



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης
αισθητήρων LIDAR για μέτρηση του ρυθμού μεταφοράς
θραυσμένων υλικών με ταινιοδρόμους

Κωνσταντίνος Φίγγος

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Μιχαήλ Γαλετάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Κωνσταντίνος Κομνίτσας

Αν. Καθηγητής Παναγιώτης Παρτσινέβελος

Χανιά
Ιούλιος, 2018

Πρόλογος

Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ανέπαφης μέτρησης του όγκου θραυσμένων υλικών, κατά τη μεταφορά τους με ταινιοδρόμους μονάδων παραγωγής. Ως ογκομετρικό μέσο χρησιμοποιήθηκε ένας σαρωτής LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Η λειτουργία των αισθητήρων αυτού του τύπου βασίζεται στη χρήση ακτινών λέιζερ για την μέτρηση αποστάσεων. Πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές δοκιμές σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων και να εντοπιστούν οι κρίσιμες παράμετροι που την επηρεάζουν.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη για την εξαιρετική συνεργασία, βοήθεια και καθοδήγηση κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διερεύνησης και τη συγγραφή της εργασίας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα και τον αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παναγιώτη Παρτσινέβελο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή, τις παρατηρήσεις και σχόλιά τους.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω τον φίλο μου Άγγελο Παπαδημητρίου, μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συμβολή του στην τροποποίηση του κώδικα σάρωσης σε περιβάλλον MATLAB.

Περίληψη

Οι μεταφορείς με ελαστικούς ιμάντες ή αλλιώς ταινιόδρομοι χρησιμοποιούνται στους περισσότερους κλάδους της βιομηχανίας για την μεταφορά χύδην υλικών και εμπορευμάτων. Βρίσκουν εφαρμογή τόσο σε εσωτερικούς χώρους εργοστασίων όσο και εξωτερικά εργοτάξια (λατομεία, υπαίθριες και υπόγειες εκμεταλλεύσεις). Η ταχεία μεταφορά, η αξιοπιστία, η ευελιξία και η μεγάλη απόσταση μεταφοράς είναι τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης τους. Η εξέλιξη των ταινιοδρόμων οφείλεται κυρίως στη χρήση τους σε ορυχεία υπαίθριας εκμετάλλευσης λιγνίτη. Στην μεταλλευτική βιομηχανία η χρήση ταινιοδρόμων για μεταφορά των εξορυσσόμενων υλικών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, ειδικά σε μεγάλες επιφανειακές εκμεταλλεύσεις που χρησιμοποιούν τη συνεχή μέθοδο εκμετάλλευσης.

Η ακριβής παρακολούθηση της μεταφερόμενης ποσότητας των υλικών με ταινιοδρόμους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος ελέγχου της απόδοσής τους. Η πιο διαδομένη μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται σήμερα αυτός ο έλεγχος είναι η χρήση ταινιοζυγών. Οι ταινιοζυγοί ωστόσο δεν επιτυγχάνουν πάντα την απαιτούμενη ακρίβεια, απαιτούν συχνές βαθμονομήσεις, ενώ παρουσιάζουν λειτουργικά προβλήματα όπως βλάβες και απορρυθμίσεις με αποτέλεσμα να διακόπτεται η παραγωγική διαδικασία. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης σαρωτή/αποστασιομέτρου τύπου LIDAR (Light Detection And Ranging) για την μέτρηση όγκου μεταφερόμενου υλικού σε ταινιόδρομο. Η λειτουργία των αισθητήρων αυτού του τύπου βασίζεται στην χρήση ακτινών λέιζερ για την μέτρηση αποστάσεων.

Η διερεύνηση περιλάμβανε τις μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ του σαρωτή/αποστασιομέτρου και διαφόρων θραυσμένων υλικών (ασβεστολιθικά αδρανή διαφόρων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα, λιγνίτη και τέφρα λιγνίτη) που είχαν τοποθετηθεί επί μεταφορικού ιμάντα. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό εμβαδού της διατομής του θραυσμένου υλικού επί του ιμάντα που σε συνδυασμό με τη μέτρηση της ταχύτητας κίνησης του ιμάντα δίνουν την ογκομετρική παροχή (απόδοση) του ταινιοδρόμου. Εκτελέστηκαν διάφοροι έλεγχοι της ακρίβειας της μέτρησης της διατομής του υλικού επί του ιμάντα που αφορούσαν:

- τις παραμέτρους μέτρησης του οργάνου (ύψος LIDAR από ταινιόδρομο, γωνιακό εύρος και ταχύτητα σάρωσης)
- την κοκκομετρία και το είδος του υλικού
- τον τύπο του ιμάντα μεταφοράς (επίπεδος ή σκαφιδωτός)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επιταχυνόμενη ακρίβεια επηρεάζεται κυρίως από το είδος του υλικού επί του ιμάντα και λιγότερο από την κοκκομετρία του. Σε υλικά με χαμηλή ανακλαστική ικανότητα η ακρίβεια μέτρησης είναι σχετικά χαμηλή. Όσον αφορά τις παραμέτρους μέτρησης του οργάνου, διαπιστώθηκε ότι επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια υπολογισμού της διατομής του υλικού για απόσταση αισθητήρα-ιμάντα περίπου διπλάσια του πλάτους του ιμάντα και για υψηλή συχνότητα σάρωσης. Τέλος, οι μετρήσεις της διατομής του υλικού επί σκαφιδωτού (κυρτού) ιμάντα ήταν ακριβέστερες από τις αντίστοιχες σε επίπεδο ιμάντα.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περίληψη.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Κατάλογος σχημάτων	6
Κατάλογος πινάκων	8
1 Περιγραφή ταινιοδρόμων και συστημάτων παρακολούθησης της απόδοσής τους.....	9
1.1 Συγκρότηση ταινιοδρόμου	9
1.2 Συστήματα παρακολούθησης της ποσότητας μεταφερόμενου υλικού	12
1.2.1 Μέτρηση βάρους μεταφερόμενου υλικού μέσω διατάξεων ζύγισης.....	12
1.2.2 Μειονεκτήματα των χρησιμοποιούμενων διατάξεων και προτεινόμενη νέα προσέγγιση.....	15
2 Μεθοδολογία μέτρησης της διατομής του υλικού και υπολογισμοί.....	19
2.1 Υπολογισμός εμβαδού τόξου και διατομής υλικού	19
2.2 Υπολογισμός θεωρητικού σφάλματος	23
2.3 Υπολογισμός μεταφορικής απόδοσης ταινιοδρόμου	26
3 Περιγραφή της εργαστηριακής διάταξης και της μεθοδολογίας των μετρήσεων	28
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	28
3.2 Σύνδεση LIDAR με Η/Υ και λογισμικό λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων	32
3.3 Διαδικασία μετρήσεων	33
4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων – αξιολόγηση.....	35
4.1 Μορφή και οργάνωση μετρήσεων	35
4.2 Μετρήσεις για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του σαρωτή LIDAR και τον καθορισμό της βέλτιστης απόστασής του από τον στόχο με χρήση πρότυπου κυβόλιθου.....	36
4.3 Ακρίβεια μετρήσεων σε σχέση με τον αριθμό των σαρώσεων.....	40
4.4 Επίδραση κοκκομετρίας στην ακρίβεια μέτρησης	41
4.5 Μετρήσεις σε ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας.....	49
4.6 Μετρήσεις σε λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μέταλλευμα Εύβοιας	50
4.7 Μετρήσεις σε λιγνίτη Πτολεμαΐδας.....	52
4.8 Μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού κοκκομετρίας 4-8mm σε σκαφιδωτό ιμάντα.....	55
5 Συμπεράσματα και προτάσεις	58
Βιβλιογραφία.....	60
Παραρτήματα	62

A.	Ψηφιακό διαδραστικό περιβάλλον του προγράμματος URG Benri.....	63
B.	Κώδικας διεπικοινωνίας (με τον αισθητήρα URG-04LX-UG01), υπολογισμού εμβαδού τομής υλικού και υπολογισμού όγκου χύδην υλικού.....	64

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ταινιοδρόμος μεγάλων αποστάσεων (www.geldof.be).....	10
Σχήμα 1.2: Σχεδιάγραμμα ταινιοδρόμου (Γαλετάκης, 2013)	11
Σχήμα 1.3: Διάταξη ταινιοζυγού (http://www.protemgroup.com)	12
Σχήμα 1.4: Πλαίσιο ταινιοζυγού υψηλής ακρίβειας (www.calculus-tac.co.za/weighing-systems/)	13
Σχήμα 1.5: Σύστημα προσδιορισμού παροχής και υγρασίας με χρήση αισθητήρα μικροκυμάτων, τύπου LB 472 (https://www.berthold.com/).....	14
Σχήμα 1.6: Ραδιομετρικό σύστημα μέτρησης μάζας και μονάδα αξιολόγησης (www.berthold.com/en/pc/bulk-flow).....	15
Σχήμα 1.7: Διάταξη μονάδας CBM Beltspy™ (http://www.cbmi.com.au/uploads/im/beltspy-layout.jpg)	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Σχήμα 1.8: Υψομετρικά δεδομένα LIDAR υψηλής ακρίβειας από περιοχή στη νότια Καλιφόρνια (www.harris.com)	16
Σχήμα 1.9: Απεικόνιση χαρτογράφησης εδάφους με LIDAR από τον αέρα (www.geoconnexion.com/news/)	17
Σχήμα 1.10: Διάφορα είδη αισθητήρων LIDAR: SEN-14117 Scanse Sweep Scanner LIDAR Sensor - winder/ Panasonic 3D LIDAR sensor 500 / Leica SPL100 Single Photon LIDAR Sensor (www.aliexpress.com / www.electronicweekly.com / leica-geosystems.com).....	17
Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα από το πρόγραμμα “URG Benri”. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε μέσα σε κυλινδρικό δοχείο.	19
Σχήμα 2.2: Τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας της διατομής του υλικού με σάρωση του άδειου και έμφορτου ιμάντα με τον αισθητήρα LIDAR.	20
Σχήμα 2.3: Υπολογισμός της διατομής του υλικού επί του ιμάντα.....	21
Σχήμα 2.4: Αναλυτικός (αριστερά) και προσεγγιστικός (δεξιά) υπολογισμός της επιφάνειας S σε σύστημα πολικών συντεταγμένων (https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_coordinate_system)	22
Σχήμα 2.5: : Μεταβολή του σχετικού σφάλματος της διατομής του υλικού ως συνάρτηση του μέσου πάχους του υλικού (ΔR_m) για τις περιπτώσεις όπου το σφάλμα μέτρησης δx του LIDAR κυμαίνεται από 1 έως 5 mm.	26
Σχήμα 2.6: Τομή πρόσοψης σκαφιδωτού ιμάντα	27
Σχήμα 3.1: HOKUYO URG-04LX-UG01 (en.manu-systems.com/)	28
Σχήμα 3.2 Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης.....	30
Σχήμα 3.3: Φωτογραφίες πειραματικής διάταξης (πρόσοψη αριστερά και κάτοψη δεξιά).	30
Σχήμα 3.4: Κάτοψη του εργαστηριακού ταινιοδρόμου	31
Σχήμα 3.5: Πλάγια όψη του εργαστηριακού ταινιοδρόμου.....	31
Σχήμα 3.6: Απεικόνιση μετρήσεων και έλεγχος του LIDAR με το λογισμικό URG Benri της Hokuyo.....	32
Σχήμα 3.7: Διάταξη ελέγχου της ακρίβειας με μέτρηση με κυβόλιθου	33
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της διατομής του κυβόλιθου, όπως προέκυψε από τη σάρωση με τον αισθητήρα LIDAR, σε σύστημα ορθογωνίων καρτεσιανών συντεταγμένων.	36
Σχήμα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα της σάρωσης της άνω επιφάνειας του κυβόλιθου με τον αισθητήρα LIDAR (χωρίς κλίμακα).	37
Σχήμα 4.3: Μεταβολή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας λέιζερ του LIDAR.	38

Σχήμα 4.4: Μεταβολή του σχετικού σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας λέιζερ του LIDAR για οκτώ διαφορετικά ύψη τοποθέτησης του LIDAR από την τράπεζα μέτρησης.	38
Σχήμα 4.5: Μεταβολή του μέσου σχετικού σφάλματος σε συνάρτηση με το ύψος	39
Σχήμα 4.6: Μεταβολή του σφάλματος (RMSE) μέτρησης της απόστασης σε σχέση με τον χρόνο για κάθε γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας (βήμα). Τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.....	40
Σχήμα 4.7: Εξάπλωση υλικού επί του ιμάντα σε κάτοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά). Τα κάθετα τοποθετημένα επί του ταινιοδρόμου ξύλινα φύλλα λειτουργούν ως οδηγοί που σηματοδοτούν την έναρξη και λήξη των μετρήσεων με τον σαρωτή LIDAR.	41
Σχήμα 4.8: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 0-4mm.	43
Σχήμα 4.9: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 4-8mm	44
Σχήμα 4.10: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 8-16mm	46
Σχήμα 4.11: Στατικές μετρήσεις σε θραυσμένο ασβεστόλιθο διαφόρων κοκκομετριών.....	48
Σχήμα 4.12: Δυναμικές μετρήσεις σε θραυσμένο ασβεστόλιθο διαφόρων κοκκομετριών.	48
Σχήμα 4.13: Τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας	49
Σχήμα 4.14: Λατερίτης Εύβοιας.....	51
Σχήμα 4.15: Λιγνίτης Πτολεμαΐδας.....	52
Σχήμα 4.16: Στατικές μετρήσεις των υλικών	54
Σχήμα 4.17: Δυναμικές μετρήσεις των υλικών	54
Σχήμα 4.18: Ασβεστολιθικό υλικό επί σκαφιδωτού ιμάντα.....	55
Σχήμα 4.19 Στατικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού επί σκαφιδωτού ιμάντα.....	57
Σχήμα 4.20: Δυναμικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού επί σκαφιδωτού ιμάντα	57

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Μεταβολή του σχετικού σφάλματος μέτρησης της διατομής υλικού σε σχέση με το σφάλμα μέτρησης (δx) του LIDAR και του πάχους του υλικού (ΔR_m) επί του ιμάντα.	25
Πίνακας 4.1: Μετρήσεις της σάρωσης του κυβόλιθου από το LIDAR.....	39
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά και παράμετροι λειτουργίας του οριζόντιου ταινιόδρομου με τον επίπεδο ιμάντα.	42
Πίνακας 4.3: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 0-4mm.	43
Πίνακας 4.4: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 0-4mm.	44
Πίνακας 4.5: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 4-8mm.	45
Πίνακας 4.6: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 4-8mm.	45
Πίνακας 4.7: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 8-16mm.....	47
Πίνακας 4.8: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 8-16mm.	47
Πίνακας 4.9: Στατικές τέφρας.....	50
Πίνακας 4.10: Δυναμικές τέφρας	50
Πίνακας 4.11: Στατικές λατερίτη	51
Πίνακας 4.12: Δυναμικές λατερίτη	52
Πίνακας 4.13: Δυναμικές λιγνίτη	53
Πίνακας 4.14: Παράμετροι σκαφιδωτού ιμάντα.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 4.15: Στατικές ασβ. σε σκαφιδωτό ιμάντα.....	56
Πίνακας 4.16: Δυναμικές ασβ. σε σκαφιδωτό ιμάντα.....	56

1 Περιγραφή ταινιοδρόμων και συστημάτων παρακολούθησης της απόδοσής τους

1.1 Συγκρότηση ταινιοδρόμου

Ταινιοδρόμος ή ταινιομεταφορέας είναι ένα μηχανικό σύστημα μεταφοράς υλικών. Πρόκειται για μια διάταξη από 2 ή περισσότερες τροχαλίες γύρω απ' τις οποίες εφαρμόζει ένας ελαστικός ιμάντας ο οποίος περιστρέφεται σε έναν ατέρμων βρόχο. Μία ή περισσότερες από τις τροχαλίες λειτουργούν ως κινητήρες και ονομάζονται τύμπανα κίνησης.

Εμφανίζονται για πρώτη φορά το 1892 όταν Thomas Robins παρουσίασε μια σειρά από εφευρέσεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός ιμάντα μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά άνθρακα, μεταλλευμάτων και άλλων προϊόντων. Στη συνέχεια το 1905 ο μηχανικός Richard Sutcliffe εφηύρε τους πρώτους ιμάντες μεταφοράς για χρήση σε ανθρακωρυχεία όπου έφερε την επανάσταση στον κλάδο της εξόρυξης, ενώ το 1913 ο Henry Ford εισήγαγε γραμμές συναρμολόγησης ταινιοδρόμων στο εργοστάσιο της Ford Motor Company στο Michigan των ΗΠΑ.

Έκτοτε, μεταφορικές διατάξεις αποτελούμενες από ελαστικούς ιμάντες είναι οι πλέον διαδεδομένες στη βιομηχανία για μεταφορά υλικών σε χύδην μορφή αλλά και σε μεγάλα τεχνικά έργα για αποκομιδή υλικών εκσκαφής.

Τυπικά παραδείγματα χρήσης μεταφορικών ταινιών αποτελούν η μεταφορά του τσιμέντου στη τσιμεντοβιομηχανία, των αδρανών υλικών στα λατομεία, των μεταλλευμάτων, των γαιανθράκων και των αγόνων υλικών σε ορυχεία (Σχήμα 1.1), των λιπασμάτων στη χημική βιομηχανία, των σιτηρών στη γεωργία κ.ά. (Κολοβός, 2004).



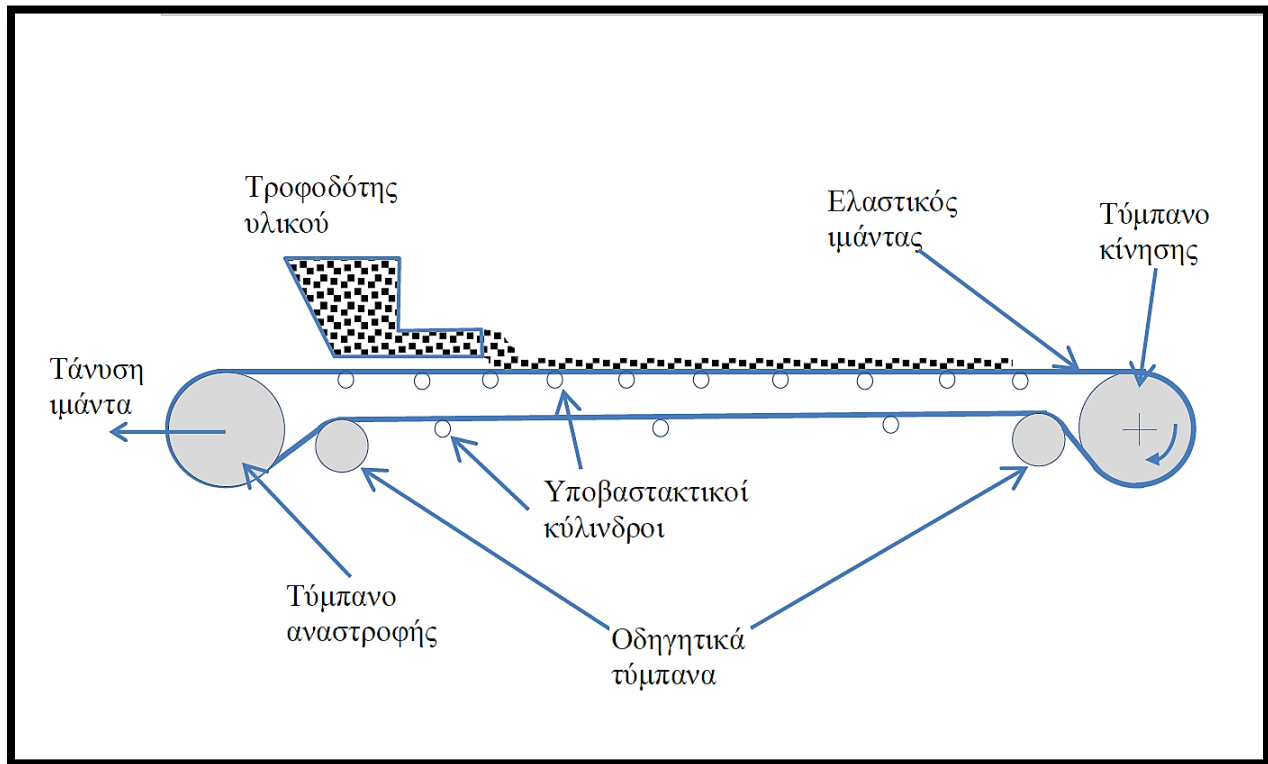
Σχήμα 1.1: Ταινιόδρομος μεγάλων αποστάσεων (www.geldof.be)

Ιδιαίτερα μεγάλη εξάπλωση και εξέλιξη γνώρισαν τα συστήματα μεταφοράς με ιμάντες στα μεγάλα υπαίθρια λιγνιτωρυχεία συνεχούς λειτουργίας. Στα ορυχεία αυτά τα συστήματα μεταφορικών ταινιών, λόγω της συνεχούς λειτουργίας τους και της μεγάλης μεταφορικής ικανότητάς τους, αποδεικνύονται οικονομικότερα για τη μεταφορά των αγόνων υλικών και του γαιάνθρακα σε σχέση με τα συμβατικά μέσα μεταφοράς ασυνεχούς λειτουργίας, όπως τα φορτηγά και η σιδηροδρομική μεταφορά. Οι μεταφορικές ταινίες στα λιγνιτωρυχεία συνεχούς λειτουργίας, συνεργάζονται με τους καδοφόρους εκσκαφείς που εξορύσσουν τα υλικά και τους αποθέτες/απολήπτες λιγνίτη και αγόνων που πραγματοποιούν την απόθεση και ενδιάμεση διακίνηση (Εφραιμίδης, 1985).

Τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται ένας ταινιόδρομος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2 είναι (Γαλετάκης, 2013):

- i. Το/α τύμπανο/α κίνησης που λαμβάνει κίνηση από έναν κινητήρα (μέσω μειωτήρα) και απαρτίζει την κεφαλή του ταινιοδρόμου. Στην κεφαλή του ταινιοδρόμου βρίσκεται επίσης το σύστημα πέδησης.
- ii. Το/α τύμπανο/α αναστροφής του ιμάντα που συνδέεται με μηχανισμό τάνυσης και αποτελεί την ουρά του ταινιοδρόμου.
- iii. Τον ατέρμονα ελαστικό ιμάντα που είναι συνήθως ενισχυμένος με λινό ή συνθετικό ύφασμα, ή με χαλύβδινα σύρματα σε περιπτώσεις ιμάντων μεγάλου μήκους.
- iv. τους υποβαστακτικούς κυλίνδρους (ράουλα) επί των οποίων στηρίζεται ο ιμάντας και τα οδηγητικά τύμπανα (για την αύξηση της προσφυγής και την ευθυγράμμιση του ιμάντα).
- v. Τον τροφοδότη του υλικού που συνήθως τοποθετείται στην ουρά του ταινιοδρόμου.

- vi. Την μεταλλική κατασκευή επί της οποίας εδράζεται ο κατά μήκος εξοπλισμός του ταινιοδρόμου (υποβαστακτικού κυλίνδρου, ιμάντας) και η οποία αποτελείται από μια σειρά μεταλλικών πλαισίων που τοποθετούνται κατά τον διαμήκη άξονα του ταινιοδρόμου και εδράζονται στο έδαφος επί μεταλλικών ή τσιμεντένιων στρωτήρων, που μπορεί να είναι σταθεροί ή μεταθετοί αν απαιτούνται μετακινήσεις του ταινιοδρόμου.



Σχήμα 1.2: Σχεδιάγραμμα ταινιοδρόμου (Γαλετάκης, 2013)

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες ταινιοδρόμων:

- Οι γενικού υλικού όπως εκείνοι που μεταφέρουν τα κιβώτια ή τις παλέτες κατά μήκος σε μια βιομηχανία ή ένα εργοστάσιο.
- Οι μαζικού ή χύδην υλικού οι οποίοι μεταφέρουν βιομηχανικά υλικά, μεταλλεύματα και πολλά άλλα υλικά.

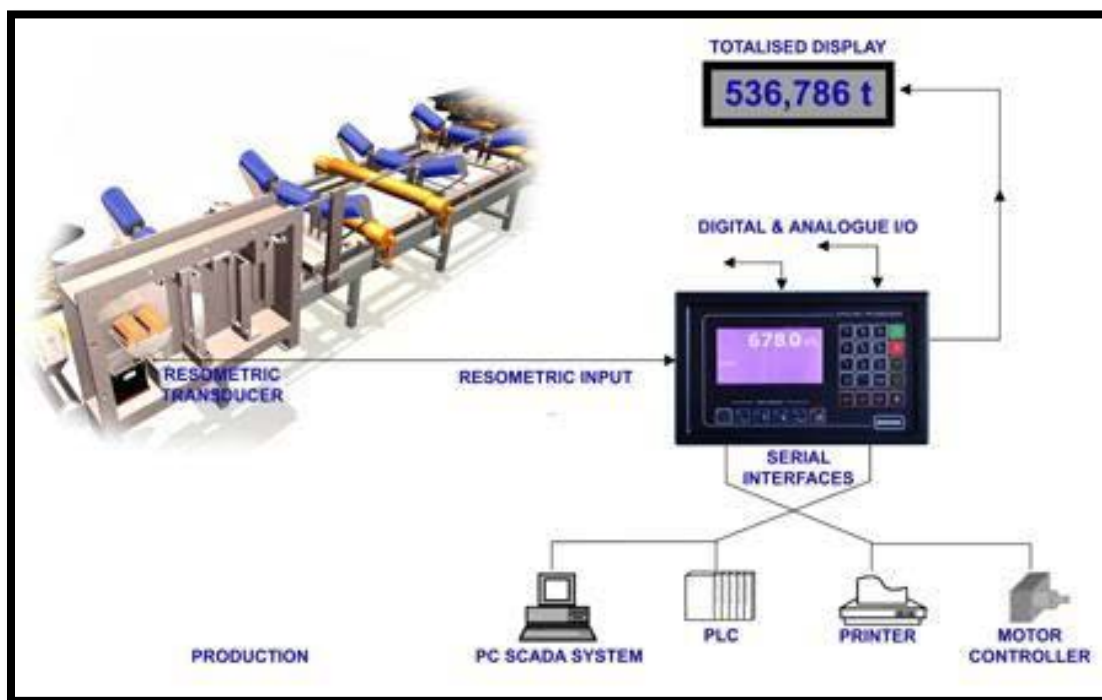
Ο τύπος του ταινιοδρόμου και του ιμάντα μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά εξαρτάται από το υλικό που θέλουμε να μεταφέρουμε και τα σημεία μεταφοράς του, επομένως μπορούμε να συναντήσουμε ποικίλους τύπους όπως ραουλόδρομους βαρύτητας, μεταφορικές ταινίες, λείας ή αντλιοσθητικής επιφάνειας, με προφίλ κ.λπ.

1.2 Συστήματα παρακολούθησης της ποσότητας μεταφερόμενου υλικού

1.2.1 Μέτρηση βάρους μεταφερόμενου υλικού μέσω διατάξεων ζύγισης

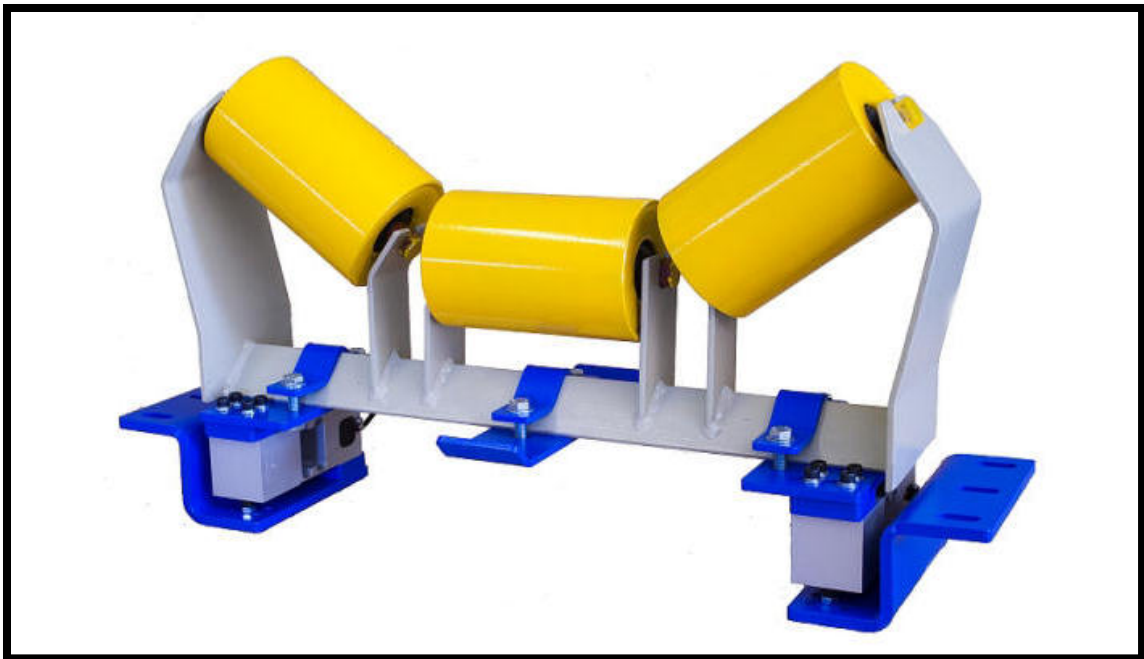
Η μέτρηση του βάρους των μεταφερόμενων υλικών μέσω των διατάξεων των ταινιοδρόμων σε μια βιομηχανία ή γραμμή παραγωγής είναι το πλέον σημαντικό μέγεθος, αφού είναι αυτό που δίνει τις πληροφορίες όσον αφορά την απόδοση της εκάστοτε μονάδας μεταφοράς. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για τη μέτρηση του βάρους των μεταφερόμενων υλικών σε μεταφορικές ταινίες διακρίνονται σε δυο κύριες κατηγορίες (Κολοβός, 2004):

- i. Διατάξεις επαφής υλικού, όπως είναι η διάταξη ταινιοζυγού (Σχήμα 1.3). Χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη μάζα ή το ρυθμό ροής του υλικού που διακινείται από έναν μεταφορικό ιμάντα οποιουδήποτε μήκους.



Σχήμα 1.3: Διάταξη ταινιοζυγού (<http://www.protemgroup.com>)

Ένας ή περισσότεροι (αναλόγως της επιθυμητής ακρίβειας) σταθμοί ράουλων μιας μεταφορικής ταινίας, τοποθετούνται πάνω στο πλαίσιο του ταινιοζυγού (Σχήμα 1.4) που έχει αισθητήρια βάρους (δυναμοκυψέλες). Το βάρος του υλικού που μεταφέρει η ταινία πιέζει τον ιμάντα και με τη σειρά του πιέζει τα ράουλα και τους σταθμούς. Το βάρος αυτό καταμετράται συνεχώς από τις δυναμοκυψέλες και στη συνέχεια μέσω του ηλεκτρονικού οργάνου, μετατρέπεται σε ένδειξη παροχής (π.χ. t/h). Για τους υπολογισμούς της παροχής απαιτείται και η μέτρηση της ταχύτητας κίνησης (m/s) του ιμάντα που γίνεται μέσω του αισθητηρίου ταχύτητας.



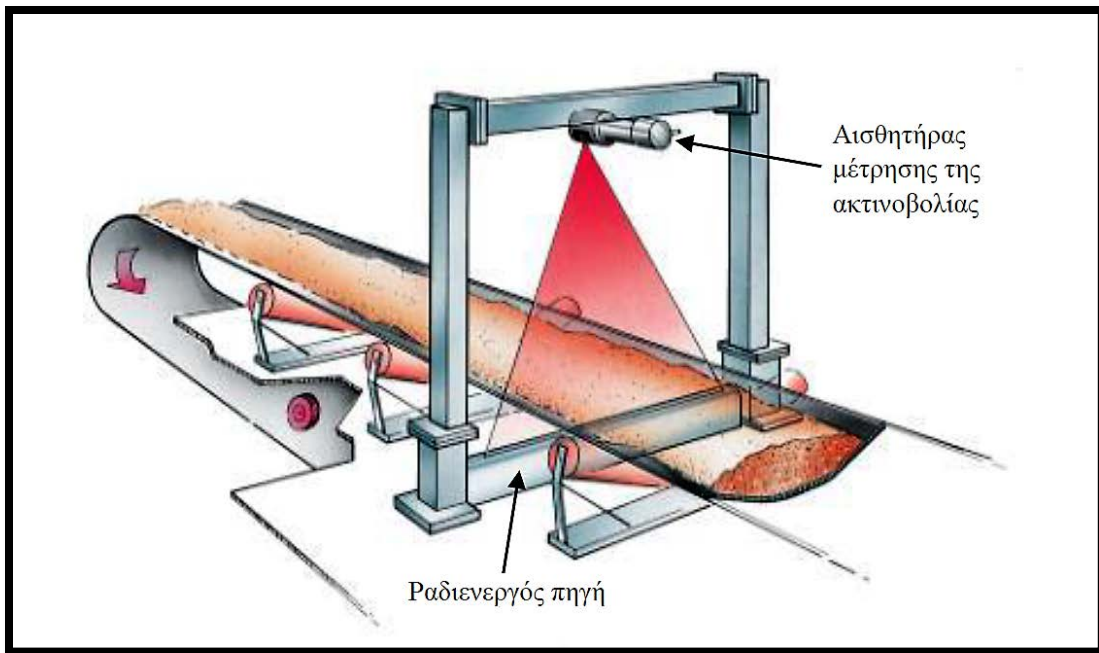
Σχήμα 1.4: Πλαίσιο ταινιοζυγού υψηλής ακρίβειας (www.calculus-tac.co.za/weighing-systems/)

- ii. Ανέπαφες διατάξεις υπολογισμού βάρους του μεταφερόμενου υλικού, όπου στηρίζονται σε προηγμένες τεχνολογικά τεχνικές, όπως:
 - a) Μέτρηση με τη μέθοδο των μικροκυμάτων: Τα μικροκύματα εισχωρούν στο κενό χώρο του υλικού (πόρους, αεροθύλακες) προκαλώντας διέγερση των μορίων του νερού που υπάρχει σε αυτούς, με αποτέλεσμα η ταχύτητα των μικροκυμάτων (μεταβολή φάσης) και η έντασή τους να ελαττώνεται (εξασθένηση). Και τα δυο φαινόμενα αυτά χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας του διερχόμενου υλικού και απαιτούν πολύ χαμηλές ενέργειες της τάξης του 0,1mW και επακόλουθα το υλικό δεν θερμαίνεται ή αλλοιώνεται. Ένα τέτοιο σύστημα είναι και το LB 472 bulk flow system (Σχήμα 1.5) που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη μεταλλευτική βιομηχανία για τον προσδιορισμό με ακρίβεια της ροής των μεταφερόμενων υλικών. Το σύστημα αυτό μέτρησης μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από τον ταινιόδρομο και η μέτρηση δεν απαιτεί την επαφή ή την καταστροφή του υλικού, ενώ παρέχει δεδομένα της ροής μάζας και της υγρασίας του υλικού.



Σχήμα 1.5: Σύστημα προσδιορισμού παροχής και υγρασίας με χρήση αισθητήρα μικροκυμάτων, τύπου LB 472 (<https://www.berthold.com/>)

- b) Ραδιομετρικό σύστημα: Το ραδιομετρικό σύστημα (Σχήμα 1.6) χρησιμοποιεί ραδιενεργές πηγές ακτινοβολίας γάμμα. Η πηγή ακτινοβολίας αποτελείται από ραδιενεργό υλικό, που είναι ενθυλακωμένο σε σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα μέσα σε δοχείο θωράκισης, είναι τοποθετημένη κάτω από τον μεταφορέα και είναι ειδικά σχεδιασμένη για το υλικό και το σύστημα μεταφοράς. Ο ανιχνευτής-καταγραφέας της ακτινοβολίας είναι μετρητής σπινθηρισμού (scintillation counter), εγκαθίσταται πάνω από τον μεταφορέα και ευθυγραμμίζεται με την πηγή ακτινοβολίας. Η ένταση της ακτινοβολίας που λαμβάνεται από τον απαριθμητή σπινθηρισμού σχετίζεται με την ποσότητα του υλικού πάνω στην ταινία (φόρτιση T/Δ). Η τιμή αυτή συνδυαζόμενη με τη μέτρηση της ταχύτητας κίνησης του ιμάντα (ένδειξη στροφόμετρου) οδηγεί στον υπολογισμό της παροχής του ταινιοδρόμου (t/h).



Σχήμα 1.6: Ραδιομετρικό σύστημα μέτρησης μάζας και μονάδα αξιολόγησης (www.berthold.com/en/pc/bulk-flow)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ανέπαφες μέθοδοι έναντι των κλασσικών μεθόδων μέτρησης βάρους είναι:

- Η απουσία επαφής ή παρέμβασης
- Η αποφυγή φθορών και καταστροφών
- Ο ηλεκτρονικός έλεγχος της διαδικασίας
- Η ακριβής και χωρίς συντήρηση λειτουργία
- Η μέτρηση όλου του προφίλ του υλικού
- Η εύκολη εγκατάσταση σε υφιστάμενα συστήματα ταινιοδρόμων

1.2.2 Μειονεκτήματα των χρησιμοποιούμενων διατάξεων και προτεινόμενη νέα προσέγγιση

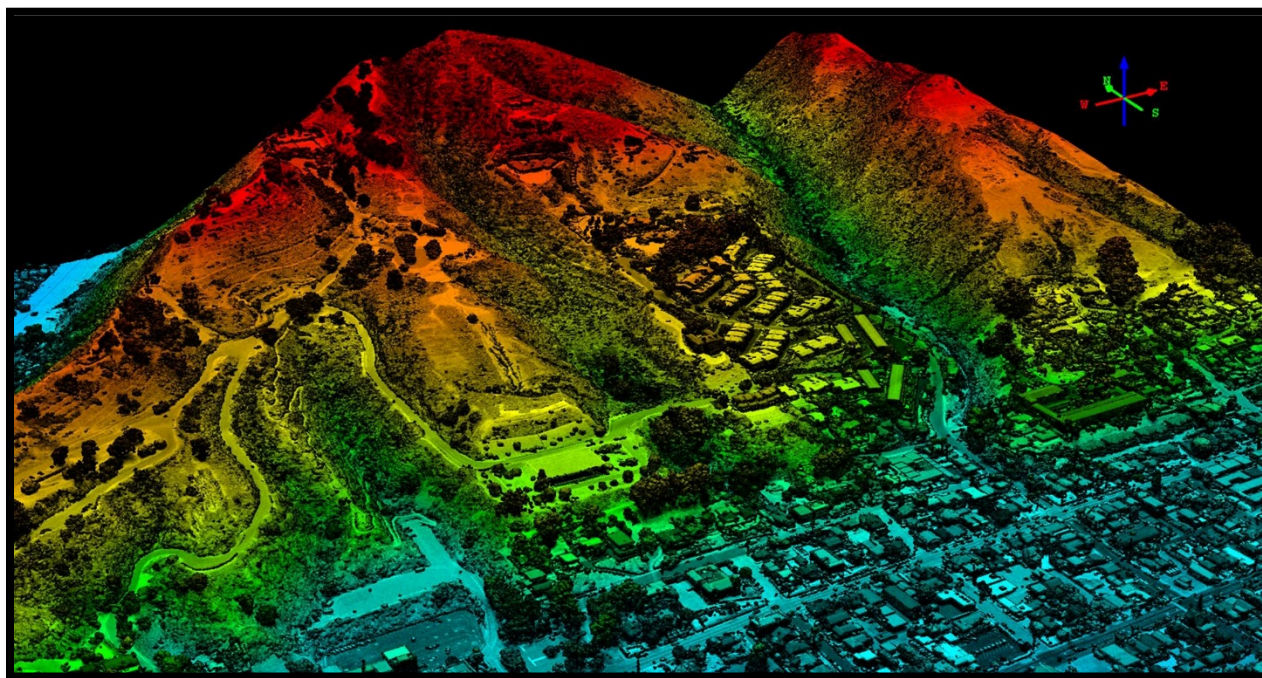
Οι διατάξεις που αναφερθήκαν παραπάνω παρουσιάζουν μερικά σοβαρά μειονεκτήματα, όπως το μεγάλο κόστος εγκατάστασης των συστημάτων μηχανικής όρασης (κάμερες), τα συχνά σφάλματα στις ζυγίσεις των ταινιοζυγών καθώς και οι αποκλίσεις στις μετρήσεις υγρασίας των συστημάτων που βασίζονται στα μικροκύματα και στην ακτινοβολία γάμμα, ιδιαίτερα για ορισμένα υλικά με χαμηλό πορώδες.

Επιπλέον η ταυτόχρονη παρακολούθηση της απόδοσης (ρυθμός μεταφοράς υλικών από τον ταινιοδρόμο) και της καλής λειτουργίας του (κατάσταση ελαστικού ιμάντα, εκφυγές, ολισθήσεις, κ.ά.) απαιτεί την εγκατάσταση πλέον του ενός, συστημάτων παρακολούθησης, γεγονός που οδηγεί σε

αύξηση τόσο του κόστους ελέγχου όσο και της πολυπλοκότητας του συστήματος. Επίσης τα συστήματα που χρησιμοποιούν μικροκύματα και ακτινοβολίες απαιτούν ειδικές διατάξεις ασφαλείας και ειδική εκπαίδευση του προσωπικού.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνολογία που στηρίζεται στη συνεχή καταγραφή τόσο της διατομής του υλικού επί της ταινίας όσο και της επιφάνειας του κενού ιμάντα (προφίλομετρία) χρησιμοποιώντας σαρωτές/αποστασιόμετρα ακτίνων λέιζερ, γνωστοί ως αισθητήρες LIDAR (www.lase.de), (www.syperion.de).

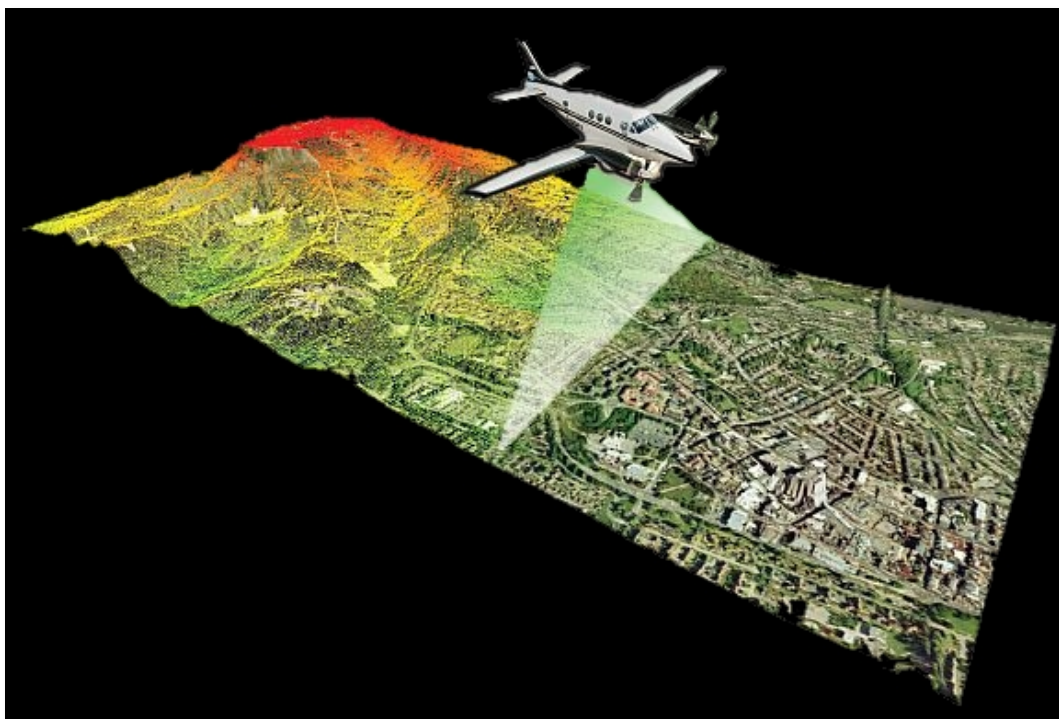
Η τεχνολογία LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) αρχικά χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη συλλογή υψομετρικών δεδομένων μεγάλης πυκνότητας και ακρίβειας χρησιμοποιώντας τεχνικές σάρωσης με δέσμη laser (Σχήμα 1.8). Είναι μια μέθοδος εξαιρετικής ακρίβειας και αποτελεσματικότητας παραγωγής υψομετρικής πληροφορίας που επιτρέπει τη σάρωση του εδάφους αλλά και της βλάστησης κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες φωτισμού.



Σχήμα 1.7: Υψομετρικά δεδομένα LIDAR υψηλής ακρίβειας από περιοχή στη νότια Καλιφόρνια (www.harris.com)

Οι LIDAR αισθητήρες λειτουργούν με την ίδια αρχή όπως το ραντάρ, αποστολή ενός παλμού λέιζερ σε ένα αντικείμενο και υπολογισμός του χρόνου επιστροφής του στην πηγή. Επειδή το φως λέιζερ έχει πολύ μικρότερο μήκος κύματος, είναι δυνατόν να μετρηθούν με ακρίβεια πολύ μικρότερα αντικείμενα, πράγμα που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για τη χαρτογράφηση του εδάφους από αερομεταφερόμενα οχήματα (Σχήμα 1.9).

Στο Σχήμα 1.10 απεικονίζονται 3 είδη σαρωτών LIDAR διαφορετικής ακρίβειας και χρήσης.



Σχήμα 1.8: Απεικόνιση χαρτογράφησης εδάφους με LIDAR από τον αέρα (www.geoconnexion.com/news/)



Σχήμα 1.9: Διάφορα είδη αισθητήρων LIDAR: SEN-14117 Scanse Sweep Scanner LIDAR Sensor - winder/ Panasonic 3D LIDAR sensor 500 / Leica SPL100 Single Photon LIDAR Sensor (www.aliexpress.com / www.electronicweekly.com / leica-geosystems.com)

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα χρήσης της τεχνικής αυτής για να μετρηθεί η διατομή κοκκωδών χύδην υλικών που μεταφέρονται με ταινιοδρόμους. Στη συνέχεια η πληροφορία αυτή σε συνδυασμό με τη μέτρηση της ταχύτητας κίνησης του ιμάντα μεταφοράς χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η απόδοση σε ογκομετρική βάση (m^3/h) του ταινιοδρόμου.

Η τεχνική αυτή φαίνεται υποσχόμενη εφόσον είναι ανέπαφη, έχει μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου μεταφέρονται ομογενή χύδην υλικά με σταθερή φαινόμενη πυκνότητα ή σε περιπτώσεις όπου προτιμάται ο υπολογισμός της παροχής σε ογκομετρική βάση (www.syperion.de).

Οι μέχρι τώρα εφαρμογές για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής ταινιοδρόμων είναι περιορισμένες. Τα υπάρχοντα δημοσιευμένα άρθρα σχετικά με την επιτυγχανόμενη ακρίβεια, τόσο σε επίπεδο βιομηχανικής εφαρμογής όσο και εργαστηριακής διερεύνησης είναι επίσης περιορισμένα (Δημητρακάκης και Τοπάλογλου, 2016).

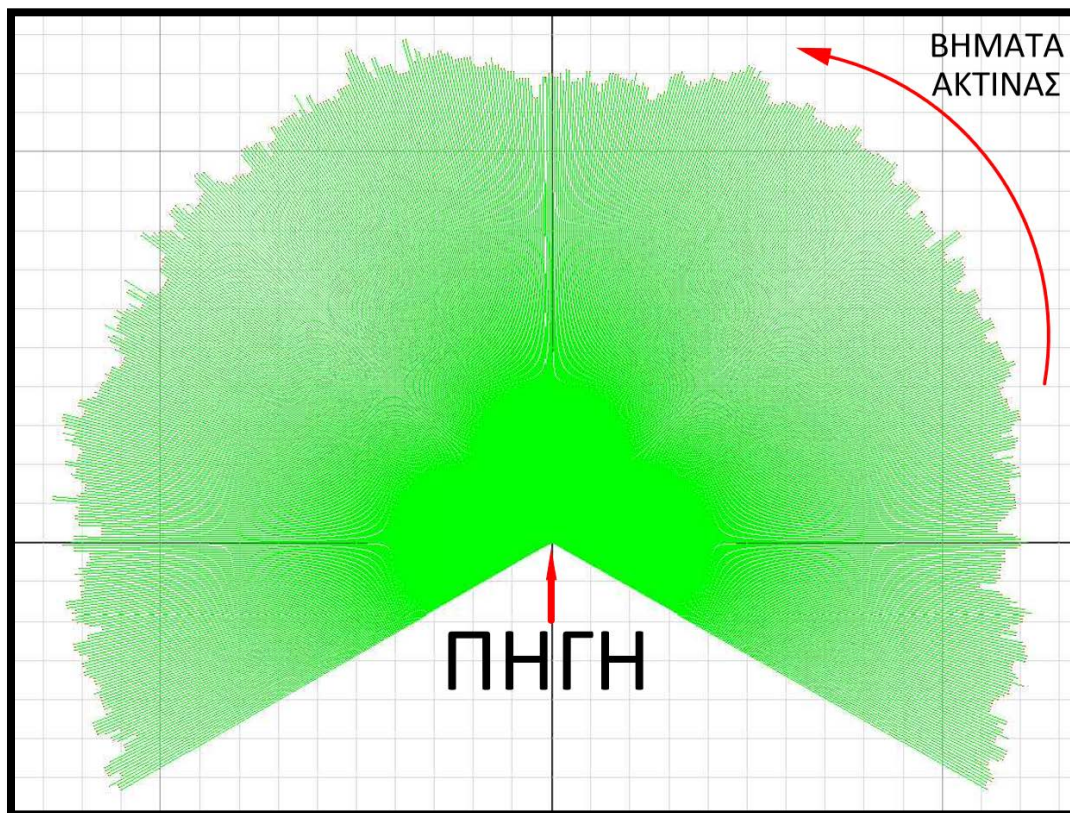
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα εργαστηριακό σύστημα ανέπαφης μέτρησης της απόδοσης ταινιοδρόμου, χρησιμοποιώντας αισθητήρα LIDAR και μέσω μιας σειράς στατικών και δυναμικών μετρήσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον, επιχειρήθηκε να εκτιμηθεί η ακρίβεια μέτρησης. Το σύστημα αυτό, εφόσον αποδειχθεί αξιόπιστο και αποτελεσματικό, μπορεί να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα βιομηχανικά συστήματα με επιτυχία αφού είναι οικονομικότερο, απλούστερο στην εγκατάσταση και λειτουργία του και πιο ολοκληρωμένο από τα υπάρχοντα συστήματα. Επιπρόσθετα μπορεί παράλληλα με τον πραγματοποιήση του υπολογισμού απόδοσης να εντοπίζει τα λειτουργικά προβλήματα των ταινιοδρόμων (Δασκαλάκης, 2018).

2 Μεθοδολογία μέτρησης της διατομής του υλικού και υπολογισμοί

2.1 Υπολογισμός εμβαδού τόξου και διατομής υλικού

Ο σαρωτής τύπου LIDAR σαρώνει μια επιφάνεια και υπολογίζει τις τιμές των αποστάσεων των αντικειμένων στα οποία ανακλάται η ακτίνα του. Η ακτίνα εκπέμπεται από μια περιστρεφόμενη πηγή και επιστρέφει δεδομένα για ένα συγκεκριμένο γωνιακό εύρος ϕ αυτής της περιστροφής. Η σάρωση πραγματοποιείται βηματικά (με προκαθορισμένο γωνιακό βήμα $\delta\phi$) και σε κάθε βήμα υπολογίζεται η απόσταση γ . Για κάθε πλήρη περιστροφή της ακτίνας του σαρωτή LIDAR λαμβάνονται $n=\phi/\delta\phi$ τιμές απόστασης γ που αντιστοιχούν στα βήματα μέτρησης εντός του ϕ .

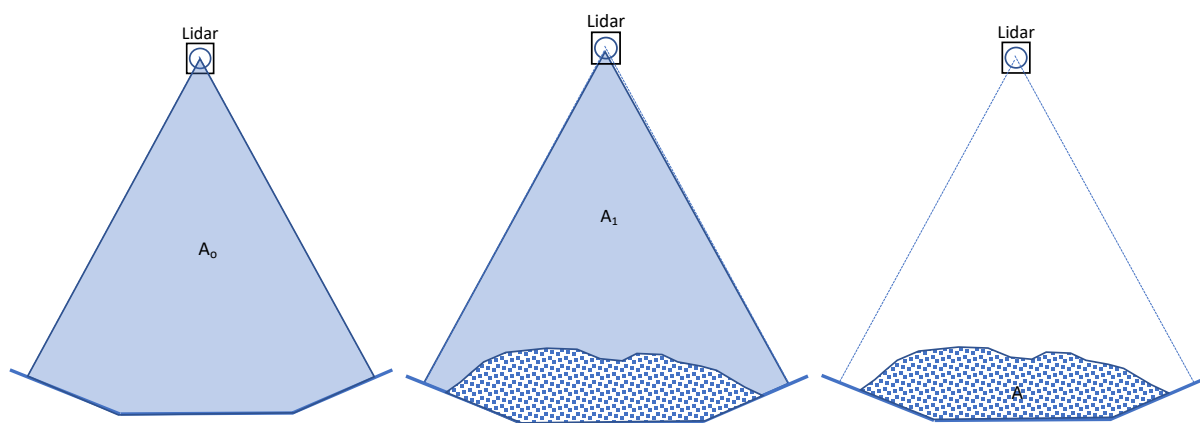
Σχηματικά, τα βήματα δημιουργούν ένα τόξο, στην καμπύλη του οποίου αποτυπώνονται οι επιφάνειες των αντικειμένων που ανακλούν την ακτίνα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα από το πρόγραμμα "URG Benri". Ο σαρωτής τοποθετήθηκε μέσα σε κυλινδρικό δοχείο.

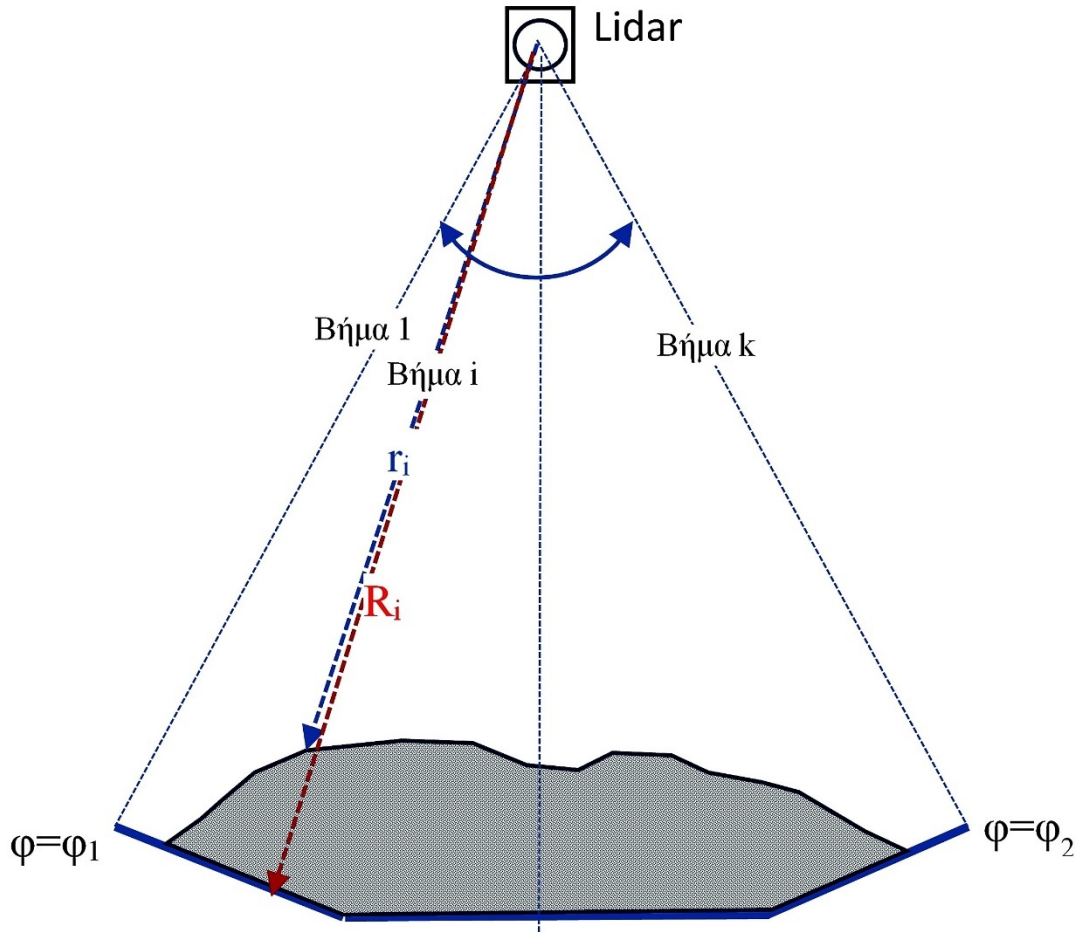
Για τον υπολογισμό της διατομής του υλικού επί του ιμάντα με βάση τις αποστάσεις που έχουν μετρηθεί από τον αισθητήρα LIDAR υπολογίζονται αρχικά οι επιφάνειες A_0 και A_1 που αντιστοιχούν στις μετρήσεις με κενό και έμφορτο ιμάντα (Σχήμα 2.2). Η διατομή A του υλικού επί του ιμάντα προκύπτει στη συνέχεια με αφαίρεση του A_1 από το A_0 . Ισχύει δηλαδή, όπως φαίνεται παραστατικά και στο Σχήμα 2.6 ότι:

$$A = A_0 - A_1 \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.2: Τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας της διατομής του υλικού με σάρωση του άδειου και έμφορτου ιμάντα με τον αισθητήρα LIDAR.

Για τον υπολογισμό των επιφανειών A_0 και A_1 , που σαρώνει ο αισθητήρας LIDAR, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις υπολογισμού που βασίζονται σε σύστημα πολικών συντεταγμένων με πόλο τη θέση του αισθητήρα LIDAR (Σχήμα 2.7). Ως ακτίνες R_i και r_i θεωρήθηκαν αντίστοιχα οι αποστάσεις που υπολογίζει ο αισθητήρας, στο βήμα μέτρησης i , από τον κενό και τον έμφορτο ιμάντα αντίστοιχα. Το γωνιακό βήμα σάρωσης του αισθητήρα είναι $\delta\phi = 360^\circ/1024$ και οι γωνίες σάρωσης ϕ_1 έως ϕ_2 επιλέγονται έτσι ώστε να καλύπτουν ολόκληρο το πλάτος του ιμάντα. Η γωνία ϕ_1 θεωρείται γωνία έναρξης της σάρωσης και αντιστοιχεί στην πρώτη μέτρηση (βήμα 1) και η γωνία ϕ_2 θεωρείται η τελική γωνία και αντιστοιχεί στην τελευταία μέτρηση (βήμα k). Ο αριθμός των βημάτων k είναι, $k = (\phi_2 - \phi_1) / \delta\phi$.



Σχήμα 2.3: Υπολογισμός της διατομής του υλικού επί του ιμάντα

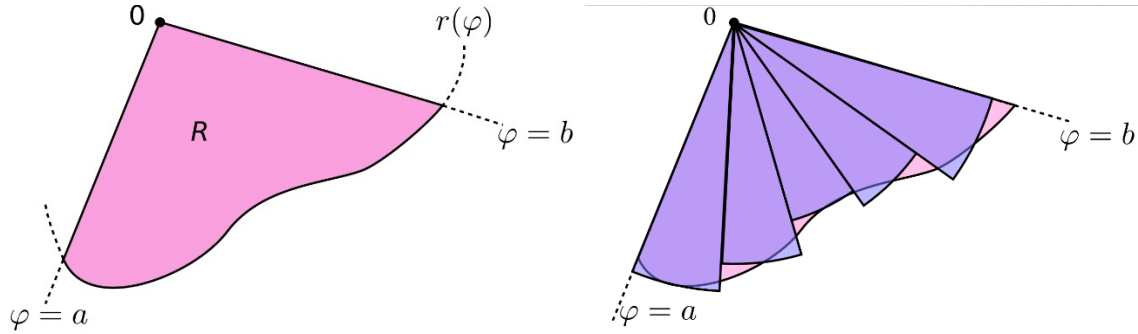
Ο αναλυτικός υπολογισμός της επιφάνειας S που περιλαμβάνεται μεταξύ των γωνιών $\phi=a$ και $\phi=b$ όταν είναι γνωστή η αναλυτική σχέση $r(\phi)$ μεταξύ της ακτίνας r και της γωνίας ϕ , σε σύστημα πολικών συντεταγμένων (Σχήμα 2.4) δίνεται από τη σχέση (2.2)

$$S = \frac{1}{2} \int_a^b [r(\phi)]^2 d\phi \quad (2.2)$$

Αν η αναλυτική σχέση $r(\phi)$ δεν είναι γνωστή, τότε ο υπολογισμός της επιφάνειας S μπορεί να προσεγγιστεί με το άθροισμα των επιφανειών η διαδοχικών στοιχειωδών κυκλικών τομέων (Σχήμα 2.4).

Θεωρείται ότι κάθε στοιχειώδης κυκλικός τομέας i έχει ακτίνα r_i και γωνία $\delta\varphi$ ίση με $(a-b)/n$ (η γωνία φ είναι σε ακτίνια). Η επιφάνεια S υπολογίζεται από τη σχέση (2.3) :

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} r_i^2 \delta\varphi \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.4: Αναλυτικός (αριστερά) και προσεγγιστικός (δεξιά) υπολογισμός της επιφάνειας S σε σύστημα πολικών συντεταγμένων (https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_coordinate_system)

Καθώς αυξάνεται ο αριθμός n των στοιχειωδών κυκλικών τομέων αυξάνει η ακρίβεια υπολογισμού της επιφάνειας S . Όταν το $n \rightarrow \infty$, το άθροισμα γίνεται το άθροισμα Riemann για το παραπάνω ολοκλήρωμα. Με βάση τη σχέση 2.3 οι επιφάνειες A_0 και A_1 δίνονται από τις σχέσεις 2.4 και 2.5:

$$A_0 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} R_i^2 \delta\varphi \quad (2.4)$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} r_i^2 \delta\varphi \quad (2.5)$$

ενώ η διατομή του υλικού επί του μάντα A δίνεται από τη σχέση 2.6:

$$A = A_0 - A_1 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (R_i^2 - r_i^2) \delta\varphi = \frac{1}{2} \delta\varphi \sum_{i=1}^k (R_i^2 - r_i^2) \quad (2.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι για τον συγκεκριμένο αισθητήρα LIDAR η γωνιακή διακριτική ικανότητα είναι $\delta\phi=360^\circ/1024$ ή $2\pi/1024$, εφόσον η γωνία ϕ μετρίεται σε ακτίνια, η διατομή A δίνεται από τη σχέση 2.7:

$$A = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{1024} \sum_{i=1}^k (R_i^2 - r_i^2) = \frac{\pi}{1024} \sum_{i=1}^k (R_i^2 - r_i^2) \quad (2.7)$$

2.2 Υπολογισμός θεωρητικού σφάλματος

Για την εκτίμηση του θεωρητικού σφάλματος του υπολογισμού εμβαδού της διατομής υλικού επί του ιμάντα δA που βασίζεται στη σχέση 2.7 (εξίσωση με χρήση των πολικών συντεταγμένων) χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση κατά Taylor (Coleman et al. , 1999):

$$\delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial R}\right)^2 \cdot \delta R^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial r}\right)^2 \cdot \delta r^2} \quad (2.8)$$

Όπου: δR , δr είναι τα σφάλματα μέτρησης των ακτίνων R και r αντίστοιχα, ενώ $\partial A/\partial R$ και $\partial A/\partial r$ είναι οι μερικές παράγωγοι της συνάρτησης A ως προς R , r .

Οι μερικές παράγωγοι της A είναι:

$$A = \frac{\pi}{512} \cdot \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 - r_i^2 \right) \Rightarrow \frac{\partial A}{\partial R} = \frac{\pi}{1024} \cdot \sum_{i=1}^n 2R_i = \frac{\pi}{512} \cdot \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.9)$$

και

$$\frac{\partial A}{\partial r} = -\frac{\pi}{1024} \cdot \sum_{i=1}^n 2r_i = -\frac{\pi}{512} \cdot \sum_{i=1}^n r_i \quad (2.10)$$

Το σφάλμα δA υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial R}\right)^2 \cdot \delta R_i^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial r}\right)^2 \cdot \delta r_i^2} \Rightarrow$$

$$\delta A^2 = \left(\frac{\pi}{512} \sum_{i=1}^n R_i\right)^2 \cdot \delta R_i^2 + \left(\frac{\pi}{512} \sum_{i=1}^n r_i\right)^2 \cdot \delta r_i^2$$
(2.11)

Θεωρώντας R_m ως:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$$
(2.12)

και r_m ως:

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$$
(2.13)

προκύπτει:

$$\delta A^2 = \left(\frac{n \cdot \pi}{512}\right)^2 \cdot (R_m^2 \cdot \delta R_i^2 + r_m^2 \cdot \delta r_i^2)$$
(2.14)

Λόγω του μικρού πάχους του υλικού επί του ιμάντα και της μεγάλης σχετικά απόστασης του LIDAR από τον ιμάντα μπορεί να θεωρηθεί ότι τα σφάλματα μέτρησης σε κενό και έμφορτο ιμάντα είναι παραπλήσια αφού R_i και r_i διαφέρουν ελάχιστα ($R_i - r_i \ll R_i$, $R_i - r_i \ll r_i$). Δηλαδή:

$$\delta R_i = \delta r_i = \delta x$$

οπότε

$$\delta A = \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \delta x}{512}\right) \cdot \sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}$$
(2.15)

και το σχετικό σφάλμα

$$\delta A_r = \frac{\delta A}{A} = \frac{\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \delta x}{512}\right) \cdot \sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{\left[\frac{\pi}{1024} \cdot \sum_{i=1}^n (R_i^2 - r_i^2)\right]} = \frac{2 \cdot n \cdot \delta x \cdot \sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{\sum_{i=1}^n (R_i^2 - r_i^2)}$$
(2.16)

Επειδή R_i και r_i διαφέρουν ελάχιστα μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$\sum_1^n (R_i^2 - r_i^2) \cong n \cdot (R_m^2 - r_m^2) \quad (2.17)$$

Άρα:

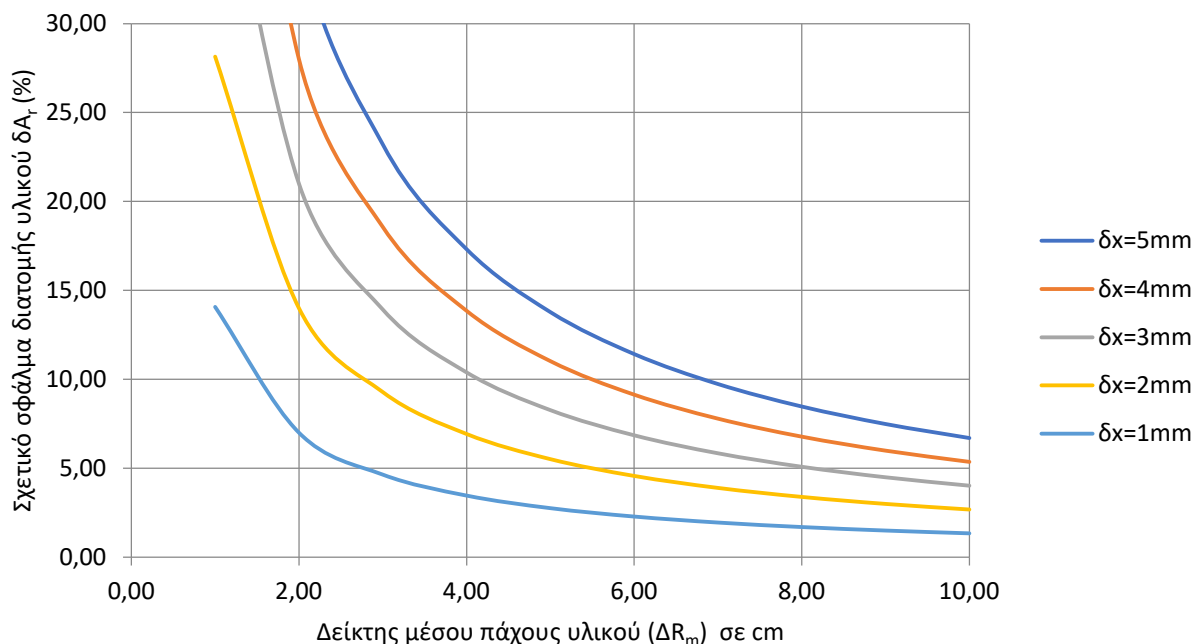
$$\delta A_r = \frac{2n\delta x \sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{n(R_m^2 - r_m^2)} = 2\delta x \frac{\sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{(R_m^2 - r_m^2)} = 2\delta x \frac{\sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{(R_m - r_m)(R_m + r_m)} = 2\delta x \frac{\sqrt{(R_m^2 + r_m^2)}}{\Delta R_m (R_m + r_m)} \quad (2.18)$$

Όπου το $\Delta R_m = R_m - r_m$ μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί δείκτη που αντιπροσωπεύει το μέσο πάχος του υλικού επί του ιμάντα.

Με βάση τη σχέση 2.18 έγιναν υπολογισμοί του σχετικού σφάλματος δA_r της διατομής του υλικού θεωρώντας ότι το σφάλμα μέτρησης του LIDAR κυμαίνεται από 1 έως 5 mm (για αποστάσεις μέτρησης από 100 έως 200cm) και το μέσο πάχος του υλικού (ΔR_m) από 1 έως 10cm. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στον Πίνακα 2.1 και στο αντίστοιχο γράφημα του Σχήματος 2.5. Όπως είναι αναμενόμενο και από τη σχέση 2.18 το δA_r είναι αντιστρόφως ανάλογο του πάχους του υλικού (ΔR_m) επί του ιμάντα.

Πίνακας 2.1: Μεταβολή του σχετικού σφάλματος μέτρησης της διατομής υλικού σε σχέση με το σφάλμα μέτρησης (δx) του LIDAR και του πάχους του υλικού (ΔR_m) επί του ιμάντα.

	Σχετικό σφάλμα μέτρησης διατομής υλικού %									
	$\Delta R_m=10cm$	9cm	8cm	7cm	6cm	5cm	4cm	3cm	2cm	1cm
$\delta x=5mm$	6.70	7.49	8.47	9.74	11.42	13.78	17.32	23.21	35.00	70.36
4mm	5.36	5.99	6.78	7.79	9.14	11.02	13.85	18.57	28.00	56.28
3mm	4.02	4.49	5.08	5.84	6.85	8.27	10.39	13.93	21.00	42.21
2mm	2.68	2.99	3.39	3.89	4.57	5.51	6.93	9.28	14.00	28.14
1mm	1.34	1.50	1.69	1.95	2.28	2.76	3.46	4.64	7.00	14.07



Σχήμα 2.5: : Μεταβολή του σχετικού σφάλματος της διατομής του υλικού ως συνάρτηση του μέσου πάχους του υλικού (ΔR_m) για τις περιπτώσεις όπου το σφάλμα μέτρησης δx του LIDAR κυμαίνεται από 1 έως 5 mm.

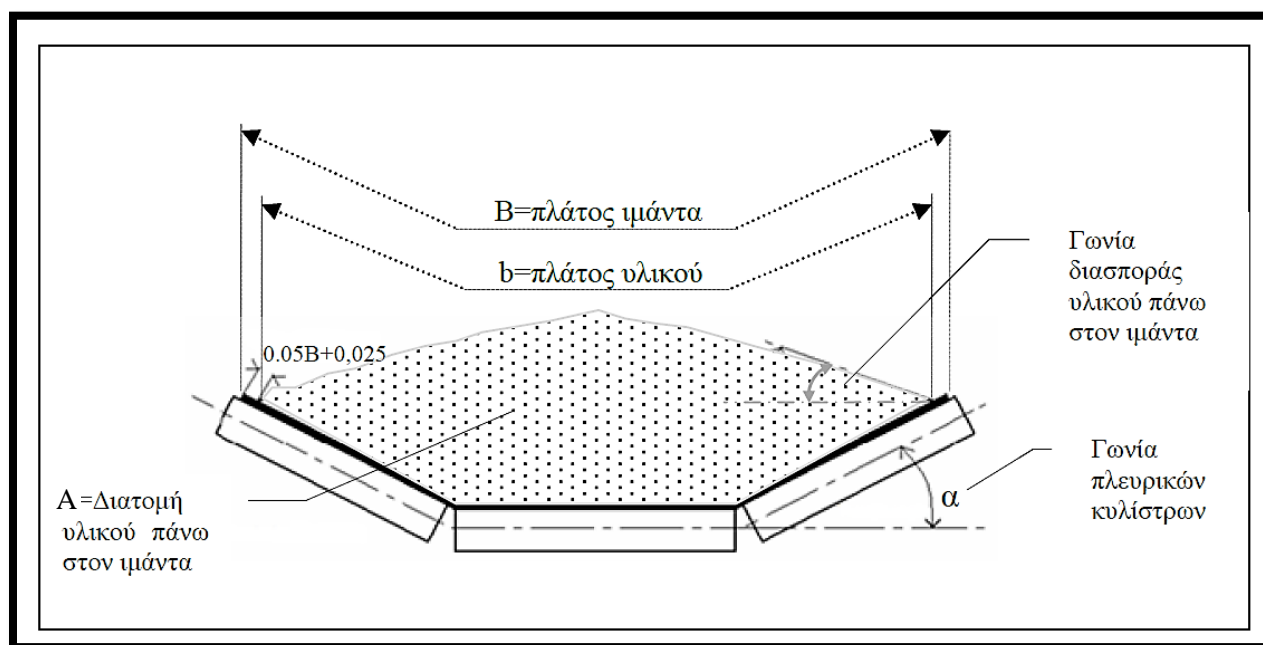
Από το διάγραμμα του Σχήματος 2.5 συμπεραίνεται ότι για επίτευξη σφάλματος δA_r < 5% (τιμή που θεωρείται ικανοποιητική για τη βιομηχανία) απαιτείται μέσο πάχος υλικού επί του ιμάντα μεγαλύτερου των 8cm, θεωρώντας ως απόλυτο σφάλμα μέτρησης του LIDAR τα 3mm. Σε περιπτώσεις όπου το πάχος του υλικού είναι μικρότερο (π.χ. 5.5 cm) απαιτείται σφάλμα μέτρησης του LIDAR μικρότερο των 2mm για να επιτευχθεί δA_r < 5%.

2.3 Υπολογισμός μεταφορικής απόδοσης ταινιοδρόμου

Ο υπολογισμός μεταφορικής απόδοσης ταινιοδρόμου μπορεί να γίνει είτε με ακριβείς αναλυτικούς υπολογισμούς, είτε με χρήση πινάκων που δίνουν γρήγορα αλλά με μικρότερη ακρίβεια την μεταφορική ικανότητα για τυποποιημένα πλάτη, διαμορφώσεις της μεταφορικής σκάφης και ταχύτητες του ιμάντα.

Η ακριβής μέθοδος υπολογισμού της μεταφορικής απόδοσης Q (m³/h) βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας της συνεχούς ροής υλικών και πραγματοποιείται με τον προσδιορισμό της διατομής F (m²) του υλικού πάνω στον ιμάντα (Σχήμα 2.10) και τον πολλαπλασιασμό της με την ταχύτητα του ιμάντα v σε m/s (Γαλετάκης, 2012 & 2013).

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = 3600 \times A \text{ (m}^2\text{)} \times v \text{ (m/s)}$$



Σχήμα 2.6: Τομή πρόσοψης σκαφιδωτού ιμάντα

Για τον ακριβή υπολογισμό της διατομής A απαιτείται η ακριβής γνώση της γεωμετρίας του ιμάντα, του πλάτους b (Σχήμα 2.6) καθώς και της γωνίας διασποράς του υλικού. Η γωνία διασποράς του υλικού εξαρτάται από το είδος του υλικού, την κοκκομετρία του, την γωνία φυσικού πρανούς του, την γωνία απόθεσης πρανούς και κυμαίνεται μεταξύ 5° - 25° (Γαλετάκης, 2013).

Η μεταφορική απόδοση όταν δεν είναι γνωστά τα ανωτέρω μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση (Εφραιμίδης, 1985):

$$Q = \xi \cdot \lambda \cdot \nu \cdot (0,9 \cdot B - 0,05)^2 (m^3/h) \quad (2.19)$$

όπου:

- B: πλάτος ιμάντα (m)
- $0.9B - 0.005 = b$: πλάτος εξάπλωσης υλικού πάνω στον ιμάντα (m)
- ξ : σταθερά που εξαρτάται από την κλίση α των πλευρικών κυλίστρων ως προς την οριζόντια διεύθυνση. Τιμές ξ για τυποποιημένες γωνίες κλίσης α δίνονται από τυποποιημένους πίνακες (DIN 22107).
- λ : συντελεστής διόρθωσης της μεταφορικής απόδοσης ανάλογα με τη γωνία κλίσης δ του ιμάντα ως προς την οριζόντια διεύθυνση. Τιμές λ συναρτήσει της γωνίας δ δίνονται από τυποποιημένους πίνακες (DIN 22107).
- ν : ταχύτητα μεταφοράς του υλικού σε m/s

3 Περιγραφή της εργαστηριακής διάταξης και της μεθοδολογίας των μετρήσεων

3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τον σαρωτή/αποστασιόμετρο LIDAR, τη ρυθμιζόμενη βάση στήριξής του και την τράπεζα τοποθέτησης του υλικού προς μέτρηση.

Σαρωτής LIDAR

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής της εταιρείας HOKUYO, μοντέλο URG-04LX-UG01 (Σχήμα 3.1). Αποτελείται από μια πηγή (ημιαγωγική δίοδος) laser τοποθετημένη πάνω σε πλήρως περιστρεφόμενο μέρος, το οποίο επιτρέπει τη σάρωση κατά την επιθυμητή διεύθυνση. Τροφοδοτείται μέσω καλωδίου από θύρα USB. Οι μετρήσεις λαμβάνονται και καταγράφονται μέσω του ειδικού λογισμικού URG Benri σε Η/Υ.



Σχήμα 3.1: HOKUYO URG-04LX-UG01 (en.manu-systems.com/)

Τεχνικά χαρακτηριστικά σαρωτή URG-04LX-UG01* (www.hokuyo-aut.jp):

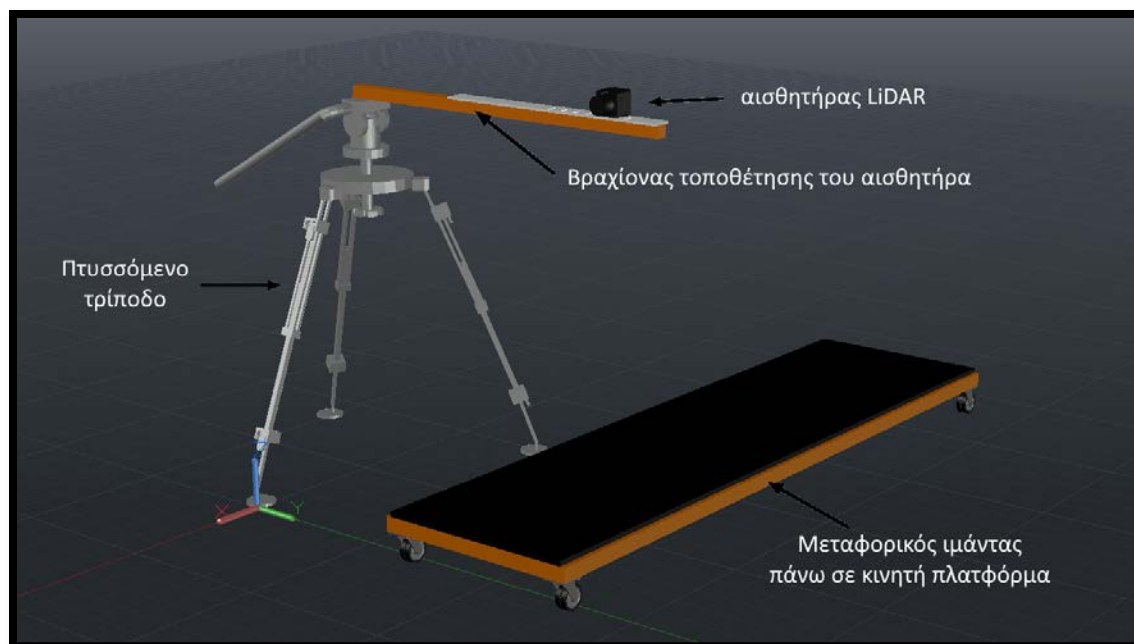
- Πηγή φωτός: Ημιαγωγική δίοδος laser ($\lambda=785\text{nm}$, υπέρυθρο φάσμα), Laser safety Class 1, Ισχύς laser $\leq 0.8\text{mW}$
- Δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων από 60 mm έως 4095 mm
- Ακρίβεια $\pm 30\text{mm}$ έως τα 1000 mm και $\pm 3\%$ της μέτρησης για αποστάσεις από 1000- 4095 mm.
- Γωνιακό εύρος σάρωσης 240°
- Βήμα μέτρησης 0.36° ($360^\circ/1024$)
- Ταχύτητα σάρωσης: 10 σαρώσεις/s
- Θόρυβος $\leq 25\text{ dB(A)}$ (αμελητέος)
- Μέγιστη επιτρεπόμενη φωτεινότητα περιβάλλοντος: Λαμπτήρες αλογόνου/υδραργύρου έως 10000 Lux, Λαμπτήρες φθορισμού έως 6 000 Lux.
- Υγρασία περιβάλλοντος: έως 85%
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $-10^\circ \geq +50^\circ$
- Αντοχή σε κραδασμούς που είναι στη περιοχή των συχνοτήτων 10-55Hz
- Αντοχή σε πρόσκρουση για επιτάχυνση $\leq 196\text{m/s}^2$
- Βάρος: $\sim 160\text{ g}$

**Τα ανωτέρω έχουν πιστοποιηθεί για στόχους διαστάσεων $70 \times 70 \text{mm}^2$ με ανακλαστική ικανότητα όμοια με του λευκού χαρτιού. Η ακρίβεια αναφέρεται σε σαρώσεις σε ανοικτό χώρο με μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού και ποικιλία αντικειμένων μέτρησης. Σε ελεγχόμενο περιβάλλον μετρήσεων το σφάλμα μέτρησης περιορίζεται.*

Το HOKUYO URG-04LX-UG01 είναι αισθητήρας τύπου phase – shift. Η phase shift είναι μια τεχνική μέτρησης απόστασης η οποία βασίζεται στη σύγκριση φάσεων. Συγκεκριμένα, η δέσμη λέιζερ εκπέμπεται με ημιτονοειδές οπτικό κύμα και προσπίπτει στο στόχο. Το ανακλώμενο φως επιστρέφει στην πηγή και η φάση του ανακλώμενου κύματος συγκρίνεται με αυτή του εκπεμπόμενου, υπολογίζοντας έτσι τον χρόνο επιστροφής της ακτίνας και κατ' επέκταση της απόστασης της πηγής απ' το στόχο (Aleksandrović and Damjanović, 2018).

Βάση στήριξης του σαρωτή LIDAR

Ως βάση στήριξης του σαρωτή χρησιμοποιήθηκε πτυσσόμενο τρίποδο φωτογραφικών μηχανών, στην κεφαλή του οποίου στερεώθηκε ένας ξύλινος οριζόντιος βραχίονας διαστάσεων $50\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$. Η διάταξη αυτή με τις ρυθμίσεις που διαθέτει εξασφαλίζει την εύκολη ρύθμιση ύψους και διεύθυνση σάρωσης, καθώς και τη δυνατότητα οριζοντίωσης του βραχίονα. Στην άνω επιφάνεια του ξύλινου βραχίονα στερεώθηκε οδηγός αλουμινίου ο οποίος επέτρεπε την εύκολη μετακίνηση του σαρωτή LIDAR και ταυτόχρονα εξασφάλιζε διεύθυνση σάρωσης παράλληλη με αυτή του μήκους του βραχίονα (Σχήμα 3.2). Στα άκρα του βραχίονα στερεώθηκαν δύο δείκτες Laser, σε απόσταση 40cm μεταξύ τους και σε κατακόρυφη θέση σκοπεύοντας στην τράπεζα μέτρησης. Οι φωτεινές ενδείξεις των δεικτών επί της τράπεζας μέτρησης, σε συνδυασμό με ένα κάρναβο, χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της διεύθυνσης σάρωσης του LIDAR (Σχήμα 3.3).



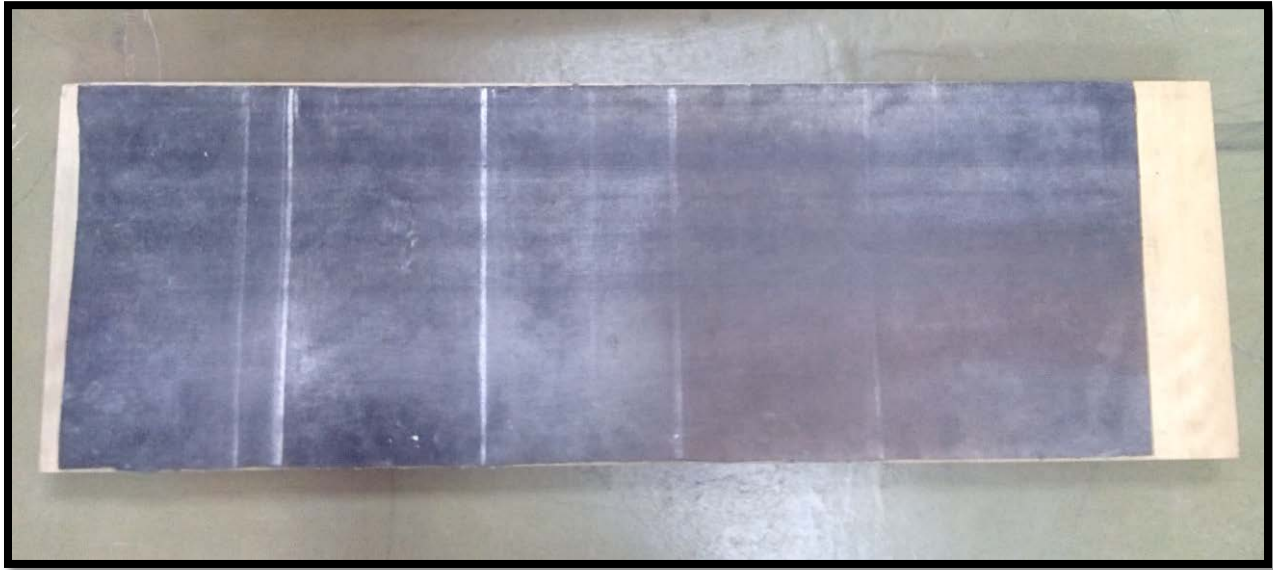
Σχήμα 3.2 Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης



Σχήμα 3.3: Φωτογραφίες πειραματικής διάταξης (πρόσοψη αριστερά και κάτοψη δεξιά).

Τράπεζα τοποθέτησης υλικού

Για την προσομοίωση σε εργαστηριακή κλίμακα των στατικών και δυναμικών μετρήσεων των υλικών επί των ταινιοδρόμων κατασκευάστηκε ξύλινη μετακινούμενη πλατφόρμα διαστάσεων 40cmx200cm. Η επιφάνειά της καλύφθηκε με ελαστικό ιμάντα ταινιοδρόμων πλάτους 40cm. Το σύστημα αυτό αποτέλεσε τον «εργαστηριακό ταινιοδρόμο» (Σχήματα 3.4 και 3.5). Τα υλικά που μετρήθηκαν διαστρώνονταν επί του ιμάντα με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες μεταφοράς των υλικών.



Σχήμα 3.4: Κάτοψη του εργαστηριακού ταινιοδρόμου

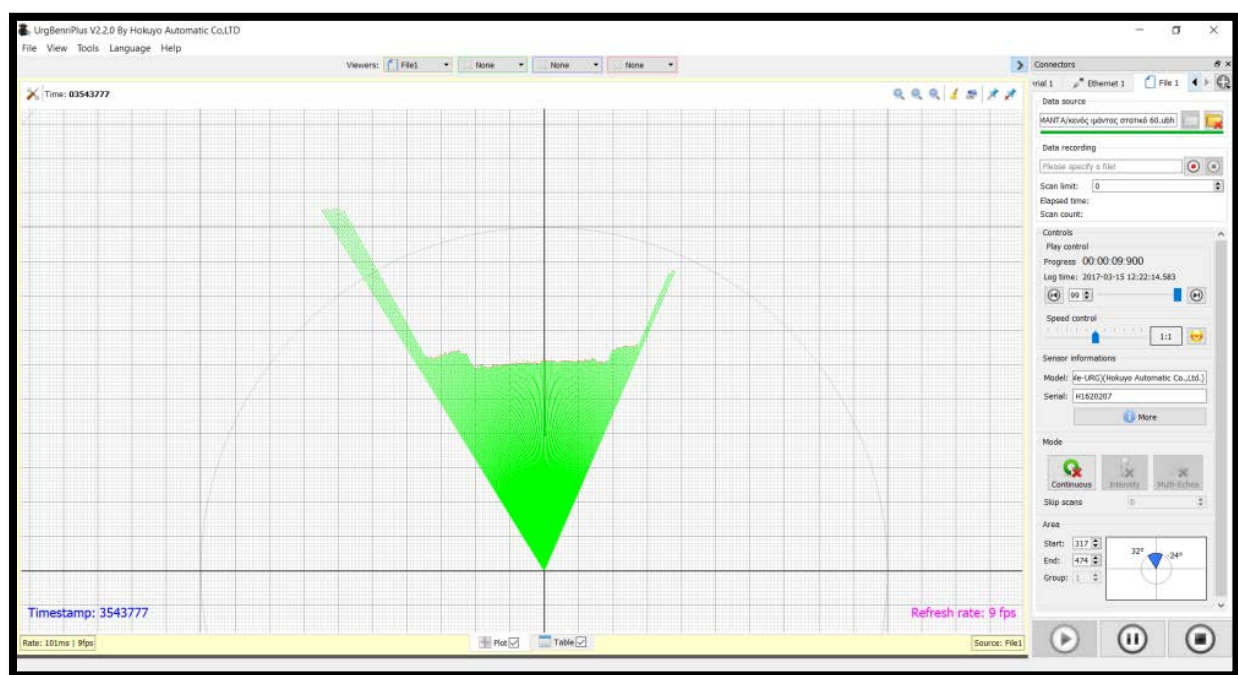


Σχήμα 3.5: Πλάγια όψη του εργαστηριακού ταινιοδρόμου

3.2 Σύνδεση LIDAR με Η/Υ και λογισμικό λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων

Ο σαρωτής LIDAR συνδέθηκε μέσω θύρας USB με Η/Υ και χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικοί τρόποι λήψης αποτελεσμάτων, το επίσημο λογισμικό της Hokuyo το URG - Benri και ειδικό λογισμικό που αναπτύχθηκε σε Matlab.

Το λογισμικό URG - Benri της Hokuyo (βλέπε Παράρτημα Α) επιτρέπει την παρακολούθηση των μετρήσεων του σαρωτή LIDAR σε πραγματικό χρόνο, τη ρύθμιση των παραμέτρων σάρωσης (εύρος σάρωσης, αριθμός επαναλήψεων) καθώς και την αποθήκευση των μετρούμενων αποστάσεων σε υπολογιστικά φύλλα (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση μετρήσεων και έλεγχος του LIDAR με το λογισμικό URG Benri της Hokuyo

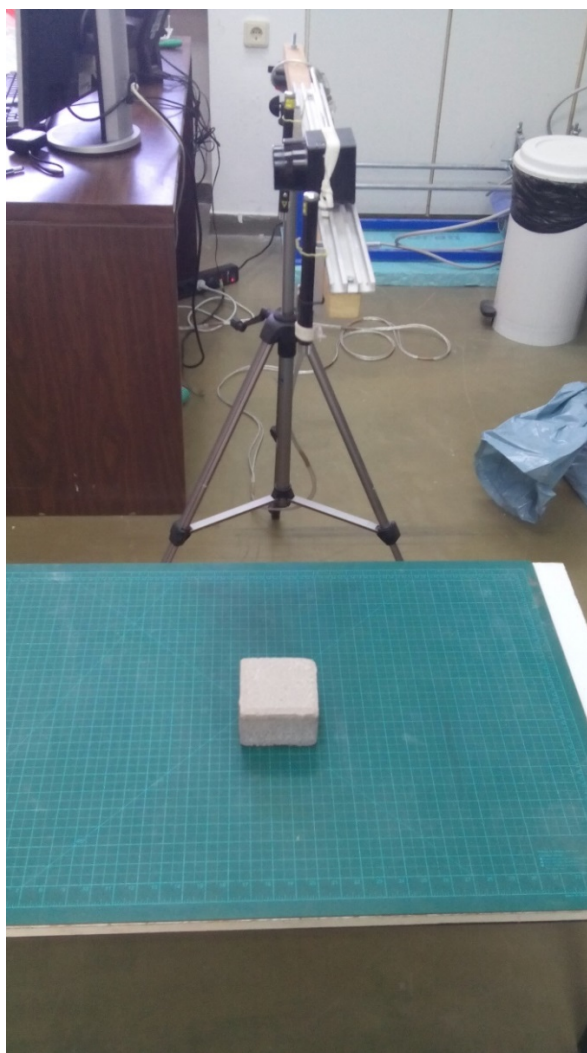
Το λογισμικό URG - Benri δεν επιτρέπει όμως την περαιτέρω επεξεργασία των αποστάσεων σε πραγματικό χρόνο για το υπολογισμό της διατομής του μετρούμενου υλικού ή άλλων παραμέτρων. Κατά συνέπεια ο υπολογισμός της διατομής και εν συνεχεία του όγκου του υλικού απαιτείται να γίνει σε δεύτερο χρόνο από τον χρήστη από τα υπολογιστικά φύλλα αποθήκευσης των μετρήσεων. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα και ακατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Για τους λόγους αυτούς αναπτύχθηκε ειδικός κώδικας σε Matlab που δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Για την διασύνδεση του σαρωτή LIDAR με τον Η/Υ χρησιμοποιήθηκε κώδικας διεπικοινωνίας (driver) από τον ιστότοπο της εταιρείας MathWorks. Το λογισμικό αυτό επιτρέπει:

- Την ρύθμιση παραμέτρων της εκάστοτε σάρωσης.
- Την αποθήκευση των μετρούμενων αποστάσεων σε πίνακα.
- Τον απευθείας υπολογισμό όγκου του υλικού.
- Την διενέργεια μετρήσεων τόσο σε στατικό όσο και σε κινούμενο ιμάντα.

3.3 Διαδικασία μετρήσεων

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν περιελάμβαναν στατικές (ακίνητος ταινιόδρομος) και δυναμικές (κινούμενος ταινιόδρομος) μετρήσεις. Πιο αναλυτικά πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

- Στατικές μετρήσεις με τοποθέτηση σωμάτων γνωστών διαστάσεων (κυβόλιθος εμπορίου) στην τράπεζα μέτρησης για τον έλεγχο της ακρίβειας και καλής λειτουργίας του σαρωτή LIDAR (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.7: Διάταξη ελέγχου της ακρίβειας με μέτρηση με κυβόλιθου

- Στατικές και δυναμικές μετρήσεις σε κενό ιμάντα για τον προσδιορισμό της διατομής του κενού ιμάντα.

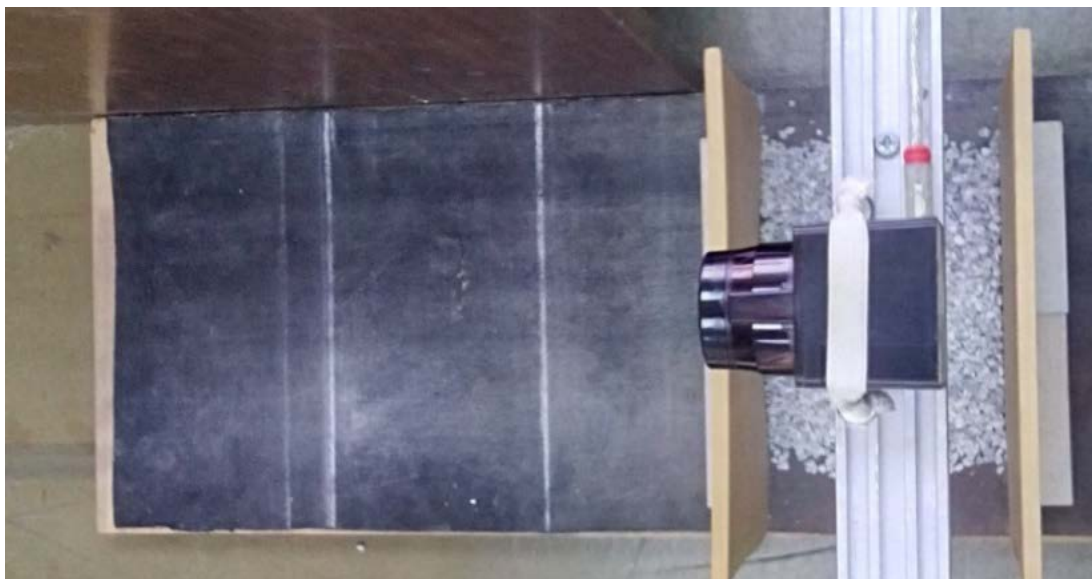
- Στατικές μετρήσεις (ακίνητοποιημένος ταινιόδρομος) για υπολογισμό της διατομής του υλικού με τον σαρωτή LIDAR σε ισαπέχουσες θέσεις πάνω στον ιμάντα και στη συνέχεια υπολογισμό του όγκου του. Ο όγκος του υλικού μετρήθηκε στη συνέχεια με ογκομετρικό δοχείο και έγινε ο υπολογισμός του σφάλματος του σαρωτή LIDAR.

- Δυναμικές μετρήσεις (κινούμενος ταινιόδρομος) για προσδιορισμό της διατομής μεταφερόμενου υλικού και στη συνέχεια του όγκου του. Το σφάλμα της μέτρησης υπολογίστηκε όπως και στη περίπτωση των στατικών μετρήσεων.

Οι στατικές και δυναμικές μετρήσεις περιελάμβαναν τον υπολογισμό του όγκου διαφόρων θραυσμένων υλικών που είχαν τοποθετηθεί επί μεταφορικού ιμάντα (Σχήμα 3.7). Μετρήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή διαφόρων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα, λιγνίτης και τέφρα λιγνίτη. Οι μετρήσεις αυτές επαναλήφθηκαν μεταβάλλοντας μια σειρά από παραμέτρους όπως:

- ύψος LIDAR από ταινιόδρομο, γωνιακό εύρος και ταχύτητα σάρωσης
- κοκκομετρία και το είδος του υλικού
- τύπο ιμάντα μεταφοράς (επίπεδος ή σκαφιδωτός)

προκειμένου να υπολογιστεί η επίδρασή τους στην ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή LIDAR.



Σχήμα 3.7: Τοποθέτηση προκαθορισμένης ποσότητας θραυσμένου υλικού επί του ταινιοδρόμου και διάταξη μέτρησης (κάτοψη).

4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων – αξιολόγηση

4.1 Μορφή και οργάνωση μετρήσεων

Από κάθε μέτρηση διατομής υλικών με τον σαρωτή LIDAR προέκυψαν μια σειρά δεδομένων που οργανώθηκαν σε μορφή πίνακα. Τέτοιος τυπικός πίνακας μετρήσεων είναι ο Πίνακας 4.1. Σε κάθε περιστροφή της δέσμης laser (ονομάζεται σάρωση και συμβολίζεται στον Πίνακα 4.1 με Σ) καταγράφονται μια σειρά από διαδοχικές τιμές που αντιστοιχούν στις θέσεις μέτρησης της απόστασης (βήματα). Οι θέσεις αυτές έχουν καλύπτουν συγκεκριμένο γωνιακό εύρος και έχουν προκαθοριστεί έτσι ώστε να καλύπτουν την περιοχή εξάπλωσης του υλικού επί του ιμάντα. Ο Πίνακας 4.1 για παράδειγμα δείχνει τις μετρήσεις από 10 σαρώσεις (Σ1 έως Σ10) και σε κάθε σάρωση έχουν καταγραφεί αποστάσεις από 8 διαδοχικές θέσεις (βήματα 317-378) που αντιστοιχούν σε γωνίες σάρωσης (πρόπτωσης της ακτίνας laser) από 88° έως 90.5°. Ο χρόνος μιας πλήρους σάρωσης είναι 100ms.

Πίνακας 4.1. Τυπικός πίνακας μετρήσεων διατομής υλικού με σαρωτή LIDAR.

Α. Βήματος	Απόσταση σαρωτή LIDAR - υλικού (mm)										MT	TA	Σχ. Σφ.
	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8	Σ9	Σ10			
371	369	376	366	373	365	371	377	366	380	366	370.9	5.18	1.37
372	359	358	361	360	365	370	364	361	370	364	363.2	4.01	1.10
373	358	357	359	359	358	360	364	360	364	363	360.2	2.44	0.67
374	357	355	359	359	358	360	364	358	363	363	359.6	2.76	0.77
375	354	355	359	359	361	359	364	358	360	361	359.0	2.76	0.77
376	354	357	360	359	361	359	364	358	360	364	359.6	2.87	0.80
377	354	362	361	362	361	359	365	358	360	365	360.7	3.1	0.86
378	354	364	361	362	361	359	366	360	360	366	361.3	3.37	0.93

Μετά την ολοκλήρωση των σαρώσεων υπολογίστηκε για κάθε βήμα η μέση τιμή (MT) της απόστασης y_i , η τυπική απόκλιση (TA) η οποία θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύει και το τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error ή RMSE) και το σχετικό σφάλμα (Σχ. Σφ.). Για η σαρώσεις οι σχέσεις υπολογισμού της MT, TA και Σχ. Σφ. σε κάθε βήμα j είναι:

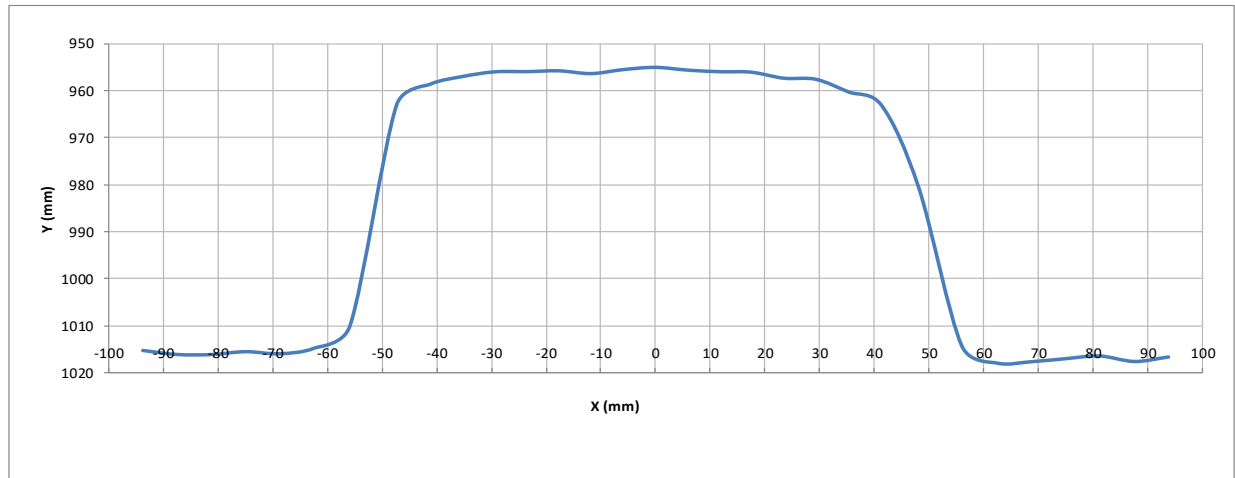
$$MT_{\text{βήμα } j} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (4.1)$$

$$TA_{\beta\eta\mu\alpha j} = RMSE_{\beta\eta\mu\alpha j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MT_{\beta\eta\mu\alpha j} - y_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$

$$\Sigma\chi.\Sigma\varphi.\beta\eta\mu\alpha j = \frac{TA_{\beta\eta\mu\alpha j}}{MT_{\alpha.\beta\eta\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

4.2 Μετρήσεις για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του σαρωτή LIDAR και τον καθορισμό της βέλτιστης απόστασής του από τον στόχο με χρήση πρότυπου κυβόλιθου

Οι μετρήσεις για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του LIDAR πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός πρότυπου κυβόλιθου. Ο κυβόλιθος διαστάσεων 100x100x60 mm³ τοποθετήθηκε σε απόσταση 1000 mm από τον αισθητήρα LIDAR και μετρήθηκε τόσο η απόσταση της άνω επιφάνειας κυβόλιθου από το σημείο στο οποίο είχε τοποθετηθεί ο αισθητήρας LIDAR, όσο και το πάχος του με βάση τη διατομή που προέκυψε από την σάρωσή του (Σχήμα 4.1).

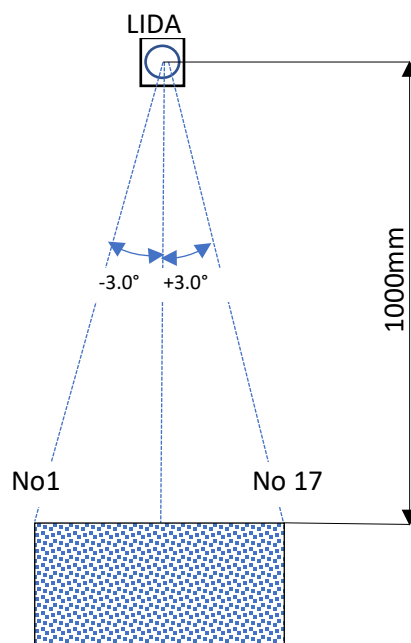


Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της διατομής του κυβόλιθου, όπως προέκυψε από τη σάρωση με τον αισθητήρα LIDAR, σε σύστημα ορθογωνίων καρτεσιανών συντεταγμένων.

Το τυχαίο σφάλμα του LIDAR υπολογίστηκε ως το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 50 επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (50 διαδοχικές σαρώσεις). Το RMSE της απόστασης του κυβόλιθου από τον αισθητήρα LIDAR υπολογίστηκε για κάθε μια από τις γωνίες πρόπτωσης των ακτίνων που

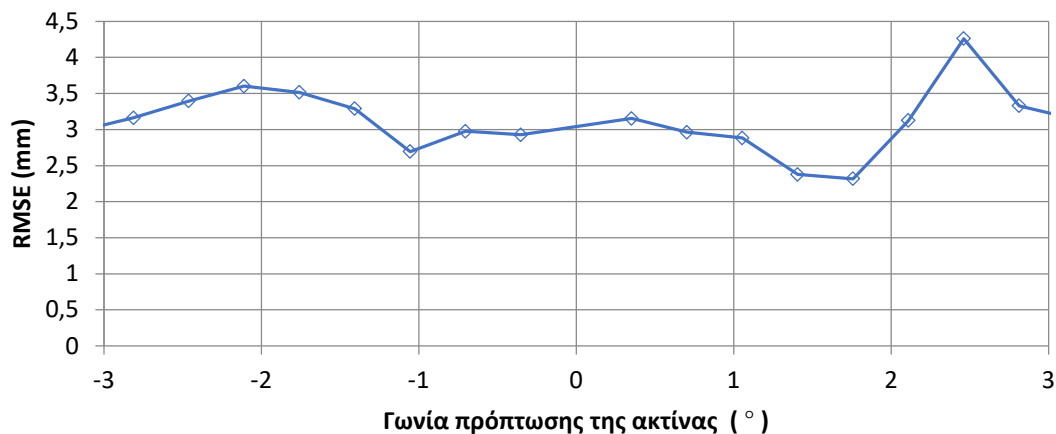
σάρωσαν την επιφάνεια του κυβόλιθου, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει συστηματική μεταβολή του σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης λέιζερ του LIDAR.

Για τη σάρωση της άνω επιφάνειας του κυβόλιθου διαστάσεων $100 \times 100 \text{ mm}^2$ απαιτήθηκαν 17 σημεία μέτρησης, που αντιστοιχούν σε γωνίες πρόσπτωσης των ακτίνων λέιζερ του LIDAR από -3.0° έως $+3.0^\circ$ μετρούμενες ως προς την κατακόρυφο (Σχήμα 4.2).



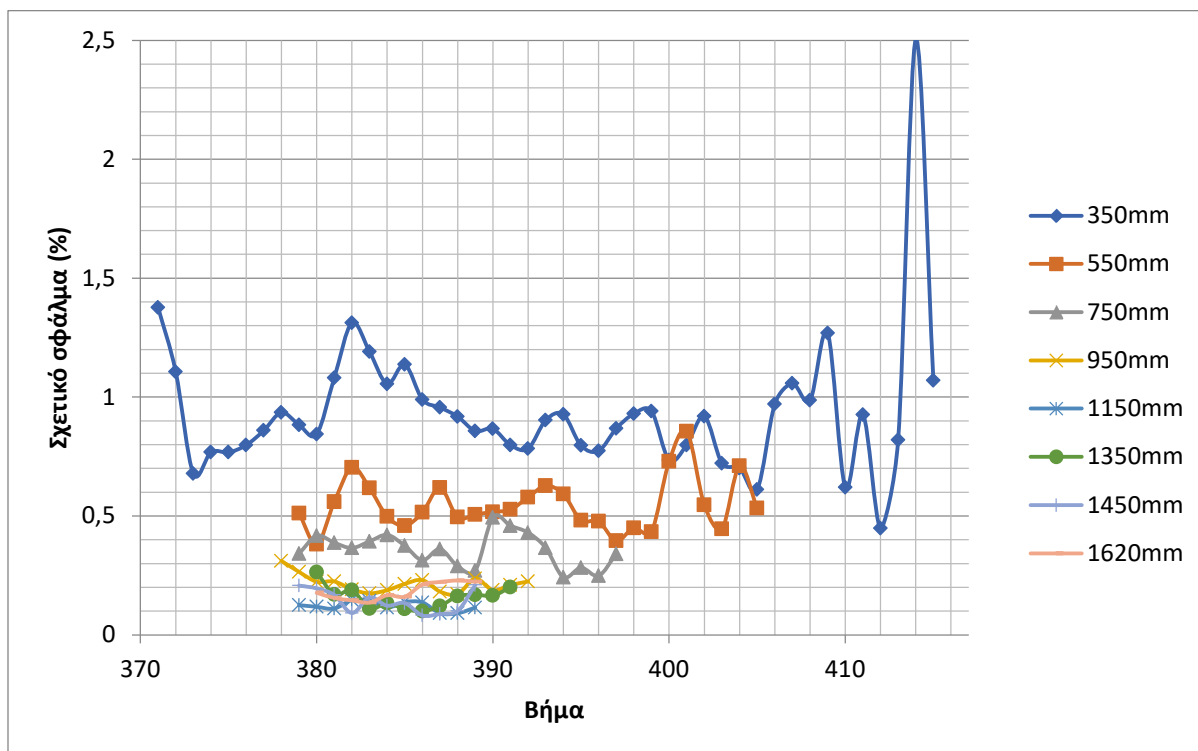
Σχήμα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα της σάρωσης της άνω επιφάνειας του κυβόλιθου με τον αισθητήρα LIDAR (χωρίς κλίμακα).

Το μέσο RMSE για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης (και για τα βήματα No1 έως No40) υπολογίστηκε σε 3.05 mm που αντιστοιχεί σε σχετικό σφάλμα 0.3% αφού η απόσταση κυβόλιθου - LIDAR είναι 1000 mm. Τόσο το απόλυτο όσο και το σχετικό RMSE που υπολογίστηκαν είναι σημαντικά μικρότερα εκείνων που εγγυάται ο κατασκευαστής σφάλμα του αισθητήρα LIDAR. Η μεταβολή του σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 δεν έδειξε κάποια συστηματική μεταβολή για το εύρος των γωνιών που εξετάστηκαν.

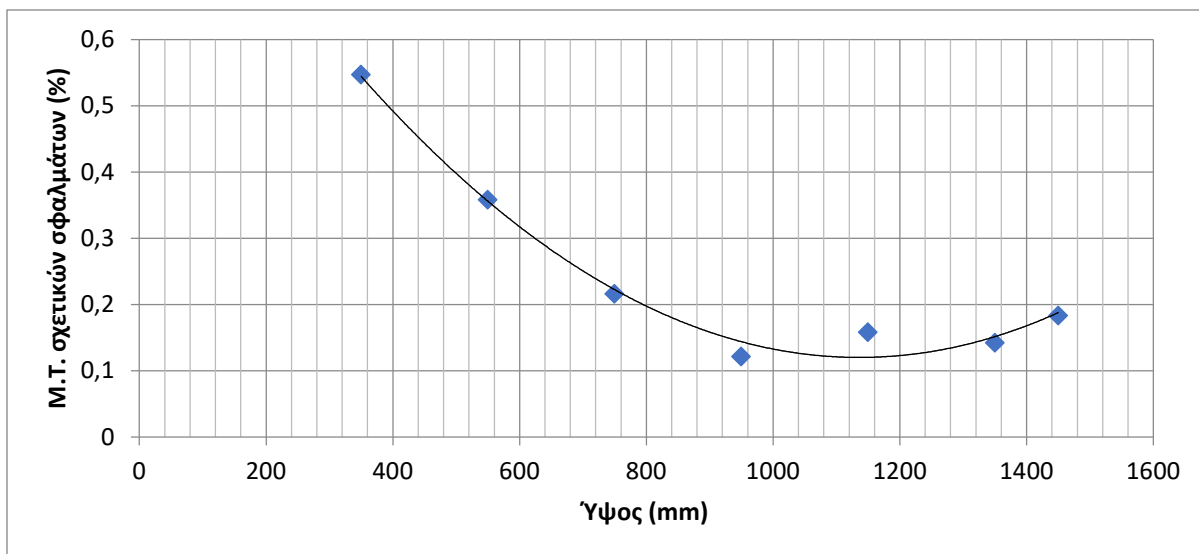


Σχήμα 4.3: Μεταβολή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας λέιζερ του LIDAR.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η συσχέτιση του σφάλματος (RMSE και σχετικού) με την απόσταση του σαρωτή LIDAR από τον κυβόλιθο. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε σε επτά διαφορετικά ύψη: H1 = 350 mm, H2 = 550 mm, H3 = 750 mm, H4 = 950 mm, H5 = 1150 mm, H5 = 1350 mm, H6 = 1450 mm, H7 = 1620 mm. Σε κάθε ύψος πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις και υπολογίστηκε το RMSE και το σχετικό σφάλμα για κάθε βήμα χωριστά και το συνολικό (Σχήματα 4.4 και 4.5).



Σχήμα 4.4: Μεταβολή του σχετικού σφάλματος σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας λέιζερ του LIDAR για οκτώ διαφορετικά ύψη τοποθέτησης του LIDAR από την τράπεζα μέτρησης.



Σχήμα 4.5: Μεταβολή του μέσου σχετικού σφάλματος σε συνάρτηση με το ύψος

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι, το βέλτιστο ύψος τοποθέτησης του σαρωτή LIDAR πάνω από το αντικείμενο σάρωσης, που εξασφαλίζει το μικρότερο σφάλμα, είναι της τάξεως του 1.0-1.5m.

Στη συνέχεια ο σαρωτής LIDAR τοποθετήθηκε στα 1050 mm πάνω από τον κυβόλιθο και μετρήθηκε η διατομή του κυβόλιθου με βάση τις αποστάσεις που καταγράφηκαν (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις της σάρωσης του κυβόλιθου από το LIDAR.

ΒΗΜΑ	ΜΤ ΚΕΝΟ	ΤΑ ΚΕΝΟ	Σχ. Σφ.	ΜΤ ΥΛΙΚΟ	ΤΑ ΥΛΙΚΟ	Σχ. Σφ.
375	1116.53	3.01	0.27	1110.3	2.45	0.22
376	1115.91	2.75	0.25	1083.7	2.49	0.23
377	1116.89	2.73	0.24	1064	2.79	0.26
378	1116.87	2.83	0.25	1059.8	2.18	0.21
379	1115.92	3.05	0.27	1057.2	3.09	0.29
380	1115.6	3.09	0.27	1055.4	2.76	0.26
381	1115.96	3.01	0.27	1054.3	2.61	0.25
382	1115.31	3.09	0.28	1052.7	2.65	0.25
383	1114.83	3.02	0.27	1052.3	2.41	0.23
384	1115.47	3.01	0.27	1050.2	2.18	0.21
385	1114.45	2.99	0.27	1049.6	1.96	0.19
386	1113.78	2.83	0.25	1049.6	1.96	0.19
387	1113.62	2.86	0.26	1050.2	1.94	0.18
388	1113.14	2.92	0.26	1051.9	1.7	0.16
389	1113.22	2.68	0.24	1054.3	2.28	0.22
390	1114.44	2.76	0.25	1057	2.65	0.25
391	1114.29	2.66	0.24	1083.1	3.7	0.34
392	1114.37	2.60	0.23	1107.1	2.43	0.22

Ο υπολογισμός εμβαδού της διατομής του κυβολίθου με βάση την εξίσωση 2.7 υπολογίστηκε σε $A = 61.88\text{cm}^2$ ενώ η πραγματική επιφάνεια της διατομής με βάση τις γεωμετρικές του διαστάσεις είναι $A_{\text{real}} = 63.44\text{cm}^2$. Το σχετικό σφάλμα δA της μέτρησης της διατομής είναι:

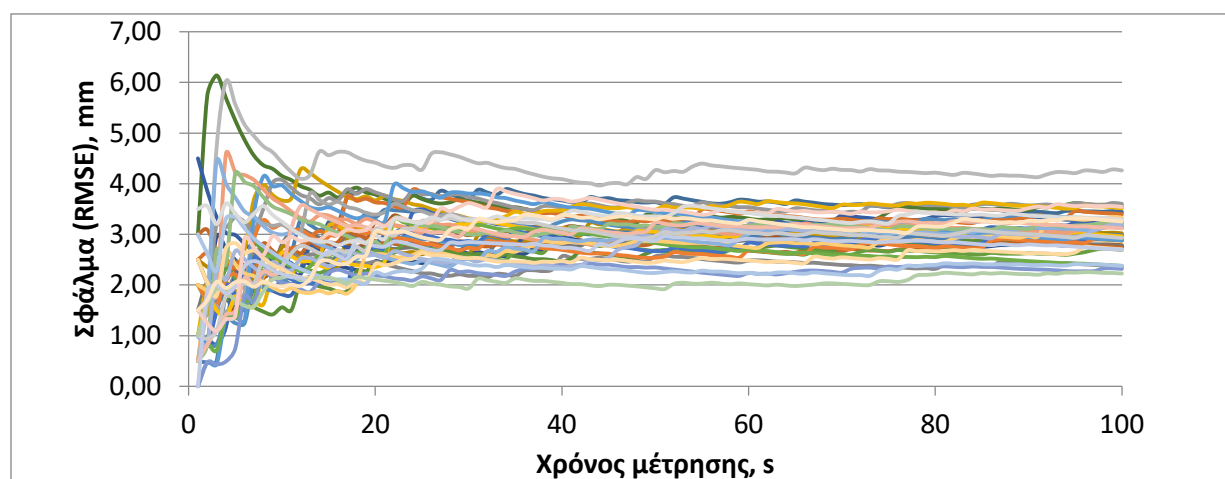
$$\delta A (\%) = \frac{A - A_{\text{real}}}{A_{\text{real}}} \cdot 100 = \frac{61.88 - 63.44}{63.44} \cdot 100 = -2.46\% \quad (4.5)$$

Η απόλυτη τιμή του σφάλματος είναι αισθητά μικρότερη του 5% που έχει θεωρηθεί ως το αποδεκτό όριο.

4.3 Ακρίβεια μετρήσεων σε σχέση με τον αριθμό των σαρώσεων

Σκοπός του ελέγχου αυτού είναι η διαπίστωση της ακρίβειας με την οποία μετρείται η απόσταση του θραυσμένου υλικού που τοποθετείται πάνω στον ιμάντα ως συνάρτηση του αριθμού των σαρώσεων που γίνονται σε κάθε θέση.

Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκε επί του ιμάντα ποσότητα θραυσμένου υλικού (ασβεστολιθική ψηφίδα) και πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από σαρώσεις στην ίδια θέση του υλικού. Κάθε σάρωση περιελάμβανε 40 μετρήσεις (βήματα) έτσι ώστε να καλύπτεται το εύρος εξάπλωσης του υλικού επί της ταινίας. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 1000 σαρώσεις και απαιτήθηκε χρόνος 100s (10 σαρώσεις/s). Υπολογίστηκε στη συνέχεια το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ως συνάρτηση του χρόνου για κάθε βήμα σάρωσης. Τα αποτελέσματα δίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.6. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.6 το σφάλμα σταθεροποιείται μετά από 10 τουλάχιστον σαρώσεις. Η μέση τιμή του σφάλματος είναι τα 3mm, ενώ το εύρος διακύμανσής του, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας (βήμα), κυμαίνεται από 2 έως 4mm.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή του σφάλματος (RMSE) μέτρησης της απόστασης σε σχέση με τον χρόνο για κάθε γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας (βήμα). Τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

4.4 Επίδραση κοκκομετρίας στην ακρίβεια μέτρησης

Οι μετρήσεις για τη διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρίας του θραυσμένου υλικού που μεταφέρεται με τον ταινιοδρόμο στην ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή LIDAR, πραγματοποιήθηκαν με τη χρησιμοποίηση θραυσμένου ασβεστολιθικού υλικού σε 3 κοκκομετρικές διαβαθμίσεις:

- 0-4 (mm)
- 4-8 (mm)
- 8-16 (mm)

Πραγματοποιήθηκαν τόσο στατικές όσο και δυναμικές μετρήσεις, ενώ το υλικό διαστρώθηκε στον ιμάντα του ταινιοδρόμου καταλαμβάνοντας μήκος 20cm (Σχήμα 4.7). Οι στατικές μετρήσεις περιλάμβαναν 10 σαρώσεις ανά θέση, με απόσταση διαδοχικών θέσεων 2cm. Οι δυναμικές μετρήσεις περιλάμβαναν συνεχείς σαρώσεις κατά το μήκος εξάπλωσης του υλικού, με αυτόματη έναρξη και λήξη σαρώσεων με χρήση ειδικών οδηγών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Οι μετρήσεις έγιναν μέσω της πλατφόρμας προγραμματισμού MATLAB και χρησιμοποιώντας τον κώδικα που αναπτύχθηκε ειδικά για τις μετρήσεις αυτές. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για όλα τα υπόλοιπα υλικά που εξετάζονται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 4.7: Εξάπλωση υλικού επί του ιμάντα σε κάτοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά). Τα κάθετα τοποθετημένα επί του ταινιοδρόμου ξύλινα φύλλα λειτουργούν ως οδηγοί που σηματοδοτούν την έναρξη και λήξη των μετρήσεων με τον σαρωτή LIDAR.

Σε κάθε μέτρηση καταγράφηκαν τα γεωμετρικά/τεχνικά στοιχεία του ταινιοδρόμου και του υλικού που τοποθετήθηκε σε αυτόν καθώς και οι παράμετροι του περιβάλλοντος του εργαστηρίου που θεωρήθηκαν ότι είναι πιθανόν να επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης του LIDAR (φωτισμός, συγκέντρωση σκόνης και θερμοκρασία). Έγιναν 4 επαναλήψεις (δοκιμές) για κάθε μετρούμενο υλικό, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού επί του ιμάντα, συγκρίθηκε με τον πραγματικό και υπολογίστηκε το συστηματικό και το τυχαίο σφάλμα.

Ως συστηματικό σφάλμα θεωρήθηκε το σχετικό μέσο σφάλμα που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Συστηματικό σφάλμα (\%)} = \frac{V_{\text{μετρούμενος}} - V_{\text{πραγματικός}}}{V_{\text{πραγματικός}}} \cdot 100$$

Όπου

$V_{\text{μετρούμενος}}$: Ο όγκος που υπολογίζεται από τις μετρήσεις του σαρωτή

$V_{\text{πραγματικός}}$: Ο πραγματικός όγκος του υλικού

Το τυχαίο σφάλμα υπολογίστηκε με διαίρεση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) του όγκου που μετρείται με τον σαρωτή LIDAR στις επαναλαμβανόμενες δοκιμές με τον πραγματικό όγκο του υλικού.

$$\text{Τυχαίο σφάλμα (\%)} = \frac{RMSE(V_{\text{μετρούμενοι}})}{V_{\text{πραγματικός}}} \cdot 100$$

Υπολογίστηκε η μεταφορική απόδοση του ταινιοδρόμου από την σχέση 2.19 και βάσει αυτής υπολογίστηκε ο θεωρητικός όγκος υλικού που μεταφέρεται στο μήκος εξάπλωσης του υλικού (20cm). Στον πίνακα 4.2 δίνονται τα στοιχεία για τον ταινιόδρομο με τον επίπεδο ιμάντα που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά και παράμετροι λειτουργίας του οριζόντιου ταινιοδρόμου με τον επίπεδο ιμάντα

Β πλάτος ιμάντα (m)	0.4
b πλάτος υλικού πάνω στον ιμάντα (m)	0.31
Γωνία πλευρικών κυλίστρων α (°)	0
Γωνία κλίσης ταινιοδρόμου δ (°)	0
Συντελεστής ξ	240
Συντελεστής μήκους λ	1
Πλάτος ελεύθερου ιμάντα εκατέρωθεν του υλικού (m)	0.045
Ταχύτητα κίνησης ιμάντα (m/s)	1
Θεωρητική μεταφορική απόδοση ταινιοδρόμου (m ³ /h)	23.1
Όγκος υλικού (cm ³) σε μήκος 20 cm με βάση τη θεωρητική μεταφορική απόδοση	1281

ι. Μέτρηση θραυσμένου ασβεστολιθικού υλικού με κοκκομετρία 0-4 (mm)

Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.8: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 0-4mm.

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm³):	1300
Φωτισμός (lux):	626
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m³):	40
Θερμοκρασία (°C)::	18.5

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.3 και 4.4.

Πίνακας 4.3: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 0-4mm.

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1444	11.11
2	1579	21.45
3	1498	15.22
4	1524	17.19
Τυχαίο σφάλμα (%) = 3.72		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 16.24		

Πίνακας 4.4: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 0-4mm.

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1523	18.8
2	1539	18.35
3	1552	19.37
4	1495	16.6
Τυχαίο σφάλμα (%) = 1.63		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 18.28		

Οι δυναμικές μετρήσεις έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη αποτύπωση της επιφάνειας του θραυσμένου υλικού από τον σαρωτή LIDAR, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού σαρώσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τις στατικές μετρήσεις.

Το τυχαίο σφάλμα είναι αποδεκτό (<5%). Τα συστηματικά σφάλματα, που οφείλονται στον εργαστηριακό εξοπλισμό μπορούν να μειωθούν σημαντικά με χρήση κατάλληλης βαθμονόμησης του σαρωτή LIDAR.

ii. Μέτρηση θραυσμένου ασβεστολιθικού υλικού με κοκκομετρία 4-8 (mm)

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.9: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 4-8mm

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm ³):	1280
Φωτισμός (lux):	481
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m ³):	29
Θερμοκρασία (°C):	21.5

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6.

Πίνακας 4.5: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 4-8mm.

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1225	-4.4
2	1321	3.1
3	1127	-12.0
4	1236	-3.5
Τυχαίο σφάλμα (%) = 5.37		
Συστηματικό σφάλμα (%) = -4.2		

Πίνακας 4.6: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 4-8mm.

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1245	-2.8
2	1347	5.1
3	1173	-8.5
4	1202	-6.2
Τυχαίο σφάλμα (RMSE) (%) = 5.15		
Συστηματικό σφάλμα (%) = -3.1		

Τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για το κοκκομετρικό κλάσμα 4-8mm είναι σημαντικά μικρότερα εκείνων του κλάσματος 0-4mm. Τόσο οι στατικές όσο και οι δυναμικές μετρήσεις έδωσαν σε 4 δοκιμές σφάλματα <5%. Το τυχαίο σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι στο όριο του αποδεκτού σφάλματος (~5%).

iii. Μέτρηση θραυσμένου ασβεστολιθικού υλικού με κοκκομετρία 8-16mm

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.10: Θραυσμένος ασβεστόλιθος με κοκκομετρία 8-16mm

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm ³):	1280
Φωτισμός (lux):	526
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m ³):	28
Θερμοκρασία (°C):	20

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.7 και 4.8.

Πίνακας 4.7: Στατικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 8-16mm

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1225	-4.4
2	1763	37.6
3	1435	12.0
4	1412	10.2
Τυχαίο σφάλμα (%) = 15.12		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 13.85		

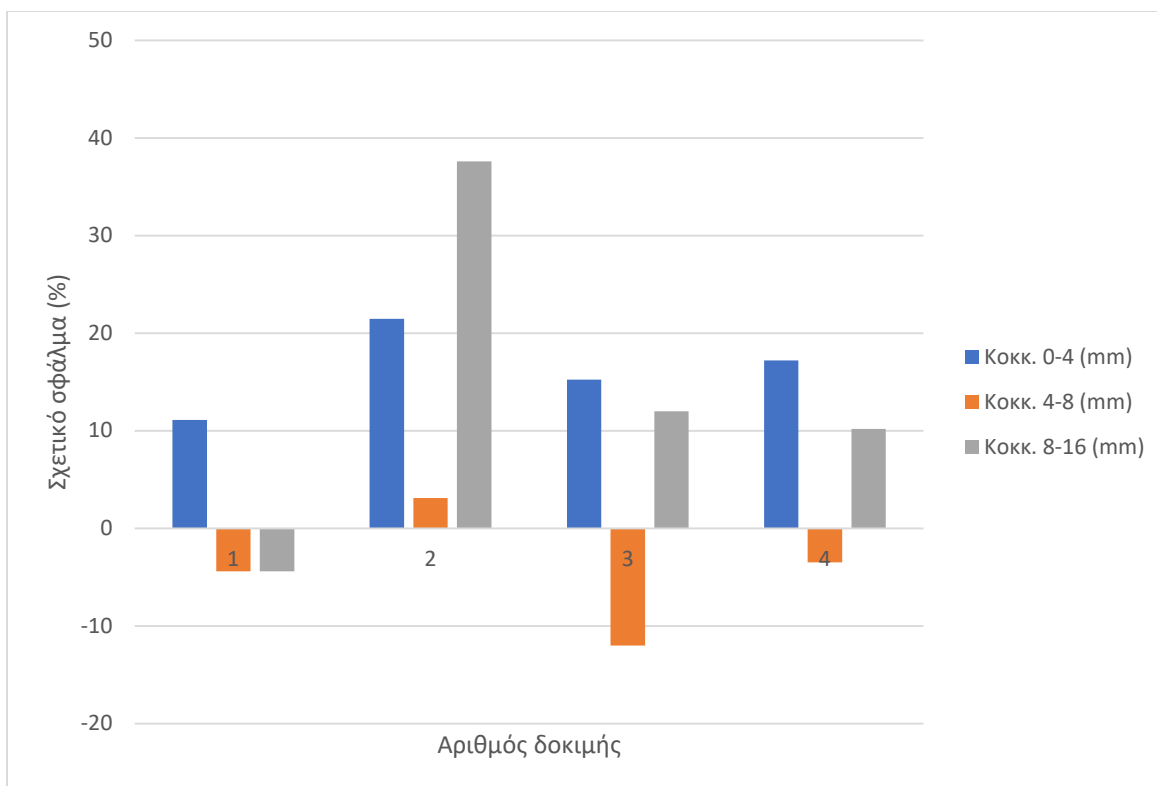
Πίνακας 4.8: Δυναμικές μετρήσεις για θραυσμένο ασβεστόλιθο με κοκκομετρία 8-16mm.

Αριθμός δοκιμής	Υπολογιζόμενος όγκος V (cm ³)	Σφάλμα %
1	1369	6.9
2	1366	6.6
3	1307	2.0
4	1302	1.6
Τυχαίο σφάλμα (%) = 2.47		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 3.4		

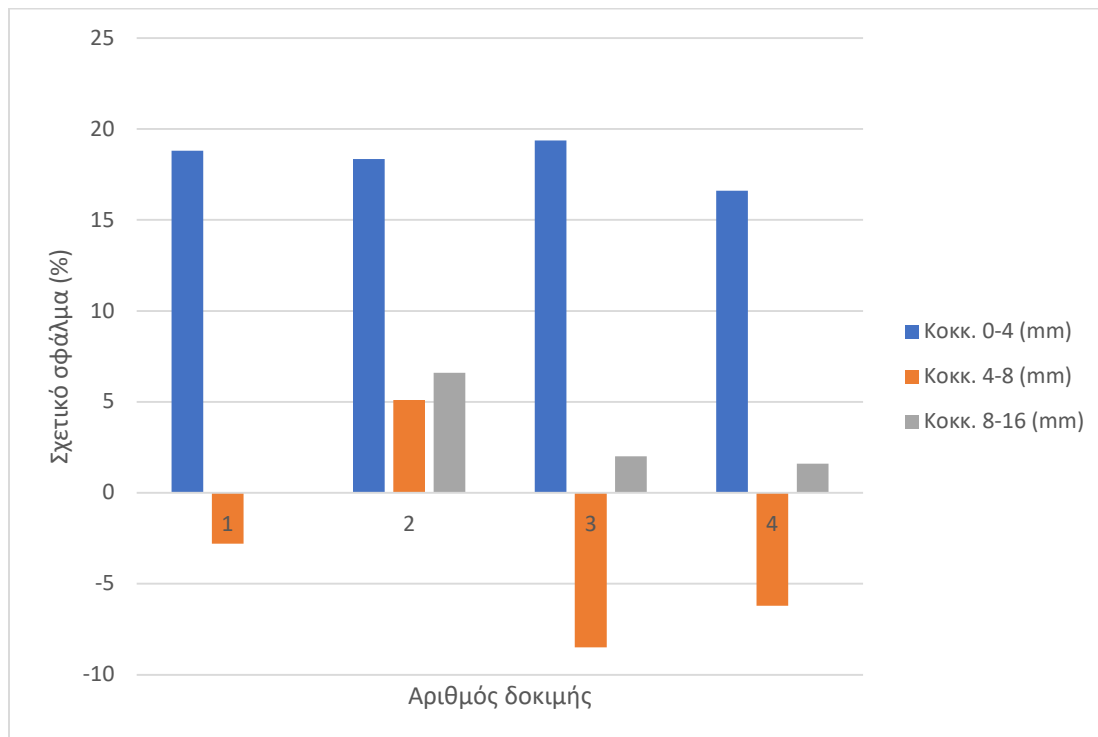
Τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για το κοκκομετρικό κλάσμα 8-16mm είναι σημαντικά μικρότερα εκείνων του κλάσματος 0-4mm και παραπλήσια του 4-8mm, κυρίως όσον αφορά τις δυναμικές μετρήσεις που έδωσαν αρκετά ικανοποιητικές τιμές. Οι δυναμικές μετρήσεις στο κλάσμα 8-16mm έδωσαν σημαντικά καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις στατικές.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – αξιολόγηση

Τα αποτελέσματα των στατικών μετρήσεων δίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.11 και των δυναμικών μετρήσεων στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.11: Στατικές μετρήσεις σε θραυσμένο ασβεστόλιθο διαφόρων κοκκομετριών.



Σχήμα 4.12: Δυναμικές μετρήσεις σε θραυσμένο ασβεστόλιθο διαφόρων κοκκομετριών.

Είναι φανερό ότι τα καλύτερα αποτελέσματα ελήφθησαν για το κοκκομετρικό κλάσμα 4-12mm τόσο για τις στατικές όσο και για τις δυναμικές μετρήσεις. Το σφάλμα μέτρησης σε αρκετές περιπτώσεις ήταν μικρότερο του 5%. Ο ασβεστόλιθος κλάσματος 0-4 mm παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια στη κοκκομετρία του, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει τους μηχανισμούς διάθλασης/ανάκλασης της ακτίνας λέιζερ.

4.5 Μετρήσεις σε υπάμενη τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.13: Τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm ³):	1470
Φωτισμός (lux):	700
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m ³):	35
Θερμοκρασία (°C):	21.8

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.9 και 4.10.

Πίνακας 4.9: Στατικές μετρήσεις σε τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	1561	6.22
2	1570	6.80
3	1553	5.65
4	1632	11.05
Τυχαιό σφάλμα (%) = 2.12		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 7.43		

Πίνακας 4.10: Δυναμικές μετρήσεις σε τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	1481	0.73
2	1496	1.80
3	1521	3.48
4	1559	6.05
Τυχαιό σφάλμα (%) = 2.01		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 3.02		

Τα αποτελέσματα των δυναμικών μετρήσεων είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Τόσο το τυχαίο όσο και το συστηματικό σφάλμα είναι αποδεκτά (<5%). Η μικρή κοκκομετρία (κόκκοι < 150μm) καθώς και η ομοιομορφία του υλικού συμβάλουν στη επίτευξη της καλύτερης ακρίβειας.

4.6 Μετρήσεις σε λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα Εύβοιας

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.14: Λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα Εύβοιας

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm ³):	1280
Φωτισμός (lux):	605
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m ³):	37
Θερμοκρασία (°C):	23

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.11 και 4.12.

Πίνακας 4.11: Στατικές μετρήσεις σε λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα Εύβοιας

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	694	-45.82
2	626	-51.13
3	701	-45.16
4	653	-48.98
Τυχαίο σφάλμα (%) = 1.61		
Συστηματικό σφάλμα (%) = -47.77		

Πίνακας 4.12: Δυναμικές μετρήσεις σε σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα Εύβοιας

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	1208	-5.56
2	815	-36.30
3	1156	-9.70
4	824	-35.67
Τυχαίο σφάλμα (%) = 14.24		
Συστηματικό σφάλμα (%) = -21.81		

Τα μόνα αποδεκτά σφάλματα προήλθαν από τις δυναμικές μετρήσεις. Δεδομένου ότι η πλειονότητα των υπολογιζόμενων όγκων είχαν μεγάλη διαφορά από τον πραγματικό, θεωρούμε ότι οι καλές μετρήσεις ήταν τυχαίες.

Το υλικό δεν είχε ομοιόμορφη κοκκομετρία. Οι καλές μετρήσεις προήλθαν από σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε επιφάνεια του λατερίτη που ανακλούσε καλύτερα την ακτίνα.

4.7 Μετρήσεις σε λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται το είδος του υλικού που μετρήθηκε.



Σχήμα 4.15: Λιγνίτης Πτολεμαΐδας

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm³):	1280
Φωτισμός (lux):	605
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m³):	37
Θερμοκρασία (°C):	23

Ακολουθούν μόνο δυναμικές μετρήσεις του υλικού γιατί όπως θα γίνει αντιληπτό από τα αποτελέσματα δεν υπήρχε λόγος διεξαγωγής στατικών μετρήσεων (στην εργαστηριακή διαδικασία λήψης μετρήσεων οι δυναμικές σαρώσεις προηγούνταν των στατικών).

Υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.13.

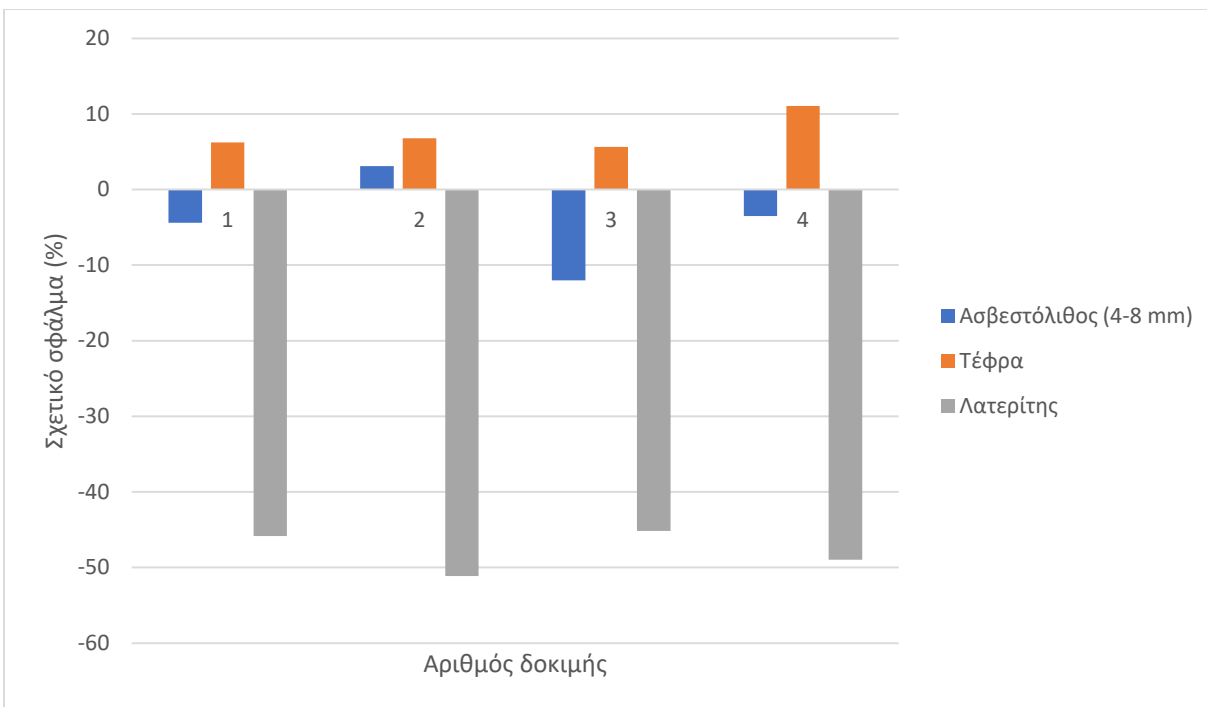
Πίνακας 4.13: Δυναμικές μετρήσεις σε λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	-727	-156.77
2	-669.9	-152.34
3	-2762	-315.78
4	-1547	-220.86
Τυχαίο σφάλμα (%) = 44.50		
Συστηματικό σφάλμα (%) = -211.44		

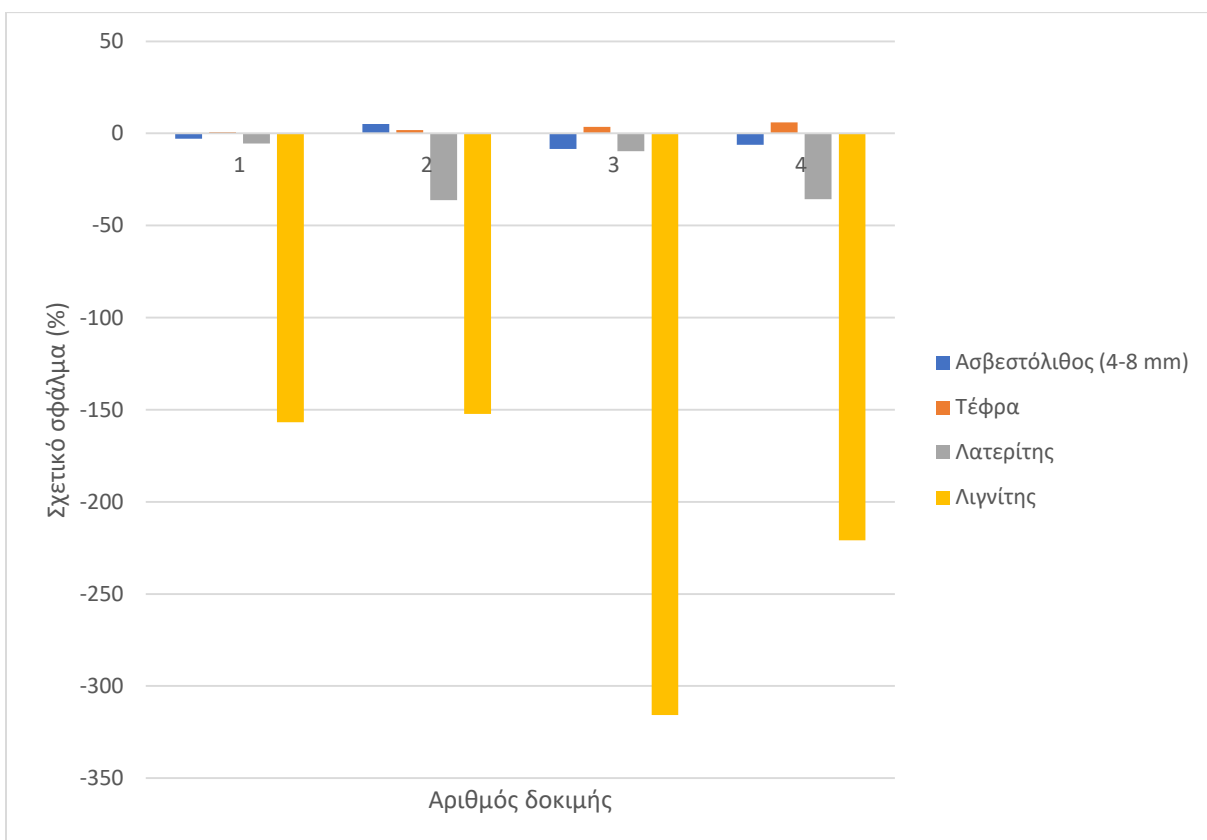
Σε απόλυτη τιμή τα σφάλματα είναι πολύ μεγαλύτερα του αποδεκτού (>5%). Οι μετρήσεις επιπλέον δεν εμφανίζουν κάποια σταθερότητα, με αποτέλεσμα να μην είναι εφαρμόσιμη η βαθμονόμηση.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – αξιολόγηση

Τα αποτελέσματα των στατικών μετρήσεων όλων των υλικών δίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.16 και των δυναμικών μετρήσεων στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.16: Στατικές μετρήσεις των υλικών



Σχήμα 4.17: Δυναμικές μετρήσεις των υλικών

Είναι φανερό ότι τα καλύτερα αποτελέσματα ελήφθησαν από δυναμικές μετρήσεις σε τέφρα λιγνίτη Πτολεμαΐδας.

4.8 Μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού κοκκομετρίας 4-8mm σε σκαφιδωτό ιμάντα

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού κοκκομετρίας 4-8mm σε ταινιόδρομο με σκαφιδωτό ιμάντα, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 4.15. Ο ιμάντας φαίνεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Ασβεστολιθικό υλικό κοκκομετρίας 4-8mm επί του σκαφιδωτού ιμάντα

Πίνακας 4.14: Χαρακτηριστικά και παράμετροι λειτουργίας του οριζόντιου ταινιοδρόμου με τον επίπεδο ιμάντα

B πλάτος ιμάντα (m)	0.4
b πλάτος υλικού πάνω στον ιμάντα (m)	0.31
Γωνία πλευρικών κυλίστρων α (°)	0
Γωνία κλίσης ταινιοδρόμου δ (°)	0
Συντελεστής ξ	545
Συντελεστής μήκους λ	1
Πλάτος ελεύθερου ιμάντα εκατέρωθεν του υλικού (m)	0.045
Ταχύτητα κίνησης ιμάντα (m/s)	1
Θεωρητική μεταφορική απόδοση ταινιοδρόμου (m ³ /h)	52.38

Το υλικό αρχικά ογκομετρήθηκε με χρήση ειδικού ογκομετρικού δοχείου και καταγράφηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Όγκος υλικού (cm³):	1900
Φωτισμός (lux):	640
Συγκέντρωση σκόνης στον αέρα (μg/m³):	27
Θερμοκρασία (°C):	23

Στη συνέχεια έγιναν οι στατικές και οι δυναμικές μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του υλικού με βάση τις μετρήσεις του LIDAR και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα. Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε 4 φορές. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 4.16 και 4.17.

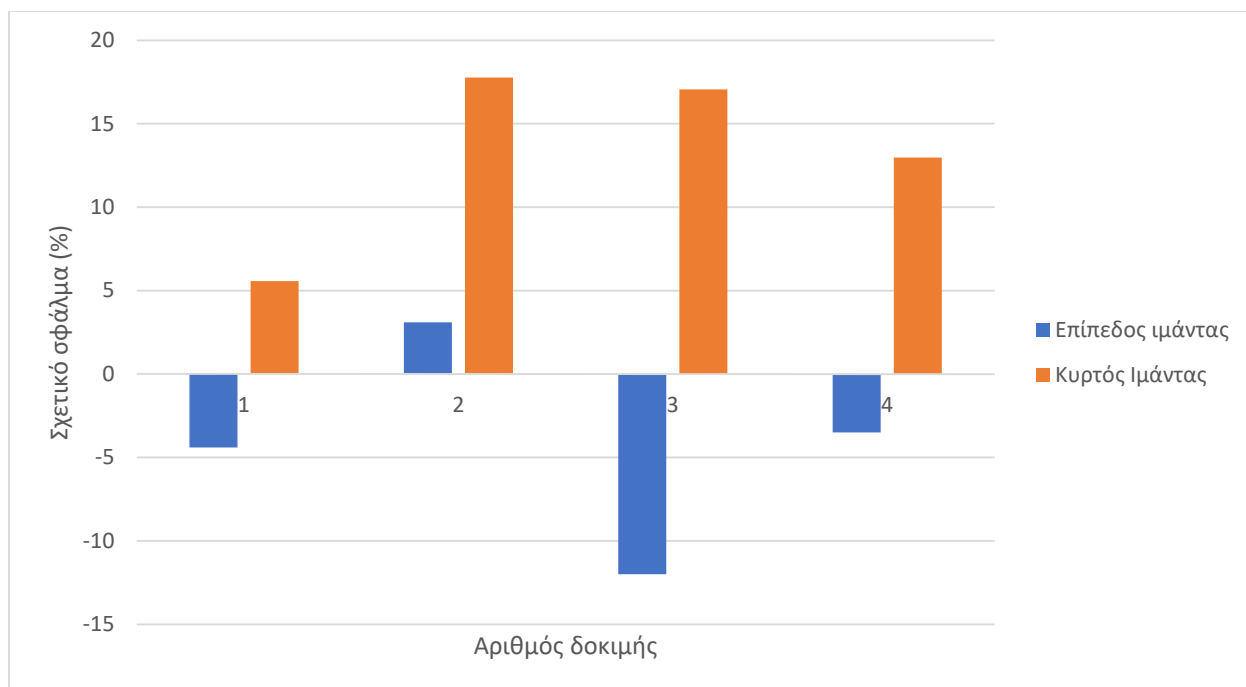
Πίνακας 4.15: Στατικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού επί σκαφιδωτού μάντα

Αριθμός δοκιμής	V (cm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	1794	5.58
2	1563	17.76
3	1576	17.05
4	1653	12.97
Τυχαίο σφάλμα (%) = 4.83		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 13.34		

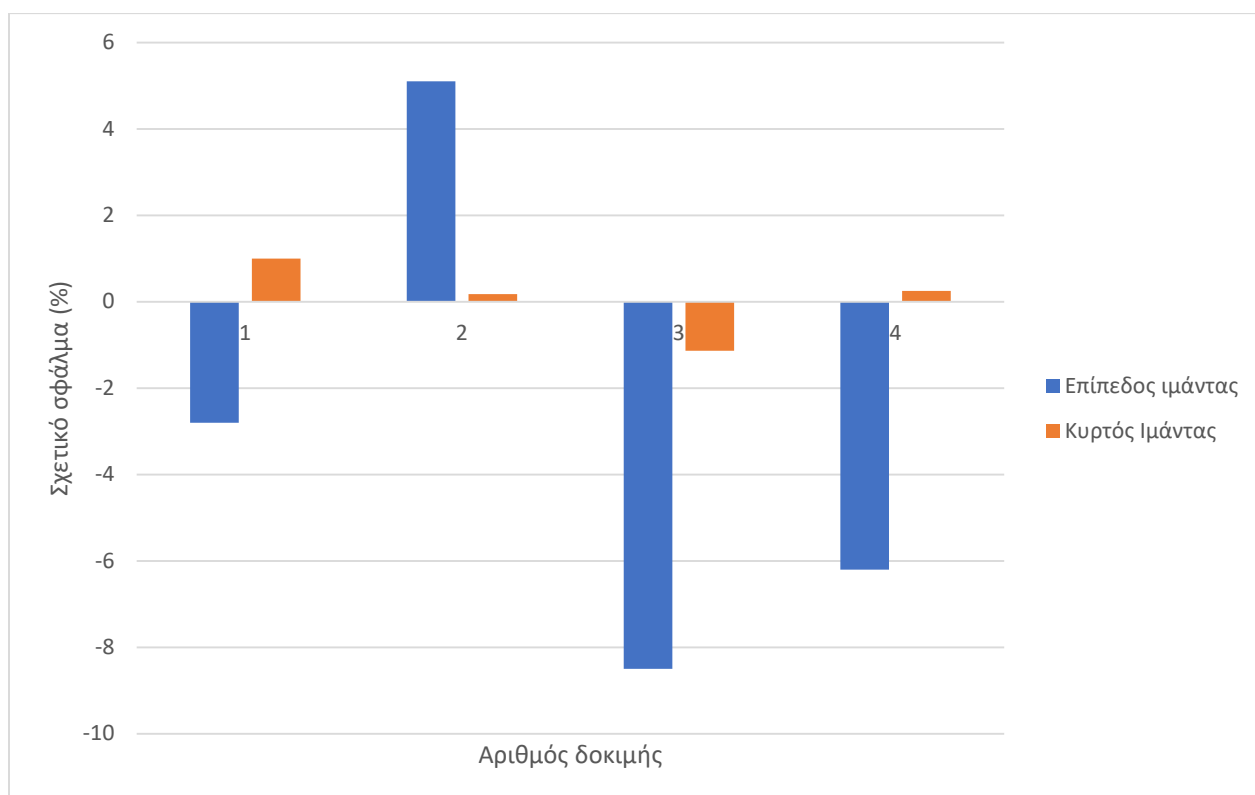
Πίνακας 4.16: Δυναμικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού επί σκαφιδωτού μάντα

Αριθμός δοκιμής	V (mm ³)	ΣΦΑΛΜΑ %
1	1919	1
2	1903	0.1737
3	1878	-1.1368
4	1905	0.2474
Τυχαίο σφάλμα (%) = 0.78		
Συστηματικό σφάλμα (%) = 0.07		

Οι δυναμικές μετρήσεις έδωσαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα και αρκετά καλύτερα απ' τα αντίστοιχα του ασβεστολιθικού υλικού επί επίπεδου μάντα, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 4.19 και 4.20. Η κυρτότητα του μάντα συμπεραίνεται ότι συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων του σαρωτή.



Σχήμα 4.19 Στατικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού κοκκομετρίας 4-8 (mm) επί επίπεδου και σκαφιδωτού ιμάντα



Σχήμα 4.20: Δυναμικές μετρήσεις ασβεστολιθικού υλικού κοκκομετρίας 4-8mm επί επίπεδου και σκαφιδωτού ιμάντα

5 Συμπεράσματα και προτάσεις

Η ακριβής παρακολούθηση της μεταφερόμενης ποσότητας των υλικών με ταινιοδρόμους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος ελέγχου της απόδοσής τους. Η δυνατότητα χρήσης σαρωτή-αποστασιομέτρου τύπου LIDAR (Light Detection And Ranging) για την μέτρηση όγκου μεταφερόμενου υλικού σε ταινιόδρομο αντί των συμβατικών μεθόδων (ταινιοζυγοί, ραδιομετρικές μέθοδοι, οπτικά συστήματα) εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος και η ακριβής απεικόνιση της διατομής του υλικού επί του ιμάντα.

Η ακρίβεια μέτρησης ενός τέτοιου συστήματος εκτιμήθηκε κατ' αρχήν θεωρητικά και υπολογίστηκε η σχέση που συνδέει το σφάλμα μέτρησης του ογκομετρούμενου υλικού με την ακρίβεια του σαρωτή LIDAR και το πάχος του υλικού επί του ιμάντα. Από την θεωρητική ανάλυση φάνηκε ότι είναι δυνατή η επίτευξη σφάλματος μέτρησης του ογκομετρούμενου υλικού μικρότερου του 5%, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή LIDAR είναι της τάξης των 3-5mm για αποστάσεις μέτρησης 1.0 – 2.0m.

Η εργαστηριακή διερεύνηση που ακολούθησε περιλάμβανε στατικές και δυναμικές μετρήσεις διαφόρων θραυσμένων υλικών (ασβεστολιθικά αδρανή διαφόρων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, λατεριτικό σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα, λιγνίτη και τέφρα λιγνίτη) που είχαν τοποθετηθεί επί εργαστηριακού ταινιοδρόμου. Περιλάμβανε επίσης διερεύνηση παραμέτρων μέτρησης όπως, το ύψος LIDAR από ταινιόδρομο, το γωνιακό εύρος και η ταχύτητα σάρωσης και ο τύπος του ιμάντα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι:

- Η επιταχυνόμενη ακρίβεια επηρεάζεται τόσο από το είδος του υλικού επί του ιμάντα όσο και από την κοκκομετρία του. Σε υλικά με χαμηλή ανακλαστική ικανότητα, όπως ο λιγνίτης, η ακρίβεια μέτρησης είναι χαμηλή. Οι μετρήσεις υλικών με κοκκομετρική ομοιογένεια δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα και ιδιαίτερα τα λεπτομερή υλικά, όπως η τέφρα του λιγνίτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα λεπτόκοκκα υλικά δημιουργούν πολύ πιο ομαλές επιφάνειες κατά την εξάπλωσή τους στον ιμάντα, γεγονός που διευκολύνει τη σάρωσή τους με το LIDAR.
- Οι δυναμικές μετρήσεις έδωσαν σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση του όγκου των υλικών σε σχέση με τις στατικές. Η υπεροχή των δυναμικών μετρήσεων έναντι των στατικών στη συγκεκριμένη διερεύνηση, αποδίδεται στη μικρή ταχύτητα κίνησης του εργαστηριακού ταινιοδρόμου, η οποία εξασφάλισε μεγάλο αριθμό σαρώσεων ανά τρέχον μέτρο ιμάντα.
- Όσον αφορά τις παραμέτρους μέτρησης του οργάνου, διαπιστώθηκε ότι επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια για απόσταση αισθητήρα-ιμάντα μεγαλύτερης του 1m, που αντιστοιχεί σε απόσταση περίπου διπλάσια του πλάτους του ιμάντα.
- Η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται ελαφρά για τις θέσεις όπου οι γωνίες πρόσπτωσης των ακτίνων λείζερ του σαρωτή LIDAR αποκλίνουν σημαντικά από τις 90° (μικρές σχετικά γωνίες πρόσπτωσης).
- Από τη συσχέτιση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με τον αριθμό των σαρώσεων φάνηκε ότι η υψηλή συχνότητα σάρωσης οδηγεί σε καλύτερη ακρίβεια.

- Η ακρίβεια των μετρήσεων βελτιώθηκε επίσης σημαντικά με τη χρησιμοποίηση σκαφιδωτού ιμάντα. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στις ευνοϊκότερες γωνίες πρόσπτωσης των ακτίνων λέιζερ που εξασφαλίζει η διαμόρφωση αυτή του ιμάντα.

Συνολικά ο σαρωτής LIDAR που χρησιμοποιήθηκε στη εργασία αυτή πέτυχε σφάλμα μέτρησης μικρότερο του 5% μόνο σε συγκεκριμένα υλικά (λιγνιτική τέφρα, θραυσμένος ασβεστόλιθος 4-8mm και 8-16mm). Επιπλέον στις δυναμικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε μικρή ταχύτητα κίνησης του ταινιοδρόμου για την επίτευξη ικανοποιητικού αριθμού σαρώσεων ανά τρέχον μέτρο υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ταχύτητες των ταινιοδρόμων στις βιομηχανικές εφαρμογές είναι πολύ μεγαλύτερες, απαιτείται η χρήση σαρωτών LIDAR με πολλαπλάσια συχνότητα σάρωσης από εκείνου που χρησιμοποιήθηκε.

Για τη βελτίωση της ακρίβειας προτείνεται η εκτέλεση δοκιμών με σαρωτή LIDAR με μεγαλύτερη συχνότητα σάρωσης, ή/και με διαφορετική πηγή ακτίνας laser (διαφορετικό μήκος κύματος). Το μήκος κύματος της πηγής που θα επιλεγεί θα πρέπει να εξασφαλίζει υψηλό ποσοστό ανάκλασης της προσπίπτουσας ακτίνας από το υλικό που μεταφέρει ο ταινιοδρόμος.

Η μεθοδολογία υπολογισμού της διατομής του υλικού επί του ταινιοδρόμου κατά τη διενέργεια των δυναμικών μετρήσεων (κώδικας Matlab) αποδείχθηκε ακριβής και εξαιρετικά γρήγορη. Η μεθοδολογία αυτή προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη εφαρμογών παρακολούθησης της απόδοσης των ταινιοδρόμων σε πραγματικό χρόνο.

Βιβλιογραφία

Διεθνής βιβλιογραφία:

- ❖ S. Aleksandrović, V. Damjanović, *Volume Flow measurement of Bulk Solids on Conveyor Belts, The International Journal of Transport & Logistics, ISSN 1451-107X* www.sjf.tuke.sk/transportlogistics/.
- ❖ W. Coleman and W. Steele. *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- ❖ T. Fares – *Laser Scanning of Conveyor Ore Profiles* – 2015 – www.ironore2015.ausimm.com
- ❖ Fenner-Dunlop Conveyor Belting Australia, *Conveyor Handbook*, 2009.
- ❖ M. Galetakis, G. Alevizos, F. Pavloudakis, C. Roumpos, C. Kavouridis. *Prediction of the Performance of On-line Ash Analyzers used in the Quality Control Process of a Coal Mining System*, Energy Sources, Part A, 31:1115–1130, 2009.
- ❖ L. Kneip, F. Tâche, G. Caprari, R. Siegwart, *Characterization of the compact Hokuyo URG-04OX 2D laser range scanner*, 2009 (in electronic form, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010035863>).
- ❖ Y. Okubo, Y. Cang, J Borenstein, *Characterization of the Hokuyo URG – 04LX Laser Rangefinder for Mobile Robot Obstacle Negotiation*, 2009, 2-4.
- ❖ S. Shrestha – *Hokuyo URG-04LX LIDAR Driver for MATLAB* – 2012. (www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36700-hokuyo-urg-04lx-LIDAR-driver-for-matlab?s_tid=mwa_osa_a)
- ❖ K. Tsakalakakis, Th. Michalakopoulos, *Mathematical Modeling of The Conveyor Belt Capacity*, Proceedings of the 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Tel-Aviv, Israel, May 2015, 1-13.
- ❖ U. Wong, A. Morris, C. Lea, J. Lee, C. Whittaker, B. Garney, R. Whittaker, *Comparative Evaluation of Range Sensing Technologies for Underground Void Modeling*, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3816 – 3823, 2011.

Ελληνική βιβλιογραφία:

- ❖ Μ. Γαλετάκης, Έλεγχος ποιότητας ορυκτών πρώτων υλών, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.

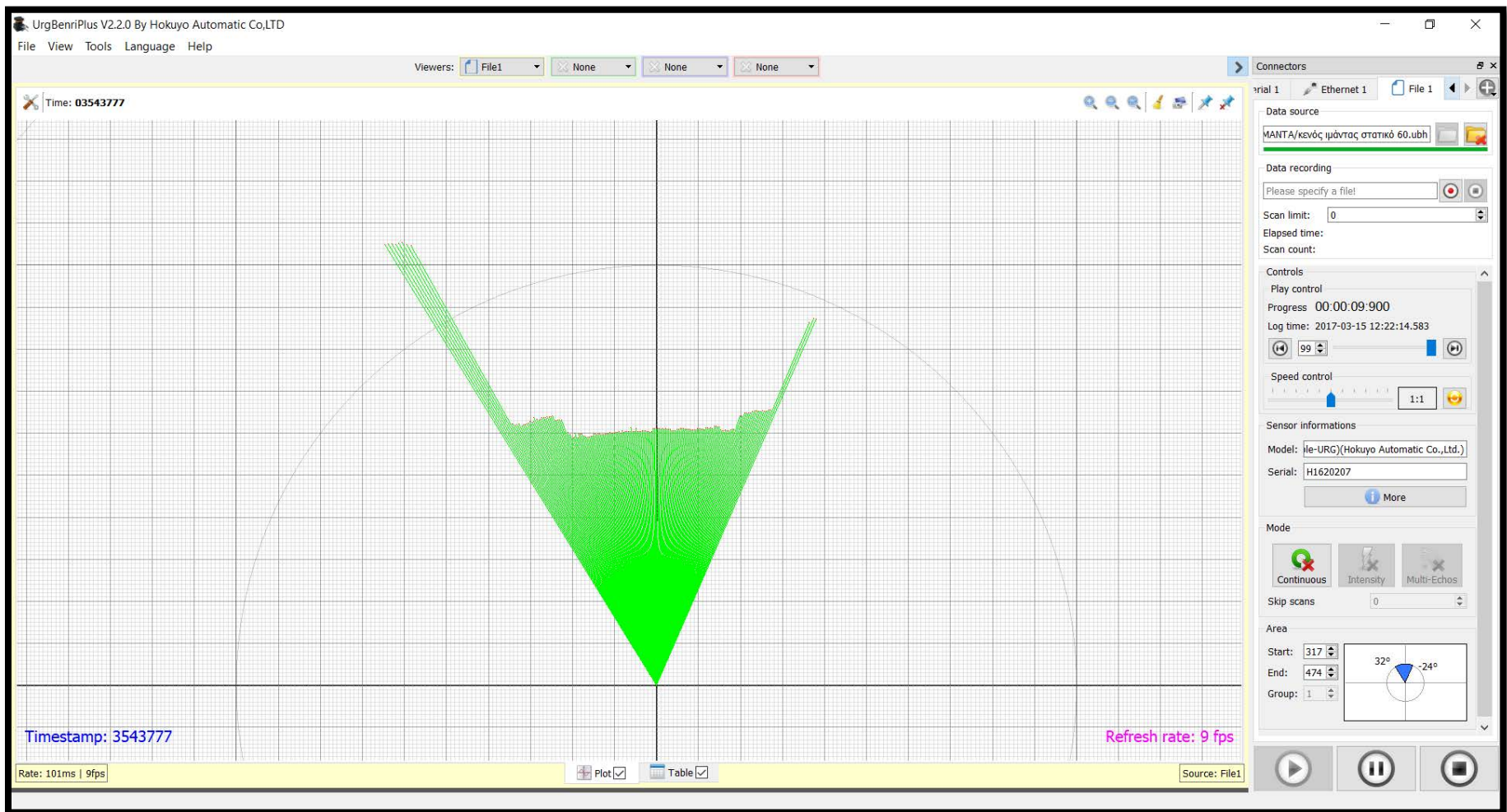
- ❖ Μ. Γαλετάκης, Περιγραφή-επιλογή και υπολογισμός απόδοσης εξοπλισμού επιφανειακών εκμεταλλεύσεων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.
- ❖ Αρ. Δασκαλάκης, Διάγνωση προβλημάτων λειτουργίας μεταφορικών ταινιών με χρήση ανέπαφων αισθητήρων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2018.
- ❖ Ι. Δημητρακάκης, Φ. Τοπάλογλου, Αυτοματοποίηση 3D σκαναρίσματος μέσω κάμερας, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2016
- ❖ Χ. Ι. Εφραιμίδης, Σημειώσεις επί των μέσων εκμηχανίσεως των δομικών έργων, 1985.
- ❖ Χ. Ι. Κολοβός, Τεχνολογία Εκμετάλλευσης Γαιανθράκων, 2004.

Ιστότοποι:

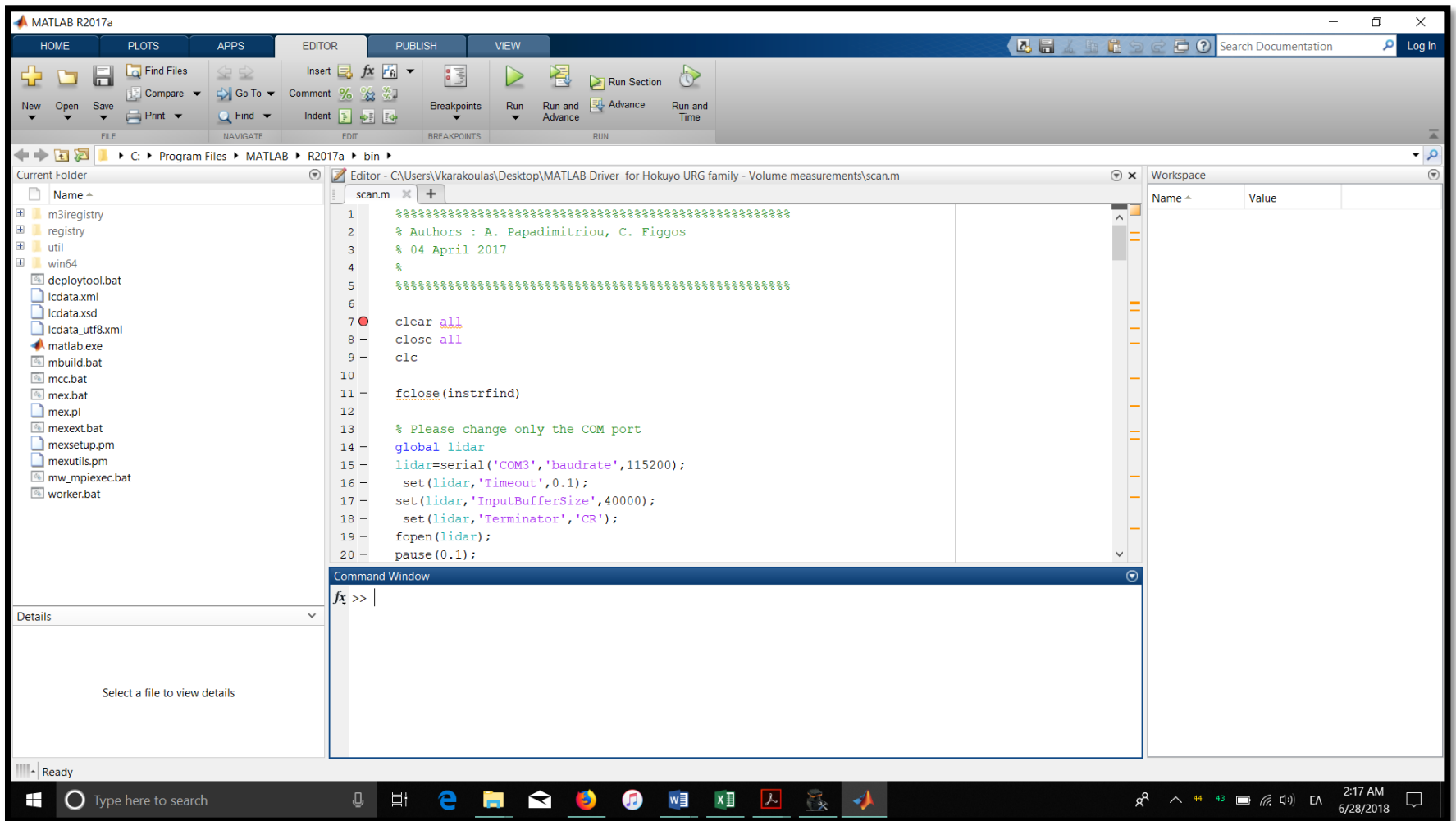
- ❖ Ιστότοπος Dasodata: <http://dasodata.gr/index.php/kainotomes-efarmoges/528-texnologia-LIDAR/507-texnologia-LIDAR> (προσπελάστηκε 29-3-2018).
- ❖ Ιστότοπος Lase BVC, Bulk Volume Conveyor Product Data Sheet, Product module CEWS Bulk Volume, Rudolf-Diesel-Str. 111. www.lase.de, 1-2 (προσπελάστηκε 23-5-2018).
- ❖ Ιστότοπος HOKUYO: www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=166 (προσπελάστηκε 3-3-2018).

Παραρτήματα

A. Ψηφιακό διαδραστικό περιβάλλον του προγράμματος URG Benri



Β. Κώδικας διεπικοινωνίας (με τον αισθητήρα URG-04LX-UG01), υπολογισμού εμβαδού τομής υλικού και υπολογισμού όγκου χύδην υλικού



Ο κώδικας:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Authors : A. Papadimitriou, C. Figgos
% 04 April 2017
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
close all
clc

fclose(instrfind)

% Please change only the COM port
global LIDAR
LIDAR=serial('COM3','baudrate',115200);
set(LIDAR,'Timeout',0.1);
set(LIDAR,'InputBufferSize',40000);
set(LIDAR,'Terminator','CR');
fopen(LIDAR);
pause(0.1);
fprintf(LIDAR,'SCIP2.0');
pause(0.3);
fscanf(LIDAR)
fprintf(LIDAR,'VV');
pause(0.3);
fscanf(LIDAR)
fprintf(LIDAR,'BM');
pause(0.3);
fscanf(LIDAR)
fprintf(LIDAR,'GD0044072500');
pause(0.1);
fscanf(LIDAR)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

angles=(-120:240/682:120-240/682)*pi/180;

% Set the initial angles
range_start = 370;
range_end = 409;

% Transport them to <angles> indexes
range_start = (range_start - 43);
range_end = (range_end - 44);

angles(range_start)*180/pi;
```

```

angles(range_end)*180/pi;

initialObj = zeros(1, range_end-range_start+1);

display('Calibrating. Wait...')
i = 1;
max = 10; % Calibration samples
while (i <= max)
    [A]=LIDARScan(LIDAR);
    A(range_start:range_end);
    initialObj = initialObj + A(range_start:range_end)/max;
    i = i + 1;
    pause(0.1)
end
initialObj

selection = input('*-----*\n|For Static press
1|\n|For Dynamic press 2|\n*-----*\n');
%%%%%%%%%%%%%%
length = 18.5;%
%%%%%%%%%%%%%%

% Static Selection !
if (selection == 1 )
    display('Static Selection')
    j = 1;
    obj = zeros(1, range_end-range_start+1);

    while(1)
        i = 1;
        max = 2; %! Make that 10 : Sampling per distance
        while (i <= max)
            [A]=LIDARScan(LIDAR);
            obj(j,:) = obj(j,:) + A(range_start:range_end)/max;
            i = i + 1;
            pause(0.1)
        end
        j = j + 1;

        option = input('Do you want another measurement?\nYES :
1\nNO : 2\n');

        if option == 2
            break
        else
            obj = [obj ; zeros(1, range_end-range_start+1)]; % Do
not Question this!!
        end

    end

    %obj % Uncomment this to show the obj samples
    sqrEmpty = initialObj.^2;

```

```

sqrObj = obj.^2;
sqrEmpty = sum(sqrEmpty);
sqrObj = sum(sqrObj);
area = 0;

if j == 2
    sqrEmpty = initialObj.^2;
    sqrObj = obj.^2;
    sqrEmpty = sum(sqrEmpty);
    sqrObj = sum(sqrObj);
    area = 0.5*240/682/180*pi*(sqrEmpty - sqrObj)/100*length
else
    for i = 1:size(obj,1)
        sqrEmpty = initialObj.^2;
        sqrObj = obj(i,:).^2;
        sqrEmpty = sum(sqrEmpty);
        sqrObj = sum(sqrObj);
        if i == 1 || i == size(obj,1)
            area = area + 0.5*240/682/180*pi*(sqrEmpty -
sqrObj)/100*length/2;
        else
            area = area + 0.5*240/682/180*pi*(sqrEmpty -
sqrObj)/100*length;
        end
    end
end
%area = 0.5*240/682/180*pi*(sqrEmpty - sqrObj)/100*length
volume = area

else % Dynamic Selection !
    display('Dynamic Selection')
    avgEmpty = mean(initialObj);

    start = 0;
    i = 1;
    prevAvg = -10000;

    while(1)
        [A]=LIDARScan(LIDAR);
        A = A(range_start:range_end);
        mean(A);
        % If there is a jump of at least 22 cm start the
measurement
        if avgEmpty > mean(A) + 220 && start == 0
            start = 1;
            prevAvg = mean(A);
            pause(0.1)
            [A]=LIDARScan(LIDAR);
            A = A(range_start:range_end);
            meanA = mean(A);

```

```

        % Search where the initializing object ends
        while (meanA > prevAvg - prevAvg*0.1)
            display('Starting Object Measurement')
            break
        end
    else

        % While measuring, if there is a jump of at least 10 cm
stop
        if start == 1 && prevAvg > mean(A) + 100
            start = 0;
            break
        end

        if start == 1
            obj(i,:) = A;
            prevAvg = mean(A);
            i = i + 1;
        end

        end
        pause(0.1)
    end

    sections = i - 1;
    vol = 0;
    for i = 1 : sections
        sqrEmpty = initialObj.^2;
        sqrObj = obj(i,:).^2;
        sqrEmpty = sum(sqrEmpty);
        sqrObj = sum(sqrObj);
        vol = vol + 0.5*240/682/180*pi*(sqrEmpty - sqrObj)/100;
    end
    vol/sections*length
end

```