



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

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ
ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΔΟΠΟΙΑΣ



Δεμεσλής Ραφαήλ-Σταύρος

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων:
Γεώργιος Πανταζής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Οκτώβριος 2024

10/10/2024



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

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ
ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

του

Δεμεσλή Ραφαήλ-Σταύρου

Επιβλέπων:

Γεώργιος Πανταζής

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Πανταζής
Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

.....
Δημήτριος Αναστασίου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Νικολίτσας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Οκτώβριος 2024

(Υπογραφή)

.....
Δεμεσλής Ραφαήλ-Σταύρος

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Δεμεσλής Ραφαήλ-Σταύρος, 2024

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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά το τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον διευθυντή του εργαστηρίου Γεωδαισίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του ΕΜΠ κ. **Γιώργο Πανταζή** για τη διατύπωση και την ανάθεση ενός τόσο πρωτότυπου, ενδιαφέροντος, απαιτητικού και πολύπλευρου θέματος.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να εκπονήσω ένα απαιτητικό θέμα, στο οποίο χρειάστηκε να πάρω σημαντικά ρίσκα και αποφάσεις. Οι κριτικές παρεμβάσεις του και η καθοδήγησή του σε συνδυασμό με τη συνέπεια και το παιδαγωγικό του 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 **Mobact Solutions** για την επαφή με ανθρώπους του χώρου που αξιοποιούν τα συγκεκριμένα συστήματα και για την πρώτη επαφή με εργοτάξιο και τις προκλήσεις που καλούνται οι εργαζόμενοι να αντιμετωπίσουν. Συγκεκριμένα ο κ. **Σταύρος Καριζόνης** βοήθησε στην σφαιρική κατανόηση της σημασίας των συστημάτων αυτοματοποίησης και καθοδήγησης και της συνεισφοράς τους σε ένα εργοτάξιο

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να το εκφράσω και να το αφιερώσω στους γονείς μου **Μαρία** και **Θεόδωρο** 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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας προσφέρει νέες δυνατότητες στην καθημερινότητα των ανθρώπων και δραστηριότητες που φάνταζαν δύσκολες ή χρονοβόρες πλέον έχουν απλοποιηθεί και αυτοματοποιηθεί.

Η εξέλιξη αυτή επεκτείνεται από απλές δραστηριότητες της καθημερινότητας, όπως η οικιακή χρήση, η μεταφορά, η επικοινωνία κτλ μέχρι και σε εξειδικευμένες δραστηριότητες, όπως η ιατρική, η επιστήμη κτλ. Μία από αυτές τις εξειδικευμένες δραστηριότητες είναι και η τοπογραφία.

Ο σύγχρονος αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός έχει πλέον στα χέρια του πληθώρα εργαλείων που διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό την καθημερινή του δουλειά. Από χρήση δέκτη GNSS για την απλή αποτύπωση ενός οικοπέδου μέχρι και τη χρήση ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών και 3D σαρωτών λέιζερ για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας. Η εργασία πλέον ολοκληρώνεται πιο εύκολα, πιο γρήγορα και πιο αξιόπιστα.

Ο σύγχρονος γεωδαιτικός εξοπλισμός, σε συνδυασμό με την γνώση της αυτοματοποίησης προσφέρει νέες δυνατότητες στις κατασκευαστικές εταιρείες, καθώς προσφέρει ακρίβεια, ταχύτητα, αξιοπιστία και φυσικά οικονομικό όφελος. Η σύγχρονη κοινωνία έχει ανάγκη από γρήγορες και αξιόπιστες κατασκευές, εξαιτίας των πολύ γοργών ρυθμών της εποχής. Μία εποχή όπου η επέκταση του ανθρώπου σε δύσκολα περιβάλλοντα έχει γίνει πιο εύκολη και η ανάγκη για πιο γρήγορη επικοινωνία έχει γίνει επιτακτική.

Σε αυτό το πλαίσιο ο συνδυασμός του σύγχρονου γεωδαιτικού εξοπλισμού, καθώς και η γνώση στην αυτοματοποίηση μηχανημάτων έχει ενισχύσει την κατασκευή νέων οδών, οι οποίοι ολοκληρώνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Οπότε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής περιγράφονται και μελετώνται πως οι σύγχρονοι γεωδαιτικές μέθοδοι κατευθύνουν και αυτοματοποιούν μηχανήματα οδοποιίας, προσφέροντας πολλά οφέλη.

Δεμεσλής Ραφαήλ-Σταύρος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	II
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	IV
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	VI
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	VI
ΠΙΝΑΚΕΣ.....	VII
ΣΧΗΜΑΤΑ.....	VIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	X
ABSTRACT.....	XII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	4
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	4
1.1 Γενική εξέλιξη του αυτοματισμού και των συστημάτων ελέγχου....	4
1.1.1 Αρχικά στάδια ελέγχου: Έως το 1900μ.Χ.....	7
1.1.2 Προ-κλασική περίοδος: 1900μ.Χ-1935μ.Χ.....	15
1.1.3 Κλασική περίοδος: 1935μ.Χ-1960μ.Χ.....	16
1.1.4 Σύγχρονος έλεγχος: 1960μ.Χ – σήμερα.....	17
1.2 Γενική εξέλιξη των μηχανημάτων καθοδήγησης – Machine Control	18
1.2.1 Δεκαετία 1960- Εξέλιξη συστημάτων laser.....	18
1.2.2 Δεκαετίες 1970 και 1980- Αισθητήρες ήχου (Sonic sensors)...	19
1.2.3 Δεκαετία 1990- Ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί και δέκτες GNSS.....	20
1.2.4 21ος αιώνας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	22
Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΪΑ.....	22
2.1 Ο σύγχρονος γεωδαιτικός εξοπλισμός.....	22

2.1.1 Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός.....	22
2.1.2 Δέκτες GNSS.....	29
2.1.3 Laser χωροβάτης.....	31
2.1.4 Αδρανειακά συστήματα πλοήγησης INS.....	34
2.1.5 Συστήματα καθοδήγησης / Λογισμικά.....	35
2.1.6 3D laser σαρωτές (laser scanner).....	36
2.2 Οι διάφοροι τύποι μηχανημάτων οδοποιίας.....	38
2.3 Παραδείγματα εφαρμογών συστημάτων machine control.....	44
2.3.1 Μελέτη αεροδρομίου Λειψίας/ Χάλλε.....	44
2.3.2 Έργο αποκατάστασης οδού A2 EP12 Bellinzona.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	49
3.1 Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων καθοδήγησης και αυτοματισμού.....	50
3.2 Οι προκλήσεις των συστημάτων καθοδήγησης και αυτοματισμού	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	57
4.1 Ίδρυση Τριγωνομετρικών και Πολυγωνομετρικών δικτύων.....	58
4.1.1 Υλοποίηση – σήμανση των κορυφών των δικτύων σε ένα τεχνικό έργο.....	59
4.1.2 Συνόρθωση γεωδαιτικών δικτύων.....	62
4.1.3 Πολυγωνομετρία.....	66
4.2 Αποτύπωση ΦΓΕ.....	72
4.2.1 Εργασίες Πεδίου.....	73
4.2.2 Εργασίες γραφείου.....	75
4.2.3 Έλεγχος του διαγράμματος.....	76
4.3 Γεωδαιτικές μέθοδοι αυτοματισμού και καθοδήγησης.....	77
4.3.1 2D επίλυση με laser χωροβάτη.....	77
4.3.2 3D επίλυση με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό.....	81
4.3.3 3D επίλυση με δέκτες GNSS.....	87
4.4 Εφαρμογή των μεθόδων στο πεδίο.....	89

4.4.1 Υψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης με χρήση laser χωροβάτη.....	89
4.4.2 Κατασκευή οδού 1 χιλιομέτρου με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.....	103
4.4.3 Εκσκαφή εδάφους με χρήση δεκτών GNSS.....	113
4.5 Έλεγχος.....	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	119
5.1 Συμπεράσματα.....	119
5.2 Προτάσεις.....	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ.....	124

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Ο μέσος όρος των εφαρμογών που χρησιμοποιούν το machine control ανάλογα το μέγεθος της εταιρείας[32].....	53
Διάγραμμα 2: Ανασταλτικοί παράγοντες στην ενσωμάτωση του machine control [35].....	54

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Νερόμυλος[1].....	9
Εικόνα 2: Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα [1].....	10
Εικόνα 3: Το ρολόι του Κτισίβιου [1].....	11
Εικόνα 4: Δέκτης GNSS με το χειριστήριό του (Trimble).....	30
Εικόνα 5: Laser χωροβάτης.....	33
Εικόνα 6: Ο laser σαρωτής Trimble X12.....	37
Εικόνα 7: Διαστρωτήρας.....	38
Εικόνα 8: Φρέζα.....	39
Εικόνα 9: Ισοπεδωτής.....	40

Εικόνα 10: Οδοστρωτήρας.....	41
Εικόνα 11: Εκσκαφής.....	42
Εικόνα 12: Διατρητικό.....	42
Εικόνα 13: Προωθητής.....	43
Εικόνα 14: Κρασπεδομηχανή.....	44
Εικόνα 15: Απόσπασμα από την εφαρμογή του συστήματος στο πεδίο. .	46
Εικόνα 16: Αριστερά: Η διάταξη των διαστρωτήρων στο πεδίο, Δεξιά: Το λογισμικό πεδίου.....	47
Εικόνα 17: Παραδείγματα σήμανσης κορυφών δικτύου.....	61
Εικόνα 18: Υψομετρικές αφετηρίες.....	61
Εικόνα 19: Αποτέλεσμα εξομάλυνσης επιφάνειας (1η φάση).....	96
Εικόνα 20: Το μοντέλο του χώρου στάθμευσης.....	96
Εικόνα 21: Επίπεδο laser χωροβάτη.....	97
Εικόνα 22: Επιφάνειες εφαρμογής (ΨΜΕ:μπλε ,μοντέλο χώρου στάθμευσης: κόκκινο ,επίπεδο laser χωροβάτη:γκρι).....	100
Εικόνα 23: Υψομετρικές διαφορές (κίτρινο: ΦΓΕ-μοντέλο, κόκκινο: Επίπεδο laser - ΦΓΕ).....	101
Εικόνα 24: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μαζί με το μοντέλο της οδού. .	108
Εικόνα 25: ΨΜΕ περιοχής μελέτης.....	114
Εικόνα 26: Μοντέλο εκσκαφής.....	115

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Υψόμετρα Κορυφών Δικτύου.....	90
Πίνακας 2: Υπολογισμός σφάλματος κάθε υψομετρικής διαφοράς.....	91
Πίνακας 3: Πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας V_x (mm^2). .	92

Πίνακας 4: Τελικός πίνακας υψομετρικών τιμών.....	92
Πίνακας 5: Αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομέτρων του μοντέλου από την κορυφή R8(σ_{H1}).....	101
Πίνακας 6: Αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομέτρων του μοντέλου από την κορυφή R3(σ_{H1}).....	103
Πίνακας 7: Πίνακας συντεταγμένων κορυφών δικτύου.....	105
Πίνακας 8: Πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας.....	106

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Σύστημα κλειστού βρόγχου [3].....	5
Σχήμα 2: Αυτορυθμιζόμενο ελεγχόμενο σύστημα, λειτουργία απόκρισης [3].....	6
Σχήμα 3: Ο ρυθμιστής του Watt[5].....	13
Σχήμα 4: Ο ρυθμιστής του Porter[6].....	14
Σχήμα 5: Ο ρυθμιστής του Hartnell[7].....	14
Σχήμα 6: Οι τρεις άξονες του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.....	23
Σχήμα 7: Α΄ τυπική όψη ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.....	24
Σχήμα 8: Β΄ τυπική όψη ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.....	25
Σχήμα 9: Αυτόματη αναγνώριση στόχου ATR.....	28
Σχήμα 10: Βασικά στοιχεία χωροβάτη.....	32
Σχήμα 11: Τυπική διάταξη επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων [22]...35	
Σχήμα 12: Ανοιχτή πλήρως εξαρτημένη όδευση από τα δύο άκρα.....	70
Σχήμα 13: Κλειστή εξαρτημένη όδευση.....	71
Σχήμα 14: Μέτρηση με laser χωροβάτη.....	79
Σχήμα 15: Μέτρηση με laser χωροβάτη σε εφαρμογή machine control. .80	

Σχήμα 16: Υπολογισμός συντεταγμένων καταφώτου.....	85
Σχήμα 17: Υπολογισμός συντεταγμένων εργαλείου (R TS).....	86
Σχήμα 18: Υπολογισμός συντεταγμένων εργαλείου(GNSS).....	88
Σχήμα 19: Υψομετρικό δίκτυο.....	93
Σχήμα 20: Το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης.....	94
Σχήμα 21: Θέση χωροβάτη σε κάθε φάση.....	102
Σχήμα 22: Τριγωνομετρικό δίκτυο περιοχής μελέτης.....	104
Σχήμα 23: Θέσεις στάσεων γεωδαιτικού σταθμού.....	109

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των σύγχρονων γεωδαιτικών μεθόδων αυτοματοποίησης και καθοδήγησης μηχανημάτων οδοποιίας, γνωστή και ως machine control. Η διερεύνηση της νέας αυτής τεχνολογίας και μεθοδολογιών επιχειρήθηκε στο πλαίσιο του θεωρητικού σχεδιασμού και ελέγχου.

Η εργασία αποσκοπεί στη διαπίστωση της σπουδαιότητας αυτών των συστημάτων καθώς και της αξιοπιστίας τους στις πιο σύνθετες εφαρμογές που αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός κλάδος. Η εργασία συνοψίζεται από τα εξής πέντε κεφάλαια:

- **Στο πρώτο κεφάλαιο** γίνεται ιστορική αναφορά στην εξέλιξη του αυτοματισμού με το πέρασμα των αιώνων και την ανάγκη των ανθρώπων για αυτοματοποίηση απλών καθημερινών δραστηριοτήτων. Ακόμα γίνεται ειδική ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη του machine control στον κατασκευαστικό κλάδο.
- **Στο δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφεται ο σύγχρονος γεωδαιτικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην εκπόνηση μιας εφαρμογής. Για κάθε εξοπλισμό περιγράφεται η βασική αρχή λειτουργίας του και τι είδους δεδομένα παρέχουν. Επιπλέον περιγράφεται η βασική λειτουργία των πιο χρησιμοποιημένων οχημάτων σε ένα εργοτάξιο οδοποιίας.
- **Στο τρίτο κεφάλαιο** περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις αυτών των συστημάτων. Συγκεκριμένα δίνεται ιδιαίτερη βάση στους λόγους που ακόμα δεν έχουν αφομοιωθεί στην πλειοψηφία των εφαρμογών τόσο σε διεθνές επίπεδο όσο και σε εθνικό επίπεδο.
- **Στο τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται και παρουσιάζεται η διαδικασία εκπόνησης μιας εργασίας έργου οδοποιίας. Η περιγραφή αφορά στην ίδρυση του γεωδαιτικού δικτύου και των οδεύσεων και στην αποτύπωση της περιοχής μελέτης με διαφορετικές μεθοδολογίες (laser scanner, laser χωροβάτης, δέκτες GNSS, ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί). Επιπλέον περιγράφονται οι τρεις πιο βασικοί σύγχρονοι γεωδαιτικές μέθοδοι

αυτοματοποίησης και καθοδήγησης (laser χωροβάτης, ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός, δέκτες GNSS) αναλύοντας τα βασικά μοντέλα της κάθε μεθοδολογίας. Έπειτα παρουσιάζονται, με θεωρητικό σχεδιασμό, τρεις από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές οδοποιίας, παρουσιάζοντας την ίδρυση του γεωδαιτικού δικτύου, την αποτύπωση, την εφαρμογή της μεθόδου χάραξης και την τελική ακρίβεια υλοποίησης του έργου. Οι εφαρμογές αυτές είναι

1. Ύψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης με χρήση laser χωροβάτη
2. Κατασκευή οδού μήκους 1Km με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού
3. Εκσκαφή εδάφους με χρήση δεκτών GNSS

Τέλος περιγράφεται ο τρόπος ελέγχου της υλοποίησης και τα ανεκτά όρια.

- **Στο πέμπτο κεφάλαιο** συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των εφαρμογών καθώς και προτάσεις για την αφομοίωση αυτών των συστημάτων.

Τα συστήματα machine control είναι συστήματα που διευκολύνουν την εκπόνηση έργων οδοποιίας προσφέροντας αξιοπιστία και ακρίβεια. Καθώς χρησιμοποιούνται όργανα όπως γεωδαιτικός σταθμός, δέκτες GNSS και χωροβάτης η ακρίβεια των κλασσικών μεθόδων διατηρείται και σε πολλές περιπτώσεις βελτιώνεται. Η βελτίωση οφείλεται στο γεγονός ότι ελαχιστοποιούνται σφάλματα που οφείλονται στην ανθρώπινη παρατήρηση και παρέμβαση.

Ακόμα προσφέρουν ασφάλεια, ταχύτητα, εξοικονόμηση καυσίμων, λιγότερες εργατοώρες, σε βάθος χρόνου περισσότερα ολοκληρωμένα έργα, αξιοπιστία και κέρδος. Είναι αξιόπιστα συστήματα που ακόμα δεν έχουν καταφέρει να αφομοιωθούν στην πλειοψηφία των εφαρμογών.

MODERN GEODETIC METHODS OF AUTOMATION AND GUIDANCE OF ROAD CONSTRUCTION MACHINERY

ABSTRACT

The subject of this thesis is the evaluation of modern geodetic methods of automation and guidance of road construction machinery, also known as machine control. The investigation of this new technology and methodologies was attempted in the context of theoretical design and control.

The work aims to ascertain the importance of these systems as well as their reliability in the most common applications faced by the construction industry. The paper is summarized by the following five chapters:

- **In the first chapter**, a historical reference is made to the evolution of automation over the centuries and the need of people to automate simple daily activities. There is also a special historical review of the evolution of machine control in the construction industry.
- **The second chapter** describes the modern geodetic equipment used in the development of an application. For each equipment, the basic principle of its operation and what kind of data they provide are described. In addition, the basic function of the most used vehicles on a road construction site is described.
- **The third chapter** describes the advantages and challenges of these systems. In particular, special attention is given to the reasons that have not yet been assimilated in the majority of applications both internationally and nationally.
- **The fourth chapter** describes and presents the process of preparing a road construction project. The description concerns the establishment of the geodetic network and routes and the mapping of the study area with different methodologies (laser scanner, laser rangefinder, GNSS receivers, robotic geodetic stations). In addition, the three most basic

modern geodetic methods of automation and guidance (laser level, robotic geodetic station, GNSS receivers) are described, analyzing the basic principles of each methodology. Three of the most common road construction applications are then presented, with a theoretical design, presenting the establishment of the geodetic network, the mapping, the application of the engraving method and the final accuracy of the project implementation. These applications are

1. Height measurement of a parking space using a laser level
2. Construction of a 1Km long road using a robotic geodetic station
3. Ground excavation using GNSS receivers

Finally, the way in which implementation is monitored and the tolerable limits are described.

- **The fifth chapter** gathers the conclusions that emerged from all the applications as well as proposals for the assimilation of these systems.

Machine control systems are systems that facilitate the preparation of road construction projects by offering reliability and accuracy. As instruments such as total station, GNSS receivers and levels are used, the accuracy of classical methods is maintained and in many cases improved. The improvement is due to the fact that errors due to human observation and intervention are minimized.

They also offer safety, speed, fuel savings, fewer working hours, more completed projects in the long run, reliability and profit. They are reliable systems that have not yet managed to be assimilated in the majority of applications.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής εξέλιξη του γεωδαιτικού εξοπλισμού έχει διαμορφώσει ένα νέο πλαίσιο στις δραστηριότητες του τοπογράφου μηχανικού. Ο σύγχρονος τοπογράφος μηχανικός άπτεται σε δραστηριότητα όπως είναι η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς φυσικών σχηματισμών και τεχνικών έργων και η μέτρηση παραμορφώσεων.

Ακόμη η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και ειδικότερα των γραφικών και σχεδιαστικών τους δυνατοτήτων αυξάνει συνεχώς τη ζήτηση για τρισδιάστατη πληροφορία. Έτσι η ανάγκη για την κατασκευή τρισδιάστατων 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.

Στον κατασκευαστικό τομέα οι εφαρμογές όλο και αυξάνονται μαζί με τις απαιτήσεις. Η πίεση του χρόνου είναι ασφυκτική και δεν αφήνει περιθώρια για την εφαρμογή των κλασσικών μεθόδων. Ο κατασκευαστικός κλάδος βρίσκεται κάτω από ασφυκτική πίεση και αναζητά νέες, σύγχρονες, αξιόπιστες λύσεις.

Η εισαγωγή των συστημάτων machine control είναι αυτό που αναζητά ο κλάδος. Όλοι οι μεγάλοι οίκοι, όπως Trimble, Topcon, Leica έχουν επενδύσει και έχουν προσφέρει αξιόπιστες και ορθές λύσεις που απαντούν στα σύγχρονα προβλήματα. Ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων είναι συνδυασμός γεωδαιτικών μεθόδων, ειδικών και φιλικών ως προς το χρήστη λογισμικά, αξιοποίηση γεωδαιτικών δεδομένων και αυτοματοποίηση των λειτουργιών του οχήματος. Τα συστήματα αυτά καλύπτουν όλες τις εφαρμογές που εφαρμόζονται σε ένα εργοτάξιο

Στο πλαίσιο του θεωρητικού ελέγχου και ενδιαφέροντος διατυπώθηκε το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιολόγηση των σύγχρονων γεωδαιτικών μεθόδων αυτοματοποίησης και καθοδήγησης. Η

διερεύνηση των μεθόδων έγινε σε εφαρμογές που καλύπτουν καθημερινές πραγματικές προκλήσεις του κλάδου και αναλύθηκε η γεωδαιτική σκοπιά των συστημάτων αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.1 Γενική εξέλιξη του αυτοματισμού και των συστημάτων ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού χρησιμοποιούνται περισσότερο από 2000 χρόνια. Όσο η τεχνολογία και η σκέψη του ανθρώπου εξελισσόταν τόσο κατέφευγαν σε αυτοματοποιημένα συστήματα που διευκόλυναν την καθημερινότητα και μείωναν τη χειρονακτική εργασία. Τι είναι όμως ένα σύστημα ελέγχου και υπό ποιές προϋποθέσεις ορίζεται ως τέτοιο και ποιες είναι οι βασικές παράμετροί λειτουργίας του;

Σύμφωνα με τη Lisa M. Ferguson [1] ένα σύστημα ελέγχου είναι μια συσκευή ή μια λειτουργία η οποία ρυθμίζει τη συμπεριφορά μιας άλλης συσκευής ή συστήματος. Ο μηχανικός ελέγχου, ο υπεύθυνος για τον σχεδιασμό και την ορθή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, ασχολείται με την κατανόηση και τον έλεγχο τμημάτων του περιβάλλοντος με σκοπό να προσφέρουν οικονομικά προϊόντα στην κοινωνία. Πιο συγκεκριμένα ένα σύστημα ελέγχου στοχεύει πρώτα στην ικανότητα εκτέλεσης ενός συστήματος αυτόματα ή στην ευκολότερη διεξαγωγή μιας χειροκίνητης δραστηριότητας, ο οποίος στόχος οδηγεί σε κερδοφόρες δραστηριότητες.

Τα συστήματα ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δύο διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα στην ανατροφοδότηση που λαμβάνουν: συστήματα κλειστού βρόγχου (σχήμα 1) και συστήματα ανοιχτού βρόγχου.

Τα συστήματα κλειστού βρόγχου βασίζονται και εξαρτώνται από την ανατροφοδότηση που λαμβάνουν από τις προηγούμενες δράσεις και αποτελούν την πλειοψηφία των συστημάτων ελέγχου. Σε αντίθεση τα συστήματα ανοιχτού ελέγχου δεν λαμβάνουν κάποια ανατροφοδότηση και συνεχίζουν να λειτουργούν χρησιμοποιώντας τις αρχικές συνθήκες που είχαν οριστεί, δηλαδή είναι ανεξάρτητα του περιβάλλοντός τους.

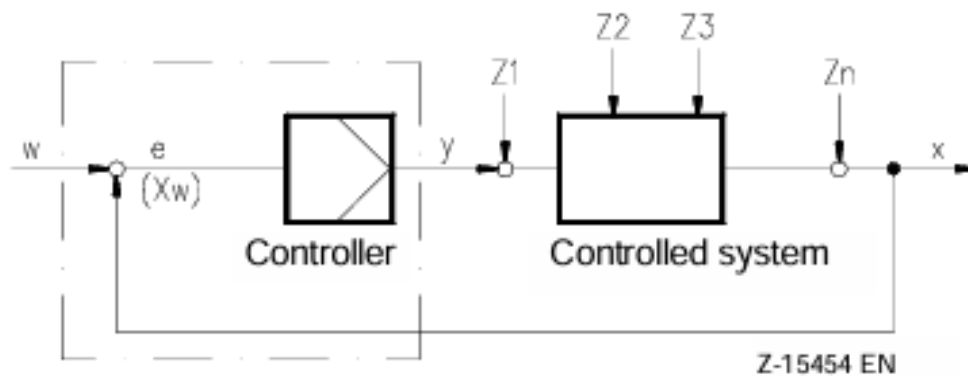
Πιο συγκεκριμένα σε ένα σύστημα κλειστού βρόγχου, σύμφωνα με τους Hartmann & Braun[3], η **ελεγχόμενη τιμή (πραγματική τιμή)** x ενός ελεγχόμενου συστήματος μετράται συνεχώς και τροφοδοτείται ως **μεταβλητή ανάδρασης r** σε ένα **στοιχείο σύγκρισης** όπου συγκρίνεται με μια **μεταβλητή αναφοράς (σημείο ρύθμισης)** w . Έπειτα

υπολογίζεται η μεταβλητή εξόδου YR από την προκύπτουσα απόκλιση ελέγχου $x_w = x - w$ ή από το δείκτη σφάλματος $e = w - x$. Αυτή η μεταβλητή εξόδου YR χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως χειραγωγημένη μεταβλητή y για να επιφέρει μείωση της απόκλισης ελέγχου στο ελεγχόμενο σύστημα. Αυτό αποδίδει έναν κλειστό βρόγχο ελέγχου.

Οι μεταβλητές διαταραχής z ενεργούν σε αυτό το βρόγχο επανειλημμένα με σκοπό να προκαλούν απόκλιση ελέγχου.

Ακόμα η ελεγχόμενη μεταβλητή x μπορεί να αντικατασταθεί από μια μεταβλητή αντικειμένου x_A εάν η προς το έλεγχο μεταβλητή δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας. Στην περίπτωση που και η μεταβλητή αντικειμένου δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα κατά τον έλεγχο της σύνθεσης, τότε μια αντιπροσωπευτική ιδιότητα (pH, πυκνότητα κτλ) μπορεί να υιοθετηθεί ως η ελεγχόμενη μεταβλητή.

Η ακρίβεια ή ποιότητα του ελέγχου ενός κλειστού βρόγχου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλή είναι η σύνδεση του ελεγκτή-χειριστηρίου (controller) με το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου.

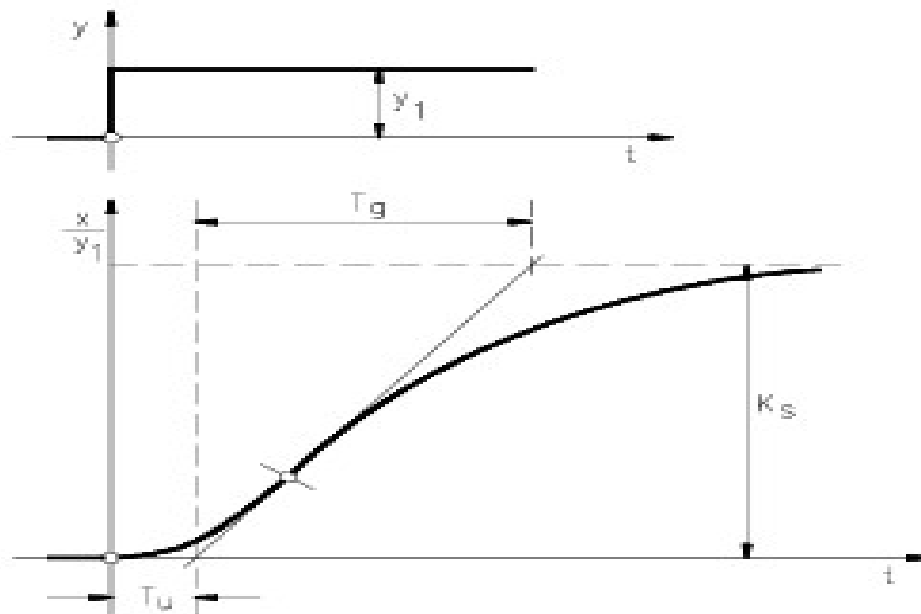


Σχήμα 1: Σύστημα κλειστού βρόγχου [3]

Τα συστήματα ελέγχου χαρακτηρίζονται από τη χρονική τους απόκριση. Πληθώρα διαδικασιών καθορίζουν τη χρονική απόκριση του συστήματος το οποίο ενεργοποιείται από ένα καθοριστικό σήμα. Η αντίδραση του συστήματος καθορίζει και την δυναμική του.

Στη συνέχεια αξιολογείται η λειτουργία απόκρισης για τον προσδιορισμό των τιμών ρύθμισης του ελεγκτή. Το σχήμα 2 δείχνει ένα αυτορυθμιζόμενο ελεγχόμενο σύστημα στο οποίο μια νέα κατάσταση σταθερής κατάστασης έχει ως αποτέλεσμα μια απότομη αλλαγή στη

μεταβλητή εισόδου. Αυτή η κατάσταση επιτυγχάνεται όταν η είσοδος στο σύστημα ισούται με την έξοδό του.



Σχήμα 2: Αυτορυθμιζόμενο ελεγχόμενο σύστημα, λειτουργία απόκρισης [3]

Ελεγχόμενο κέρδος συστήματος: $K_s = \frac{x}{y_1}$

Χρόνος καθυστέρησης: T_u

Χρόνος αποκατάστασης: T_g

Η τιμή του χρόνου αποκατάστασης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και μερικές ώρες. Ακόμα ο λόγος T_u/T_g είναι αρκετά σημαντικός, καθώς δείχνει το πόσο εύκολα ελέγχεται ένα σύστημα. Στην περίπτωση που ο λόγος είναι $\ll 0.1$ τότε το σύστημα ελέγχεται εύκολα. Αν ο λόγος παραμένει < 0.3 τότε ακόμα μπορεί να ελεγχθεί. Αν τελικά ο λόγος υπερβαίνει την τιμή 0.3 τότε τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με ένα ελεγκτή θα επιδεινωθούν αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, διερευνάται η δυνατότητα διακοπής του βρόγχου ελέγχου, ώστε να είναι δυνατή η δοκιμή του διαδοχικού ελέγχου.

Τέλος απομένει η επιλογή του ελεγκτή. Οι ελεγκτές χωρίζονται σε 3 κατηγορίες.

- Compact Controllers: Προτιμώνται για τον έλεγχο μεμονωμένων βρόχων ελέγχου.
- Digital Controllers με σειριακές διεπαφές: Χρησιμοποιούνται για κεντρική λειτουργία και παρακολούθηση μερικών βρόγχων ελέγχου σε μικρές και μεσαίες μονάδες επεξεργασίας και μπορούν να συνδυαστούν με μονάδες οπτικοποίησης διεργασιών μέσω υπολογιστή.
- Συστήματα αυτοματισμού: Χρησιμοποιούνται γενικά για την αυτοματοποίηση μεγάλων εγκαταστάσεων βιομηχανικής επεξεργασίας (οδοποιία, κατασκευή). Αυτά αναλαμβάνουν τον έλεγχο και άλλα καθήκοντα.

Η επιλογή κάθε ελεγκτή εξαρτάται από το χρόνο απόκρισης, το σήμα ενεργοποίησης, το σήμα εισόδου, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και από τις απαιτήσεις ασφάλειας.

Η ιστορία, λοιπόν, των συστημάτων ελέγχου και αυτοματισμού χωρίζονται σε 4 βασικές περιόδους

- Αρχικά στάδια ελέγχου: Έως το 1900 μ.Χ
- Προ-κλασσική περίοδος: 1900μ.Χ-1935 μ.Χ
- Κλασσική περίοδος: 1935μ.Χ-1960 μ.Χ
- Σύγχρονος έλεγχος: 1960 μ.Χ έως σήμερα

Παρακάτω αναλύεται η κάθε περίοδος δίνοντας αντίστοιχη έμφαση σε όλες, με σκοπό την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των συστημάτων μέσα στο πέρασμα των χρόνων.

1.1.1 Αρχικά στάδια ελέγχου: Έως το 1900μ.Χ

Όσο πρωτόγνωρο και να ακούγεται, ο αυτόματος έλεγχος μηχανημάτων έχει τις βάσεις του από την ελληνιστική κιάλας περίοδο, δηλαδή κάτι παραπάνω από 2000 χρόνια πριν. Η ανθρωπότητα είχε κατανοήσει τη

σημασία του αυτοματισμού και τα οφέλη του και είχε προχωρήσει στη δημιουργία τέτοιων συστημάτων.

Λόγω της τεχνολογίας της εποχής τα περισσότερα συστήματα ελέγχου ήταν συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Για τους μηχανικούς της εποχής ήταν πιο εύκολο να ρυθμίσουν τις αρχικές μεταβλητές για την αυτοματοποίηση ενός συστήματος παρά να αναμένουν την ανταπόκριση του περιβάλλοντος, όπως γίνεται σε ένα κλειστό βρόγχο. Μάλιστα οι κλειστοί βρόγχοι ήταν πιο αργοί και εξαιτίας της τεχνολογίας πρακτικά δύσχρηστοι.

Τα συστήματα ελέγχου της εποχής είχαν χρήση στην κατασκευή, στη διασκέδαση και στις θρησκευτικές τελετές. Υπήρχε η πεποίθηση ότι τα αποτελέσματα των συστημάτων ήταν κάποιο είδος μαγείας ή μήνυμα από τους Θεούς, καθιστώντας τους μηχανικούς της εποχής πολύ ικανούς και αναγνωρισμένους, αξιοποιώντας κυρίως τα στοιχεία της φύσης, όπως νερό, φωτιά και αέρα.

Οι πολιτισμοί της εποχής εκείνης ζούσαν και ευημερούσαν κοντά σε πηγές ύδατος, όπως ποτάμια, λίμνες ή θάλασσα καθώς το νερό αποτελεί πηγή ζωής. Το νερό αποτελεί εφόδιο μεταφοράς, τροφής, εμπορίου αλλά και συστήματος ελέγχου. Τη δύναμη του νερού αξιοποίησαν οι μηχανικοί της εποχής ως πηγή του συστήματος ελέγχου¹ που κατασκεύαζαν.

Ένα από τα πιο χρήσιμα υδάτινα σώματα αποτέλεσαν οι ποταμοί, αφού η συνεχής και γραμμική ροή τους τα καθιστούν κατάλληλες πηγές συστήματος ελέγχου. Ανάλογα με το πως αλληλεπιδρούσε το σύστημα ελέγχου με τη ροή του ποταμού, διαφορετικές λειτουργίες απόκρισης μπορούσαν να κατασκευαστούν για διαφορετικά συστήματα [3].

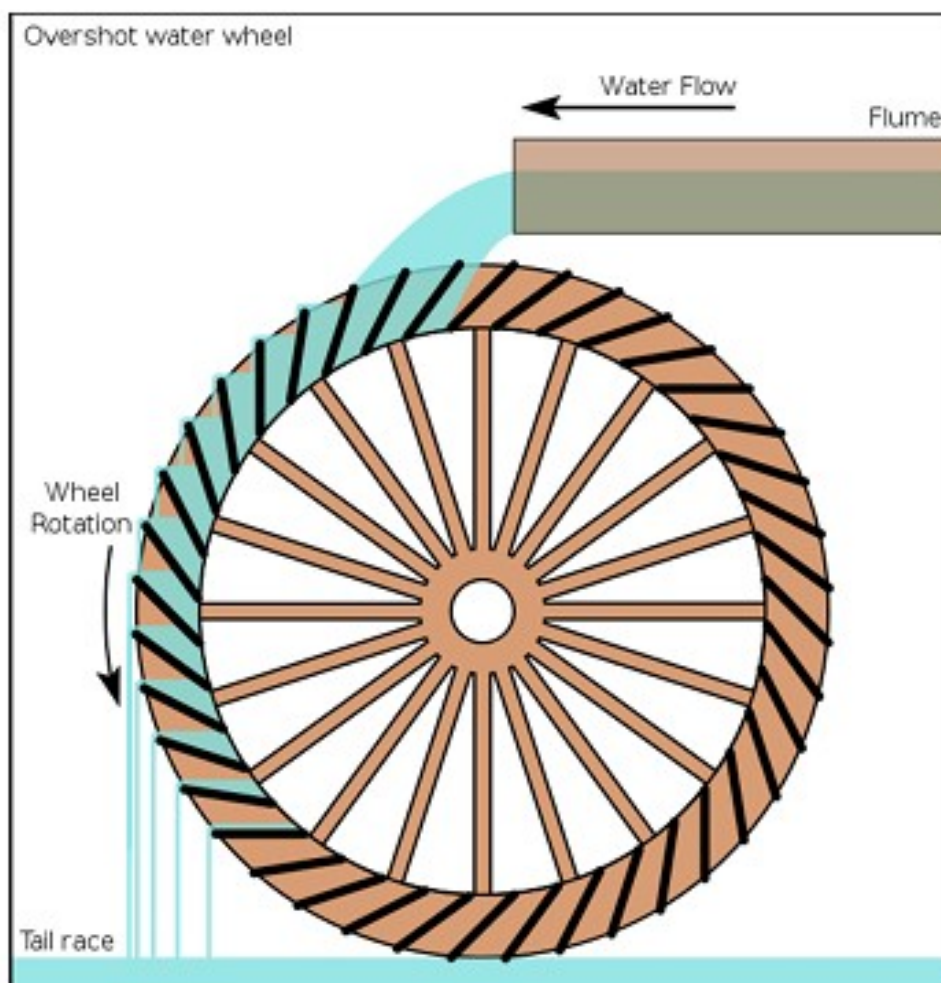
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ένα σύστημα ελέγχου καθορίζεται από τον τύπο του συστήματος, το χρόνο απόκρισης και τον ελεγκτή του(πηγή). Πάνω σε αυτό θα αναφερθούν κάποιες από τις εφαρμογές που αξιοποίησαν οι μηχανικοί της εποχής.

Η πρώτη κατασκευή είναι ο νερόμυλος (εικόνα 1). Η λογική πίσω από τη λειτουργία του είναι η αξιοποίηση της ροής του νερού για παραγωγή ενέργειας και κίνησης². Ανάλογα το μέγεθος και το σχήμα των πλακών

¹Πηγή συστήματος ελέγχου είναι οτιδήποτε παρέχει ενέργεια και δύναμη στο σύστημα[3]

²Οι νερόμυλοι αποτελούν τους αντίστοιχους DC κινητήρες για την εποχή. Η διαφορά είναι ότι οι κινητήρες του σήμερα έχουν ως ελεγκτή τη ροή του ηλεκτρισμού.

υποδοχής του νερού καθορίζεται και η εκάστοτε εφαρμογή του, η οποία μπορεί να είναι από αγροτική έως και βιομηχανική. Ως προς τον ορισμό ενός συστήματος ελέγχου ο νερόμυλος από μόνος του αποτελεί ένα σύστημα ανοιχτού βρόγχου, καθώς δεν υπάρχει ανατροφοδότηση από τη λειτουργία του. Το νερό εισέρχεται στην υποδοχή, ο νερόμυλος περιστρέφεται και το νερό καταλήγει σε άλλη επιφάνεια, οπότε χωρίς το νερό δεν υπάρχει κάποια ανατροφοδότηση που να περιστρέψει το σύστημα, κάνοντας αυτόματα τη ροή του νερού ελεγκτή του συστήματος. Τέλος ανάλογα τη ταχύτητα ροής του νερού και την μηχανική κίνηση του μύλου δημιουργούνται διαφορετικές λειτουργίες απόκρισης.



Εικόνα 1: Νερόμυλος[1]

Άλλη σημαντική δημιουργία ήταν η αιολόσφαιρα του Ήρωνα (εικόνα 2). Αποτελεί ένα διαφορετικό τύπο DC κινητήρα για την εποχή και θα μπορούσε να είναι πηγή περιστροφικής κίνησης.

Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα ήταν ένα σφραγισμένο σφαιρικό δοχείο με δύο σωλήνες εξάτμισης που έδειχναν προς αντίθετες κατευθύνσεις. Το δοχείο ήταν απομονωμένο έτσι ώστε να μπορούσε να περιστρέφεται ελεύθερα από δύο σει κοίλων σωλήνων που τροφοδοτούνται σε μια σφραγισμένη λεκάνη. Για την ενεργοποίηση της μηχανής χρειαζόταν η λεκάνη να γεμίσει με νερό και κάτω από τη λεκάνη να ανάψει φωτιά. Η θερμότητα προκαλούσε την εξάτμιση του νερού, με τον ατμό να “ταξιδεύει” στους δύο σωλήνες και έπειτα εκτός των δύο σωλήνων εξάτμισης, κάνοντας τη σφαίρα να περιστρέφεται. Όσο υπήρχε νερό στη λεκάνη, τόσο δούλευε και η μηχανή.

Ως προς τον ορισμό ενός συστήματος ελέγχου, ελεγκτής είναι ο συνδυασμός της θερμότητας με το νερό, το σύστημα ανήκει στην κατηγορία ανοιχτού βρόγχου συστήματος, αφού δεν υπάρχει ανατροφοδότηση από το σύστημα και λειτουργεί μέχρι να εξαντληθεί η ποσότητα του νερού και επειδή δεν υπάρχει τρόπος ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής της σφαίρας δεν εφαρμόζονται λειτουργίες απόκρισης. Τέλος η αιολόσφαιρα του Ήρωνα αποτελεί την πρώτη μηχανή ατμού, η οποία χρησιμοποιόταν για ψυχαγωγικούς και θρησκευτικούς λόγους.

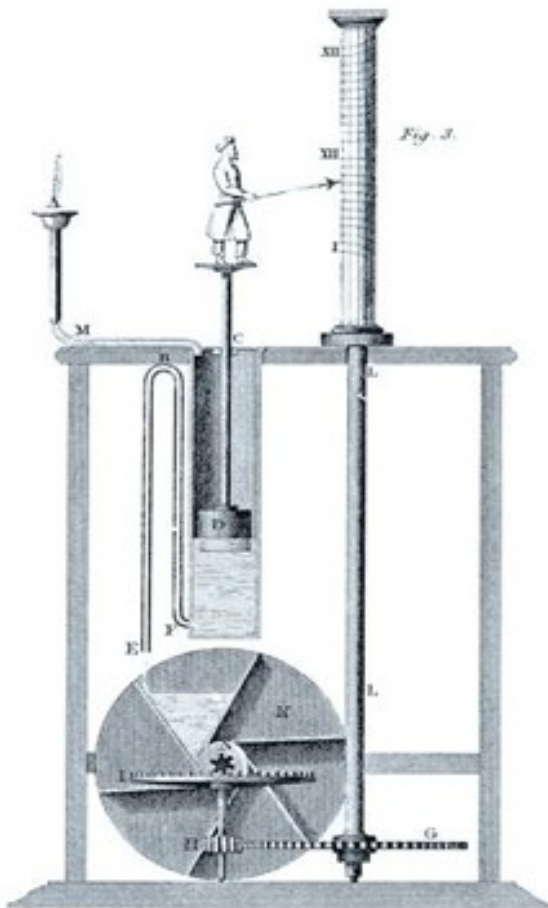


Εικόνα 2: Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα [1]

Η σημασία αυτή της κατασκευής είναι ότι μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε σημείο, όσο υπήρχε καύσιμο (νερό) και δε χρειαζόταν να βρίσκεται κοντά σε μια πηγή νερού, όπως ο νερόμυλος. Ακόμα η λογική

λειτουργίας της είναι παρόμοια με αυτή των σημερινών μηχανών. Διαφορά αποτελεί το καύσιμο και η αιτία θερμότητας, όπου πλέον δεν είναι το νερό και η φωτιά, αλλά εκρηκτικό καύσιμο και συμπίεση του εξατμιζόμενου καυσίμου.

Τελειώνοντας με την ελληνιστική περίοδο, άξιο αναφοράς αποτελεί το ρολόι νερού του Κτησίβιου (εικόνα 3). Μέχρι εκείνη τη στιγμή το νερό χρησιμοποιούταν ως κλεψύδρα για τη καταγραφή του χρόνου, χωρίς να δίνει ανατροφοδότηση στο χρήστη. Αντίθετα ο Κτησίβιος κατασκεύασε ένα ρολόι στο οποίο η ροή του νερού μετακινούσε και ένα δείκτη καταγραφή της ώρας εκείνης της στιγμής, και σε κάποιες περιπτώσεις καταγραφή και ειδοποίηση συγκεκριμένων γεγονότων.



Εικόνα 3: Το ρολόι του Κτησίβιου [1]

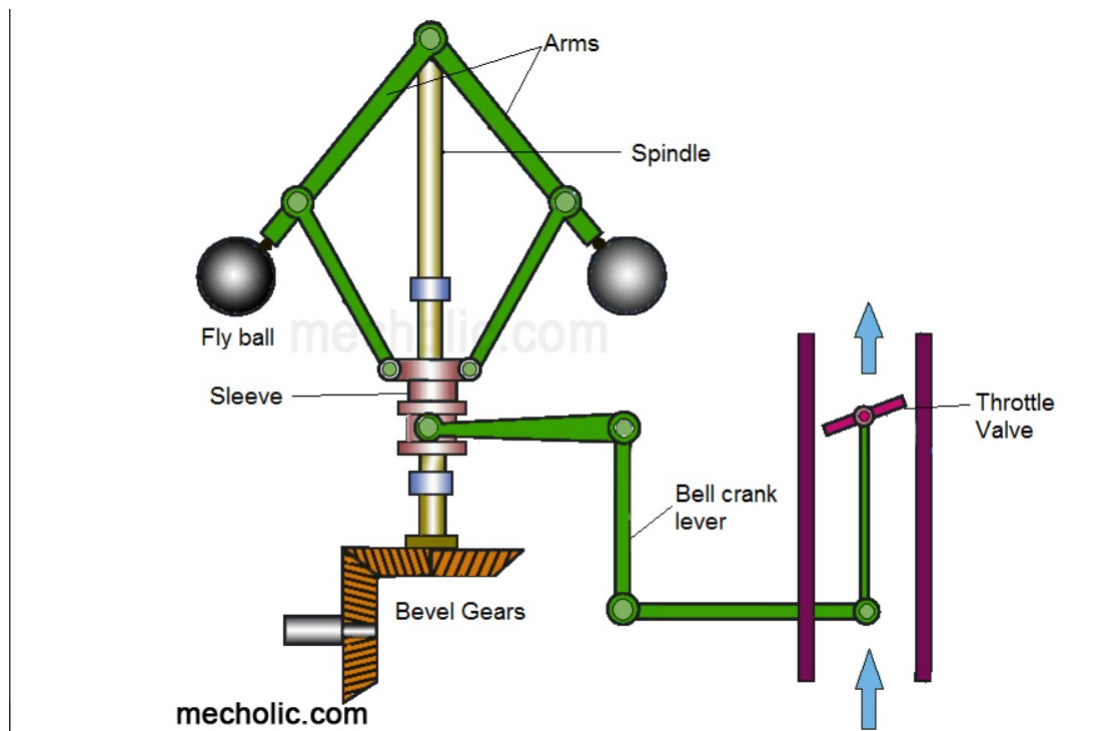
Η λογική της λειτουργίας του κινείται γύρω από τη κίνηση νερού, το οποίο ανάγκαζε ένα σύστημα νερόμυλου και γранаζιών να γυρνάει, με αποτέλεσμα ο δείκτης να μετακινείται και να δείχνει τον χρόνο. Το νερό τροφοδοτούνταν στο πάνω μέρος του ρολογιού από εξωτερική πηγή και γέμιζε ένα ρεζερβουάρ. Σε αυτό το ρεζερβουάρ επέπλεε ο δείκτης και στη βάση του βρισκόταν ένας σωλήνας σχήματος ανάποδου U διατηρώντας τη στάθμη του νερού στο ρεζερβουάρ σχετικά σταθερή (αργή μεταβολή). Έπειτα το νερό έπεφτε σε νερόμυλο, εξαναγκάζοντας τον σε κίνηση και μαζί με αυτόν κίνηση επιδρούσε σε άλλα γρανάζια, καταγράφοντας έτσι τον χρόνο. Στη συνέχεια με μικρές μετατροπές δημιουργήθηκαν χρονόμετρα και ξυπνητήρια. Ήταν ένα από τα πρώτα συστήματα ελέγχου που παρείχαν ανατροφοδότηση στο χρήστη, θεμελιώνοντας την αρχή της εποχής της αυτοματοποίησης.

Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου, οι χρονοδιακόπτες υλοποιούνται ψηφιακά χρησιμοποιώντας την ταλάντωση ενός κρυστάλλου για να δημιουργήσουν τα χρονικά βήματα που διέπουν το πέρασμα του χρόνου. Ο χρόνος και η καταγραφή του είναι πάρα πολύ σημαντικά στα συστήματα ελέγχου.

Αυτές οι κατασκευές διατηρήθηκαν για 1500 χρόνια περίπου και η επόμενη τεχνολογική εξέλιξη ήταν οι θερμοστάτες περί του 16ου-17ου αιώνα από τον Reamur(1683-1757). Ο Reamur πρότεινε αρκετές αυτόματες συσκευές με σκοπό τον έλεγχο της θερμοκρασίας φυτωρίων, βασιζόμενος σε μια εφεύρεση του Drebbel(1572-1663). Σύμφωνα με τη Britannica[4], ο Drebbel επινόησε ένα έξυπνο "ρολόι αένας κίνησης", που ενεργοποιείται από αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία. Με βάση αυτή την επινόηση ο Reamur μετρούσε τη θερμοκρασία με τη διαστολή ενός υγρού το οποίο συγκρατείται σε ένα δοχείο που είναι συνδεδεμένο με ένα σωλήνα σχήματος V που περιέχει υδράργυρο. Ένας πλωτήρας στον υδράργυρο λειτουργούσε ως βραχίονας που έλεγε το ρεύμα σε έναν κλίβανο και επομένως τον ρυθμό καύσης. Με αυτό τον τρόπο μπορούσε να μετρήσει τη θερμοκρασία. Στη συνέχεια ο Bonnemain (1743-1828) κατασκεύασε εξελιγμένα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας. Χάρης τη συνεισφορά αυτών των τριών κατά των 19ο αιώνα ξεκίνησε μαζική εφεύρεση, κατασκευή και πώληση θερμοστατών, οι οποίοι αποτελούν ελεγκτές ενός συστήματος ελέγχου.

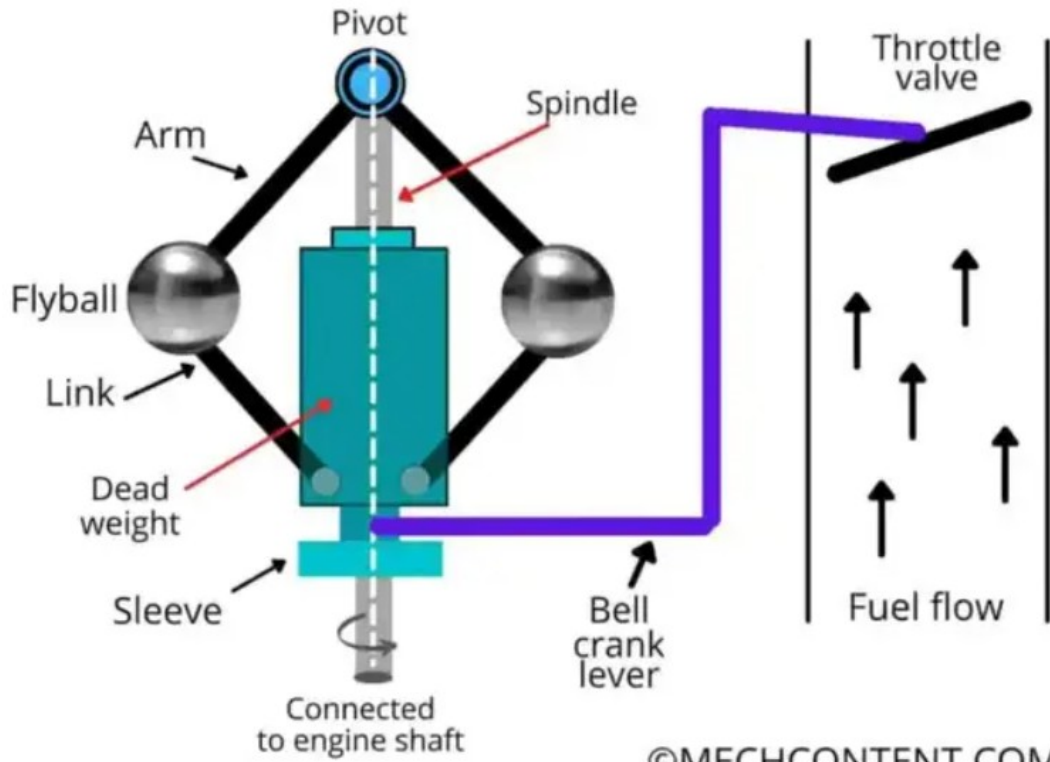
Η πιο αξιοσημείωτη ανάπτυξη ελέγχου του 18ου αιώνα ήταν ο ρυθμιστής της ατμομηχανής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην ελληνιστική περίοδο η έννοια της ατμομηχανής ήταν γνωστή, αλλά δεν είχε βρεθεί τρόπος να ρυθμίζεται η λειτουργία της και εξαρτώταν μονάχα από τον ελεγκτή(νερό). Αυτό το πρόβλημα ήρθε να λύσει ο ρυθμιστής. Ωστόσο, όπως κάθε επαναστατική εφεύρεση, έτσι και αυτή πέρασε από πολλά στάδια και δοκιμές μέχρι να είναι τελικά εφαρμόσιμη. Ο Watt(1736-1819) ήταν αυτός που αντιλήφθηκε ότι ο ρυθμιστής θα μπορούσε να ρυθμίσει τη ταχύτητα περιστροφής της ατμομηχανής. Ωστόσο ο ρυθμιστής του Watt(1789) (σχήμα 3) είχε αναλογικό έλεγχο και ως εκ τούτου ελεγχόμενη ταχύτητα σε μία μόνο κατάσταση λειτουργίας, καθιστώντας τον ως συντονιστή και όχι ελεγκτή.

Αυτό ήρθαν και βελτίωσαν σταδιακά με τη σειρά τους οι William Siemens, Porter (σχήμα 4), Pickering και Hartnell (σχήμα 5) το μέγεθος και τη ταχύτητα του ρυθμιστή, κάνοντας τον μικρότερο και πιο γρήγορο και μετατρέποντάς τον σε ελεγκτή.



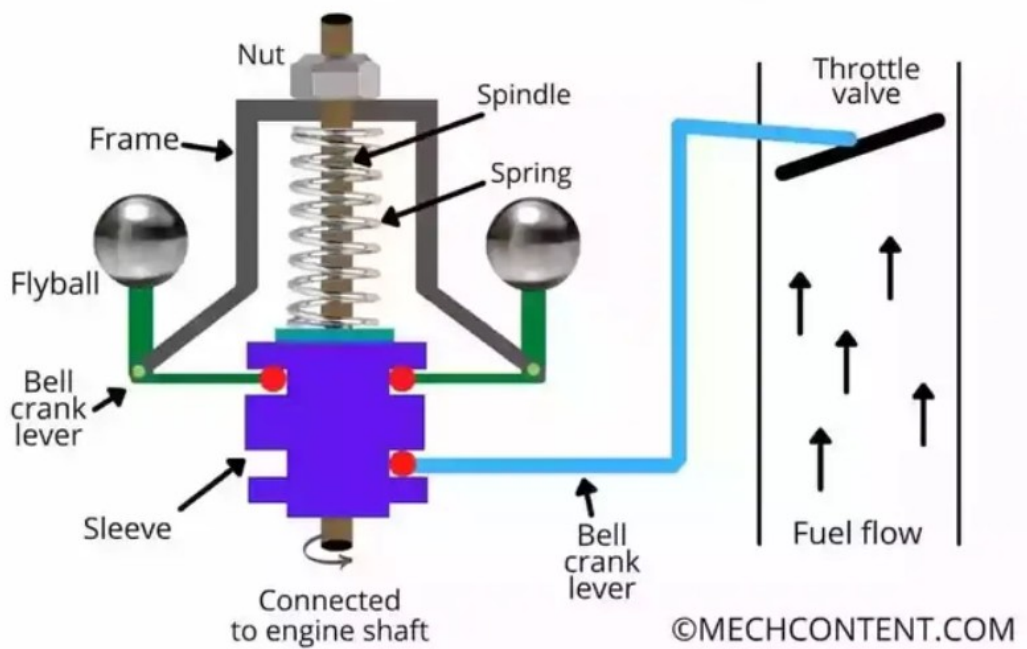
Σχήμα 3: Ο ρυθμιστής του Watt[5]

Porter Governor



Σχήμα 4: Ο ρυθμιστής του Porter[6]

Hartnell Governor



Σχήμα 5: Ο ρυθμιστής του Hartnell[7]

Οι περισσότερες εφαρμογές του 19ου αιώνα αφορούσαν στον έλεγχο θερμοκρασιών, πιέσεων, επίπεδο υγρών και τη ταχύτητα περιστροφής. Ανάγκη αποτελούσε η σταθερότητα και η ρύθμιση. Ωστόσο με την κατασκευή μεγαλύτερων οχημάτων (πλοία, αεροπλάνα), μηχανημάτων, όπλων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας οι απαιτήσεις αυξήθηκαν με αποτέλεσμα τη χρήση ατμού και υδραυλικής ισχύος για συστήματα ελέγχου θέσης. Οι μηχανικοί τότε ξεκίνησαν να επινοούν μηχανοκίνητες μηχανές διεύθυνσης, με την πρώτη να αποτελεί ανοιχτού βρόγχου σύστημα (Sickels, 1853). Στη συνέχεια, το 1866 επινοήθηκε η πρώτη μηχανοκίνητη μηχανή διεύθυνση κλειστού βρόγχου από τον J McFarlane Gray και την ίδια περίοδο κατασκευάστηκαν στη Γαλλία ένα εύρος τέτοιων συστημάτων, τα οποία είναι γνωστά ως servo-moter.

Τέλος με τη χρήση του ηλεκτρισμού δόθηκαν νέες δυνατότητες και νέες απαιτήσεις στα συστήματα ελέγχου και ξεκίνησε η εφαρμογή τους στα ήδη υπάρχοντα συστήματα, βελτιώνοντας την απόδοσή τους αισθητά.

1.1.2 Προ-κλασσική περίοδος: 1900μ.Χ-1935μ.Χ

Στις αρχές του 20ου αιώνα υπήρξε ραγδαία αύξηση στη χρήση ανατροφοδοτούμενων ελεγκτών για την τάση, το ρεύμα, τη συχνότητα, βραστήρες για παραγωγή ατμού, για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός ηλεκτρικού κινητήρα, για τα πηδαλιούχια πλοίων και αεροσκαφών καθώς και αυτόματης σταθεροποίησης και για τον έλεγχο της θερμοκρασία, της πίεσης και της ροής στη βιομηχανία διεργασιών. Ακόμα ραγδαία ήταν η αγορά εξοπλισμού μέτρησης, ένδειξης και καταγραφής "στοιχείων-μεγεθών". Παρά την κατασκευή και την επινοήση πολλών συστημάτων ελέγχου υπήρχαν δύο σημαντικά μειονεκτήματα.

Το πρώτο μειονέκτημα ήταν το ελλιπές θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τα συστήματα ελέγχου και κατ' επέκταση υπήρχε έλλειψη κοινού λεξιλογίου και το δεύτερο μειονέκτημα ήταν η μη απλές, εύκολα εφαρμόσιμες αναλύσεις και σχεδιαστικές μέθοδοι. Το αποτέλεσμα αυτών των δύο μειονεκτημάτων ήταν ότι τα συστήματα ελέγχου αποτελούσαν κυρίως επινοήσεις μηχανικών της εποχής, οι οποίες δεν λειτουργούσαν σε κάθε περίπτωση. Με άλλα λόγια το θεωρητικό υπόβαθρο της περιόδου εξυπηρετούσε κυρίως στη δημιουργία συστημάτων ελέγχου για συγκεκριμένες εφαρμογές, χωρίς να υπάρχει ευελιξία του συστήματος σε περίπτωση αλλαγής των αρχικών παραμέτρων ή των συνθηκών. Δηλαδή,

ενώ ένα σύστημα εμφάνιζε σταθερότητα σε μια εφαρμογή, σε μια άλλη ήταν μη λειτουργικό. Σημαντική βελτίωση και παράλληλα προβληματισμός υπήρξε στις τηλεπικοινωνίες, με ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα να είναι η διαχείριση του μήκους κύματος εξαιτίας της διαδικτυακής κίνησης. Τέλος, το 1922 ο Minorsky έδωσε μια σαφή ανάλυση των συστημάτων ελέγχου θέσης και διατύπωσε ένα νόμο ελέγχου.

1.1.3 Κλασσική περίοδος: 1935μ.Χ-1960μ.Χ

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από θεωρητική εμβάθυνση και εξειδίκευση στα συστήματα ελέγχου. Τα συστήματα αυτά άρχισαν να κατηγοριοποιούνται και εξειδικευμένες ομάδες μελετούσε τη κάθε κατηγορία. Οι 3 βασικές κατηγορίες αποτελούσαν τα τηλεφωνικά συστήματα, η εγκαθίδρυση κοινού λεξιλογίου και θεωρίας μαζί με ανάπτυξη μεθόδων σχεδιασμού και η χρήση διαφορετικών μεθόδων και θεωρητικής ανάπτυξης του χρονικού παράγοντα.

Πιο συγκεκριμένα η AT & T Company εργάστηκε πάνω στο τομέα των τηλεφωνικών συστημάτων και κύριος στόχος της αποτέλεσε η διεύρυνση του μήκους κύματος καθώς και η απόκτηση καλών χαρακτηριστικών απόκρισης συχνότητας για κανάλια φωνητικής επικοινωνίας. Οι μηχανολόγοι μηχανικοί και οι φυσικοί εργάστηκαν στη δεύτερη κατηγορία των συστημάτων ελέγχου και ήρθαν σε συνεργασία με την ASME δημιουργώντας την Industrial Instruments and Regulators Committee(1936). Εκείνη τη περίοδο εξελίχθηκε ραγδαία ο εξοπλισμός και τα μηχανήματα βάζοντας στην υπόθεση PID ελεγκτές³. Τέλος το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του MIT χρησιμοποίησε μεθόδους χρονικής απόκρισης που βασίζονται στις τεχνικές του χειριστή, εισάγοντας μπλοκ διαγράμματα και χρησιμοποίησε διαφορικό αναλυτή για την προσομοίωση συστημάτων ελέγχου.

Όλες αυτές οι μονάδες λειτουργούσαν μεμονωμένα έως ότου ο 2ος Παγκόσμιος Πόλεμος χρειάστηκε την ανάγκη τους. Όπως είναι γνωστό, σε ένα πόλεμο είναι επιτακτική ανάγκη η αξιοποίηση του καλύτερου τεχνολογικά εξοπλισμού που διαθέτει η χώρα, με σκοπό τη νίκη. Έτσι

³Ένας ελεγκτής PID είναι ένας ελεγκτής που χρησιμοποιείται στον αυτοματισμό για τον έλεγχο μιας εξόδου και τη μεταφορά μιας τιμής διεργασίας στο επιθυμητό σημείο ρύθμισης. Αυτό γίνεται, καθώς ο ελεγκτής παρακολουθεί μια συγκεκριμένη είσοδο (την τιμή διεργασίας), υπολογίζοντας τη διαφορά από το σημείο ρύθμισης και χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες για τον υπολογισμό της εξόδου. [8]

και σε αυτή την περίπτωση αφορμή υπήρξε η κατασκευή αντιαεροπορικών πυροβόλων, το οποίο αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που αφορά την ανίχνευση της θέσης του αεροσκάφους, τον υπολογισμό της μελλοντικής του θέσης και των ακριβή έλεγχο του βαρέως όπλου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου συνεργάστηκαν όλοι οι κλάδοι ενώνοντας τις γνώσεις τους. Από αυτή τη συνεργασία προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα. Πρώτον αναδείχθηκε η προσέγγιση που αφορά την ανατροφοδότηση συχνότητας και ότι τα πραγματικά συστήματα δεν είναι απλά και γραμμικά, αλλά περιέχουν σφάλματα και θόρυβο, είναι μη γραμμικά και οι εξωτερικές συνθήκες αβέβαιες. Αυτά τα συμπεράσματα οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα στη μετά-πολεμική περίοδο να ασχοληθεί με αυτές τις δύο προσεγγίσεις.

1.1.4 Σύγχρονος έλεγχος: 1960μ.Χ – σήμερα

Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου η πορεία εξέλιξης δόθηκε από τα θέλω των κρατών και την εξέλιξη των Η/Υ. Τα κράτη θεώρησαν σημαντικά την εκτόξευση, την πλοήγηση και τον εντοπισμό ρουκετών και διαστημικών οχημάτων. Στην ουσία χρειαζόταν λύση του προβλήματος του ελέγχου βαλλιστικών αντικειμένων. Σε αυτό το σκοπό αποσκοπούν φυσικά μοντέλα τα οποία περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις, γραμμικές και μη. Τέλος όργανα μέτρησης υψηλής ακρίβειας εξελίχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Η επίλυση αυτού του προβλήματος σε συνδυασμό με την εξέλιξη των Η/Υ, προσφέροντας τη δυνατότητα δημιουργίας αλγορίθμων που εξυπηρετούν σε αυτό τον σκοπό, οδήγησαν στη δημιουργία του Dynamic Programming. Με αυτή την επινόηση του Bellman η επιστημονική κοινότητα ξεκίνησε να εμβαθύνει σε δυναμικά και πολυδιάστατα προβλήματα, που μέχρι και σήμερα δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμα, και δόθηκε μια ευρεία και βαθειά μελέτη στα μαθηματικά προβλήματα του αυτόματου ελέγχου.

1.2 Γενική εξέλιξη των μηχανημάτων καθοδήγησης – Machine Control

Τα μηχανήματα καθοδήγησης, γνωστά και ως machine control, έκαναν τη μαζική εμφάνισή τους τη δεκαετία του 1960 και ακολούθησαν την εξέλιξη της τεχνολογίας του αυτοματισμού και του γεωδαιτικού εξοπλισμού έως και σήμερα.

Σημαντικό σημείο αναφοράς αποτελεί το πρώτο μηχανήμα καθοδήγησης, το οποίο κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1920 από την A. W. French & Co. Γνωστό και ως Utility Grader, αποτελούταν από έναν φορτωτή κάδου, ο οποίος μετακινούνταν πάνω σε ράγες που ήταν τοποθετημένες σε ένα πλαίσιο ισοπέδωσης, το οποίο υποστηριζόταν σε κάθε γωνία από έναν τροφοδοτούμενο γρύλο. Οι εναλλασσόμενες ράγες μπορούσαν να διαμορφωθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό περίγραμμα.

Ο φορτωτής κάδου έσκαβε υλικό από το οδόστρωμα και ένας αναστρέψιμος μεταφορέας εκκένωσης το μετέφερε στο πλάι με σκοπό τη φόρτωσή του σε φορτηγά ή στο πλάι του δρόμου. Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω δεικτών στο πλαίσιο ισοπέδωσης που εντόπιζαν τη γραμμή χορδής (stringline) στη πλάι του δρόμου διατηρώντας το τέλος του βρόγχου σε τάξη.

Ωστόσο η μαζική εμφάνιση των μηχανημάτων καθοδήγησης έγινε πριν περίπου 60 χρόνια έχοντας κάνει τεράστια πρόοδο εξαιτίας χαρισματικών μηχανικών που εξερεύνησαν την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών με πολλούς νέους και διαφορετικούς τρόπους.

1.2.1 Δεκαετία 1960- Εξέλιξη συστημάτων laser

Με την εξέλιξη των laser συστημάτων ήρθε και η πρώτη μαζική εμφάνιση των μηχανημάτων καθοδήγησης. Εκείνη την εποχή, το ερευνητικό εργαστήριο Hughes που βρίσκεται στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, κατασκεύασε το πρώτο πρωτότυπο laser, ένα οπτικό αντηχείο που δημιουργεί μια στενή δέσμη φωτός και έχει την ικανότητα να μετρήσει την απόσταση μεταξύ του οργάνου και του στόχου. Αυτή η τεχνολογία αποτέλεσε το θεμέλιο για στρατιωτικού επιπέδου ανιχνευτές και παράλληλα προσέλκυσε την προσοχή της γεωργικής κοινότητας.

Οι γεωπόννοι μηχανικοί James Fouss και Norman Fausey της Υπηρεσίας Γεωργικής Έρευνας του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ στο Πολιτειακό Πανεπιστήμιο του Οχάιο κατασκεύασαν το πρώτο σύστημα ελέγχου βαθμού laser για ένα γεωργικό μηχάνημα αποστράγγισης στα μέσα του 1960. Ο τρόπος λειτουργίας αφορούσε τη χρήση φωτοκύτταρων που ήταν τοποθετημένα σε μηχανήματα εκσκαφής και αποστράγγισης τύπου άροτρου. Το σύστημα ανέβαζε και κατέβαζε αυτόματα τη συσκευή εκσκαφής σε ελεγχόμενο βάθος και υπέδαφος που υπαγορεύεται από μια δέσμη laser ρυθμισμένη στο επιθυμητό υψόμετρο και επίπεδο.

Την ίδια περίοδο, ο Robert H. Studebaker ξεκίνησε την κατασκευή ενός ελεγχόμενου με laser κινητήρα grader. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο πρίσμα για τη δημιουργία ενός επιπέδου φωτός λέιζερ που ελέγχει πολλές μηχανές σε ένα πεδίο για οριζόντια και επικλινή επίπεδα.

Το 1967, ο Studebaker και ο Teach ίδρυσαν τη Laserplane Corp, την πρώτη εταιρεία laser. Τον Σεπτέμβριο του 1968 έκαναν επίδειξη, σε συνεργασία με την ARS, του πρώτου ελέγχου laser σε μηχάνημα εκσκαφής τάφρων που έγινε στη State Farm Science Review του Οχάιο.

1.2.2 Δεκαετίες 1970 και 1980- Αισθητήρες ήχου (Sonic sensors)

Την περίοδο αυτή η εμφάνιση και η εξέλιξη των αισθητήρων ήχου, η καθοδήγηση μηχανημάτων επεκτάθηκε σε μηχανήματα όπως είναι οι στρωτήρες και οι motor graders για ανύψωση και για κατεύθυνση. Οι αισθητήρες ήχου είναι όργανα που χρησιμοποιούν υπερηχητικά κύματα με σκοπό τη μέτρηση της απόστασης από το όργανο προς ένα αντικείμενο.

Ο συνδυασμός των περιστρεφόμενων laser και των αισθητήρων ήχου καθιέρωσε τη πρώτη γενιά μονοδιάστατων και δισδιάστατων (1D/2D) επιλύσεων καθοδήγησης μηχανημάτων (υψομετρία και κατεύθυνση) με συνεχόμενη εξέλιξη τα επόμενα χρόνια. Το αποτέλεσμα ήταν μια λύση διπλού αυτόματου ελέγχου λεπίδας, γνωστό και ως BladePro System, το οποίο αναπτύχθηκε από τη Spectra Precision το 1998.

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί αναπτυγμένη τεχνολογία H/Y και φιλικό προς το χρήστη έλεγχο. Παρέχει στο χρήστη ένα 3D σύστημα

καθοδήγησης μηχανημάτων για κατασκευή οδών, σιδηροδρομικών γραμμών και διαδρόμων απογείωσης αεροπλάνων.

Συνδυάζει ένα λογισμικό σχεδίασης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM), ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς και σύστημα ελέγχου motorgrader με σκοπό τον αυτοματοποιημένο έλεγχο του υψομέτρου και της κλίσης της λεπίδας.

1.2.3 Δεκαετία 1990- Ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί και δέκτες GNSS

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την εφεύρεση ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών και την εξέλιξη της τεχνολογίας δεκτών GNSS, θέτοντας τα θεμέλια της 3D καθοδήγησης μηχανημάτων.

Όλοι οι μεγάλοι οίκοι που κατασκεύαζαν τοπογραφικό εξοπλισμό, όπως η Trimble, η Spectra precision, η Leica, η Topcon σημείωσαν σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η κατασκευή του πρώτου δέκτη RTK GPS από την Trimble, του πρώτου δέκτη GPS από τη Leica, ανάπτυξη λογισμικών καθοδήγησης μηχανημάτων, όπως το Computer Aided Earthmoving System για μπουλντόζες και εκσκαφείς από τη Caterpillar και τη Trimble.

Η άποψη της εποχής ήταν ότι ο τοπογράφος μηχανικός δε χρειάζεται πλέον να τοποθετεί πασσάλους για να κατευθύνει τα μηχανήματα αλλά τα μηχανήματα από μόνα τους να κατευθύνονται αυτόματα στις σωστές θέσεις, με την κατεύθυνση της αγοράς να στέφει προς αυτή την κατεύθυνση.

1.2.4 21ος αιώνας

Το σήμερα βρίσκει την καθοδήγηση μηχανημάτων στην ακμή τους με τη χρήση τους να αρχίζει να καθιερώνεται σε κάθε πιθανό εργοτάξιο και όχι μόνο για έργα οδοποιίας και όχι μόνο σε απλά έργα και απλές εφαρμογές.

Χαρακτηριστική εφαρμογή είναι η χρήση καθοδήγησης μηχανημάτων στα υπόγεια έργα με τον μετροπόντικα. Ακόμα και σε εργοτάξια κατασκευών κτιρίων και σε ορυχεία η χρήση τους έχει εκτοξευθεί τα τελευταία χρόνια έχοντας βελτιωθεί αισθητά σε θέματα χρηστικότητας, ακρίβειας και ταχύτητας, με σημαντική εξέλιξη να αποτελεί η μεταξύ επικοινωνία των διαφορετικών μηχανημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΙΙΑ

2.1 Ο σύγχρονος γεωδαιτικός εξοπλισμός

Για την εφαρμογή αυτοματοποιημένης καθοδήγησης μηχανημάτων οδοποιίας, εκτός των σύγχρονων μηχανημάτων, χρειάζεται και ο αντίστοιχος σύγχρονος γεωδαιτικός εξοπλισμός, ο οποίος σε συνδυασμό με τα κατάλληλα λογισμικά επιτελεί το έργο του αυτοματισμού και της καθοδήγησης. Η συμβολή του τοπογράφου μηχανικού και της γνώσης του σε χωρικά προβλήματα και στον τρόπο επίλυσής τους τον έχει κατατάξει ως αναπόσπαστο μέλος ενός εργοταξίου και πόσο μάλλον ενός οδικού έργου. Ένα έργο οδοποιίας για να πραγματοποιηθεί χρειάζονται τα παρακάτω βασικά στάδια: αποτύπωση περιοχής εργασίας, χάραξη νέας οδού και έλεγχος. Σε όλα αυτά τα στάδια ο ρόλος του τοπογράφου μηχανικού είναι πολύ σημαντικός και υψίστης σημασίας. Χρειάζεται ταχύτητα, ευελιξία, αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα. Αυτά τα στοιχεία προσφέρονται από το σύγχρονο γεωδαιτικό εξοπλισμό, ο οποίος αναλύεται παρακάτω.

2.1.1 Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός

Ο γεωδαιτικός σταθμός είναι ένα υψίστης σημασίας εργαλείο στην αποτύπωση και στη χάραξη τεχνικών έργων. Αποτελεί ένα οπτικά ηλεκτρονικό όργανο που μετράει με υψηλή ακρίβεια κατακόρυφες και οριζόντιες γωνίες καθώς και μήκη από το όργανο προς το μετρούμενο σημείο.

Από μόνος του ο μηχανικός γεωδαιτικός σταθμός έχει αποτελέσει ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στα χέρια του τοπογράφου μηχανικού, κάνοντας τη δουλειά του πιο γρήγορη, πιο ακριβή και πιο αποτελεσματική. Ένας ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός έχει τις ίδιες ιδιότητες με έναν κλασικό γεωδαιτικό σταθμό, με τη διαφορά ότι ο ρομποτικός σταθμός μπορεί να σκοπεύσει και να μετρήσει εξ αποστάσεως, χωρίς την παρέμβαση χρήστη. Ακόμα η δυνατότητα του οργάνου να επικοινωνεί με τοπογραφικά λογισμικά επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο και εν κινήσει προσαρμογές, εξορθολογίζοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού δεν αλλάζει σε σχέση με ένα μηχανικό γεωδαιτικό σταθμό. Ένας γεωδαιτικός σταθμός βασίζει τη λειτουργία του στην ορθή γεωμετρική θέση των τριών αξόνων του. (σχήμα 6)

- Ο πρωτεύων άξονας ΠΠ' πρέπει να είναι κατακόρυφος
- Ο δευτερεύων άξονας ΔΔ' πρέπει να είναι κάθετος στον πρωτεύοντα
- Ο σκοπευτικός άξονας ΣΣ' ή σκοπευτική γραμμή πρέπει να είναι κάθετος στον δευτερεύοντα.



Σχήμα 6: Οι τρεις άξονες του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού

Ένας ολοκληρωμένος ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός αποτελείται από δύο μέρη (σχήμα 7 και σχήμα 8).



Σχήμα 7: Α' τυπική όψη ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού

Το κάτω μέρος το οποίο είναι σταθερό, συνδέεται με τον τρίποδα με κοχλία και αποτελείται από:

- Το τρικόχλιο, το οποίο φέρει μια σφαιρική αεροστάθμη με την οποία είναι δυνατή η κατακόρυφωση του πρωτεύοντα άξονα
- Μία βάση, η οποία στηρίζεται στο τρικόχλιο και φέρει κατάλληλες θύρες τροφοδοσίας και επικοινωνίας του σταθμού



Σχήμα 8: Β' τοπική όψη ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού

Στο εσωτερικό της βάσης υπάρχει ο δίσκος με τους αισθητήρες ανάγνωσης των οριζόντιων διευθύνσεων. Η βάση έχει τη δυνατότητα να αποσπάται από το τρικόχλιο με τη χρήση ειδικού μηχανισμού (πεταλούδα-ασφάλεια).

- Το προσοφθάλμιο οπτικής κέντρωσης μπορεί να βρίσκεται είτε στο τρικόχλιο είτε στο επάνω μέρος του σταθμού. Αυτό το προσοφθάλμιο φέρει χαραγμένο σταυρόνημα και ειδικά πρίσματα. Η οπτική ακτίνα που περνά από το κέντρο του σταυρονήματος ταυτίζεται με τον άξονα ΠΠ' του οργάνου με φορά προς το ναδίρ.

Το πάνω μέρος είναι κινητό, δηλαδή περιστρέφεται γύρω από τον πρωτεύοντα άξονα και αποτελείται από:

- Την ψηφιακή αεροστάθμη ακριβούς οριζοντίωσης, η οποία εμφανίζεται στην οθόνη του οργάνου. Σε κάποιες περιπτώσεις κάποιοι γεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν μηχανική σωληνωτή αεροστάθμη. Με τη χρήση της είναι δυνατή η ακριβής οριζοντίωση του γεωδαιτικού σταθμού.
- Τον μηχανισμό εκπομπής ορατής δέσμης κόκκινου laser, για την πιο ακριβή κέντρωση του οργάνου (σε ορισμένους γεωδαιτικούς σταθμούς).
- Τον δίσκο και τους αισθητήρες ανάγνωσης των κατακόρυφων διευθύνσεων.
- Τον ισοσταθμητή για τον συνεχή έλεγχο της οριζοντίωσης του σταθμού και τη διόρθωση των ενδείξεων των μετρήσεων.
- Το τηλεσκόπιο, το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον δευτερεύοντα άξονα.
- Την μπαταρία τροφοδοσίας.
- Τους κοχλίες ρύθμισης των κινήσεων του γεωδαιτικού σταθμού. Οι κοχλίες αυτοί ή έχουν περιορισμένη κίνηση με μηχανισμό πάκτωσης ή ατέρμονη κίνηση με συνεχή μικρομετακίνηση.
- Αισθητήρες και μηχανισμοί αυτόματης περιστροφής του γεωδαιτικού σταθμού στο επιθυμητό σημείο, “διαβάζοντας” το σημείο που δίνεται από το χρήστη ή ακολουθώντας το πρίσμα. Μέσω μηχανισμών ο γεωδαιτικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει την επιφάνεια του κατάφωτου και να το ακολουθεί αυτόνομα.
- Τη θέση τοποθέτησης της κάρτας μνήμης, στην οποία αποθηκεύονται οι μετρήσεις. Ο σταθμός περιλαμβάνει και εσωτερική μνήμη, δηλαδή τον μικροπολογιστή του, αλλά η χρήση εξωτερικής μνήμης διευκολύνει τη μεταφορά των μετρήσεων και επεκτείνει την ήδη υπάρχουσα μνήμη.

- Τον ειδικό Η/Υ του που διαχειρίζεται τις εντολές λειτουργίας του σταθμού που δίνει ο χρήστης, είτε μέσω ίντερνετ είτε μέσω Bluetooth διαχειριζόμενος άλλο λογισμικό πεδίου, είτε μέσω της οθόνης. Ακόμα παράγει μετρήσεις και εκτελεί απλούς υπολογισμούς και σύνθετα γεωδαιτικά προβλήματα όπως οπισθοτομία, χάραξη, εμπροσθοτομία κ.α), τα οποία γίνονται και στο λογισμικό πεδίου.

Λίγες ακόμα πληροφορίες είναι ότι ο κάθε ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός υποστηρίζει τη λειτουργία EDM για τη μέτρηση μηκών, κατά την οποία μια δέσμη φωτός ξεκινάει από το σταθμό, συναντά το επιθυμητό σημείο και επιστρέφει πίσω στο σημείο εκκίνησης. Με βάση τη σχέση της φυσικής που συνδέει τη ταχύτητα, το μήκος και τον χρόνο το μήκος υπολογίζεται από τη σχέση

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

με D: μήκος, c: ταχύτητα φωτός και t: χρόνος εκπομπής δέσμης. Το μέγεθος που μετράται είναι ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής του σήματος και το σφάλμα στη μέτρηση του χρόνου καθορίζει και το σφάλμα στη μέτρηση του μήκους.

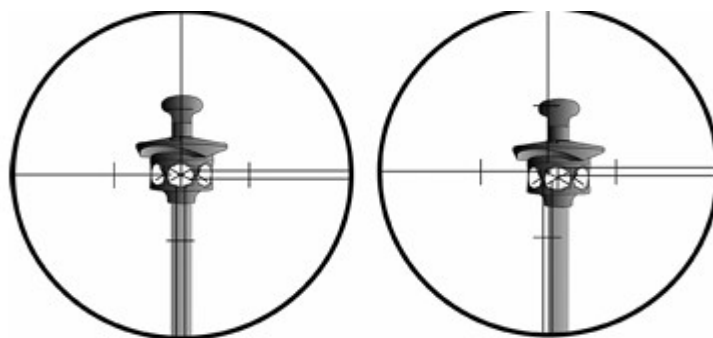
Για τη μέτρηση των διευθύνσεων οι σύγχρονοι σταθμοί χρησιμοποιούν την απόλυτη μέθοδο. Στην απόλυτη μέθοδο το όργανο φέρει έναν γυάλινο κωδικοποιημένο δίσκο, ο οποίος έχει ενσωματωμένο ένα συγκεκριμένο γραμμικό πρότυπο κώδικα. Στη μία όψη του δίσκου, βρίσκεται τοποθετημένη μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια, ενώ στην άλλη όψη είναι τοποθετημένη μια φωτεινή πηγή. Η σκιά καταγράφεται πάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια και διαβάζεται από έναν ή δύο αισθητήρες. Ένας αποκωδικοποιητής διαβάζει τις εικόνες και τις αναλύει σε κυματομορφές, τις συγκρίνει με το αποθηκευμένο πρότυπο και τις μετατρέπει σε ανάγνωση διεύθυνσης.

Ακόμα όλοι οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί συνδέονται με το αντίστοιχο λογισμικό πεδίου σε άλλη κινητή συσκευή (πχ τάμπλετ) από την οποία ο χρήστης έχει τον πλήρη απομακρυσμένο έλεγχο του σταθμού και μπορεί να εκτελεί τις λειτουργίες του εξ αποστάσεως (radio - modem). Η αυτοματοποιημένη κίνηση του σταθμού πραγματοποιείται

από τρεις διαφορετικές κινήσεις, ανάλογα την τεχνολογία του κάθε σταθμού.

Η πρώτη κίνηση είναι η **ηλεκτρική κίνηση**(servo). Κατά αυτή την κίνηση πραγματοποιείται αυτοματοποιημένη περιστροφή – αναστροφή και στόχευση του οργάνου στο σημείο ενδιαφέροντος. Η κίνηση αυτή είναι ταχύτερη, απλούστερη και ακριβέστερη σε σχέση με τη μηχανική κίνηση. Εξέλιξη της ηλεκτρικής κίνησης είναι η **ηλεκτρομαγνητική κίνηση** κατά την οποία η κίνηση του σταθμού γίνεται χωρίς τριβές με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, αθόρυβη κίνηση και οικονομία ενέργειας.

Μία ακόμη πολύ σημαντική λειτουργία ενός ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού είναι η **αυτόματη αναγνώριση του στόχου ATR**(σχήμα 9). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στο όργανο να εντοπίζει μόνο του και να παρακολουθεί το στόχο και να πραγματοποιεί τη μέτρηση. Κατά τη λειτουργία του σταθμού εκπέμπεται μια ακτίνα laser και η ανακλώμενη ακτίνα λαμβάνεται από την ενσωματωμένη CCD κάμερα. Υπολογίζονται οι αποκλίσεις της οριζόντιας και της κατακόρυφης θέσης του ίχνους και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το κέντρο του τηλεσκοπίου. Τότε περιστρέφεται οριζόντια και κατακόρυφα το τηλεσκόπιο μέχρι το σταυρόνημα του τηλεσκοπίου συναντήσει το κέντρο του ανακλαστήρα. Αυτή η λειτουργία κλειδώνει το τηλεσκόπιο του σταθμού πάνω στον ανακλαστήρα και εξυπηρετείται η **παρακολούθηση ενός κινούμενου στόχου**. Η μέτρηση λαμβάνεται βάση της επιθυμητής ακρίβειας, η οποία είναι συνάρτηση της ταχύτητας του στόχου, οπότε από μια τιμή ταχύτητας και πάνω ο σταθμός δεν πραγματοποιεί μετρήσεις, αλλά παρακολουθεί το στόχο.



Σχήμα 9: Αυτόματη αναγνώριση στόχου ATR

2.1.2 Δέκτες GNSS

Οι δέκτες του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού αποτελούνται από 3 κύρια μέρη: την κεραία, το βασικό δέκτη και το χειριστήριο. Για τη λειτουργία χρειάζονται και άλλα παρελκόμενα, όπως μπαταρία, modem, καλώδια ανάλογα τη τεχνολογία του δέκτη και την εφαρμογή.

Η **κεραία** του δέκτη λαμβάνει το εξασθενημένο σήμα από τους δορυφόρους του συστήματος και το ενισχύει, μέσω του προενισχυτή που διαθέτει, και το στέλνει στο δέκτη για την επεξεργασία. Η κεραία λαμβάνει σήμα στη συχνότητα L1 ή L2 ή και στις δύο, ανάλογα τη τεχνολογία του ή και σε άλλες συχνότητες ανάλογα το δορυφορικό σύστημα (GPS, GLONASS, Beidou κτλ.).

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η σταθερότητα του κέντρου φάσης της, δηλαδή του ηλεκτρικού κέντρου λήψης του των σημάτων, όπου αναφέρονται οι μετρήσεις όλων των συχνοτήτων. Συνήθως, το ηλεκτρικό με το μηχανικό κέντρο λήψης δεν ταυτίζονται προκαλώντας ένα συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις, το οποίο μπορεί να εξαλειφθεί με χρήση δεκτών του ίδιου κατασκευαστή και προσανατολισμού των κεραιών στην ίδια διεύθυνση. Η εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευής των κεραιών τείνει να εξαλείψει αυτό το σφάλμα.

Ο **βασικός δέκτης** (εικόνα 4) παραλαμβάνει τα δορυφορικά σήματα και εκτελεί όλη την επεξεργασία τους. Οι σύγχρονοι δέκτες διαθέτουν αρκετούς διαύλους (κανάλια), οι οποίοι λειτουργούν ταυτόχρονα και παρακολουθούν ξεχωριστά ο κάθε ένας όλους τους δορυφόρους που βρίσκονται πάνω από τον ορίζοντα στο οπτικό πεδίο του δέκτη.

Κάθε δέκτης περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή και ένα πρόγραμμα το οποίο εκτελεί όλες τις λειτουργίες (εγκλωβισμός δορυφόρων, επεξεργασία σήματος, προσδιορισμός θέσης, επικοινωνία με το χρήστη).

Το **χειριστήριο** (εικόνα 4) είναι η μονάδα επικοινωνίας του δέκτη με τον χρήστη. Συνδέεται με το δέκτη είτε με τη χρήση καλωδίου, είτε με bluetooth, είτε με Wi-fi είτε με radio modem, ανάλογα την εμβέλεια, την εφαρμογή και την τεχνολογία.

Με το χειριστήριο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μέσω μιας οθόνης και ενός πληκτρολογίου να ορίσει τις παραμέτρους των μετρήσεων, το ρυθμό καταγραφής, την γωνία αποκοπής των δορυφόρων, το είδος εντοπισμού,

την ονομασία-χαρακτηρισμό των σημείων και το επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Ακόμα ενημερώνεται για την κατάσταση της μπαταρίας του δέκτη, την ολοκλήρωση μιας μέτρησης, την αβεβαιότητα της μέτρησης, τη γεωμετρία των δορυφόρων, τον απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης κ.α.



Εικόνα 4: Δέκτης GNSS με το χειριστήριό του (Trimble)

Τεχνολογία Dual GNSS

Οι σύγχρονοι δέκτες, εκτός ότι λαμβάνουν σήματα από δορυφόρους πολλών διαφορετικών συστημάτων (multi-band GNSS), λαμβάνουν δύο τουλάχιστον διαφορετικές συχνότητες από δύο διαφορετικούς δορυφόρους. Για παράδειγμα από ένα δορυφόρο GPS λαμβάνει τη συχνότητα L1 και L2 και από ένα δορυφόρο Galileo λαμβάνει τη συχνότητα E1 και E2. Κατά αυτό τον τρόπο ο προσδιορισμός της θέσης είναι πιο ακριβής, μειώνονται σφάλματα που οφείλονται στην απώλεια σήματος και στην πολυανάκλαση και ο υπολογισμός του σημείου είναι πιο γρήγορος.

Ακόμα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία εξυπηρετείται η αυτοματοποιημένη μετακίνηση του οχήματος. Με τη χρήση δύο dual

GNSS δεκτών, ο υπολογισμός της κατεύθυνσης είναι πιο ακριβής και πιο γρήγορος προσανατολίζοντας το όχημα στην κατάλληλη κατεύθυνση.

2.1.3 Laser χωροβάτης

Ο χωροβάτης οπτικομηχανικός ή ψηφιακός αποτελείται από το τηλεσκόπιο και το τρικόχλιο (σχήμα 10) τα οποία αποτελούν ενιαίο σώμα, με το τηλεσκόπιο να μην αποσπάται από το τρικόχλιο.

Το τηλεσκόπιο μπορεί να περιστρέφεται μόνο γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, ο οποίος ονομάζεται πρωτεύοντας άξονας (ΠΠ').

Οι βασικές συνθήκες λειτουργίας του χωροβάτη είναι:

- Ο σκοπευτικός άξονας ΣΣ' ή σκοπευτική γραμμή πρέπει να είναι παράλληλος με την κανονική ευθεία ΚΚ' της αεροστάθμης
- Η κανονική ευθείας ΚΚ' της αεροστάθμης πρέπει να είναι κάθετη στον πρωτεύοντα άξονα ΠΠ'.

Το τηλεσκόπιο υλοποιεί την σκοπευτική γραμμή που οριζοντιώνεται με ακρίβεια. Η γραμμή αυτή υλοποιείται από το κέντρο του σταυρονήματος που είναι χαραγμένο στο τηλεσκόπιο το οργάνου και το οπτικό κέντρο του φακού του τηλεσκοπίου. Η οριζοντίωση του σκοπευτικού άξονα γίνεται με τη χρήση σωληνωτής ή ψηφιακής αεροστάθμης και με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η παραλληλία του άξονα με το οριζόντιο επίπεδο που ορίζει ο μηχανισμός οριζοντίωσης. Όταν το τηλεσκόπιο περιστρέφεται γύρω από τον πρωτεύοντα άξονα τότε ο σκοπευτικός άξονας διαγράφει ένα οριζόντιο επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο στην κατακόρυφο του τόπου του σημείου που έχει στηθεί ο χωροβάτης.



Σχήμα 10: Βασικά στοιχεία χωροβάτη

Ειδικότερα οι χωροβάτες laser είναι όργανα ειδικά σχεδιασμένα για υψομετρικούς προσδιορισμούς. Η λειτουργία τους βασίζεται στην υλοποίηση ενός οριζόντιου επιπέδου με τη βοήθεια μιας περιστρεφόμενης ορατής κόκκινης δέσμης laser. Η ακριβής οριζοντίωση του οργάνου γίνεται με αυτόματο σύστημα, αφού προηγηθεί η κατά προσέγγιση οριζοντίωσή του.

Τα όργανα αυτά δε διαθέτουν τηλεσκόπιο αλλά διαθέτουν ειδικό σύστημα εκπομπής ορατής δέσμης laser (Εικόνα 5). Στην κεφαλή του οργάνου υπάρχει ένα κεκλιμένο πρίσμα που μπορεί να περιστρέφεται ή να παραμένει σταθερό σε κάποια θέση. Η δέσμη laser περνά από αυτό το πρίσμα και υλοποιεί ένα οριζόντιο επίπεδο στο χώρο όταν αυτό περιστρέφεται ή μια οριζόντια ευθεία όταν παραμένει σταθερό. Η ανάγνωση λαμβάνεται από τον σταδιοφόρο πάνω σε απλό αριθμημένο πήχη, όπου έχει τοποθετηθεί επιβατηγά ένας ειδικός αισθητήρας ανάγνωσης της δέσμης laser. Το όργανο μπορεί να αναγνωρίζει τον

ειδικό ανακλαστικό αισθητήρα πάνω στη σταδία και να παρακολουθεί τη κίνησή της.



Εικόνα 5: Laser χωροβάτης

2.1.4 Αδρανειακά συστήματα πλοήγησης INS

Ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης, γνωστό και ως INS, είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιεί ένα εύρος περιβαλλοντικών αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να εντοπίσουν και να μετρήσουν την αλλαγή στην κίνηση ενός αντικειμένου. Με τη χρήση των δεδομένων των αισθητήρων, το σύστημα μπορεί να προσδιορίσει τη θέση ενός αντικειμένου σε σχέση με την αρχική του θέση, γνωστό και ως dead reckoning.

Οι δύο βασικοί τύποι αδρανειακών αισθητήρων είναι τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια (σχήμα 11).

➤ **Επιταχυνσιόμετρα:** Τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν τις αλλαγές στην γραμμική ταχύτητα, με άλλα λόγια μετρούν τη δεύτερη παράγωγο της θέσης. Καθώς κάθε αντικείμενο κινείται σε ένα τρισδιάστατο χώρο, χρησιμοποιούνται 3 επιταχυνσιόμετρα, κάθετα μεταξύ τους σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα

➤ **Γυροσκόπια:** Τα γυροσκόπια μετρούν την περιστροφική κίνηση και για τον ίδιο λόγο με τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται κάθετα μεταξύ τους σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα.

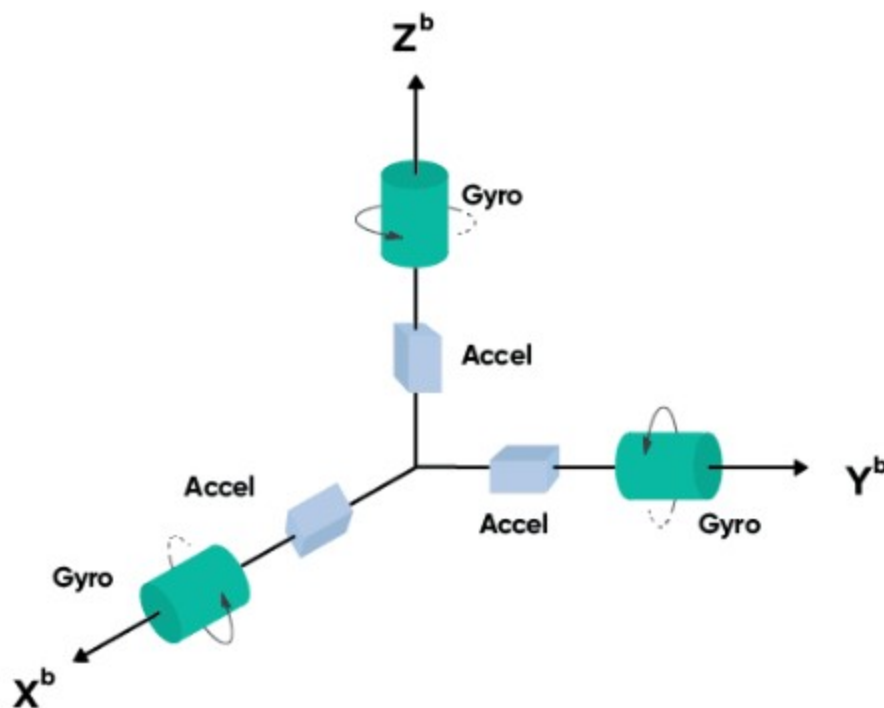
Ένα τυπικό INS σύστημα εμπεριέχει ή είναι συνδεδεμένο με άλλους αισθητήρες και εξοπλισμό, οι οποίοι παρέχουν ένα πιο ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων, το οποίο είναι ευρύτερο από την κίνηση μόνο, όπως

➤ **Δέκτες GNSS:** Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι δέκτες GNSS λαμβάνουν και κωδικοποιούν σήματα από διάφορους δορυφόρους προσανατολισμού με σκοπό τον προσδιορισμό τρισδιάστατης θέσης (οριζοντιογραφικής και υψομετρικής). Η χρήση παραπάνω δεκτών βοηθά στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης και του προσανατολισμού.

➤ **Μαγνητόμετρα:** Τα μαγνητόμετρα εντοπίζουν και μετρούν τη δύναμη και την κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Με τη χρήση τριών μαγνητομέτρων παρέχεται ένα τρισδιάστατο σύστημα προσανατολισμού σε σχέση με το μαγνητικό βορρά.

➤ **Αισθητήρες πίεσης:** Οι αισθητήρες πίεσης μετρούν την εξωτερική πίεση, με σκοπό τον προσδιορισμό του υψομέτρου με βάση την εξωτερική πίεση.

Η αδρανειακή ανίχνευση εκτελείται από μια ενότητα γνωστή ως **αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU** που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της κίνησης ονομάζεται και είναι συνήθως μια ηλεκτρομηχανική ή στερεάς κατάστασης συσκευή η οποία περιέχει μια σειρά αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να μετρήσουν την κίνηση. Η IMU εξάγει πρωτογενή δεδομένα κίνησης (raw data) από άλλα μέρη του INS, συνήθως σε συνδυασμό με μια σειρά δεδομένων άλλων αισθητήρων όπως οι δέκτες GNSS.



Σχήμα 11: Τυπική διάταξη επιταχυνσιμέτρων και γυροσκοπίων [22]

2.1.5 Συστήματα καθοδήγησης / Λογισμικά

Τα συστήματα καθοδήγησης των μηχανημάτων οδοποιίας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Τα 1D/2D συστήματα και τα 3D συστήματα καθοδήγησης.

(a) Συστήματα καθοδήγησης 1D/2D

Τα συστήματα αυτά είναι χαμηλού κόστους, εύχρηστα και βασίζονται κυρίως σε περιστρεφόμενο Laser, δηλαδή στον laser χωροβάτη. Τα συστήματα αυτά διαχειρίζονται τα δεδομένα του χωροβάτη κυρίως ή άλλες πηγές, όπως πεζοδρόμια, ράμμα με πασσαλάκια, φρεζαρισμένη επιφάνεια, υφιστάμενη στρώση και δημιουργεί ένα εικονικό οριζόντιο επίπεδο ύψους. Ορισμένα από αυτά τα συστήματα έχουν και πληροφορίες κλίσης καθιστώντας το σύστημα 2D.

(b) Συστήματα καθοδήγησης 3D

Στα συστήματα αυτά εμπεριέχονται όλες οι μετρήσεις από αμιγώς γεωδαιτικά όργανα και μέθοδοι που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Με αυτόν τον τρόπο τα λογισμικά αυτά διαχειρίζονται τα 3D δεδομένα του εκάστοτε έργου και της εκάστοτε εφαρμογής και μπορούν να κατευθύνουν τα μηχανήματα οδοποιίας.

Ακόμα αυτά τα συστήματα παρέχουν ολοκληρωμένη τρισδιάστατη απεικόνιση του έργου και καθοδήγηση των μηχανημάτων, καθώς και τη δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου της πορείας εκτέλεσης του έργου. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να κρίνει την πορεία του έργου, να διορθώσει την κατεύθυνση του οχήματος και να βελτιώσει την παραγωγικότητά του.

2.1.6 3D laser σαρωτές (laser scanner)

Τα όργανα σάρωσης επιφανειών ή αλλιώς laser σαρωτές, είναι όργανα τα οποία σαρώνουν μια επιφάνεια και δημιουργούν τρισδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας (εικόνα 6).

Η αρχή λειτουργίας αυτών των οργάνων είναι η εξής. Ορίζονται τα όρια της επιφάνειας που πρόκειται να σαρωθεί καθώς και το βήμα σάρωσης. Στους πιο σύγχρονους λέιζερ σαρωτές σαρώνεται όλη η επιφάνεια πέριξ του οργάνου, πραγματοποιώντας το ίδιο περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονά του και έχοντας προεπιλεγμένα βήματα σάρωσης. Από τον σαρωτή εκπέμπεται παλμός laser προς το αντικείμενο. Ταυτόχρονα οπτικοί κωδικοποιητές μετρούν τις γωνίες ανάκλασης και το χρόνο μετάβασης και επιστροφής της ακτινοβολίας.

Με αυτή τη μέθοδο πραγματοποιούνται από εκατοντάδες μέχρι εκατομμύρια μετρήσεις το λεπτό, ανάλογα τη τεχνολογία του οργάνου, και προσδιορίζονται οι x, y, z συντεταγμένες των σημείων σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς.

Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων κυμαίνεται από $\pm 3\text{mm}$ – $\pm 45\text{mm}$, η οποία εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- η απόσταση από το αντικείμενο
- η επιφάνεια του αντικειμένου (μαύρη, γυαλιστερή, υγρή → δημιουργία θορύβου)
- από τη ταχύτητα σάρωσης
- από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας
- τη μέθοδο σάρωσης που κάθε σύστημα χρησιμοποιεί



Εικόνα 6: Ο laser σαρωτής Trimble X12

2.2 Οι διάφοροι τύποι μηχανημάτων οδοποιίας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή όλων των μηχανημάτων οδοποιίας στα οποία εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης καθοδήγησης, αναφέροντας τις βασικές λειτουργίες τους σε ένα έργο οδοποιίας.

1. Διαστρωτήρες (Paver / Finishers)

Οι διαστρωτήρες(εικόνα 7), γνωστοί και ως finisher οδοστρωμάτων, ασφαλτοστρωτήρες ή μηχανές οδοστρωσίας, χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση της ασφάλτου σε δρόμους, γέφυρες, χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων κτλ.

Το μηχάνημα χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση της ασφάλτου στο έδαφος και παρέχει μικρή συμπύκνωση πριν συμπιεστεί με ρολό. Οι αυτοκινούμενες επιστρώσεις αποτελούνται από δύο βασικές μονάδες που είναι ο ελκυστήρας και η μονάδα επίστρωσης. Ο ελκυστήρας παρέχει τη κίνηση προς τα εμπρός και διανέμει την ασφάλτο. Από την άλλη η μονάδα επίστρωσης, που είναι και η πιο σημαντική μονάδα, ισοπεδώνει και διαμορφώνει το στρώμα της ασφάλτου.



Εικόνα 7: Διαστρωτήρας

2. Φρέζες (Miling machines)

Οι φρέζες (εικόνα 8) είναι μηχανήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία αφαίρεσης μέρους της πλακόστρωτης επιφάνειας, καλύπτοντας δρόμους, αυτοκινητοδρόμους, γέφυρες ή χώρους στάθμευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται άλεση ασφάλτου (asphalt miling) και χάρη σε αυτή τη διαδικασία το ύψος του οδοστρώματος δε θα αυξηθεί μετά τη τοποθέτηση νέας ασφάλτου και όλες οι υπάρχουσες δομικές ζημιές μπορούν να επισκευασθούν. Τέλος, η άσφαλτος που αφαιρέθηκε μπορεί να ανακυκλωθεί ως αδρανές υλικό για άλλα έργα οδοστρώματος.



Εικόνα 8: Φρέζα

3. Ισοπεδωτές (Graders)

Ο ισοπεδωτής (εικόνα 9) χρησιμοποιείται για την κατασκευή, τη συντήρηση και τον έλεγχο των οδοστρωμάτων. Η δυνατότητα του ισοπεδωτή να είναι αρκετά ευκίνητος, με την ευελιξία των λάστιχων του, και να μπορεί να μετακινεί τη λεπίδα του σχεδόν σε όλες τις κατευθύνσεις το καθιστά χρήσιμο σε πληθώρα εργασιών.

Εργασίες όπως η κατασκευή χωματόδρομων, η προετοιμασία ομαλών επιφανειών προτού την είσοδο των διαστρωτήρων, καθώς και στο "κόψιμο" τάφρων και αναχωμάτων. Εκτός από την κατασκευή ενός οδοστρώματος, ο ισοπεδωτής συμβάλει στην ανάμειξη υλικών, στη συντήρηση, στο χειρισμό μεγάλων κλίσεων πίσω από φορτηγά και ξύστρες καθώς και στην επιπεδοποίηση δύσκολων επιφανειών όπως γύρω από κράσπεδα και φρεάτια.



Εικόνα 9: Ισοπεδωτής

4. Οδοστρωτήρες (Road rollers)

Η κύρια λειτουργία ενός οδοστρωτήρα (εικόνα 10) είναι να ασκεί πίεση σε μια επιφάνεια για να τη συμπυκνώσει. Η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει πολλά περάσματα πάνω από μια περιοχή που συμπιέζεται. Για τους στατικούς κύλινδρους, το τεράστιο βάρος της μηχανής συμπιέζει το υλικό. Οι δονούμενοι κύλινδροι από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν τόσο βάρος όσο και μηχανικού κραδασμούς για να επιτύχουν βαθύτερη συμπύκνωση. Οι πνευματικοί κύλινδροι κατανέμουν στο φορτίο σε πολλαπλά ελαστικά, τα οποία μπορούν να ρυθμιστούν για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο συμπίεσης.



Εικόνα 10: Οδοστρωτήρας

5. Εκσκαφείς (Excavators)

Οι εκσκαφείς (εικόνα 11) είναι ένας βαρύς κατασκευαστικός εξοπλισμός που αποτελείται από σκούπα, βραχίονα, κουβά και καμπίνα σε μια περιστρεφόμενη κατασκευή που βρίσκεται στην κορυφή ενός οχήματος με τροχούς. Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργασίες εκσκαφής καθώς και σε διάφορες εφαρμογές ανύψωσης και μεταφοράς. Μαζί με ειδικά εργαλεία όπως είναι οι υδραυλικοί διακόπτες, οι κόφτες, τα ψαλίδια, οι λαβές κλπ. που τοποθετούνται στο τέλος των διαφόρων διαμορφώσεων της σκούπας και του βραχίονα, οι εκσκαφείς μπορούν να ολοκληρώσουν ένα ευρύτερο φάσμα εργασιών. Διαφέρουν σε μέγεθος ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούνται. Παράγοντες που επηρεάζουν στην επιλογή του μπορεί να είναι η παραγωγικότητα, η απόδοση καυσίμου κλπ. Κάθε μέγεθος έχει τον δικό του σκοπό και μερικά είναι εξαιρετικά εξειδικευμένα.



Εικόνα 11: Εκσκαφής

6. Διατρητικά (Drilling Machines)

Τα διατρητικά (εικόνα 12) είναι τεράστια μηχανήματα εκσκαφής τα οποία μπορούν να “κόψουν” μέσα από βράχους ή άλλα σκληρά υλικά. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την τοποθέτηση θεμελίων ή και πηγαδιών ανάλογα την εκάστοτε εφαρμογή.



Εικόνα 12: Διατρητικό

7. Προωθητές (Dozers)

Οι προωθητές ή αλλιώς μπουλντόζες (εικόνα 13) είναι ισχυρά μηχανήματα τα οποία εξυπηρετούν στο σκάψιμο του εδάφους, στη μεταφορά και την μετακίνηση υλικών και στην οριζοντίωση του εδάφους. Αποτελείται από μια βαριά λεπίδα από μέταλλο και μετακινείται σε μια ειδικά διαμορφωμένη τροχιά από συνεχή μεταλλικά πέλματα.



Εικόνα 13: Προωθητής

8. Κρασπεδομηχανές (Slipform pavers)

Η ολισθηρή επίστρωση είναι μια διαδικασία χύτευσης του σκυροδέματος όπου το σκυρόδεμα διανέμεται σε ένα καλούπι που κινείται συνεχώς για να αποκτήσει το απαιτούμενο σχήμα ή σχέδιο. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται σε βαριές κατασκευές όπως δρόμοι, γέφυρες και βαριά κτίρια. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η δημιουργία μιας συνεχούς, "χυτευμένης στη θέση" και σχεδόν αψεγάδιαστης δομής που έχει ανώτερη απόδοση σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως καλούπια και διακριτά μπλοκ. Αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται από τις κρασπεδομηχανές (εικόνα 14).



Εικόνα 14: Κρασπεδομηχανή

2.3 Παραδείγματα εφαρμογών συστημάτων machine control

Τα συστήματα αυτά εφαρμόζονται στο πεδίο εδώ και πολλές δεκαετίες και έχει πληθώρα εφαρμογών. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο πραγματικές εφαρμογές συστημάτων machine control, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στο λόγο που χρησιμοποιήθηκαν, στον εξοπλισμό και στο αποτέλεσμα.

2.3.1 Μελέτη αεροδρομίου Λειψίας/ Χάλλε

Η εταιρεία Kutter ανέλαβε στα τέλη του 2021 να ξαναστρώσει τη βόρεια λωρίδα απογείωσης και προσγείωσης, καθώς και έναν σημαντικό αριθμό τροχοδρόμων του αεροδρομίου της Λειψίας/Χάλλε. Δηλαδή, ο βόρειος διάδρομος μήκους 3.8Km και πλάτους 60m και οι σχετικοί τροχοδρόμοι, περίπου 300000m² επιφάνειας από σκυρόδεμα, έπρεπε να αντικατασταθούν. Προκειμένου να διατηρηθεί η κατεργασμένη με τσιμέντο πορεία βάσης, ο ιδιοκτήτης όρισε ότι η αφαίρεση της επιφάνειας του σκυροδέματος έπρεπε να είναι χωρίς κραδασμούς.

Επιπλέον, η νέα στρώση σκυροδέματος έπρεπε να τοποθετηθεί απευθείας στην αλεσμένη επιφάνεια, έτσι ώστε το υψόμετρο να πρέπει να διατηρείται εντός 10mm, δηλαδή ακρίβειας $\pm 10\text{mm}$. Χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία της Trimble 3D Paving Control μπορούσε να επιτευχθεί ακρίβεια $\pm 3\text{mm}$ σε ολόκληρη την περιοχή. Το έργο έπρεπε να ολοκληρωθεί σε 7 εβδομάδες.

Το σύστημα Trimble 3D Paving Control απαιτεί τη χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού. Κατά την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Trimble SPS930, το 360° πρίσμα MT900 και το χειριστήριο TSC7. Στο έργο χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 15 φρέζες Kutter. Ακόμα η επικάλυψη του σκυροδέματος πάχους 40cm ενισχύθηκε με πολλά στρώματα αγκυρίων και πειρών. Το βάθος του φρεαζαρίσματος ήταν προσαρμοσμένο στη θέση των αγκυρίων και των πειρών.

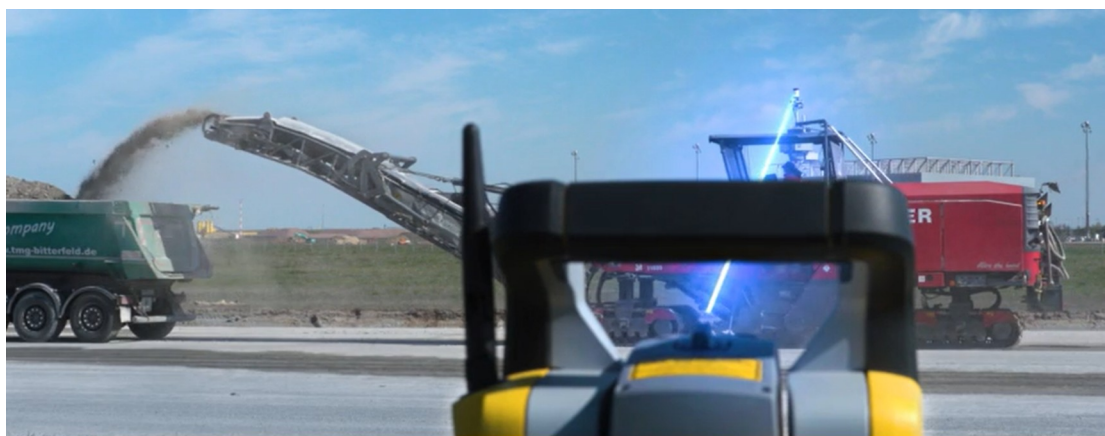
Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος είναι ως εξής:

1. Πρώτα σχεδιάζεται ψηφιακά η τελική επιφάνεια σκυροδέματος.
2. Έπειτα σχεδιάζεται το σχέδιο εργασίας (work design), το οποίο δημιουργείται από την αφαίρεση του πάχους του στρώματος από την τελική επιφάνεια.
3. Αυτό το σχέδιο μεταφέρεται στις φρέζες και παρουσιάζεται στην οθόνη του συστήματος.
4. Με αυτό το τρόπο είναι γνωστό σε κάθε τοποθεσία το επιθυμητό υψόμετρο.

Κατά το μήκος της λωρίδας τοποθετούνται ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς το πρίσμα που τους αντιστοιχεί. Με αυτό τον τρόπο η παρακολούθηση του στόχου γίνεται παντός καιρού σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες (πρωί, βράδυ, βροχή, αέρα, σκόνη) (εικόνα 15).

Ως αποτέλεσμα ήταν η επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας των $\pm 3\text{mm}$ σε όλη την έκταση των 300000m^2 με μέση παραγωγή πάνω των 7000m^2 ανά μηχάνημα ανά βάρδια. Ακόμα οι φρέζες λειτουργούσαν σε ταχύτητες των $25\text{m}/\text{min}$ και υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες η λειτουργία του

συστήματος ήταν ομαλή. Τέλος το έργο ολοκληρώθηκε εντός των 7 εβδομάδων.



Εικόνα 15: Απόσπασμα από την εφαρμογή του συστήματος στο πεδίο

2.3.2 Έργο αποκατάστασης οδού A2 EP12 Bellinzona

Ως μέρος του έργου αποκατάστασης της οδού A2 EP12 της Bellinzona, Ελβετία, η κοινοπραξία CasCa ένωσε τις δυνάμεις της για να ενισχύσει την ηχομόνωση μέσω νέων και υπαρχόντων προστατευτικών και αναλαμβάνει περίπου 6.2Km ανακατασκευής πεζοδρομίου με Ανοιχτή Πορώδη Ασφαλτο, ένα σύγχρονο ηχοαπορροφητικό ασφαλτικό μείγμα.

Για την επίτευξη του έργου χρησιμοποιήθηκε το 3D σύστημα machine control Leica MC1. Χρησιμοποιήθηκαν ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί οι οποίοι παρείχαν συνεχώς πληροφορίες θέσης στο σύστημα, επιτρέποντας ακριβή και σε πραγματικό χρόνο λειτουργία του διαστρωτήρα σε σχέση με το ψηφιακό μοντέλο.

Η επίστρωση έγινε ως εξής. Δεξιά και αριστερά της οδού οι διαστρωτήρες ήταν εξοπλισμένοι με το σύστημα Leica MC1 και καθοηγούνταν από ένα ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Ο μεσαίος διαστρωτήρας λειτουργούσε ως μεσολαβητής, αντιστοιχίζοντας το ύψος με το ύψος των προπορευόμενων διαστρωτήρων και στις δύο πλευρές (εικόνα 16).

Ακόμα η χρησιμοποίηση πολλαπλών γεωδαιτικών σταθμών επέτρεψε στη συνεχή παροχή πληροφοριών θέσης, από δύο τουλάχιστον σημεία αναφοράς, ακόμα και όταν δεν υπήρχε η ορατότητα ή το εύρος μέτρησης

κάποιων γεωδαιτικών σταθμών είχε ξεπερασθεί, πάντα υπήρχε πληροφορία θέσης.

Έπειτα οι τοπογράφοι έλεγχαν εάν το αποτέλεσμα της επίστρωσης ήταν ορθό μετρώντας τις συντεταγμένες σημείων. Η όλη διαδικασία ήταν αυτοματοποιημένη και δε χρειάστηκε η χρήση πασσάλων σε ένα τέτοιο περιορισμένο χώρο.

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής ήταν η επίτευξη του επιπέδου ακρίβειας της επίστρωσης, η αποτελεσματικότητα και η ταχύτητα των συστημάτων και η ενίσχυση της ασφάλειας των εργατών.



Εικόνα 16: Αριστερά: Η διάταξη των διαστρωτήρων στο πεδίο, Δεξιά: Το λογισμικό πεδίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία και εκτιμάται ότι μέχρι το έτος 2100 θα ανέρχεται ο ανθρώπινος πληθυσμός περί τα 10 δισεκατομμύρια, με αποτέλεσμα να υπάρχουν επιτακτικές ανάγκες και υψηλές πιέσεις και προσδοκίες στον κατασκευαστικό τομέα. Η συντήρηση όλου αυτού του πληθυσμού δημιουργεί όλο και περισσότερες εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν όλο και ταχύτερη παράδοση. Επίσης η τάση προς αποφυγή ενασχόλησης με τον κατασκευαστικό τομέα έχει μειώσει το ανθρώπινο δυναμικό, τόσο πληθυσμιακά όσο και γνωστικά. Ακόμα τα αυστηρά μέτρα που αφορούν περιβαλλοντικούς σκοπούς, όπως η εξοικονόμηση υλικών και η μείωση των καυσίμων, έχει δυσκολέψει τον κατασκευαστικό τομέα. Όλοι αυτοί οι λόγοι έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές σε αδιέξοδο, ψάχνοντας τον καλύτερο δυνατό τρόπο για την αύξηση της παραγωγικότητας σε συνδυασμό με την επιθυμητή ακρίβεια.

Το 90% των κατασκευαστικών εργασιών είτε ολοκληρώνονται αργοπορημένα είτε υπερβαίνουν τον αρχικό προϋπολογισμό. Σύμφωνα με το άρθρο της Trimble Civil Construction [37] αυτό που χρειάζεται ο τομέας είναι να επενδύσει στην νέα τεχνολογία και να αφομοιώσει νέες και πιο σύγχρονες τεχνικές. Με αυτό τον τρόπο εκτιμάται ο τομέας να παράγει κέρδη της τάξης των 1.6 τρισεκατομμυρίων και να προσθέτει 2% στη συνολική οικονομία. Ωστόσο ο φόβος των κατασκευαστών σε αυτή την επένδυση, έχει οδηγήσει στην επένδυση ανθρώπινου δυναμικού, που όσο πάει και μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι ο λιγότερο τεχνικά ανεπτυγμένος κλάδος στον κόσμο.

Σε αυτό το σημείο είναι που τα συστήματα αυτοματοποίησης και καθοδήγησης μηχανημάτων, μπορούν να λύσουν τα παραπάνω προβλήματα. Παρά, όμως, των αποδεδειγμένων δυνατοτήτων αυτών των συστημάτων, ακόμα οι ίδιοι κατασκευαστές αλλά και οι κατασκευαστικές εταιρίες διστάζουν στη συγκεκριμένη επένδυση. Παρακάτω ακολουθεί μια σειρά πλεονεκτημάτων και προκλήσεων των συγκεκριμένων συστημάτων, που αφορούν το σύνολο του κλάδου.

3.1 Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων καθοδήγησης και αυτοματισμού

Τα συστήματα καθοδήγησης και αυτοματισμού απαιτούν τη χρήση ειδικού γεωδαιτικού εξοπλισμού για τον προσδιορισμό της θέσης τους. Με αυτό τον τρόπο έχουν την ικανότητα να διαχειρίζονται και να ελέγχουν την ανύψωση του εργαλείου και του προσαρτήματος (λεπίδα, κουβάς, δαγκάνα), που αποτελεί την πιο δύσκολη πτυχή του χειρισμού ενός βαρέος οχήματος. Ένα λάθος στο χειρισμό του εργαλείου από το χειριστή, οδηγεί σε σημαντικές καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση του έργου και σημαντικά κόστη.

Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή εκσκαφής εάν ο χειριστής του οχήματος δεν εκτιμήσει σωστά και η τελική του εκσκαφή είναι εκτός του αρχικού σχεδίου (πχ 0.50m κάτω από το θεωρητικό) τότε χρειάζονται διορθωτικές ενέργειες, οι οποίες καθυστερούν την ολοκλήρωση του έργου, ίσως να οδηγήσουν σε άλλα σφάλματα, καταναλώνονται πολλά περισσότερα καύσιμα και εκθέτουν τους εργάτες πεδίου σε περισσότερο κίνδυνο.

Με το machine control αυτό το γεγονός αποφεύγεται, καθώς το σχέδιο υλοποιείται και παρακολουθείται ταυτόχρονα από τον ίδιο τον χειριστή, ο οποίος έχει καλύτερη εποπτεία. Το επιθυμητό αποτέλεσμα εμφανίζεται στην οθόνη που είναι μέσα στο μηχάνημα και δε χρειάζεται τη καθοδήγηση εργατών πεδίου ή εκτυπωμένων εγγράφων, δυσκολεύοντας το έργο του. Έτσι η εργασία μπορεί να ολοκληρωθεί με ένα πέρασμα, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό κάθε επανεπεξεργασία.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η απαξίωση σε παραδοσιακές μεθόδους, όπως η χρήση πασσάλων. Δε χρειάζεται πλέον η προεργασία τοποθέτησης πασσάλων ανά 5-10-20 μέτρα κατά μήκος και κατά πλάτος του πεδίου. Η προεργασία αυτή, πέρα το σφάλμα που έχει, λόγω της τοποθέτησης και της ανθρώπινης σήμανσης, απαιτεί αρκετό χρόνο και χωματουργική εργασία. Πλέον ο χειριστής έχοντας το μοντέλο στην οθόνη του δε χρειάζεται τους πασσάλους για να κατευθυνθεί και πόσο μάλλον το τμήμα μεταξύ των πασσάλων δεν εμπεριέχει αβέβαιο αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα μεταξύ των πασσάλων ο χειριστής δεν έχει εποπτεία του αποτελέσματος, ενώ με τη χρήση του μοντέλου γνωρίζει ακριβώς το αποτέλεσμα. Αυτό

είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων. Ένα εργοτάξιο χωρίς πασσάλους.

Η μεταφορά κυβικών μέτρων εδάφους με ακρίβεια εκατοστών ή και χιλιοστών, ανάλογα την εφαρμογή είναι μια δύσκολη και επίπονη εργασία. Μέχρι στιγμής επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα αλλά εις βάρος του χρόνου και χωρίς μεγάλη βεβαιότητα. Η καθοδήγηση μηχανημάτων εξαλείφει αυτές τις μεθόδους και κάνει τη δουλειά τους σε συντομότερο χρονικό διάστημα, με καλύτερη εποπτεία και καλύτερη ακρίβεια, με το αποτέλεσμα να βρίσκεται συνεχώς εντός των επιτρεπόμενων ορίων και ανοχών. Με αυτό το τρόπο και ένας λιγότερα έμπειρος χειριστής μπορεί να εργαστεί και να αποφέρει το επιθυμητό αποτελέσματα, προσελκύοντας έτσι νέο ανθρώπινο δυναμικό, το οποίο δε χρειάζεται την προϋπηρεσία που απαιτείται σε παραδοσιακά εργοτάξια.

Κάτι που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι η έκθεση εργατών πεδίου. Με το machine control η έκθεση αυτή μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια του προσωπικού και την μειώνοντας την ψυχική και σωματική κούραση. Δε χρειάζεται πλέον να βρίσκονται αρκετό προσωπικό κοντά στα βαρέα μηχανήματα σε ένα μη σταθερό έδαφος, καθώς η δουλειά την οποία επιτελούν (επίβλεψη και καθοδήγηση) πραγματοποιείται από τα συστήματα.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η ενημέρωση του υπάρχοντος μοντέλου. Με τις παραδοσιακές μεθόδους αν έπρεπε να γίνει μια ανανέωση στα υπάρχοντα σχέδια, τότε το εργοτάξιο διακόπτει τις εργασίες του μέχρι ο τοπογράφος μηχανικός να κάνει την εργασία που επιβάλλεται και να ανανεώσει το εργοτάξιο με νέους πασσάλους ή νέες ενδείξεις. Πλέον τα συνεργεία πεδίου μπορούν να ξεκινήσουν προγραμματιστές εργασίες χωρίς να επιβαρύνουν χρονικά το εργοτάξιο και να ενημερώνουν ταυτόχρονα τα σχέδια, δηλαδή το μοντέλο, με αποτέλεσμα να εξοικονομείται σημαντικός χρόνος.

Μειώνοντας επίπονες δραστηριότητες πεδίου, όπως η συνεχής σήμανση, η συνεχής επίβλεψη, η έκθεση σε κίνδυνο, η καθυστέρηση όλου του εργοταξίου για τοπογραφικές εργασίες έχει βελτιώσει αισθητά τις συνθήκες εργασίες και έχει κάνει την εργασία σε εργοτάξιο πιο ευχάριστη βελτιώνοντας τις μεταξύ σχέσεις του προσωπικού.

Ακόμα στο μοντέλο μπορούν να ενταχθούν πληροφορίες που αφορούν υπόγεια δίκτυα και να οριστεί μια ζώνη για την αποφυγή καταστροφής αυτών των εγκαταστάσεων.

Με όλη αυτή την οικονομία χρόνου, επιτυγχάνονται περιβαλλοντικοί στόχοι, που αφορούν τη χρήση καυσίμων. Επίσης δίνεται μεγαλύτερη παράταση ζωής στα βαρέα μηχανήματα, αφού μειώνονται οι ώρες λειτουργίας τους.

Οπότε τα συστήματα καθοδήγησης και αυτοματισμού βελτιώνουν αισθητά το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου στην επιθυμητή ακρίβεια, επιτυγχάνοντας περιβαλλοντικούς στόχους, βελτιώνοντας τις συνθήκες εργασίας και δίνοντας παράταση ζωής στον εξοπλισμό.

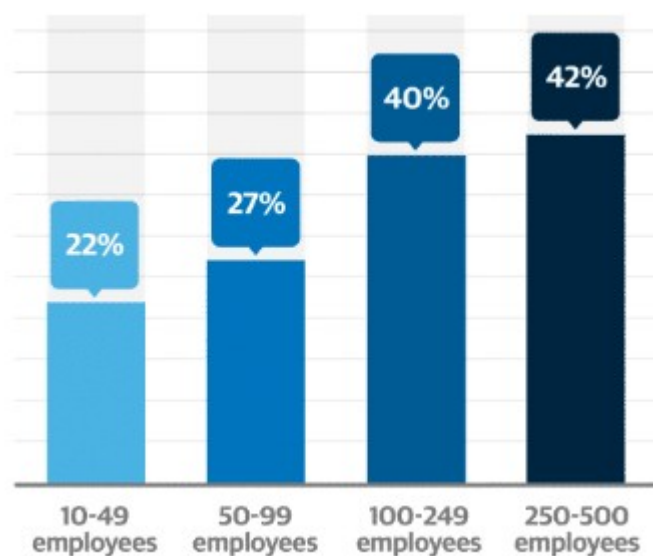
3.2 Οι προκλήσεις των συστημάτων καθοδήγησης και αυτοματισμού

Όπως κάθε νέα τεχνολογία, έτσι και αυτή εμφανίζει σημαντικές προκλήσεις και δυσκολίες που καλούνται να αντιμετωπιστούν με σκοπό την αφομοίωση της τεχνολογίας στην καθημερινότητα του κατασκευαστικού κλάδου. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο κατασκευαστικός κλάδος είναι ένας παραδοσιακός κλάδος. Ένας κλάδος που δεν αφομοιώνει εύκολα τη νέα τεχνολογία και επιλέγει τον παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας. Ωστόσο οι μέχρι τώρα παραδοσιακές μέθοδοι δεν εμφανίζουν σημαντικά σφάλματα και έχουν επιθυμητά αποτελέσματα έχοντας φτάσει όμως στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους και δεν μπορούν να καλύψουν το τεράστιο όγκο δουλειάς.

Σύμφωνα με την έρευνα της Torcon [32], κατά την οποία ερωτήθηκαν 1000 υπεύθυνοι, διευθυντές εταιρειών και εργολάβοι από τον κατασκευαστικό τομέα σε αγορές κατά μήκος της Ευρώπης, έγινε σημαντική καταγραφή για το πώς χρησιμοποιείται η νέα τεχνολογία και ποιοι παράγοντες ανακόπτουν την πλήρη ενσωμάτωσή της (διάγραμμα 1).

Από την έρευνα αυτή μόνο το 3% του δείγματος χρησιμοποιεί τον αυτοματισμό στο μεγαλύτερο ποσοστό των εργασιών, δείχνοντας πως οι εργολάβοι είναι άγνωστοι με το machine control. Από αυτό το ποσοστό είναι γεγονός ότι μονάχα το 1% χρησιμοποιεί την τεχνολογία σε κάθε

πιθανή εργασία με την πλειοψηφία να τη χρησιμοποιεί κατά διαστήματα, άλλοτε λιγότερο άλλοτε περισσότερο, αλλά σε συγκριμένες εφαρμογές.



Διάγραμμα 1: Ο μέσος όρος των εφαρμογών που χρησιμοποιούν το machine control ανάλογα το μέγεθος της εταιρείας[32]

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ότι οι μεγαλύτερες εταιρείες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν την τεχνολογία σε περισσότερες εφαρμογές. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στη δυνατότητα επένδυσης στο συγκεκριμένο εξοπλισμό ή στην ανάληψη δυσκολότερων και μεγαλύτερων εργασιών που απαιτούν την καθοδήγηση μηχανημάτων.

Γεωγραφικά μόνο 7 χώρες της Ευρώπης εμφανίζουν ποσοστό αφομοίωσης της τεχνολογίας μεγαλύτερο του 30%, με αυτές να είναι οι σκανδιναβικές χώρες (Σουηδία, Φινλανδία, Νορβηγία, Δανία) (36%), η Γερμανία (36%), το Ηνωμένο Βασίλειο (32%) και το Βέλγιο (31%). Ποσοστά χαμηλά, δείχνοντας πως ακόμα η τεχνολογία δεν έχει αφομοιωθεί από τις μεγαλύτερες οικονομικά δυνατές χώρες.

Υπάρχουν 8 παράγοντες που εμποδίζουν τις εταιρείες να προχωρήσουν στη συγκεκριμένη επένδυση, οι οποίες παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.

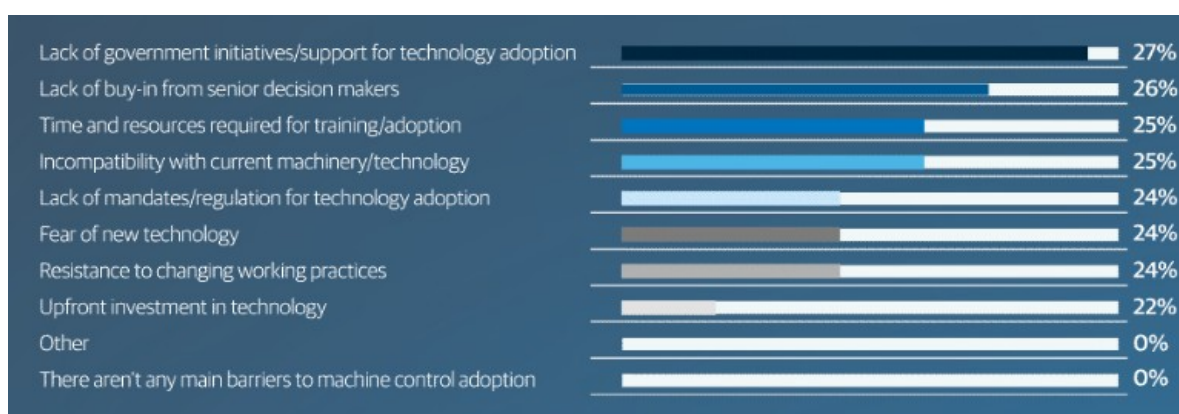
Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η μη ύπαρξη νομικού πλαισίου που να ορίζει όρους και προϋποθέσεις για την υποστήριξη της τεχνολογικής ενσωμάτωσης είναι ο λόγος που προβληματίζει περισσότερο τις

εταιρείες. Η αδυναμία της κυβέρνησης να υποστηρίξει αυτό το εγχείρημα οδηγεί σε μεγάλο επενδυτικό ρίσκο για τις εταιρείες, το οποίο οι περισσότερες επιλέγουν να μην πάρουν.

Μια τέτοια επένδυση έχει 2-3 πολύ σημαντικά έξοδα τα οποία αποθαρρύνουν τις εταιρείες από την πραγματοποίηση της επένδυσης. Ο ποιος σημαντικός για τους περισσότερους είναι από ποιο τοπογραφικό/γεωδαιτικό οίκο (Trimble, Leica, Topcon κ.α) θα γίνει η αγορά και ακόμα ότι δεν υπάρχουν οι αντίστοιχες αντιπροσωπείες με τα αντίστοιχα προϊόντα δημιουργώντας αίσθημα ανασφάλειας. Επίσης πέρα από την αγορά είναι απαραίτητη η επένδυση σε χρόνο και πόρους για την εκπαίδευση του προσωπικού πάνω στη νέα τεχνολογία. Τέλος η εγκατάσταση του εξοπλισμού αλλά και η αγορά του αντίστοιχου μηχανοκίνητου στόλου αποτελεί σημαντικό εμπόδιο.

Με λίγα λόγια η επένδυση στο συγκεκριμένο εξοπλισμό έχει υψηλό κόστος, το οποίο χωρίς κρατική υποστήριξη είναι απαγορευτικό για πολλές εταιρείες και αποθαρρύνει σημαντικά αυτήν την επένδυση.

Τέλος, προσωπικοί λόγοι των εργολάβων, όπως η άρνηση για μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους στις σύγχρονες και η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων στο τελικό προϊόν οδηγούν στη μη αξιοποίηση των συστημάτων.



Διάγραμμα 2: Ανασταλτικοί παράγοντες στην ενσωμάτωση του machine control [35]

Όσο αφορά τον ελλαδικό χώρο, δεν υπάρχει το κατάλληλο νομικό πλαίσιο (ΦΕΚ ή προεδρικό διάταγμα) ώστε να παρακινεί τους

κατασκευαστές στην αξιοποίηση των συστημάτων. Ακόμα δεν υπάρχουν πολλοί προμηθευτές τέτοιων συστημάτων, οι οποίοι είναι ελάχιστοι και οι κυρίαρχοι της αγοράς είναι η Mobact Solution.

Αυτοί είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους δεν έχουν αξιοποιηθεί στο βαθμό που θα έπρεπε τα συστήματα αυτοματισμού και καθοδήγησης, τόσο γενικά όσο και στον ελλαδικό χώρο.

Οπότε, παρόλο που τα συστήματα αυτά αποδεδειγμένα έχουν αποδείξει την αξιοπιστία τους σε θέματα ακρίβειας, οικονομίας χρόνου και καυσίμων και ταχύτητας δεν έχουν καταφέρει να εδραιωθούν στον κατασκευαστικό κλάδο. Η αδυναμία της εκάστοτε κυβέρνησης να υποστηρίξει τη νέα τεχνολογία σε συνδυασμό με την ελλειπή ενημέρωση έχουν οδηγήσει στην αδράνεια των συστημάτων, με ελάχιστες εξαιρέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η αυτοματοποίηση και η καθοδήγηση μηχανημάτων έχει πληθώρα εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα και κατ' επέκταση στην οδοποιία και εκτελεί τις ίδιες παραδοσιακές εφαρμογές. Εφαρμογές, όπως η υψομετρική υλοποίηση του εδάφους, η εκσκαφή βάθους 2 μέτρων, η κατασκευή οδικού δικτύου, η κατασκευή της επιθυμητής κλίσης και επίκλησης κ.ά εκτελούνται με τη μέθοδο του machine control σε μικρότερο χρονικό διάστημα, με μεγαλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση παραμένει ένα αδρά γεωδαιτικό πρόβλημα το οποίο βασίζεται στις βασικές αρχές της γεωδαισίας και οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Σκοπός αυτός του κεφαλαίου είναι η περιγραφή, με βάση τη γεωδαιτική σκοπιά, όλης της διαδικασίας υλοποίησης τριών εφαρμογών. Οι εφαρμογές που θα αναλυθούν είναι:

- 1. Υψομετρική υλοποίηση ενός γηπέδου με χρήση laser χωροβάτη**
- 2. Κατασκευή οδού 1 χιλιομέτρου με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού**
- 3. Εκσκαφή εδάφους με χρήση δεκτών GNSS**

Η ανάλυση των εφαρμογών είναι θεωρητική και τα αριθμητικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν δεν αποτελούν πραγματικές εφαρμογές. Η ανάλυση γίνεται από την οπτική του σχεδιασμού της κάθε εφαρμογής και το πως τα συστήματα αυτοματοποίησης και καθοδήγησης εκτελούν το τελικό παραδοτέο και πως είναι δυνατός ο έλεγχος της εφαρμογής των συστημάτων.

Σε ένα τεχνικό έργο η γεωδαιτική διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής

1. Ίδρυση Τριγωνομετρικών και Πολυγωνομετρικών δικτύων
2. Αποτύπωση ΦΓΕ
3. Δημιουργία κατασκευαστικού σχεδίου

4. Εφαρμογή του μοντέλου στο πεδίο

5. Έλεγχος

Τα πρώτα δύο στάδια είναι κοινά για όλες τις εφαρμογές και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Η δημιουργία του κατασκευαστικού σχεδίου εξαρτάται από την εφαρμογή και τα ζητούμενα του έργου, όπως και η εφαρμογή του μοντέλου. Ο έλεγχος ακολουθεί την ίδια διαδικασία και λογική σε όλες τις εφαρμογές.

4.1 Ίδρυση Τριγωνομετρικών και Πολυγωνομετρικών δικτύων

Ως δίκτυο ορίζεται ένα σύνολο μόνιμων σημείων εγκαταστημένων σε μια περιοχή. Τα σημεία αυτά, που ονομάζονται και κορυφές του δικτύου, συνδέονται μεταξύ τους με μετρήσεις και είναι γνωστή η θέση τους σε μια, δύο, τρεις ή τέσσερις διαστάσεις. Έτσι τα δίκτυα διακρίνονται σε:

- Μονοδιάστατα ή υψομετρικά δίκτυα ή δίκτυα κατακορύφου ελέγχου
- Δισδιάστατα ή οριζόντια δίκτυα ή δίκτυα οριζοντίου ελέγχου
- Τρισδιάστατα δίκτυα
- Τετραδιάστατα δίκτυα δηλαδή τρισδιάστατα δίκτυα σε συγκεκριμένο χρόνο (εποχή)

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων των κορυφών ενός δικτύου είναι πάντοτε μικρότερη της απαιτούμενης αβεβαιότητας των γεωδαιτικών παραγώγων που παρέχονται για μια περιοχή.

Πύκνωση ή επέκταση δικτύου ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία, για τις ανάγκες μιας γεωδαιτικής εφαρμογής, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός ή περισσότερων νέων σημείων του, τα οποία προστίθενται στο υπάρχον δίκτυο. Για να γίνει αυτό απαιτούνται η υλοποίηση των νέων σημείων και οι απαραίτητες μετρήσεις για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων τους.

Η ίδρυση ενός νέου δικτύου σε ένα τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς ή η πύκνωση του κρατικού δικτύου γίνεται με σκοπό τη δημιουργία ενός γεωδαιτικού σκελετού της περιοχής. Από τα σημεία του δικτύου θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις των σημείων λεπτομερειών, που

αφορούν την αποτύπωση ενός τμήματος της ΦΓΕ και των κατασκευών που περιλαμβάνει ή ενός τεχνικού έργου.

Όταν γίνεται η πύκνωση του κρατικού δικτύου, τότε πραγματοποιείται και η ένταξη της περιοχής αυτής στο κρατικό σύστημα αναφοράς και η πύκνωση πραγματοποιείται σε αποτυπώσεις μεγάλων περιοχών ή όταν απαιτείται η γνώση ενός τμήματος της ΦΓΕ με μοναδικό τρόπο.

Τριγωνομετρικά σημεία και πολυγωνομετρικά σημεία ονομάζονται τα σημεία των οποίων προσδιορίζονται οι συντεταγμένες σε δύο ή τρεις διαστάσεις και πυκνώνουν δίκτυα δισδιάστατα ή τρισδιάστατα.

Υψομετρικές αφετηρίες ή Reperes ονομάζονται τα σημεία με τα οποία γίνεται η πύκνωση υψομετρικών δικτύων. Για τα σημεία αυτά προσδιορίζεται μόνο η μια τους διάσταση (υψόμετρο).

4.1.1 Υλοποίηση – σήμανση των κορυφών των δικτύων σε ένα τεχνικό έργο

Η σήμανση των κορυφών του δικτύου είναι συνήθως μόνιμη. Σε κάποιες περιπτώσεις, ανάλογα και τη σπουδαιότητα, τη χρήση και του δικτύου που ανήκει το σημείο μπορεί η σήμανση να είναι είτε ημιμόνιμη είτε προσωρινή.

Η ιδιότητα που ορίζει κάθε σήμανση είναι η εξασφάλιση της μοναδικότητας του σημείου, για να είναι εφικτή η ακριβής κέντρωση του γεωδαιτικού οργάνου στο σημείο αλλά και η ακριβής μέτρησή του. Τα υλικά και οι κατασκευές που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάλογα την εφαρμογή αλλά και το σημείο τοποθέτησής τους.

Σε ένα τεχνικό έργο, εξαιτίας των μετακινήσεων βαρέων οχημάτων αλλά και ανθρώπινου δυναμικού, οι κορυφές του οποιουδήποτε δικτύου επιλέγονται να βρίσκονται εκτός του τεχνικού έργου για να αποφεύγεται η πιθανότητα καταστροφής του σημείου, το οποίο ισοδυναμεί σε απώλεια δουλειάς.

Οι πιο σύνηθες μόνιμες κατασκευές που χρησιμοποιούνται για τη σήμανση τριγωνομετρικών ή πολυγωνομετρικών σημείων είναι οι παρακάτω (εικόνα 17).

- Βάθρα από σκυρόδεμα

- Βάθρα από PVC γεμάτα με μπετόν
- Μπρούτζινα μπουλόνια πακτωμένα με ρητίνη ή απλό σκυρόδεμα

Στις ημιμόνιμες σημάνσεις χρησιμοποιούνται ατσαλόκαρφα ή ξύλινοι πάσσαλοι ενώ στις προσωρινές σημάνσεις χρησιμοποιούνται αυτοκόλλητοι στόχοι ή μαρκαδόροι μεγάλης διάρκειας (εικόνα 17).

Σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, χρησιμοποιούνται βάσεις εξαναγκασμένης κέντρωσης ή ειδικές βάσεις τριχογλίων που ελαχιστοποιούν το σφάλμα στην τοποθέτηση οργάνων και στόχων στο $\pm 0.1mm$ (εικόνα 17).

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των σημείων είναι ότι πρέπει να εξασφαλίζεται η δυνατότητα τοποθέτησης και οριζοντίωσης του γεωδαιτικού οργάνου και η δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων.

Η αναγνώριση ενός σημείου μπορεί να γίνει και με τη χρήση δεκτών GNSS, με την προϋπόθεση οι συντεταγμένες του σημείου να είναι γνωστές στο κρατικό ή παγκόσμιο σύστημα αναφοράς.

Για την σήμανση υψομετρικών αφετηριών, που είναι συνήθως μόνιμη, χρησιμοποιούνται ορειχάλκινα μπουλόνια με κυλινδρική ή σφαιρική κεφαλή, τα οποία πακτώνονται οριζόντια σε τοίχους με ειδική εποξειδική ρητίνη ή μπετόν (εικόνα 18). Το σημείο τοποθέτησης πρέπει να εξασφαλίζει τη δυνατότητα κατακόρυφης τοποθέτησης της σταδίας και το μοναδικό τρόπο έδρασης της βάσης της σταδίας κατά τη μέτρηση.



Εικόνα 17: Παραδείγματα σήμανσης κορυφών δικτύου



Εικόνα 18: Υψομετρικές αφετηρίες

4.1.2 Συνόρθωση γεωδαιτικών δικτύων

Με τον όρο **συνόρθωση δικτύων**, ορίζεται η διαδικασία με την οποία οι μετρήσεις των μεγεθών του δικτύου (υψομετρικές διαφορές, αποστάσεις, οριζόντιες γωνίες ή διευθύνσεις, κατακόρυφες γωνίες) στις οποίες εμπεριέχονται τυχαία σφάλματα, αντικαθίστανται από νέες συμβιβαστές μεταξύ τους τιμές ώστε να ικανοποιείται το μαθηματικό μοντέλο.

Τα είδη των δικτύων που επιλύονται είναι τρία και είναι αυτά που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.1 (μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα) και όλα επιλύονται με την ίδια μέθοδο, η οποία είναι η **μέθοδος των εμμέσων μετρήσεων**.

Σε κάθε δίκτυο, πριν την υλοποίηση του ακόμα, πρέπει να ορισθεί ένα **σύστημα αναφοράς** για τον προσδιορισμό των τιμών του υψομέτρου ή των συντεταγμένων των κορυφών. Τα δίκτυα, ανάλογα τα δεδομένα και τις μετρήσεις, διακρίνονται σε **ορισμένα** και **ελεύθερα**. Ορισμένα ένα δίκτυο το οποίο έχει τα απαραίτητα δεδομένα για να ορίσει το σύστημα αναφοράς του.

Οπότε ορισμένα είναι ένα

- ➔ Μονοδιάστατο δίκτυο, όταν θεωρείται γνωστή, χωρίς σφάλμα, η τιμή τουλάχιστον μίας κορυφής του
- ➔ Δισδιάστατο δίκτυο ή τρισδιάστατο τοποκεντρικό δίκτυο, όταν θεωρούνται γνωστές, χωρίς σφάλμα, οι συντεταγμένες μίας κορυφής του δικτύου (ορίζεται η θέση), όταν θεωρείται γνωστή τουλάχιστον μία διεύθυνση ή έχουν μετρηθεί περισσότερα από ένα αζιμούθια (ορίζεται ο προσανατολισμός) και όταν θεωρείται γνωστή τουλάχιστον μία απόσταση ή έχουν μετρηθεί περισσότερες από μία αποστάσεις (ορίζεται η κλίμακα). Στην περίπτωση που δύο κορυφές του δικτύου είναι γνωστές, τότε το δίκτυο είναι οπωσδήποτε ορισμένο
- ➔ Τρισδιάστατο δίκτυο, όταν θεωρούνται γνωστές οι συντεταγμένες μίας κορυφής του δικτύου.

Σε ένα ορισμένο δίκτυο είναι δυνατός ο υπολογισμός των τιμών ή των συντεταγμένων των άγνωστων κορυφών του δικτύου. Έτσι, αν ο αριθμός των άγνωστων κορυφών είναι n , τότε οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι είναι

$$m=D \cdot v \quad (4.1)$$

με D να είναι η διάσταση του δικτύου.

Αν κάποιο από τα παραπάνω μεγέθη που προαναφέρθηκαν δεν είναι μετρημένα-γνωστά τότε το δίκτυο είναι **ελεύθερο** και τα μεγέθη αυτά ονομάζονται **ατέλειες**. Συνεπώς ελεύθερο είναι ένα

- ➔ Μονοδιάστατο δίκτυο, χωρίς γνωστή τιμή σε καμία κορυφή και επομένως έχει μία ατέλεια
- ➔ Δισδιάστατο δίκτυο ή τρισδιάστατο τοποκεντρικό δίκτυο , χωρίς γνωστές συντεταγμένες σε καμία κορυφή (2 ή 3 ατέλειες θέσης), ή/και χωρίς γνωστή κλίμακα (1 ατέλεια κλίμακας) ή/και χωρίς γνωστό προσανατολισμό (1 ατέλεια προσανατολισμού).
- ➔ Τρισδιάστατο δίκτυο, χωρίς γνωστές τις συντεταγμένες σε καμία κορυφή και επομένως έχει 3 ατέλειες θέσεις.

Σε ένα ελεύθερο δίκτυο αν ο αριθμός των άγνωστων κορυφών του είναι v , τότε οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι είναι

$$m=D \cdot v - d \quad (4.2)$$

με D να είναι η διάσταση του δικτύου και d να είναι ο αριθμός των ατελειών.

Για την εφαρμογή της μεθόδου των εμμέσων μετρήσεων πρέπει να γίνει άρση των ατελειών, χωρίς να επηρεάζονται οι μετρήσεις ⁴. Η άρση των ατελειών γίνεται είτε με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, που είναι ο πιο συχνός τρόπος, είτε με τις ελάχιστες εσωτερικές δεσμεύσεις.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι:

- Σχηματίζονται εξισώσεις συνθηκών που συνδέουν κάθε μέτρηση γραμμικά με τις καλύτερες τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων
- Ο αριθμός των εξισώσεων είναι ίσος με τον αριθμό των μετρήσεων
- Το κανονικό σύστημα αποτελείται από m εξισώσεις με m αγνώστους, όπου m ο αριθμός των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων.

⁴Η άρση ατελειών εξυπηρετεί στον ορισμό του συστήματος αναφοράς και στη δυνατότητα αντιστροφής του πίνακα N των συντελεστών των αγνώστων των εξισώσεων του κανονικού συστήματος

Οι άγνωστοι που προσδιορίζονται άμεσα με τη μέθοδο αυτή είναι οι καλύτερες τιμές \hat{x}_i των m ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων. Έτσι το συναρτησιακό μοντέλο των n εξισώσεων παρατηρήσεων που εκφράζουν τις καλύτερες τιμές $\hat{l}_i = l_i + u_i$ των μετρήσεων δίνονται από τη σχέση

$$A \hat{x} = \delta l + v \quad (4.3)$$

όπου

$$\delta l = l_\mu - l_\pi \quad (4.4)$$

και

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \hline \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nn} \\ \hline \end{array} \quad \hat{x} = \begin{array}{|c|} \hline \hat{x}_1 \\ \hline \hat{x}_2 \\ \hline \dots \\ \hline \hat{x}_m \\ \hline \end{array} \quad \delta l = \begin{array}{|c|} \hline \delta l_1 \\ \hline \delta l_2 \\ \hline \dots \\ \hline \delta l_n \\ \hline \end{array}$$

$$\delta l = \begin{array}{|c|} \hline \delta l_1 \\ \hline \delta l_2 \\ \hline \dots \\ \hline \delta l_n \\ \hline \end{array} \quad u = \begin{array}{|c|} \hline u_1 \\ \hline u_2 \\ \hline \dots \\ \hline u_n \\ \hline \end{array}$$

Η λύση θα είναι εκείνη που ικανοποιεί την αρχή της Μ. Ε. Τ.

$$S = u^T P u = \min \quad (4.5)$$

Με βάση τη σχέση 4.3 προκύπτει ότι

$$A^T P A \quad (4.6)$$

Θεωρώντας

$$N=A^T P A \quad (4.7)$$

και

$$v=A^T P \delta l \quad (4.8)$$

η σχέση 4.6 γράφεται

$$N \hat{x}=u \Rightarrow \hat{x}=N^{-1} u \Rightarrow \hat{x}=(A^T P A)^{-1} A^T P \delta l \quad (4.9)$$

Ο τελικός πίνακας μεταβλητότητας- συμμεταβλητότητας δίνεται από τη σχέση

$$V_{\hat{x}}=\sigma_o^2 N^{-1} \quad (4.10)$$

με

$$\sigma_o^2=\frac{u^T P u}{n-m} \quad (4.11)$$

Στην περίπτωση μη γραμμικών εξισώσεων μετρήσεων, τότε αυτές αναπτύσσονται κατά Taylor σε κάποια θέση και γραμμικοποιούνται, μεταβάλλοντας μόνο τον πίνακα A, ο οποίος εμπεριέχει τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων παρατήρησης ως προς τις άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους. Λόγω της γραμμικοποίησης, δεν επιτυγχάνεται με την πρώτη λύση το επιθυμητό αποτέλεσμα, αλλά δημιουργείται το διάνυσμα δx , που αποτελεί τις διορθώσεις των προσωρινών τιμών και γίνονται διαδοχικές επαναλήψεις έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια. Επομένως

$$\hat{x}=x^o+\delta x \quad (4.12)$$

A: Πίνακας σχεδιασμού

P: Πίνακας βαρών

l: Διάνυσμα των μετρήσεων

N: Πίνακας βαρών του διανύσματος \hat{x}

u: Διάνυσμα υπολοίπων

x^o : Διάνυσμα προσωρινών τιμών

δx : Διάνυσμα διορθώσεων

\hat{x} : Διάνυσμα καλύτερων τιμών των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων

$V^{\hat{x}}$: Πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας

σ_o^2 : a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους

I_{μ} : Διάνυσμα μετρημένων μεγεθών

I_{π} : Διάνυσμα προσωρινών τιμών των μετρημένων μεγεθών

4.1.3 Πολυγωνομετρία

Με τη μέθοδο της πολυγωνομετρίας επιτυγχάνεται η πύκνωση ενός υφιστάμενου κρατικού ή τοπικού δικτύου με τη δημιουργία πολυγωνικών οδεύσεων.

Ως πολυγωνική όδευση ή απλά όδευση ορίζεται μια τεθλασμένη γραμμή που αποτελείται από κορυφές των οποίων ζητούνται οι συντεταγμένες σε κάποια σύστημα αναφοράς. Τα στοιχεία της όδευσης είναι οι κορυφές, οι πλευρές και οι γωνίες θλάσης. Οι κορυφές, αλλιώς και πολυγωνικά σημεία, υλοποιούνται στο έδαφος και πρέπει να είναι προσβάσιμα και ανά δύο διαδοχικά να έχουν άμεση ορατότητα. Οι πλευρές της όδευσης είναι το ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από την προβολή δύο διαδοχικών κορυφών στο οριζόντιο επίπεδο. Τέλος, ως γωνία θλάσης, ορίζεται η οριζόντια γωνία που προκύπτει από δύο διαδοχικές πλευρές, όταν η προηγούμενη πλευρά στραφεί δεξιόστροφα για να συναντήσει την επόμενη.

Οι οδεύσεις διακρίνονται ανάλογα με το σχήμα τους, το σύστημα αναφοράς στο οποίο εντάσσονται, την ποιότητα εξάρτησης και την αβεβαιότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων των κορυφών τους.

Ανάλογα το σχήμα οι οδεύσεις διακρίνονται σε κλειστές και ανοιχτές. Κλειστές είναι οι οδεύσεις στις οποίες η πρώτη και η τελευταία κορυφή αποτελούν το ίδιο σημείο (συμπίπτουν), δηλαδή έχει μορφή κλειστού πολυγώνου (σχήμα 13), ενώ ανοιχτές είναι οι οδεύσεις στις οποίες η πρώτη και η τελευταία κορυφή είναι ανεξάρτητα σημεία (σχήμα 12).

Ανάλογα το σύστημα αναφοράς στο οποίο εντάσσονται διακρίνονται σε ανεξάρτητες και εξαρτημένες. Ανεξάρτητη είναι η όδευση η οποία εντάσσεται σε τοπικό σύστημα αναφοράς ενώ εξαρτημένη είναι η όδευση που εντάσσεται στο κρατικό σύστημα αναφοράς.

Ανάλογα με την ποιότητα εξάρτησης οι οδεύσεις διακρίνονται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες. Πρωτεύουσες ή κύριες οδεύσεις ονομάζονται οι οδεύσεις στις οποίες η πρώτη και η τελευταία κορυφή τους είναι τριγωνομετρικά σημεία. Δευτερεύουσες οδεύσεις ονομάζονται οι οδεύσεις στις οποίες η πρώτη και η τελευταία κορυφή τους είναι πολυγωνομετρικά σημεία πρωτευουσών οδεύσεων.

Τέλος ανάλογα την αβεβαιότητά τους διακρίνονται σε οδεύσεις υψηλής ακρίβειας και σε οδεύσεις μέσης ακρίβειας.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε μια όδευση είναι μετρήσεις μηκών, οριζόντιων γωνιών και ζενίθιων γωνιών, σε τουλάχιστον δύο περιόδους σε μετάβαση και επιστροφή, για μεγαλύτερη ακρίβεια και απαλοιφή σφαλμάτων. Ακόμα μετρούνται Ύψος Στόχου και Ύψος Οργάνου εάν επρόκειτο να επιλυθεί η όδευση και υψομετρικά.

Οι οδεύσεις που υλοποιούνται είναι είτε ανοιχτές πλήρως εξαρτημένες και από τα δύο άκρα ή κλειστές εξαρτημένες οδεύσεις με τη μέθοδο Bodwich. Οι συγκεκριμένοι τύποι οδεύσεων επιτρέπουν τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων τους και μπορούν να υπολογίσουν το σφάλμα των συντεταγμένων των κορυφών τους. Οι οδεύσεις επιλύονται οριζοντιογραφικά και υψομετρικά, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Οριζοντιογραφική επίλυση όδευσης

Αρχικά υπολογίζονται με το 2ο Θ.Π οι γωνίες διεύθυνσης – οι γωνίες εξάρτησης

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{\Delta X_{ij}}{\Delta Y_{ij}}\right) \quad (4.13)$$

με την αντίστοιχη διερεύνηση

$$\text{Αν } \Delta X_{ij} > 0 \text{ και } \Delta Y_{ij} > 0 \rightarrow \alpha_{ij} = 0g + \alpha_{ij}$$

$$\text{Αν } \Delta X_{ij} > 0 \text{ και } \Delta y_{ij} < 0 \rightarrow \alpha_{ij} = 200g + \alpha_{ij}$$

$$\text{Αν } \Delta x_{ij} < 0 \text{ και } \Delta y_{ij} < 0 \rightarrow \alpha_{ij} = 200g + \alpha_{ij}$$

$$\text{Αν } \Delta x_{ij} < 0 \text{ και } \Delta Y_{ij} > 0 \rightarrow \alpha_{ij} = 400g + \alpha_{ij}$$

Έπειτα υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης της τελικής γωνίας εξάρτησης με εφαρμογή του 3ου Θ.Π από τις μετρήσεις της όδευσης

$$\alpha_{n,n+1} = \alpha_{01} + \sum_{i=1}^n \beta_i + n \cdot 200_g - k \cdot 400_g \quad (4.14)$$

με β_i τις γωνίες θλάσης, n ο αριθμός των μετρημένων γωνιών και k ακέραιος αριθμός

Στη συνέχεια υπολογίζεται το γωνιακό σφάλμα

$$\omega_\beta = \alpha_{n,n+1}^{\pi\phi} - \alpha_{n,n+1}^\mu \quad (4.15)$$

Υπολογίζεται η αναλογική διόρθωση σε κάθε γωνία που μετρήθηκε και υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές των γωνιών

$$\delta_\beta = \frac{\omega_\beta}{v} \quad (4.16)$$

v :αριθμός μετρημένων γωνιών

$$\beta'_i = \beta_i + \delta_\beta \quad (4.17)$$

Έτσι υπολογίζονται οι τελικές γωνίες διεύθυνσης κάθε πλευράς με εφαρμογή του 3ου Θ.Π και της σχέσης

$$\alpha_{i,(i+1)} = \alpha_{(i-1),i} + \beta'_i + 200_g - k \cdot 400_g \quad (4.18)$$

Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών της όδευσης, οι οποίες διορθώνονται για κλίση, ανάγονται στη μσθ εάν είναι απαραίτητο και ανάγονται λόγω χαρτογραφικής προβολής.

$$S_{ij} = D_{ij} \cdot \sin z_{ij} \quad (4.19)$$

διόρθωση για κλίση

$$S_{ij}^{\mu\sigma\theta} = \sqrt{\frac{D_{ij}^2 - \Delta H_{ij}^2}{\left(1 + \frac{H_i + YO}{R}\right) \left(1 + \frac{H_j + Y\Sigma}{R}\right)}} \quad (4.20)$$

αναγωγή στη μσθ

$$S_{ij}^{EΓΣA} = K S_{ij}^{\mu\sigma\theta} \quad (4.21)$$

αναγωγή λόγω χαρτογραφικής προβολής (ΕΓΣΑ 87)

$$K=K_o+0.012311(X-X_o)^2 \quad (4.22)$$

προσδιορισμό συντελεστή κλίμακας

$$K_o=0.9996$$

X=το μέσο X της περιοχής σε Mm

Αφού υπολογιστούν οι αποστάσεις υπολογίζονται οι προσωρινές διορθώσεις των συντεταγμένων από το 1ο Θ.Π

$$\Delta X'_{ij}=S_{ij}^{ΕΓΣΑ} \sin \alpha_{ij} \quad (4.23)$$

και

$$\Delta Y'_{ij}=S_{ij}^{ΕΓΣΑ} \cos \alpha_{ij} \quad (4.24)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντεταγμένες της τελευταίας κορυφής

$$X'_n=X'_1+\sum \Delta X' \quad (4.25)$$

και

$$Y'_n=Y'_1+\sum \Delta Y' \quad (4.26)$$

Υπολογίζεται το γραμμικό σφάλμα

κατά X

$$\omega_X=X_n-X'_n \quad (4.27)$$

κατά Y

$$\omega_Y=Y_n-Y'_n \quad (4.28)$$

το ολικό γραμμικό σφάλμα

$$\omega_s=\sqrt{\omega_X^2+\omega_Y^2} \quad (4.29)$$

και η γωνία του γραμμικού σφάλματος

$$\alpha_{\omega_s}=\arctan \frac{\omega_X}{\omega_Y} \quad (4.30)$$

Υπολογίζονται οι διορθώσεις

$$\delta_{\Delta X_{ij}} = \omega_X \frac{S_{ij}}{\Sigma S} \quad (4.31)$$

και

$$\delta_{\Delta Y_{ij}} = \omega_Y \frac{S_{ij}}{\Sigma S} \quad (4.32)$$

Υπολογίζονται οι τελικές τιμές των διορθώσεων των συντεταγμένων

$$\Delta X_{ij} = \Delta X'_{ij} + \delta_{\Delta X_{ij}} \quad (4.33)$$

και

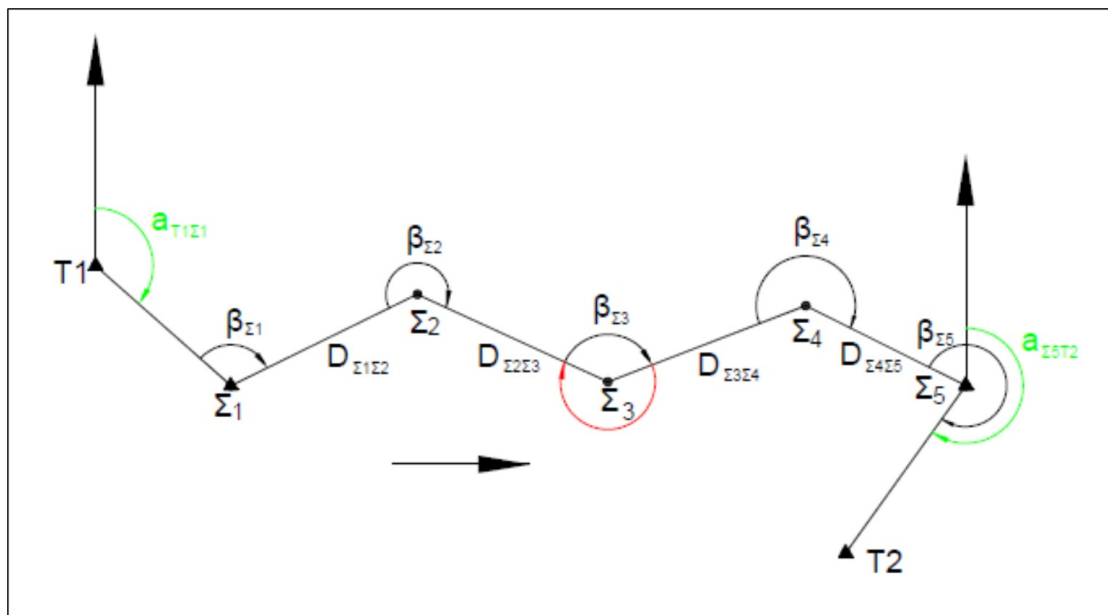
$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y'_{ij} + \delta_{\Delta Y_{ij}} \quad (4.34)$$

Και τέλος με εφαρμογή του 1ου Θ.Π υπολογίζονται οι τελικές τιμές των συντεταγμένων των κορυφών από τις σχέσεις

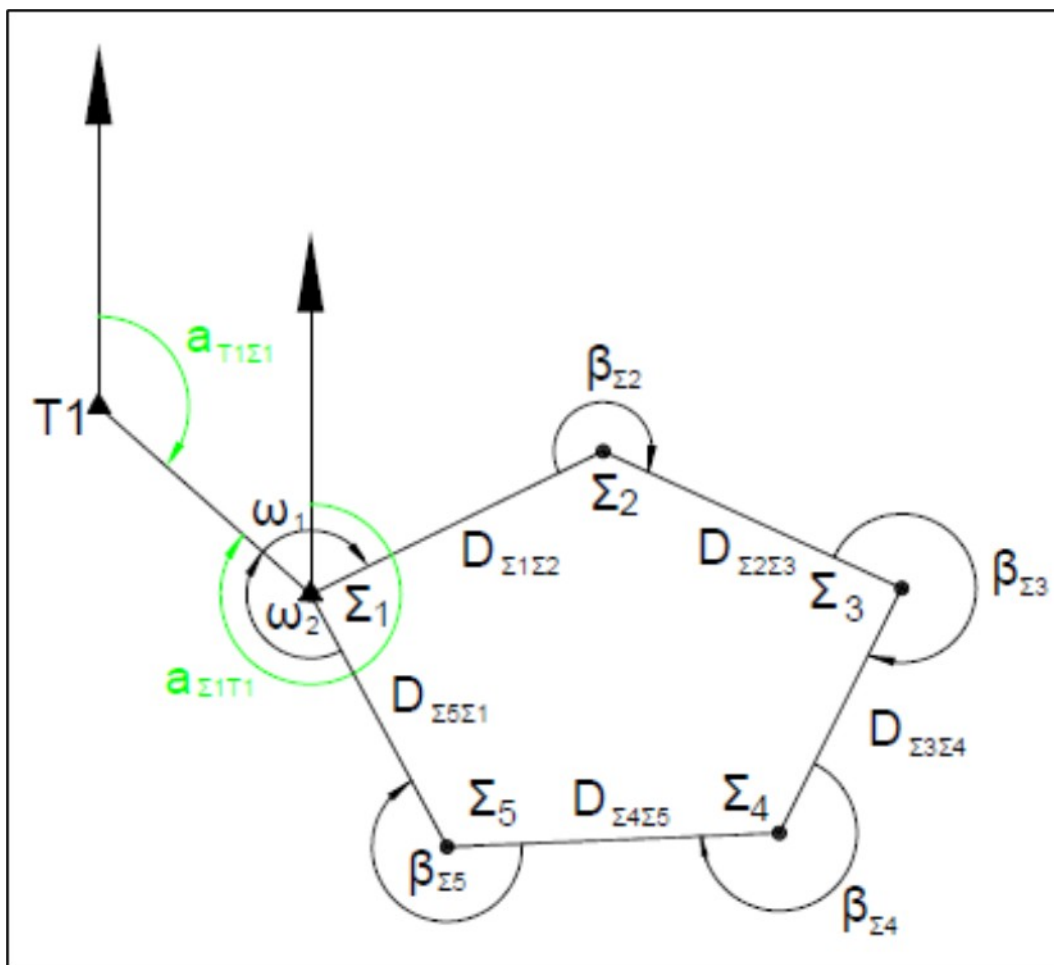
$$X_i = X_{i-1} + \Delta X_{i-1,i} \quad (4.35)$$

και

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta Y_{i-1,i} \quad (4.36)$$



Σχήμα 12: Ανοιχτή πλήρως εξαρτημένη όδευση από τα δύο άκρα



Σχήμα 13: Κλειστή εξαρτημένη όδευση

Υψομετρική Επίλυση Όδευσης

Για την υψομετρική επίλυση οδεύσεων έχουν μετρηθεί τα μήκη D , οι ζενίθιες γωνίες z , το Y_O και το Y_Σ σε κάθε μέτρηση. Ακόμα πρέπει να είναι γνωστό το ορθομετρικό υψόμετρο μίας κορυφής (συνήθως της πρώτης) στο $E\Sigma Y$, όταν αυτό ανάγεται στο κρατικό σύστημα αναφοράς, αλλιώς δίνεται αυθαίρετο υψόμετρο σε μία κορυφή. Τέλος πρέπει να είναι γνωστή η υψομετρική διαφορά ΔH της πρώτης και της τελευταίας κορυφής, εάν επρόκειτο για ανοιχτή όδευση. Σε κλειστή όδευση επρόκειτο για την ίδια κορυφή άρα $\Delta H=0m$.

Με τον τύπο της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας υπολογίζονται οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των κορυφών σε μετάβαση και επιστροφή

$$\Delta H'_{i,i+1} = S_{i,i+1} \cos z_{i,i+1} + (1-k) \frac{S_{i,i+1}^2}{2R} \sin^2 z_{i,i+1} + YO - Y\Sigma \quad (4.37)$$

Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος της κάθε υψομετρικής διαφοράς, από τις τιμές της μετάβασης και επιστροφής, διατηρώντας το πρόσημο της μετάβασης

$$\Delta H'_{i,i+1\mu\epsilon\sigma\sigma} = \frac{\Delta H'_{i,i+1} - \Delta H'_{i+1,i}}{2} \quad (4.38)$$

Αθροίζονται όλοι οι μέσοι όροι των υψομετρικών διαφορών και υπολογίζεται το υψομετρικό σφάλμα

$$\omega_{\Delta H} = \Delta H^{np} - \Delta H' = \Delta H^{np} - \Sigma \Delta H'_{i,i+1\mu\epsilon\sigma\sigma} \quad (4.39)$$

Στη συνέχεια το υψομετρικό σφάλμα ισομοιράζεται στις υψομετρικές διαφορές ή διαμοιράζεται γραμμικά, ανάλογα τα μήκη μεταξύ των κορυφών

$$\delta_{\Delta H_{i,i+1}} = \frac{\omega_{\Delta H}}{v} \quad (4.40)$$

με v : αριθμός υψομετρικών διαφορών

$$\delta_{\Delta H_{i,i+1}} = \frac{\omega_{\Delta H}}{\Sigma S} S_{i,i+1} \quad (4.41)$$

Υπολογίζεται η τελική τιμή κάθε υψομετρικής διαφοράς

$$\Delta H_{i,i+1} = \Delta H'_{i,i+1} + \delta_{\Delta H_{i,i+1}} \quad (4.42)$$

Τα τελικά υψόμετρα των κορυφών προκύπτουν από τη σχέση

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_{i,i+1} \quad (4.43)$$

4.2 Αποτύπωση ΦΓΕ

Η αποτύπωση της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας είναι το αμέσως επόμενο στάδιο. Ως αποτύπωση ορίζεται η διαδικασία που ακολουθείται για να

⁵Ο όρος $(1-k) \frac{D_{i,i+1}^2}{2R} \sin^2 z_{i,i+1}$ μπορεί να παραλειφθεί ανάλογα το επιθυμητό σφάλμα προσδιορισμού των υψομέτρων. Για μήκη μικρότερα της τάξης των 400m η διόρθωση είναι της τάξης του 1cm, ενώ για μήκη μικρότερα των 100m, η διόρθωση είναι της τάξης του 1mm.

προσδιοριστεί η θέση, το σχήμα και το μέγεθος ενός τμήματος της ΦΓΕ ή ενός τεχνικού έργου ή μιας ιδιοκτησίας.

Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των ορθογώνιων συντεταγμένων δηλαδή την προβολή των χαρακτηριστικών σημείων που ορίζουν την επιφάνεια, σε κάποιο επίπεδο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και τον προσδιορισμό του υψομέτρου τους.

Το αποτέλεσμα της αποτύπωσης είναι ένα σχέδιο στο οποίο αποδίδεται η μορφή του εδάφους και οποιουδήποτε τεχνικού έργου πάνω σε αυτό. Το σχέδιο αυτό ονομάζεται τοπογραφικό διάγραμμα και αποτελεί τη βασική τεχνική υποδομή για την προμελέτη, μελέτη και την εκτέλεση έργων.

Η αποτύπωση αφορά τρία βασικά στάδια: τις εργασίες πεδίου, τις εργασίες γραφείου και τον έλεγχο του παραγώγου

4.2.1 Εργασίες Πεδίου

Στις εργασίες πεδίου πρώτα γίνεται αναγνώριση της περιοχής, όπου εκτιμάται ο χρόνος της αποτύπωσης, το μέγεθος της αποτύπωσης και ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί. Πριν τις μετρήσεις γίνεται το αυτοσχέδιο πεδίου (σκαρίφημα, κροκί) στο οποίο σχεδιάζονται πρόχειρα και χειρόγραφα τα στοιχεία του χώρου και τα σημεία προς αποτύπωση έχοντας κατά προσέγγιση προσανατολισμό προς το βορρά. Πάνω στο αυτοσχέδιο πεδίου σχεδιάζουν οι κορυφές του δικτύου ή της όδευσης, με συνεχή αρίθμηση τα σημεία λεπτομέρειας που ορίζουν τα χαρακτηριστικά σημεία της έκτασης προς αποτύπωση και σχόλια για κάθε αντικείμενο που περιλαμβάνει.

Στη συνέχεια γίνεται η ένταξη της αποτύπωσης στο κρατικό σύστημα αναφοράς, κατά την οποία προσδιορίζονται οι ορθογώνιες συντεταγμένες των κορυφών των δικτύων και έπειτα ακολουθεί η εγκατάσταση και η μέτρηση του δικτύου, όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4.1.

Το τελευταίο στάδιο στις εργασίες πεδίου, στο οποίο θα δοθεί και η μεγαλύτερη σημασία στο πλαίσιο αυτού του κειμένου, είναι η μέτρηση των σημείων λεπτομέρειας – χαρακτηριστικών σημείων.

Σήμερα χρησιμοποιούνται 3 βασικές μέθοδοι αποτύπωσης

- **Η μέθοδος της ταχυμετρίας/ πολικών συντεταγμένων**

- Δορυφορικός εντοπισμός
- 3D σάρωση επιφανειών

Η μέθοδος των **πολικών συντεταγμένων** είναι η πιο συχνή μέθοδος μέτρησης σημείων λεπτομέρειας και εφαρμόζεται όταν η άμεση μέτρηση μήκους προς αυτά τα σημεία είναι δυνατή. Για την μέτρηση των σημείων αυτών χρησιμοποιείται ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός ρομποτικός ή μη, με τη δυνατότητα μέτρησης χωρίς ανακλαστήρα, ένας τρίποδας, ένας στυλεός, ένας ανακλαστήρας και μια μετροταινία για τη μέτρηση του ύψους οργάνου.

Για τη διαδικασία συλλογής δεδομένων εφαρμόζονται τα παρακάτω βήματα. Αρχικά ο γεωδαιτικός σταθμός κεντρώνεται σε μία από τις κορυφές της όδευσης ή του δικτύου και οριζοντιώνεται. Έπειτα γίνεται μέτρηση του ΥΟ του γεωδαιτικού σταθμού και καταγράφεται. Στη συνέχεια γίνεται σκόπευση συνήθως στην προηγούμενη κορυφή της όδευσης ή του δικτύου και γίνεται μηδενισμός του οριζόντιου δίσκου ή λαμβάνεται η ανάγνωση της οριζόντιας διεύθυνσης. Στη συνέχεια το σύστημα στυλεό-ανακλαστήρας τοποθετείται κατακόρυφα σε σημείο λεπτομέρειας ή γίνεται απευθείας η μέτρηση του σημείου RL. Γίνεται μέτρηση και καταγραφή της οριζόντιας γωνίας, του μήκους, της ζενίθιας γωνίας και του ΥΣ, εάν επρόκειτο για σύστημα στυλεό-ανακλαστήρας. Οι μετρήσεις αυτές επαναλαμβάνονται για όλα τα σημεία λεπτομέρειας και τελειώνει η διαδικασία.

Η αποτύπωση με **δορυφορικό εντοπισμό** μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιοχές με καθαρό ορίζοντα, δηλαδή αγροτικές ή ήμι αστικές περιοχές, στις οποίες η λήψη σήματος από δορυφόρους είναι εφικτή, αφορά πολλούς δορυφόρους και με καλή γεωμετρία. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων ενός σημείου γίνεται με επίλυση βάσεων, δηλαδή χρειάζονται δύο δέκτες GNSS (base και rover). Ο base δέκτης δεν είναι απαραίτητο να ανήκει στην ιδιοκτησία του τοπογράφου μηχανικού, αλλά μπορεί να αποτελεί κορυφή ενός δικτύου GNSS όπως το HEPOS, τον οποίο “δανείζεται” ο τοπογράφος και “συνδέει” τον rover με τον base. Η επίλυση της βάσης σήμερα γίνεται συνήθως με τη μέθοδο Real Time Kinematic, κατά την οποία ο δέκτης τοποθετείται κατακόρυφα ή υπό κλίση σε πιο σύγχρονους δέκτες και γίνεται η μέτρηση του σημείου με ακρίβεια 0.7-3cm οριζοντιογραφικά και 2-5cm υψομετρικά. Για πιο

ακριβή υπολογισμό επιλέγεται η μέθοδος fast static κατά την οποία ο δέκτης τοποθετείται στο σημείο λεπτομέρειας για διάρκεια 10-12 λεπτών.

Η μέθοδος του δορυφορικού εντοπισμού είναι γρήγορη παρέχοντας την επιθυμητή ακρίβεια, ακόμα και σε απρόσιτα σημεία τώρα που είναι εφικτή η μέτρηση υπό κλίση. Ωστόσο έχει βασικούς περιορισμούς και αυτοί είναι η λήψη σήματος από αρκετούς δορυφόρους ορθά γεωμετρικά κατανομημένους σε περιοχές με μειωμένη ορατότητα προς την ουράνια σφαίρα με αποτέλεσμα η μέτρηση του σημείου να έχει σφάλμα μέχρι και 20-30cm ή να είναι και αδύνατη.

Η αποτύπωση με τη **μέθοδο τρισδιάστατης σάρωσης επιφανειών** εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που χρειάζονται γρήγορα αποτελέσματα με ακρίβεια μερικών χιλιοστών και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περιβάλλον. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι ένας τρισδιάστατος σαρωτής, ένας τρίποδας και ένας φορητός H/Y (tablet). Η διαδικασία μέτρησης είναι η εξής.

Ο σαρωτής τοποθετείται σε ένα οποιοδήποτε σημείο και οριζοντιώνεται. Επιλέγονται οι παράμετροι της σάρωσης, όπως είναι ο χρόνος της σάρωσης, η ταχύτητα της σάρωσης, η λήψη εικόνων, η ποιότητα των εικόνων και η περιοχή σάρωσης. Από το σημείο αυτό ο σαρωτής μετράει μήκη και γωνίες προς κάθε κατεύθυνση και αποτυπώνει την περιοχή ως νέφος σημείων σε δικό του τοπικό σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια τοποθετείται σε άλλο σημείο και γίνεται η ίδια διαδικασία μέχρι τη πλήρη αποτύπωση της περιοχής μελέτης.

Αυτό που χρήζει σημασίας είναι ότι τα σημεία τοποθέτησης του σαρωτή πρέπει να είσαι σε τέτοια θέση ώστε οι διαδοχικές σαρώσεις να δημιουργούν νέφη με επικάλυψη τουλάχιστον 60%.

4.2.2 Εργασίες γραφείου

Στις εργασίες γραφείου είναι η στιγμή που γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων, ο σχεδιασμός του τοπογραφικού διαγράμματος σε λογισμικό σχεδίασης CAD και η εκτύπωσή του.

Η εξαγωγή των μετρήσεων γίνεται από το χρησιμοποιημένο εξοπλισμό ενσύρματα ή ασύρματα στο H/Y με την κατάλληλη μορφή αρχείου. Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων και προσδιορίζονται οι

συντεταγμένες των σημείων λεπτομέρειας ανάλογα τη μέθοδο μέτρησης που έχει επιλεγθεί

Στην περίπτωση μέτρησης με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων οι συντεταγμένες των σημείων λεπτομέρειας προσδιορίζονται από την εφαρμογή του 1ου Θ.Π και της Τ.Υ.

Στη μέθοδο του δορυφορικού εντοπισμού για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του σημείου πρέπει να επιλυθούν οι αντίστοιχες βάσεις. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αυτή η επίλυση γίνεται σε πραγματικό χρόνο και ο προσδιορισμός πραγματοποιείται στο πεδίο.

Τέλος στη μέθοδος της 3d σάρωσης επιφανειών λαμβάνεται ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς. Αυτό που χρειάζεται είναι πρώτα ο έλεγχος της γεωμετρίας του νέφους (register). Στη συνέχεια πρέπει να γίνει η ένταξη του νέφους στο κρατικό σύστημα αναφοράς (έχουν μετρηθεί αντίστοιχα σημεία για γεωαναφορά). Τέλος γίνεται επεξεργασία του νέφους και καθαρίζεται από πιθανούς θορύβους και αστοχίες και δημιουργείται το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο.

Πλέον, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, μπορούν να εφαρμοσθούν και οι τρεις παραπάνω μέθοδοι στην ίδια αποτύπωση. Αυτή η εφαρμογή προσφέρει καλύτερη ακρίβεια στην αποτύπωση και πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση, καθώς υπάρχουν μετρήσεις σημείων ελέγχου, αλλά και σημείων λεπτομέρειας από πολλές πηγές, μειώνοντας σημαντικά τυχαία σφάλματα και διορθώνοντας με μεγαλύτερη ευκολία χονδροειδή σφάλματα που μπορεί να έχουν προκύψει.

Τέλος γίνεται η ψηφιακή σχεδίαση του τοπογραφικού διαγράμματος σε ειδικά λογισμικά σχεδίασης CAD και η εκτύπωση του σχεδίου σε κατάλληλη κλίμακα.

4.2.3 Έλεγχος του διαγράμματος

Ο έλεγχος του διαγράμματος είναι μια διαδικασία-εργασία ιδιαίτερης σημασίας και απαραίτητη κάθε φορά που πραγματοποιείται μια αποτύπωση. Κατά τον έλεγχο πρέπει να διαπιστωθεί εάν το τελικά παραγόμενο διάγραμμα συμφωνεί με την πραγματική κατάσταση.

Περπατώντας προσεκτικά στο πεδίο όλη την περιοχή που αποτυπώθηκε πάνω στο διάγραμμα αυτό, ελέγχεται προσεκτικά κάθε λεπτομέρεια, γίνονται επιτόπου οι απαραίτητες επιβεβαιώσεις, διορθώσεις και συμπληρώσεις με χρήση μετροταινίας. Στην περίπτωση ανάγκης χρήσης γεωδαιτικού οργάνου πραγματοποιούνται οι απαραίτητες μετρήσεις για την ορθή συμπλήρωση του διαγράμματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιβεβαιωθεί η ορθότητα και η πληρότητα του διαγράμματος.

4.3 Γεωδαιτικές μέθοδοι αυτοματισμού και καθοδήγησης

Επόμενο βήμα αποτελεί η επιλογή της μεθόδου αυτοματισμού και καθοδήγησης των μηχανημάτων. Με την έννοια μέθοδο ορίζεται ένα σύνολο κατάλληλων αρχών, κανόνων και μέσων που ακολουθούνται επί ορισμένου σκοπού ή σειρά συντονισμένων διαδικασιών και τακτικών που αυξάνουν τις πιθανότητες της κατάληξης του επιδιωκόμενου σκοπού. Υπό τη γεωδαιτική έννοια μία μέθοδος περιγράφει τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί, τις προδιαγραφές του και τη διαδικασία των μετρήσεων.

Αυτή η περιγραφή ακολουθεί παρακάτω για τις τρεις πιο βασικές μεθόδους αυτοματισμού και καθοδήγησης μηχανημάτων. Αυτές είναι:

- **2D επίλυση με laser χωροβάτη**
- **3D επίλυση με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό**
- **3D επίλυση με δέκτες GNSS**

Οι παραπάνω μέθοδοι είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο στο πεδίο, καθώς έχουν πιο γρήγορα, πιο εύκολα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο πεδίο αποτελούν ολοκληρωμένες μεθόδους (integrated) οι οποίες συνδυάζουν τις παραπάνω μεθόδους και εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή.

4.3.1 2D επίλυση με laser χωροβάτη

Η χρήση του laser χωροβάτη είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος καθοδήγησης, εξαιτίας της απλότητας, της ταχύτητας και της ακρίβειας που προσφέρει. Πριν τη περιγραφή της μεθόδου θα γίνει περιγραφή της λειτουργίας του laser χωροβάτη.

Αρχικά ο laser χωροβάτης (εικόνα 5) τοποθετείται σε σταθερό έδαφος, οριζοντιώνεται και ενεργοποιείται. Έπειτα ο χωροβάτης οριζοντιώνεται μόνος του (self-level) μειώνοντας σημαντικά το σφάλμα οριζοντίωσης του χωροβάτη. Στη συνέχεια ορίζεται η υψομετρική αφετηρία, τοποθετώντας τη σταδία σε κορυφή υψομετρικής αφετηρίας (Repere). Στη θέση αυτή μετακινείται ο receiver μέχρι να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη δέσμη laser. Στο σημείο αυτό υπάρχει ενδεικτική ένδειξη και ήχος από το receiver και πραγματοποιείται η μέτρηση της υψομετρικής διαφοράς Όπισθεν (O). Ορίζεται το επιθυμητό υψομετρικό επίπεδο, παράλληλο με το επίπεδο της δέσμης προσθέτοντας τη τιμή ΔH^{Op} . Οπότε η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο επιπέδων είναι.

$$\Delta H^E = O + \Delta H^{Op} \quad (4.44)$$

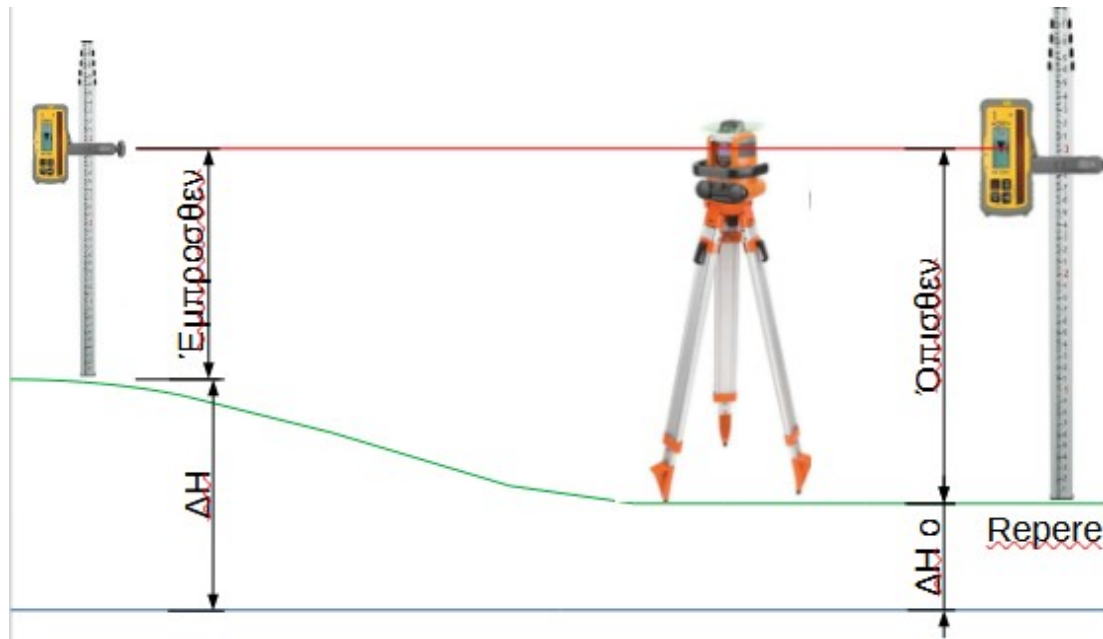
Αφού έχει ορισθεί το επίπεδο αναφοράς τότε σε οποιοδήποτε σημείο και αν στηθεί η σταδία είναι γνωστή η υψομετρική διαφορά του σημείου από το επίπεδο. Στα σημεία αυτά γίνεται η μέτρηση Έμπροσθεν (E), η οποία είναι η υψομετρική διαφορά του επιπέδου της δέσμης με το σημείο πάνω στη ΦΓΕ. Οπότε η τελική υψομετρική διαφορά δίνεται από τη σχέση

$$\Delta H = \Delta H^E - E = (O - E) + \Delta H^{Op} \quad (4.45)$$

με ΔH^E : Υψομετρική Διαφορά υψομετρικής αφετηρίας από επιθυμητό επίπεδο
 ΔH : Τελική Υψομετρική Διαφορά από επιθυμητό επίπεδο

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο σχήμα 14.

Ακριβώς η ίδια λογική και οι ίδιες σχέσεις ισχύουν και σε επίπεδα με κλίση. Η διαφορά είναι ότι πρέπει να οριστεί η κλίση του επιπέδου στο χωροβάτη και έπειτα με τις ίδιες μετρήσεις και σχέσεις δημιουργείται το επιθυμητό επίπεδο.



Σχήμα 14: Μέτρηση με laser χωροβάτη

Τι ισχύει όμως όταν οι μετρήσεις γίνονται με τη μέθοδο του machine control. Στις περιπτώσεις αυτές εξακολουθούν να εφαρμόζονται οι ίδιες σχέσεις και μετρήσεις. Η διαφορά είναι ότι στις εξισώσεις λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις της σκούπας που έχει κάθε όχημα και η διαχείριση των δεδομένων γίνεται από ειδικό λογισμικό, το οποίο βρίσκεται εντός του οχήματος. Η υψομετρική μετακίνηση της σκούπας πραγματοποιείται από ειδικούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ειδικά σημεία του οχήματος και μπορούν να επεμβαίνουν στο υδραυλικό σύστημα του οχήματος.

Το κάθε λογισμικό που εγκαθίσταται στο όχημα διαθέτει την απαραίτητη βάση δεδομένων και αναγνωρίζει τον τύπο του οχήματος και τον τύπο του εργαλείου που χρησιμοποιεί.

Η διαδικασία μέτρησης είναι η ίδια. Το εργαλείο τοποθετείται στην αντίστοιχη υψομετρική αφετηρία, ορίζεται το επιθυμητό επίπεδο στο επιθυμητό υψόμετρο και στην επιθυμητή κλίση και έπειτα όπου και εάν τοποθετείται το εργαλείο είναι γνωστή η υψομετρική διαφορά και σκάβει αναλόγως. Το μόνο που χρειάζεται από το χρήστη είναι να ελέγχει ανά τακτά χρονικά διαστήματα εάν το σήμα λαμβάνεται από το χωροβάτη.

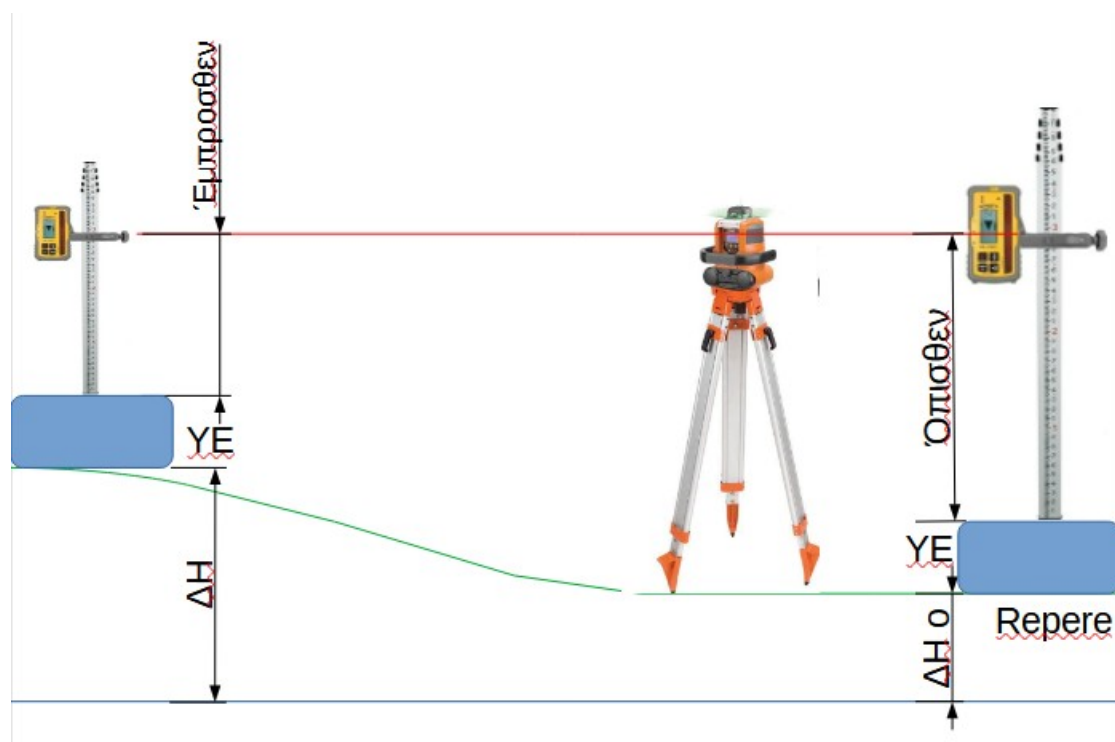
Ωστόσο η μετακίνηση του οχήματος στο χώρο γίνεται από το χειριστή του και μόνο. Οπότε ο αυτοματισμός που πραγματοποιείται στις εν λόγω εφαρμογές είναι καθαρά υψομετρική, δηλαδή κατακόρυφη, του εργαλείου του οχήματος.

Οι σχέσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$\Delta H^{E\pi} = O + YE + \Delta H^{O\pi} = \Delta H^E + YE \quad (4.46)$$

$$\Delta H^{MC} = \Delta H^{E\pi} - (E + YE) = (O - E) + \Delta H^{O\pi} \quad (4.47)$$

με YE: Ύψος Εργαλείου, $\Delta H^{E\pi}$: Υψομετρική Διαφορά υψομετρικής αφετηρίας από επιθυμητό επίπεδο ΔH^{MC} : Τελική Υψομετρική Διαφορά εργαλείου από επιθυμητό επίπεδο (σχήμα 15).



Σχήμα 15: Μέτρηση με laser χωροβάτη σε εφαρμογή machine control

Η ακρίβεια μέτρησης ενός λέιζερ χωροβάτη είναι μεταξύ $\pm 0.5\text{mm}/10\text{m}$ έως $\pm 1\text{mm}/10\text{m}$, ανάλογα του μοντέλου που επιλέγεται. Οπότε παρατηρείται ότι όσο απομακρύνεται το όχημα από το χωροβάτη τόσο μειώνεται η ακρίβεια μέτρησης της υψομετρικής διαφοράς. Ωστόσο στην ακρίβεια υλοποίησης του επιπέδου το πιο σημαντικό ρόλο τον έχει ο τύπος του εργαλείου που χρησιμοποιεί το όχημα. Αυτό συμβαίνει καθώς

η άκρη των εργαλείων έχει διαστάσεις μεταξύ μερικών χιλιοστών και μερικών εκατοστών. Επομένως αν ληφθεί υπόψη η χειρότερη δυνατή περίπτωση, δηλαδή χωροβάτες ακρίβειας $\pm 1\text{mm}/10\text{m}$ και εργαλείο με διάσταση στα άκρα 5 εκατοστά, άρα και αντίστοιχη ακρίβεια στην εκσκαφή, τότε από το Νόμο Μετάδοσης Σφαλμάτων (ΝΜΣ) στη σχέση (4.47) μπορεί να υπολογισθεί η ακρίβεια προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς εκσκαφής.

Θεωρείται ότι οι μετρήσεις έγιναν σε μια ακτίνα 10m και η υψομετρική διαφορά ΔH^{Op} είναι χωρίς σφάλμα

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta O}\right)^2 \sigma_O^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta \Delta H^{Op}}\right)^2 \sigma_{\Delta H^{Op}}^2}$$

$$\pm \sqrt{(1)^2(0.1\text{cm})^2 + (-1)^2(0.1\text{cm})^2 + (1)^2(5\text{cm})^2}$$

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm 5.0\text{cm}$$

Στην καλύτερη δυνατή περίπτωση με χωροβάτες ακρίβειας $\pm 0.5\text{mm}/10\text{m}$ και εξάρτημα εκσκαφής με διάσταση 3 mm η ακρίβεια προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς εκσκαφής είναι:

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm 3.1\text{mm}$$

Επομένως ανάλογα την εκάστοτε εφαρμογή επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια σε λιγότερο χρόνο και αποφεύγοντας τα λάθη του παρατηρητή, με την ακρίβεια να εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το εργαλείο του οχήματος.

4.3.2 3D επίλυση με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό

Η μέθοδος επίλυσης με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό δεν απέχει πολύ από την κλασσική μέθοδο χάραξης με γεωδαιτικό σταθμό. Η διαφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η μη συμμετοχή παρατηρητή και στυλεοφόρου.

Αυτό που συμβαίνει στην πράξη είναι το εξής. Ο γεωδαιτικός σταθμός στήνεται σε πολυγωνομετρικό ή τριγωνομετρικό σημείο. Συνδέεται με wi-fi ή bluetooth ή με radio-model με το αντίστοιχο λογισμικό πεδίου. Στη συνέχεια μηδενίζεται ο οριζόντιος δίσκος σε προηγούμενη κορυφή του δικτύου. Έπειτα αναγνωρίζει το στόχο που βρίσκεται πάνω στο

όχημα και κάνει συνεχόμενες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές μεταφράζονται στον παρατηρητή ως τρισδιάστατες συντεταγμένες του εργαλείου που χρησιμοποιεί. Σε συνδυασμό με ειδικούς αισθητήρες που παρεμβαίνουν στο υδραυλικό σύστημα του οχήματος αυτό μετακινείται αυτοματοποιημένα. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ολοκληρωθεί η εργασία (σχήμα 16).

Το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά τον υπολογισμό των συντεταγμένων του καταφώτου. Το δεύτερο μέρος αφορά τον υπολογισμό των συντεταγμένων του εργαλείου του οχήματος, δηλαδή τον υπολογισμό του διανύσματος βάσης.

Ο υπολογισμός των συντεταγμένων του καταφώτου γίνεται από τις εξισώσεις του 1ου Θ.Π και τον τύπο της T.Y.

$$X_{i+1} = X_i + S_{ij} \sin a_{ij} \quad (4.48)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + S_{ij} \cos a_{ij} \quad (4.49)$$

$$\Delta H'_{i,i+1} = D_{i,i+1} \cos z_{i,i+1} + (1-k) \frac{D_{i,i+1}^2}{2R} \sin^2 z_{i,i+1} + YO - Y\Sigma \quad (4.50)$$

με $Y\Sigma=0$.

Ο υπολογισμός των συντεταγμένων του καταφώτου γίνεται σε πραγματικό χρόνο από το λογισμικό.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το διάνυσμα βάσης καταφώτου-εργαλείου. Το διάνυσμα αυτό παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς οι διαστάσεις του οχήματος και η σχετική θέση του καταφώτου ως προς το όχημα παραμένουν σταθερές. Για κάθε όχημα και για κάθε διαφορετικό ύψος στυλεού προκύπτει και διαφορετική τιμή για το διάνυσμα βάσης (σχήμα 17).

Πιο συγκεκριμένα ισχύει

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3 + \mathbf{X}_4 + \mathbf{X}_5 + \dots + \mathbf{X}_i \quad (4.51)$$

με $\mathbf{X}_i = [X_i \ Y_i \ H_i]$

Για $n > 1$ $\mathbf{X}_n = \text{σταθ.}$, ενώ για $n=1$ $\mathbf{X}_1 = \text{σταθ.}$ και $Y_1 = \text{σταθ.}$

Επομένως η μόνη μεταβλητή που πρέπει σε κάθε περίπτωση να υπολογίζεται είναι το ύψος στο οποίο εδράζεται το κατάφωτο⁶, το οποίο προκύπτει με ακρίβεια χιλιοστού από την ένδειξη του στυλεού στο οποίο τοποθετείται. Επομένως ισχύει:

$$X_E = X_K + \Delta X \quad (4.52)$$

$$Y_E = Y_K + \Delta Y \quad (4.53)$$

$$H_E = H_K + \Delta H \quad (4.54)$$

Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων προκύπτει με εφαρμογή του ΝΜΣ. Θεωρείται ΔX , ΔY χωρίς σφάλμα και η ποσότητα ΔH έχει σφάλμα, το σφάλμα μέτρησης του ύψους του καταφώτου, εκτός εάν η θέση που τοποθετείται είναι συγκεκριμένη. Οπότε πριν την εφαρμογή του ΝΜΣ παρατηρείται ότι η οριζοντιογραφική ακρίβεια των συντεταγμένων του εργαλείου είναι ίδια με αυτή των συντεταγμένων του καταφώτου που προκύπτει από τις μετρήσεις, ενώ η υψομετρική ακρίβεια εξαρτάται και από τις μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού, αλλά και από τη μέτρηση του ύψους του στυλεού.

Οπότε προκύπτουν

Αβεβαιότητα μέτρησης γωνιών:

$$\sigma_\beta = \pm \sqrt{2} \sigma_\delta \quad (4.55)$$

Αβεβαιότητα μέτρησης μηκών:

$$\sigma_D = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot D \cdot 10^{-3})^2} \quad (4.56)$$

$$\sigma_S = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} \quad (4.57)$$

Επομένως με εφαρμογή του ΝΜΣ στις σχέσεις (4.48), (4.49) και (4.50) προκύπτουν

$$\begin{aligned} \sigma_{XK} &= \pm \sqrt{\left(\frac{\theta X}{\theta X}\right)^2 (\sigma_X)^2 + \left(\frac{\theta X}{\theta S}\right)^2 (\sigma_S)^2 + \left(\frac{\theta X}{\theta a}\right)^2 (\sigma_a)^2} = \\ &\pm \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sin a)^2 (\sigma_S)^2 + (S \cos a)^2 \left(\frac{\sigma_a^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} \end{aligned} \quad (4.58)$$

⁶Το κατάφωτο εδράζεται σε κατακόρυφο στυλεό

$$\sigma_{YK} = \pm \sqrt{\left(\frac{\theta Y}{\theta Y}\right)^2 (\sigma_Y)^2 + \left(\frac{\theta Y}{\theta S}\right)^2 (\sigma_S)^2 + \left(\frac{\theta Y}{\theta a}\right)^2 (\sigma_a)^2} =$$

$$\pm \sqrt{(\sigma_Y)^2 + (\cos a)^2 (\sigma_S)^2 + (-S \sin a)^2 \left(\frac{\sigma_{\rho^{cc}}}{\rho^{cc}}\right)^2} \quad (4.59)$$

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \sqrt{\left(\cos z + \frac{(1-\kappa) D \sin^2 z}{R}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-\kappa) D^2 \frac{\sin 2z}{2R}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{cc}}{\rho^{cc}}\right)^2 + \sigma_{YO}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2}$$

$$\sqrt{\left(\frac{-D^2 \sin^2 z}{2R}\right)^2 \sigma_\kappa^2 + \left(-D^2 \sin^2 z \frac{(1-\kappa)}{2R}\right)^2 \sigma_R^2} \quad (\sigma_\kappa, \sigma_R: \text{αμελητέα})$$

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \sqrt{\left(\cos z + \frac{(1-\kappa) D \sin^2 z}{R}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-\kappa) D^2 \frac{\sin 2z}{2R}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{cc}}{\rho^{cc}}\right)^2 + \sigma_{YO}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2} \quad (4.60)$$

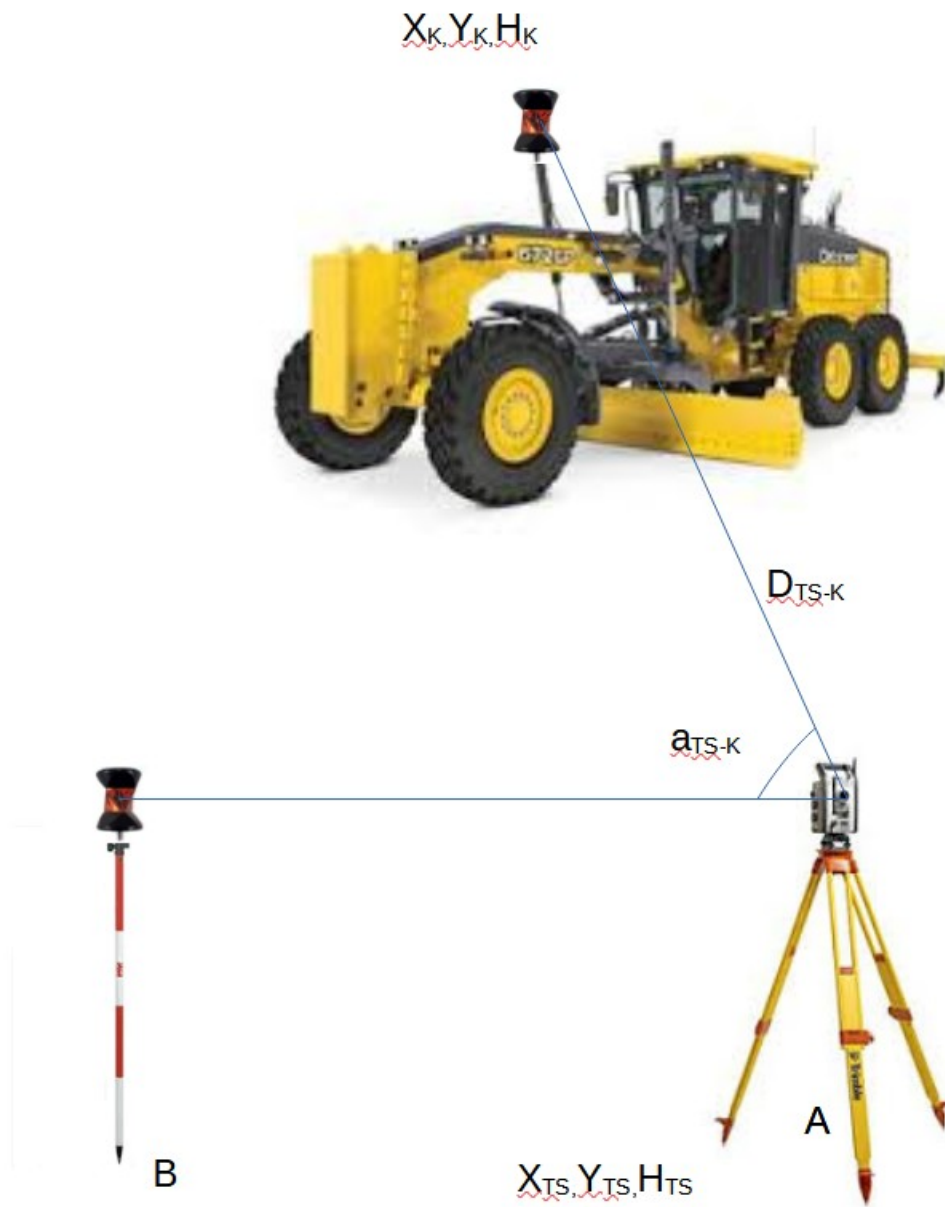
$$\sigma_{H\kappa} = \pm \sqrt{\sigma_{HA}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} \quad (4.61)$$

Τελικά η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων του εργαλείου είναι:

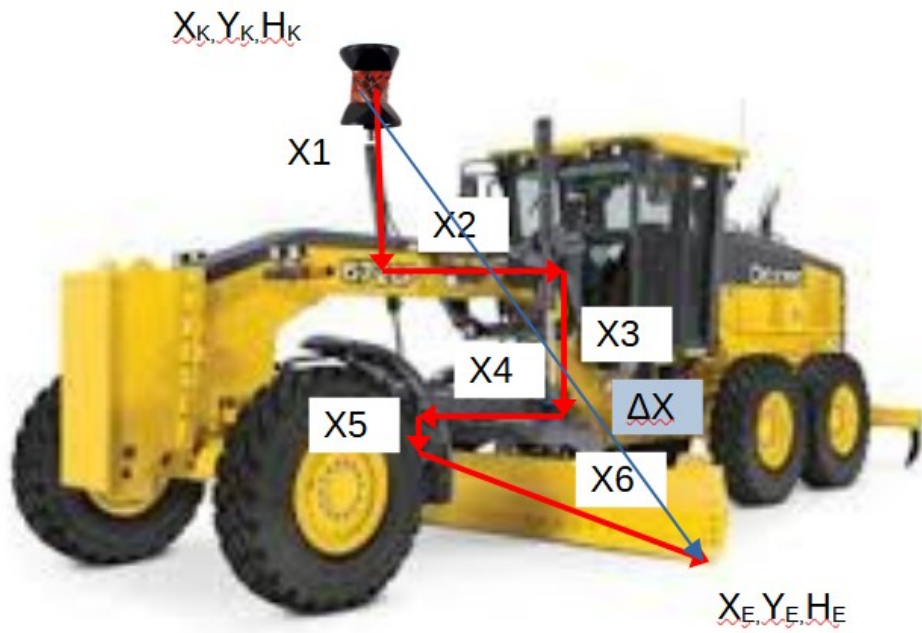
$$\sigma_{XE} = \pm \sqrt{\sigma_{XK}^2 + \sigma_{\Delta X}^2} \quad (4.62)$$

$$\sigma_{YE} = \pm \sqrt{\sigma_{YK}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2} \quad (4.63)$$

$$\sigma_{HE} = \pm \sqrt{\sigma_{H\kappa}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} \quad (4.64)$$



Σχήμα 16: Υπολογισμός συντεταγμένων καταφώτου



Σχήμα 17: Υπολογισμός συντεταγμένων εργαλείου (R TS)

4.3.3 3D επίλυση με δέκτες GNSS

Η μέθοδος επίλυσης με δέκτες GNSS είναι μια διαδομένη 3D μέθοδος επίλυσης machine control και αξιοποιείται για την πλήρη αυτοματοποίηση και καθοδήγηση του οχήματος σε εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια εκατοστού. Η ακρίβεια μέτρησης με δέκτες GNSS είναι της τάξης των μερικών εκατοστών και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία των δορυφόρων, η ορατότητα προς τους δορυφόρους, τα στοιχεία του περιβάλλοντος κ.ά. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται η μέθοδος dual GNSS, η οποία έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.1.2. Ο τελικός προσδιορισμός των συντεταγμένων του εργαλείου του οχήματος γίνεται με την επίλυση του διανύσματος βάσης, όμοιου με αυτού της επίλυσης με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό (κατάφωτο-εργαλείο).

Παρακάτω περιγράφεται η σημασία της τεχνολογίας dual GNSS και ο τρόπος υπολογισμού των συντεταγμένων του εργαλείου του οχήματος, οι οποίες έχουν αβεβαιότητα μερικών εκατοστών, λόγω της χρήσης GNSS.

Η τεχνολογία dual GNSS προσφέρει επίλυση θέσης και κατεύθυνσης σε πραγματικό χρόνο, καθώς και 3D καθοδήγηση του εργαλείου σε πραγματικό χρόνο. Βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του οχήματος, καθώς απαλείφει αρκετά σφάλματα που δυσχεραίνουν την τελική ακρίβεια, ακόμα και σε πιο δύσκολα περιβάλλοντα. Η τεχνολογία αυτή συνδυάζει δύο δορυφορικά σήματα (L1 και L5 ή L1 και L2) ανάλογα τη τεχνολογία των δεκτών. Αυτή η μέθοδος έχει τη δυνατότητα πιο ακριβούς μέτρησης άρα και διόρθωσης του ιονοσφαιρικού σφάλματος. Επίσης τα συστήματα αυτά αναγνωρίζουν σήματα πολυανάκλασης και δεν συμμετέχουν στη τελική επίλυση, προσφέροντας καλύτερη ακρίβεια σε δύσκολα περιβάλλοντα (φυσικά και αστικά). Ακόμα με την εισαγωγή της L5 band υπάρχει μεγαλύτερη διείσδυση σημάτων σε δύσκολα περιβάλλοντα. Επιπλέον τα συστήματα αυτά είναι πιο ανθεκτικά σε παρεμβολές σημάτων που μπορούν να προκύψουν. Τέλος η πρώτη επίλυση πραγματοποιείται ταχύτερα (Time to First Fix TTFF), δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την απόκτηση των δορυφορικών σημάτων και τον καθορισμό της θέσης στην καλύτερη δυνατή ακρίβεια (Fix) είναι μικρότερος, άρα πιο γρήγορες επιλύσεις.

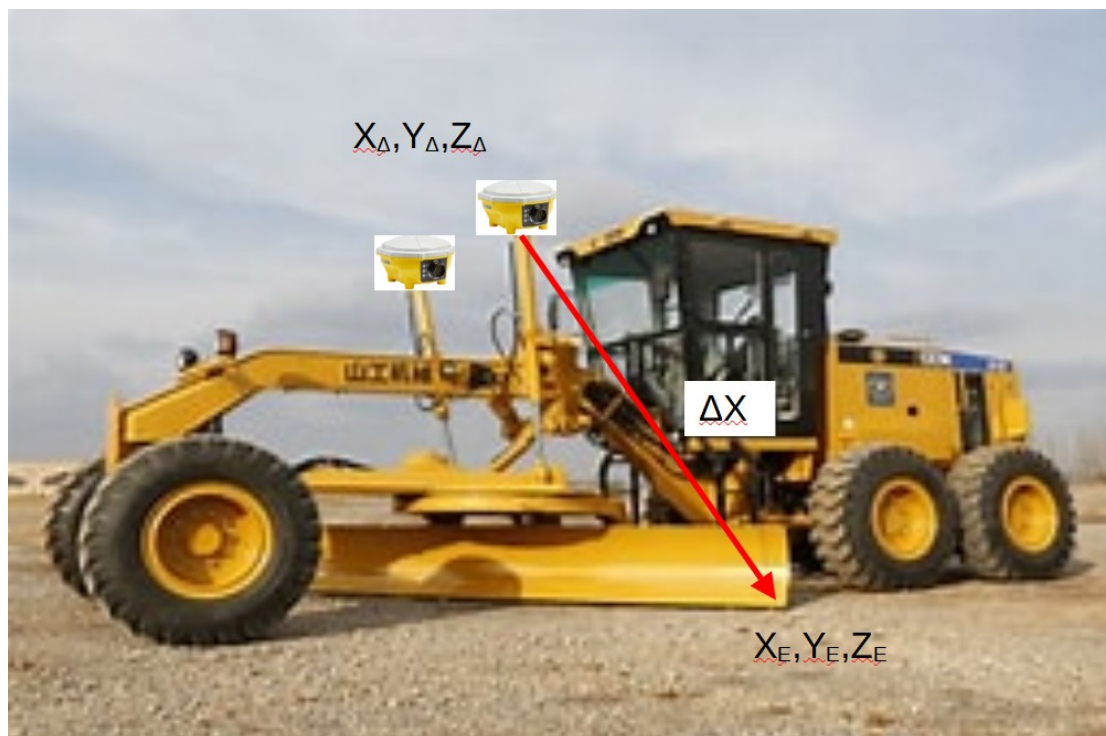
Για τους παραπάνω λόγους είναι εμφανές η σημασία αυτής της τεχνολογίας στην αυτοματοποίηση και καθοδήγηση των μηχανημάτων προσδίδοντας καλύτερη δυνατή ακρίβεια, με λιγότερες απώλειες σήματος, ολοκληρώνοντας την εργασία σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

Όσο αφορά τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του εργαλείου ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Από τον έναν δέκτη λαμβάνεται η πληροφορία της θέσης και από τον άλλο η πληροφορία της κατεύθυνσης. Οι δέκτες τοποθετούνται σε ειδικές θέσεις πάνω στο όχημα, οπότε το διάνυσμα ΔX είναι σταθερό σε κάθε περίπτωση. Επομένως κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστή η θέση του εργαλείου με ακρίβεια εκατοστού οριζοντιογραφικά και υψομετρικά(σχήμα 18). Δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις:

$$X_E = X_\Delta + \Delta X \quad (4.65)$$

$$Y_E = Y_\Delta + \Delta Y \quad (4.66)$$

$$Z_E = Z_\Delta + \Delta Z \quad (4.67)$$



Σχήμα 18: Υπολογισμός συντεταγμένων εργαλείου(GNSS)

4.4 Εφαρμογή των μεθόδων στο πεδίο

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια αναλύθηκαν οι μέθοδοι με τις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος machine control στο σύγχρονο κατασκευαστικό κλάδο και κατ' επέκταση στη σύγχρονη οδοποιία. Παρακάτω περιγράφονται θεωρητικά οι τρεις πιο συνηθισμένες εφαρμογές που αντιμετωπίζονται στο πεδίο. Αυτές είναι:

- Η υψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης
- Η κατασκευή οδούς 1 χιλιομέτρου
- Η εκσκαφή τμήματος της ΦΓΕ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι θεωρητικά και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τα λογισμικά Civil 3d, Matlab, QGIS και Excel. Τα δεδομένα θεωρείται ότι δεν έχουν τυχαία σφάλματα, που οφείλονται στη "δημιουργία" τους και για το πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας θεωρούνται ότι αφορούν πραγματικά δεδομένα.

4.4.1 Υψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης με χρήση laser χωροβάτη

Μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές είναι η υψομετρική υλοποίηση ενός τμήματος της ΦΓΕ, έκτασης όσο ενός γηπέδου (75m x 90m), με ακρίβεια $\pm 1\text{cm}$. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται ο laser χωροβάτης, με τους ειδικούς αισθητήρες του και το όχημα grader (εικόνα 9), στο οποίο εφαρμόζεται η πιο λεπτή, σε πάχος, λεπίδα.

Πριν την είσοδο του grader υλοποιείται και μετράται το υψομετρικό δίκτυο της περιοχής(σχήμα 21) και στην συνέχεια υλοποιείται το Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκαν 8 υψομετρικές κορυφές περιμετρικά του χώρου στάθμευσης. Η επίλυση του χωροσταθμικού δικτύου έγινε με την κλασική μέθοδο μέτρησης και επίλυσης. Δηλαδή, ο laser χωροβάτης τοποθετούταν ενδιάμεσα από τις υψομετρικές κορυφές και έκανε μετρήσεις Όπισθεν, Έμπροσθεν σε μετάβαση και επιστροφή για κάθε ζεύγος κορυφών.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των υψομέτρων των κορυφών του δικτύου σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Θεωρώντας ότι χρησιμοποιείται laser χωροβάτης ακρίβειας $\pm 0.5\text{mm}/10\text{m}$ και εύρους μέτρησης τα 150m υπολογίστηκε η ακρίβεια προσδιορισμού των τιμών των υψομέτρων.

Κορυφή	H(m)
R1	199.00
R2	205.00
R3	204.00
R4	204.00
R5	201.00
R6	198.00
R7	202.00
R8	200.00

Πίνακας 1: Υψόμετρα Κορυφών Δικτύου

Αρχικά υπολογίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών, ώστε να είναι γνωστό το σφάλμα ανάγνωσης του χωροβάτη και θεωρείται ότι χρειάστηκαν για κάθε ζεύγος κορυφών μονάχα μία στάση χωροβάτη. Επομένως το σφάλμα ανάγνωσης της σταδίας ισούται με το σφάλμα προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς, καθώς

$$\sigma_{\Delta H} = \pm \sqrt{n} \sigma_{\alpha} \quad (4.68)$$

με n: αριθμός στάσεων, προκύπτει ο πίνακας 2.

a/a	$D(m)$	$D/2(m)$	$\sigma a(mm)=\sigma \Delta H(mm)$
R1-R2	52.152	26.076	± 1.30
R2-R3	80.186	40.093	± 2.00
R3-R4	56.268	28.134	± 1.41
R4-R5	65.265	32.633	± 1.63
R5-R6	55.270	27.635	± 1.38
R6-R7	63.163	31.582	± 1.58
R7-R8	42.348	21.174	± 1.06
R8-R1	57.995	28.997	± 1.45
R1-R3	119.537	59.769	± 2.99
R2-R4	129.435	64.718	± 3.24
R5-R3	107.947	53.973	± 2.70
R6-R4	106.923	53.461	± 2.67
R7-R5	113.491	56.745	± 2.84
R8-R6	97.277	48.638	± 2.43

Πίνακας 2: Υπολογισμός σφάλματος κάθε υψομετρικής διαφοράς

Επιλύοντας το υψομετρικό δίκτυο με εφαρμογή της ΜΕΤ, θεωρώντας ως γνωστή κορυφή την R8, προέκυψαν ο παρακάτω πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας και η ακρίβεια προσδιορισμού των υψομέτρων των κορυφών (πίνακας 3).

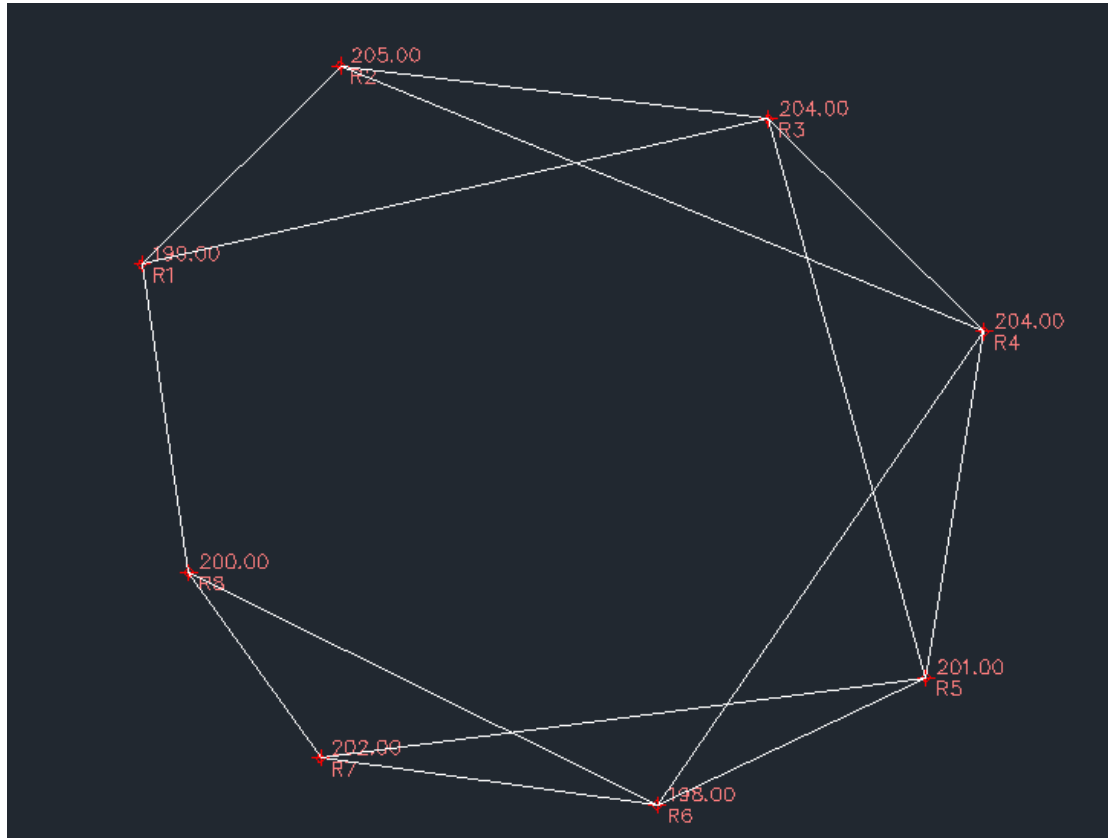
1.6509	1.4041	1.0360	0.8375	0.5917	0.4002	0.1652
1.4041	2.5031	1.5611	1.3044	0.9133	0.6192	0.2554
1.0360	1.5611	2.6638	1.9286	1.4064	0.9434	0.3904
0.8375	1.3044	1.9286	2.5664	1.6172	1.1285	0.4613
0.5917	0.9133	1.4064	1.6172	2.1959	1.2988	0.5603
0.4002	0.6192	0.9434	1.1285	1.2988	1.6810	0.5899
0.1652	0.2554	0.3904	0.4613	0.5603	0.5899	0.9231

Πίνακας 3: Πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας V_x (mm^2)

Οπότε ο τελικός ολοκληρωμένος πίνακας του υψομετρικού δικτύου είναι(πίνακας 4):

Κορυφή	H(m)	$\sigma_H(mm)$
R1	199.00	± 1.28
R2	205.00	± 1.58
R3	204.00	± 1.63
R4	204.00	± 1.60
R5	201.00	± 1.48
R6	198.00	± 1.30
R7	202.00	± 0.96
R8	200.00	± 0

Πίνακας 4: Τελικός πίνακας υψομετρικών τιμών



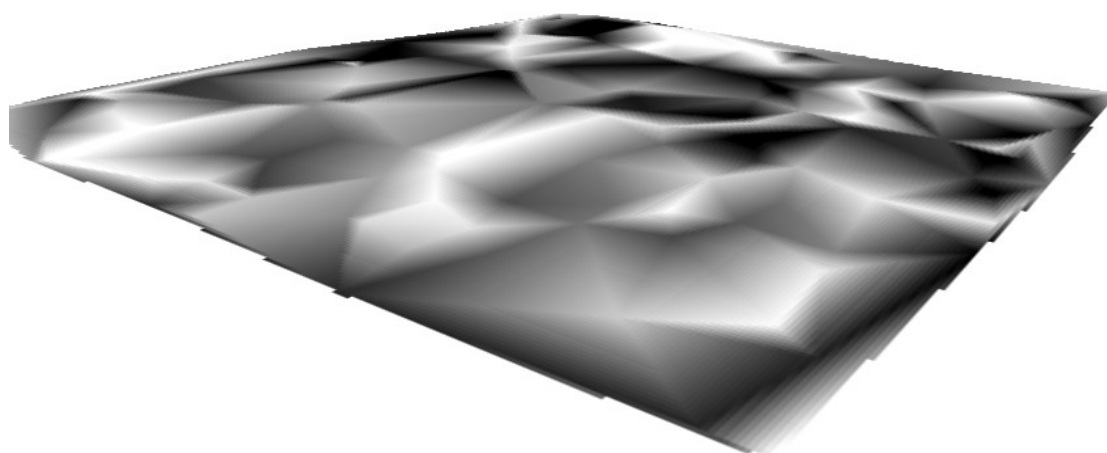
Σχήμα 19: Υψομετρικό δίκτυο

Από την επίλυση του δικτύου προκύπτει ότι η ακρίβεια προσδιορισμού του υψομέτρου των κορυφών του δικτύου είναι της τάξης του $\pm 1.5\text{mm}$, ακρίβεια που είναι αποδεκτή με βάση την ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Επίσης το δίκτυο καταλαμβάνει έκταση περίπου 16518 m^2 και η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ 2 κορυφών του δικτύου είναι της τάξης των 150 μέτρων η υψομετρική αποτύπωση της περιοχής μελέτης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μονάχα μία κορυφή του δικτύου, κατά προτίμηση την κορυφή R7 ή R8, οι οποίες έχουν και την καλύτερη ακρίβεια.

Αυτή η δυνατότητα προσφέρεται από το μεγάλο εύρος μέτρησης του laser χωροβάτη με μεγάλη ακρίβεια. Το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να προκύψει στο σφάλμα ανάγνωσης του χωροβάτη κατά το στάδιο της αποτύπωσης της ΦΓΕ είναι $\frac{150\text{ m} \cdot 0.5\text{ mm}}{10\text{ m}} = \pm 7.5\text{ mm}$, η οποία είναι απόλυτα αποδεκτή με βάση την επιθυμητή ακρίβεια.

Χάρης αυτή τη δυνατότητα οι εργασίες αποτύπωσης στο πεδίο είναι πολύ πιο γρήγορες και στην καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Θεωρώντας λοιπόν ως

υψομετρική αφετηρία την κορυφή R8 προσδιορίστηκαν οι υψομετρικές διαφορές και επομένως τα υψόμετρα σημείων της ΦΓΕ και σχεδιάστηκε το ΨΜΕ (σχήμα 20). Για την υλοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Random του λογισμικού Excel, με σκοπό να υλοποιηθούν θεωρητικά υψομετρικά σημεία στο χώρο.



Σχήμα 20: Το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης

Το εύρος των υψόμετρων του ΨΜΕ είναι μεταξύ 200.104m-203.961m με ακρίβεια που κυμαίνεται από $\pm 0.9\text{mm}$ για τα πιο κοντινά σημεία στην κορυφή R8 και $\pm 6.5\text{mm}$ για τα πιο μακρινά σημεία από την κορυφή R8. Για την εξομάλυνση αυτών των σφαλμάτων επιλέγεται ο λείζερ χωροβάτης να τοποθετηθεί περίπου στη μέση της περιοχής μελέτης, σε απόσταση 65m από την κορυφή R8. Από αυτή την θέση το μέγιστο σφάλμα στην ανάγνωση του χωροβάτη είναι της τάξης των $\pm 3.25\text{mm}$, επομένως η ακρίβεια προσδιορισμού των υψόμετρων, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_H^i = \pm \sqrt{(\sigma_{\Delta H}^{R8-i})^2 + (\sigma_H^{R8})^2} \quad (4.69)$$

$$\sigma_H^{R8} = 0 \Rightarrow \sigma_H^i = \pm \sqrt{(\sigma_{\Delta H}^{R8-i})^2} = \pm \sigma_{\Delta H}^{R8-i} = \pm \sigma_\alpha \quad (4.70)$$

κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\pm 0.5\text{mm}$ - $\pm 3.25\text{mm}$.

Με αυτή την ακρίβεια στον προσδιορισμό των υψομέτρων της ΦΓΕ έχει δημιουργηθεί ένα ΨΜΕ υψηλής ακρίβειας.

Το αμέσως επόμενο στάδιο στην υψομετρική υλοποίηση του χώρου στάθμευσης(εικόνα 20) είναι η εξομάλυνση της ΦΓΕ (grading) σε μια επιφάνεια που προσεγγίζει περισσότερο το μοντέλο του χώρου στάθμευσης(εικόνα 19). Η διαδικασία αυτή έγινε στο λογισμικό Civil 3d. Για τη δημιουργία της συγκεκριμένης επιφάνειας στην πραγματικότητα εφαρμόζεται η μέθοδος του laser χωροβάτη αλλά με χρήση διαφορετικού οχήματος, όπως μπουλντόζα ή εκσκαφέας. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται επικέντρωση στην εφαρμογή της μεθόδου στο τελικό στάδιο της εργασίας. Για αυτούς τους λόγους θεωρείται ότι η επιφάνεια που προέκυψε μετά την εξομάλυνση 1ης φάσης του εδάφους είναι χωρίς σφάλμα.

Ο σχεδιασμός του χώρου στάθμευσης αφορά μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία εμφανίζει μέγιστη κλίση κατά τον άξονα x 2% και ελάχιστη κλίση κατά τον άξονα y 1%. Στο εσωτερικό του χώρου στάθμευσης η κλίση βρίσκεται μεταξύ των τιμών 1%-2% εξαιτίας της μεταβλητής κλίσης στους δύο άξονες. Για τον σχεδιασμό του μοντέλου ακολούθησε η παρακάτω μέθοδος.

Αρχικά ορίστηκαν τα υψόμετρα των τεσσάρων κορυφών του χώρου στάθμευσης

Κάτω αριστερά: 200.5m

Κάτω δεξιά:202m

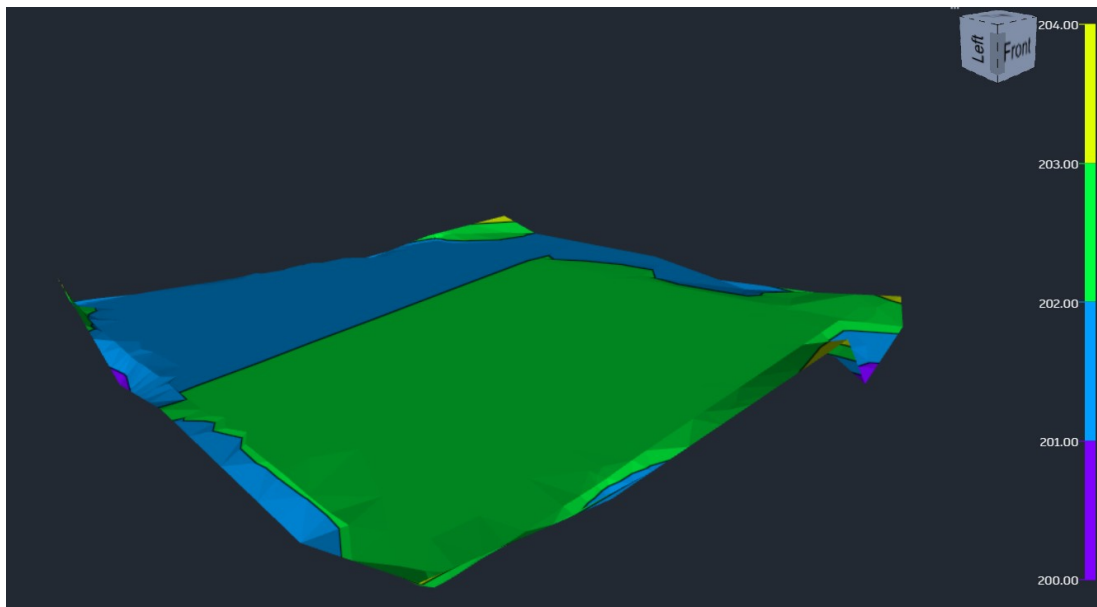
Πάνω δεξιά:202.9m

Πάνω αριστερά:202.3m

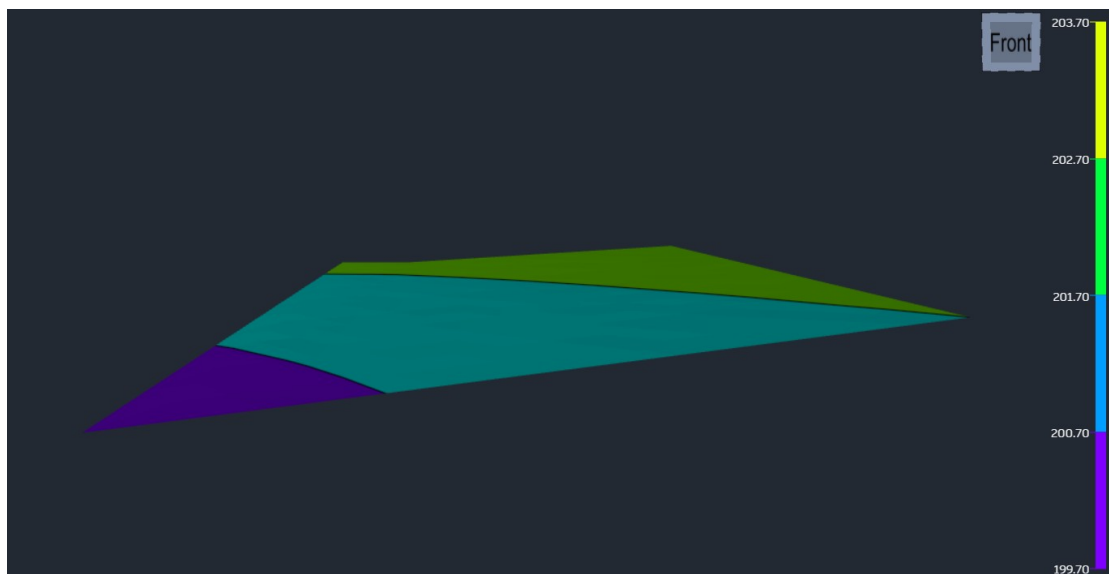
Τέλος με βήμα 5m κατά X και κατά Y υπολογίστηκαν τα υψόμετρα των αντίστοιχων σημείων από τη σχέση

$$H_i = H_a + \frac{D^{a-i} \cdot y}{100} \quad (4.71)$$

με H_a : Το υψόμετρο αναφοράς (έστω κάτω αριστερά), D^{a-i} : Απόσταση σημείου αναφοράς και σημείο κανάβου, γ : κλίση

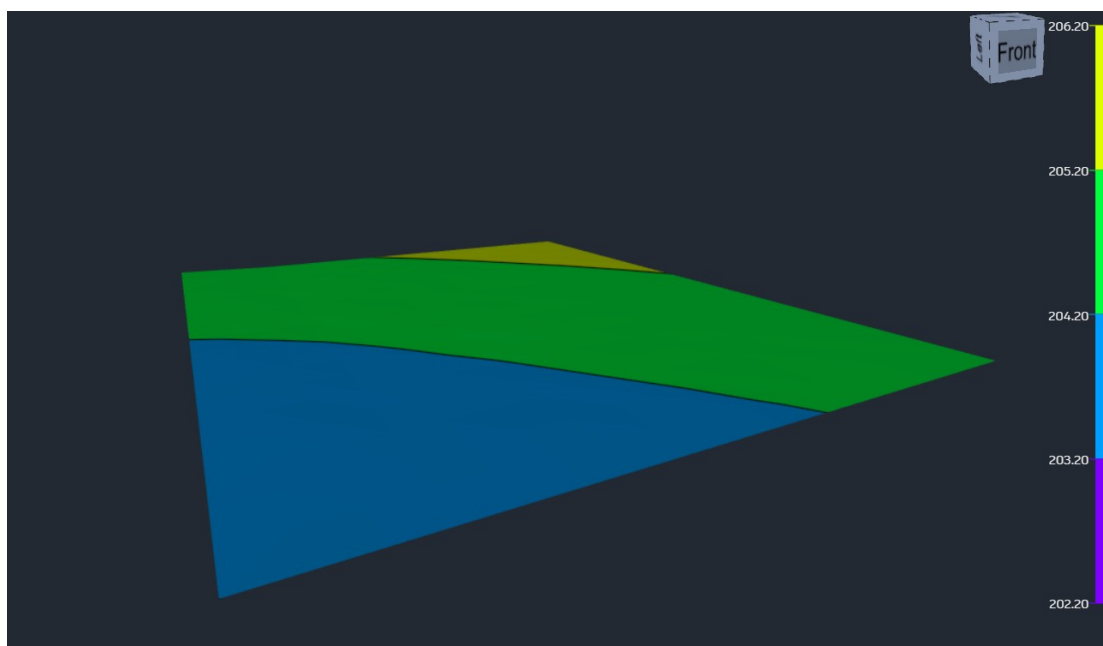


Εικόνα 19: Αποτέλεσμα εξομάλυνσης επιφάνειας (1η φάση)



Εικόνα 20: Το μοντέλο του χώρου στάθμευσης

Η επόμενη επιφάνεια που σχεδιάστηκε είναι αυτή που ορίζει ο laser χωροβάτης. Όπως έχει αναφερθεί ο laser χωροβάτης δημιουργεί ένα οποιοδήποτε επίπεδο. Επομένως δημιουργήθηκε ένα παράλληλο ως προς μοντέλο του χώρου στάθμευσης επίπεδο κατά 2.5m ψηλότερο (εικόνα 21).



Εικόνα 21: Επίπεδο laser χωροβάτη

Από τη στιγμή που έχουν ορισθεί οι απαραίτητες επιφάνειες (ΨΜΕ, μοντέλο, επίπεδο χωροβάτη) είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο. Κατά τη διάρκεια αυτής ο χωροβάτης τοποθετείται σε σημείο ασφάλειας εκτός της περιοχής δράσης του οχήματος και οι σταδίες τοποθετούνται στις δύο άκρες της λεπίδας του grader. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται λεπίδα μήκους 2.4m, ύψους 27.94cm, πάχους 15.24cm και πάχους λεπίδας 1.59cm. Έχοντας γνωστή τη διάσταση της λεπίδας το ΥΕ είναι δεδομένο με σφάλμα κατασκευής $\pm 1\text{ mm}$, οπότε $ΥΕ = 15.24\text{ cm} + 1.59\text{ cm} = 168.3\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$.

Σύμφωνα με την εξίσωση (4.47), για τον προσδιορισμό της τελικής υψομετρικής διαφοράς για το επιθυμητό επίπεδο, απαιτείται ο υπολογισμός των υψομετρικών διαφορών μεταξύ της εξομαλυμένης επιφάνειας και του μοντέλου του χώρου στάθμευσης και μεταξύ της εξομαλυμένης επιφάνειας και του επιπέδου του χωροβάτη.

Στην πράξη είναι γνωστή η διαφορά της ΦΓΕ με το επιθυμητό μοντέλο, καθώς το μοντέλο έχει εισαχθεί στο λογισμικό. Ακόμα γνωστές είναι και οι διαστάσεις της λεπίδας. Οπότε ο μοναδικός άγνωστος σε κάθε περίπτωση είναι η μετρημένη υψομετρική διαφορά, η οποία μετριέται αυτόματα από το laser χωροβάτη. Στο πλαίσιο της διπλωματικής έχουν υπολογιστεί οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των επιφανειών, με χρήση

του λογισμικού QGIS. Το σφάλμα των υψομετρικών διαφορών προκύπτει από τις θεωρητικές μετρήσεις.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εικόνες. Στην πρώτη εικόνα αποτυπώνονται οι τρεις διαφορετικές επιφάνειες (εικόνα 22) και στη δεύτερη εικόνα (εικόνα 23) οι επιφάνειες που προκύπτουν από την αφαίρεση των επιφανειών.

Ως σημεία υψομετρικής αναφοράς επιλέχθηκαν οι κορυφές R8 και R3, καθώς βρίσκονται πιο κοντά στο μοντέλο του χώρου στάθμευσης. Για την εφαρμογή της μεθόδου, χρειάζεται να υπολογιστεί η θεωρητική τιμή υψομέτρου που θα είχε το μοντέλο σε αυτές τις θέσεις με γραμμική παρεμβολή. Από την εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής (σχέση (4.70)) προκύπτει ότι $H_{R8M}=200.519m$ και $H_{R3M}=203.063m$. Ομοίως για επίπεδο του χωροβάτη, προστίθεται και στις δύο τιμές η ποσότητα 2.5m, άρα $H_{R8E}=203.019m$ και $H_{R3E}=205.563m$. Από την κορυφή R8 επιλέγεται η μέτρηση υψομετρικών διαφορών σε μια ακτίνα 90m ενώ από την κορυφή R3 σε μια ακτίνα 80m. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με την αβεβαιότητα προσδιορισμού της εκάστοτε κορυφής (πίνακας 4) και στο σφάλμα ανάγνωσης του χωροβάτη ανάλογα την απόσταση, με απώτερο σκοπό την μικρότερη δυνατή αβεβαιότητα προσδιορισμού των υψομετρικών διαφορών. Από την κορυφή R8 αναμένεται μέγιστη αβεβαιότητα στην ανάγνωση, λόγω της απόστασης, $\pm 4.5mm$ και από την κορυφή R3, λόγω απόστασης και σφάλμα προσδιορισμού της κορυφής $\pm \sqrt{4mm^2 + 1.63mm^2} = \pm 4.4mm$. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις για την κάθε περίπτωση προκύπτει:

Κορυφή R8

$$(4.46) \Rightarrow \Delta H^{E\pi} = (H_{R8E} - H_{R8} - YE) + 168.3mm + (200m - 200.519m) \\ = (203.019m - 200m - 0.1683m) + 0.1683m - 0.519m$$

$$\Delta H^{E\pi} = 2.5m \quad (4.72)$$

$$(4.47) \Rightarrow \Delta H^{MC} = \Delta H^{E\pi} - E = 2.5m - 0.1683m - \Delta H^{Op} - E$$

$$\Delta H^{MC} = 2.332m - \Delta H^{Op} - E \quad (4.73)$$

Οπότε με εφαρμογή του ΝΜΣ προκύπτει η αβεβαιότητα της υψομετρικής διαφοράς και στη συνέχεια η αβεβαιότητα του υψομέτρου του σημείου.

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta O}\right)^2 \sigma_O^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta \Delta H^{Op}}\right)^2 \sigma_{\Delta H^{Op}}^2}$$

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm \sqrt{\sigma_O^2 + \sigma_E^2 + \sigma_{\Delta H^{Op}}^2} \quad (4.74)$$

$$\sigma_{Hi} = \pm \sqrt{(\sigma_{\Delta H^{MC}})^2 + \sigma_{HRB}^2} = \pm \sigma_{\Delta H^{MC}} \quad (4.75)$$

Ωστόσο κατά το στάδιο της αποτύπωσης ο χωροβάτης είχε τοποθετηθεί στο κέντρο της περιοχής μελέτης, ενώ στο στάδιο της χάραξης εκτός αυτής, οπότε το σφάλμα προσδιορισμού των υψομέτρων σε κάθε περίπτωση είναι συνδυασμός του σφάλματος ανάγνωσης κατά την αποτύπωση και κατά τη χάραξη. Ο συνδυασμός αυτός παρουσιάζεται στον πίνακα 5, μαζί με σχέδιο της θέσης του χωροβάτη στα διάφορα στάδια της εφαρμογής (σχήμα 21).

Κορυφή R3

Ομοίως

$$(4.46) \Rightarrow \Delta H^{E\pi} = (H_{R3E} - H_{R3} - YE) + 168.3\text{mm} + (204\text{m} - 203.063\text{m})$$

$$= (205.563\text{m} - 204\text{m} - 0.1683\text{m}) + 0.1683\text{m} + 0.937\text{m}$$

$$\Delta H^{E\pi} = 2.5\text{m} \quad (4.76)$$

$$(4.47) \Rightarrow \Delta H^{MC} = \Delta H^{E\pi} - E = 2.5\text{m} - 0.1683\text{m} - \Delta H^{Op} - E$$

$$\Delta H^{MC} = 2.332\text{m} - \Delta H^{Op} - E \quad (4.77)$$

Οπότε ισχύουν οι ίδιες σχέσεις και με εφαρμογή του ΝΜΣ προκύπτει η αβεβαιότητα της υψομετρικής διαφοράς και στη συνέχεια η αβεβαιότητα του υψομέτρου του σημείου, με τη διαφορά ότι συνυπολογίζεται και η αβεβαιότητα προσδιορισμού της κορυφής R3.

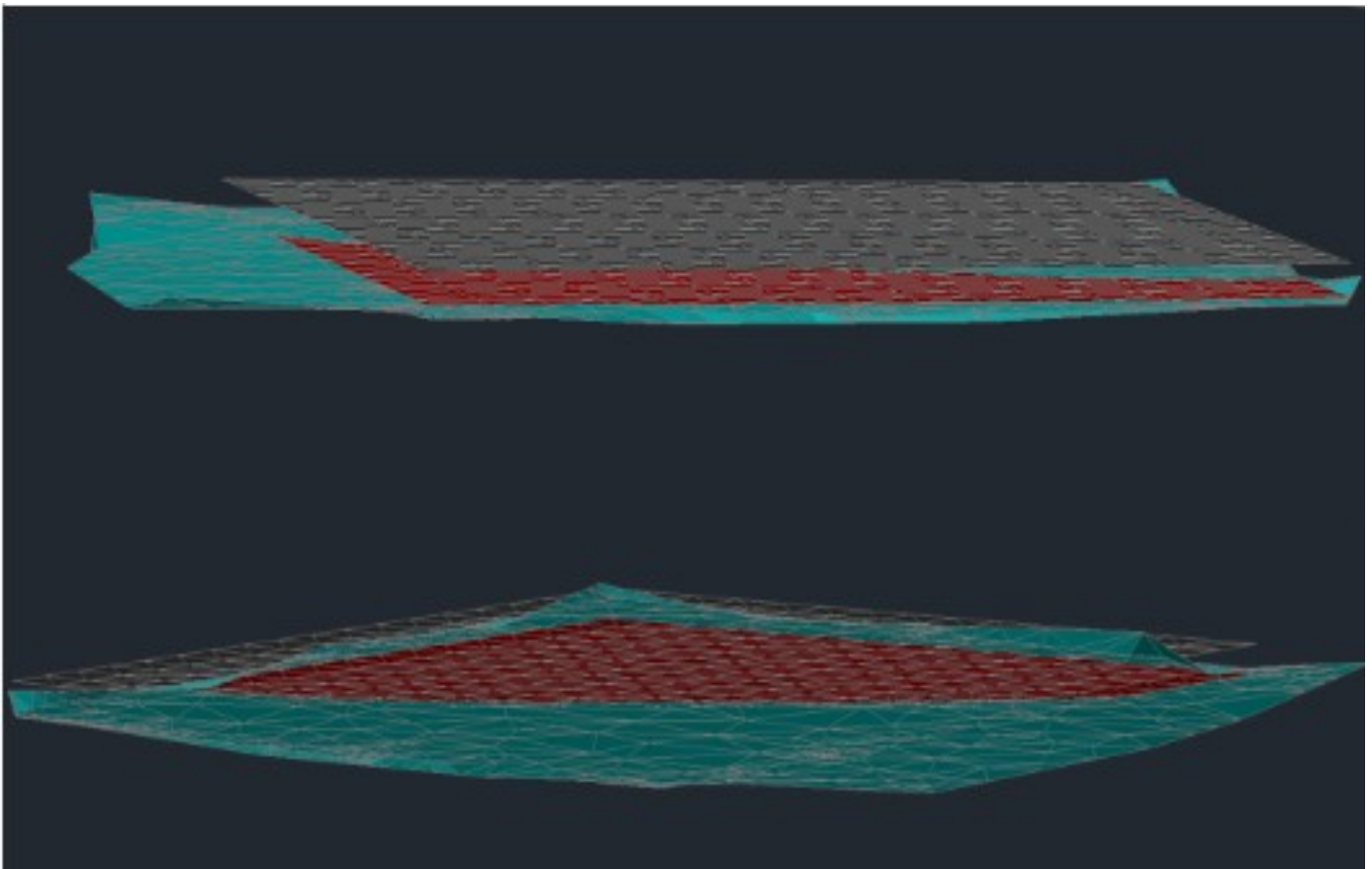
$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta O}\right)^2 \sigma_O^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\theta \Delta H^{MC}}{\theta \Delta H^{Op}}\right)^2 \sigma_{\Delta H^{Op}}^2}$$

$$\sigma_{\Delta H^{MC}} = \pm \sqrt{\sigma_O^2 + \sigma_E^2 + \sigma_{\Delta H^{Op}}^2} \quad (4.74)$$

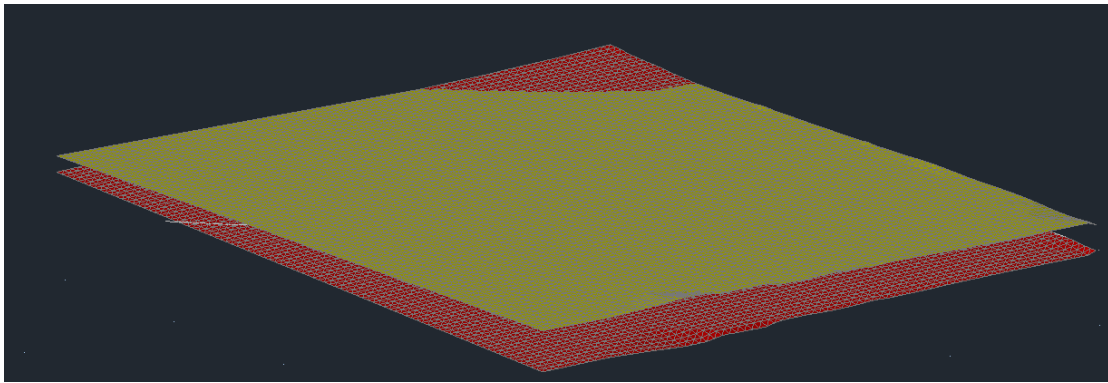
$$\sigma_{Hi} = \pm \sqrt{(\sigma_{\Delta H^{MC}})^2 + \sigma_{HR3}^2} \quad (4.78)$$

Ο πίνακας 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν το σφάλμα του υψομέτρου των σημείων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\pm 2.9\text{mm}$ – $\pm 4.6\text{mm}$, η οποία ακρίβεια καλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής. Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της αποτύπωσης στη χειρότερη δυνατή περίπτωση, δηλαδή αβεβαιότητα αποτύπωσης $\pm 7.5\text{mm}$, από το ΝΜΣ προκύπτει μέγιστο σφάλμα $\pm 8.7\text{mm}$, οπότε η υψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης με αυτή τη μέθοδο αποφέρει ορθά και ακριβή αποτελέσματα και σε συντομότερο χρονικό διάστημα, καθώς η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη, με το όχημα να χρειάζεται ελάχιστο αριθμό περασμάτων από το κάθε σημείο.



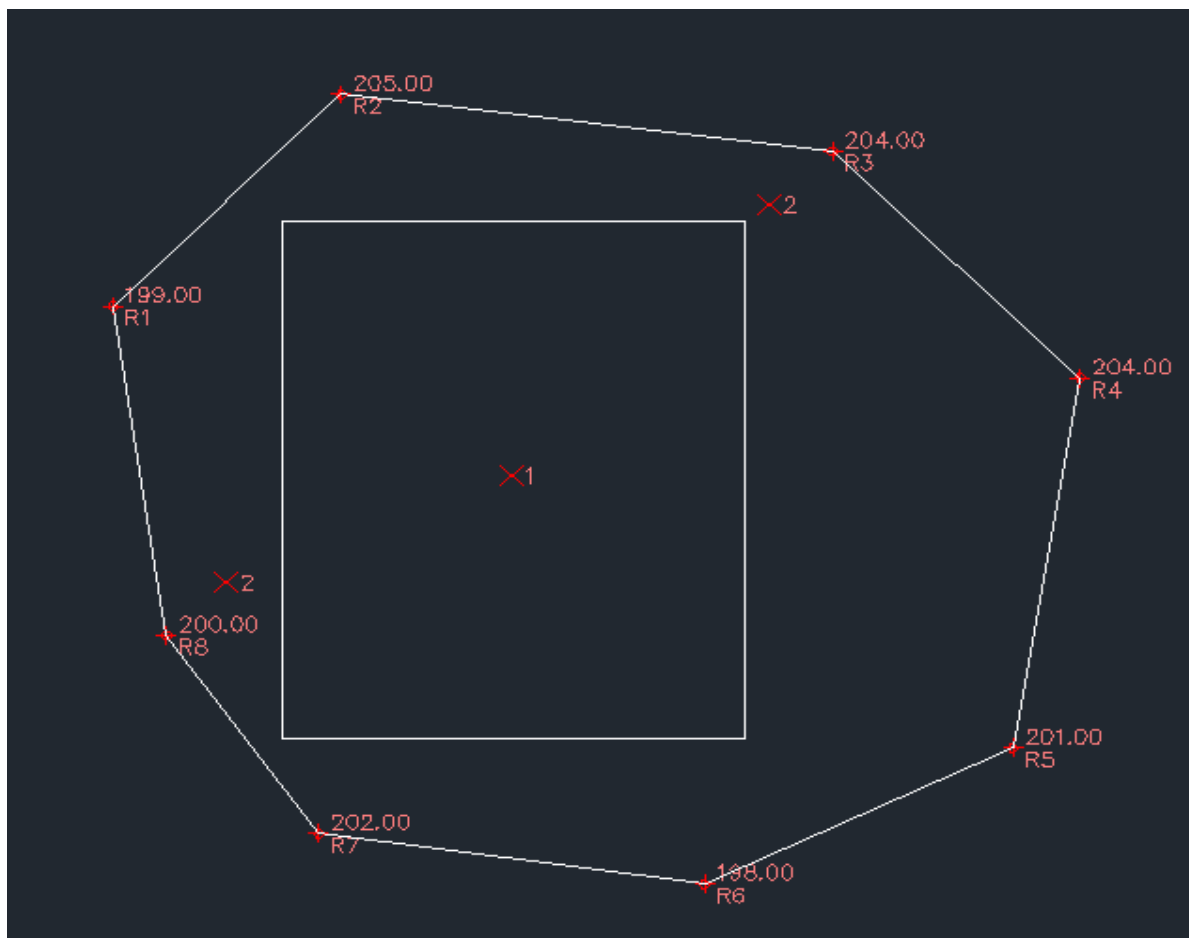
Εικόνα 22: Επιφάνειες εφαρμογής (ΨΜΕ:μπλε ,μοντέλο χώρου στάθμευσης: κόκκινο ,επίπεδο laser χωροβάτη:γκρι)



Εικόνα 23: Υψομετρικές διαφορές (κίτρινο: ΦΓΕ-μοντέλο, κόκκινο: Επίπεδο laser - ΦΓΕ)

$\sigma_{HR8}(\text{mm})$	± 0.0								
$\sigma_q(\text{mm})$	± 0.5								
Απόσταση από χωροβάτη(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\sigma_E(\text{mm})$	± 0.5	± 1	± 1.5	± 2	± 2.5	± 3	± 3.5	± 4	± 4.5
Απόσταση από χωροβάτη(m)	70	60	50	40	30	20	10	10	20
$\sigma_{\Delta O_8}(\text{mm})$	± 3.5	± 3	± 2.5	± 2	± 1.5	± 1	± 0.5	± 0.5	± 1
$\sigma_{\Delta HMC}(\text{mm})$	± 3.57	± 3.20	± 2.96	± 2.87	± 2.96	± 3.20	± 3.57	± 4.06	± 4.64
$\sigma_H(\text{mm})$	± 3.57	± 3.20	± 2.96	± 2.87	± 2.96	± 3.20	± 3.57	± 4.06	± 4.64

Πίνακας 5: Αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομέτρων του μοντέλου από την κορυφή R8(σ_H)



Σχήμα 21: Θέση χωροβάτη σε κάθε φάση

$\sigma_{HR3}(mm)$	± 1.63							
$\sigma_q (mm)$	± 0.5							
Απόσταση από χωροβάτη(m)	10	20	30	40	50	60	70	80
$\sigma_E(mm)$	± 0.5	± 1	± 1.5	± 2	± 2.5	± 3	± 3.5	± 4
Απόσταση από χωροβάτη(m)	70	60	50	40	30	20	10	10
$\sigma_{\Delta O_3}(mm)$	± 3.5	± 3	± 2.5	± 2	± 1.5	± 1	± 0.5	± 0.5
$\sigma_{\Delta HMC}(mm)$	± 3.57	± 3.20	± 2.96	± 2.87	± 2.96	± 3.20	± 3.57	± 4.06
$\sigma_{HI}(mm)$	± 3.93	± 3.59	± 3.38	± 3.30	± 3.38	± 3.59	± 3.93	± 4.38

Πίνακας 6: Αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομέτρων του μοντέλου από την κορυφή R3(σ_{HI})

4.4.2 Κατασκευή οδού 1 χιλιομέτρου με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού

Η δεύτερη εφαρμογή που εξετάζεται είναι η περίπτωση της υψομετρικής υλοποίησης ενός τμήματος οδικού δικτύου μήκους 1 χιλιομέτρου. Ως υψομετρική υλοποίηση θεωρείται η φάση της κατασκευής πριν την ασφαλτόστρωση της οδού. Η υλοποίηση της οδού απαιτείται να γίνει με ακρίβεια $\pm 9.5mm$. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι ένας ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός με ακρίβεια ανάγνωσης γωνίας 1.5 cc και ακρίβεια μέτρησης στο μήκος 1mm + 2 ppm και δυνατότητας παρακολούθησης στόχου και ένας ισοπεδωτής (grader), ίδιος σε διαστάσεις με αυτόν της εφαρμογής 4.4.1.

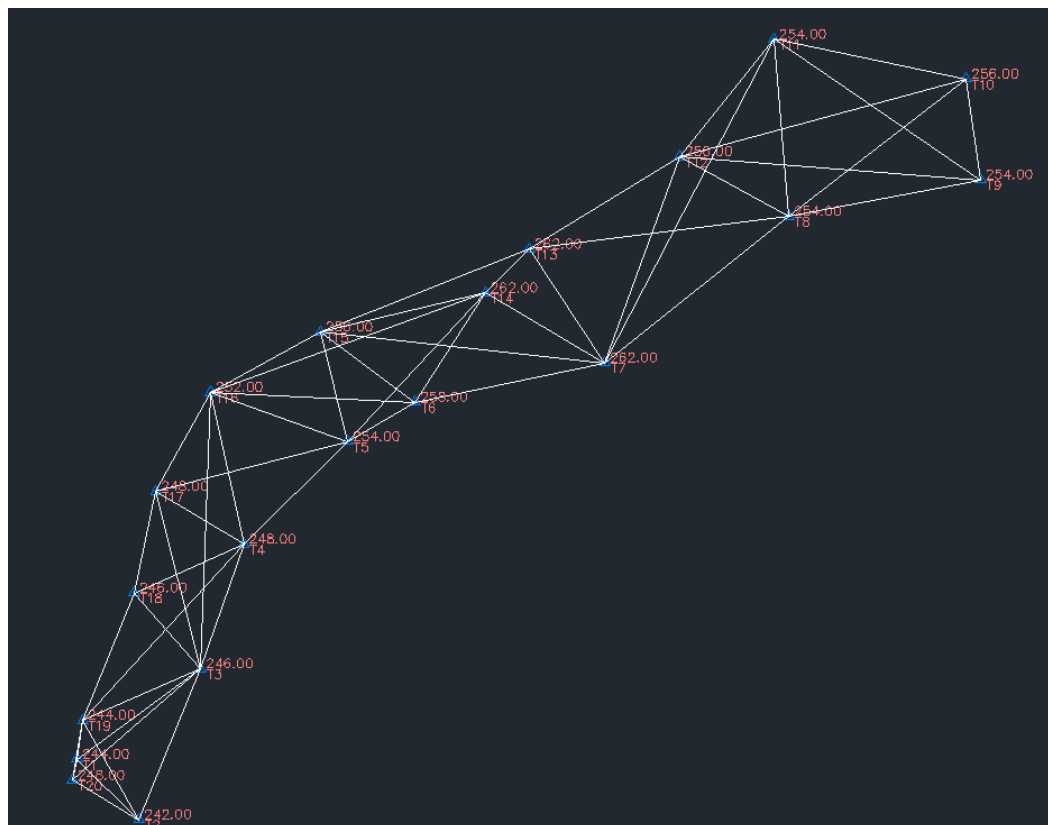
Αρχικά υλοποιείται και επιλύεται το τριγωνομετρικό δίκτυο της περιοχής μελέτης στο ΕΓΣΑ '87(σχήμα 22) και στη συνέχεια υλοποιείται το Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους.

Το τριγωνομετρικό δίκτυο αποτελείται από 20 κορυφές, οι οποίες βρίσκονται εκατέρωθεν της οδού που κατασκευάζεται. Η μέθοδος μέτρησης του δικτύου είναι η κλασική μέθοδος μέτρησης ενός τριγωνομετρικού δικτύου. Ο γεωδαιτικός σταθμός κεντρώνεται και

οριζοντιώνεται σε κάθε μία από τις κορυφές και έπειτα πραγματοποιεί τις απαραίτητες μετρήσεις μήκους και γωνιών προς άλλες κορυφές του δικτύου. Αφού έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις επιλύθηκε το δίκτυο με τη ΜΕΤ και του λογισμικού *optimnet*, που παρέχεται από τη ΣΑΤΜ- ΜΓ και το εργαστήριο γεωδαισίας. Θεωρήθηκε ότι έγιναν μετρήσεις 72 γωνιών και 52 αποστάσεων και πραγματοποιήθηκε η επίλυση του δικτύου. Θεωρείται ότι οι τιμές των υψομέτρων είναι χωρίς σφάλμα. Η σταθερή κορυφή του δικτύου είναι η κορυφή T1 με την κορυφή T2 να είναι ημισταθερή. Οι άγνωστοι καθοριστικοί παράμετροι είναι $m=37$, οπότε ο αριθμός ελευθερίας του δικτύου είναι

$$r=n-m=87$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα των συντεταγμένων με τις αβεβαιότητες τους (πίνακας 7) μαζί με τον πίνακα μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας (πίνακας 8).



Σχήμα 22: Τριγωνομετρικό δίκτυο περιοχής μελέτης

α/α	X(m)	$\sigma X(\text{mm})$	Y(m)	$\sigma Y(\text{mm})$	H(m)
T1	480052.043	± 0	4200154.002	± 0	244
T2	480103.081	± 1	4200104.404	± 0	242
T3	480153.872	± 1	4200228.430	± 1	246
T4	480189.160	± 1	4200330.727	± 1	248
T5	480274.490	± 1	4200415.209	± 1	254
T6	480330.131	± 2	4200447.675	± 1	258
T7	480486.140	± 2	4200480.064	± 2	262
T8	480637.394	± 3	4200600.447	± 3	254
T9	480795.023	± 3	4200630.524	± 4	254
T10	480783.227	± 3	4200713.338	± 4	256
T11	480625.069	± 4	4200745.933	± 3	254
T12	480547.786	± 3	4200649.578	± 2	256
T13	480423.967	± 2	4200573.388	± 1	262
T14	480387.840	± 2	4200537.441	± 1	262
T15	480252.249	± 2	4200505.206	± 1	256
T16	480161.783	± 2	4200455.720	± 1	252
T17	480116.952	± 1	4200374.121	± 1	248
T18	480099.176	± 1	4200290.852	± 1	246
T19	480056.795	± 0	4200186.115	± 0	244
T20	480048.356	± 0	4200136.763	± 0	248

Πίνακας 7: Πίνακας συντεταγμένων κορυφών δικτύου

3.46E-07	2.21E-07	3.55E-08	2.88E-07	1.06E-07	3.40E-07	4.18E-08	3.56E-07	-1.02E-08	3.61E-07	-1.46E-07	4.36E-07	-3.00E-07	4.53E-07	-4.37E-07	5.22E-07	-4.31E-07	5.57E-07
2.21E-07	4.64E-07	1.68E-07	5.92E-07	2.14E-07	7.06E-07	6.63E-08	7.43E-07	-4.21E-08	7.55E-07	-3.28E-07	9.16E-07	-6.49E-07	9.55E-07	-9.35E-07	1.10E-06	-9.23E-07	1.17E-06
3.55E-08	1.68E-07	2.70E-07	5.10E-08	1.06E-07	-3.35E-08	1.84E-07	-7.67E-08	2.14E-07	-1.37E-07	3.20E-07	-2.65E-07	3.91E-07	-2.99E-07	5.02E-07	-3.60E-07	4.86E-07	-3.74E-07
2.88E-07	5.92E-07	5.10E-08	1.02E-06	3.14E-07	1.28E-06	-1.08E-08	1.38E-06	-2.34E-07	1.46E-06	-8.37E-07	1.85E-06	-1.47E-06	1.95E-06	-2.08E-06	2.26E-06	-2.05E-06	2.40E-06
1.06E-07	2.14E-07	1.06E-07	3.14E-07	2.81E-07	3.39E-07	1.93E-07	3.44E-07	1.37E-07	3.28E-07	-2.48E-09	3.78E-07	-1.80E-07	3.88E-07	-3.20E-07	4.56E-07	-3.19E-07	4.96E-07
3.40E-07	7.06E-07	-3.35E-08	1.28E-06	3.39E-07	2.16E-06	-1.96E-07	2.43E-06	-5.57E-07	2.61E-06	-1.74E-06	3.46E-06	-2.98E-06	3.67E-06	-4.20E-06	4.30E-06	-4.12E-06	4.57E-06
4.18E-08	6.63E-08	1.84E-07	-1.08E-08	1.93E-07	-1.96E-07	6.28E-07	-3.74E-07	7.05E-07	-5.34E-07	1.02E-06	-9.14E-07	1.25E-06	-1.01E-06	1.58E-06	-1.20E-06	1.54E-06	-1.24E-06
3.56E-07	7.43E-07	-7.67E-08	1.38E-06	3.44E-07	2.43E-06	-3.74E-07	2.95E-06	-7.38E-07	3.16E-06	-2.14E-06	4.18E-06	-3.64E-06	4.45E-06	-5.13E-06	5.22E-06	-5.03E-06	5.54E-06
-1.02E-08	-4.21E-08	2.14E-07	-2.34E-07	1.37E-07	-5.57E-07	7.05E-07	-7.38E-07	9.58E-07	-1.01E-06	1.59E-06	-1.67E-06	2.08E-06	-1.84E-06	2.72E-06	-2.19E-06	2.65E-06	-2.29E-06
3.61E-07	7.55E-07	-1.37E-07	1.46E-06	3.28E-07	2.61E-06	-5.34E-07	3.16E-06	-1.01E-06	3.79E-06	-2.60E-06	4.99E-06	-4.20E-06	5.28E-06	-5.92E-06	6.16E-06	-5.79E-06	6.51E-06
-1.46E-07	-3.28E-07	3.20E-07	-8.37E-07	-2.48E-09	-1.74E-06	1.02E-06	-2.14E-06	1.59E-06	-2.60E-06	3.31E-06	-4.14E-06	4.71E-06	-4.52E-06	6.38E-06	-5.42E-06	6.21E-06	-5.72E-06
4.36E-07	9.16E-07	-2.65E-07	1.85E-06	3.78E-07	3.46E-06	-9.14E-07	4.18E-06	-1.67E-06	4.99E-06	-4.14E-06	7.28E-06	-6.41E-06	7.69E-06	-9.04E-06	9.04E-06	-8.74E-06	9.56E-06
-3.00E-07	-6.49E-07	3.91E-07	-1.47E-06	-1.80E-07	-2.98E-06	1.25E-06	-3.64E-06	2.08E-06	-4.20E-06	4.71E-06	-6.41E-06	7.48E-06	-7.11E-06	1.03E-05	-8.62E-06	1.00E-05	-9.09E-06
4.53E-07	9.55E-07	-2.99E-07	1.95E-06	3.88E-07	3.67E-06	-1.01E-06	4.45E-06	-1.84E-06	5.28E-06	-4.52E-06	7.69E-06	-7.11E-06	8.59E-06	-9.93E-06	1.01E-05	-9.58E-06	1.03E-05
-4.37E-07	-9.35E-07	5.02E-07	-2.08E-06	-3.20E-07	-4.20E-06	1.58E-06	-5.13E-06	2.72E-06	-5.92E-06	6.38E-06	-9.04E-06	1.03E-05	-9.93E-06	1.44E-05	-1.21E-05	1.40E-05	-1.28E-05
5.22E-07	1.10E-06	-3.60E-07	2.26E-06	4.56E-07	4.30E-06	-1.20E-06	5.22E-06	-2.19E-06	6.16E-06	-5.42E-06	9.04E-06	-8.62E-06	1.01E-05	-1.21E-05	1.19E-05	-1.18E-05	1.23E-05
-4.31E-07	-9.23E-07	4.86E-07	-2.05E-06	-3.19E-07	-4.12E-06	1.54E-06	-5.03E-06	2.65E-06	-5.79E-06	6.21E-06	-8.74E-06	1.00E-05	-9.58E-06	1.40E-05	-1.18E-05	1.39E-05	-1.26E-05
5.57E-07	1.17E-06	-3.74E-07	2.40E-06	4.96E-07	4.57E-06	-1.24E-06	5.54E-06	-2.29E-06	6.51E-06	-5.72E-06	9.56E-06	-9.09E-06	1.03E-05	-1.28E-05	1.23E-05	-1.26E-05	1.31E-05
-3.06E-07	-6.57E-07	3.59E-07	-1.46E-06	-2.00E-07	-2.92E-06	1.15E-06	-3.57E-06	1.94E-06	-4.13E-06	4.45E-06	-6.19E-06	7.03E-06	-6.69E-06	9.75E-06	-8.13E-06	9.56E-06	-8.79E-06
4.87E-07	1.02E-06	-2.87E-07	2.06E-06	4.37E-07	3.85E-06	-9.83E-07	4.66E-06	-1.83E-06	5.53E-06	-4.59E-06	7.96E-06	-7.20E-06	8.47E-06	-1.02E-05	1.00E-05	-9.97E-06	1.07E-05
-2.29E-07	-4.99E-07	3.18E-07	-1.14E-06	-1.14E-07	-2.30E-06	1.03E-06	-2.82E-06	1.68E-06	-3.22E-06	3.70E-06	-4.85E-06	5.80E-06	-5.40E-06	7.89E-06	-6.52E-06	7.71E-06	-6.90E-06
4.49E-07	9.40E-07	-1.91E-07	1.83E-06	4.23E-07	3.36E-06	-7.04E-07	4.07E-06	-1.35E-06	4.70E-06	-3.53E-06	6.41E-06	-5.83E-06	6.85E-06	-8.19E-06	8.08E-06	-8.00E-06	8.56E-06
-1.06E-07	-2.44E-07	2.53E-07	-6.25E-07	2.56E-08	-1.28E-06	8.37E-07	-1.58E-06	1.26E-06	-1.80E-06	2.52E-06	-2.94E-06	3.61E-06	-3.24E-06	4.82E-06	-3.91E-06	4.71E-06	-4.13E-06
4.24E-07	8.86E-07	-1.55E-07	1.70E-06	4.02E-07	3.04E-06	-6.11E-07	3.69E-06	-1.20E-06	4.19E-06	-3.10E-06	5.69E-06	-5.13E-06	6.07E-06	-7.20E-06	7.15E-06	-7.06E-06	7.59E-06
-6.92E-08	-1.67E-07	2.37E-07	-4.74E-07	6.80E-08	-1.02E-06	7.83E-07	-1.27E-06	1.13E-06	-1.49E-06	2.19E-06	-2.46E-06	3.03E-06	-2.71E-06	4.03E-06	-3.26E-06	3.92E-06	-3.42E-06
4.12E-07	8.61E-07	-1.03E-07	1.62E-06	4.10E-07	2.82E-06	-4.43E-07	3.28E-06	-9.67E-07	3.58E-06	-2.71E-06	4.90E-06	-4.49E-06	5.23E-06	-6.28E-06	6.17E-06	-6.15E-06	6.54E-06
5.02E-08	8.22E-08	1.43E-07	5.45E-08	1.91E-07	8.83E-08	5.12E-07	7.34E-08	6.13E-07	-5.62E-08	7.56E-07	-3.01E-07	7.39E-07	-3.62E-07	8.49E-07	-4.34E-07	8.22E-07	-4.34E-07
3.85E-07	8.07E-07	-3.79E-08	1.44E-06	3.87E-07	2.22E-06	-3.44E-07	2.54E-06	-8.15E-07	2.81E-06	-2.18E-06	3.85E-06	-3.54E-06	4.11E-06	-4.93E-06	4.84E-06	-4.83E-06	5.13E-06
1.33E-07	2.54E-07	8.76E-08	4.12E-07	2.76E-07	6.59E-07	3.44E-07	7.06E-07	2.36E-07	7.13E-07	-1.13E-07	8.85E-07	-5.41E-07	9.26E-07	-9.05E-07	1.11E-06	-8.90E-07	1.20E-06
3.08E-07	6.58E-07	2.39E-08	1.12E-06	3.25E-07	1.56E-06	-2.31E-07	1.74E-06	-5.34E-07	1.89E-06	-1.39E-06	2.53E-06	-2.25E-06	2.68E-06	-3.12E-06	3.14E-06	-3.06E-06	3.32E-06
1.85E-07	3.59E-07	6.43E-08	6.23E-07	3.45E-07	8.37E-07	1.62E-07	9.08E-07	-3.61E-08	9.08E-07	-5.42E-07	1.32E-06	-1.07E-06	1.40E-06	-1.59E-06	1.66E-06	-1.56E-06	1.78E-06
1.87E-07	4.50E-07	9.36E-08	6.79E-07	2.00E-07	8.92E-07	-8.09E-08	9.80E-07	-2.38E-07	1.04E-06	-6.80E-07	1.35E-06	-1.13E-06	1.42E-06	-1.58E-06	1.66E-06	-1.55E-06	1.75E-06
1.81E-07	3.98E-07	2.97E-07	3.94E-07	2.13E-07	3.85E-07	2.09E-07	3.65E-07	1.70E-07	3.22E-07	9.52E-08	3.04E-07	-3.25E-08	2.97E-07	-1.05E-07	3.28E-07	-1.11E-07	3.58E-07
5.35E-08	1.11E-07	-9.54E-09	1.97E-07	4.28E-08	2.73E-07	-4.45E-08	3.05E-07	-9.67E-08	3.32E-07	-2.45E-07	4.42E-07	-3.92E-07	4.69E-07	-5.42E-07	5.48E-07	-5.32E-07	5.80E-07
7.89E-08	2.32E-07	7.40E-08	3.61E-07	1.26E-07	5.06E-07	-3.76E-08	5.65E-07	-1.38E-07	6.08E-07	-4.19E-07	8.10E-07	-7.06E-07	8.60E-07	-9.91E-07	1.01E-06	-9.72E-07	1.07E-06
-2.16E-08	-1.52E-08	2.59E-09	-2.42E-08	-5.98E-09	-3.08E-08	1.21E-09	-3.32E-08	6.49E-09	-3.51E-08	2.09E-08	-4.48E-08	3.60E-08	-4.71E-08	5.06E-08	-5.46E-08	4.97E-08	-5.79E-08
-1.07E-07	5.75E-08	-1.39E-09	1.24E-07	1.91E-08	1.90E-07	-5.40E-08	2.18E-07	-9.42E-08	2.44E-07	-2.11E-07	3.37E-07	-3.23E-07	3.61E-07	-4.41E-07	4.23E-07	-4.32E-07	4.47E-07
-3.06E-07	4.87E-07	-2.29E-07	4.49E-07	-1.06E-07	4.24E-07	-6.92E-08	4.12E-07	5.02E-08	3.85E-07	1.33E-07	3.08E-07	1.85E-07	1.87E-07	1.81E-07	5.35E-08	7.89E-08	-2.16E-08
-6.57E-07	1.02E-06	-4.99E-07	9.40E-07	-2.44E-07	8.86E-07	-1.67E-07	8.61E-07	8.22E-08	8.07E-07	2.54E-07	6.58E-07	3.59E-07	4.50E-07	3.98E-07	1.11E-07	2.33E-07	-1.52E-08
3.59E-07	-2.87E-07	3.18E-07	-1.91E-07	2.53E-07	-1.55E-07	2.37E-07	-1.03E-07	1.43E-07	-3.79E-08	8.76E-08	2.39E-08	6.43E-08	9.36E-08	2.97E-07	-9.54E-09	7.40E-08	2.59E-09
-1.46E-06	2.06E-06	-1.14E-06	1.83E-06	-6.25E-07	1.70E-06	-4.74E-07	1.62E-06	5.45E-08	1.44E-06	4.12E-07	1.12E-06	6.23E-07	6.79E-07	3.94E-07	1.97E-07	3.61E-07	-2.42E-08
-2.00E-07	4.37E-07	-1.14E-07	4.23E-07	2.56E-08	4.02E-07	6.80E-08	4.10E-07	1.91E-07	3.87E-07	2.76E-07	3.25E-07	3.45E-07	2.00E-07	2.13E-07	4.28E-08	1.26E-07	-5.98E-09
-2.92E-06	3.85E-06	-2.30E-06	3.36E-06	-1.28E-06	3.04E-06	-1.02E-06	2.82E-06	8.83E-08	2.22E-06	6.59E-07	1.56E-06	8.37E-07	8.92E-07	3.85E-07	2.73E-07	5.06E-07	-3.08E-08
1.15E-06	-9.83E-07	1.03E-06	-7.04E-07	8.37E-07	-6.11E-07	7.83E-07	-4.49E-07	5.12E-07	-3.44E-07	3.44E-07	-2.31E-07	1.62E-07	-8.09E-08	2.09E-07	-4.45E-08	-3.76E-08	1.21E-09
-3.57E-06	4.66E-06	-2.82E-06	4.07E-06	-1.58E-06	3.69E-06	-1.27E-06	3.28E-06	7.34E-08	2.54E-06	7.06E-07	1.74E-06	9.08E-07	9.80E-07	3.65E-07	3.05E-07	5.65E-07	-3.32E-08
1.94E-06	-1.83E-06	1.68E-06	-1.35E-06	1.26E-06	-1.20E-06	1.13E-06	-9.67E-07	6.13E-07	-8.15E-07	2.36E-07	-5.34E-07	-3.61E-08	-2.38E-07	1.70E-07	-9.67E-08	-1.38E-07	6.49E-09
-4.13E-06	5.53E-06	-3.22E-06	4.70E-06	-1.80E-06	4.19E-06	-1.49E-06	3.58E-06	-5.62E-08	2.81E-06	7.13E-07	1.89E-06	9.82E-07	1.04E-06	3.22E-07	3.32E-07	6.08E-07	-3.51E-08
4.45E-06	-4.59E-06	3.70E-06	-3.53E-06	2.52E-06	-3.10E-06	2.19E-06	-2.71E-06	7.56E-07	-2.18E-06	-1.13E-07	-1.39E-06	-5.42E-07	-6.80E-07	9.52E-08	-2.45E-07	-4.19E-07	2.09E-08
-6.19E-06	7.96E-06	-4.85E-06	6.41E-06	-2.94E-06	5.69E-06	-2.46E-06	4.90E-06	-3.01E-07	3.85E-06	8.85E-07	2.53E-06	1.32E-06	1.35E-06	3.04E-07	4.42E-07	8.10E-07	-4.48E-08
7.03E-06	-7.20E-06	5.80E-06	-5.83E-06	3.61E-06	-5.13E-06	3.03E-06	-4.49E-06	7.39E-07	-3.54E-06	-5.41E-07	-2.25E-06	-1.07E-06	-1.13E-06	-3.25E-08	-3.92E-07	-7.06E-07	3.60E-08
-6.69E-06	8.47E-06	-5.40E-06	6.85E-06	-3.24E-06	6.07E-06	-2.71E-06	5.23E-06	-3.62E-07	4.11E-06	9.26E-07	2.68E-06	1.40E-06	1.42E-06	2.97E-07	4.69E-07	8.60E-07	-4.71E-08
9.75E-06	-1.02E-05	7.89E-06	-8.19E-06	4.82E-06	-7.20E-06	4.03E-06	-6.28E-06	8.49E-07	-4.93E-06	-9.05E-07	-3.12E-06						

Με την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη εφαρμογή δημιουργήθηκε το ΨΜΕ και το τελικό μοντέλο της οδού, τα οποία παρουσιάζονται στην (εικόνα 24).

Στη συνέχεια υλοποιούνται οδεύσεις στην περιοχή μελέτης, για τις οποίες στο πλαίσιο της διπλωματικής δε θα αναλυθούν, καθώς δεν υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα. Με την ολοκλήρωση των οδεύσεων ξεκινάει το στάδιο της αποτύπωσης της ΦΓΕ με τη μέθοδο της ταχυμετρίας. Θεωρώντας ότι η ακρίβεια προσδιορισμού των κορυφών της όδευσης είναι κατά μέσο όρο $\pm 5\text{mm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 7\text{mm}$ υψομετρικά, σύμφωνα με τις σχέσεις (4.56),(4.57),(4.58), (4.59), (4.60) και (4.61) και για αποστάσεις της τάξης των 150m έχουμε:

$$\sigma_D = \pm \sqrt{1 + (2 * 150 / 1000)^2} = \pm 1.04 \text{ mm}$$

$$\sigma_S = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 1.10 \text{ mm}$$

$$\sigma_\alpha = \pm \sqrt{\left(\sigma_x \frac{\sqrt{2}}{S} \rho^{cc} \right)^2 + (\sqrt{2} \sigma_\delta)^2} = \pm 24.1 \text{ cc}$$

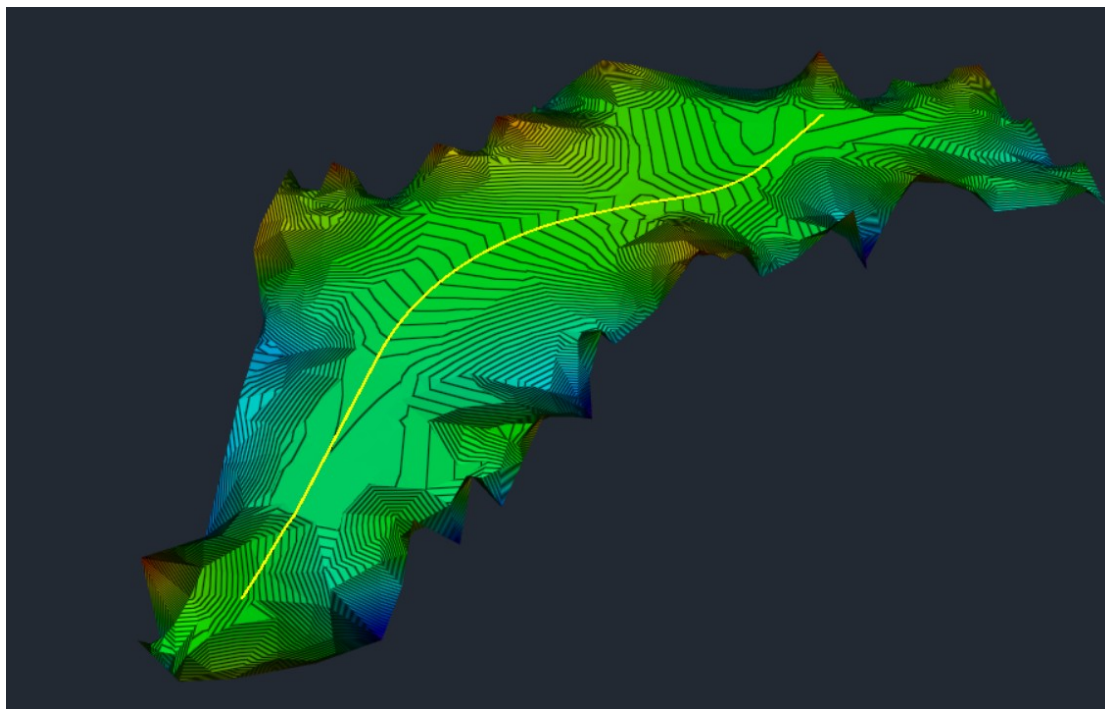
$$\sigma_x = \pm \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sin \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (S \cos \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 7.6 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{(\sigma_y)^2 + (\cos \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (-S \sin \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 7.6 \text{ mm}$$

$$\sigma_{YO} = \sigma_{Y\Sigma} = \pm 1 \text{ mm}$$

$$k = 0.14$$

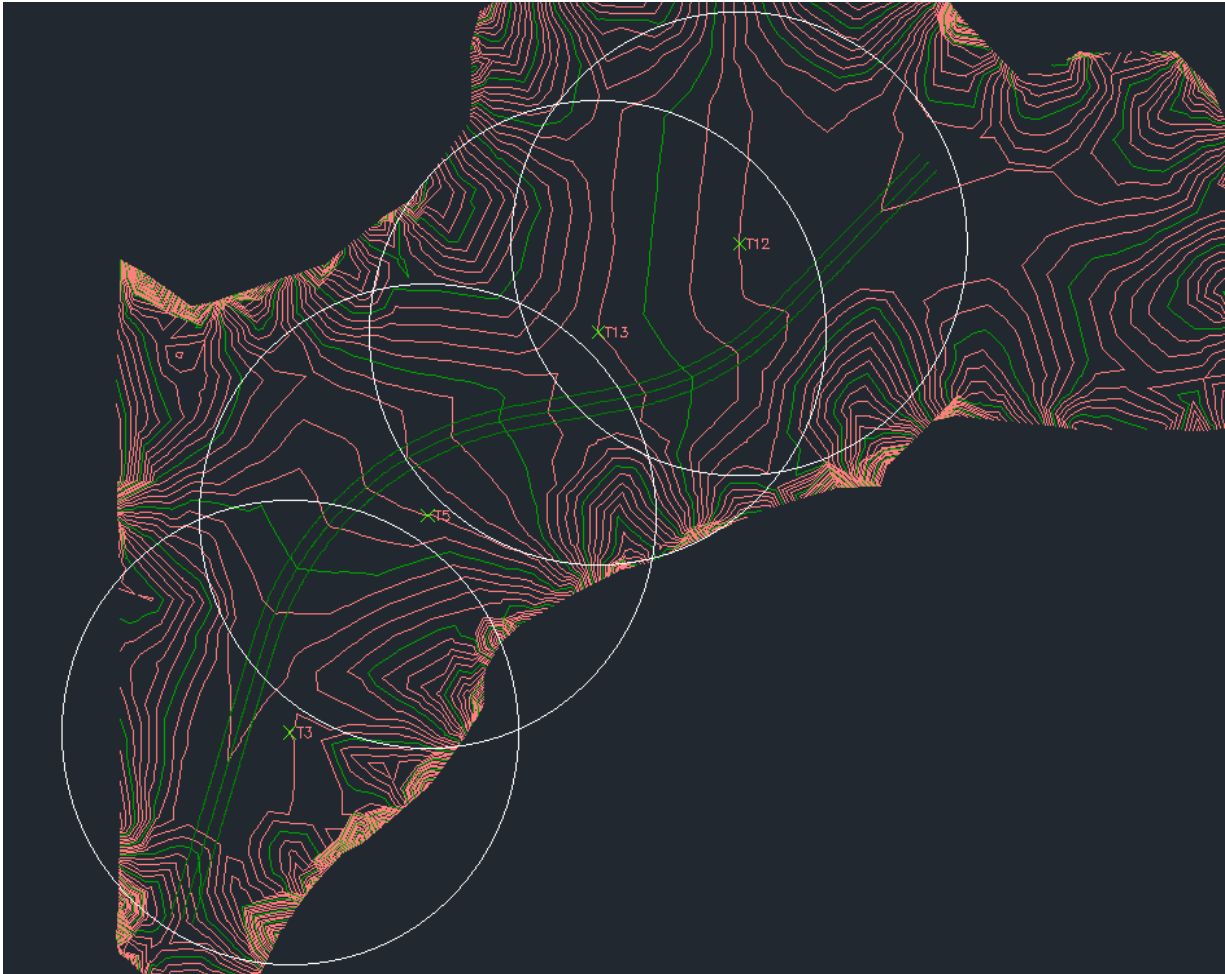
$$\sigma_H = \pm \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \left(\cos z + \frac{(1-k) D \sin^2 z}{R} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-k) D^2 \frac{\sin 2z}{2R} \right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2 + \sigma_{YO}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2} = \pm 7.2 \text{ mm}$$



Εικόνα 24: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μαζί με το μοντέλο της οδού

Η υλοποίηση της οδού είναι πρακτικά η διαφορά του μοντέλου της οδού με τη ΦΓΕ, όπως και στη δισδιάστατη επίλυση. Η διαφορά στη τρισδιάστατη επίλυση είναι η δυνατότητα αυτόνομης καθοδήγησης του οχήματος, χωρίς την παρέμβαση του χειριστή. Στην εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο, ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετείται στις κορυφές με την καλύτερη ακρίβεια που προέκυψαν από τις επιλύσεις δικτύου και όδευσης και μετράει συνεχώς ως προς το κατάφωτο. Επιλέγονται 4 κορυφές, με την κάθε μία να μετράει σε μια ακτίνα 200m και υπολογίζεται η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων του καταφώτου και στη συνέχεια η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων στην κάτω άκρη της λεπίδας.

Οι κορυφές του δικτύου που επιλέχθηκαν ως στάσεις του οργάνου είναι η T3, η T5, η T13 και η T12, όπως παρουσιάζεται και στο σκαρίφημα (σχήμα 23). Πριν τον υπολογισμό της αβεβαιότητας προσδιορισμού των συντεταγμένων του καταφώτου για κάθε κορυφή και κατ' επέκταση και της λεπίδας θα προσδιοριστεί και η ακρίβεια μέτρησης με παρακολούθηση στόχου.



Σχήμα 23: Θέσεις στάσεων γεωδαιτικού σταθμού

Κατά τη μέτρηση με παρακολούθηση στόχου υπάρχει πιθανότητα να διαφέρει η στόχευση του παρατηρητή με την αυτόματη στόχευση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές δεν αποτελεί πρόβλημα αλλά πρέπει να γίνεται έλεγχος πριν από κάθε εφαρμογή. Ο έλεγχος γίνεται ως εξής:

Πρώτα ο παρατηρητής στοχεύει χειροκίνητα το γεωδαιτικό σταθμό προς το κατάφωτο και καταγράφει τις αναγνώσεις οριζόντιας και ζενίθιας γωνίας. Έπειτα γίνεται αυτόματη στόχευση από το ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό προς το κατάφωτο και γίνεται η ίδια καταγραφή. Αν η διαφορά των δύο αναγνώσεων δεν είναι αποδεκτή με βάση την επιθυμητή ακρίβεια τότε επιβάλλεται η διόρθωση αυτή στην ανάγνωση των γωνιών σύμφωνα με τις σχέσεις (4.79),(4.80).

$$\beta_{TEΛ} = \beta_{ANAG} + \epsilon_{\beta} \quad (4.79)$$

$$z_{TEΛ} = z_{ANAG} + \varepsilon_z \quad (4.80)$$

με

$$\varepsilon_\beta = \beta_{\Pi AP} - \beta_{POM} \quad (4.81)$$

και

$$\varepsilon_z = z_{\Pi AP} - z_{POM} \quad (4.82)$$

$\beta_{TEΛ}$: διορθωμένη ανάγνωση οριζόντιας γωνίας, β_{ANAG} : η ανάγνωση της οριζόντιας γωνίας, $z_{TEΛ}$: διορθωμένη ανάγνωση ζενίθιας γωνίας, z_{ANAG} : η ανάγνωση της ζενίθιας γωνίας, $\beta_{\Pi AP}$: μέτρηση οριζόντιας γωνίας από τον παρατηρητή, β_{POM} : μέτρηση οριζόντιας γωνίας από τον γεωδαιτικό σταθμό, $z_{\Pi AP}$: μέτρηση ζενίθιας γωνίας από τον παρατηρητή, z_{POM} : μέτρηση ζενίθιας γωνίας από τον γεωδαιτικό σταθμό, ε_β : σφάλμα ανάγνωσης οριζόντιας γωνίας, ε_z : σφάλμα ανάγνωσης ζενίθιας γωνίας.

Θεωρώντας ότι δεν χρειάζεται διόρθωση των αναγνώσεων των γωνιών και ότι $\sigma_H = \sigma_x + 1 \text{ mm}$ έχουμε για κάθε κορυφή:

Στάση T3

$$\sigma_D = \pm \sqrt{1 + (2 * 200 / 1000)^2} = \pm 1.07 \text{ mm}$$

$$\sigma_S = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 1.10 \text{ mm}$$

$$\sigma_\alpha = \pm \sqrt{\left(\sigma_x \frac{\sqrt{2}}{S} \rho^{cc} \right)^2 + (\sqrt{2} \sigma_\delta)^2} = \pm 5 \text{ cc}$$

$$\sigma_{xK} = \pm \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sin \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (S \cos \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 2.2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{yK} = \pm \sqrt{(\sigma_y)^2 + (\cos \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (-S \sin \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2} = \pm 2.2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{YO} = \sigma_{Y\Sigma} = \pm 1 \text{ mm}$$

$$k = 0.14$$

$$\sigma_{HK} = \pm \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \left(\cos z + \frac{(1-k) D \sin^2 z}{R} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-k) D^2 \frac{\sin 2z}{2R} \right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc} \right)^2 + \sigma_{YO}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2} = \pm 2.5 \text{ mm}$$

Οπότε από τις σχέσεις (4.62),(4.63) και (4.64) και θεωρώντας ότι η αβεβαιότητα των διανυσμάτων ΔX, ΔY και ΔH είναι $\pm 1mm$ η τελική αβεβαιότητα των συντεταγμένων της λεπίδας (σχήμα 17) είναι:

$$\sigma_{XE} = \pm \sqrt{\sigma_{XK}^2 + \sigma_{\Delta X}^2} = \pm 2.4 mm$$

$$\sigma_{YE} = \pm \sqrt{\sigma_{YK}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2} = \pm 2.4 mm$$

$$\sigma_{HE} = \pm \sqrt{\sigma_{HK}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 2.7 mm$$

Στάση T5

$$\sigma_D = \pm \sqrt{1 + (2 * 200 / 1000)^2} = \pm 1.07 mm$$

$$\sigma_S = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} = \pm 1.10 mm$$

$$\sigma_\alpha = \pm \sqrt{\left(\sigma_x \frac{\sqrt{2}}{S} \rho^{cc}\right)^2 + (\sqrt{2} \sigma_\delta)^2} = \pm 5 cc$$

$$\sigma_{xK} = \pm \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sin \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (S \cos \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} = \pm 2.2 mm$$

$$\sigma_{yK} = \pm \sqrt{(\sigma_y)^2 + (\cos \alpha)^2 (\sigma_S)^2 + (-S \sin \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_\alpha^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} = \pm 2.2 mm$$

$$\sigma_{YO} = \sigma_{Y\Sigma} = \pm 1 mm$$

$$k = 0.14$$

$$\sigma_{HK} = \pm \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \left(\cos z + \frac{(1-k) D \sin^2 z}{R}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-k) D^2 \frac{\sin 2z}{2R}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2 + \sigma_{YO}^2 + \sigma_{Y\Sigma}^2} = \pm 2.5 mm$$

$$\sigma_{XE} = \pm \sqrt{\sigma_{XK}^2 + \sigma_{\Delta X}^2} = \pm 2.4 mm$$

$$\sigma_{YE} = \pm \sqrt{\sigma_{YK}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2} = \pm 2.4 mm$$

$$\sigma_{HE} = \pm \sqrt{\sigma_{HK}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 2.7 mm$$

Στάση T13

$$\sigma_D = \pm \sqrt{1 + (2 * 200 / 1000)^2} = \pm 1.07 mm$$

$$\sigma_S = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{\rho cc}}{\rho cc}\right)^2} = \pm 1.10 mm$$

$$\sigma_{\alpha} = \pm \sqrt{\left(\sigma_x \frac{\sqrt{2}}{S} \rho^{cc}\right)^2 + (\sqrt{2} \sigma_{\delta})^2} = \pm 9.2 cc$$

$$\sigma_{xK} = \pm \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sin \alpha)^2 (\sigma_s)^2 + (S \cos \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha}^{pcc}}{\rho^{cc}}\right)^2} = \pm 3.7 mm$$

$$\sigma_{yK} = \pm \sqrt{(\sigma_y)^2 + (\cos \alpha)^2 (\sigma_s)^2 + (-S \sin \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha}^{pcc}}{\rho^{cc}}\right)^2} = \pm 3.3 mm$$

$$\sigma_{yO} = \sigma_{y\Sigma} = \pm 1 mm$$

$$k=0.14$$

$$\sigma_{HK} = \pm \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \left(\cos z + \frac{(1-k) D \sin^2 z}{R}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-k) D^2 \frac{\sin 2z}{2R}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{cc}}{\rho^{cc}}\right)^2 + \sigma_{yO}^2 + \sigma_{y\Sigma}^2} = \pm 3.3 mm$$

$$\sigma_{XE} = \pm \sqrt{\sigma_{XK}^2 + \sigma_{\Delta X}^2} = \pm 3.8 mm$$

$$\sigma_{YE} = \pm \sqrt{\sigma_{YK}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2} = \pm 3.4 mm$$

$$\sigma_{HE} = \pm \sqrt{\sigma_{HK}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 3.4 mm$$

Στάση T12

$$\sigma_D = \pm \sqrt{1 + (2 * 200 / 1000)^2} = \pm 1.07 mm$$

$$\sigma_s = \pm \sqrt{(\sin z)^2 \sigma_D^2 + (D \cos z)^2 \left(\frac{\sigma_z^{pcc}}{\rho^{cc}}\right)^2} = \pm 1.10 mm$$

$$\sigma_{\alpha} = \pm \sqrt{\left(\sigma_x \frac{\sqrt{2}}{S} \rho^{cc}\right)^2 + (\sqrt{2} \sigma_{\delta})^2} = \pm 13.7 cc$$

$$\sigma_{xK} = \pm \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sin \alpha)^2 (\sigma_s)^2 + (S \cos \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha}^{pcc}}{\rho^{cc}}\right)^2} = \pm 5.4 mm$$

$$\sigma_{yK} = \pm \sqrt{(\sigma_y)^2 + (\cos \alpha)^2 (\sigma_s)^2 + (-S \sin \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_{\alpha}^{pcc}}{\rho^{cc}}\right)^2} = \pm 4.9 mm$$

$$\sigma_{yO} = \sigma_{y\Sigma} = \pm 1 mm$$

$$k=0.14$$

$$\sigma_{HK} = \pm \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \left(\cos z + \frac{(1-k) D \sin^2 z}{R}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(D \sin z + (1-k) D^2 \frac{\sin 2z}{2R}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z^{cc}}{\rho^{cc}}\right)^2 + \sigma_{yO}^2 + \sigma_{y\Sigma}^2} = \pm 4.3 mm$$

$$\sigma_{xE} = \pm \sqrt{\sigma_{xK}^2 + \sigma_{\Delta x}^2} = \pm 5.5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{yE} = \pm \sqrt{\sigma_{yK}^2 + \sigma_{\Delta y}^2} = \pm 5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{HE} = \pm \sqrt{\sigma_{HK}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 4.1 \text{ mm}$$

Αυτό που απομένει είναι να προσδιοριστεί η τελική ακρίβεια υλοποίησης της οδού, η οποία είναι η διαφορά μεταξύ των συντεταγμένων της λεπίδας με αυτή του ΨΜΕ.

$$\sigma_{\Delta X} = \pm \sqrt{\sigma_{X^{\Psi ME}}^2 + \sigma_{XE}^2} \quad (4.83)$$

με

$$\mathbf{X}^{\Psi ME} = [X \ Y \ H] \quad (4.84)$$

και

$$\mathbf{XE} = [XE \ YE \ HE] \quad (4.85)$$

επομένως

$$\Delta \mathbf{X} = [XE - X \ YE - Y \ HE - H] \quad (4.86)$$

Οπότε από ΝΜΣ για κάθε τιμή του διανύσματος $\Delta \mathbf{X}$ η αβεβαιότητα είναι όμοια της σχέσης (4.83). Επομένως το εύρος της αβεβαιότητας που κυμαίνεται είναι $\pm 8 \text{ mm} - \pm 9.4 \text{ mm}$.

Άρα η υλοποίηση μιας οδού μήκους 1 χλμ με ακρίβεια $\pm 9.5 \text{ mm}$ μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο μέτρησης με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό προσφέροντας την απαιτούμενη αβεβαιότητα και μάλιστα καλύτερη, καθώς με μετρήσεις γωνιών στους υπολογισμούς των αβεβαιοτήτων οι τιμές θα είναι μικρότερες διότι για κάθε τριγωνομετρικό αριθμό θεωρήθηκε η μέγιστη τιμή 1 και το μέγιστο μήκος μέτρησης. Επομένως επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ακρίβεια και μάλιστα σε ποιο σύντομο χρονικό διάστημα και με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς η όλη διαδικασία γίνεται αυτόνομα.

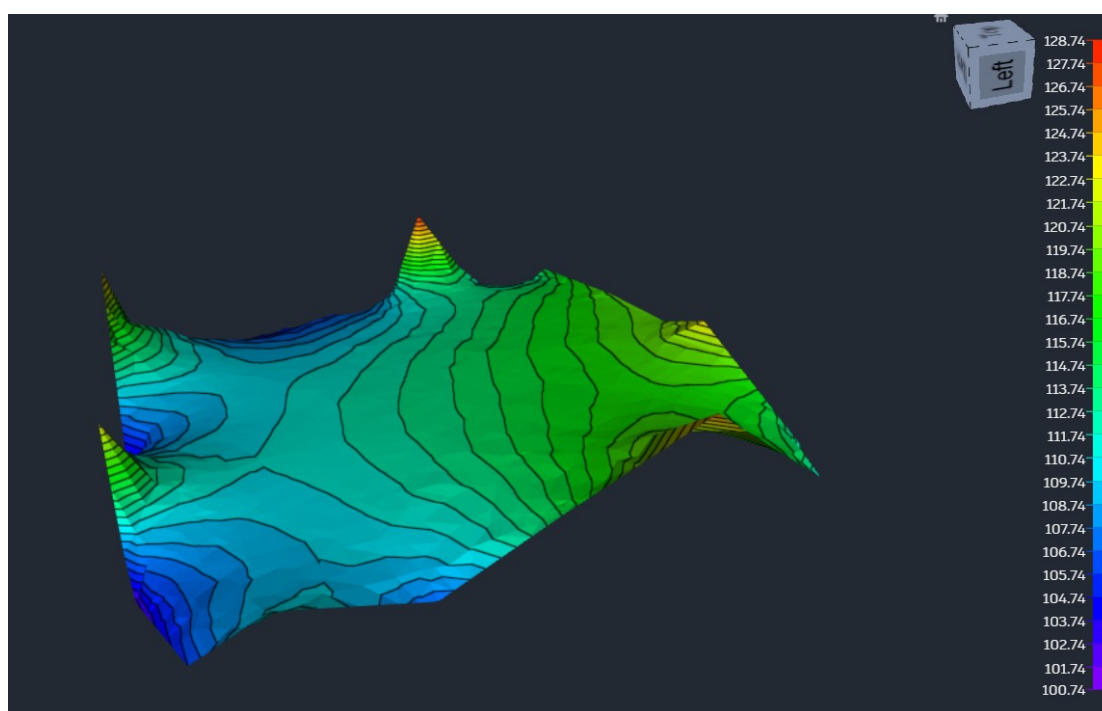
4.4.3 Εκσκαφή εδάφους με χρήση δεκτών GNSS

Η τρίτη εφαρμογή που εξετάζεται είναι η εκσκαφή 10m βάθους από την επιφάνεια για την κατασκευή υπόγειου σταθμού σιδηροδρομικής γραμμής. Η ακρίβεια της εκσκαφής είναι της τάξης των $\pm 5 \text{ cm}$. Για την

υλοποίησή της χρησιμοποιείται η τεχνολογία dual GNSS και εκσκαφείας(εικόνα 11).

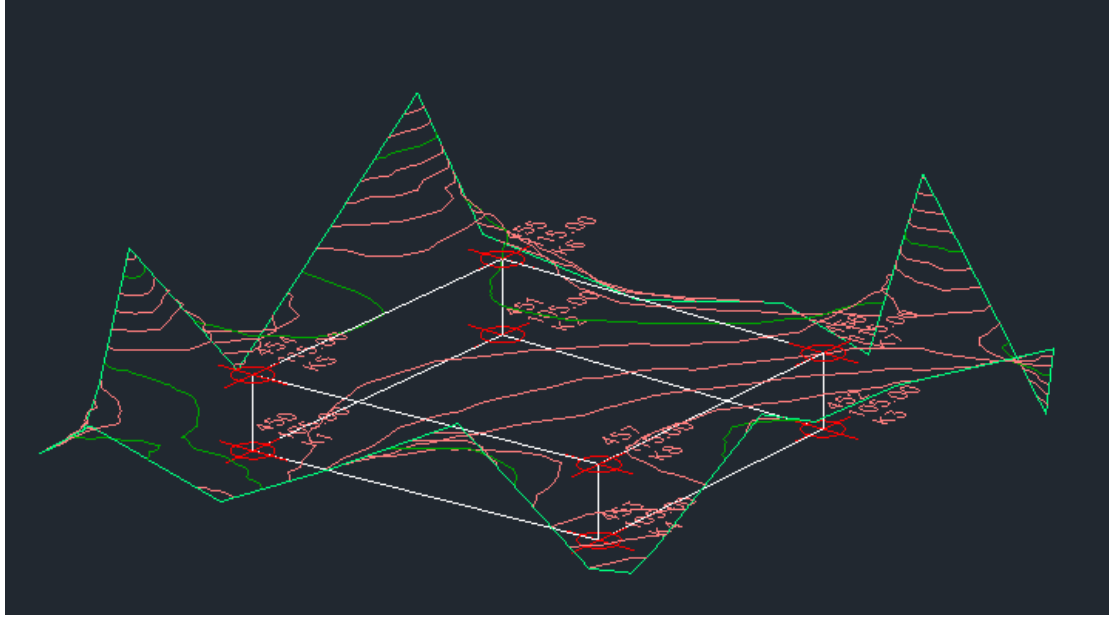
Η τεχνολογία dual GNSS προσφέρει οριζοντιογραφική ακρίβεια $\pm 1\text{cm}$ και $\pm 2\text{cm}$ υψομετρικής ακρίβειας. Το εργαλείο του εκσκαφείας (κουβάς) έχει ακρίβεια εκσκαφής $\pm 3\text{cm}$.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής. Αρχικά γίνεται η αποτύπωση της περιοχής μελέτης με τη μέθοδο αποτύπωσης με δέκτη GNSS. Σύμφωνα με το υπό κεφάλαιο 4.2.1 η ακρίβεια αποτύπωσης με ένα τυπικό δέκτη GNSS είναι $\pm 0.7\text{cm}-\pm 3\text{cm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 2-\pm 5\text{cm}$ υψομετρικά. Με βάση το δέκτη GNSS που αξιοποιείται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η ακρίβεια της αποτύπωσης είναι η ακρίβεια μέτρησης του δέκτη. Από τις μετρήσεις του δέκτη και την κατάλληλη επεξεργασία προέκυψε το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης(εικόνα 25).



Εικόνα 25: ΨΜΕ περιοχής μελέτης

Έπειτα σχεδιάστηκε το μοντέλο της εκσκαφής που θα πραγματοποιηθεί(εικόνα 26).



Εικόνα 26: Μοντέλο εκσκαφής

Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων του δέκτη είναι γνωστές και αυτό που απομένει είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων της σκούπας του εκσκαφέα, εφαρμόζοντας το ΝΜΣ στις σχέσεις (4.65), (4.66) και (4.67). Οπότε θεωρώντας και $\sigma_{\Delta x} = \pm 1 \text{ cm}$ προκύπτει ότι

$$\sigma_{XE} = \pm \sqrt{1^2 + 1^2} = \pm 1.41 \text{ cm}$$

$$\sigma_{YE} = \pm \sqrt{1^2 + 1^2} = \pm 1.41 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ZE} = \pm \sqrt{2^2 + 1^2} = \pm 2.24 \text{ cm}$$

Οπότε γνωρίζοντας την ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων στην άκρη της σκούπας αυτό που απομένει είναι η ακρίβεια της εκσκαφής. Αυτή εξαρτάται από την διάσταση του δοντιού της σκούπας, η οποία είναι περίπου 3cm οπότε προσφέρει και ακρίβεια $\pm 3 \text{ cm}$, και από την ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων της σκούπας. Οπότε με εφαρμογή ΝΜΣ, προκύπτει ότι

$$\sigma_{XEK} = \pm \sqrt{1.41^2 + 3^2} = \pm 3.32 \text{ cm}$$

$$\sigma_{Y EK} = \pm \sqrt{1.41^2 + 3^2} = \pm 3.32 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ZEK} = \pm \sqrt{2.24^2 + 3^2} = \pm 4.33 \text{ cm}$$

Επομένως παρατηρείται ότι η ακρίβεια της εκσκαφής είναι εντός ορίων. Μάλιστα η υλοποίηση πραγματοποιείται ταχύτερα, καθώς η αξιοποίηση

των δεκτών GNSS προσφέρει αυτοματοποίηση και καθοδήγηση του οχήματος και των λειτουργιών του.

4.5 Έλεγχος

Σε ένα έργο στον κατασκευαστικό τομέα πρέπει να γίνονται έλεγχοι για να αποφεύγονται λάθη που είναι πιθανό να έχουν προκύψει από κακή εκτίμηση του χειριστή ή από λάθος μετρήσεις. Στην εφαρμογή κλασσικών μεθόδων οι έλεγχοι είναι πολύ συχνοί και γίνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα θέτοντας τους εργάτες σε κίνδυνο καθώς βρίσκονται κοντά σε βαρέα οχήματα. Από την άλλη μεριά οι σύγχρονοι μέθοδοι δεν απαιτούν τόσους τακτικούς ελέγχους καθώς σφάλματα χειριστή και παρατηρητή ελαχιστοποιούνται. Ωστόσο οι μέθοδοι ελέγχου παραμένουν ίδιες και πρέπει να τηρούν συγκεκριμένα όρια.

Για τον υψομετρικό έλεγχο σημείων πραγματοποιούνται μετρήσεις με laser χωροβάτη σε χαρακτηριστικά σημεία και υπολογίζεται το υψόμετρο του σημείου. Για τον έλεγχο τρισδιάστατων συντεταγμένων ενός χαρακτηριστικού σημείου ακρίβειας μερικών mm γίνεται μέτρηση με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Τέλος για τον ίδιο έλεγχο αλλά ακρίβειας μερικών cm γίνεται μέτρηση με δέκτη GNSS.

Το μέγεθος που εξετάζεται ονομάζεται **απόκλιση (α)**. Ως απόκλιση ορίζεται η διαφορά μεταξύ των ονομαστικών τιμών των συντεταγμένων ενός χαρακτηριστικού σημείου του T.E., με βάση τα κατασκευαστικά σχέδια, και της υλοποίησής τους στο ύπαιθρο. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της απόκλισης καθορίζονται από τον μελετητή ή από κανονισμούς.

$$\alpha = OT - YT \quad (4.87)$$

με OT:Ονομαστική τιμή, YT=Υλοποιημένη τιμή

Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση ονομάζεται **Ανοχή(A)**. Στην περίπτωση που $\alpha > A$ δυσχεραίνεται η εκτέλεση του έργου και επηρεάζεται η ασφάλειά του.

Η απόκλιση ελέγχεται αν βρίσκεται στο διάστημα $(-t\sigma_\alpha, t\sigma_\alpha)$ με σ_α :η αβεβαιότητα της απόκλισης και t: μέγεθος που εξαρτάται από τη πιθανότητα p% η απόκλιση να βρίσκεται στο συγκεκριμένο διάστημα.

Η αβεβαιότητα της απόκλισης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$|\alpha_{max}|=2\cdot|\sigma_\alpha|\Rightarrow \pm\sigma_\alpha=\frac{\alpha_{max}}{2} \quad (4.88)$$

Επομένως εάν

- $|\alpha|\leq 2\cdot|\sigma_\alpha|\rightarrow$ η απόκλιση οφείλεται στο θόρυβο των μετρήσεων
- $|\alpha|>2\cdot|\sigma_\alpha|\rightarrow$ η απόκλιση οφείλεται σε σφάλμα κατά την υλοποίηση.
Αν $|\alpha|<|A|$ οι εργασίες συνεχίζονται. Αν $|\alpha|>|A|$ πρέπει να επαναληφθεί η υλοποίηση των σημείων που αφορούν το ελεγχόμενο σημείο.

Αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος και πιστοποιηθεί ότι το έργο κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μελέτης συντάσσονται τα τελικά σχέδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκε διεξοδικά το πως οι σύγχρονες γεωδαιτικές μέθοδοι αυτοματοποίησης και καθοδήγησης των μηχανημάτων οδοποιίας και κατ' επέκταση των μηχανημάτων του κατασκευαστικού κλάδου προσφέρουν πολλά οφέλη στην υλοποίηση των εργασιών. Τα οφέλη αυτά αφορούν στην ακρίβεια, στην ορθότητα, στις εργατοώρες, στην ασφάλεια, στην ταχύτητα, στην εξοικονόμηση καυσίμων, στην ελαχιστοποίηση των ανθρώπινων σφαλμάτων, στην ολοκλήρωση περισσότερων έργων και τέλος στο κέρδος.

Η αυτοματοποίηση της λειτουργίας των μηχανημάτων οδοποιίας δεν απαιτεί πλέον τη χρήση πασσάλων κατά μήκος και κατά πλάτος του πεδίου και τη συνεχή καθοδήγηση του οχήματος από τον τοπογράφο μηχανικό και το χειρισμό του χειριστή. Τα σχέδια είναι ψηφιακά και εντός του μηχανήματος έχοντας πρόσβαση σε αυτά και ο χειριστής και ο τοπογράφος μηχανικός. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων, με λιγότερη έκθεση εργατών στο πεδίο για συνεχή έλεγχο, βελτιώνοντας τις συνθήκες εργασίας και ασφάλειας.

Ακόμα η μεταφορά όγκων εδαφικού υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί και από λιγότερο έμπειρους χειριστές, εξαιτίας της συνεισφοράς της τεχνολογίας. Με αυτό τον τρόπο το εργασιακό περιβάλλον ενός εργοταξίου προσεγγίζει νέο ανθρώπινο δυναμικό, που υστερεί σε εμπειρία και μέχρι πρότινος ήταν ανέφικτη η ενασχόλησή τους λόγω έλλειψης εμπειρίας.

Ακόμα η επικοινωνία μεταξύ εργατών, χειριστών και τοπογράφων είναι σε φιλικότερους τόνους βελτιώνοντας τις σχέσεις μεταξύ τους.

Στον τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος τα συστήματα έχουν θετική συνεισφορά. Αρχικά στα σχέδια μπορούν να ενταχθούν υπόγεια δίκτυα αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο απρόσμενες βλάβες σε υπόγεια δίκτυα. Επιπλέον η αυξημένη ταχύτητα ολοκλήρωσης του έργου και η

σημαντική μείωση σφαλμάτων οδηγεί στην μικρότερη έκθεση καυσίμων στην ατμόσφαιρα και στην πιο αποδοτική χρήση εδαφικού υλικού, καθώς και στην παράταση ζωής των μηχανημάτων.

Όσο αφορά στην αποδοτικότητά τους σε διάφορες εφαρμογές αυτή αποδείχθηκε σε τρεις διαφορετικές εφαρμογές στο κεφάλαιο 4, οι οποίες σχεδιάστηκαν θεωρητικά.

Η υψομετρική υλοποίηση ενός χώρου στάθμευσης με ακρίβεια $\pm 1\text{cm}$ πραγματοποιείται με χρήση 2D συστημάτων machine control. Απαιτείται η ίδρυση υψομετρικού δικτύου υψηλής ακρίβειας περιμετρικά του χώρου στάθμευσης. Χρησιμοποιώντας laser χωροβάτη ακρίβειας $\pm 0.5\text{mm}/10\text{m}$ γίνεται η μέτρηση υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών του δικτύου και στη συνέχεια δημιουργείται το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης και παράλληλα σχεδιάζεται το μοντέλο του χώρου στάθμευσης. Εγκαθιστώντας το σύστημα στο grader τότε το μηχάνημα αυτοματοποιημένα υλοποιεί υψομετρικά την τελική επιφάνεια. Η ακρίβεια υλοποίησης της επιφάνειας αποδείχθηκε στην καλύτερη περίπτωση να είναι $\pm 2.9\text{mm} - \pm 4.6\text{mm}$, η οποία καλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής. Στην περίπτωση της αποτύπωσης με μέγιστο σφάλμα αποτύπωσης $\pm 7.5\text{mm}$, το μέγιστο σφάλμα της υψομετρικής υλοποίησης είναι $\pm 8.7\text{mm}$, που καλύπτει ακόμα τις ανάγκες της εφαρμογής.

Επιπλέον η κατασκευή οδού 1Km με χρήση 3D συστήματος machine control ακρίβειας $\pm 9.5\text{mm}$ επιτυγχάνεται. Απαιτείται η χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού ακρίβειας μέτρησης στο μήκος $1\text{mm} + 2\text{ppm}$ και ακρίβεια ανάγνωσης γωνίας 1.5cc και η χρήση grader. Αρχικά ιδρύεται τριγωνομετρικό δίκτυο υψηλής ακρίβειας και επιλύεται με τη MET. Στη συνέχεια με μετρήσεις ταχυμετρίας σχεδιάζεται το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης και παράλληλα σχεδιάζεται το μοντέλο της οδού προς κατασκευή. Έπειτα εγκαθίσταται στο grader το 3D σύστημα machine control και αυτό πραγματοποιεί τις λειτουργίες αυτόνομα. Η συνεχής παροχή πληροφοριών θέσης σε πραγματικό χρόνο καθοδηγεί το μηχάνημα και αυτοματοποιεί τις λειτουργίες του. Η ακρίβεια υλοποίησης της οδού κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\pm 8\text{mm} - \pm 9.4\text{mm}$, η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στην εκσκαφή εδάφους 10m για την κατασκευή υπόγειου σταθμού σιδηροδρομικής γραμμής ακρίβειας $\pm 5\text{cm}$ χρησιμοποιείται 3D σύστημα

machine control. Απαιτείται η χρήση δεκτών GNSS οριζοντιογραφικής ακρίβειας $\pm 1\text{cm}$ και υψομετρικής $\pm 2\text{cm}$ εφαρμόζοντας την τεχνολογία dual GNSS και η χρήση εκσκαφέα, με ακρίβεια εκσκαφής $\pm 1\text{cm}$. Αρχικά σχεδιάζεται το ΨΜΕ της περιοχής μελέτης, έπειτα από μετρήσεις με δορυφορικό εντοπισμό και παράλληλα σχεδιάζεται το μοντέλο εκσκαφής. Εγκαθιστώντας το σύστημα machine control στον εκσκαφέα, αυτός καθοδηγείται και λειτουργεί αυτόνομα, εξαιτίας της συνεχής πληροφορίας θέσης σε πραγματικό χρόνο. Η τελική ακρίβεια εκσκαφής είναι $\pm 3.3\text{cm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 4.3\text{cm}$ υψομετρικά, καλύπτοντας τις ανάγκες της εφαρμογής.

Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα των απαιτήσεων, τα συστήματα machine control καλύπτουν τις ανάγκες ορθότητας και ακρίβειας σε συντομότερο χρονικό διάστημα, εξαιτίας της αυτοματοποίησης των λειτουργιών των οχημάτων. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που έχουν αναχαιτίσει την πλήρη αφομοίωσή τους στον κατασκευαστικό κλάδο.

Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι ένας παραδοσιακός κλάδος, ο οποίος δεν έχει επιτρέψει ακόμα την εισβολή της τεχνολογίας στην καθημερινότητά του και αυτό οφείλεται σε πολλούς εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες.

Ένας από αυτούς τους παράγοντες είναι η μέθοδος της εταιρείας που αναλαμβάνει ένα τεχνικό έργο. Από το διάγραμμα 1 παρατηρείται ότι το μέγεθος της εταιρείας έχει σημαντικό ρόλο στη χρήση των συστημάτων αυτών σε διάφορες εφαρμογές της. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα επένδυσης του συγκεκριμένου εξοπλισμού ή στην ανάληψη δυσκολότερων και μεγαλύτερων τεχνικών έργων που απαιτούν την εφαρμογή των σύγχρονων μεθόδων.

Οι εξωγενείς παράγοντες που εμποδίζουν την επένδυση στα συστήματα machine control είναι η μη κρατική υποστήριξη και η ανυπαρξία νομοθετικού πλαισίου προς αυτά τα συστήματα, τα οποία καθιστούν ανασταλτικούς παράγοντες για τις εταιρείες. Επίσης το γεγονός ότι οι αντιπροσωπίες μεγάλων γεωδαιτικών οίκων δεν έχουν εξοπλιστεί ακόμα με αυτόν τον εξοπλισμό δημιουργεί κύμα ανασφάλειας στις εταιρείες.

Στους ενδογενείς παράγοντες τοποθετούνται λόγοι, όπως οι προσωπικές ανησυχίες των εργολάβων στην αξιοπιστία της τεχνολογίας, η

εκπαίδευση του προσωπικού, η αγορά νέων οχημάτων συμβατών με τα συστήματα και η εγκατάστασή τους αποτελούν επιπλέον ανασταλτικούς παράγοντες.

Για τους ίδιους λόγους και στον ελλαδικό χώρο η τεχνολογία αυτή έχει αξιοποιηθεί σε ελάχιστες περιπτώσεις μεμονωμένα με μονάχα μία αντιπροσωπεία να προσφέρει τα εν λόγω συστήματα. Αυτός είναι και ο λόγος που οδήγησε στην θεωρητική επίλυση εφαρμογών συστημάτων machine control.

5.2 Προτάσεις

Παρόλο που τα συστήματα machine control είναι αξιόπιστα και προσφέρουν πολλές λύσεις, είναι εμφανές ότι ακόμα δεν υπάρχει ούτε η εμπιστοσύνη, ούτε το κατάλληλο γνωστικό και νομοθετικό υπόβαθρο ούτε και η κατάλληλη ενημέρωση. Παρακάτω προτείνονται διάφορες ενέργειες που θα ενισχύσουν τη στροφή από τις παραδοσιακές μεθόδους στις σύγχρονες μεθόδους.

Αρχικά χρειάζεται η πολιτεία να στηρίξει με χρηματοδοτήσεις και με το κατάλληλο νομοθετικό πλαίσιο και να ενθαρρύνει τις εταιρείες να επενδύσουν στον σύγχρονο εξοπλισμό.

Επίσης οι αντιπροσωπείες των μεγάλων γεωδαιτικών οίκων μπορούν μέσω καμπάνιας να ενημερώσουν τις κατασκευαστικές εταιρείες για την αξιοπιστία των συστημάτων καθοδήγησης και αυτοματοποίησης και να ενθαρρύνουν τη χρήση τους. Ακόμα σε ημερίδες ή σημαντικές εκδηλώσεις έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάσουν τις δυνατότητες των συστημάτων.

Επιπλέον οι εταιρείες πρέπει να κάνουν βήματα εξέλιξης προς τη νέα τεχνολογία και να υπάρξουν ειδικά προγράμματα και σεμινάρια εκπαίδευσης του προσωπικού στη νέα τεχνολογία, καθώς και η πρόσληψη νέων υπαλλήλων με πιο φρέσκιες ιδέες και καινοτομίες.

Στα πλαίσια της εκπαίδευσης στις αντίστοιχες σχολές, χρειάζεται η αναφορά, η ενημέρωση, η εξοικείωση και η παρουσίαση των συστημάτων machine control. Αυτό θα καθοδηγήσει νέους μηχανικούς να ακολουθήσουν καριέρα στον κατασκευαστικό κλάδο εφαρμόζοντας αποκτημένες γνώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ

1. [viewcontent.cgi \(erau.edu\)](#)
2. [main.pdf \(sciencedirectassets.com\)](#)
3. Hartmann & Braun, Fundamentals of Control Engineering ([60_015se.pdf \(abb.com\)](#))
4. [Cornelis Drebbel | Submarine Creator, Engineer & Scientist | Britannica](#)
5. [Watt Governor - Working, Types, Limitation, Equation For Height \(Design\) \(mecholic.com\)](#)
6. [Porter governor: Working, Construction, Diagram, Uses \(mechcontent.com\)](#)
7. [Hartnell governor: Definition, Working, Diagram, Parts \(mechcontent.com\)](#)
8. [What is a PID Controller? • PID Explained](#)
9. [The First Machine-Control System? | Construction Equipment](#)
10. [Machine Control Systems & Grading Technology Basics | Trimble](#)
11. [A history of machine control: part one - Construction Briefing](#)
12. [A history of machine control: part two - Construction Briefing](#)
13. [viewcontent.cgi \(purdue.edu\)](#)
14. [What is a Robotic Total Station? - ATT Metrology Solutions \(attinc.com\)](#)
15. [What is a Robotic Total Station? | Global GPS Systems](#)
16. Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Ευαγγελία Λάμπρου – Γιώργος Πανταζής, Εκδόσεις Ζήτη
17. GPS και ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, Αριστείδης Ι. Φωτίου – Χρήστος Κ. Πικριδάς, Εκδόσεις Ζήτη

18. [Trimble S Series - User Guide - English.pdf](#)
19. [Global Navigation Satellite System \[Explained\] \(advancednavigation.com\)](#)
20. [Advantages of dual-frequency GNSS in smartphones \(geospatialworld.net\)](#)
21. [What is Dual GNSS and Why Is It Important? | Inertial Sense \[Video\]](#)
22. [Inertial Navigation System \[Explained\] | Advanced Navigation](#)
23. Γεωδαισία II Τοπογραφικές Αποτυπώσεις Χαράξεις, Παρασκευάς Σαββαΐδης- Ιωάννης Υφαντής – Ιωάννης Δούκας, Εκδόσεις Κυριακίδη, Κεφ. 1,8
24. [Machine Control - Mobact](#)
25. [What are Road Pavers? - Omnia Machinery](#)
26. [Road Milling: What Is It? How Does It Work? - KoneCarbide](#)
27. [What Is a Motor Grader and What Does It Do? \(buildwitt.com\)](#)
28. [Road Rollers: What You Need to Know - RoadSky \(roadskymaintenance.com\)](#)
29. [What Are Construction Drills Used For? | The Cat Rental Store](#)
30. [Bulldozer | Heavy-duty, Construction, Earthmoving | Britannica](#)
31. [Slip Form Paver - Types & Benefits of SlipForm Paving Technology \(apolloinfratech.com\)](#)
32. [Topcon Future of Machine Control report \(adobe.com\)](#)
33. [Five Reasons to Use Machine Control in Heavy Construction - Hexagon Geosystems Blog](#)
34. [Challenges & Benefits of Using GNSS-Based 3D Machine Control \(hemispheregnss.com\)](#)
35. [pg30as230.pdf \(machineguidance.com.au\)](#)

36. [Reasons for Optimism About Civil Construction Profitability \(trimble.com\)](#)
37. [Get more from your existing fleet \(trimble.com\)](#)
38. Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων και Εφαρμογές, Αμαλία Μαρία Αγάτζα Μπαλοδήμου – Γεώργιος Πάνου, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφ. 5,8
39. [Dual-frequency GPS tracking: addressing accuracy and reliability in telematics — Navixy](#)
40. <https://heavyindustry.trimble.com/resources/construction/leipzig-halle-airport-case-study>
41. <https://leica-geosystems.com/case-studies/heavy-construction/paving-roads-of-the-future-with-3d-machine-control>