων περιέχει σε όλες του τις σειρές την προσωρινή τιμή $-b_0$. Αντίστοιχα με πράξεις μεταξύ των πινάκων κατασκευάζεται ο $w=k-B1$ που πρόκειται ουσιαστικά για τον πίνακα κλεισίματος που ισοδυναμεί με τις πράξεις $w=y-y_0$.

Στη διαδικασία δε χρησιμοποιήθηκε πίνακας βαρών καθώς οι μετρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως.

Η επίλυση του συστήματος δίνεται από τις σχέσεις (4.18) και (4.19) ως προς τους βοηθητικούς πίνακες των σχέσεων (4.16) και (4.17) με το διάνυσμα \hat{x} να αντιστοιχεί τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων που ενδιαφέρουν:

$$P_\alpha = (BB^T)^{-1} \quad (4.16)$$

$$N_\alpha = A^T P_\alpha A \quad (4.17)$$

$$d\hat{x} = N_\alpha^{-1} A^T P_\alpha w \quad (4.18)$$

$$\hat{x} = x_0 + d\hat{x} \quad (4.19)$$

Στις σχέσεις (4.20), (4.21) και (4.22) που ακολουθούν υπολογίζονται αντίστοιχα ο πίνακας των υπολοίπων των μετρήσεων, το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους της συνόρθωσης και ο a-posteriori πίνακας μεταβλητότητας συμμεταβλητότητας των καλύτερων τιμών των παραμέτρων που ενδιαφέρουν:

$$u = B^T P_\alpha (w - Ad\hat{x}) \quad (4.20)$$

$$\hat{\sigma}_0 = \pm \sqrt{\frac{u^T u}{r}} \quad (4.21)$$

$$\hat{V}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N_\alpha^{-1} \quad (4.22)$$

Το παραπάνω σύστημα συνόρθωσης συντάχθηκε και επιλύθηκε στο περιβάλλον του Matlab και ο κώδικας του προγράμματος εμπεριέχεται στο παράρτημα της εργασίας. Επιπλέον οι προσωρινές τιμές των άγνωστων παραμέτρων προσδιορίστηκαν με την προσαρμογή ευθείας που παρέχεται στις εφαρμογές του λογισμικού.

Στο τέλος το πρόγραμμα εμφανίζει στην οθόνη τις λύσεις των παραμέτρων με τα τυπικά τους σφάλματα. Ταυτόχρονα εμφανίζει την αριστερόστροφη γωνία στροφής των ταχυμετρικών σημείων σε σχέση με τον άξονα x και το τυπικό της σφάλμα από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων, στη συνάρτηση του τόξου εφαπτομένης:

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων με τα τυπικά είναι σφάλματα είναι:

$$\alpha = -0.1654529384 \pm 0.0001687642 \text{ rad}$$

$$\beta = 1173.817 \pm 0.169 \text{ m}$$

Η γωνία στροφής με το τυπικό της σφάλμα είναι:

$$\gamma_{\text{τομής}} = -10.4385 \pm 0.0105 \text{ grad}$$

Η γωνία $\gamma_{\text{τομής}}$ είναι αριστερόστροφη ως προς τον άξονα x, όμως η γωνία διεύθυνσης της όψης μπορεί να ανήκει είτε στο δεύτερο είτε στο τέταρτο τεταρτημόριο να είναι δηλαδή ή 110.4385° ή 310.4385° . Για να στραφούν τα σημεία ως προς το σωστό γωνιακό μέγεθος και να προκύψει η επιθυμητή όψη και όχι η κατοπτρική, η σωστή γωνία διεύθυνσης είναι αυτή που δημιουργείται όταν διατρέχεται η όψη από αριστερά προς τα δεξιά, με μέτωπο προς αυτήν, να αφήνει το ίχνος της τομής στα αριστερά της [Λάμπρου, Πανταζής, 2010].

Το γεγονός αυτό συμβαίνει όταν η $\alpha_{\text{τομής}}=110.4385^g$. Για να στρίψουν τα σημεία λεπτομέρειας και το ίχνος της τομής να γίνει παράλληλο στον άξονα x το σύστημα αναφοράς πρέπει να στραφεί κατά γωνία:

$$\varphi = \alpha_{\text{τομής}} - 100^g = 10.4385^g. \quad (4.23)$$

Η στροφή και ο μετασχηματισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων της όψης του Λαμπαδαρίου πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Matlab, ο κώδικας του συγκεκριμένου αλγορίθμου υπάρχει στο παράρτημα.

Η στροφή του συστήματος έγινε κρατώντας σταθερό το ταχυμετρικό σημείο 106 σύμφωνα με τις σχέσεις (4.24), (4.25) ενώ ο μετασχηματισμός έγινε όπως υποδεικνύεται στη σχέση (4.26) [Πανταζής Γ., 2005]:

$$x_i = x_{106} + \cos\varphi(x_i - x_{106}) - \sin\varphi(y_i - y_{106}) \quad (4.24)$$

$$y_i = y_{106} + \sin\varphi(x_i - x_{106}) + \cos\varphi(y_i - y_{106}) \quad (4.25)$$

$$x_s = x_i, \quad y_s = H_i, \quad H_s = y_i \quad (4.26)$$

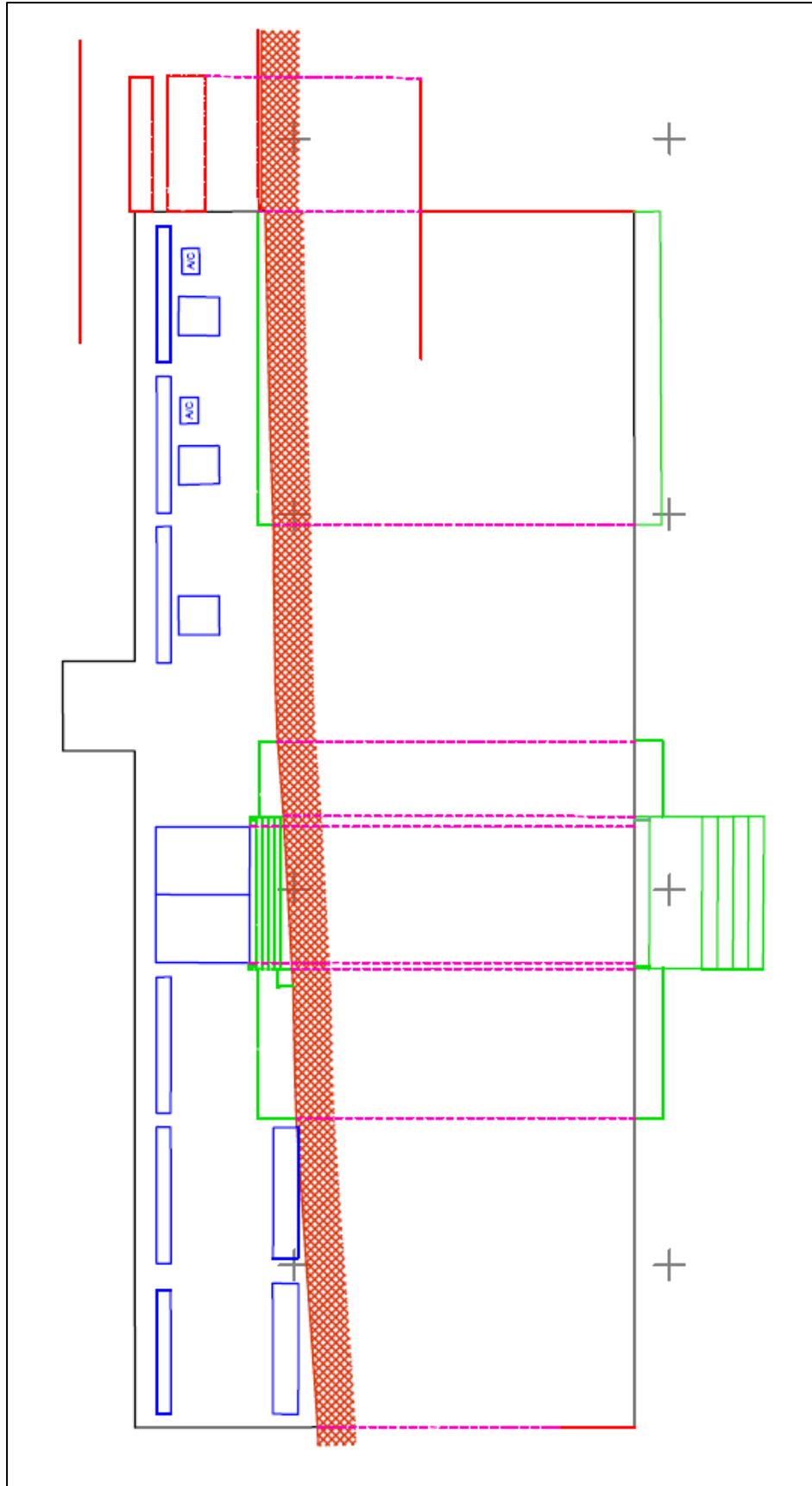
Με την ολοκλήρωση των εργασιών που περιγράφηκαν πραγματοποιήθηκε η απόδοση του διαγράμματος της όψης του Λαμπαδαρίου, η οποία πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Autocad το αποτέλεσμα του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.

Κατά την απόδοση δημιουργήθηκαν διαφορετικά θεματικά επίπεδα (layers) με διαφορετικά χρώματα για το επίπεδο της όψης, την επιφάνειας του εδάφους, των κάτω προβαλλόμενων στοιχείων, που αφορούν κυρίως σε σκάλες, πεζούλια και φεγγίτες, και των άνω προβαλλόμενων στοιχείων όπως φαίνονται χαρακτηριστικά στο υπόμνημα του σχήματος 4.3.

Ο έλεγχος του διαγράμματος πραγματοποιήθηκε επιτυχημένα με δύο τρόπους. Αρχικά με τον έλεγχο του ταυτόσημου του διαγράμματος της όψης σε σχέση με αυτό της γενικής οριζοντιογραφίας, του σχήματος 4.4 που ακολουθεί το υπόμνημα του σχήματος 4.3 ενώ με ροζ διακεκομμένες φαίνονται οι προβολές ομόλογων σημείων. Ο δεύτερος τρόπος αφορούσε σε τοπομετρικές μετρήσεις με χρήση μετροταινίας σε χαρακτηριστικές αποστάσεις του σχεδίου σε όλη την έκταση του διαγράμματος.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα όψης Λαμπαδαρίου από γεωδαιτική διαδικασία.



Σχήμα 4.4 Έλεγχος του ταυτόσημου των διαγραμμάτων της όψης και της γενικής οριζοντιογραφίας από γεωδαιτική διαδικασία.

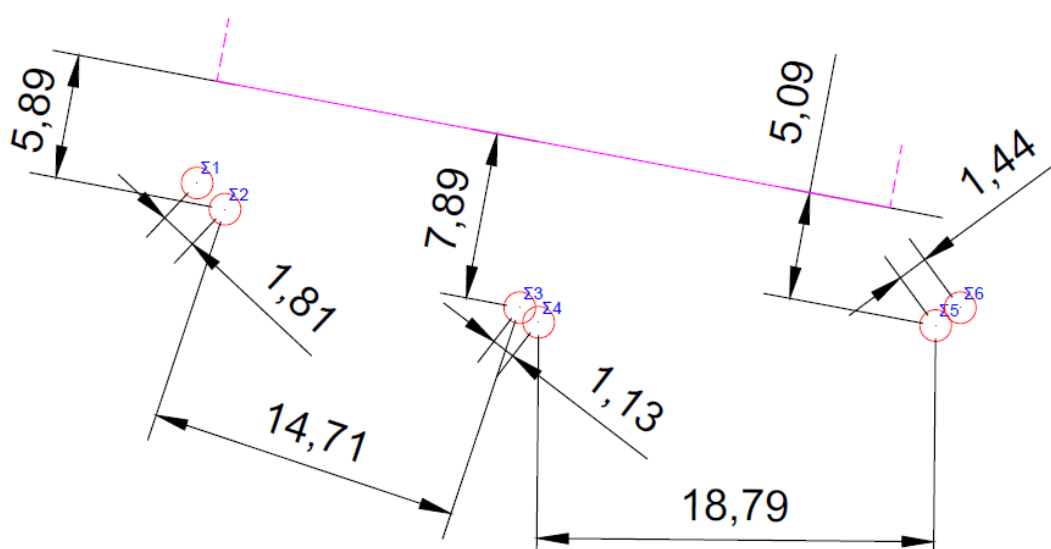
4.1.2 Αποτύπωση με το Σύστημα V10

Αυτόματη διαδικασία τριγωνισμού:

Ο αρχικός σχεδιασμός των στάσεων λήψης του V10 πραγματοποιήθηκε με στόχο την επίλυση του τριγωνισμού με αυτόματη διαδικασία. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν αρχικά τρία δίπολα, απόστασης της τάξης των 2m και λιγότερο, από 6 στάσεις λήψης ($\Sigma 1$ - $\Sigma 2$, $\Sigma 3$ - $\Sigma 4$, $\Sigma 5$ - $\Sigma 6$) που μετρήθηκαν γεωδαιτικά όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Με τη διαδικασία των δίπολων οι αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης σημείων γίνονται αποδοτικότεροι.

Η επιλογή των θέσεων πραγματοποιήθηκε ώστε να ικανοποιείται η ανισότητα (2.9) και η βάση λήψης να είναι μεγαλύτερη από το μισό της απόστασης αντικειμένου και μικρότερη από 2.5 φορές της ίδιας απόστασης.

Η επιλογή της θέσης των στάσεων λήψης έγινε με χρήση μετροταινίας των 30m. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι αποστάσεις μεταξύ των δίπολων, των βάσεων λήψης και της απόστασης αντικειμένου σε μέτρα, οι οποίες πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια.



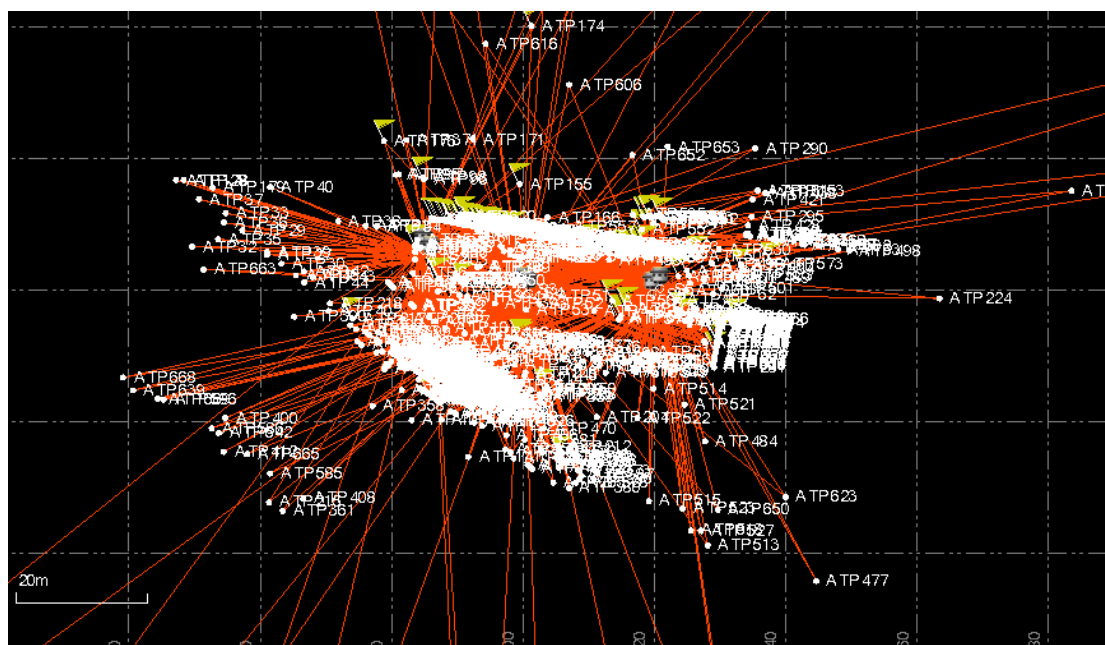
Σχήμα 4.5 Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων λήψης και της όψης του Λαμπαδαρίου.

Επιπλέον δόθηκε έμφαση ώστε η οι στάσεις να μην είναι συνευθειακές αλλά να σχηματίζουν τεθλασμένη γραμμή γεγονός που επιτεύχθηκε αλλά όχι σε ικανοποιητικό βαθμό. Αξίζει να τονιστεί είναι ότι η βάση λήψης

μεταξύ Σ3Σ4-Σ5Σ6 είναι οριακά στη μέγιστη τιμή της ενώ η βάση λήψης μεταξύ των δίπολων Σ3-Σ4 δεν μπορεί να εξυπηρετήσει στατιστικά σημαντικές εμπροσθοτομίες προς το επίπεδο της όψης. Αντίστοιχα τα άλλα δύο δίπολα έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν μετρήσεις σε μία μικρή μόνο περιοχή της όψης.

Ο τριγωνισμός των πανοραμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της δέσμης με αυτόματη διαδικασία εξεύρεσης σημείων σύνδεσης με είδος εγκατάστασης "full orientation". Δηλαδή κάθε πανόραμα εισάγει στη συνόρθωση τρεις αγνώστους, για τις τρεις στροφές ω , φ , κ και για κάθε σημείο σύνδεσης εισάγει ως άγνωστες τις γεωδαιτικές του συντεταγμένες.

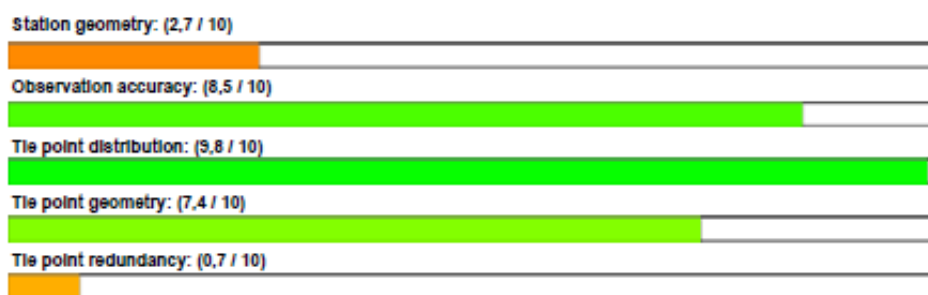
Ο τριγωνισμός των πανοραμάτων επιλύθηκε με επιτυχία προσανατολίζοντας και τις 6 λήψεις, με 620 σημεία σύνδεσης, 2670 εξισώσεις συνθήκης, 1878 αγνώστους και 792 βαθμούς ελευθερίας. Το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους υπολογίστηκε στα 0.70 (1 μ m) εικονοστοιχεία ενώ η μέγιστη απόκλιση των υπολοίπων υπολογίστηκε στα 6.9 εικονοστοιχεία. Το φωτογραμμετρικό δίκτυο του τριγωνισμού έχει τη μορφή του σχήματος 4.6, που αποδεικνύει την εμφάνιση των αυτόματων σημείων σύνδεσης κατά σμήνη.



Σχήμα 4.6 Φωτογραμμετρικό δίκτυο αυτόματου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Σε σχέση με την αναφορά της επίλυσης που δίνει το TBC, η οποία βρίσκεται εξ'ολοκλήρου στο παράρτημα της εργασίας, το αποτέλεσμα συνοψίζεται από τις πέντε μπάρες βαθμολόγησης της διαδικασίας της εικόνας 4.4. Η πρώτη μπάρα δείχνει την αδυναμία της γεωμετρίας του δικτύου των στάσεων λήψης και το γεγονός αυτό οφείλεται στο περιορισμένο εύρος των μεγεθών των γωνιών διεύθυνσης της κάθε στάσης προς τις υπόλοιπες.

Οι επόμενες τρεις μπάρες σε σχέση με την ακρίβεια των παρατηρήσεων, τη κατανομή των σημείων σύνδεσης και τη γεωμετρία τους δίνουν καλά αποτελέσματα. Η τελευταία μπάρα, η οποία έχει την χαμηλότερη βαθμολογία, αναφέρεται στο βαθμό ελευθερίας που προσφέρει κάθε σημείο σύνδεσης. Η χαμηλή αυτή βαθμολογία οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγάλη πλειοψηφία των σημείων σύνδεσης παρατηρούνται από δύο μόνο πανοράματα, δηλαδή από τη σχετική θέση των δίπολων.



Εικόνα 4.4 Μπάρες βαθμολόγησης της αυτόματης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Επιπλέον ένα σημαντικό στοιχείο σε σχέση με τη συγκεκριμένη αναφορά και επίλυση είναι ο πίνακας με τα στατιστικά στοιχεία των στάσεων λήψης όπως αυτός παρουσιάζεται στον πίνακα 4.4.

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
S1 (Q8)	1,87 / 10	10,00 / 10	123,8
S2 (Q5)	1,74 / 10	10,00 / 10	135,7
S3 (Q4)	4,29 / 10	9,75 / 10	182,6
S4 (Q3)	5,12 / 10	9,53 / 10	180,2
S5 (Q2)	1,55 / 10	10,00 / 10	81,7
S6 (Q1)	1,65 / 10	10,00 / 10	88,1

Πίνακας 4.4 Πίνακας στατιστικών στοιχείων των στάσεων λήψης της αυτόματης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Αυτό που συμπεραίνεται από το συγκεκριμένο πίνακα είναι ότι οι στάσεις Σ3 και Σ4 ισχυροποιούνται γεωμετρικά και συμμετέχουν σε περισσότερες παρατηρήσεις καθώς βρίσκονται στο κέντρο του δικτύου. Ενώ τα δίπολα στα άκρα του δικτύου των στάσεων λήψης παρουσιάζουν αδυναμία με μεγαλύτερη αυτή των στάσεων Σ5, Σ6.

Η διαδικασία της αποτύπωσης συνεχίστηκε με την επιλογή και τη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας της όψης στο TBC για τον προσδιορισμό των γεωδαιτικών τους συντεταγμένων.

Όπου ήταν εφικτό τα σημεία σκοπεύθηκαν από περισσότερες στάσεις λήψης. Οι επιλύσεις των φωτογραμμετρικών εμπροσθοτομιών πραγματοποιούνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

Από τα 84 σημεία λεπτομέρειας τα 52 επισημάνθηκαν από το λογισμικό με κατάλληλο σύμβολο και σχολιασμό για αδύναμη επίλυση (poor solution).

Τα 9 από αυτά είχαν δείκτη ισχύος του σχήματος μεγαλύτερο από 2.63 ενώ τα 43 είχαν κάποιο γωνιακό υπόλοιπο μεγαλύτερο από 2' της μοίρας, 6 σε σχέση με τις οριζόντιες γωνίες και 37 σε σχέση με τις κατακόρυφες γωνίες.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι θέσεις των στάσεων λήψης εξυπηρετούν βέλτιστες τομές εμπροσθοτομίας, δηλαδή χαμηλούς δείκτες ισχύος του σχήματος, όμως η αδύναμη επίλυση του φωτοτριγωνισμού εισάγει μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις

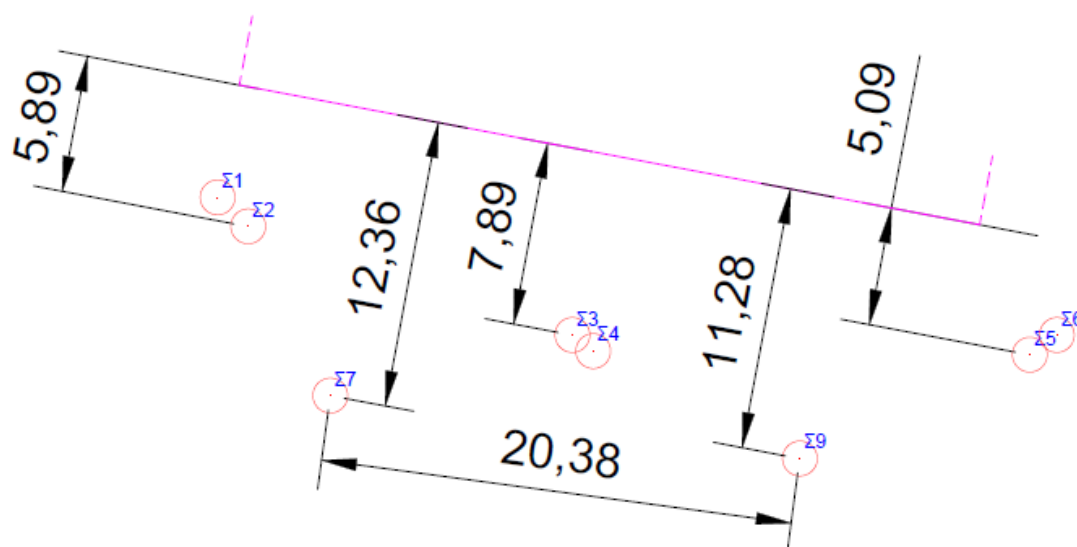
Οι συντεταγμένες των σημείων στράφηκαν και μετασχηματίστηκαν ως προς το επίπεδο της όψης με τον ίδιο κώδικα σε περιβάλλον Matlab, δηλαδή με την ίδια γωνία στροφής και το ίδιο σταθερό σημείο, που χρησιμοποιήθηκε στη γεωδαιτική μέθοδο. Αυτό έγινε ώστε να υπάρξει άμεση σύγκριση των διαγραμμάτων από τις δύο διαφορετικές μεθόδους.

Η απόδοση του διαγράμματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Autocad με μωβ χρώμα και το τελικό παράγωγο εισάχθηκε ως "block" στο διάγραμμα της όψης που προέκυψε από την κλασική διαδικασία. Όπως παρουσιάζεται στο πάνω μέρος του σχήματος 4.10 και στο αριστερό μέρος του σχήματος 4.9.

Χειροκίνητη διαδικασία τριγωνισμού:

Τόσο οι δύο πορτοκαλί μπάρες από τη βαθμολόγηση της επίλυσης της αυτόματης διαδικασίας όσο και οι αδύναμες επιλύσεις των εμπροσθοτομιών των σημείων λεπτομέρειας δημιούργησαν την ανάγκη για περισσότερη διερεύνηση με τελικό στόχο τη βελτίωση του αποτελέσματος. Έτσι αποφασίστηκε η πύκνωση του δικτύου των στάσεων λήψης.

Στη διαδικασία λοιπόν προστέθηκαν οι στάσεις Σ7 και Σ9. Στην επιλογή των θέσεων των στάσεων λήψης ακολουθήθηκαν τα ίδια κριτήρια, δηλαδή να δημιουργούνται οι κατάλληλοι συνδυασμοί μεταξύ των βάσεων λήψης και των αποστάσεων του αντικειμένου. Ενώ παράλληλα δόθηκε έμφαση ώστε να ισχυροποιείται η γεωμετρία του δικτύου, δηλαδή να αυξηθεί το εύρος των γωνιών διεύθυνσης από την κάθε στάση λήψης προς τις υπόλοιπες, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 4.7 όπου δίνονται κάποιες κρίσιμες αποστάσεις σε μέτρα.



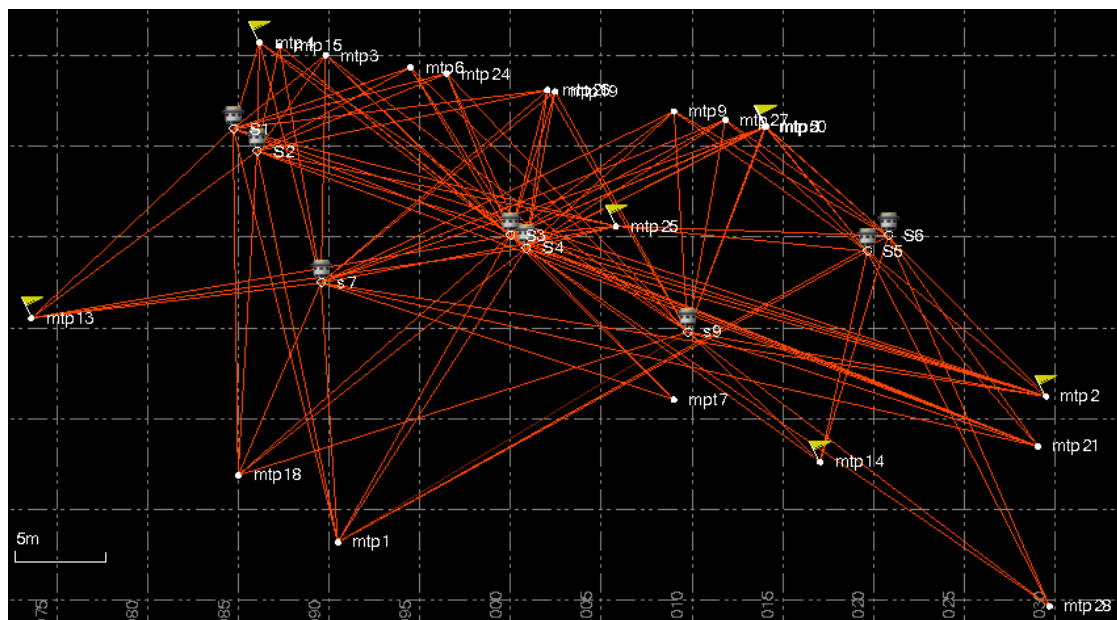
Σχήμα 4.7 Πύκνωση του δικτύου των στάσεων λήψης για την αποτύπωση της όψης Λαμπαδαρίου.

Οι λήψεις από τις στάσεις Σ7 και Σ9 πραγματοποιήθηκαν διαφορετική ημέρα και ώρα από εκείνες στις στάσεις Σ1, Σ2, Σ3, Σ4, Σ5, και Σ6. Ως εκ τούτου οι αποκλίσεις στις ραδιομετρικές μεταβολές των εικόνων και η αλλαγή του τοπίου σε σχέση με τα κινητά αντικείμενα δεν επέτρεπε την αυτόματη εξαγωγή σημείων σύνδεσης.

Έτσι επιλέχθηκε η διαδικασία εξεύρεσης και μέτρησης των σημείων σύνδεσης να γίνει χειροκίνητα με το μαθηματικό μοντέλο επίλυσης "full orientation".

Ο φωτοτριγωνισμός των 8 πανοραμάτων επιλύθηκε με επιτυχία με τη συμβολή 20 σημείων σύνδεσης τα οποία διαμόρφωσαν 222 εξισώσεις συνθήκης, με 84 αγνώστους και 138 βαθμούς ελευθερίας.

Το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους υπολογίστηκε στα 0.59 (0.8 μ m) εικονοστοιχεία ενώ η μέγιστη απόκλιση των υπολοίπων είχε την τιμή 2.64 εικονοστοιχεία. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μορφή του φωτογραμμετρικού δικτύου όπως αυτό διαμορφώθηκε χειροκίνητα στο TBC.



Σχήμα 4.8 Φωτογραμμετρικό δίκτυο χειροκίνητου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου

Όλα τα στοιχεία του δικτύου βελτιώθηκαν αισθητά όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις μπάρες βαθμολόγησης της επίλυσης του τριγωνισμού που προέρχεται από την αναφορά του TBC η οποία βρίσκεται εξ'ολοκλήρου στο παράρτημα της εργασίας. Το μόνο στοιχείο που δεν αποκαταστάθηκε πλήρως αφορά στην γεωμετρία των στάσεων λήψης ενώ μικρή ήταν η βελτίωση σε σχέση με την ποιότητα των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων που φαίνεται από τη δεύτερη μπάρα βαθμολόγησης και το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους.



Εικόνα 4.5 Μπάρες βαθμολόγησης της χειροκίνητης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

Οι βελτιώσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο αυξημένο πλήθος των παρατηρήσεων στα σημεία σύνδεσης από διαφορετικά πανοράματα, στην ισχυροποίηση του δικτύου των στάσεων λήψης και στην ποιότητα των χειροκίνητων φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων παρά τον μικρό αριθμό των σημείων σύνδεσης. Επιπλέον από τον πίνακα 4.5 που περιέχει στατιστικά στοιχεία σε σχέση με τις στάσεις λήψης φαίνεται ότι οι ισχυρότερες επιλύσεις αφορούν στις στάσεις Σ7 και Σ9 ενώ οι πιο αδύναμες στις στάσεις Σ5 και Σ6.

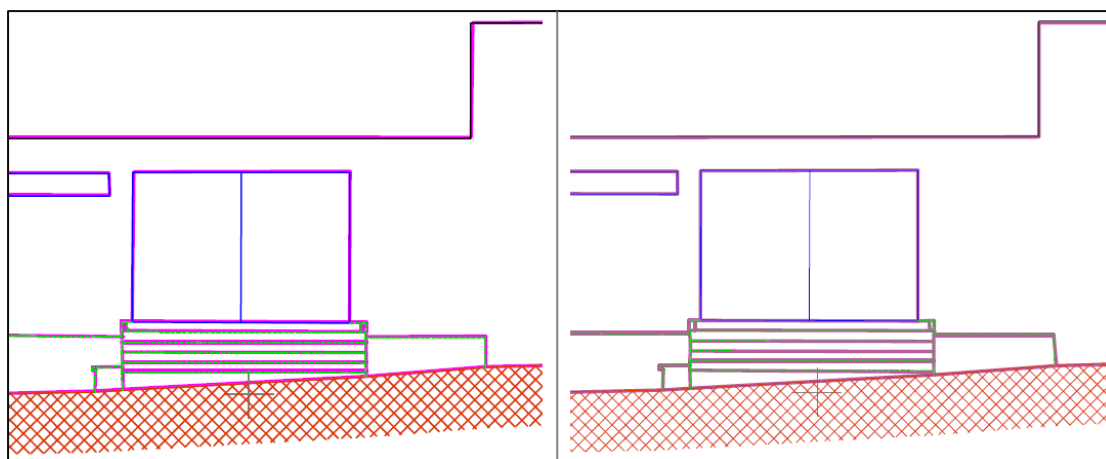
Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
S1 (Q6)	5,58 / 10	10,00 / 10	13,2
S2 (Q5)	5,75 / 10	10,00 / 10	14,6
S3 (Q4)	6,04 / 10	10,00 / 10	24,0
S4 (Q3)	6,05 / 10	10,00 / 10	26,3
S5 (Q2)	4,22 / 10	7,51 / 10	11,5
S6 (Q1)	4,26 / 10	8,03 / 10	11,1
S7 (Q9)	8,78 / 10	10,00 / 10	19,2
S9 (Q10)	8,07 / 10	9,06 / 10	18,1

Πίνακας 4.5 Πίνακας στατιστικών στοιχείων των στάσεων λήψης της χειροκίνητης επίλυσης του τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου.

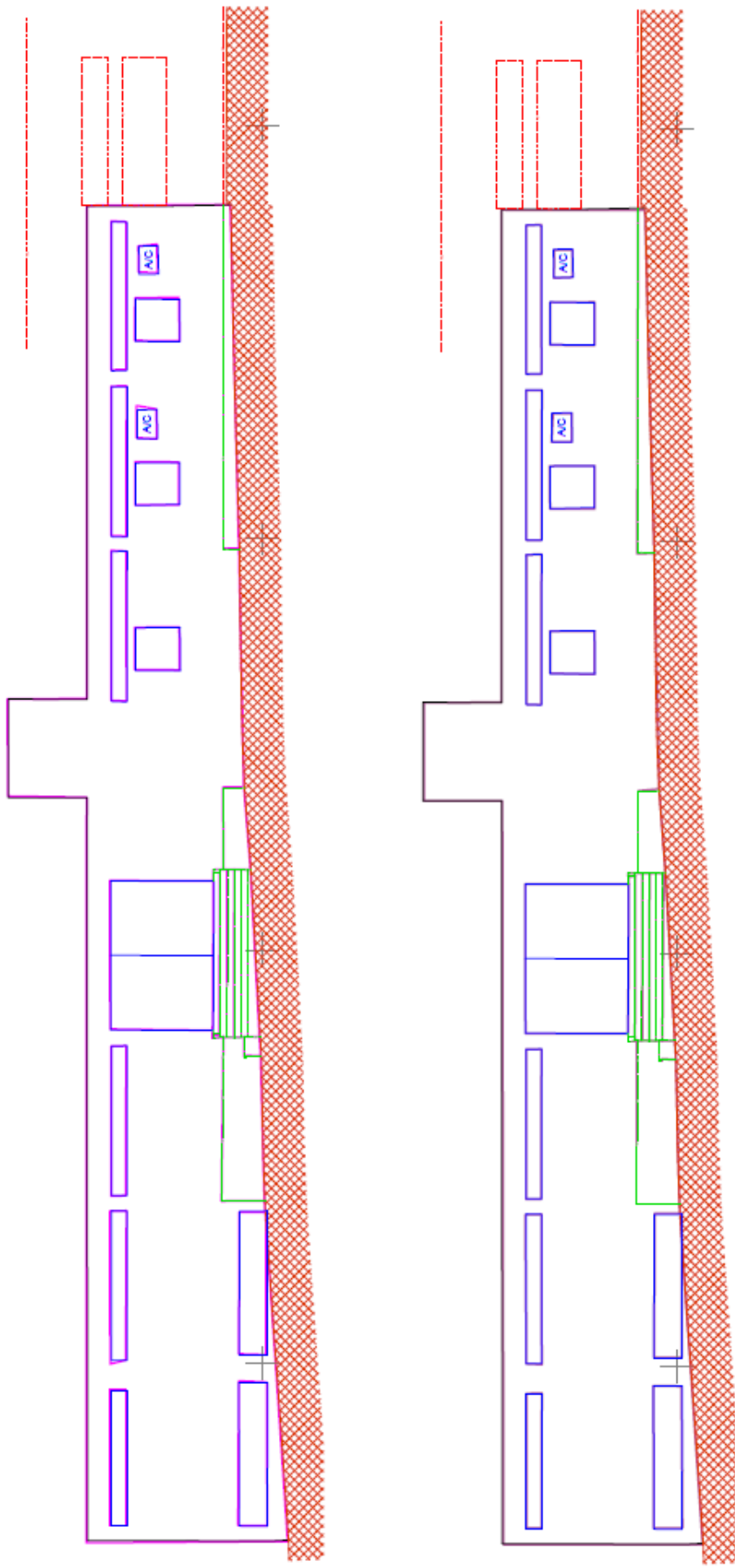
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου με 86 σημεία λεπτομέρειας τα οποία επιλέχθηκαν και μετρήθηκαν εκ νέου στο νέο μοντέλο που δημιουργήθηκε. Από αυτά μόνο τα έξι παρουσίασαν αδυναμία επίλυσης, όπου τα 2 είχαν μεγάλο δείκτη ισχύος τους σχήματος, γεγονός που αποδεικνύει την επιτυχία των θέσεων των στάσεων λήψης, το 1 είχε μεγάλο υπόλοιπο σε σχέση με την οριζόντια γωνία ενώ τα άλλα 3 σε σχέση με τις κατακόρυφες γωνίες.

Τα σημεία αυτά στράφηκαν και μετασχηματίστηκαν ως προς το επίπεδο της όψης με τον ίδιο αλγόριθμο σε περιβάλλον Matlab, δηλαδή με την ίδια γωνία στροφής και το ίδιο σταθερό σημείο, που χρησιμοποιήθηκε στη γεωδαιτική μέθοδο και στην αυτόματη διαδικασία. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να υπάρχει άμεση σύγκριση και συσχέτιση των διαγραμμάτων.

Η απόδοση του διαγράμματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Autocad με μωβ χρώμα και το τελικό παράγωγο εισάχθηκε ως "block" στο διάγραμμα της όψης του Λαμπαδαρίου που προέκυψε από την κλασική γεωδαιτική διαδικασία. Η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος 4.10 και στο δεξί μέρος του σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9 Σύγκριση του διαγράμματος της γεωδαιτικής διαδικασίας με αυτό της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού (αριστερά) και της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού (δεξιά).



Σχήμα 4.10 Σύγκριση των διαγραμμάτων της γεωδαιτικής διαδικασίας με της φωτογραμμετρικής για αυτόματο (αριστερά) και χειροκίνητο (δεξιά) τριγωνισμό.

4.1.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων

Τα δύο διαγράμματα που προέκυψαν φωτογραμμετρικά, από την αυτόματη και χειροκίνητη διαδικασία τριγωνισμού όπως και αυτό που προέκυψε με τη γεωδαιτική διαδικασία χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα αναφοράς. Ταυτόχρονα έχουν στραφεί κατά την ίδια γωνιά και το ίδιο σταθερό σημείο ως προς το επίπεδο της όψης.

Αποτέλεσμα αυτού είναι η άμεση σύγκριση και συσχέτιση των διαγραμμάτων μεταξύ τους. Η πρώτη σύγκριση πραγματοποιήθηκε οπτικά όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9 και 4.10 όπου τα φωτογραμμετρικά διαγράμματα έχουν εισαχθεί ως "block" με μωβ χρώμα και έχουν τοποθετηθεί πίσω από το σχέδιο της κλασικής μεθόδου.

Έτσι, οι γεωμετρικές μεταβολές των διαγραμμάτων ως προς αυτό της κλασικής μεθόδου αναπαριστώνται στις μωβ περιοχές των σχεδίων του σχήματος 4.9. Αν και στη συγκεκριμένη κλίμακα απεικόνισης δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν λεπτομέρειες εύλογα αντιλαμβάνεται κανείς την παρεμβολή του μωβ χρώματος στο σχέδιο που αφορά την αυτόματη διαδικασία τριγωνισμού. Αντίθετα στο κάτω μέρος του σχήματος που παρεμβάλλεται το σχέδιο της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού οι μεταβολές διακρίνονται ελάχιστα έως καθόλου.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί η ακρίβεια των ταχυμετρικών σημείων που υπολογίστηκαν με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό είναι της τάξης των $\pm 2\text{mm}$ για την κάθε διάσταση. Παράλληλα πολλές λεπτομέρειες από τα γεωμετρικά στοιχεία της όψης υπολογίστηκαν ως αποτέλεσμα τομής ευθειών στο Autocad με τη βοήθεια των εντολών extend και fillet, αυξάνοντας έτσι την ορθότητα τους.

Η διαδικασία αυτή συνήθως δεν είναι δυνατή κατά την επιλογή σημείων από το μοντέλο και οι "σκοπεύσεις" αφορούν σημεία που δεν έχουν καμία συμμετρικότητα ή χαρακτηριστική ακμή.

Για τους λόγους που περιγράφηκαν και για την ποσοτικοποίηση της γεωμετρικής μεταβολής των διαγραμμάτων μετριέται η ευκλείδεια απόσταση στο επίπεδο της όψης από τα σημεία λεπτομέρειας της γεωδαιτικής διαδικασίας προς τα ομόλογα σημεία που προσδιορίστηκαν με το εικονοσύστημα V10. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή της

γεωμετρικής μεταβολής ανάμεσα στις παρατηρήσεις από τις δύο διαδικασίες.

Επιπλέον εξετάζεται η μέση τιμή τόσο της κατά x διαφοράς όσο και της κατά y σε απόλυτες τιμές σύμφωνα με τη σχέση (4.27) [Αγατζιά-Μπαλοδήμου, 2009]. Αντίστοιχα υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης της διαφοράς, αλλά και συνολικά η μεταβολή για διαφορετικά μέρη των διαγραμμάτων.

$$\overline{dx} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n |dx| \quad (4.27)$$

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται και για τα δύο σχέδια με τη βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου του Autocad και της εντολής μέτρησης αποστάσεων και ενός λογιστικού φύλλου του προγράμματος Excel. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η μέση τιμή της διαφοράς στις μετρήσεις των γεωδαιτικών συντεταγμένων από τις δύο διαδικασίες. Έτσι δίνεται μια καλή εκτίμηση της ακρίβειας των δεδομένων του συστήματος V10.

Γεωμετρική μεταβολή διαγράμματος αυτόματου τριγωνισμού:

Η μέση τιμή της γεωμετρικής μεταβολής \overline{dS} του διαγράμματος που προέκυψε από την επίλυση του αυτόματου τριγωνισμού σε σχέση με αυτό της κλασσικής διαδικασίας υπολογίστηκε στα **25mm** από 84 ομόλογα σημεία. Το εύρος τιμών της βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος [**2mm,103mm**].

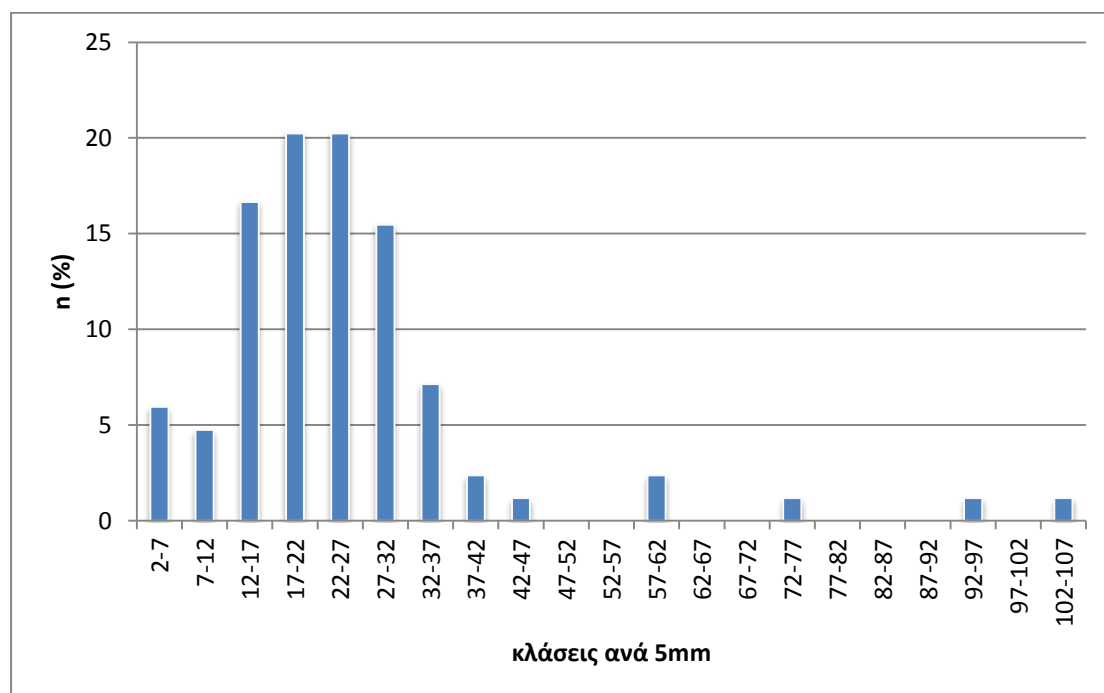
Στο ιστόγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης γεωμετρικής μεταβολής σε ποσοστά (%) που αντιστοιχούν στο πλήθος των σημείων για κλάσεις διαστημάτων των 5mm. Δηλαδή οι τιμές του άξονα x δείχνουν το εύρος του διαστήματος της κάθε κλάσης.

Η μέση τιμή της κατά x μεταβολής υπολογίστηκε $\overline{dx} = \mathbf{16mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος [**-89mm,102mm**]. Αντίστοιχα η μέση τιμή της κατά y μεταβολής υπολογίστηκε στα $\overline{dy} = \mathbf{17mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος [**-2mm,39mm**].

Το γεγονός ότι η μέση υψομετρική διαφορά είναι μεγαλύτερη δεν είναι αναμενόμενο γιατί οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες που αντιστοιχούν στις x γεωδαιτικές συντεταγμένες του διαγράμματος έχουν θεωρητικά

μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Βέβαια το εύρος τιμών της κατά y διαφοράς επιβεβαιώνει τη θέση αυτή αφού είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό της x διαφοράς.

Από αυτές τις δύο τιμές συμπεραίνεται ότι η **μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης** του σχεδίου είναι αυτή των **1:100** διότι ο θόρυβος των μετρήσεων καλύπτεται από την αβεβαιότητα της κλίμακας.

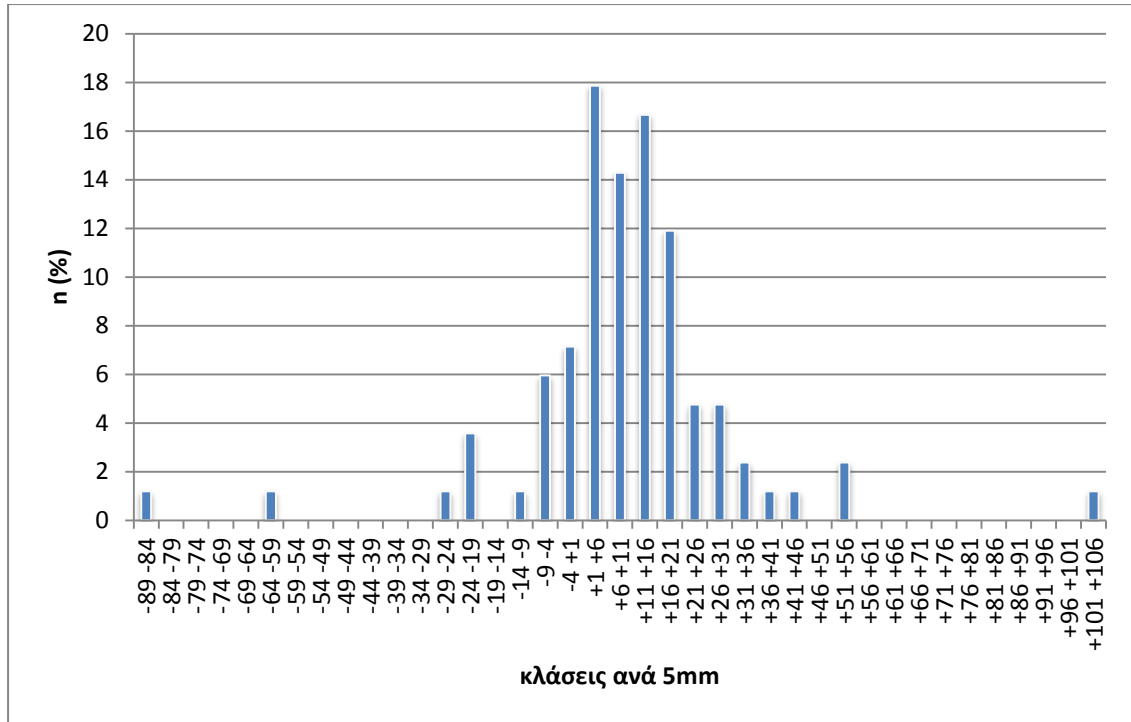


Διάγραμμα 4.1 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.

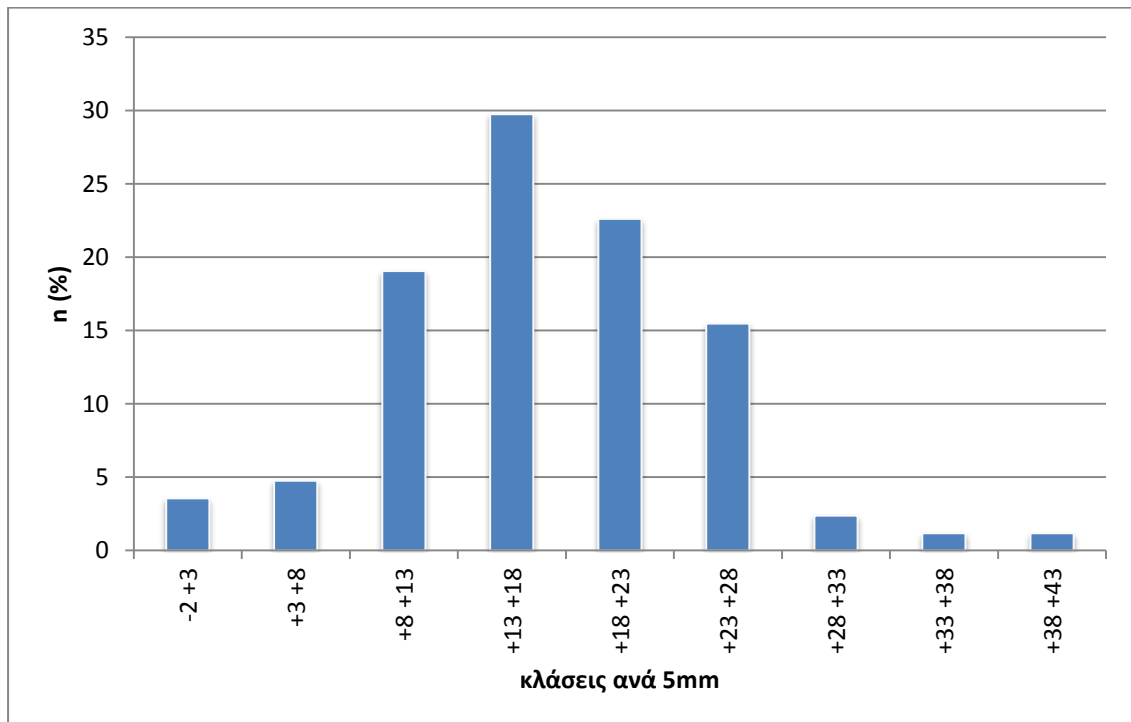
Στα ιστογράμματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζεται η κατανομή της κατά x και της κατά y μέσης μεταβολής αντίστοιχα, ως προς διαστήματα των 5mm.

Αυτό που αξίζει να τονιστεί είναι ότι οι κατά y διαφορές των ομόλογων σημείων ήταν όλες θετικές διαμορφώνοντας έτσι γωνίες διεύθυνσης στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο, δηλαδή το διάγραμμα ανυψώνεται σε σχέση με αυτό της γεωδαιτικής διαδικασίας με μία τάση προς τα ανατολικά.

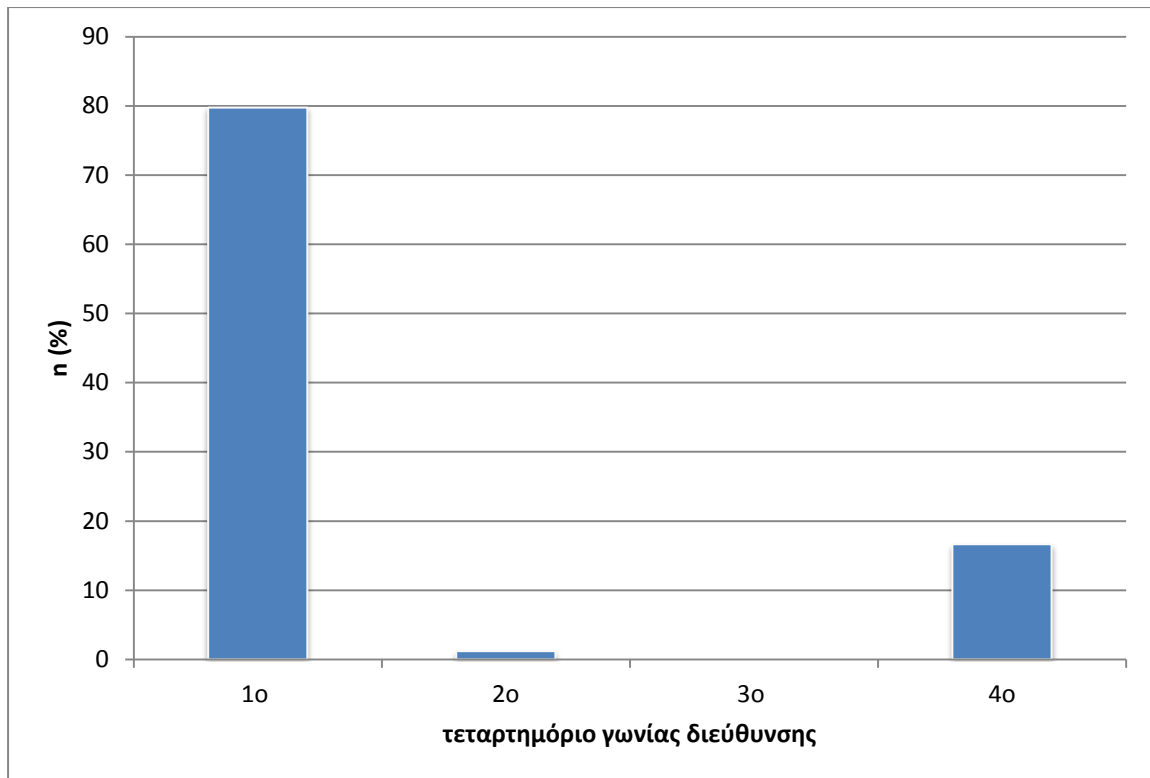
Αυτό οφείλεται στην αδύναμη γεωμετρία του δικτύου των στάσεων λήψης. Στο ιστογράμμα 4.4 παρουσιάζεται η κατανομή των γωνιών διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο.



Διάγραμμα 4.2 Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.



Διάγραμμα 4.3 Ιστόγραμμα της κατά y μεταβολής του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.

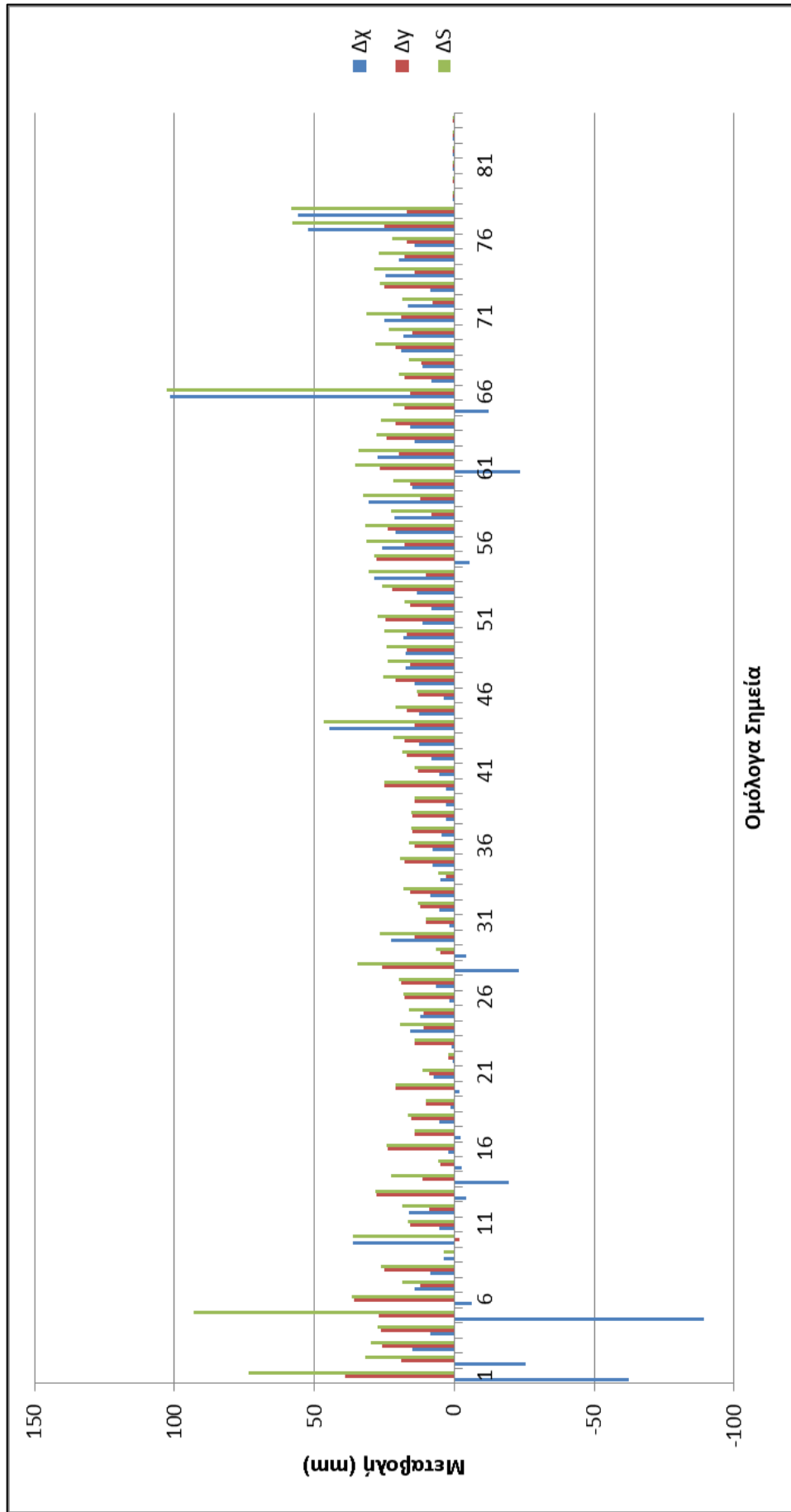


Διάγραμμα 4.4 Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο για το διάγραμμα της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού.

Στη συνέχεια το διάγραμμα χωρίστηκε σε τρεις κατακόρυφους τομείς τον δυτικό, τον κεντρικό και τον ανατολικό με πλάτος της τάξης των δέκα μέτρων. Η μέση τιμή της μεταβολής διαμορφώθηκε για το **δυτικό** τομέα στα **29mm** , για τον **κεντρικό** τομέα στα **19mm** και για τον **ανατολικό** στα **31mm**.

Οι τρεις αυτές τιμές ακολουθούν την ποιότητα της επίλυσης του φωτοτριγωνισμού. Δηλαδή οι στάσεις Σ3 και Σ4 με την ισχυρότερη επίλυση αντιστοιχούν στον κεντρικό τομέα ενώ οι στάσεις Σ5 και Σ6 με τις πιο αδύναμες επιλύσεις αντιστοιχούν στον ανατολικό τομέα. Γενικότερα λοιπόν το σχέδιο παρουσιάζει αδυναμία ως προς τα άκρα του όπως ακριβώς και το φωτογραμμετρικό δίκτυο.

Αυτό φαίνεται και στο ιστόγραμμα 4.5 που παρουσιάζει τη μεταβολή όλων των σημείων ενώ διατηρείται η διάταξη δυτικός-κεντρικός-ανατολικός τομέας με αποτέλεσμα η γεωμετρική μεταβολή των σημείων στο κέντρο του να παρουσιάζουν μικρότερες τιμές.



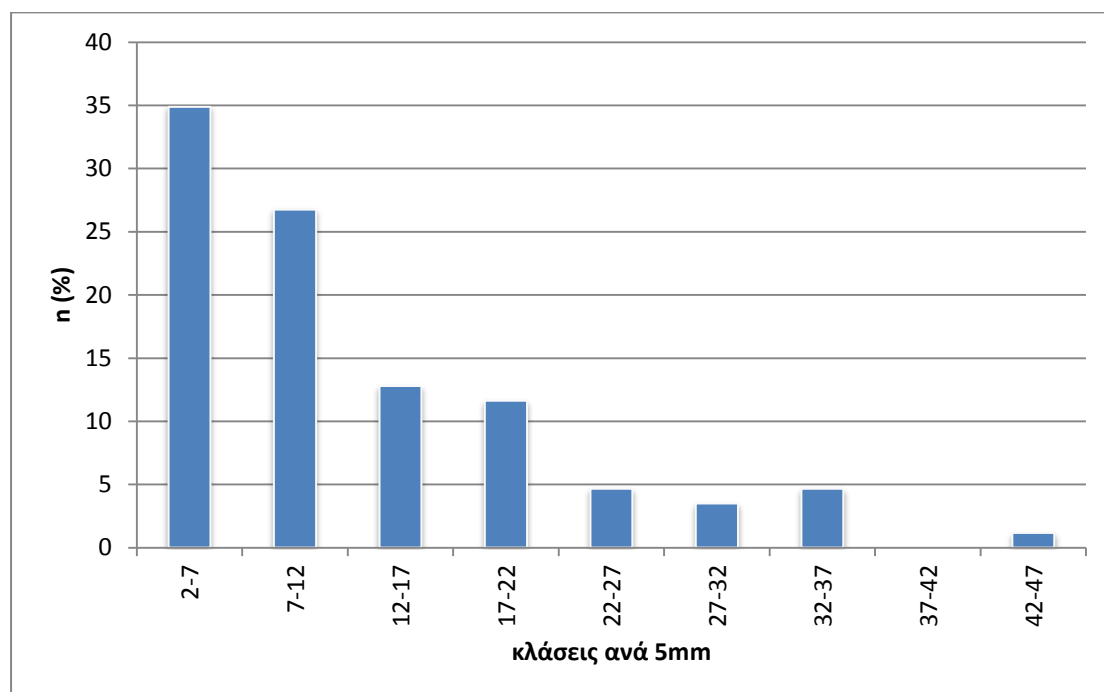
Διάγραμμα 4.5 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού

Επιπλέον το διάγραμμα χωρίστηκε σε δύο οριζόντιους τομείς τον **επάνω** με μέση μεταβολή **28mm** και τον **κάτω** με **18mm**. Τα σημεία που δεν μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν απαλείφθηκαν από τον υπολογισμό. Από του συγκεκριμένους υπολογισμούς δεν συμπεραίνεται κάτι επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό του δείγματος του κάτω μέρους αποτελείται κυρίως από σημεία του κεντρικού κατακόρυφου τομέα.

Τέλος εξετάστηκε αν τα φωτογραμμετρικά σημεία του διαγράμματος που δεν είχαν επισήμανση για αδύναμη επίλυση παρουσίαζαν μικρότερη μέση τιμή γεωμετρικής μεταβολής. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε καθώς η τιμή των 30 αυτών σημείων διαμορφώθηκε στα 24mm.

Γεωμετρική μεταβολή διαγράμματος χειροκίνητου τριγωνισμού:

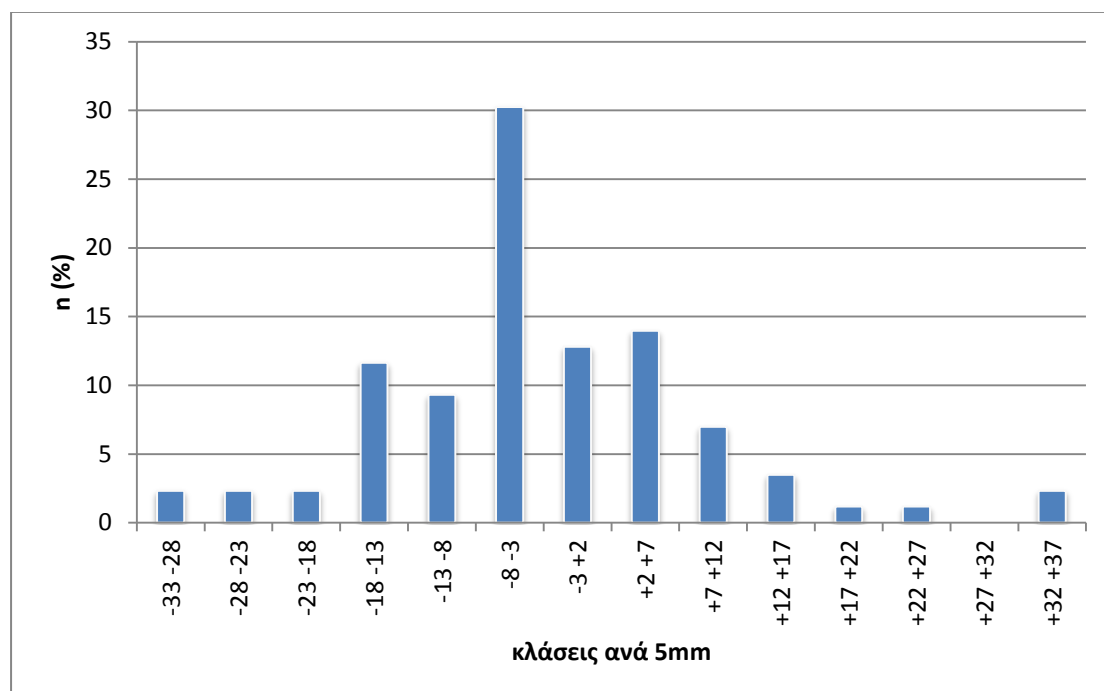
Η μέση τιμή της γεωμετρικής μεταβολής \overline{dS} του διαγράμματος που προέκυψε από την επίλυση του χειροκίνητου τριγωνισμού σε σχέση με αυτό της γεωδαιτικής διαδικασίας υπολογίστηκε στα **13mm**. Το εύρος τιμών της βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος **[2mm,43mm]** για τα 86 ομόλογα σημεία ενώ η κατανομή της παρουσιάζεται στο ιστόγραμμα 4.6.



Διάγραμμα 4.6 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.

Η μείωση της μέσης τιμής της γεωμετρικής μεταβολής αποδεικνύει ότι το γεωμετρικό παράγωγο της όψης βελτιώθηκε από την πύκνωση του δικτύου των στάσεων λήψης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η ακρίβεια εξαρτάται από την γεωμετρία του δικτύου παρά από το βαθμό ελευθερίας ($r_{\text{αυτομ.}}=792$ και $r_{\text{χειροκ.}}=138$).

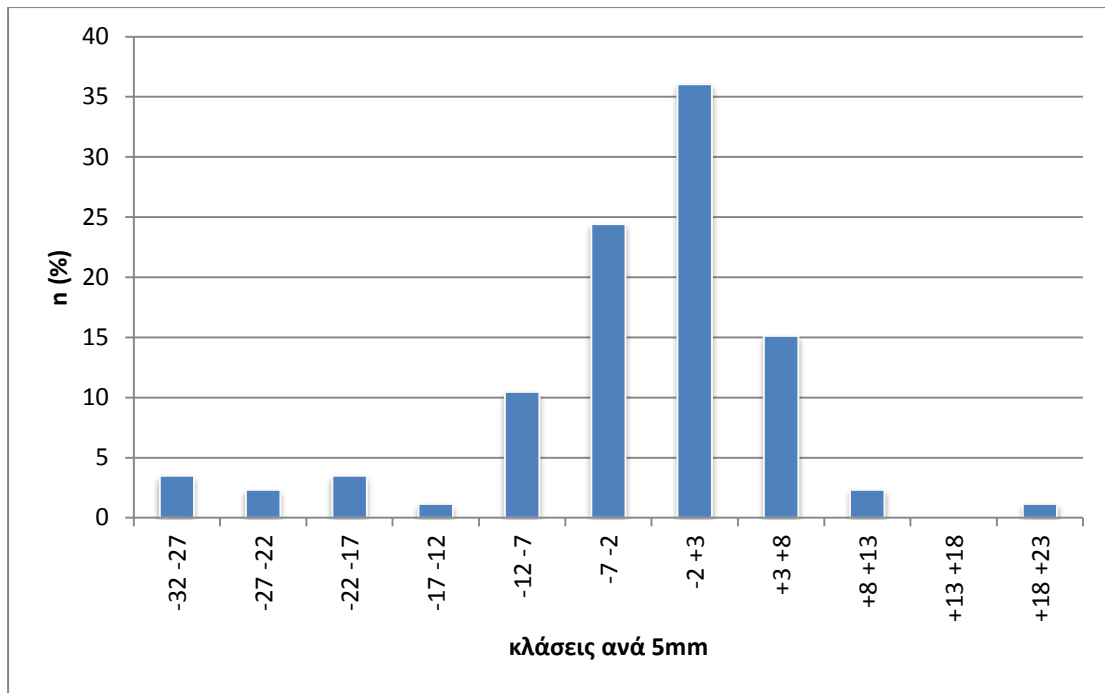
Η μέση τιμή της κατά x μεταβολής υπολογίστηκε στα $\overline{dx} = 9\text{mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος $[-33\text{mm}, 35\text{mm}]$. Στο ιστόγραμμα 4.7 παρουσιάζεται η κατανομή της σε κλάσεις των 5mm.



Διάγραμμα 4.7 Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.

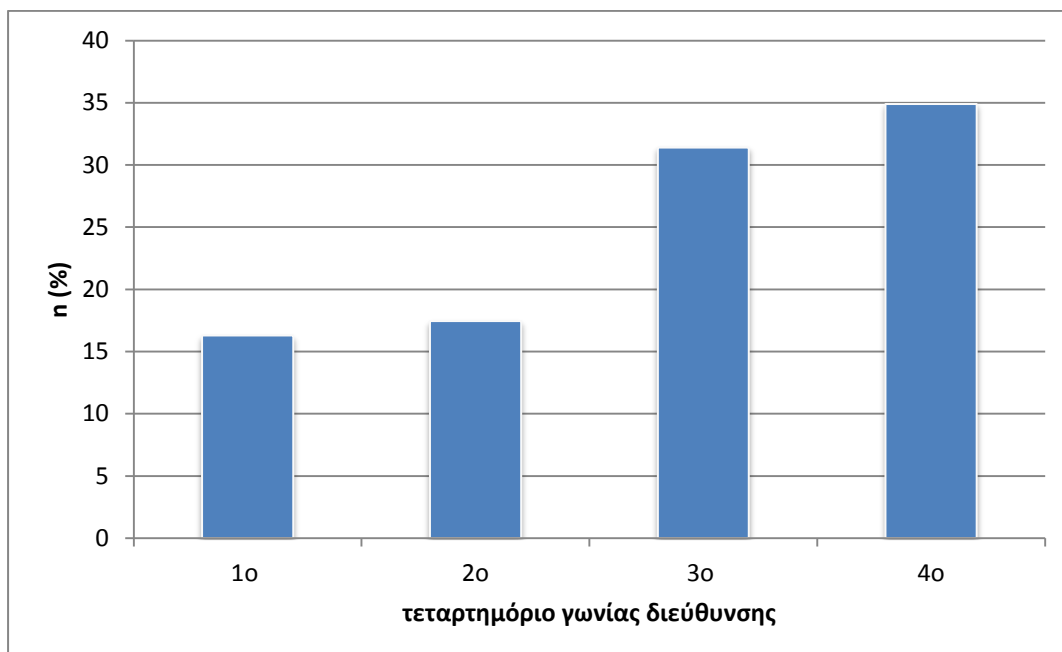
Αντίστοιχα η μέση τιμή της κατά y μεταβολής προσδιορίστηκε στα $\overline{dy} = 6\text{mm}$ αποδεικνύοντας ότι ο προσδιορισμός του βάθους που αντιστοιχεί στις x γεωδαιτικές συντεταγμένες του διαγράμματος έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα ενώ αυτός του υψομέτρου μικρότερη. Σε σχέση με αυτές τις δύο τιμές συμπεραίνεται ότι η **μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης** του διαγράμματος είναι αυτή των **1:50**.

Το εύρος τιμών της κατά y μεταβολής βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος $[-32\text{mm}, 21\text{mm}]$. Στο ιστόγραμμα 4.8 παρουσιάζεται η κατανομή της κατά y μεταβολής σε κλάσεις διαστημάτων των 5mm.



Διάγραμμα 4.8 Ιστόγραμμα της κατά γ μεταβολής του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού.

Το ιστόγραμμα 4.9 παρουσιάζει την κατανομή της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο η οποία δεν είναι συστηματική.

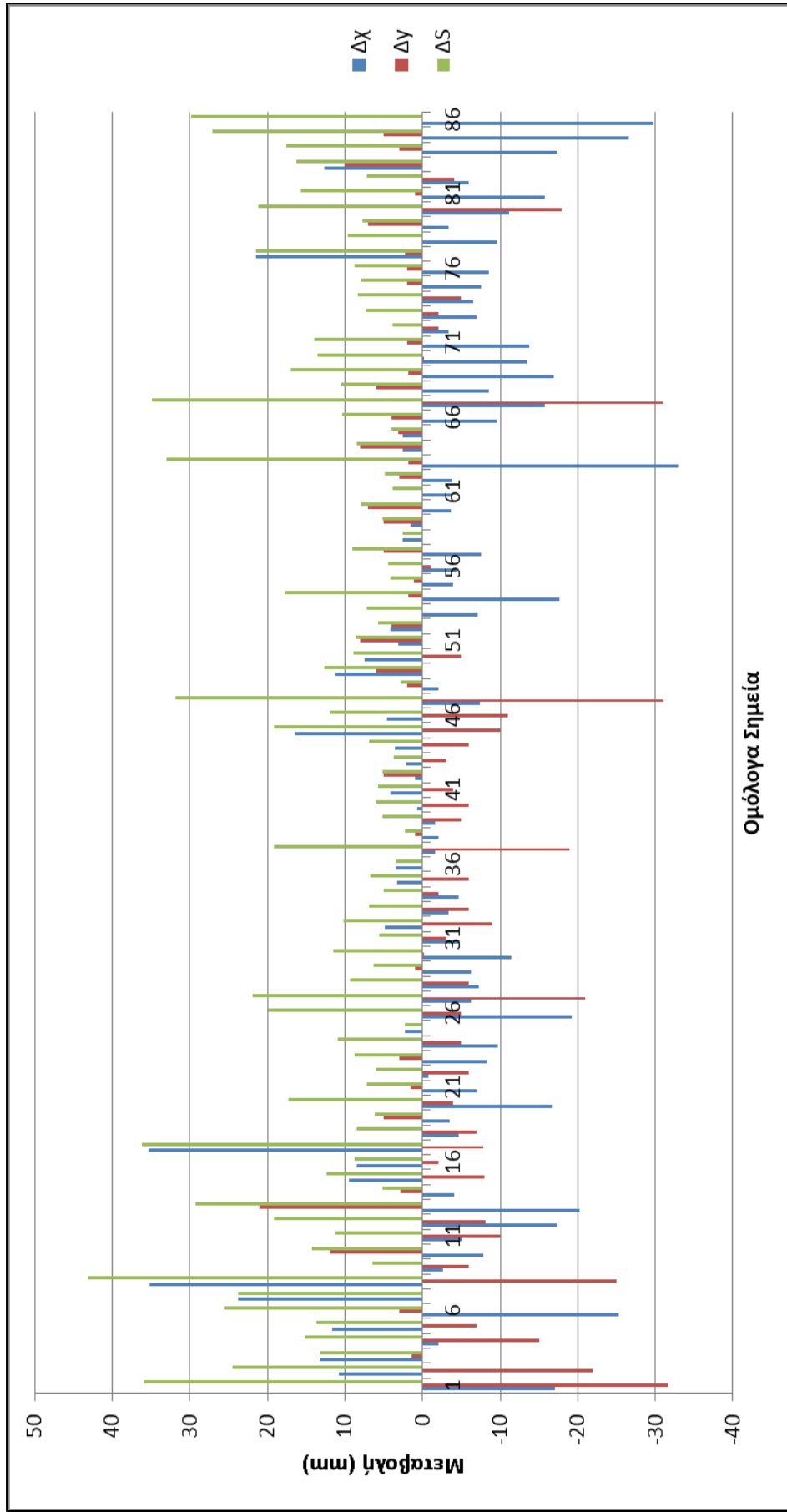


Διάγραμμα 4.9 Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων στο επίπεδο της όψης ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο για το διάγραμμα της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού

Έπειτα υπολογίστηκε η μέση τιμή της μεταβολής για τους τρεις κατακόρυφους τομείς του διαγράμματος με αυτό του **δυτικού** τομέα να διαμορφώνεται στα **18mm**, του **κεντρικού** τομέα στα **9mm** και του **ανατολικού** στα **13mm**. Όπως και προηγουμένως το διάγραμμα ισχυροποιείται στον κεντρικό τομέα και αποδυναμώνεται στα άκρα του όπως το δίκτυο των στάσεων λήψης.

Αυτό παρατηρείται και στο ιστόγραμμα 4.10 όπου η διάταξη των σημείων διατηρείται ως προς τον άξονα x με αποτέλεσμα οι τιμές στο κέντρο του να είναι μικρότερες

Αντίστοιχα ως προς τους κατακόρυφους τομείς η γεωμετρική μεταβολή διαμορφώθηκε για τον **κάτω** τομέα στα **12mm** και για το **πάνω** τομέα στα **11mm**. Από τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν απορρέει κάποια διαπίστωση καθώς η διαφορά τους δεν είναι σημαντική.



Διάγραμμα 4.10 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού

4.2 Αποτύπωση Μνημείου

Ο όρος μνημείο χρησιμοποιούταν κυρίως για αρχιτεκτονικά ή γλυπτικά έργα που ανεγείρονταν για την ανάμνηση ενός γεγονότος ή ενός προσώπου. Σήμερα ο όρος αυτός χρησιμοποιείται τόσο για τα οικοδομήματα όσο και για τα έργα τέχνης και λόγου που θεωρούνται αριστουργήματα και έχουν διασωθεί από την αρχαιότητα μέχρι τώρα.

Τα μνημεία, ως αναπόσπαστο κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελούν κληροδοτήματα ιστορικής μνήμης σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Ο κίνδυνος της καταστροφής ή της αλλοίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς είτε από φυσικά φαινόμενα είτε από ανθρώπινες παρεμβάσεις (πόλεμοι, βανδαλισμοί) δημιουργεί την ανάγκη της προστασίας της [Γεωργόπουλος Α., 2014].

Όσον αφορά τα υλικά και ακίνητα μνημεία η προστασία τους πραγματοποιείται με την ολοκληρωμένη τεκμηρίωσή τους ανεξάρτητα αν ο τελικός στόχος είναι η συντήρηση, ανακατασκευή, αναστήλωση, αποκατάσταση, ανάδειξη, εξυγίανση ή αναβίωση τους. Το μέρος που απασχολεί τον τοπογράφο μηχανικό σε αυτήν τη διαδικασία είναι η αποτύπωση και η γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων αφορά στη συλλογή, επεξεργασία, απόδοση και καταχώριση στοιχείων που προσδιορίζουν τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος ενός μνημείου στο χώρο των τριών διαστάσεων για μια δεδομένη χρονική στιγμή κατά την πάροδο του χρόνου. Τα παράγωγα της εν λόγω διαδικασίας αφορούν σε διαγράμματα κατακόρυφων και οριζόντιων τομών, όψεων, αναπτύγματα επιφανειών, τριδιάστατα μοντέλα, φωτορεαλιστικά σχέδια, εικονιστικά προϊόντα κ.α.

Η δεύτερη εφαρμογή που επιχειρήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 αφορά στην αποτύπωση μέρους του ναού του Ηφαίστου. Ο συγκεκριμένος ναός όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6 βρίσκεται στον αρχαιολογικό χώρο της Αρχαίας Αγοράς στην περιοχή του Θησείου.



Εικόνα 4.6 Ο ναός του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά του Θησείου, οπισθόδομος και νότια όψη.

Ο ναός είναι χτισμένος στο λόφο του Αγοραίου Κολωνού με είσοδο (προναός) από την ανατολή και διεύθυνση προς τη δύση. Είναι δωρικού ρυθμού, εξάστυλος, περίπτερος, από πεντελικό μάρμαρο με τριαδική οργάνωση τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Οικοδομήθηκε κατά την Κλασική Ελληνική περίοδο και πιο συγκεκριμένα τα έτη 460-420 π.Χ. πιθανότατα από τον αρχιτέκτονα Ικτίνο.

Ο ναός κοσμεύεται από αρχιτεκτονικά γλυπτά ιδιαίτερου κάλλους τόσο στις μετώπες της ζωφόρου της εξωτερικής περιστασης όσο και στα αετώματα. Η λαϊκή ονομασία "Θησείο" του ναού του Ηφαίστου προέρχεται από τον γλυπτό διάκοσμο στις νότιες και βόρειες μετώπες που απεικονίζουν επεισόδια από τις περιπέτειες και τους άθλους του Θησέα.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση του "Θησείου" πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια ανά τμήματα από τη ΣΑΤΜ, στα πλαίσια του μαθήματος θέματος "Αποτύπώσεις Μνημείων" του 9^{ου} εξαμήνου. Τα γεωμετρικά παράγωγα που εξάγονται αφορούν σε συνδυασμό γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών μεθοδολογιών υψηλής ακρίβειας, με σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα, φωτομηχανές και λογισμικά.

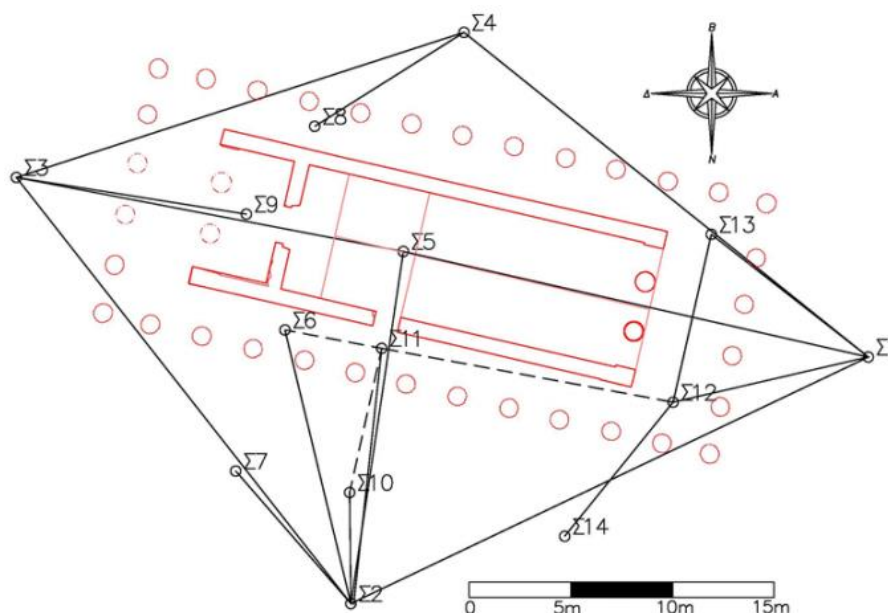
Η αρχική ιδέα της εφαρμογής περιελάμβανε την αποτύπωση της ανατολικής όψης του ναού και της οριζόντιας τομής του προναού

χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο πολυγωνομετρικό δίκτυο. Το εν λόγω τμήμα έχει αποτυπωθεί και αποδοθεί από παλαιότερες ομάδες εργασίες φοιτητών της ΣΑΤΜ τα έτη 2013 και 2014. Βέβαια τα τελικά μετρητικά δεδομένα που εξήχθησαν με το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 δεν επέτρεψαν τη σύγκριση και συσχέτιση του διαγράμματος της οριζόντιας τομής αλλά μόνο ενός μέρους της ανατολικής όψης για λόγους που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

4.2.1 Συνδυασμός Γεωδαιτικής και Φωτογραμμετρικής Μεθόδου

Το διάγραμμα της ανατολικής όψης, σχήμα 4.12, του ναού του Ηφαίστου είναι σε κλίμακα 1:50 και αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά στο διανυσματικό σχέδιο που περιέχει την γραμμή του εδάφους και την περιβάλλουσα της όψης που εμπεριέχει τη βάση, τη στέψη και την εξωτερική πλευρά από τις ακριανές κιονοστοιχίες.

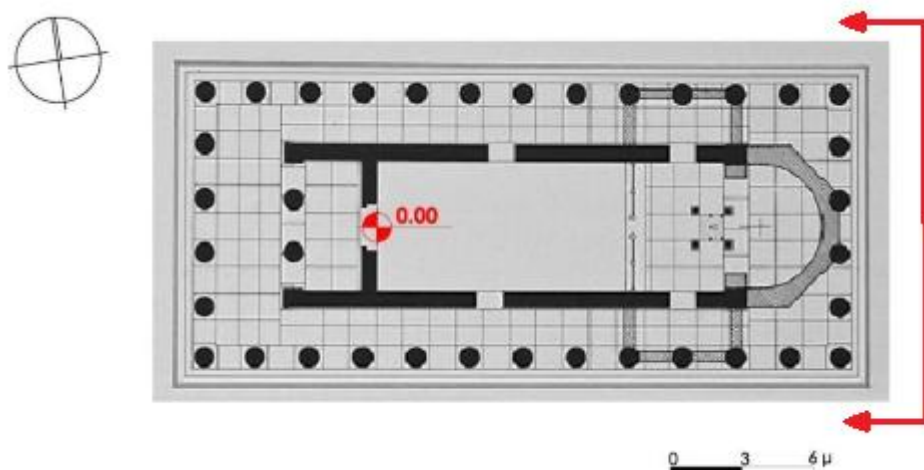
Το διανυσματικό σχέδιο έχει προκύψει γεωδαιτικά με τη χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που έχει τη δυνατότητα να μετρά μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων λεπτομέρειας έχουν προσδιοριστεί από τις κορυφές του υφιστάμενου πολυγωνομετρικού δικτύου με ακρίβεια της τάξης των $\pm 6\text{mm}$ σε κάθε διάσταση.



Σχήμα 4.11 Υφιστάμενο πολυγωνομετρικό δίκτυο.

Το πολυγωνομετρικό δίκτυο, όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11, αποτελείται από κλειστές οδεύσεις σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα

αναφοράς. Οι μετρήσεις του δικτύου έγιναν με τη μέθοδο των τριών τριπόδων ενώ ο προσανατολισμός του πραγματοποιήθηκε μέσω αστρονομικών παρατηρήσεων. Οι συντεταγμένες των στάσεων αναφοράς έχουν προσδιοριστεί με αβεβαιότητα της τάξης των $\pm 0.5\text{mm}$.



Σχήμα 4.12 Το επίπεδο της ανατολικής όψης σε σχέση με τη κάτοψη του ναού.



Εικόνα 4.7 Ορθοφωτογραφία ανατολικής όψης του ναού του Ηφαίστου.

Η τεκμηρίωση της ανατολικής όψης αποτελείται από ορθοεικόνα η οποία απεικονίζει σε ορθή προβολή τους αναβαθμούς, τις κιονοστοιχίες, τους κίονες, τη ζωφόρο και το αέτωμα όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 4.7. Η ορθοφωτογραφία δημιουργήθηκε μέσω του

λογισμικού Photoscan από δύο λωρίδες εικόνων μέσης κλίμακας 1:200 με 80% κατά μήκος επικάλυψη και 60% κατά πλάτος.

Η διαδικασία της παραγωγής του εικονιστικού προϊόντος ξεκινάει με τον σχετικό προσανατολισμό των εικόνων όπου τα σημεία σύνδεσης εξάγονται μέσω αυτόματης πυκνής συνταύτισης σημείων με τη μέθοδο Structure from motion. Έτσι παράγεται ένα τριδιάστατο νέφος σημείων το οποίο αποκαθίσταται σε θέση, κλίμακα και προσανατολισμό μέσω του απόλυτου προσανατολισμού από τρία φωτοσταθερά σημεία, η ακρίβεια των οποίων είναι αντίστοιχη της ταχυμετρίας ($\pm 6\text{mm}$).

Στη συνέχεια από το τριδιάστατο νέφος σημείων δημιουργείται το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας σε μορφή ακανόνιστου δικτύου τριγώνου (TIN) με το οποίο πραγματοποιείται η ορθοαναγωγή. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας/εικονοστοιχείου καθορίζεται στα 5mm ενώ η ακρίβεια μέτρησης ως προς φωτοσταθερά σημεία ελέγχου υπολογίστηκε στα $\pm 7\text{mm}$ για κάθε διεύθυνση. Το τελικό διάγραμμα μετά από κατάλληλη επεξεργασία και διορθώσεις έχει την μορφή του σχήματος 4.13 ενώ καλύπτει τις προϋποθέσεις ακρίβειας για κλίμακα εκτύπωσης 1:50.

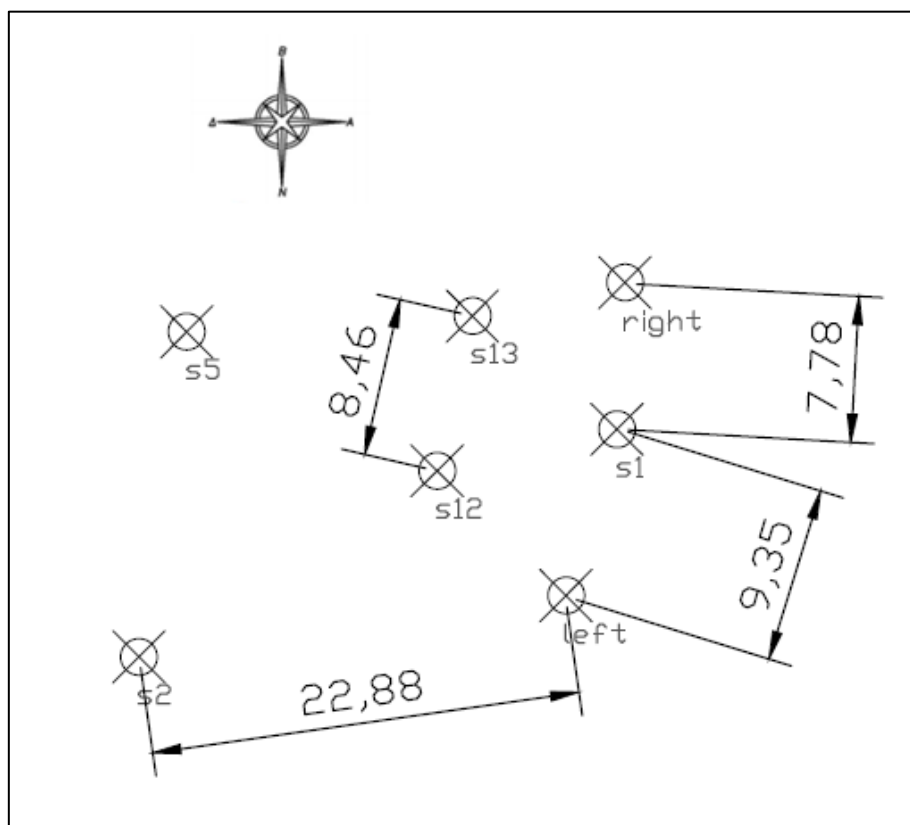


Σχήμα 4.13 Τελικό διάγραμμα ανατολικής όψης.

4.2.2 Αντιμετώπιση με το Σύστημα V10

Οι λήψεις με το σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκαν από τις στάσεις αναφοράς Σ1, Σ2, Σ5, Σ12 και Σ13 του υφιστάμενου πολυγωνομετρικού δικτύου αλλά και από τις στάσεις left και right οι οποίες μετρήθηκαν πολικά για την πύκνωση του δικτύου των στάσεων λήψης. Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται το δίκτυο των στάσεων λήψης με μερικές χαρακτηριστικές αποστάσεις σε μέτρα.

Αυτό που αξίζει να τονιστεί είναι πως η συνεχιζόμενη βροχόπτωση σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο των εργασιών πεδίου αλλά κυρίως η έλλειψη εμπειρίας δημιούργησαν προβλήματα τόσο στη διαμόρφωση του δικτύου των στάσεων λήψης, όσο και στην ποιότητα των εικόνων. Επιπλέον η Αρχαία Αγορά είναι ένας χώρος με μεγάλη επισκευσιμότητα οπότε κατά τη λήψη των πανοραμικών εικόνων παρεμβάλλονται κινητά αντικείμενα (επισκέπτες) ενώ η σήμανση των στάσεων χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή με μηδαμινή παρέμβαση στο μνημείο.



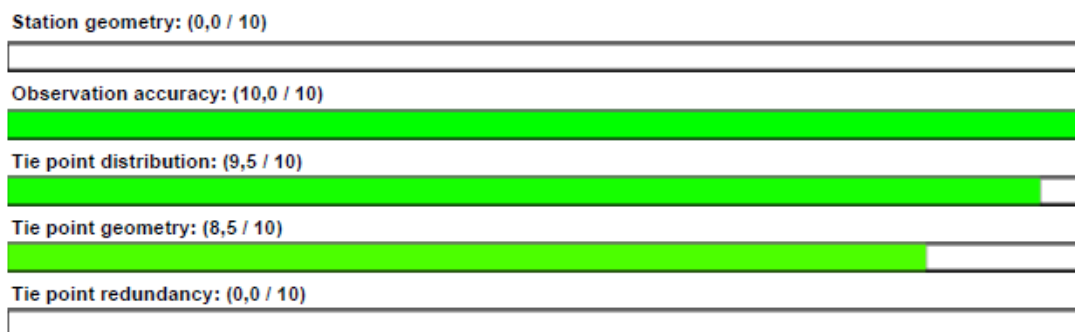
Σχήμα 4.14 Στάσεις λήψης με το σύστημα του V10.

Επιπλέον ο περιβάλλοντας χώρος του ναού αποτελείται κυρίως από βλάστηση ενώ τα αντικείμενα με χαρακτηριστικές δομές και υφή είναι ιδιαίτερα απομακρυσμένα από το λόφο του Αγοραίου Κολωνού δημιουργώντας αδύναμες γεωμετρικά τομές για τα σημεία σύνδεσης. Ακόμη η διάταξη των κιονοστοιχιών προκαλεί αποκρύψεις μεταξύ των στάσεων που βρίσκονται εντός του προναού με αυτές που βρίσκονται στο εξωτερικό του.

Τέλος όσον αφορά τις στάσεις left, right και Σ1 που φωτογραφίζουν το μεγαλύτερο μέρος της όψης βρίσκονται σε απόσταση 6m από το κατακόρυφο επίπεδό της. Δηλαδή ενώ ο λόγος βάσεων λήψης προς απόσταση αντικειμένου είναι αποδεκτός χάνεται αρκετή πληροφορία του πάνω μέρους της όψης δηλαδή της ζωφόρου και του αετώματος.

Επίσης σημειώνεται ότι η διάταξη των τριών στάσεων είναι συνευθειακή. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί με διαφορετική διαμόρφωση του δικτύου των στάσεων λήψης και με τη λήψη κεκλιμένων πανοραμάτων, αφού το σύστημα αποδέχεται λήψεις με απόκλιση από την κατακόρυφο έως και 15° μοιρών.

Η επίλυση του τριγωνισμού των πανοραμάτων έγινε αρχικά με τη αυτόματη διαδικασία για είδος εγκατάστασης full orientation. Τα αποτελέσματα της επίλυσης βέβαια δεν ήταν ικανοποιητικά για όλους τους λόγους που αναφέρθηκαν στις τρεις προηγούμενες παραγράφους. Τα μόνα πανοράματα που λύθηκαν με επιτυχία αφορούν στις στάσεις Σ1 και right. Επιπρόσθετα επιχειρήθηκε να λυθεί ο τριγωνισμός χειροκίνητα για ζεύγη πανοραμάτων που όμως και σε αυτή την περίπτωση δεν υπήρξε επιτυχία.

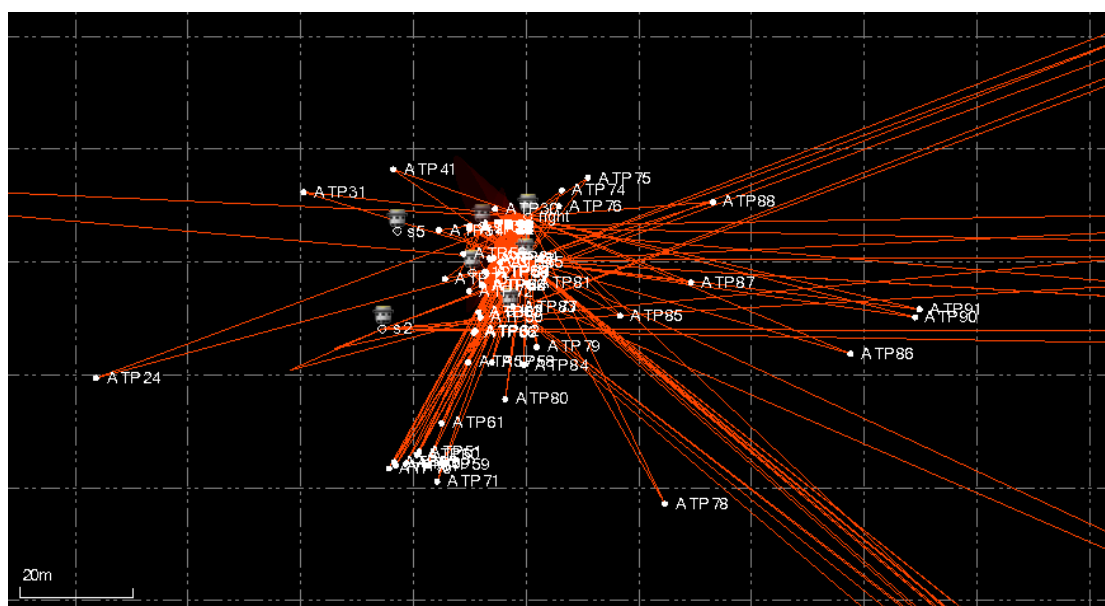


Εικόνα 4.8 Μπάρες βαθμολόγησης του επίγειου τριγωνισμού για την αποτύπωση του ναού του Ηφαίστου από το TBC.

Ο τριγωνισμός συνεχίστηκε με 18 χειροκίνητα σημεία σύνδεσης από τα οποία μόνο τα τρία έγιναν αποδεκτά από την εφαρμογή blunder detection του TBC. Παρόλα αυτά τα δύο πανοράματα που λύθηκαν παρουσίασαν εξαιρετικά στατιστικά στοιχεία όπως φαίνεται από τις μπάρες βαθμολόγησης της αναφοράς του επίγειου τριγωνισμού από το TBC της εικόνας 4.8.

Το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους διαμορφώθηκε στα 0.29 εικονοστοιχεία (0.4μm) το οποίο αντιστοιχεί σε $\pm 1\text{mm}$ σε απόσταση 10m ενώ η μέγιστη απόκλιση των υπολοίπων των μετρήσεων διαμορφώθηκε στα 1.71 εικονοστοιχεία δηλαδή σε $\pm 6\text{mm}$ σε απόσταση 10m. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί τη βαθμολογία 10/10 στην μπάρα που αναφέρεται στην ακρίβεια των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων. Ταυτόχρονα η επίλυση δύο μόνο πανοραμάτων από τα συνολικά 7 διαμορφώνει τη μηδενική βαθμολογία της πρώτης και πέμπτης μπάρας βαθμολόγησης.

Τα δύο πανοράματα των στάσεων right και Σ1 λύθηκαν με 71 σημεία σύνδεσης με το αντίστοιχο φωτογραμμετρικό δίκτυο να διαμορφώνεται όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14. Τα συνολικά μεγέθη της επίλυσης αφορούν σε 219 αγνώστους και 290 εξισώσεις συνθήκης. Ολόκληρη η αναφορά του επίγειου τριγωνισμού βρίσκεται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.15 Φωτογραμμετρικό δίκτυο επίγειου τριγωνισμού για την αποτύπωση του ναού του Ηφαίστου με το σύστημα V10.

Στη συνέχεια μετρήθηκαν 85 σημεία λεπτομέρειας της ανατολικής όψης του ναού του Ηφαίστου παρατηρήσεις στο TBC. Οι μετρήσεις αφορούσαν σε χαρακτηριστικά σημεία της λιθοδομής της κρηπίδας και των αναβαθμών όπως και στις ραβδώσεις των σφονδύλων στη βάση της πρώτης σειράς των κιόνων όπου αυτές ήταν ορατές. Ακόμη τα σημεία με αδύναμες επιλύσεις απαλείφθηκαν από τις μετέπειτα διαδικασίες μειώνοντας το δείγμα των σημείων στα 67.

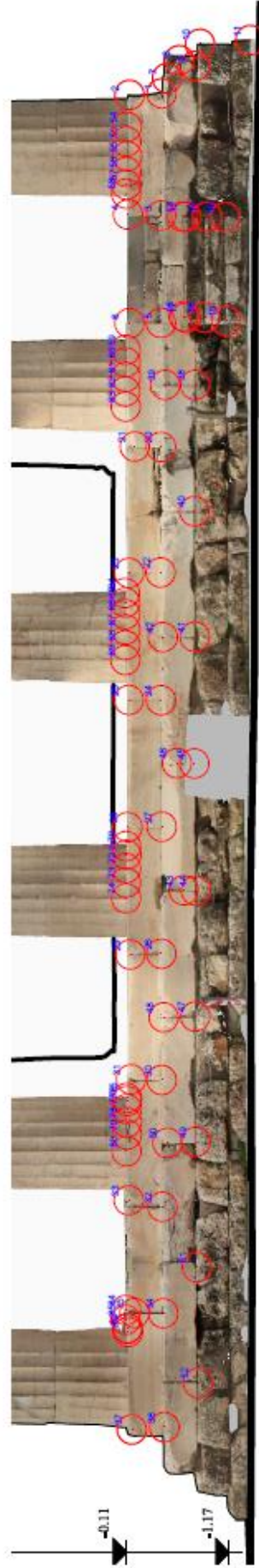
Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων που υπολογίστηκαν στο TBC στράφηκαν και μετασχηματίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις 4.28, 4.29, 4.30 σε περιβάλλον Matlab, ο κώδικας του οποίου περιλαμβάνεται στο παράρτημα. Η στροφή των σημείων έγινε κατά γωνία $\varphi=14^{\circ}.3418-100^{\circ}$ χωρίς μετάθεση ή στροφή σε σχέση με κάποιο σταθερό σημείο ώστε να συσχετίζονται άμεσα με το υπάρχον διάγραμμα χρησιμοποιώντας το ίδιο σύστημα αναφοράς [Πανταζής Γ., 2005].

$$x_i = \cos\varphi(x_i) - \sin\varphi(y_i) \quad (4.28)$$

$$y_i = \sin\varphi(x_i) + \cos\varphi(y_i) \quad (4.29)$$

$$x_s = x_i, \quad y_s = H_i, \quad H_s = -y_i \quad (4.30)$$

Έπειτα τα σημεία εισήχθησαν ως block στο διάγραμμα της ανατολικής όψης όπως αυτό έχει προκύψει από το συνδυασμό της γεωδαιτικής και φωτογραμμετρικής μεθοδολογίας στο περιβάλλον του Autocad. Η επίθεση των 67 σημείων στο διάγραμμα παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο απόσπασμα του σχήματος. 4.16.



Σχήμα 4.16 Σημεία λεπτομέρειας της ανατολικής όψης του ναού του Ηφαιίστου από το TBC με το σύστημα V10 σε σχέση με το υπάρχον διάγραμμα.

4.2.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Για τη σύγκριση των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων που υπολογίστηκαν φωτογραμμετρικά με το V10 με τα ομόλογα τους στην ορθοφωτογραφία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Autocad και ένα λογιστικό φύλλο του Excel. Από τα σημεία της ορθοφωτογραφίας μετρήθηκε η συνολική γεωμετρική μεταβολή στο επίπεδο της όψης ως ευκλείδεια απόσταση όπως και ξεχωριστά οι διαφορές ως προς τους δύο άξονες x και y.

Τόσο για τη μεταβολή των σημείων όσο και για τις διαφορές τους κατά τους δύο άξονες υπολογίστηκε η μέση τιμή τους ως προς τις απόλυτες τιμές σύμφωνα με τη σχέση 4.31 [Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009]. Το δείγμα των σημείων δε χωρίστηκε ως προς τη θέση τους στο διάγραμμα όπως έγινε στην πρώτη εφαρμογή της όψης του κτιρίου Λαμπαδαρίου καθώς προέκυψαν από δύο μόνο στάσεις λήψης και ως εκ τούτου θα ήταν άνευ νοήματος.

$$\overline{dx} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} |dx| \quad (4.31)$$

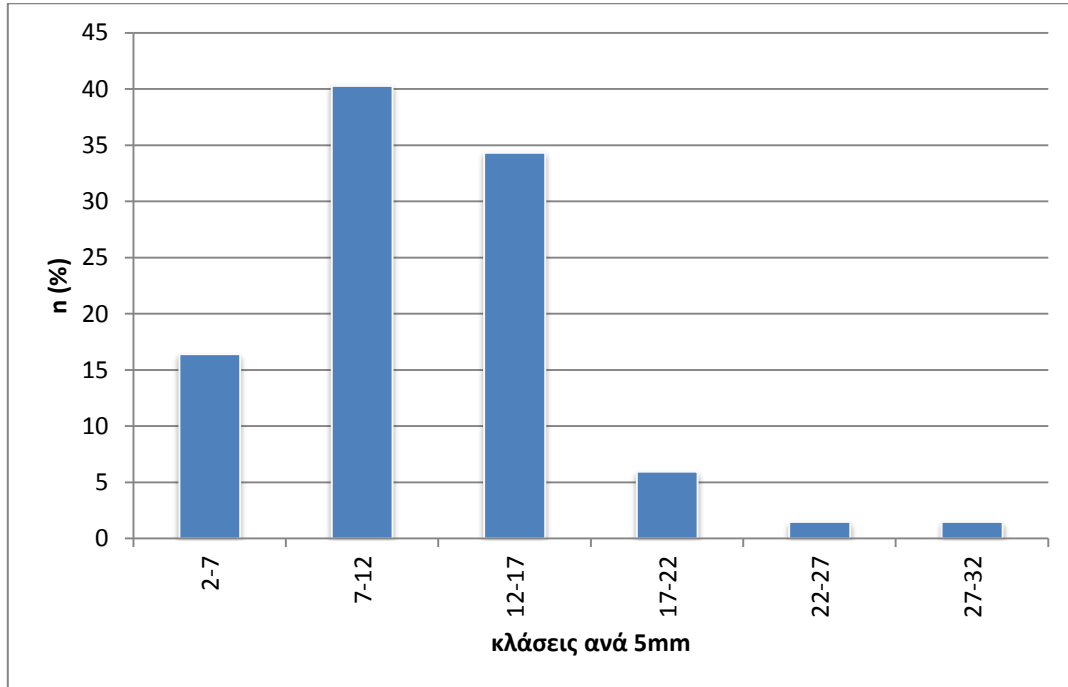
Η μέση τιμή της μεταβολής των 67 ομόλογων σημείων από τις δύο μεθοδολογίες υπολογίστηκε στα $\overline{dS} = 11\text{mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος **[2mm,29mm]**. Στο ιστόγραμμα 4.11 παρουσιάζεται η κατανομή της γεωμετρικής μεταβολής ανά διαστήματα 5mm.

Αντίστοιχα η μέση τιμή κατά x μεταβολής προσδιορίστηκε στα $\overline{dx} = 8\text{mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος **[-17mm,17mm]**. Στο ιστόγραμμα 4.12 παρουσιάζεται η κατανομή της γεωμετρικής μεταβολής ανά διαστήματα 5mm.

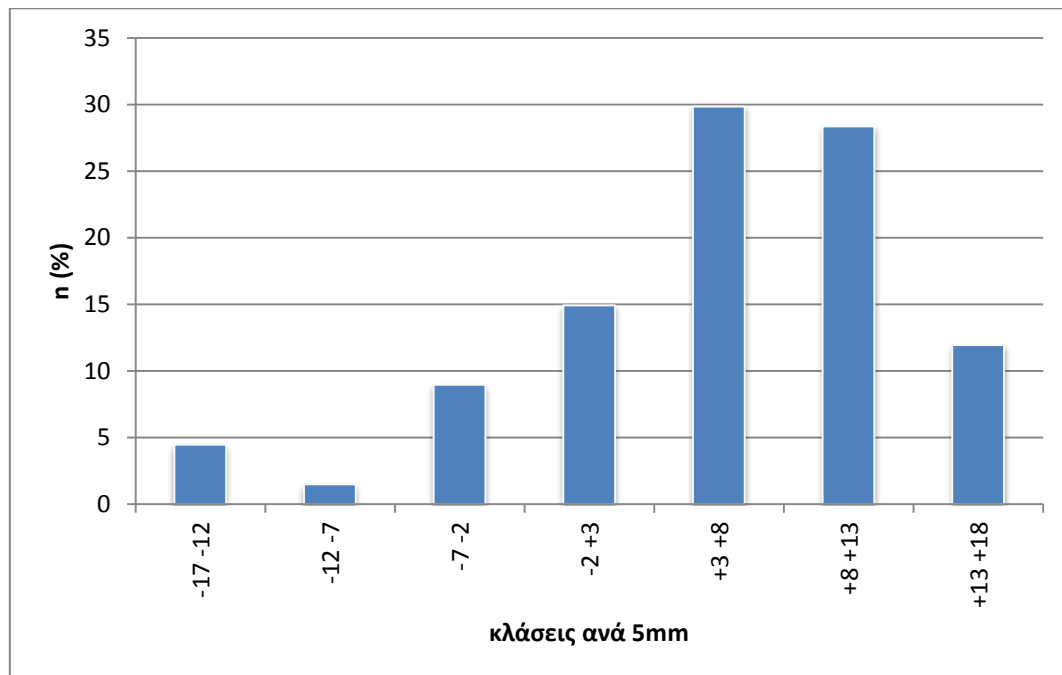
Η μέση τιμή της κατά y μεταβολής υπολογίστηκε στα $\overline{dy} = 6\text{mm}$ με το εύρος τιμών της να βρίσκεται μεταξύ του κλειστού διαστήματος **[-28mm,14mm]**. Δηλαδή υψομετρικά οι διαφορές παρουσιάζουν μικρότερες τιμές όπως ήταν αναμενόμενο. Στο ιστόγραμμα 4.13 παρουσιάζεται η κατανομή της γεωμετρικής μεταβολής ανά διαστήματα 5mm

Κατά τον έλεγχο της ακρίβειας της ορθοεικόνας με μετρήσεις ως προς φωτοσταθερά σημεία ελέγχου αποτελούμενα από τεχνητούς στόχους

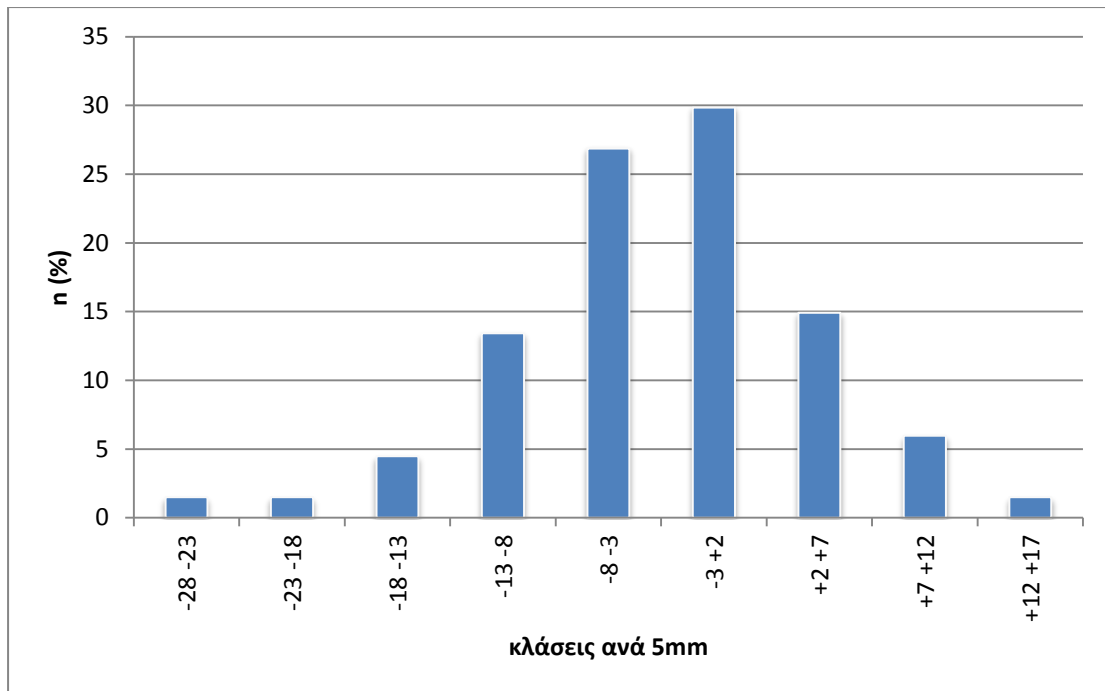
είχαν προσδιοριστεί διαφορές της τάξης των $\pm 7\text{mm}$ για κάθε διεύθυνση. Ταυτόχρονα η ακρίβεια προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών ήταν της τάξης των $\pm 6\text{mm}$ ενώ το μέγεθος της εικονομηφίδας της ορθοεικόνας είναι καθορισμένο στα 5mm .



Διάγραμμα 4.11 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.

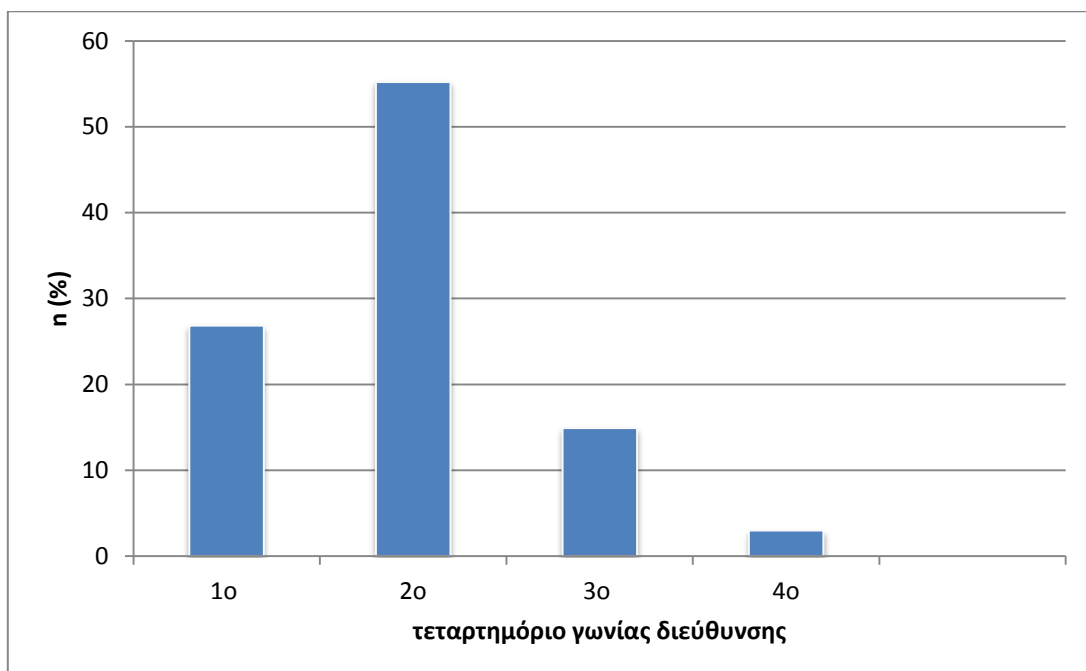


Διάγραμμα 4.12 Ιστόγραμμα της κατά x μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.



Διάγραμμα 4.13 Ιστόγραμμα της κατά y μεταβολής των σημείων της ανατολικής όψης του Θησείου.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας που προέκυψαν με το σύστημα του V10 πληρούν τα όρια της ακρίβειας για μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:50 πληρούνται.

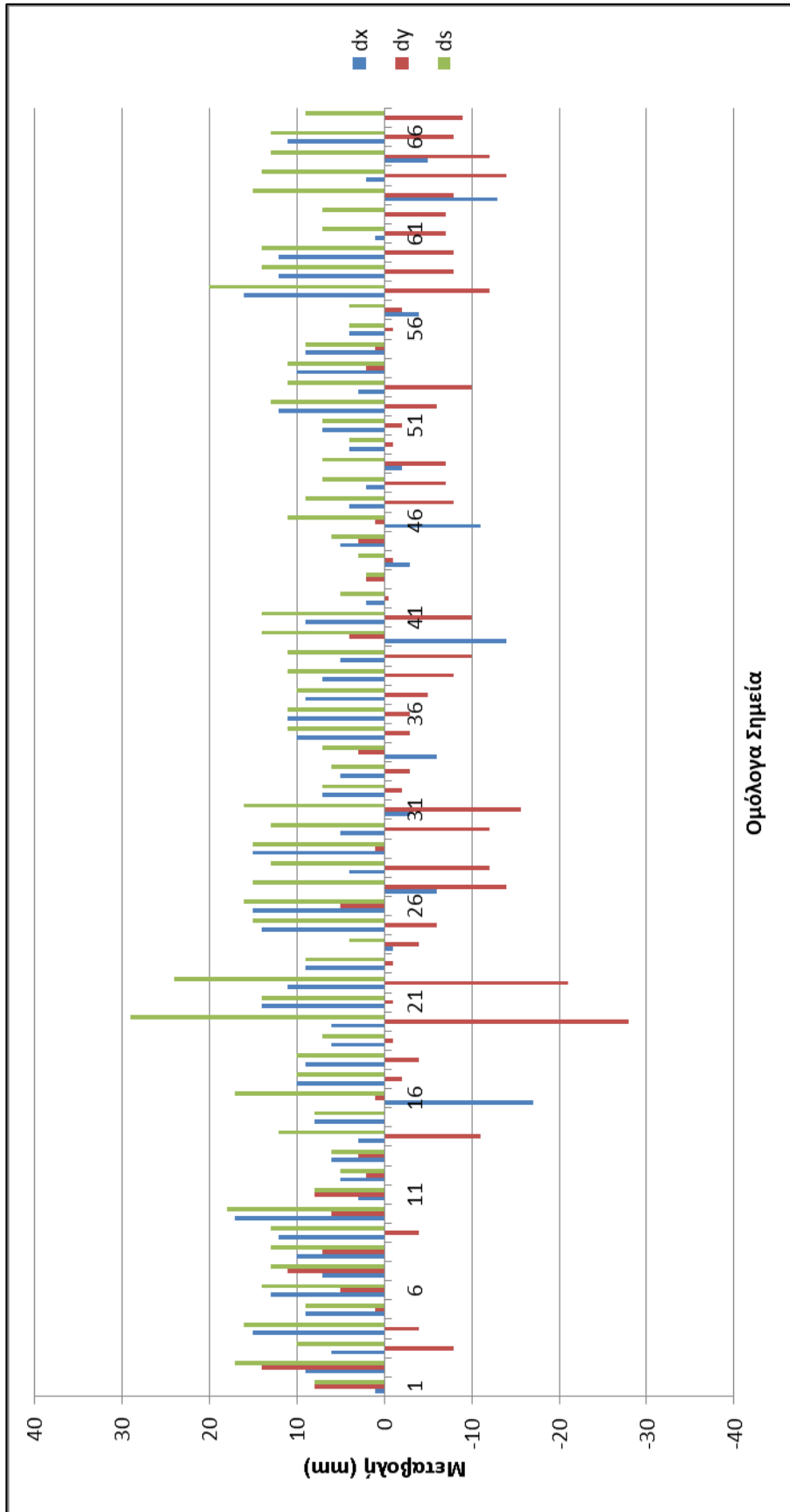


Διάγραμμα 4.14 Ιστόγραμμα της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων ως προς το αντίστοιχο τεταρτημόριο.

Στο ιστόγραμμα 4.15 παρουσιάζεται η κατανομή της γωνίας διεύθυνσης των διαφορών των ομόλογων σημείων ως προς το επίπεδο της όψης σε σχέση με το αντίστοιχο τεταρτημόριο. Το μεγαλύτερο ποσοστό λαμβάνεται από το 2^ο τεταρτημόριο αλλά η μεταβολή δεν παρουσιάζει συστηματική διεύθυνση.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδύναμη γεωμετρία του δικτύου των στάσεων λήψης που αποτελείται από 2 μόνο στάσεις αναφοράς.

Στο ιστόγραμμα 4.15 που ακολουθεί παρουσιάζεται συνολικά η μεταβολή ανάμεσα στις δύο διαδικασίες και για τα 67 ομόλογα σημεία. Σε αυτό περιλαμβάνεται τόσο η μεταβολή ds όσο και οι συνιστώσες της dx , dy κατά τους δύο άξονες.



Διάγραμμα 4.15 Ιστόγραμμα της γεωμετρικής μεταβολής των ομόλογων σημείων του διαγράμματος της ανατολικής όψης του Θησαυρίου.

4.3 Αποτύπωση Δεξαμενής Αποθήκευσης Καυσίμων

Οι συνηθέστερες υπέργειες δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων ανάλογα με τη χρήση τους και τα προϊόντα που φιλοξενούν διακρίνονται σε σφαιρικές (αέρια προϊόντα) και σε κυλινδρικές κατακόρυφες ή οριζόντιες (υγρά προϊόντα), όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 4.9. Οι περισσότερο διαδεδομένες αλλά και μεγαλύτερες σε όγκο είναι οι κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές που διακρίνονται αντίστοιχα σε σταθερής και πλωτής οροφής.



Εικόνα 4.9 Κατηγορίες δεξαμενών από αριστερά: σφαιρική, κατακόρυφη κυλινδρική, οριζόντια κυλινδρική.

Τόσο οι ίδιες οι κατασκευές των δεξαμενών όσο και η αγοραπωλησία των πετροχημικών προϊόντων έχουν ιδιαίτερα μεγάλο κόστος. Παράλληλα η στρατηγική σημασία της παραγωγής και αποθήκευσης καυσίμων όπως και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί όροι που απαιτούνται σε αυτού του είδους τις εγκαταστάσεις καθιστούν την επιθεώρηση, την πρόληψη και τη συντήρηση απαραίτητη ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αποδοτικότερη οικονομικά σε σχέση με την αντικατάσταση.

Ο συνήθης κύκλος ζωής μιας δεξαμενής απαιτεί εκτός απροόπτου την επέμβαση στην κατασκευή σε βάθος χρόνου δεκαετίας και την επιθεώρηση της (μακροσκοπικός έλεγχος) σε μικρότερα διαστήματα της τάξης των 5 χρόνων [API 653]. Τα χρονικά αυτά διαστήματα μειώνονται όταν αυξάνεται ο περιβαλλοντικός κίνδυνος ή αντίστοιχα ο ρυθμός διάβρωσης των ελασμάτων στο κέλυφος της δεξαμενής λόγω του προϊόντος. Οι προδιαγραφές των εν λόγω εργασιών περιγράφονται από τεχνικά κείμενα διεθνών οργανισμών και ινστιτούτων όπως οι: International Standards Organization (ISO), American Petroleum Institute (API), Steel Tank Institute (STI) και από τις αντίστοιχες κρατικές νομοθεσίες και υπηρεσίες.

Οι κυριότερες εφαρμογές σε κατακόρυφες δεξαμενές στις οποίες ο αγρονόμος τοπογράφος μηχανικός έχει πρωταγωνιστικό ρόλο αφορούν σε:

- Επιθεωρήσεις
- Προγράμματα τροποποίησης του σχεδιασμού
- Παρακολούθηση μετακινήσεων και παραμορφώσεων
- Ανάλυση της συγκράτησης των αναχωμάτων
- Τεκμηρίωση του όγκου της δεξαμενής

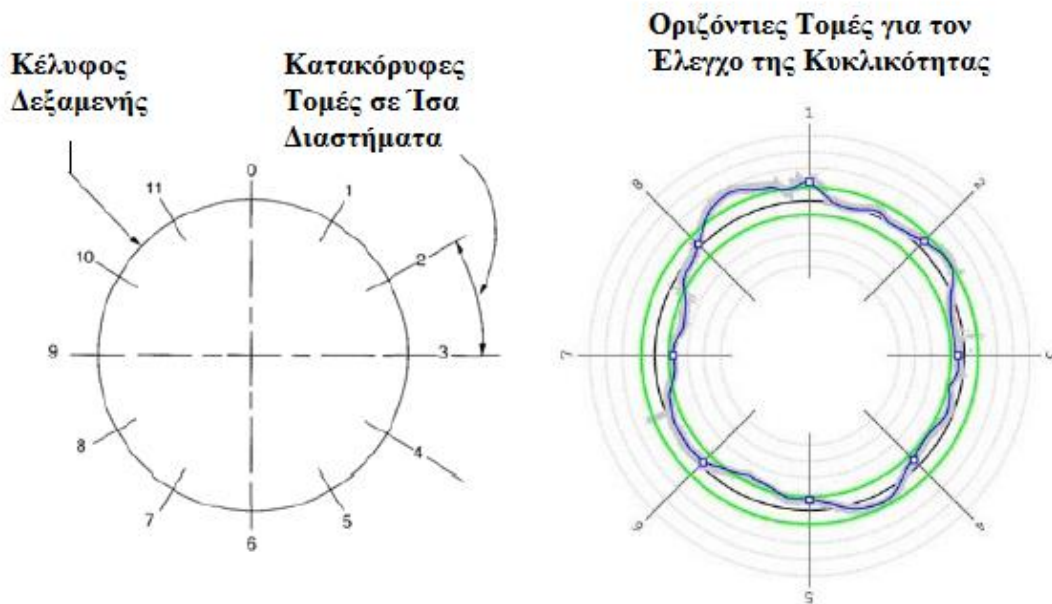
Η επιθεώρηση της δεξαμενής γίνεται κυρίως οπτικά για τη διαπίστωση διαρροών, ρηγματώσεων του χρώματος και των ελασμάτων του κελύφους, διάβρωσης των ελασμάτων με αντίστοιχες υπερηχητικές (ultrasonic) μετρήσεις του πάχους τους κ.α.

Τα προγράμματα τροποποίησης του σχεδιασμού είναι ουσιαστικά μέρος της διαχείρισης του μηχανολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης (asset management) η οποία συντελείται από μεθόδους εντοπισμού θέσης και τη σύνταξη γεωμετρικών παραγώγων όπως τοπογραφικά διαγράμματα, τριδιάστατα μοντέλα κ.τ.λ.

Οι δεξαμενές δύναται να φτάνουν τα 30m σε ύψος και τα 100m σε διάμετρο, προκαλώντας μόνιμη φόρτιση του εδάφους και του υπεδάφους και του φέροντα οργανισμού της κατασκευής από μεγάλα εντατικά μεγέθη, η οποία μεταφράζεται από ολικές και διαφορικές καθιζήσεις και το σχηματισμό κοιλωμάτων στο δάπεδο και το κέλυφος της δεξαμενής.

Ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς ότι οι εγκαταστάσεις διυλιστηρίων βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον αιγιαλό με αποτέλεσμα οι τιμές του υδροφόρου ορίζοντα να λαμβάνουν μέχρι και αρνητικές τιμές στάθμης κατά τη διάρκεια του έτους.

Η παρακολούθηση των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων της δεξαμενής αφορούν σε γεωδαιτικές μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ακόμη συντάσσονται διαγράμματα κατακόρυφων τομών σε σταθερά γωνιακά διαστήματα, για τον έλεγχο της κατακορυφότητας όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17 και διαγράμματα οριζόντιων τομών σε σταθερά ύψη για τον έλεγχο της κυκλικότητας της δεξαμενής. Επιπλέον εξετάζεται η επιπεδότητα ή αντίστοιχα η κωνικότητα του δαπέδου.



Σχήμα 4.17 Κατακόρυφες και οριζόντιες τομές για την παρακολούθηση παραμορφώσεων σε κατακόρυφη κυλινδρική δεξαμενή. [API 653]

Η ανάλυση της συγκράτησης των αναχωμάτων αναφέρεται ουσιαστικά στον όγκο του προϊόντος που είναι ικανή να συγκρατήσει η τάφρος και τα τεχνητά πρανή που περιβάλλουν τη δεξαμενή σε ενδεχόμενο εκτεταμένης διαρροής. Η συγκεκριμένη εργασία αντιμετωπίζεται από τις συνήθεις τοπογραφικές μεθοδολογίες.

Η τεκμηρίωση της δεξαμενής (tank calibration) είναι μια σύνθετη μετρολογική διαδικασία υψηλής ακρίβειας που αποσκοπεί στη σύνταξη του ογκομετρικού πίνακα ο οποίος καταγράφει τον όγκο της δεξαμενής ανά χιλιοστό της στάθμης πλήρωσης. Οι αποδεκτές προδιαγραφές των μεθοδολογιών και του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού περιγράφονται από τα παρακάτω τεχνικά κείμενα:

- Upright cylindrical tanks calibration: Manual strapping. (API 2550)
- Calibration of vertical cylindrical tanks: Strapping method (ISO 7507-1)
- Calibration of vertical cylindrical tanks: Optical-reference-line method (ISO 7507-2)
- Calibration of vertical cylindrical tanks: Optical triangulation method. (ISO 7507-3)

- Calibration of vertical cylindrical tanks: Internal electro-optical distance ranging method. (ISO 7507-4)
- Calibration of vertical cylindrical tanks: External electro-optical distance-ranging method. (ISO 7507-5)
- Recommendations for monitoring, checking and verification of tank calibration and capacity table. (ISO 7507-6)
- International Organization of Legal Metrology: OIML R 71
- Physikalisch-Technischen Bundesanstalt: PTB A-4.2

Οι μεθοδολογίες που είναι αποδεκτές από τις ελληνικές αρχές (ΦΕΚ Β' 2406/26-09-2013) είναι οι κατά ISO και API και πραγματοποιούνται είτε με τη χρήση μετροταινίας (strapping) είτε με θεοδόλιχο (optical) είτε με τη χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που έχει τη δυνατότητα να μετρά μήκη χωρίς ανακλαστήρα (distance ranging). Η γωνιακή ακρίβεια μέτρησης των οργάνων ορίζεται στα $\pm 2'' \approx 0.5''$, ενώ η αβεβαιότητα προσδιορισμού των μηκών ορίζεται στα $\pm 1\text{mm}$. Όλες οι μεθοδολογίες αποσκοπούν στην εξεύρεση της βέλτιστης ακτίνας με μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων ανά σειρά ελασμάτων με τελικό στόχο ο συνολικός όγκος να υπολογίζεται με ακρίβεια $\pm 5\%$.

περιφέρεια	σφάλμα περιμέτρου	σφάλμα ακτίνας
0-25m	$\pm 2\text{mm}$	$\pm 0.8\text{mm}$
25-50m	$\pm 4\text{mm}$	$\pm 1.6\text{mm}$
50-100m	$\pm 5\text{mm}$	$\pm 2\text{mm}$
100-200m	$\pm 6\text{mm}$	$\pm 2.4\text{mm}$
200m+	$\pm 8\text{mm}$	$\pm 3.2\text{mm}$

Πίνακας 4.6 Αβεβαιότητες προσδιορισμού της περιμέτρου και της ακτίνας σε σχέση με το μήκος της περιφέρειας της δεξαμενής. [ISO 7507]

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται είτε εσωτερικά με τη δεξαμενή άδεια είτε εξωτερικά με τη δεξαμενή σε λειτουργία. Παράλληλα πραγματοποιούνται διορθώσεις για την ακτινική διαστολή των ελασμάτων από την υδροστατική πίεση σε σχέση με το ύψος πλήρωσης, το ειδικό βάρος του ρευστού και τη θερμοκρασία, το νεκρό όγκο από ανθρωποθυρίδες και σωληνώσεις και τον όγκο που βρίσκεται κάτω από την πλάκα αναφοράς (dip plate).

Η τρίτη εφαρμογή που επιλέχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου

εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 αφορά στην αποτύπωση κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σε σχέση με δεδομένα σάρωσης (light scanning) του χωροεικονογεωδαιτικού σταθμού Trimble VX.

Η δεξαμενή που επιλέχθηκε είναι η P-8736 η οποία βρίσκεται στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων Ασπροπύργου. Αποτελείται από 7 σειρές χαλύβδινων ελασμάτων βαμμένες με αντιδιαβρωτικό χρώμα. Η ονομαστική ακτίνα της δεξαμενής είναι 11.5m με ύψος 13.38m και ανώτατο ύψος πλήρωσης από την πινακίδα αναφοράς στα 11.4m.



Εικόνα 4.10 Δεξαμενή P-8736 στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων Ασπροπύργου.

Η δεξαμενή βρισκόταν σε καλή κατάσταση χωρίς διαρροές, διαβρώσεις ή ρηγματώσεις του χρώματος και των ελασμάτων. Ο περιβάλλοντας χώρος ήταν αποψιλωμένος, χωρίς λιμνάζοντα νερά ή υπολείμματα πετρελαιοειδών ενώ υπήρχε αρκετός ελεύθερος χώρος χωρίς εμπόδια για την ανάπτυξη των δικτύων των στάσεων αναφοράς και για τα δύο σενάρια της αποτύπωσης.

Οι εγκαταστάσεις διυλιστηρίων αποτελούν ένα ιδιαίτερα επιβαρημένο και επικίνδυνο περιβάλλον οπότε για την διεξαγωγή του εν λόγω πειράματος εκδόθηκε σχετική άδεια ψυχρής εργασίας από τους υπεύθυνους των εγκαταστάσεων ενώ δόθηκε βραδύκαυστη στολή εργασίας, κράνος, γυαλιά, άρβυλα ασφαλείας και γάντια. Παράλληλα εγκρίθηκε ότι ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός δεν αποτελεί πηγή θερμότητας και άρα δεν υπήρχε ενδεχόμενο ανάφλεξης ενώ ήτανε απαραίτητη η παρακολούθηση ειδικού σεμιναρίου πυρασφάλειας επιπέδου υπευθύνου συνεργείου με τις αντίστοιχες εξετάσεις οι οποίες διεξήχθησαν με επιτυχία.

Οι μετρήσεις και με τα δύο συστήματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο ημέρες εξωτερικά της δεξαμενής με ηλιοφάνεια και θερμοκρασία στους 25° C. Η δεξαμενή και τις δύο ημέρες είχε σταθερή στάθμη στα 8m με ειδικό βάρος ρευστού στα 0.8 kg/lit. Ως εκ τούτου οι γεωμετρικές μεταβολές λόγω τις υδροστατικής πίεσης θεωρούνται σταθερές και αμοιβαίες ως προς τις δύο διαδικασίες και δεν συνυπολογίζονται στα αποτελέσματα.

Στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί ο υπολογισμός των εξωτερικών ακτίνων της δεξαμενής σε διαφορετικά ύψη γεγονός που αποτελεί αντικείμενο τόσο σε μελέτες παραμορφώσεων όσο και σε ογκομετρήσεις όπως έχει προαναφερθεί. Παράλληλα εξετάζεται η ανταπόκριση του εικονοσυστήματος V10 σε μια περισσότερο απαιτητική εργασία που εμπίπτει στον επιστημονικό χώρο της τεχνικής γεωδαισίας.

Η δεξαμενή έχει περίμετρο της τάξης 72.2m και σύμφωνα με τον πίνακα 4.6 το αποδεκτό σφάλμα υπολογισμού της ακτίνας για τη διακρίβωση της δεξαμενής κατά ISO 7507 είναι της τάξης των $\pm 2\text{mm}$. Αυτό που χρειάζεται να επισημανθεί είναι πως καμία από τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκε δεν είναι εγκεκριμένη από τους διεθνείς οργανισμούς για εργασίες ογκομετρήσεων.

Βέβαια το εθνικό μετρολογικό ινστιτούτο της Γερμανίας (PTB) έχει πιστοποιήσει την ογκομέτρηση κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών με χρήση τριδιάστατων σαρωτών και αντίστοιχων αλγορίθμων επεξεργασίας. Οι διακριβώσεις από δεδομένα σαρώσεων αναμένεται να γίνει κοινή πρακτική όπως και η αναλυτική προσέγγιση στις επισκευές δεξαμενών από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων οι γεωμετρικές

ατέλειες των οποίων θα ελαχιστοποιούνται από τα γεωδαιτικά δεδομένα δίνοντας αξιόπιστες λύσεις. Προς το παρόν υπάρχει έλλειψη σχετικού κανονιστικού πλαισίου [Λαβασάς Ι. κ.α.].

4.3.1 Σάρωση με χρήση του εικονοσταθμού Trimble VX

Η δεξαμενή P-8736 αρχικά αποτυπώθηκε με τον χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX της εταιρείας Trimble, εικόνα 4.11. Ο συγκεκριμένος ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός λειτουργεί ως τριδιάστατος σαρωτής επιφανειών ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μετρητικές εικόνες μέσω ενσωματωμένου αισθητήρα CCD. Επιπλέον είναι σερβοκινούμενος ενώ διαθέτει ατέρμονες κοχλίες τόσο για την κίνηση του όσο και για την εστίαση του τηλεσκοπίου.



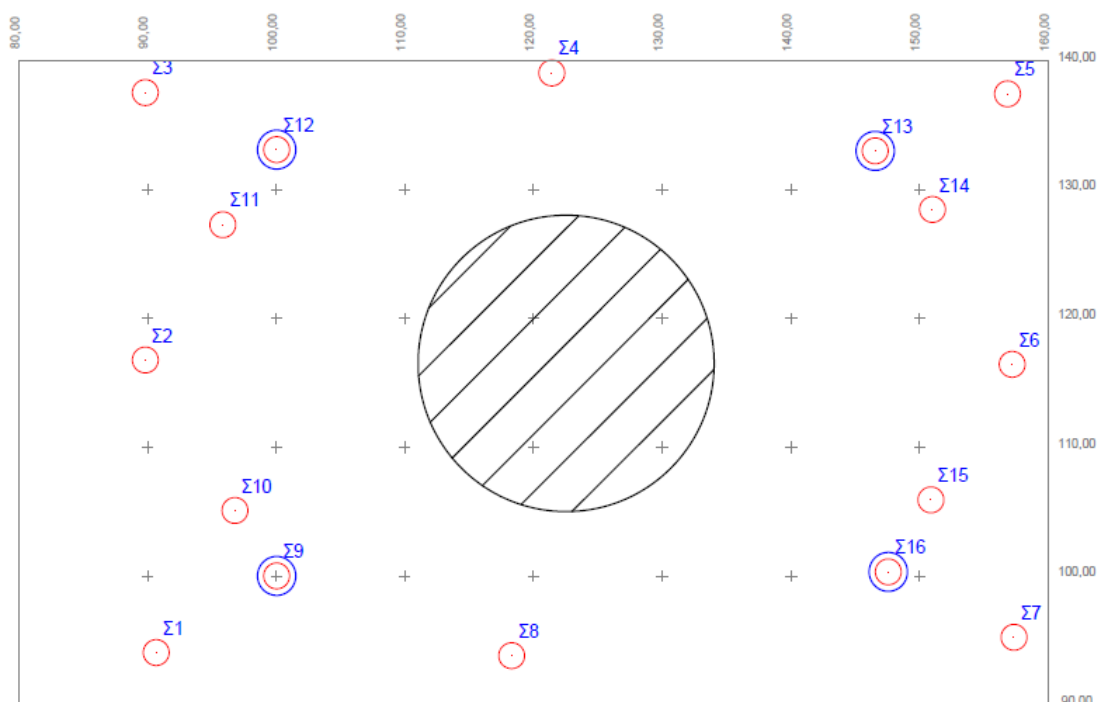
*Εικόνα 4.11 Ο γεωδαιτικός χωροεικονοσταθμός VX της εταιρείας Trimble.
[<http://www.trimble.com/>]*

Η γωνιακή ακρίβεια του σταθμού είναι της τάξης των $\pm 3'' = \pm 1''$. Αντίστοιχα η ακρίβεια μέτρησης μηκών με τη χρήση ανακλαστήρα είναι της τάξης των $\pm 2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ ενώ χωρίς ανακλαστήρα είναι $\pm 5\text{mm}$ για αποστάσεις μικρότερες των 250m [<http://www.trimble.com/>]. Τα παραπάνω μεγέθη προδιαγράφουν την ακρίβεια προσδιορισμού των

γεωδαιτικών συντεταγμένων τόσο του δικτύου των στάσεων αναφοράς όσο και των σημείων της σάρωσης.

Μετά την αναγνώριση της περιοχής πραγματοποιήθηκε η σήμανση των στάσεων αναφοράς με ημιμόνιμο τρόπο από πασσάλους και ατσαλόκαρφα. Η θέση των στάσεων επιλέχθηκε ώστε να εξυπηρετούνται και τα δύο σενάρια της αποτύπωσης, δηλαδή με το VX και με το σύστημα V10, με τη βοηθητική χρήση μετροταινίας και την αντίστοιχη προεργασία που πραγματοποιήθηκε στο γραφείο.

Έτσι σημάνθηκαν 16 στάσεις αναφοράς/λήψης περιμετρικά της δεξαμενής. Οι στάσεις Σ1-Σ8 τοποθετήθηκαν στο φρύδι του τεχνητού πρανούς συγκράτησης ενώ οι στάσεις Σ9-Σ16 τοποθετήθηκαν επί της τάφρου στα τέσσερα άκρα της σχηματίζοντας 4 δίπολα. Οι δύο ομάδες των στάσεων έχουν μεταξύ τους μια υψομετρική διαφορά που είναι μικρότερη των 3m. Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται το δίκτυο των στάσεων ενώ με μπλε χρώμα έχουν επισημανθεί οι στάσεις που αξιοποιήθηκαν για τη σάρωση με το VX (Σ9, Σ12, Σ13, Σ16).



Σχήμα 4.18 Στάσεις αναφοράς για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.

Η διαδικασία μέτρησης τους πραγματοποιήθηκε με το συνδυασμό της μεθόδου πολικών συντεταγμένων και τη μέθοδο των τριών τριπόδων σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Ο προσδιορισμός των

γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων πραγματοποιήθηκε σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο μέσω του λογισμικού υποστήριξης Trimble Survey Controller. Αυτό γίνεται ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει διαδικασία της σάρωσης και τα διαφορετικά νέφη σημείων να είναι συσχετισμένα χωρίς μετέπειτα διαδικασίες (post processing) συνένωσης. Ακολουθεί ο πίνακας 4.7 με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των στάσεων.

-	x(m)	y(m)	H(m)
Σ1	90.659	94.051	12,667
Σ2	89.796	116.776	12.627
Σ3	89.806	137.539	12.642
Σ4	121.395	139.066	12.695
Σ5	156.822	137.444	12.627
Σ6	157.179	116.431	12.681
Σ7	157.318	95.250	12.654
Σ8	118.272	93.805	12.692
Σ9	100.000	100.000	10.000
Σ10	96.764	105.076	9.960
Σ11	95.828	127.281	9.850
Σ12	100.000	133.115	9.965
Σ13	146.537	132.999	9.965
Σ14	150.969	128.467	10.157
Σ15	150.856	105.900	9.904
Σ16	147.543	100.322	10.005

Πίνακας 4.7 Γεωδαιτικές συντεταγμένες των στάσεων αναφοράς σε μέτρα για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.

Η αρχή του συστήματος αναφοράς υλοποιείται από τη στάση Σ9 (100m, 100m, 10m) με μηδενισμό στη στάση Σ16 και αντίστοιχη γωνία διεύθυνσης $\alpha_{\Sigma 9 \Sigma 16} = 100^\circ$. Από τις συγκεκριμένες στάσεις μετρήθηκαν τόσο οι υπόλοιπες στάσεις αναφοράς όσο και το 50% της σάρωσης για την ελαχιστοποίηση της μετάδοσης σφαλμάτων.

Έπειτα από σχετική διερεύνηση σε σχέση με την ακρίβεια μέτρησης του VX και με τη βοήθεια ενός λογιστικού φύλλου του Excel και τις σχέσεις 4.5-4.10 προέκυψε ότι η ακρίβεια προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων είναι της τάξης των $\pm 3\text{mm}$. Αντίστοιχα τα σημεία της σάρωσης, με οριζόντιες αποστάσεις από τις στάσεις μέτρησης που κυμαίνονται μεταξύ 15-25m, προσδιορίζονται με αβεβαιότητα που δεν ξεπερνάει τα $\pm 6\text{mm}$ στην κάθε διάσταση.

Η διαδικασία της σάρωσης ξεκινάει με τον προσδιορισμό της επιφάνειας σάρωσης μέσω της ανάπτυξης ενός πολυγώνου στην οθόνη του χειριστηρίου TCU η οποία απεικονίζει το πεδίο λήψης της ενσωματωμένης ψηφιακής κάμερας. Δηλαδή ουσιαστικά το πολύγωνο ορίζει τα όρια στις διευθύνσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών αφού όπως έχει προαναφερθεί ο αισθητήρας CCD λειτουργεί ως όργανο καταγραφής διευθύνσεων.

Στη συνέχεια επιλέγεται το βήμα σάρωσης που αντιστοιχεί σε γωνιακό βήμα κατά τον πρωτεύων και δευτερεύων άξονα του τηλεσκοπίου. Η αναγωγή του γωνιακού βήματος σε γραμμικό πραγματοποιήθηκε με την μέτρηση μιας τυχαίας κεκλιμένης απόστασης στο κέντρο της προς σάρωση επιφάνειας. Η συγκεκριμένη επιλογή παρέχεται από το λογισμικό υποστήριξης πεδίου του VX.

Το βήμα σάρωσης καθορίστηκε αρχικά στα 10cm. Μετά το πέρας της πρώτης σάρωσης, που διήρκησε λίγο λιγότερο της μίας ώρας, το βήμα σάρωσης επανακαθορίστηκε και αυξήθηκε στα 20cm. Το γεγονός αυτό πραγματοποιήθηκε ώστε να τηρηθεί το χρονοδιάγραμμα των εργασιών πεδίου σε συνδυασμό με την αυτονομία που παρείχαν οι μπαταρίες του οργάνου τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Σύμφωνα με την μέθοδο Monte Carlo και τη σχέση (4.32) τα 20cm αντιστοιχούν σε ελάχιστο βήμα σάρωσης για την προσαρμογή επιφάνειας με μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων της οποίας το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους είναι της τάξης των $\sigma_0 = \pm 10\text{cm}$. Δηλαδή το βήμα σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι αρκετά μεγαλύτερο του ελαχίστου [Pantazis G. et al, 2013].

$$n = \frac{E}{\beta^2} = \frac{E}{(\sigma_0 \cdot z_{95})^2} \quad (4.32)$$

Όπου n : το πλήθος των σημείων σάρωσης

E : το εμβαδό της προς σάρωση επιφάνειας

$\beta = \sigma_0 \cdot z_{95\%}$: το ελάχιστο βήμα σάρωσης

Αυτό συμπεραίνεται καθώς από την έρευνα που έγινε σε σχέση με άλλες εφαρμογές της μεθόδου MC με την προσαρμογή σημείων στο επίπεδο με

αντίστοιχο $\sigma_0 = \pm 18\text{mm}$ για ίδιες ακρίβειες μέτρησης και απόσταση σάρωσης [Γκότσης Β., 2012]. Αλλά και από την προσαρμογή ενός δείγματος 7000 σημείων της παρούσας σάρωσης σε κύκλο, που έκλεισε με a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους $\sigma_0 = \pm 26\text{mm}$.

Δηλαδή το ελάχιστο γραμμικό βήμα σάρωσης για την εν λόγω εφαρμογή κυμαίνεται μεταξύ 4cm και 5cm. Βέβαια ο κύλινδρος στο χώρο δεν περιγράφεται από κάποια σχέση πέρα των παραμετρικών εξισώσεων του, για αυτό η συσχέτιση έγινε με την εξίσωση του κύκλου και ως αναπτυκτή επιφάνεια του κυλίνδρου με την εξίσωση του επιπέδου.

Η διαδικασία συνεχίζεται με τη λήψη εικόνων που καλύπτουν την περιοχή του πολυγώνου συνθέτοντας ένα πανόραμα που θα χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο για το χρωματισμό της επιφάνειας. Ενώ ολοκληρώνεται με τη μέτρηση των σημείων της επιφάνειας με ταχύτητα της τάξης των 15 σημείων ανά δευτερόλεπτο δηλαδή 25-30 λεπτά για την κάθε στάση αναφοράς όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12.

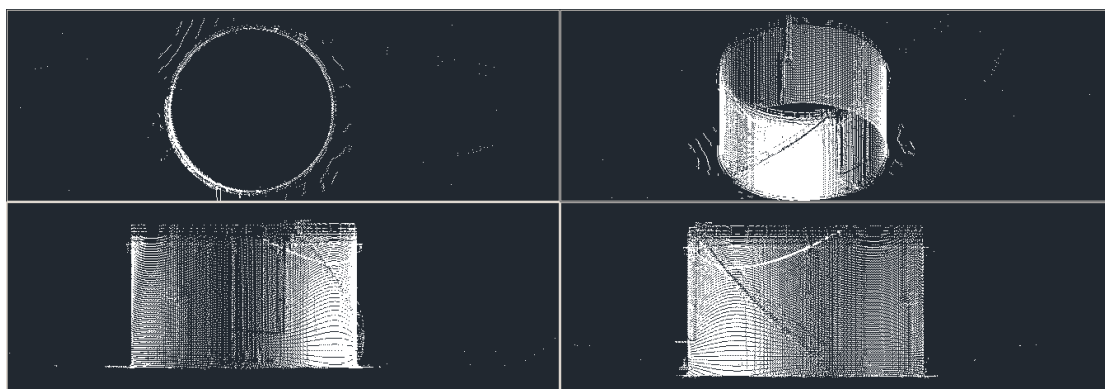


Εικόνα 4.12 Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX κατά τη σάρωση.

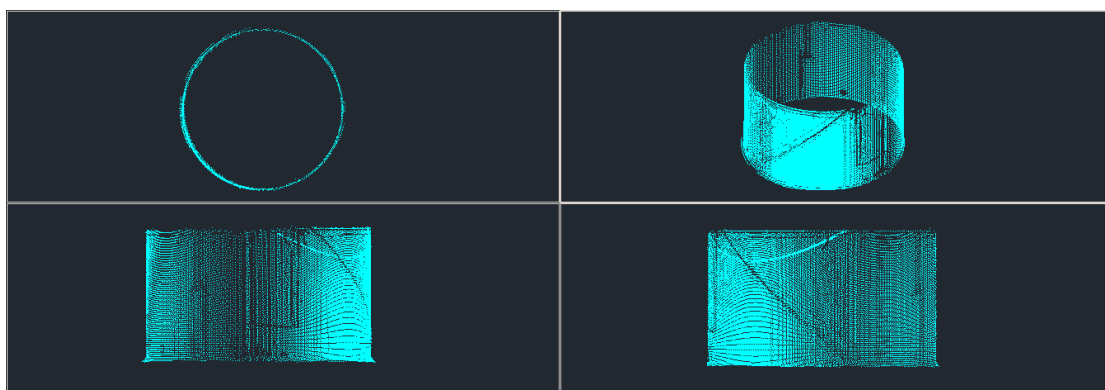
Συνολικά το νέφος αποτελούταν πρωτογενώς από 31670 σημεία όπως παρουσιάζεται στη σχήμα 4.19 κυρίως λόγω των επικαλύψεων. Η

επεξεργασία του νέφους πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Realworks. Αφού το νέφος των σημείων καθαρίστηκε σε σχέση με την περιττή πληροφορία όπως σωληνώσεις, ανθρωποθυρίδες, πυροσβεστικά συστήματα, σκάλες και κάγκελα. Έτσι παρέμειναν 29200 σημεία όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.20.

Έπειτα δημιουργήθηκε η επιφάνεια της δεξαμενής μέσω δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (TIN) κατά την πλεγματοποίηση των οποίων τηρείται το κριτήριο του Delaunay. Παράλληλα επιλέχθηκε η προβολή κυλίνδρου για τη δημιουργία του πλέγματος ώστε να διατηρείται σταθερός προσανατολισμός στα τρίγωνα που δημιουργούνται ακολουθώντας τη γεωμετρία του στερεού.



Σχήμα 4.19 Το νέφος σημείων από τη σάρωση του VX σε τέσσερις διαφορετικές προβολές (ορθή, αξονομετρική και δύο πλάγιες).

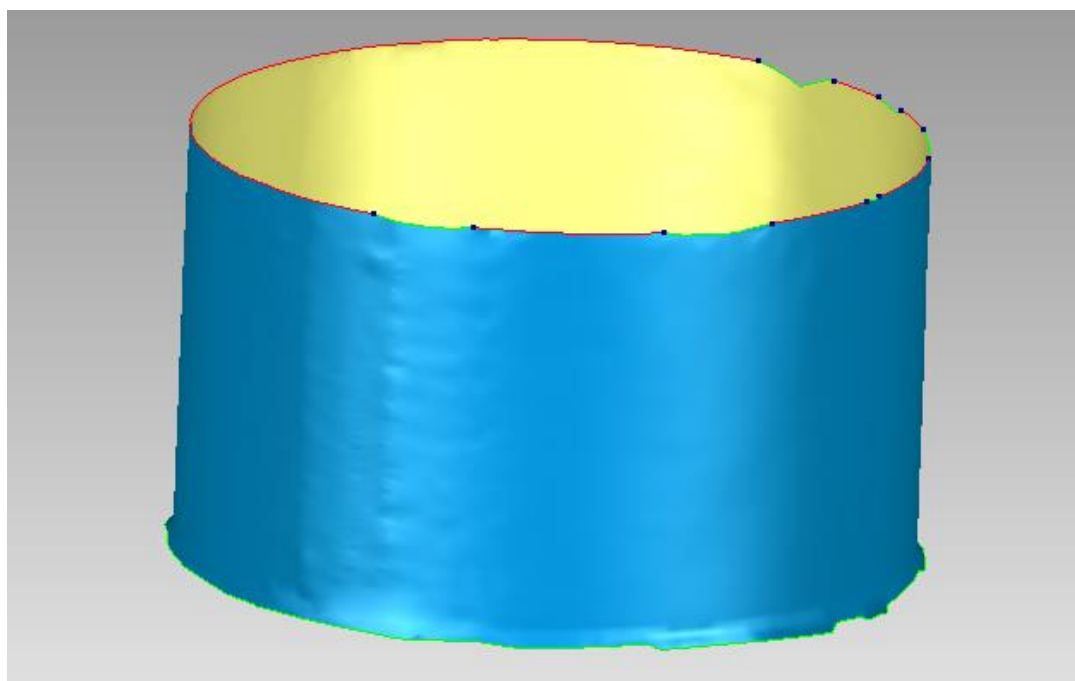


Σχήμα 4.20 Το νέφος σημείων του VX καθαρισμένο σε τέσσερις διαφορετικές προβολές (ορθή, αξονομετρική και δύο πλάγιες).

Στη συνέχεια έγινε η εξαγωγή οριζόντιων τομών τόσο σε σχέση με το νέφος σημείων όσο και με την επιφάνεια. Οι οριζόντιες τομές του νέφους εξήχθησαν σε μορφή αρχείου "txt" σε πλάτος 5cm για κάθε υψόμετρο για να χρησιμοποιηθούν ως παρατηρήσεις στις προσαρμογές κύκλων.

Αντίστοιχα οι οριζόντιες τομές της επιφάνειας εξήχθησαν σε μορφή "dxf" στα αντίστοιχα ύψη που προέκυψαν από την αποτύπωση με το σύστημα V10 για τη γεωμετρική σύγκριση των δύο διαδικασιών.

Οι οριζόντιες τομές της επιφάνειας πραγματοποιήθηκαν πριν από τις διαδικασίες εξομάλυνσης και διόρθωσης του πλέγματος για να μην υπάρξει αλλοίωση της γεωμετρικής πληροφορίας. Η εξομάλυνση της επιφάνειας, η αφαίρεση των αιχμών όπως και η διόρθωση των τεμνόμενων τριγώνων και το κλείσιμο των κενών της επιφάνειας έγινε σε δεύτερο στάδιο στο λογισμικό Geomagic. Το αποτέλεσμα της τελικής επιφάνειας παρουσιάζεται στην εικόνα 4.13.



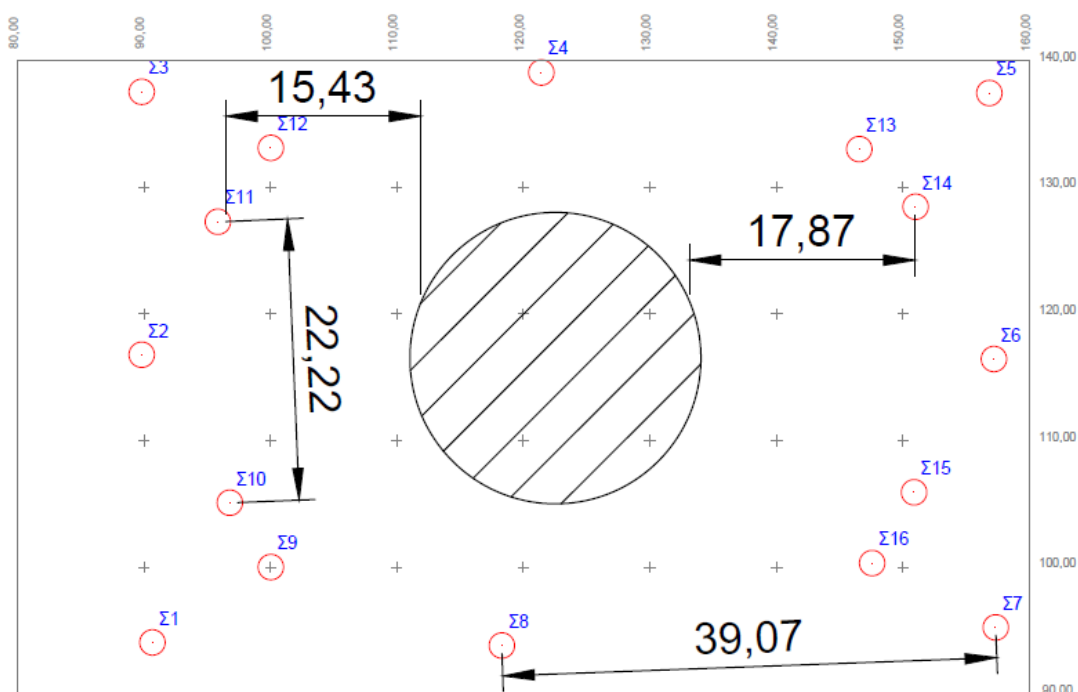
Εικόνα 4.13 Η τελική επιφάνεια της δεξαμενής έπειτα από διορθώσεις στο λογισμικό Geomagic.

4.3.2 Μέτρηση με το V10

Οι λήψεις με το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκαν και από τις 16 στάσεις αναφοράς που μετρήθηκαν με το χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX. Ο σχεδιασμός του δικτύου των στάσεων λήψης είχε ως αρχικό στόχο τη δημιουργία των περισσοτέρων δυνατών συνδυασμών βάσεων λήψης προς την απόσταση του αντικειμένου, οι οποίοι να πληρούν τα κριτήρια ορθής λειτουργίας όπως αυτά περιγράφηκαν στο 2^ο κεφάλαιο.

Επιπλέον δόθηκε έμφαση ώστε να μη χάνεται γεωμετρική πληροφορία ως προς τη δεξαμενή και κυρίως σε σχέση με το ύψος της κατασκευής. Επιπλέον οι θέσεις των στάσεων διευκολύνουν την αυτόματη διαδικασία τριγωνισμού. Γενικότερα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.21 που δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές οριζόντιες αποστάσεις σε μέτρα, το δίκτυο των στάσεων λήψης πληροί τους στόχους του και η ακρίβεια των σημείων λεπτομέρειας αναμένεται να είναι της τάξης των $\pm 10-20\text{mm}$.

Δευτερευόντως βέβαια, διαπιστώθηκε ότι οι στάσεις Σ4 και Σ8 θα έπρεπε να πυκνωθούν δημιουργώντας τρεις βάσεις λήψης αντί για δύο κατά τη μεγάλη πλευρά του πρανούς συγκράτησης.



Σχήμα 4.21 Το δίκτυο των στάσεων λήψης του V10 για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.

Τα μεγαλύτερα προβλήματα κατά τη διαδικασία προέκυψαν από την έντονη ανάκλαση λόγω της ηλιοφάνειας και του άσπρου χρώματος της δεξαμενής που μείωσε την ποιότητα αρκετών πανοραμάτων.

Ένα επιπλέον πρόβλημα δημιουργήθηκε από το γεγονός ότι οι λήψεις των πανοραμάτων Σ5, Σ6, Σ7, Σ13, Σ14, Σ15 και Σ16 πραγματοποιήθηκαν διαφορετική μέρα και ώρα από τα υπόλοιπα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες ραδιομετρικές μεταβολές μεταξύ ομόλογων σημείων.



Εικόνα 4.14 Εργασίες πεδίου για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736.

Η επίλυση του επίγειου τριγωνισμού στο TBC ξεκίνησε μέσω της αυτόματης διαδικασίας εξεύρεσης σημείων σύνδεσης με την επιλογή του μαθηματικού μοντέλου "full orientation". Έτσι επιλύθηκαν 9 από τα 16 πανοράματα, δηλαδή εκτός των στάσεων λήψης που λήφθηκαν τη δεύτερη ημέρα εργασιών, με 1178 σημεία σύνδεσης. Η αναφορά της αυτόματης επίλυσης του επίγειου τριγωνισμού βρίσκεται εξ'ολοκλήρου στο παράρτημα.

Το φωτογραμμετρικό δίκτυο ενισχύθηκε με την πύκνωση 40 σημείων σύνδεσης (όπου τα 36 έγιναν αποδεκτά) που σκοπεύθηκαν χειροκίνητα και ο φωτοτριγωνισμός επιλύθηκε με επιτυχία με 1214 σημεία σύνδεσης για τις 16 στάσεις λήψης. Οι εξισώσεις συνθήκης διαμορφώθηκαν στις 5708, οι άγνωστοι στους 3690 και οι βαθμοί ελευθερίας στους 2018. Το a-posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους διαμορφώθηκε στα ± 0.46 εικονοστοιχεία ($0.64\mu\text{m}$), που αντιστοιχεί σε 2mm σε απόσταση 10m, ενώ το μέγιστο υπόλοιπο των μετρημένων στοιχείων της συνόρθωσης διαμορφώθηκε στα 5.82 εικονοστοιχεία.

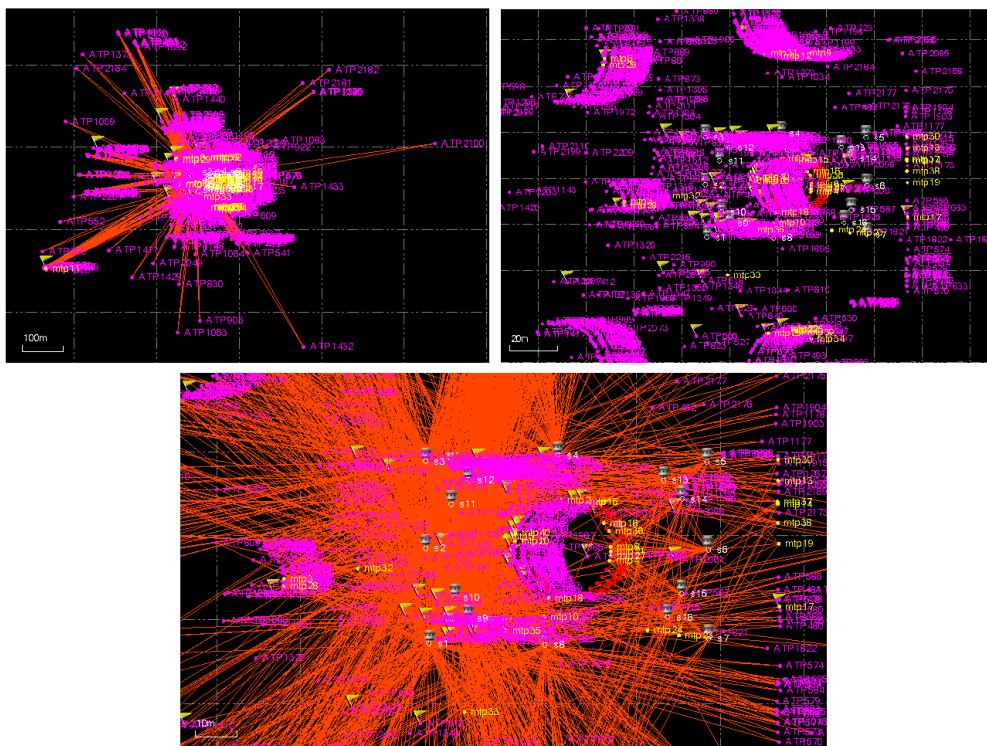
Η επιτυχία του φωτογραμμετρικού δικτύου και των θέσεων των στάσεων λήψης αποτυπώνεται από τις τρεις πρώτες μπάρες βαθμολόγησης της εικόνας 4.15, οι οποίες έχουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Η γεωμετρία των στάσεων βαθμολογείται με 10/10, η ακρίβεια των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων έχει τιμή 9.3/10, γεγονός που δικαιολογείται από το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους της συνόρθωσης, ενώ αντίστοιχη

τιμή 9.2 λαμβάνει και η διανομή των σημείων σύνδεσης. Ολόκληρη η αναφορά της τελικής επίλυσης επισυνάπτεται



Εικόνα 4.15 Μπάρες βαθμολόγησης από την τελική επίλυση του επίγειου τριγωνισμού στο TBC για την αποτύπωση της δεξαμενής P-7836.

Οι δύο τελευταίες μπάρες έχουν χαμηλές τιμές που οφείλονται αποκλειστικά στην αυτόματη διαδικασία εξεύρεσης σημείων σύνδεσης και στο πλήθος τους σε σχέση με τα σημεία που παρατηρήθηκαν χειροκίνητα. Δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά στον αριθμό των σημείων που βρίσκονται στο ανατολικό μέρος του δικτύου από ότι στο δυτικό υπό οξείες γωνίες τομής, ενώ παράλληλα το κάθε σημείο παρατηρείται από 2 πανοράματα κατά μέσο όρο (observations per point=2.35).



Σχήμα 4.22 Το φωτογραμμετρικό δίκτυο του V10 για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736 σε τρεις διαφορετικές κλίμακες.

Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η μορφή του φωτογραμμετρικού δικτύου όπου με μωβ χρώμα παρουσιάζονται τα αυτόματα σημεία σύνδεσης και με κίτρινο τα χειροκίνητα.

Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν φωτογραμμετρικά 93 σημεία λεπτομέρειας επί του κελύφους της δεξαμενής P-8736 και πιο συγκεκριμένα στις κολλήσεις των ελασμάτων. Από τα οποία τα 8 παρουσίασαν αδυναμία επίλυσης με τα 5 να παρουσιάζουν μεγάλο δείκτη ισχύς του σχήματος και τα υπόλοιπα 3 μεγάλα μη αποδεκτά υπόλοιπα κατακόρυφων διευθύνσεων. Τα 93 αυτά σημεία βρίσκονται σε 6 οριζόντια επίπεδα με σταθερή υψομετρική διαφορά στα 1.85m.

Το πρόβλημα που δημιουργήθηκε κατά την αποτύπωση σχετίζεται με την ανατολική πλευρά της δεξαμενής και ειδικότερα τους δακτυλίους που βρίσκονται ψηλότερα. Αυτό συμβαίνει καθώς από τις τρεις λήψεις που περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο μέρος μόνο μια ήταν καλής ποιότητας λόγω της έντονης ανάκλασης του φωτός. Έτσι δεν δημιουργήθηκε ένα ζεύγος πανοραμάτων ικανό να μετρήσει την εν λόγω πληροφορία.

Επιπλέον οι στάσεις Σ4 και Σ8 αν και συμμετείχαν σε πολλές παρατηρήσεις η μικρή απόσταση τους από το αντικείμενο στέρησε τελικώς γεωμετρική πληροφορία από τους υψηλότερους δακτυλίους. Τα δύο αυτά προβλήματα θα αντιμετωπίζονταν επαρκώς με την πύκνωση των στάσεων Σ4 και Σ8, με παράλληλη χρήση της τεχνικής δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους (HDR).

4.3.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των δύο διαδικασιών πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους. Αρχικά κατασκευάστηκε μια ρουτίνα σε κώδικα Matlab με αρχείο εισόδου της μορφής ``txt`` για την προσαρμογή σημείων σε περιφέρεια κύκλου. Η προσαρμογή (fitting) αφορούσε σε μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και πιο συγκεκριμένα στη γενική μέθοδο συνόρθωσης.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου έγινε επειδή δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζονται παράμετροι του μοντέλου που δεν μετριοούνται άμεσα, χωρίς παράλληλα να δεσμεύονται μετρημένα μεγέθη [Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009].

Ως εξίσωση συνθήκης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του κύκλου στις δύο διαστάσεις του ευκλείδειου χώρου όπως παρουσιάζεται στη σχέση (4.33).

$$f_i(\hat{x}, \hat{l}) = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - R^2 = 0 \quad (4.33)$$

Όπου x_i, y_i : οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του μετρημένου σημείου i

x_c, y_c : οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του κέντρου του βέλτιστου κύκλου

R : η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου

Σύμφωνα με τη γενικευμένη αντιμετώπιση συνόρθωσης σχηματίζονται c εξισώσεις συνθήκης όσες και τα μετρημένα σημεία. Ο αριθμός των παραμέτρων που ενδιαφέρει να προσδιοριστούν συμβολίζεται με m_0 που στην περίπτωση του κύκλου είναι 3 και πρόκειται για τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του κέντρου και την ακτίνα. Οι τρεις αυτοί άγνωστοι υλοποιούν το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των παραμέτρων όπως παρουσιάζεται στη σχέση (4.34).

$$\hat{x} = [x_c \quad y_c \quad R]^T \quad (4.34)$$

Η σχέση (4.35) συνδέει τον αριθμό των εξισώσεων συνθήκης c και τον αριθμό των άγνωστων παραμέτρων m_0 με το βαθμό ελευθερίας r . Ο αριθμός των μετρημένων στοιχείων n ισούται με το πλήθος των γεωδαιτικών συντεταγμένων που έχουν μετρηθεί δηλαδή είναι διπλάσιος του αριθμού των εξισώσεων συνθήκης.

$$c = r + m_0 \quad (4.35)$$

Από τη σχέση (4.33) εύλογα διαπιστώνεται ότι οι συνθήκες των μετρημένων στοιχείων δεν είναι γραμμικές ως προς τις παραμέτρους. Το γεγονός αυτό αντιμετωπίζεται δίνοντας προσωρινές τιμές στις παραμέτρους και οι συνθήκες αναπτύσσονται κατά Taylor στη θέση x^0, \hat{l} .

Το σύστημα σε μορφή πινάκων διαμορφώνεται σύμφωνα με τη σχέση (4.36). Οι προσωρινές τιμές των παραμέτρων υπολογίζονται από τρία τυχαία σημεία του δείγματος στο λογισμικό Autocad.

$$Ad\hat{x} + Bu = w \quad (4.36)$$

- Όπου $A_{m_0}^c$: ο πίνακας των συντελεστών των παραμέτρων
 B_n^c : ο πίνακας των συντελεστών των μετρήσεων
 $d\hat{x}_1^{m_0}$: οι διορθώσεις των καλύτερων τιμών των παραμέτρων
 u_1^n : το διάνυσμα των υπολοίπων των μετρήσεων
 w_1^c : το διάνυσμα των σφαλμάτων κλεισίματος

Έτσι ο πίνακας των συντελεστών των παραμέτρων κατασκευάζεται από τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων συνθήκης προς τις παραμέτρους που ενδιαφέρουν, όπως παρουσιάζεται στη σχέση (4.37).

Αντίστοιχα ο πίνακας των συντελεστών των μετρήσεων κατασκευάζεται από τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων συνθήκης ως προς τα μετρημένα στοιχεία σύμφωνα με τη σχέση (4.38).

Τέλος το διάνυσμα των σφαλμάτων κλεισίματος διαμορφώνεται από την προσωρινή τιμή της ακτίνας με αφαίρεση της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του μετρούμενου σημείου και των προσωρινών τιμών των συντεταγμένων του κέντρου, σχέση (4.39).

$$A = \begin{vmatrix} -2(x_1 - x_c^o) & -2(y_1 - y_c^o) & -2R^o \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{vmatrix} \quad (4.37)$$

$$B = \begin{vmatrix} 2(x_1 - x_c^o) & 2(y_1 - y_c^o) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 2(x_2 - x_c^o) & 2(y_2 - y_c^o) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix} \quad (4.38)$$

$$w = \begin{vmatrix} R^o - R_1^o \\ \vdots \end{vmatrix} \quad (4.39)$$

Στη διαδικασία δε συμμετέχει πίνακας βαρών καθώς οι παρατηρήσεις των δύο διαδικασιών θεωρούνται ισοβαρείς. Οπότε η λύση του συστήματος, ως προς τους βοηθητικούς πίνακες των σχέσεων (4.40) και (4.41), δίνεται από το διάνυσμα των διορθώσεων των προσωρινών τιμών

της σχέσης (4.42) και το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των παραμέτρων της σχέσης (4.43).

$$P_{\alpha} = (BB^T)^{-1} \quad (4.40)$$

$$N_{\alpha} = A^T P_{\alpha} A \quad (4.41)$$

$$d\hat{x} = N_{\alpha}^{-1} A^T P_{\alpha} w \quad (4.42)$$

$$\hat{x} = x_0 + d\hat{x} \quad (4.43)$$

Η συνόρθωση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των υπολοίπων των μετρήσεων σχέση (4.44), την εκτίμηση του a-posteriori τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους σχέση (4.45) και την κατασκευή του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας σχέση (4.46). Ο κώδικας του συγκεκριμένου προγράμματος περιλαμβάνεται στο παράρτημα της εργασίας.

$$u = B^T P_{\alpha} (w - Ad\hat{x}) \quad (4.44)$$

$$\hat{\sigma}_0 = \pm \sqrt{\frac{u^T u}{r}} \quad (4.45)$$

$$\hat{V}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N_{\alpha}^{-1} \quad (4.46)$$

Οι προσαρμογές των κύκλων στις οριζόντιες τομές των δακτυλίων της δεξαμενής αφορούν στα ύψη που παρουσιάζονται στο πίνακα 4.8. Στον ίδιο πίνακα δίνονται οι αριθμοί των εξισώσεων συνθήκης κάθε επίλυσης που αντιστοιχούν στο πλήθος των σημείων από την αποτύπωση με το σύστημα του V10 και του VX.

Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι πως η επιλογή του πλάτους της λωρίδας 5cm για τις οριζόντιες τομές του νέφους σημείων έγινε καταρχάς για να αυξηθεί το δείγμα χωρίς παράλληλα να αλλοιώνεται η γεωμετρική πληροφορία. Σε αυτή την απόσταση η διαστολή της ακτίνας της

δεξαμενής λόγω υδροστατικής πίεσης δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες μικρόμετρα. Άρα η διαφορά αυτή είναι αμελητέα καθώς δεν είναι ανιχνεύσιμη από τις μεθοδολογίες που εκτελέστηκαν.

οριζ. τομή	h (m)	c_V10	c_VX
ring 1	11.872	21	127
ring 2	13.730	17	89
ring 3	15.583	17	108
ring 4	17.438	13	98
ring 5	19.288	11	96
ring 6	21.132	10	114

Πίνακας 4.8 Πίνακας με τα ύψη των οριζόντιων τομών των δακτυλίων της δεξαμενής P-8736 με τον αντίστοιχο αριθμό σημείων από τις δύο διαδικασίες.

Στους πίνακες 4.9 και 4.10 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων των συνορθώσεων από τις δύο διαδικασίες. Οι επιλύσεις των δεδομένων του εικονοσυστήματος V10 έχουν μέσο όρο τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους της τάξης των $\pm 16\text{mm}$ και τυπικού σφάλματος της ακτίνας $\pm 5\text{mm}$ ($\pm 4\text{mm}$ αν εξαιρεθεί η τελευταία επίλυση). Αντίστοιχα ως προς τα δεδομένα της σάρωσης τα μεγέθη αυτά διαμορφώνονται στα $\pm 13\text{mm}$ για το σ_0 και $\pm 1.4\text{mm}$ για το τυπικό σφάλμα της ακτίνας.

-	x_c	σx_c	y_c	σy_c	R	σR	σ0	r
ring1	122.506	0.006	116.485	0.006	11.514	0.004	0.020	18
ring2	122.507	0.005	116.484	0.004	11.512	0.003	0.017	14
ring3	122.502	0.006	116.489	0.005	11.512	0.004	0.015	14
ring4	122.502	0.006	116.485	0.005	11.511	0.004	0.013	10
ring5	122.507	0.007	116.488	0.006	11.501	0.005	0.014	8
ring6	122.528	0.014	116.483	0.142	11.480	0.012	0.021	7

Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα των επιλύσεων προσαρμογής κύκλου με τα δεδομένα του V10 σε m.

-	x_c	σx_c	y_c	σy_c	R	σR	σ0	r
ring1	122.504	0.001	116.479	0.001	11.510	0.001	0.010	124
ring2	122.504	0.002	116.473	0.003	11.512	0.002	0.015	86
ring3	122.504	0.002	116.480	0.002	11.507	0.002	0.013	105
ring4	122.508	0.001	116.473	0.002	11.504	0.001	0.010	95
ring5	122.511	0.002	116.480	0.003	11.500	0.002	0.015	93
ring6	122.514	0.002	116.480	0.002	11.500	0.002	0.013	111

Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα των επιλύσεων προσαρμογής κύκλου με τα δεδομένα του VX σε m.

Από τα παραπάνω δεδομένα συμπεραίνεται ότι το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 δεν ενδείκνυται για την ογκομέτρηση κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών με μήκος περιφέρειας 50-100m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατά ISO-7507 και τον πίνακα 4.6. Βέβαια τα δεδομένα του συστήματος παρουσίασαν μεγάλη σταθερότητα, πέραν τεσσάρων σημείων με μεγάλα υπόλοιπα οριζόντιων διευθύνσεων και μη αποδεκτό δείκτη ισχύος του σχήματος που αφαιρέθηκαν από τη διαδικασία.

Η σημαντική αύξηση στην αβεβαιότητα προσδιορισμού των παραμέτρων της τελευταίας επίλυσης (ring 6) οφείλεται στο μικρό δείγμα των σημείων αλλά και στο γεγονός ότι τα 9 από τα 10 σημεία βρισκόταν στο δυτικό ημικύκλιο ενώ το σημείο που βρισκόταν στο βόρειο ημικύκλιο είχε αδυναμία επίλυσης. Το γεγονός φαίνεται έντονα από την αύξηση της γεωδαιτικής συντεταγμένης x του κέντρου της 6^{ης} οριζόντιας τομής που αυξάνεται κατά 2cm προς τα δυτικά.

Παράλληλα τα αποτελέσματα των παραμέτρων παρά το μικρό δείγμα των σημείων υπολογίστηκαν με πολύ μικρή αβεβαιότητα, που επιτρέπει την ανίχνευση της μόνιμης παραμόρφωσης της κατασκευής.

Το γεγονός αυτό απορρέει από τη σταδιακή αύξηση της ακτίνας όσο το ύψος μειώνεται, ακριβώς όπως και η υδροστατική πίεση αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την στάθμη αναφοράς. Όμως οι διαστολές που προκαλεί το ρευστό κατά τη στιγμή της μέτρησης δεν είναι ανιχνεύσιμες από την επίλυση των δεδομένων του συστήματος V10, αφού η μέγιστη διαστολή που αφορά στον πρώτο δακτύλιο για τη δεδομένη στιγμή είναι της τάξης των $\pm 3\text{mm}$ [ISO 7507-1, 2003].

Αντίστοιχα οι επιλύσεις που αφορούν στα δεδομένα της σάρωσης με το χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX υπολογίζουν τις παραμέτρους με μικρότερες αβεβαιότητες προσδιορισμού σε σχέση με το σύστημα V10. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται επιτρέπει τόσο την ογκομέτρηση της δεξαμενής όσο και την ανίχνευση μόνιμων παραμορφώσεων και διαστολών της κατασκευής λόγω υδροστατικής πίεσης κατά τη μέτρηση.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε σε σχέση με τις διαφορές των παραμέτρων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογίες σύμφωνα με τις τύπους της σχέσης (4.48). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αμφίπλευρος έλεγχος, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και τυποποιημένη τυχαία

μεταβλητή $z_p=1.96$, ως προς τις διαφορές των παραμέτρων και τη σχέση (4.49), θεωρώντας ότι η διαφορά της ακριβούς τιμής μηδενίζεται. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται αν οι διαφορές που προκύπτουν είναι εντός του θορύβου των μετρήσεων [Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2009].

$$\Delta x_{ij} = x_j - x_i$$

$$\sigma_{\Delta x_{ij}} = \sqrt{\sigma_{x_j}^2 + \sigma_{x_i}^2} \quad (4.48)$$

$$-z_p \sigma_{\Delta x_{ij}} \leq \Delta x_{ij} \leq +z_p \sigma_{\Delta x_{ij}} \quad (4.49)$$

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4.11 όπου με κίτρινο χρώμα επισημαίνονται οι διαφορές που ο αμφίπλευρος έλεγχος δεν γίνεται δεκτός για επίπεδο εμπιστοσύνης 68%. Αντίστοιχα ο έλεγχος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% πραγματοποιήθηκε με επιτυχία για όλες τις παραμέτρους της προσαρμογής εκτός της συντεταγμένης y της τέταρτης οριζόντιας τομής (ring 4) που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα στον πίνακα 4.11.

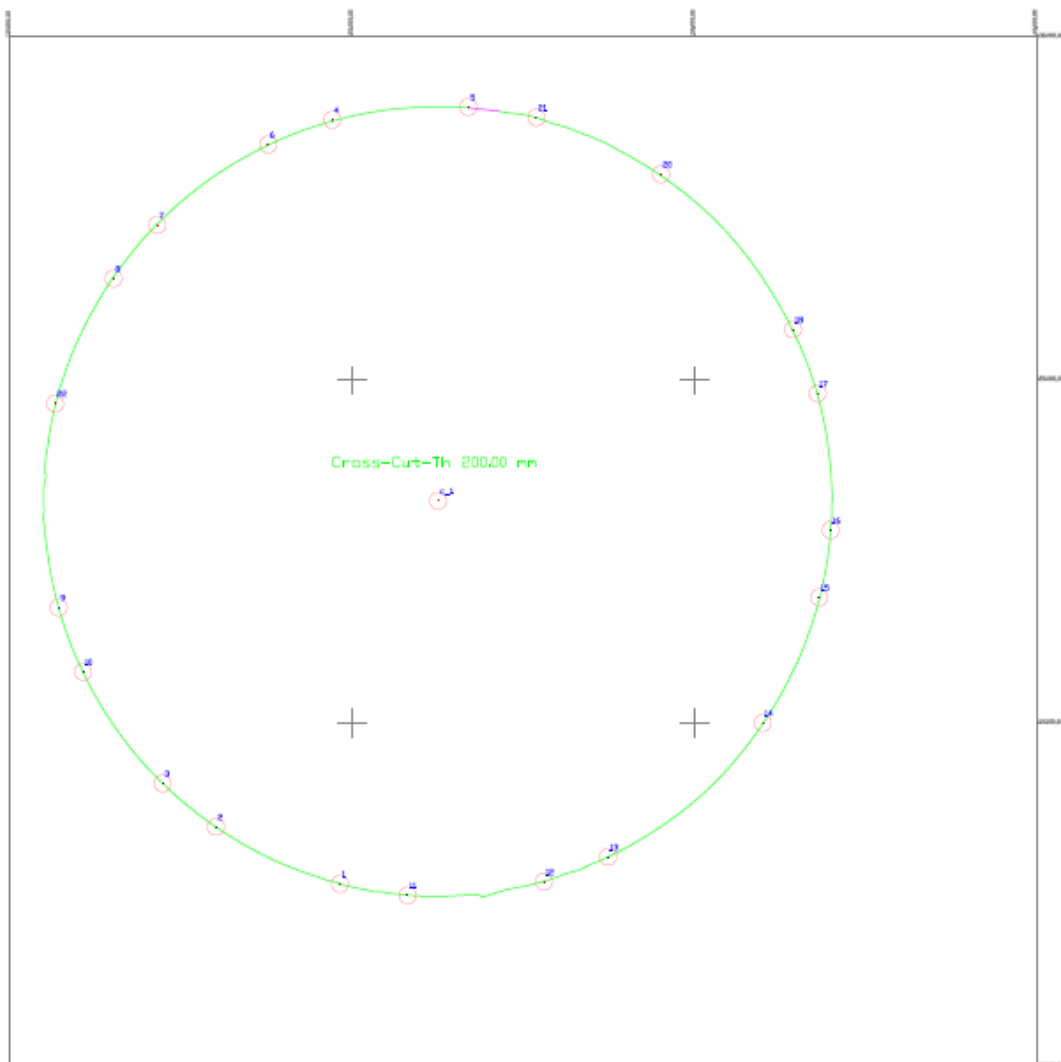
-	ΔX	$\sigma_{\Delta X}$	ΔY	$\sigma_{\Delta Y}$	ΔR	$\sigma_{\Delta R}$	$\sigma_{\Delta R} * z_{95}$
ring1	2	6	6	6	5	4	9
ring2	3	5	11	5	0	4	7
ring3	-2	6	10	5	5	4	8
ring4	-6	6	12	5	7	4	7
ring5	-3	8	8	7	1	6	11
ring6	14	14	3	14	-19	12	24

Πίνακας 4.11 Σύγκριση των παραμέτρων από τις δύο μεθοδολογίες σε mm.

Ο δεύτερος τρόπος σύγκρισης των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε γραφικά μέσω του λογισμικού πακέτου ψηφιακής σχεδίασης Autocad όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.23. Για την εν λόγω διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα των οριζόντιων τομών της δεξαμενής που προέκυψαν από την επιφάνεια της σάρωσης με τον VX και το λογισμικό Realworks.

Σε αυτά τα διαγράμματα έγινε ραπορτάρισμα των αντίστοιχων σημείων που μετρήθηκαν με το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 όπως και του κέντρου που υπολογίστηκε από την προσαρμογή. Έτσι μετρήθηκε ακτινικά η απόσταση των σημείων προς την τομή της επιφάνειας. Στα σημεία που βρισκόταν εκτός του κλειστού πολυγώνου

της επιφάνειας δόθηκε θετική τιμή στην ευκλείδεια απόσταση ενώ στα σημεία που εντοπίστηκαν εντός του πολυγώνου δόθηκε αρνητική τιμή.



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα της πρώτης οριζόντιας τομής (ring1).

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη συμβολή των εντολών trim, extend, break και dist ενώ τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν και επεξεργάστηκαν σε λογιστικό φύλλο του Excel.

Από τις διαφορές που προέκυψαν υπολογίστηκε η μέση τιμή της οριζόντιας μεταβολής \overline{dS} από τον τύπο που παρουσιάζεται στη σχέση (4.50).

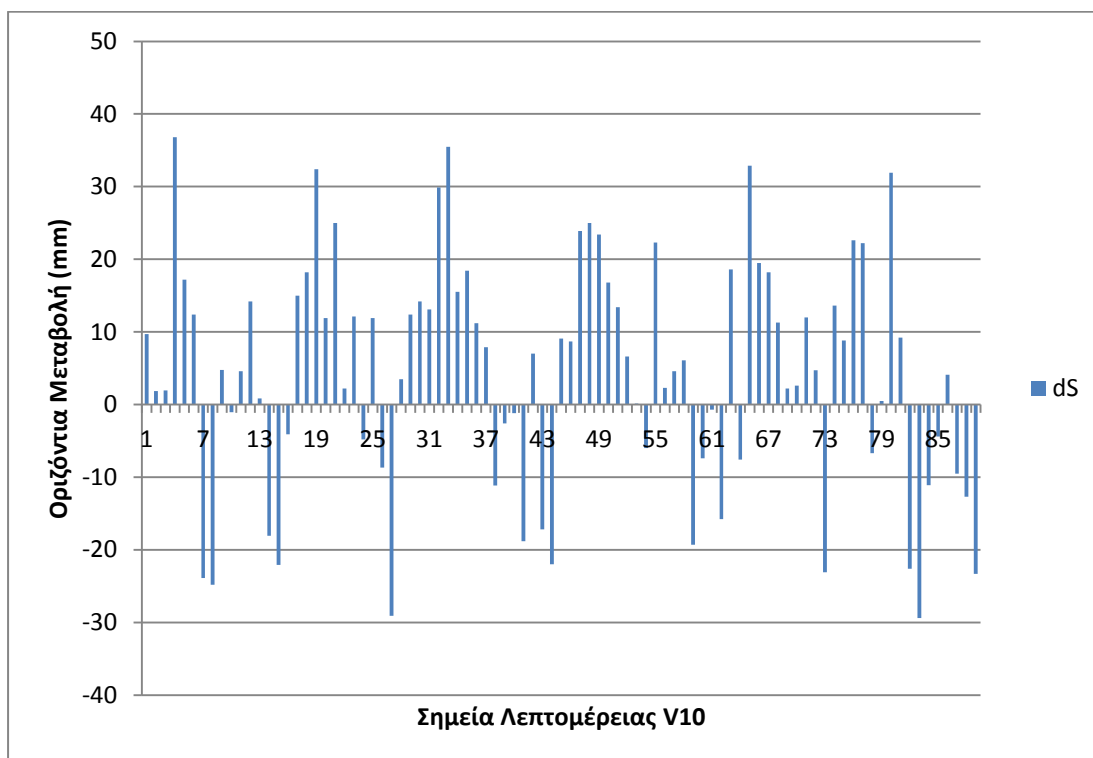
$$\overline{dS} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} |dS| \quad (4.50)$$

Όπως έχει προαναφερθεί οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων της σάρωσης υπολογίζονται με ακρίβεια της τάξης των $\pm 6\text{mm}$ για την κάθε διάσταση. Στον πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης τιμής της οριζόντιας μεταβολής για κάθε δακτύλιο που μετρήθηκε με το σύστημα V10 σε σχέση με τα δεδομένα της σάρωσης με τον VX σε mm.

ορ. τομή	dS
ring1	14mm
ring2	14mm
ring3	13mm
ring4	13mm
ring5	11mm
ring6	16mm

Πίνακας 4.12 Η μέση τιμή της οριζόντιας μεταβολής των σημείων λεπτομέρειας του συστήματος V10 σε mm ανά δακτύλιο.

Η μέση τιμή της οριζόντιας μεταβολής για τα 89 σημεία υπολογίστηκε στα $\overline{dS} = 14\text{mm}$. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την αρχική πρόβλεψη για την ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων του εικονοσυστήματος V10 ($\pm 10\text{-}20\text{mm}$). Στο ιστόγραμμα 4.16 παρουσιάζεται η οριζόντια μεταβολή για κάθε σημείο ξεχωριστά.



Διάγραμμα 4.16 Ιστόγραμμα οριζόντιας μεταβολής των 89 σημείων λεπτομέρειας του συστήματος V10 σε mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 τόσο σε μετρολογικό επίπεδο όσο και κατά τη χρήση του σε εξειδικευμένες εφαρμογές αποτυπώσεων.

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 είναι μία νέα πρωτοποριακή λύση για την οπτική και γεωμετρική τεκμηρίωση του αντικείμενου μελέτης από πανοραμικές εικόνες. Η ροή των εργασιών ξεκινάει με τη λήψη των πανοραμάτων από τα σημεία λήψης.

Τα σημεία λήψης είτε είναι γνωστών συντεταγμένων, οπότε το σύστημα λειτουργεί αυτόνομα (standalone), είτε υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο με επιβατηγό αισθητήρα θέσης που βρίσκεται σε σύζευξη με το σύστημα V10. Η δεύτερη διαδικασία αφορά είτε στην ενσωμάτωση δέκτη GNSS με τη λειτουργία δορυφορικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου VRS (virtual reference station), είτε σε πρίσμα 360° και στην παρακολούθηση του συστήματος από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό σε λειτουργία autolock.

Στις εφαρμογές που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε η αυτόνομη (standalone) λειτουργία του συστήματος. Αντίστοιχα ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης έγινε σε προηγούμενο χρόνο με χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού και τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων και τριών τριπόδων. Η μεθοδολογία αυτή είναι σχεδόν όμοια με την παρακολούθηση του V10 από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό ως προς την ακρίβεια των συντεταγμένων.

Η διαδικασία συνεχίζεται με την επίλυση του επίγειου τριγωνισμού των πανοραμάτων στο λογισμικό υποστήριξης TBC, με την επιλογή του επιθυμητού μαθηματικού μοντέλου όπως και της διαδικασία μέτρησης των σημείων σύνδεσης (αυτόματη ή χειροκίνητη). Ενώ ολοκληρώνεται με τη παρατήρηση των σημείων λεπτομέρειας μέσα στο μοντέλο.

Το μαθηματικό μοντέλο, για την επίλυση του τριγωνισμού στις αποτυπώσεις που πραγματοποιήθηκαν, αφορούσε στην επιλογή "Full Orientation" που ουσιαστικά εισάγει στη συνόρθωση τρεις αγνώστους ανά πανόραμα. Οι άγνωστοι αυτοί αναφέρονται στις τρεις στροφές του συστήματος στο χώρο σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Η έκδοση του TBC που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 3.22 (2014) με αποτέλεσμα να μην εξεταστούν μία πληθώρα εφαρμογών που σήμερα είναι διαθέσιμες στις μεταγενέστερες εκδόσεις 3.50 & 3.60 (2015) όπως η χρήση φωτοσταθερών σημείων πάνω στο αντικείμενο, η εισαγωγή δεσμεύσεων κατά τον τριγωνισμό, η λειτουργία πυκνής συνταύτισης σημείων, η εξαγωγή του μοντέλου για την τριδιάστατη σχεδίαση στο Sketch-up κ.α.

Ακόμη μία εφαρμογή που δεν ήταν διαθέσιμη κατά την εκτέλεση των εργασιών αλλά σε σχέση με το λογισμικό πεδίου Trimble Access ήταν η τεχνική δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους (HDR). Η συγκεκριμένη τεχνική ενδέχεται να βελτιώνει εξαιρετικά την ποιότητα των πανοραμάτων και ως εκ τούτου τα γεωμετρικά παράγωγα από τη χρήση του εικονοσυστήματος.

Από τη μελέτη και ανάλυση των δυνατοτήτων του εικονοσυστήματος V10 εξάγονται ορισμένα γενικότερα συμπεράσματα που αφορούν στη χρήση του εν γένει και πρόκειται για τα παρακάτω:

- Η χρήση του V10 εξαρτάται πλήρως από ένα αισθητήρα θέσης που σε μεγάλο βαθμό επηρεάζει την ακρίβεια των παραγώγων του, το γεγονός αυτό καταγράφεται ως μειονέκτημα.
- Η λειτουργικότητα του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (για παράδειγμα φωτεινότητα) και την ύπαρξη υφής στις επιφάνειες και τα αντικείμενα.
- Οι αλγόριθμοι ψηφιακής συνταύτισης του V10 δεν αποδίδουν σε πανοράματα που έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες με αποτέλεσμα να υπάρχουν έντονες ραδιομετρικές μεταβολές ανάμεσα στα ομόλογα αντικείμενα. Αντίστοιχα αστοχούν σε λείες και μονόχρωμες επιφάνειες.
- Με τη χρήση του V10 είναι εφικτό να κατασκευαστούν με ταχύτητα τριδιάστατα μοντέλα και διαγράμματα οριζόντιων και κατακόρυφων τομών με μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:50.

- Ενώ ο χρόνος των εργασιών πεδίου μειώνεται εξαιρετικά, αυξάνεται αρκετά ο αριθμός των στάσεων αναφοράς όπως και ο χρόνος εργασιών γραφείου, ειδικά όταν οι λεπτομέρειες του αντικειμένου είναι περισσότερες.
- Τόσο το λογισμικό υποστήριξης πεδίου όσο και το λογισμικό υποστήριξης γραφείου είναι φιλικά προς το χρήστη με αρκετές επιλογές και αυτοματισμούς.
- Η αντιμετώπιση γεωδαιτικών αποτυπώσεων με το εικονοσύστημα τριαδιάστατης απεικόνισης V10 απαιτεί εμπειρία και σε μεγάλο βαθμό επιστημονικό υπόβαθρο. Είναι δηλαδή δύσκολο να γίνει η χρήση του από βοηθητικό προσωπικό και να αποδώσει καλά αποτελέσματα.
- Τα γεωμετρικά δεδομένα που εξάγονται από το σύστημα επιτυγχάνουν σταθερότητα και επαναληπτικότητα ως προς την ακρίβεια και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.
- Η ακρίβεια και η ορθότητα των παραγώγων του συστήματος V10 επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:
 - Τη διαμόρφωση των στάσεων λήψης και το πλήθος τους και πιο συγκεκριμένα από το λόγο της βάσης λήψης προς την απόσταση του αντικειμένου ($0.5d \leq b \leq 2.5d$).
 - Την ακρίβεια της βαθμονόμησης των καμερών και των αισθητήρων του συστήματος του V10.
 - Την ακρίβεια μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης.
 - Τη διαθεσιμότητα, το πλήθος και την κατανομή φωτοσταθερών σημείων πάνω στο αντικείμενο και την ακρίβεια υπολογισμού των γεωδαιτικών τους συντεταγμένων.
 - Την ακρίβεια μέτρησης των αισθητήρων του V10.
 - Τον αριθμό, την κατανομή στο χώρο και το είδος των σημείων σύνδεσης (τεχνητοί στόχοι ή φυσικά αντικείμενα, αυτόματη διαδικασία μέτρησης ή χειροκίνητη).
 - Την ποιότητα επίλυσης του φωτοτριγωνισμού.
 - Την ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων μέσα στο μοντέλο, που επηρεάζεται από την εμπειρία του χρήστη, την ποιότητα των εικόνων και τη δομή του σημείου που σκοπεύετε.

- Την ποιότητα των εικόνων που εξαρτάται από την ευκρίνεια, το φωτισμό, τη φωτεινότητα, την αντίθεση, την ανάλυση και γενικότερα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Τέλος ενώ το V10 είναι ένα όργανο που τα πρωτογενή δεδομένα του είναι οι πανοραμικές εικόνες δεν προσφέρει τη δυνατότητα για την παραγωγή εικονιστικών προϊόντων όπως ορθοεικόνες, μωσαϊκά και αναπτύγματα επιφανειών. Δηλαδή λειτουργεί κυρίως ως ταχύμετρο που καταγράφει διευθύνσεις.
Η μόνη εξαίρεση εικονιστικού προϊόντος αποτελούν οι προβολικοί μετασχηματισμοί (ανηγμένες εικόνες) που υλοποιούνται στο Sketch-up pro για την εισαγωγή φωτορεαλιστικής υφής στα τριδιάστατα μοντέλα. Η εν λόγω λειτουργία δεν ήταν διαθέσιμη από την έκδοση του TBC που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση της διπλωματικής εργασίας.

Ειδικότερα τα συμπεράσματα που εξάγονται σε σχέση με τις αντίστοιχες εφαρμογές που επιχειρήθηκαν είναι τα παρακάτω:

Διακρίβωση των ψηφιακών καμερών του V10:

- Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού που προέκυψαν από τις επιλύσεις με το λογισμικό calibration_CCD παρουσίαζαν εξαιρετική σταθερότητα και επαναληπτικότητα τόσο στις διαφορετικές επιλύσεις όσο και μεταξύ διαφορετικών καμερών εκτός από τις παραμέτρους της ασύμμετρης παραμόρφωσης. Γεγονός που αποδεικνύει την υψηλή μετρητική ικανότητα του συστήματος.
- Με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί το μέτρο της σταθερότητας της εσωτερικής γεωμετρίας των μηχανών, το οποίο ο κατασκευαστής το προσδιορίζει στα 2 εικονοστοιχεία, όπως και η σύγκριση της συμπεριφοράς τους.
- Το μέγεθος του τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους προέκυψε ± 0.35 pixel όμως είναι λίγο μεγαλύτερο σε σχέση με τη διαδικασία που ακολουθείται κατά την κατασκευή ($\leq \pm 0.3$ pixel), η οποία όμως πραγματοποιείται για όλες τις κάμερες με πολλές εικόνες σε ενιαία συνόρθωση.

- Η διαδικασία που ακολουθήθηκε δεν ήταν πλήρης καθώς ο αλγόριθμος του προγράμματος δεν επιτρέπει την επίλυση εικόνων με μεγάλες γωνιακές κλίσεις του άξονα λήψης ούτε την ενιαία επίλυση πολλών εικόνων. Δηλαδή η σχετική θέση δύο καμερών δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί από αυτή τη διαδικασία όπως και ο ταυτόχρονος προσδιορισμός όλων των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού για όλες τις κάμερες.

Αποτύπωση όψης κτιρίου:

- Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας που επιτυγχάνεται στα διαγράμματα της όψης του κτιρίου Λαμπαδαρίου όταν επιτευχθεί μια αδύναμη επίλυση του δικτύου είναι της τάξης των $\pm 2\text{cm}$ και άρα μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:100 και όταν επιτυγχάνεται ισχυρή επίλυση του δικτύου είναι της τάξης του $\pm 1\text{cm}$ και μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:50.
- Η γεωμετρία του δικτύου δηλαδή οι θέσεις των στάσεων λήψης και των σημείων σύνδεσης των πανοραμάτων είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια της αποτύπωσης και των σημείων λεπτομέρειας παρά ο βαθμός ελευθερίας.
Η θέση αυτή είναι πάγια άποψη του κατασκευαστή και φαίνεται έντονα από τις διαφορές που προκύπτουν ανάμεσα στην αυτόματη και χειροκίνητη διαδικασία επίλυσης του τριγωνισμού.
- Επιπλέον η γραμμική δομή και επίλυση του δικτύου των στάσεων λήψης επηρεάζει εν γένει την ακρίβεια του σχεδίου και αποδεικνύεται από το διαχωρισμό του διαγράμματος σε κατακόρυφους τομείς όπου τα άκρα αποδυναμώνονται σε σχέση με το κέντρο ακολουθώντας τις επιλύσεις των πανοραμάτων των στάσεων λήψης.
- Εφόσον ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων έχει αβεβαιότητας $>\pm 5\text{mm}$ και η επίλυση του δικτύου είναι ισχυρή με τήρηση της αναλογίας βάσης λήψης προς την απόσταση αντικειμένου και οι εμπροσθοτομίες είναι εντός του βέλτιστου στατιστικά γεωμετρικού τύπου με καλή ποιότητα σκόπευσης τότε η απόσταση του αντικειμένου είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός και κρίσιμος δείκτης για την εκτίμηση της

ακρίβειας των σημείων λεπτομέρειας με μία αναλογία της τάξης των $\pm 10\text{mm}/10\text{m}$ απόσταση.

- Ακόμη επιβεβαιώνεται ότι η αβεβαιότητα προσδιορισμού των υψομέτρων είναι μικρότερη από αυτήν που επιτυγχάνεται οριζοντιογραφικά που είναι αναμενόμενο στην επίγεια φωτογραμμετρία αντίθετα από την εναέρια.
- Ο χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της αποτύπωσης με το σύστημα του V10 από ένα άτομο κυμαίνεται στις 2 ώρες για τις εργασίες πεδίου (κυρίως για τη διαμόρφωση και μέτρηση των στάσεων) και στις 7 ώρες για τις εργασίες γραφείου.
Αντίθετα για την κλασσική αντιμετώπιση της αποτύπωσης από ένα άτομο χρειάζονται 6 ώρες για τις εργασίες πεδίου και 3 ώρες για τις εργασίες γραφείου. Βέβαια το αποτέλεσμα της κλασσικής μεθόδου είναι κατά πολύ ανώτερο σε σχέση με την ακρίβεια (μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης 1:10).
- Η αυτόματη διαδικασία επίλυσης του τριγωνισμού στο TBC διήρκησε 30 λεπτά της ώρας για έξι στάσεις λήψης (τρία δίπολα). Η υπολογιστική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει 8Gb μνήμη ταχείας προσπέλασης και διπύρρηνο επεξεργαστή i7 στα 2Ghz.
- Τέλος τα πανοράματα που λήφθηκαν μετά την πύκνωση των στάσεων λήψης σε διαφορετική ημέρα και ώρα δεν επιλύθηκαν από την αυτόματη διαδικασία λόγω των ραδιομετρικών μεταβολών των εικόνων και την εναλλαγή των κινητών αντικειμένων (κυρίως των αυτοκινήτων).

Αποτύπωση μνημείου:

- Από τη σύγκριση ομόλογων σημείων με τις δύο διαδικασίες οι διαφορές που προέκυψαν είναι εντός του θορύβου των μετρήσεων, με τα σημεία που μετρήθηκαν με το σύστημα του V10 να έχουν αβεβαιότητα προσδιορισμού της τάξης του $\pm 1\text{cm}$ και καλύτερη. Έτσι η μέγιστη κλίμακα εκτύπωσης για τα γεωμετρικά παράγωγα του V10 καλύπτει τις απαιτήσεις της 1:50.
- Επιβεβαιώνεται ξανά ότι η υψομετρική ακρίβεια του V10 είναι καλύτερη από ότι η οριζοντιογραφική.
- Η διαδικασία του τριγωνισμού τόσο με την αυτόματη διαδικασία όσο και με τη χειροκίνητη κατάφερε να επιλύσει μόνο 2 από τα συνολικά 7 πανοράματα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι οι

αποκρύψεις, τα εμπόδια της βλάστησης και οι καιρικές συνθήκες παραμένουν ένα δύσκολο πρόβλημα αντιμετώπισης για εφαρμογές επίγειας φωτογραμμετρίας.

- Επιπλέον η σύνδεση του εσωτερικού χώρου με τον εξωτερικό χώρο δεν επετεύχθη εξαιτίας των έντονων αποκρύψεων παρά το γεγονός ότι τα πανοράματα εμπλουτίζουν και αυξάνουν την εικονιστική και γεωμετρική πληροφορία.

Αποτύπωση δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμων:

- Ο φωτοτριγωνισμός επιλύθηκε με εξαιρετικά αποτελέσματα συνδυάζοντας τόσο αυτόματα όσο και χειροκίνητα σημεία σύνδεσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις κατάλληλες θέσεις που επιλέχθηκαν για τις στάσεις λήψης και όχι στον μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Επίσης το γεγονός ότι υπήρχε υψομετρική διαφορά ανάμεσα στις στάσεις ενίσχυσε τη γεωμετρία του δικτύου.

- Η αυτόματη διαδικασία δεν κατάφερε να επιλύσει όλα τα πανοράματα επειδή πραγματοποιήθηκαν διαφορετική μέρα με άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες, που δημιούργησαν έντονες ραδιομετρικές μεταβολές, ανακλάσεις και σκιάσεις μεταξύ των διαφορετικών πανοραμάτων.

Η επίλυση του τριγωνισμού των 9 από τα 16 πανοράματα με την αυτόματη διαδικασία τριγωνισμού διήρκησε 50 λεπτά της ώρας.

- Η μέση τιμή της οριζοντιογραφικής διαφοράς των σημείων λεπτομέρειας του V10 σε σχέση με τα δεδομένα της σάρωσης από το VX υπολογίστηκε στα 14mm που είναι ανάλογη της μέσης απόστασης του αντικειμένου 15m.

Αντίστοιχα η μέση αβεβαιότητα των σημείων της σάρωσης με το χωροεικονογεωδαιτικό σταθμό VX προσδιορίστηκε στα $\pm 6\text{mm}$.

- Η ακτίνα της δεξαμενής με ονομαστική τιμή 11.5m υπολογίστηκε από την προσαρμογή κύκλου σε οριζόντιες τομές της δεξαμενής σε διαφορετικά ύψη με αβεβαιότητα $\pm 5\text{mm}$ από τα δεδομένα του V10 και $\pm 1\text{mm}$ από τα σημεία της σάρωσης του VX.

Τα αποτελέσματα του V10 είναι ικανοποιητικά για τον προσδιορισμό μόνιμων παραμορφώσεων του κελύφους της δεξαμενής αλλά όχι για την αναγωγή των διαστολών της υδροστατικής πίεσης κατά τη στιγμή της μέτρησης και άρα την υλοποίηση ογκομέτρησης. Αντίστοιχα οι αβεβαιότητες που

επιτεύχθηκαν από τη σάρωση του VX είναι σε θέση να ανιχνεύσουν και τις δύο παραμέτρους.

- Ένα κομμάτι του κελύφους της δεξαμενής δεν έδωσε καμία γεωμετρική πληροφορία από τη φωτογραμμετρική διαδικασία και αυτό οφείλεται στην έντονη ανάκλαση που δημιούργησε η ηλιοφάνεια σε συνδυασμό με το λευκό χρώμα.
- Ο χρόνος που χρειάστηκε για την αντιμετώπιση της αποτύπωσης με το V10 ήταν 3 ώρες για τις εργασίες πεδίου, όπου το 80% αναλώθηκε για τη διαμόρφωση, σήμανση και μέτρηση των στάσεων λήψης, και 10 ώρες για τις εργασίες γραφείου. Αντίστοιχα σε σχέση με το VX η κατανομή των εργασιών διαμορφώθηκε στις 6 ώρες για το πεδίο (με 4 σαρώσεις των 30 λεπτών) και άλλες 4 ώρες για τις εργασίες γραφείου.

5.2 Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας προκύπτουν αρκετά ενδιαφέροντα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης σε σχέση με τη χρήση και τις δυνατότητες του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10:

- Υπάρχει ένα μεγάλο επιστημονικό πεδίο ενδιαφέροντος που άπτεται στην τριδιάστατη βαθμονόμηση πανοραμικών συστημάτων και επίγειων σαρωτών, τόσο από την άποψη των μεθοδολογιών και δυναμικών αλγορίθμων όσο και από την υλοποίηση τριδιάστατων πεδίων ελέγχου είτε σε εργαστηριακό επίπεδο είτε σε εξωτερικούς χώρους, όπου καλύπτονται οι προδιαγραφές απόστασης και ύψους τοποθέτησης των στόχων σε όλο το εύρος του οπτικού τους πεδίου [Tommaselli et al, 2014].
- Η ανταπόκριση του συστήματος σε αποτυπώσεις μεγάλων εκτάσεων δύναται να μειώσει αρκετά το χρόνο εργασιών πεδίου. Δημιουργούνται όμως ζητήματα όπως για παράδειγμα στο πλήθος των πανοραμάτων που μπορούν να επιλυθούν ταυτόχρονα στη ίδια εργασία ή αν θα επιβάλλεται η κατάτμηση και ξεχωριστή τους αντιμετώπιση.
- Αντίστοιχα η σύνδεση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων κτιρίων παραμένει ένα σύνθετο πρόβλημα για να αντιμετωπιστεί ενιαία στο ίδιο μοντέλο.

- Ένα επιπλέον ενδιαφέρον ζήτημα είναι η συσχέτιση και σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων επίλυσης του επίγειου τριγωνισμού και των μεθόδων μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης.
- Ακόμη ενδιαφέρον είναι να εξεταστεί ο βαθμός που η τεχνική δημιουργίας εικόνων υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) συντελεί στο ξεπέρασμα ζητημάτων όπως είναι η αντιμετώπιση αυτόματων διαδικασιών ψηφιακής συνταύτισης από πανοράματα που δεν έχουν ληφθεί την ίδια ημέρα και ώρα.
- Τέλος η πρόσφατη εφαρμογή πυκνής συνταύτισης σημείων που προσφέρεται από τις τελευταίες εκδόσεις του TBC (3.50) σε σχέση με τα δεδομένα του εικονοσυστήματος V10 χρήζει επιστημονικού ελέγχου.

Ήδη ένα πείραμα που διεξήχθη από την ομάδα εργασίας Geotronics σε μια έκταση 17 στρεμμάτων στην περιοχή Zabonresky ανάμεσα σε τρεις διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής τριδιάστατου νέφους σημείων (μη επανδρωμένο αεροσκάφος, επίγειος σαρωτής επιφανειών και το εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10) έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα

[<https://trimbledimensions2014.smarteventscld.com/connect/search.wv?searchType=session&showAllResults=true#loadSearch-searchPhrase=geo+7716&searchType=session&tc=0&sortBy=&p=&i%2811964%29=>, 9/2015].

13. ISO 7507-5, Petroleum and liquid petroleum products - Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 5: External electro-optical distance-ranging method, 2010
14. ISO/TR 7507-6, Petroleum and liquid petroleum products - Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 6: Recommendations for monitoring, checking and verification of tank calibration and capacity table, 1997
15. Ιωαννίδης Χ., Αεροτριγωνισμός - Σημειώσεις περί Αεροτριγωνισμού, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ
16. Ιωαννίδης Χ., Διάλεξη 3D Scanners, προπτυχιακό μάθημα Αποτυπώσεις Μνημείων, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2014, (http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1046/document/%D0%E1%F1%EF%F5%F3%E9%DC%F3%E5%E9%F2_%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%F9%ED/3D_Scanners_2014.pdf)
17. Kraus, K., Φωτογραμμετρία Βασικές Έννοιες και Μέθοδοι, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 3 ed., Vol. 1, Α. Γεωργόπουλος & Ε. Βοζίκης Trans., Αθήνα 2010
18. Λαβασάς Ι., Ζέρβας Π., Νικολαΐδης Γ., Μπανιωτόπουλος Χ.Κ., Επισκευή Μεταλλικής Δεξαμενής Αργού Πετρελαίου Με Έντονες Παραμορφώσεις Λόγω Καθιζήσεων Του Εδάφους, ΤΠΜ, ΑΠΘ
19. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 978-960-456-205-3, Αθήνα 2010
20. Myron Z. Brown, Darius Burschka, Gregory D. Hager, 2003. Advances in Computational Stereo. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.25, No.8.
21. Μαλτέζος Ε., Εξαγωγή Πινάκων Ανομοιοτήτων Βάθους από Εναέριες Εικόνες μέσω Πυκνής Συνταύτισης Σημείων, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2013
22. Πανταζής Γ., Γεωμετρική Τεκμηρίωση Τεχνητών και Φυσικών Κατασκευών, Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2005
23. Πατιάς Π., Φωτογραμμετρία Και Τεκμηρίωση Αρχαιολογικών Χώρων Και Ευρημάτων Με Απλά Λόγια, Ανάσκαμμα (<http://www.scribd.com/doc/40883204>), 2008
24. Πέτσα Ε., Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας, Σπουδαστικές Σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας, Αθήνα 2000

25. Pantazis G., Lambrou E., Polydoros S., Gotsis V., 3D Digital Terrestrial Model Creation Using Image Assisted Total Station and Rapid Prototyping Technology, International Journal of Heritage in the Digital Era, vol. 2 ,number 2, 245-262, 2013
26. Σαμαρά Α., Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής, Διπλωματική Εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορικής», ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2004
27. Συμεωνίδης Π., Σαρωτές Laser. Τεχνολογία, Τεχνικές και Εφαρμογές, Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σερρών, Σέρρες 2007
28. Τοκμακίδης Κ., Σημειώσεις μαθήματος Αποτυπώσεις Μνημείων, ΤΑΤΜ, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2004
29. Tommaselli A.M.G., Marcato J. Moraes M.V.A., Silva S.L.A., Artero A.O., Calibration Of Panoramic Cameras With Coded Targets And A 3d Calibration Field, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W1, EuroCOW 2014, the European Calibration and Orientation Workshop, 12-14 February 2014, Castelldefels, Spain
30. Trimble Access General Survey Help, version 2015.10, revision A, April 2015 (www.trimble.com)
31. Trimble V10 Imaging Rover User Guide, revision A, Part Number 57047029, February 2014 (www.trimble.com)

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://sketchupdate.blogspot.gr/2014/11/using-trimble-vision-images-to-create.html>
2. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-231132/022543-123F_RealWorks_TN_0110_LR.pdf
3. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-347910/022543-260C_Spatial_Imaging_BRO_0909_sec.pdf
4. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-475908/022504-109B_PPP_TankSolutions_BRO_1009_LR.pdf
5. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-781681/022516-003D_TrimbleV10_DS_A4_0415_LR.pdf
6. http://www.informationforsurvey.com/tbc/TBC_News.htm?info4survey
7. <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>
8. <http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-12/>
9. <http://www.neigps.com/news/trimble-v10-tech-tips-part-22/>
10. <http://www.trimble.com>
11. http://www.trimble.com/oil-gas-chemical/pdf/3DLaserScanning_TankInspectionAndCalibration_Whitepaper_18953_Oct11_ENG_LR.pdf
12. <https://trimbledimensions2014.smarteventscloud.com>
13. <https://www.youtube.com/channel/UC-5aYOhsu9qQ36XWDesjniA>
14. <https://www.youtube.com/channel/UCeGqto4q8FkyOPjk8aShhQQ>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Matlab για την στροφή και το μετασχηματισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων του εξωτερικού πεδίου ελέγχου της ΣΑΤΜ:

```
clear all
clc
format long g
format compact

%Rotation to section plane
input=load('geo_out.txt');
[rows,cols]=size(input);

f=35.2; %grad
A=[20.0949,33.2526;];%point 1

x=zeros(rows,1);
y=zeros(rows,1);
xs=zeros(rows,1);
ys=zeros(rows,1);
zs=zeros(rows,1);

for i=1:rows

    x(i)=A(1)+[cos(f*pi/200)*(input(i,2)-A(1))]-
[sin(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    y(i)=A(2)+[sin(f*pi/200)*(input(i,2)-
A(1))]+[cos(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    xs(i)=x(i);
    ys(i)=input(i,4);
    zs(i)=-y(i);
End;
```

Κώδικας Matlab για την στροφή και το μετασχηματισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων του εσωτερικού πεδίου ελέγχου της ΣΑΤΜ:

```
clear all
clc
format long g
format compact

%Rotation to section plane
input=load('geo_in.txt');
[rows,cols]=size(input);

f=-11.021; %grad
A=[32.3838,21.0976;];%point 1

x=zeros(rows,1);
y=zeros(rows,1);
xs=zeros(rows,1);
ys=zeros(rows,1);
zs=zeros(rows,1);
```

```

for i=1:rows

    x(i)=A(1)+[cos(f*pi/200)*(input(i,2)-A(1))]-
[sin(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    y(i)=A(2)+[sin(f*pi/200)*(input(i,2)-
A(1))]+[cos(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    xs(i)=-y(i);
    ys(i)=input(i,4);
    zs(i)=-x(i);
End;

```

Κώδικας Matlab για την προσαρμογή ευθείας στα σημεία της όψης του Λαμπαδαρίου με τη γενική μέθοδο συνόρθωσης:

```

clear all
clc
format long g
format compact

%Optimal Straight
c=116;
m0=2;
r=c-m0;
n=232;
m=n-r;

%observations
x=[1001.727;1001.461;1001.465;997.8990;997.8870;1003.457;1003.459;100
3.453;1005.810;1005.811;1005.811;1005.759;1009.351;1009.380;1009.358;
1005.728;1005.758;1006.468;1006.505;1006.504;1007.526;1007.542;1006.4
68;1007.528;1010.424;1010.474;1010.447;1011.501;1011.463;1009.698;100
9.700;1013.303;1013.038;1013.295;1013.294;1013.298;1012.055;1012.054;
1012.744;1005.140;1007.840;1007.888;998.4780;997.5310;997.5180;997.51
20;993.9320;993.9120;993.6020;993.5660;993.5750;989.9920;989.9900;989
.9520;989.2980;989.3070;989.2810;986.0440;986.5380;986.0320;986.3740;
989.1630;986.0290;987.8410;988.9470;986.9630;990.1280;990.1280;990.49
40;990.1230;992.9810;992.7500;985.6860;985.6810;985.6730;985.7120;985
.6860;986.0500;989.2820;989.9940;993.9330;986.0330;989.4650;989.4410;
989.4660;993.5550;993.5580;993.5610;993.7910;991.3880;991.3030;985.67
60;1012.740;1011.474;1011.507;1011.475;1013.677;1013.680;1013.657;101
7.236;1017.233;1017.280;1017.198;1017.616;1017.619;1012.851;1015.435;
1015.380;1015.396;1014.374;1014.368;1014.369;1016.658;1016.662;1015.9
80;1015.986;];
y=[1008.068;1008.119;1008.138;1008.721;1008.710;1007.802;1007.804;100
7.804;1007.382;1007.407;1007.401;1007.412;1006.821;1006.808;1006.821;
1007.417;1007.423;1007.290;1007.298;1007.287;1007.120;1007.099;1007.2
88;1007.118;1006.631;1006.647;1006.634;1006.451;1006.462;1006.755;100
6.760;1006.173;1006.215;1006.168;1006.167;1006.158;1006.371;1006.374;
1006.262;1007.480;1007.029;1007.069;1008.630;1008.775;1008.791;1008.7
87;1009.372;1009.371;1009.428;1009.451;1009.436;1010.037;1010.030;101
0.035;1010.151;1010.143;1010.164;1010.692;1010.602;1010.688;1010.656;
1010.200;1010.686;1010.351;1010.144;1010.478;1010.002;1009.996;1009.9
05;1009.972;1009.536;1009.587;1010.751;1010.753;1010.724;1010.694;101
0.700;1010.692;1010.157;1010.035;1009.380;1010.692;1010.124;1010.088;
1010.120;1009.428;1009.426;1009.429;1009.293;1009.732;1009.728;1010.7
45;1006.260;1006.465;1006.456;1006.470;1006.108;1006.104;1006.098;100
5.514;1005.512;1005.501;1005.520;1005.448;1005.450;1006.247;1005.808;

```

```

1005.839;1005.811;1005.985;1005.987;1005.984;1005.615;1005.607;1005.7
18;1005.712;];
l=zeros(232,1);
for i=2:2:232
    l(i-1)=x(i/2);
    l(i)=y(i/2);
end

X0=[-0.1654529;1173.81695]; %temporary values

%Formatting Tables
%linearized equation: x*da+db+a0*x+b0-y=0

%design table of parameters
A=zeros(116,2);
for i=1:116
    A(i,1)=x(i);
    A(i,2)=1;
end

%factor table of measured data
B=zeros(116,232);
for i=2:2:232
    B(i/2,i-1)=X0(1);
    B(i/2,i)=-1;
end

%closure errors vector
w=zeros(116,1);
for i=1:116
    w(i)=y(i)-(X0(1)*x(i)+X0(2));
end; %alternative w=-(B*l+X0(2))

%System Solution

%auxiliary tables
Pa=inv(B*B');
Na=A'*Pa*A;

dX=Na\A'*Pa*w;
X=X0+dX;

u=B'*Pa*(w-A*dX); %residuals
s0=sqrt(u'*u/r);

Vx=s0^2*inv(Na);

sa=sqrt(Vx(1,1));
sb=sqrt(Vx(2,2));

fprintf('\nΟι τελικές τιμές των παραμέτρων με τα τυπικά είναι
σφάλματα είναι:\n')
fprintf('\nα=%1.10f +- %1.10f rad',X(1),sa)
fprintf('\nβ=%1.3f +- %1.3f m',X(2),sb)

%reverse angle
f=atan(X(1))*200/pi;
sf=sqrt(1/(1+X(1)^2))*(sa)*200/pi;

```



```
fprintf('\n\nΗ γωνία στροφής με το τυπικό της σφάλμα είναι:\n')
fprintf('\nφ=%1.4f +- %1.4f grad\n',f,sf)
```

Κώδικας Matlab για τη στροφή και το μετασχηματισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας στο επίπεδο της όψης του Λαμπαδαρίου:

```
clear all
clc
format long g
format compact

%Rotation to section plane
input=load('view_points.txt');
[rows,cols]=size(input);

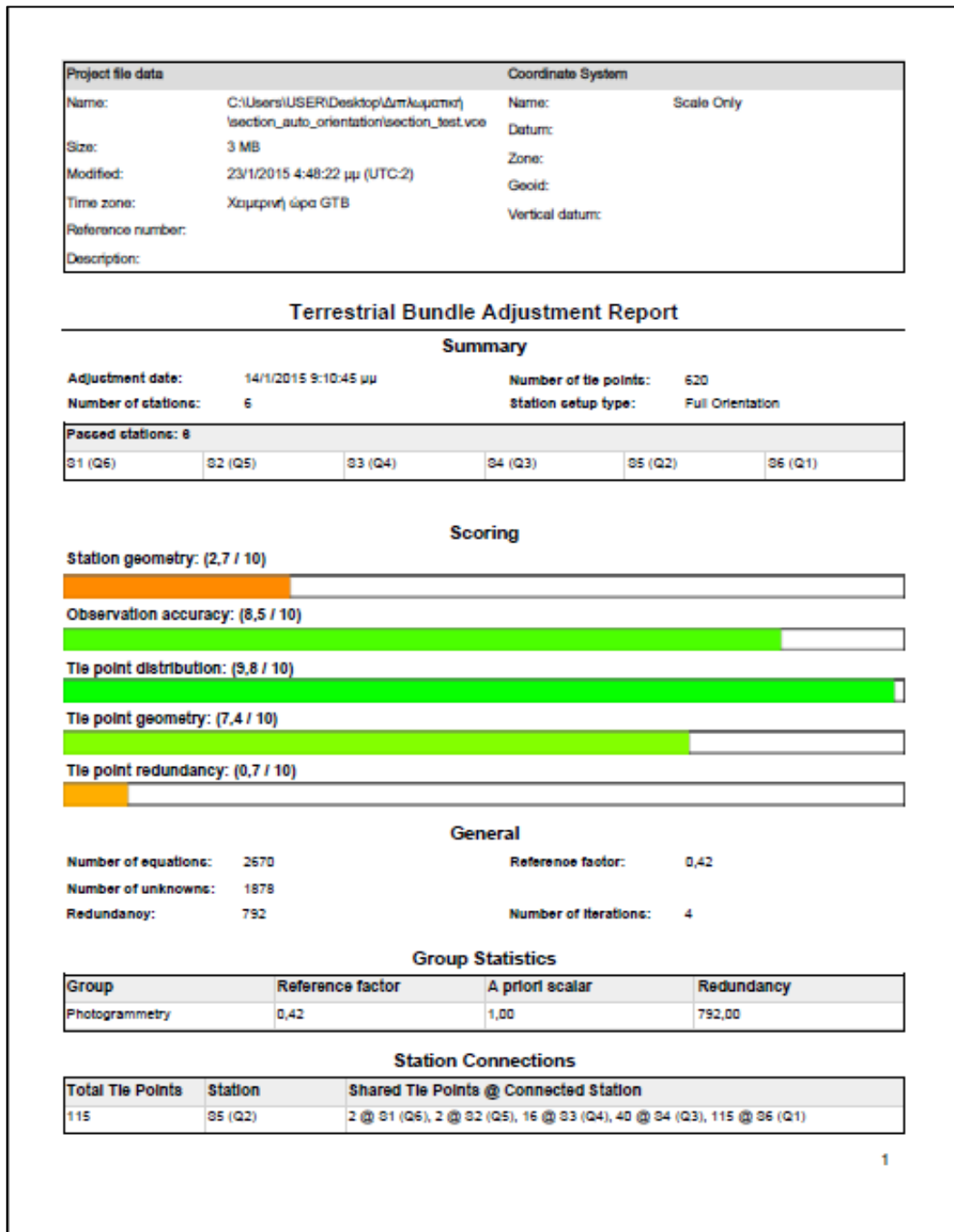
f=10.4385; %grad
A=[985.676,1010.745;];

x=zeros(rows,1);
y=zeros(rows,1);
xs=zeros(rows,1);
ys=zeros(rows,1);
zs=zeros(rows,1);

for i=1:rows

    x(i)=A(1)+[cos(f*pi/200)*(input(i,2)-A(1))]-
[sin(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    y(i)=A(2)+[sin(f*pi/200)*(input(i,2)-
A(1))]+[cos(f*pi/200)*(input(i,3)-A(2))];
    xs(i)=x(i);
    ys(i)=input(i,4);
    zs(i)=y(i);
End;
```

Αναφορά του TBC σε σχέση με την επίλυση της αυτόματης διαδικασίας τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου:



115	S6 (Q1)	1 @ S1 (Q6), 2 @ S2 (Q5), 35 @ S3 (Q4), 38 @ S4 (Q3), 115 @ S5 (Q2)
122	S2 (Q5)	2 @ S6 (Q1), 2 @ S5 (Q2), 97 @ S4 (Q3), 101 @ S3 (Q4), 122 @ S1 (Q6)
122	S1 (Q6)	1 @ S6 (Q1), 2 @ S5 (Q2), 66 @ S4 (Q3), 94 @ S3 (Q4), 122 @ S2 (Q5)
167	S4 (Q3)	38 @ S6 (Q1), 40 @ S5 (Q2), 66 @ S1 (Q6), 97 @ S2 (Q5), 167 @ S3 (Q4)
167	S3 (Q4)	16 @ S5 (Q2), 35 @ S6 (Q1), 94 @ S1 (Q6), 101 @ S2 (Q5), 167 @ S4 (Q3)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
S1 (Q6)	1,87 / 10	10,00 / 10	123,8
S2 (Q5)	1,74 / 10	10,00 / 10	135,7
S3 (Q4)	4,29 / 10	9,75 / 10	182,6
S4 (Q3)	5,12 / 10	9,53 / 10	180,2
S5 (Q2)	1,55 / 10	10,00 / 10	81,7
S6 (Q1)	1,65 / 10	10,00 / 10	88,1

Station Status

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
S1 (Q6)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S2 (Q5)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S3 (Q4)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S4 (Q3)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S5 (Q2)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S6 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled

Tie Point Statistics

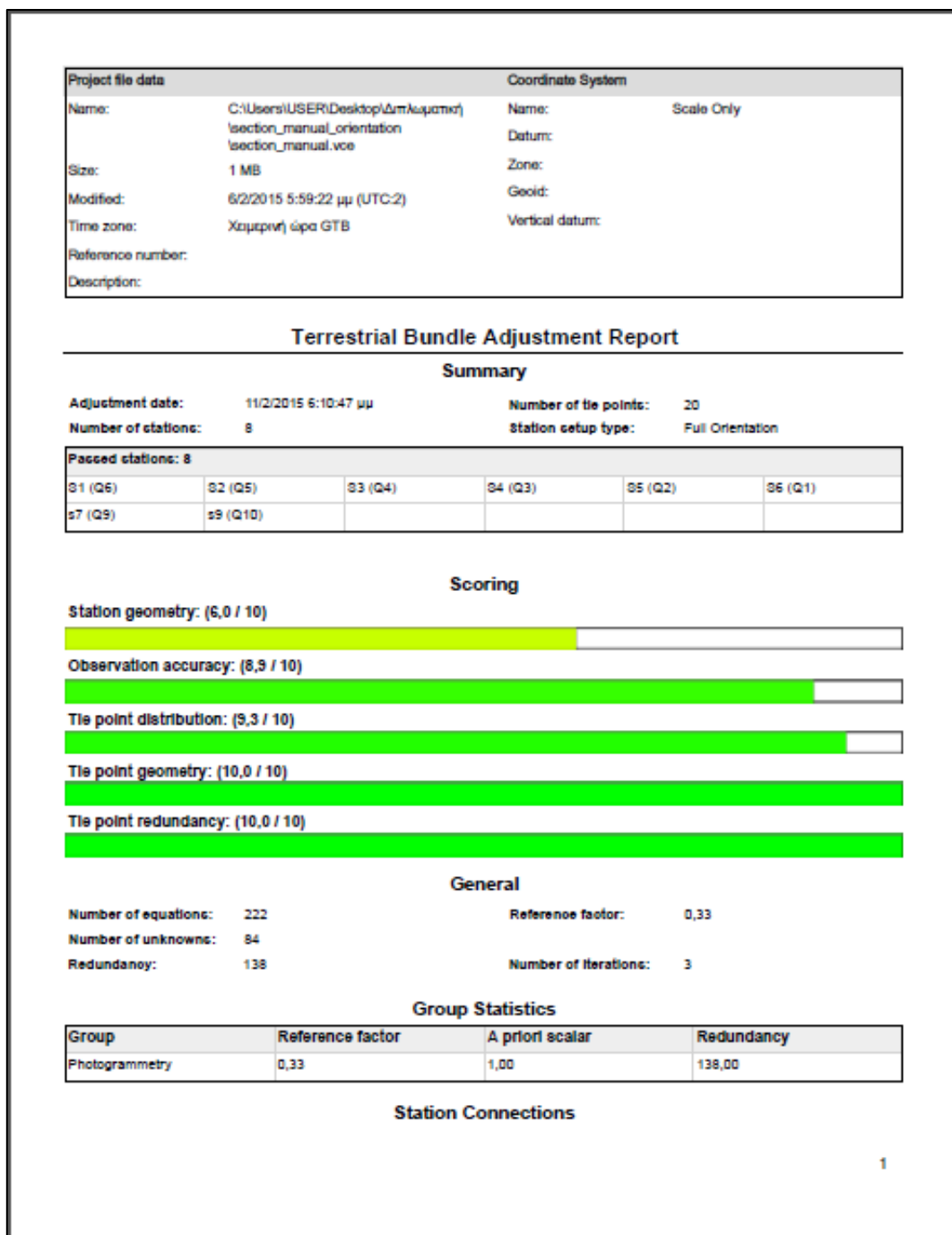
Observations per point: 2,15 Disabled manual observations: 0

Tie Point Back Projections

Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,37	
Standard deviation (constrained)	0,70	0,002 m
Maximum deviation (constrained)	6,90	0,023 m

30/1/2015 3:39:07 μμ	C:\Users\USER\Desktop\Διαλωματική \section_auto_orientation\section_test.vce	Trimble Business Center
----------------------	---	-------------------------

Αναφορά του TBC σε σχέση με την επίλυση της χειροκίνητης διαδικασίας τριγωνισμού για την αποτύπωση της όψης του Λαμπαδαρίου:



Total Tie Points	Station	Shared Tie Points @ Connected Station
10	S5 (Q2)	4 @ S1 (Q5), 4 @ S2 (Q5), 7 @ S7 (Q9), 8 @ S3 (Q4), 9 @ S9 (Q10), 10 @ S6 (Q1), 10 @ S4 (Q3)
10	S6 (Q1)	4 @ S1 (Q5), 4 @ S2 (Q5), 7 @ S7 (Q9), 8 @ S3 (Q4), 9 @ S9 (Q10), 10 @ S5 (Q2), 10 @ S4 (Q3)
11	S1 (Q6)	4 @ S6 (Q1), 4 @ S5 (Q2), 9 @ S7 (Q9), 9 @ S9 (Q10), 11 @ S2 (Q5), 11 @ S3 (Q4), 11 @ S4 (Q3)
12	S2 (Q5)	4 @ S6 (Q1), 4 @ S5 (Q2), 9 @ S9 (Q10), 10 @ S7 (Q9), 11 @ S1 (Q6), 12 @ S3 (Q4), 12 @ S4 (Q3)
15	S7 (Q9)	7 @ S6 (Q1), 7 @ S5 (Q2), 9 @ S1 (Q6), 10 @ S2 (Q5), 11 @ S9 (Q10), 15 @ S3 (Q4), 15 @ S4 (Q3)
16	S9 (Q10)	9 @ S6 (Q1), 9 @ S5 (Q2), 9 @ S1 (Q6), 9 @ S2 (Q5), 11 @ S7 (Q9), 14 @ S3 (Q4), 16 @ S4 (Q3)
18	S4 (Q3)	10 @ S6 (Q1), 10 @ S5 (Q2), 11 @ S1 (Q6), 12 @ S2 (Q5), 15 @ S7 (Q9), 16 @ S9 (Q10), 18 @ S3 (Q4)
18	S3 (Q4)	8 @ S6 (Q1), 8 @ S5 (Q2), 11 @ S1 (Q6), 12 @ S2 (Q5), 14 @ S9 (Q10), 15 @ S7 (Q9), 18 @ S4 (Q3)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
S1 (Q6)	5,58 / 10	10,00 / 10	13,2
S2 (Q5)	5,75 / 10	10,00 / 10	14,6
S3 (Q4)	6,04 / 10	10,00 / 10	24,0
S4 (Q3)	6,05 / 10	10,00 / 10	26,3
S5 (Q2)	4,22 / 10	7,51 / 10	11,5
S6 (Q1)	4,26 / 10	8,03 / 10	11,1
S7 (Q9)	8,78 / 10	10,00 / 10	19,2
S9 (Q10)	8,07 / 10	9,06 / 10	18,1

Station Status

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
S1 (Q6)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S2 (Q5)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S3 (Q4)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S4 (Q3)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S5 (Q2)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S6 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S7 (Q9)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
S9 (Q10)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled

Tie Point Statistics

Observations per point: 5,55 Disabled manual observations: 1

Tie Point Back Projections

Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,24	
Standard deviation (constrained)	0,59	0,002 m
Maximum deviation (constrained)	2,64	0,009 m

Tie Point Relative Precision Estimates (95%)

Point	Easting	Northing	Elevation	Strength of figure	Redundancy	Minimum redundancy
mpt7	0,003 m	0,003 m	0,002 m	1,73	2,78	0,00
mtp1	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,46	7,19	0,21
mtp2	0,003 m	0,002 m	0,001 m	1,88	10,01	0,37
mtp3	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,67	8,20	0,54
mtp4	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,23	8,08	0,47
mtp5	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,60	8,13	0,54
mtp6	0,001 m	0,001 m	0,002 m	0,55	6,40	0,46
mtp9	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,63	8,06	0,53
mtp13	0,003 m	0,002 m	0,002 m	1,09	5,84	0,37
mtp14	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,22	4,43	0,41
mtp15	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,20	4,57	0,28
mtp18	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,33	7,22	0,44
mtp19	0,001 m	0,002 m	0,002 m	0,15	4,66	0,27
mtp20	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,63	6,40	0,53
mtp21	0,003 m	0,002 m	0,002 m	1,52	9,93	0,38
mtp24	0,001 m	0,001 m	0,002 m	0,60	6,41	0,47
mtp25	0,003 m	0,001 m	0,001 m	2,05	9,66	0,56
mtp26	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,70	8,20	0,53
mtp27	0,001 m	0,001 m	0,001 m	0,60	8,10	0,54
mtp28	0,003 m	0,004 m	0,003 m	1,34	3,70	0,36

11/2/2015 6:14:36 μμ	C:\Users\USER\Desktop\Απλωση\section_manual_orientation\section_manual.vce	Trimble Business Center
----------------------	--	-------------------------

Αναφορά του TBC σε σχέση με την επίλυση του τριγωνισμού για την αποτύπωση του ναού Ηφαιστού:

Project file data		Coordinate System	
Name:	C:\Users\USER\Desktop\Διπλωματική\Ηφαιστος\hfaistos.vce	Name:	Scale Only
Size:	1 MB	Datum:	
Modified:	3/5/2015 10:37:03 μμ (UTC-3)	Zone:	
Time zone:	Χαμηρή ώρα GTB	Geoid:	
Reference number:		Vertical datum:	
Description:			

Terrestrial Bundle Adjustment Report

Summary

Adjustment date:	26/3/2015 3:07:41 μμ	Number of tie points:	71
Number of stations:	8	Station setup type:	Full Orientation

Passed stations: 2					
right (Q7)	s1 (Q1)				

Failed stations: 8					
left (Q6)	s2 (Q2)	s5 (Q5)	s12 (Q4)	s13 (Q3)	s15 (Q8)

Scoring

Station geometry: (0,0 / 10)

Observation accuracy: (10,0 / 10)

Tie point distribution: (9,5 / 10)

Tie point geometry: (8,5 / 10)

Tie point redundancy: (0,0 / 10)

General

Number of equations:	290	Reference factor:	0,35
Number of unknowns:	219	Number of iterations:	3
Redundancy:	71		

Group Statistics

Group	Reference factor	A priori scalar	Redundancy
Photogrammetry	0,31	1,00	66,00
Orientation	0,75	1,00	5,00

1

Station Connections

Total Tie Points	Station	Shared Tie Points @ Connected Station
0	s15 (Q8)	
0	s5 (Q5)	
0	s12 (Q4)	
0	s13 (Q3)	
0	s2 (Q2)	
3	left (Q6)	3 @ right (Q7), 3 @ s1 (Q1)
71	s1 (Q1)	3 @ left (Q6), 71 @ right (Q7)
71	right (Q7)	3 @ left (Q6), 71 @ s1 (Q1)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
right (Q7)	0,00 / 10	9,13 / 10	36,4
s1 (Q1)	0,00 / 10	10,00 / 10	34,6

Station Status

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
left (Q6)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
right (Q7)	Full Orientation	Passed	Enabled	Enabled
s1 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Enabled
s2 (Q2)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s5 (Q5)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s12 (Q4)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s13 (Q3)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s15 (Q8)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled

Tie Point Statistics

Observations per point: 2,00 Disabled manual observations: 15

Tie Point Back Projections

Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,24	
Standard deviation (constrained)	0,29	0,001 m
Maximum deviation (constrained)	1,71	0,006 m

Tie Point Relative Precision Estimates (95%)

2

2 από 3

Point	Easting	Northing	Elevation	Strength of figure	Redundancy	Minimum redundancy
mtp4	0,001 m	0,000 m	0,004 m	3,86	0,91	0,00
mtp5	0,002 m	0,002 m	0,007 m	2,54	0,97	0,00
mtp16	0,002 m	0,003 m	0,008 m	1,57	0,96	0,01

24/8/2015 3:57:00 μμ	C:\Users\USER\Desktop\Διπλωματική\Ηφαίστος\Infalstos.vce	Trimble Business Center
----------------------	--	-------------------------

3 από 3

Κώδικας Matlab για τη στροφή και το μετασχηματισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λεπτομέρειας στο επίπεδο της ανατολικής όψης του ναού του Ηφαίστου:

```
clear all
clc
format long g
format compact

%Rotation to section plane
input=load('photo_points.txt');
[rows,cols]=size(input);

f=14.3418-100; %grad

x=zeros(rows,1);
y=zeros(rows,1);
xs=zeros(rows,1);
ys=zeros(rows,1);
zs=zeros(rows,1);

for i=1:rows

    x(i)=cos(f*pi/200)*input(i,2)-sin(f*pi/200)*input(i,3);
    y(i)=sin(f*pi/200)*input(i,2)+cos(f*pi/200)*input(i,3);
    xs(i)=x(i);
    ys(i)=input(i,4);
    zs(i)=-y(i);
end;
```

Αναφορά του TBC σε σχέση με την επίλυση του αυτόματου τριγωνισμού για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736:

Project file data		Coordinate System	
Name:	C:\Users\USER\Desktop\tanker_volume\tank_auto\tank_auto.vce	Name:	Scale Only
Size:	6 MB	Datum:	
Modified:	31/3/2015 3:14:27 μμ (UTC:3)	Zone:	
Time zone:	Χαμηρή ώρα GTB	Geoid:	
Reference number:		Vertical datum:	
Description:			

Terrestrial Bundle Adjustment Report


Summary


Adjustment date: 31/3/2015 2:55:01 μμ **Number of tie points:** 1178
Number of stations: 16 **Station setup type:** Full Orientation


Passed stations: 8					
s1 (Q11)	s2 (Q10)	s3 (Q9)	s4 (Q8)	s8 (Q12)	s9 (Q4)
s10 (Q3)	s11 (Q2)	s12 (Q1)			


Failed stations: 7					
s5 (Q15)	s6 (Q16)	s7 (Q7)	s13 (Q14)	s14 (Q13)	s15 (Q6)
s16 (Q5)					


Scoring

Station geometry: (9,6 / 10)


Observation accuracy: (9,3 / 10)


Tie point distribution: (10,0 / 10)


Tie point geometry: (5,0 / 10)


Tie point redundancy: (1,3 / 10)


General

Number of equations:	5346	Reference factor:	0,56
Number of unknowns:	3561	Number of iterations:	3
Redundancy:	1785		

Group Statistics

1

Group	Reference factor	A priori scalar	Redundancy
Photogrammetry	0,56	1,00	1785,00

Station Connections

Total Tie Points	Station	Shared Tie Points @ Connected Station
0	s5 (Q16)	
0	s5 (Q15)	
0	s13 (Q14)	
0	s14 (Q13)	
0	s7 (Q7)	
0	s15 (Q6)	
0	s16 (Q5)	
69	s8 (Q12)	6 @ s11 (Q2), 12 @ s2 (Q10), 38 @ s10 (Q3), 45 @ s9 (Q4), 69 @ s1 (Q11)
99	s4 (Q8)	1 @ s1 (Q11), 5 @ s9 (Q4), 8 @ s10 (Q3), 15 @ s2 (Q10), 22 @ s11 (Q2), 62 @ s12 (Q1), 99 @ s3 (Q9)
105	s12 (Q1)	7 @ s1 (Q11), 16 @ s9 (Q4), 62 @ s4 (Q8), 68 @ s10 (Q3), 84 @ s2 (Q10), 103 @ s11 (Q2), 105 @ s3 (Q9)
110	s3 (Q9)	6 @ s1 (Q11), 10 @ s9 (Q4), 18 @ s10 (Q3), 99 @ s4 (Q8), 99 @ s11 (Q2), 105 @ s12 (Q1), 110 @ s2 (Q10)
117	s11 (Q2)	6 @ s8 (Q12), 17 @ s1 (Q11), 22 @ s4 (Q8), 79 @ s9 (Q4), 99 @ s3 (Q9), 103 @ s12 (Q1), 108 @ s10 (Q3), 117 @ s2 (Q10)
120	s2 (Q10)	12 @ s8 (Q12), 15 @ s4 (Q8), 84 @ s12 (Q1), 93 @ s9 (Q4), 110 @ s3 (Q9), 110 @ s10 (Q3), 117 @ s11 (Q2), 120 @ s1 (Q11)
122	s1 (Q11)	1 @ s4 (Q8), 6 @ s3 (Q9), 7 @ s12 (Q1), 17 @ s11 (Q2), 69 @ s8 (Q12), 109 @ s10 (Q3), 120 @ s2 (Q10), 122 @ s9 (Q4)
138	s10 (Q3)	8 @ s4 (Q8), 18 @ s3 (Q9), 38 @ s8 (Q12), 68 @ s12 (Q1), 108 @ s11 (Q2), 109 @ s1 (Q11), 110 @ s2 (Q10), 138 @ s9 (Q4)
138	s9 (Q4)	5 @ s4 (Q8), 10 @ s3 (Q9), 16 @ s12 (Q1), 45 @ s8 (Q12), 79 @ s11 (Q2), 93 @ s2 (Q10), 122 @ s1 (Q11), 138 @ s10 (Q3)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
s1 (Q11)	9,89 / 10	10,00 / 10	211,3
s2 (Q10)	10,00 / 10	10,00 / 10	284,3
s3 (Q9)	10,00 / 10	10,00 / 10	196,6
s4 (Q8)	8,46 / 10	10,00 / 10	84,8
s8 (Q12)	8,30 / 10	10,00 / 10	71,2
s9 (Q4)	10,00 / 10	10,00 / 10	230,8
s10 (Q3)	10,00 / 10	10,00 / 10	278,6
s11 (Q2)	10,00 / 10	10,00 / 10	236,2
s12 (Q1)	10,00 / 10	10,00 / 10	191,3

Station Status

2

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
s1 (Q11)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s2 (Q10)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s3 (Q9)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s4 (Q8)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s5 (Q15)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s6 (Q16)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s7 (Q7)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s8 (Q12)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s9 (Q4)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s10 (Q3)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s11 (Q2)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s12 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
s13 (Q14)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s14 (Q13)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s15 (Q6)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled
s16 (Q5)	Full Orientation	Failed	Disabled	Disabled

Tie Point Statistics

Observations per point: 2,27

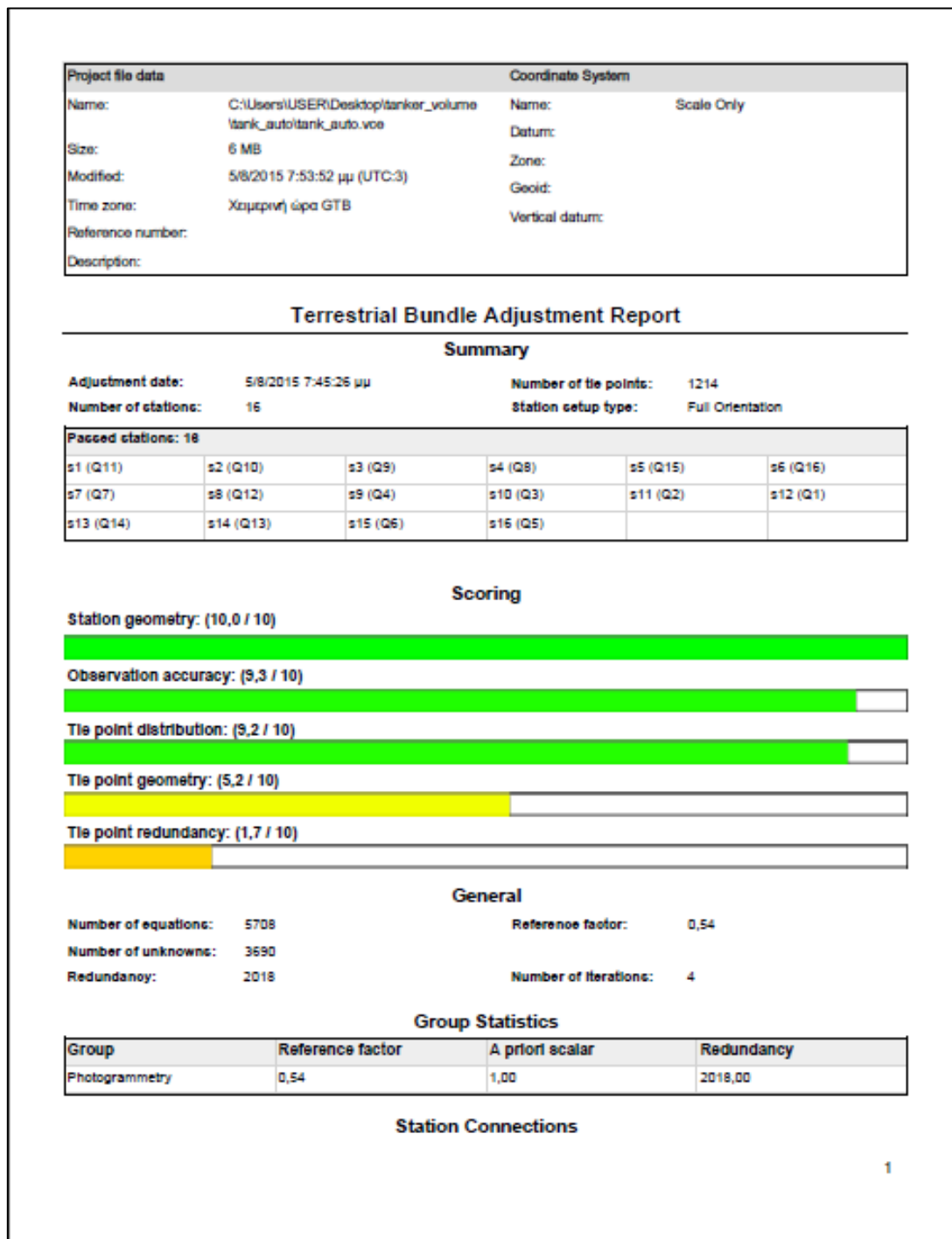
Disabled manual observations: 0

Tie Point Back Projections

Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,38	
Standard deviation (constrained)	0,48	0,002 m
Maximum deviation (constrained)	5,58	0,020 m

31/3/2015 3:14:54 μμ	C:\Users\USER\Desktop\tanker_volume tank_auto\tank_auto.vce	Trimble Business Center
----------------------	--	-------------------------

Αναφορά του TBC σε σχέση με την τελική επίλυση του επίγειου τριγωνισμού για την αποτύπωση της δεξαμενής P-8736:



Total Tie Points	Station	Shared Tie Points @ Connected Station
11	s15 (Q6)	1 @ s3 (Q9), 1 @ s12 (Q1), 1 @ s11 (Q2), 2 @ s4 (Q8), 2 @ s2 (Q10), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s1 (Q11), 3 @ s10 (Q3), 6 @ s8 (Q12), 9 @ s5 (Q15), 10 @ s14 (Q13), 10 @ s13 (Q14), 10 @ s7 (Q7), 11 @ s16 (Q5), 11 @ s6 (Q16)
13	s16 (Q5)	1 @ s11 (Q2), 2 @ s3 (Q9), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s12 (Q1), 3 @ s2 (Q10), 3 @ s10 (Q3), 4 @ s1 (Q11), 5 @ s4 (Q8), 8 @ s8 (Q12), 11 @ s15 (Q6), 11 @ s5 (Q15), 12 @ s14 (Q13), 12 @ s13 (Q14), 12 @ s7 (Q7), 13 @ s6 (Q16)
15	s13 (Q14)	1 @ s11 (Q2), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s12 (Q1), 3 @ s2 (Q10), 3 @ s10 (Q3), 4 @ s1 (Q11), 5 @ s4 (Q8), 7 @ s8 (Q12), 10 @ s15 (Q6), 11 @ s7 (Q7), 12 @ s16 (Q5), 14 @ s5 (Q15), 14 @ s6 (Q16), 15 @ s14 (Q13)
15	s14 (Q13)	1 @ s11 (Q2), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s12 (Q1), 3 @ s2 (Q10), 3 @ s10 (Q3), 4 @ s4 (Q8), 4 @ s1 (Q11), 7 @ s8 (Q12), 10 @ s15 (Q6), 11 @ s7 (Q7), 12 @ s16 (Q5), 13 @ s5 (Q15), 14 @ s6 (Q16), 15 @ s13 (Q14)
17	s7 (Q7)	1 @ s11 (Q2), 2 @ s3 (Q9), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s12 (Q1), 3 @ s10 (Q3), 4 @ s2 (Q10), 5 @ s1 (Q11), 6 @ s4 (Q8), 10 @ s15 (Q6), 11 @ s14 (Q13), 11 @ s13 (Q14), 12 @ s16 (Q5), 13 @ s5 (Q15), 13 @ s8 (Q12), 17 @ s6 (Q16)
22	s6 (Q16)	1 @ s11 (Q2), 2 @ s9 (Q4), 3 @ s12 (Q1), 3 @ s10 (Q3), 5 @ s3 (Q9), 6 @ s2 (Q10), 6 @ s1 (Q11), 11 @ s15 (Q6), 11 @ s8 (Q12), 11 @ s4 (Q8), 13 @ s16 (Q5), 14 @ s14 (Q13), 14 @ s13 (Q14), 17 @ s7 (Q7), 22 @ s5 (Q15)
22	s5 (Q15)	1 @ s9 (Q4), 2 @ s12 (Q1), 2 @ s10 (Q3), 4 @ s3 (Q9), 4 @ s2 (Q10), 4 @ s1 (Q11), 7 @ s8 (Q12), 9 @ s15 (Q6), 11 @ s16 (Q5), 12 @ s4 (Q8), 13 @ s14 (Q13), 13 @ s7 (Q7), 14 @ s13 (Q14), 22 @ s6 (Q16)
76	s8 (Q12)	3 @ s3 (Q9), 3 @ s12 (Q1), 6 @ s15 (Q6), 6 @ s4 (Q8), 6 @ s11 (Q2), 7 @ s14 (Q13), 7 @ s13 (Q14), 7 @ s5 (Q15), 8 @ s16 (Q5), 11 @ s6 (Q16), 13 @ s7 (Q7), 15 @ s2 (Q10), 41 @ s10 (Q3), 46 @ s9 (Q4), 76 @ s1 (Q11)
101	s12 (Q1)	1 @ s15 (Q6), 2 @ s5 (Q15), 3 @ s16 (Q5), 3 @ s14 (Q13), 3 @ s13 (Q14), 3 @ s7 (Q7), 3 @ s6 (Q16), 3 @ s8 (Q12), 9 @ s1 (Q11), 16 @ s9 (Q4), 62 @ s4 (Q8), 69 @ s10 (Q3), 84 @ s2 (Q10), 99 @ s3 (Q9), 101 @ s11 (Q2)
105	s4 (Q8)	2 @ s15 (Q6), 4 @ s14 (Q13), 5 @ s16 (Q5), 5 @ s13 (Q14), 5 @ s1 (Q11), 5 @ s9 (Q4), 6 @ s7 (Q7), 6 @ s8 (Q12), 6 @ s10 (Q3), 11 @ s6 (Q16), 12 @ s5 (Q15), 19 @ s11 (Q2), 19 @ s2 (Q10), 62 @ s12 (Q1), 105 @ s3 (Q9)
112	s11 (Q2)	1 @ s15 (Q6), 1 @ s16 (Q5), 1 @ s14 (Q13), 1 @ s13 (Q14), 1 @ s7 (Q7), 1 @ s6 (Q16), 6 @ s8 (Q12), 18 @ s1 (Q11), 19 @ s4 (Q8), 78 @ s9 (Q4), 96 @ s3 (Q9), 101 @ s12 (Q1), 106 @ s10 (Q3), 112 @ s2 (Q10)
113	s3 (Q9)	1 @ s15 (Q6), 2 @ s16 (Q5), 2 @ s7 (Q7), 3 @ s8 (Q12), 4 @ s5 (Q15), 5 @ s6 (Q16), 9 @ s1 (Q11), 9 @ s9 (Q4), 16 @ s10 (Q3), 96 @ s11 (Q2), 99 @ s12 (Q1), 105 @ s4 (Q8), 113 @ s2 (Q10)
128	s1 (Q11)	3 @ s15 (Q6), 4 @ s16 (Q5), 4 @ s14 (Q13), 4 @ s13 (Q14), 4 @ s5 (Q15), 5 @ s7 (Q7), 5 @ s4 (Q8), 6 @ s6 (Q16), 9 @ s3 (Q9), 9 @ s12 (Q1), 18 @ s11 (Q2), 76 @ s8 (Q12), 109 @ s10 (Q3), 125 @ s9 (Q4), 128 @ s2 (Q10)
128	s2 (Q10)	2 @ s15 (Q6), 3 @ s16 (Q5), 3 @ s14 (Q13), 3 @ s13 (Q14), 4 @ s7 (Q7), 4 @ s5 (Q15), 6 @ s6 (Q16), 15 @ s8 (Q12), 19 @ s4 (Q8), 84 @ s12 (Q1), 91 @ s9 (Q4), 107 @ s10 (Q3), 112 @ s11 (Q2), 113 @ s3 (Q9), 128 @ s1 (Q11)
139	s10 (Q3)	2 @ s5 (Q15), 3 @ s15 (Q6), 3 @ s16 (Q5), 3 @ s14 (Q13), 3 @ s13 (Q14), 3 @ s7 (Q7), 3 @ s6 (Q16), 6 @ s4 (Q8), 16 @ s3 (Q9), 41 @ s8 (Q12), 69 @ s12 (Q1), 106 @ s11 (Q2), 107 @ s2 (Q10), 109 @ s1 (Q11), 139 @ s9 (Q4)
139	s9 (Q4)	1 @ s5 (Q15), 2 @ s15 (Q6), 2 @ s16 (Q5), 2 @ s14 (Q13), 2 @ s13 (Q14), 2 @ s7 (Q7), 2 @ s6 (Q16), 5 @ s4 (Q8), 9 @ s3 (Q9), 16 @ s12 (Q1), 46 @ s8 (Q12), 78 @ s11 (Q2), 91 @ s2 (Q10), 125 @ s1 (Q11), 139 @ s10 (Q3)

Station Statistics

Station	Geometry score	Distribution score	Redundancy
s1 (Q11)	10,00 / 10	10,00 / 10	225,5
s2 (Q10)	10,00 / 10	10,00 / 10	299,5
s3 (Q9)	10,00 / 10	10,00 / 10	202,9

64 (Q8)	10,00 / 10	10,00 / 10	103,4
65 (Q15)	10,00 / 10	10,00 / 10	27,6
66 (Q16)	10,00 / 10	10,00 / 10	33,4
67 (Q7)	10,00 / 10	10,00 / 10	23,4
68 (Q12)	10,00 / 10	10,00 / 10	90,5
69 (Q4)	10,00 / 10	10,00 / 10	238,1
610 (Q3)	10,00 / 10	10,00 / 10	286,5
611 (Q2)	10,00 / 10	10,00 / 10	243,1
612 (Q1)	10,00 / 10	10,00 / 10	196,9
613 (Q14)	10,00 / 10	4,67 / 10	10,1
614 (Q13)	10,00 / 10	8,33 / 10	20,0
615 (Q6)	10,00 / 10	10,00 / 10	14,8
616 (Q5)	10,00 / 10	5,63 / 10	2,4

Station Status

Station	Setup type	Adjustment	Position	Orientation
61 (Q11)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
62 (Q10)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
63 (Q9)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
64 (Q8)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
65 (Q15)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
66 (Q16)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
67 (Q7)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
68 (Q12)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
69 (Q4)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
610 (Q3)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
611 (Q2)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
612 (Q1)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
613 (Q14)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
614 (Q13)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
615 (Q6)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled
616 (Q5)	Full Orientation	Passed	Enabled	Disabled

Tie Point Statistics

Observations per point: 2,35

Disabled manual observations: 23

Tie Point Back Projections

Residual (adjustment type)	Pixels	Distance @ 10 meters
Standard deviation (free)	0,37	

3

Standard deviation (constrained)	0,46	0,002 m
Maximum deviation (constrained)	5,82	0,021 m

Tie Point Relative Precision Estimates (95%)

Point	Easting	Northing	Elevation	Strength of figure	Redundancy	Minimum redundancy
mtp1	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,25	8,93	0,55
mtp2	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,97	0,50	0,00
mtp3	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,76	6,88	0,03
mtp4	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,31	6,47	0,49
mtp5	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,23	6,96	0,31
mtp6	0,000 m	0,000 m	0,000 m	2,22	6,28	0,47
mtp7	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,25	15,28	0,61
mtp8	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,27	6,42	0,48
mtp9	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,29	2,71	0,02
mtp10	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,80	4,97	0,32
mtp11	0,008 m	0,004 m	0,002 m	5,53	7,57	0,33
mtp12	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,82	4,59	0,29
mtp13	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,43	0,97	0,00
mtp14	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,24	4,71	0,09
mtp15	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,14	2,74	0,04
mtp16	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,39	2,80	0,07
mtp17	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,49	2,85	0,02
mtp18	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,36	2,97	0,00
mtp19	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,35	6,63	0,35
mtp20	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,27	10,90	0,65
mtp21	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,26	6,45	0,48
mtp22	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,15	9,93	0,48
mtp23	0,000 m	0,000 m	0,000 m	2,08	8,10	0,34
mtp24	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,90	6,49	0,30
mtp25	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,17	15,30	0,60
mtp26	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,48	19,31	0,61
mtp27	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,28	6,45	0,49
mtp28	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,86	4,83	0,28
mtp29	0,000 m	0,000 m	0,000 m	2,51	8,19	0,52
mtp30	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,71	4,69	0,23
mtp31	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,92	6,51	0,40
mtp32	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,32	2,96	0,21
mtp33	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,30	0,99	0,00

4

mtp34	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,93	9,37	0,08
mtp35	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,17	4,97	0,22
mtp36	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,61	2,75	0,18
mtp37	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,47	11,33	0,37
mtp38	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,41	11,49	0,47
mtp39	0,000 m	0,000 m	0,000 m	1,48	2,64	0,02
mtp40	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,30	6,95	0,36

5/8/2015 7:56:50 μμ	C:\Users\USER\Desktop\tanker_volume tank_auto\tank_auto.vce	Trimble Business Center
---------------------	--	-------------------------

5 από 5

Κώδικας Matlab για την προσαρμογή βέλτιστου κύκλου σε οριζόντιες τομές της δεξαμενής P-8736 με τη γενική μέθοδο συνόρθωσης:

```
clear all
clc
format long g
format compact

%least squares fitting of optimal circle
input=load('light_scanning_points_cs6.txt');
[rows,cols]=size(input);

for i=1:rows;
    x(i)=input(i,1);
    y(i)=input(i,2);
end;

c=rows;
m0=3; %x=[Xc, Yc, Rc]^T
r=c-m0;
n=2*rows;
m=n-r;

%Initial values
X0=[122.514;116.478;11.499;];

%Formatting tables
A=zeros(c,m0);
B=zeros(c,n);
X=zeros(m0,1);
l=zeros(n,1);
u=zeros(n,1);
w=zeros(c,1);
l=zeros(n,1);

%Table of measured data
for i=2:2:n
    l(i-1)=x(i/2);
    l(i)=y(i/2);
end
```

```

%Design table of parameters
for i=1:c
    A(i,1)=-2*(x(i)-X0(1));
    A(i,2)=-2*(y(i)-X0(2));
    A(i,3)=-2*X0(3);
end

%Factor table of measured data
for i=2:2:n
    B(i/2,i-1)=2*(x(i/2)-X0(1));
    B(i/2,i)=2*(y(i/2)-X0(2));
end

%Closure errors vector
for i=1:c
    w(i)=X0(3)^2-(x(i)-X0(1))^2-(y(i)-X0(2))^2;
end;

%System Solution

%Auxiliary tables
Pa=inv(B*B');
Na=A'*Pa*A;

dX=Na\A'*Pa*w;
X=X0+dX;

u=B'*Pa*(w-A*dX);    %residuals
s0=sqrt(u'*u/r);

Vx=s0^2*inv(Na);

sX0=sqrt(Vx(1,1));
sY0=sqrt(Vx(2,2));
sR=sqrt(Vx(3,3));

fprintf('\nΟι τελικές τιμές των παραμέτρων με τα τυπικά είναι
σφάλματα είναι:\n')
fprintf('\nX0=%1.4f +- %1.4f m',X(1),sX0)
fprintf('\nY0=%1.4f +- %1.4f m',X(2),sY0)
fprintf('\nR = %1.4f +- %1.4f m',X(3),sR)

```