



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ  
ΕΡΓΩΝ»

## Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ



Διπλωματική εργασία

Άγγελος Αϊβαλιώτης

Επιβλέπουσα: Τσακίρη Μαρία  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός Και Κατασκευή Υπόγειων Έργων»

## Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Άγγελου Αϊβαλιώτη

Επιβλέπουσα: Τσακίρη Μαρία  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Αϊβαλιώτης Άγγελος  
Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αϊβαλιώτης Άγγελος, 2021  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια **κα. Τσακίρη Μαρία** της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος, εφαρμοσμένου και πολύπλευρου θέματος, πάνω στο οποίο εξέφρασα εξ' αρχής την επιθυμία μου να μελετήσω.

Κυρίως θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την προσπάθεια που έγινε στην εύρεση του θέματος, προσεγγίζοντας στο μέγιστο το αντικείμενο που με ενδιέφερε καθώς και για την ελευθερία λήψης αποφάσεων και πρωτοβουλιών. Οι κριτικές παρεμβάσεις της και η καθοδήγησή της σε συνδυασμό με τη συνέπεια και το παιδαγωγικό της ήθος δημιούργησαν ένα περιβάλλον που ήταν ικανό να ξεπεράσει όποιες δυσκολίες παρουσιάστηκαν στα διάφορα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία «**Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.**» για τη διάθεση του χώρου των μεταλλείων και των απαραίτητων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για περεταίρω επεξεργασία.

Οφείλω και θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον εξάιρετο **Δρ. Μπουρμά Γεώργιο**, Μεταλλειολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, Υπεύθυνο Ανάπτυξης Υπόγειων Μεταλλείων της **Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.**, για τη βοήθεια και την παροχή πληροφοριών και συμβουλών στα διάφορα στάδια της εργασίας όπως ακόμα και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για το πρακτικό τμήμα της εργασίας για την επαφή μου τόσο με τον χώρο του μεταλλείου όσο και με την ευρύτερη περιοχή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω και να αφιερώσω στην οικογένειά μου, που χωρίς τις θυσίες τους και την αμέριστη υποστήριξή τους δεν θα ήμουν σε θέση να ολοκληρώσω τις σπουδές μου σε αυτό το επίπεδο, να εκπληρώσω τους στόχους μου και να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το στενό μου φιλικό περιβάλλον για τη συμπαράσταση και την κατανόηση στα άγχη και τις αγωνίες μου και κυρίως την σχέση μου, την Έλενα, η οποία εκτός από την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξε, συνέβαλε στην δακτυλογράφηση μέρους της εργασίας.

Τέλος δε θα μπορούσα να παραλείψω τους μεταπτυχιακούς συμφοιτητές μου και τον υπεύθυνο του άκρως ενδιαφέροντος και εποικοδομητικού ΔΠΜΣ «**Σχεδιασμός Και Κατασκευή Υπόγειων Έργων**» του ΕΜΠ **κ. Ανδρέα Μπενάρδο**. Πρόκειται για ένα διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, το οποίο είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα και αναγνωρίσιμα προγράμματα μεταπτυχιακών σπουδών τόσο πανελλαδικά όσο και παγκοσμίως.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη συλλογής και μοντελοποίησης της τρισδιάστατης πληροφορίας αντικειμένων του χώρου ακολουθεί αυξητική τάση τις τελευταίες δεκαετίες. Γι' αυτό τον λόγο κρίθηκε σκόπιμη η ενασχόληση της παρούσας εργασίας με την χρησιμοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας τρισδιάστατης σάρωσης για την εξαγωγή χρήσιμων στοιχείων ενός μεταλλείου και την σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα των παραδοσιακών μεθόδων. Παλαιότερα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν ήταν οπτικές και εμπειρικές, ενώ στη συνέχεια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς γεωδαιτικές μέθοδοι. Συχνά οι γεωδαιτικές μέθοδοι έχουν δυσκολία εφαρμογής λόγω των δυσμενών συνθηκών των υπογείων έργων και για εφαρμογές αποτυπώσεων, ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους αποτελεί η χρονοβόρα συλλογή σημειακής πληροφορίας.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη διερεύνηση της σύγχρονης μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, ή αλλιώς την τεχνολογία SLAM και τις δυνατότητες εφαρμογής της σε αποτυπώσεις υπογείων έργων. Η τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) αφορά στην 3D σάρωση αντικειμένων του χώρου εν κινήσει, έχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα αυτοπροσδιορισμού του οργάνου στο προς σάρωση άγνωστο περιβάλλον. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές και συνδυασμοί δεκτών στο σύστημα, όπως αδρανειακές μονάδες, έγχρωμες κάμερες, σύστημα δορυφορικού εντοπισμού κτλ.

Το πρακτικό σκέλος της εργασίας επικεντρώνεται στην εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM σε ένα υπόγειο μεταλλείο μαγνησίτη με στόχο την εφαρμογή της σε πραγματικές συνθήκες και τη μελέτη των βασικών δυνατοτήτων της, σε αντιπαραβολή με τις παραδοσιακές μεθόδους. Συγκεκριμένα, οι ενότητες που εξετάζονται είναι:

- ✓ Η σύγκριση των τρισδιάστατων δεδομένων με την πραγματική εικόνα των αντικειμένων
- ✓ Η ξενάγηση στον τρισδιάστατο χώρο του μεταλλείου
- ✓ Η εξαγωγή διατομών μέσω των τρισδιάστατων δεδομένων
- ✓ Η ογκομέτρηση τμημάτων του μεταλλείου
- ✓ Η εξαγωγή δομικών στοιχείων (κλίση και διεύθυνση βύθισης στρωμάτων) του μεταλλείου

Τέλος, διατυπώνονται συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο της τρισδιάστατης σάρωσης SLAM σε εφαρμογές υπογείων έργων καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση και ενασχόληση με το αντικείμενο.

# ABSTRACT

## THE USE OF SLAM TECHNOLOGY IN UNDERGROUND MINING OPERATIONS

The need of collecting and modelling 3D information of objects in space has been growing in recent decades. This thesis examines, the use of state-of-the-art 3D scanning technology to extract useful elements from mapping underground cavities such as minerals and compare the results with the results of traditional methods. In the past, the methods used were visual and empirical, and then, with the evolution of technology, geodetic methods were used extensively. Geodetic methods for mapping underground areas can be very slow due to inherent difficulties of the underground environment and provide only point information rather than spatial information at once.

This dissertation focuses on the investigation of the state-of-the-art three-dimensional scanning method of simultaneous localization and mapping, or SLAM technology. SLAM technology refers to the 3D scanning of the space on the go, while at the same time, having the ability of self-determining the instrument in an unknown environment. There are many variations and combinations of positioning sensors that can be used in conjunction with the system, such as inertia modules, color cameras, satellite tracking system, etc.

The practical part of the thesis focuses on the implementation of SLAM technology in an underground mining site of magnesite. The aim of this application is the implementation of SLAM technology in real conditions and the study of its basic possibilities, in comparison with traditional methods. In particular, the modules to be examined are:

- ✓ Comparison of 3D data with the actual image of objects
- ✓ The tour of the 3D mining area
- ✓ Exporting cross-sections through 3D data
- ✓ The volume calculation of mine segments
- ✓ Exporting structural elements (dip angle and dip direction) of the mineral

Finally, conclusions are given on the implementation of the SLAM technology as well as suggestions for further investigation.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>III</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>ΠΙΝΑΚΕΣ</b> .....	<b>IX</b>
<b>ΕΙΚΟΝΕΣ</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Η σημασία χαρτογράφησης των υπόγειων χώρων.....	1
1.2 Εξέλιξη τεχνικών χαρτογράφησης.....	2
1.3 Δομή εργασίας.....	4
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
<b>3D ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΑΡΩΤΕΣ</b> .....	<b>6</b>
2.1 Εισαγωγή .....	6
2.2 Σάρωση laser.....	6
2.3 Επίγειοι σαρωτές laser .....	9
2.4 Παραγωγή νεφών σημείων .....	12
2.5 Εφαρμογές μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης σε έργα μηχανικού .....	13
2.5.1 Χαρακτηρισμός βραχόμαζας.....	13
2.5.2 Ποιοτικός έλεγχος ανατίναξης της σήραγγας.....	15
2.5.3 Παρακολούθηση παραμορφώσεων .....	15
2.5.4 Βελτίωση δεδομένων εισαγωγής για αριθμητική μοντελοποίηση.....	16
2.5.5 Επιθεώρηση και ανάλυση σποών .....	16
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	
<b>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>18</b>
3.1 Εισαγωγή .....	18
3.2 Συστήματα αναφοράς και σύνδεση νεφών σημείων .....	18
3.3 Συνένωση νεφών επίγειων σαρώσεων .....	20
3.3.1 Άμεση μέθοδος.....	21
3.3.2 Έμμεση μέθοδος.....	22
3.4 Αλγόριθμοι υπολογισμού έμμεσης συνένωσης νεφών .....	25
3.4.1 Ο Αλγόριθμος του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου.....	25
3.5 Γεωαναφορά Νεφών Σημείων.....	27
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	
<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SLAM</b> .....	<b>30</b>
4.1 Εισαγωγή .....	30
4.2 Η τεχνολογία των κινητών συστημάτων σάρωσης laser.....	30
4.3 Τι είναι το SLAM.....	32
4.4 Σφάλματα αλγορίθμων SLAM.....	36
4.5 Προκλήσεις για το SLAM.....	38
4.6 Εφαρμογή τρισδιάστατης σάρωσης με τη χρήση drone.....	41
<b>5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	
<b>ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	<b>43</b>
5.1 Εισαγωγή .....	43
5.2 Μαγνησίτης.....	43
5.3 Προϊόντα και χρήσεις μαγνησίτη .....	44
5.4 Ο μαγνησίτης ως πρώτη ύλη.....	45
5.5 Γεωλογία των κοιτασμάτων του Ελληνικού χώρου .....	46
5.5.1 Γεωλογία της περιοχής μελέτης .....	48
5.6 Κοιτάσματα λευκολίθου στην Ελλάδα .....	51

5.6.1	Ιστορική αναδρομή κοιτασμάτων Β. Εύβοιας.....	52
5.6.2	Διάρθρωση των μεταλλείων λευκολίθου.....	54
<b>6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>		
<b>ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>		<b>58</b>
6.1	Εισαγωγή.....	58
6.2	Τοπογραφικός εξοπλισμός.....	58
6.3	Λογισμικό.....	60
6.4	Επεξεργασία μετρήσεων.....	61
6.4.1	Συσχέτιση 3D δεδομένων με πραγματικότητα.....	61
6.4.2	Εξαγωγή διατομών.....	66
6.4.3	Ογκομέτρηση.....	70
6.4.4	Εξαγωγή δομικών στοιχείων.....	75
<b>7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>		
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>		<b>82</b>
7.1	Εισαγωγή.....	82
7.2	Συμπεράσματα.....	82
7.2.1	Δεδομένα.....	82
7.2.2	Λογισμικό.....	83
7.2.3	Επεξεργασία.....	84
7.3	Προτάσεις.....	84
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>86</b>

# ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ZEB REVO ( <a href="http://www.geoslam.com">www.geoslam.com</a> ) .....	59
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μέτρησης εμβαδού διατομών .....	69
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα υπολογισμού όγκων .....	75
Πίνακας 6.4: Κλίση επιπέδων με προσαρμογή επιπέδου και με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής πυξίδας.....	80
Πίνακας 6.5: Διεύθυνση βύθισης επιπέδων με προσαρμογή επιπέδου και με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής πυξίδας.....	81

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Σύγκριση των επίγειων σαρωτών με την ταχυμετρία, GNSS και την φωτογραμμετρία (Zogg, 2008) .....	3
Εικόνα 2.1: Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο TOF ( <a href="https://regi.tankonyvtar.hu">https://regi.tankonyvtar.hu</a> ) .....	8
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας phase based και της τεχνολογίας TOF. ( Hiremagalur, et al., 2011) .....	8
Εικόνα 2.3: Οπτική τριγωνοποίηση ενός σημείου βασισμένη σε μία απλή δέσμη laser και ανιχνευτή ευαισθησίας θέσης. (Vosselman & Maas, 2010) .....	9
Εικόνα 2.4: Παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων από σαρωτή διαφοράς φάσης. a) Νέφος σημείων b) 3D εικόνα laser c) 2D εικόνα laser (Feng, 2012).....	11
Εικόνα 2.5: Τρισδιάστατο μοντέλο υπόγειας εκσκαφής με πραγματικά χρώματα (Feng, 2012) .....	12
Εικόνα 2.6: Παράμετροι χαρακτηρισμού βραχόμαζας (Hudson, 1989).....	14
Εικόνα 2.7: Πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που δημιουργήθηκε από τη σάρωση δεδομένων σε μία σήραγγα χάρτης (αριστερά) και τρισδιάστατο μοντέλο (δεξιά) (Feng, 2012).....	15
Εικόνα 2.8: Σύγκριση σαρώσεων μεταξύ της μεθόδου CMS (αριστερά) και της μεθόδου με drone (δεξιά) που απεικονίζουν το τελικό σχήμα μιας στοάς.....	17
Εικόνα 3.1: Προσανατολισμός νέφους σημείων (Γκίκας, et al., 2007).....	20
Εικόνα 3.2: Συνένωση μεταξύ δύο θέσεων σάρωσης (Quintero et al., 2008).....	21
Εικόνα 3.3: Επικάλυψη σκαναρισμάτων και βαθμοί ελευθερίας για τη μετατροπή σε κοινό σύστημα συντεταγμένων (Reshetyuk , 2009) .....	22
Εικόνα 3.4: Registration με τη χρήση στόχων. (Reshetyuk , 2009).....	23

Εικόνα 3.5: Αριστερά απεικονίζεται μια καλή κατανομή στόχων (good) και δεξιά μια ελλειπής κατανομή στόχων (poor) (Reshetyuk , 2009) .....	23
Εικόνα 3.6: Τεχνητοί Στόχοι και Σφαίρα ( <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> ) .....	23
Εικόνα 3.7: Σάρωση κτηρίου από 2 πλευρές και συνένωση με surface matching (κοινές επιφάνειες είναι η μπλε και η πράσινη) (Reshetyuk , 2009).....	24
Εικόνα 3.8: Μία σφαίρα-στόχος τοποθετημένη στο τοίχωμα σήραγγας.....	28
Εικόνα 3.9: (A) Τα αποτελέσματα από τη σάρωση μίας σφαίρας (B) Σφαίρες με υψηλή ανακλαστικότητα παράγουν υψηλά ποσοστά θορύβου, μειώνοντας την ακρίβεια της θέσης της σφαίρας (Jones, et al., 2019).....	28
Εικόνα 4.1: Αποτέλεσμα σάρωσης μίας περιοχής μελέτης με δύο σαρωτές (α) τον φορητό σαρωτή laser ZEB-REVO (WLS) και (β) τη συσκευή επίγειας σάρωσης laser FARO Focus3D (TLS) (Cabo, et al., 2018).....	31
Εικόνα 4.2 Visual SLAM από RGB-D κάμερες ( <a href="https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html">https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html</a> ) .....	35
Εικόνα 4.3 SLAM από 2D Lidar ( <a href="https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html">https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html</a> ) .....	35
Εικόνα 4.4: Παράδειγμα προβλήματος στο κλείσιμο βρόγχου ( <a href="https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html">https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html</a> ) .....	39
Εικόνα 4.5: Γράφημα θέσης μετά από ελαχιστοποίηση του σφάλματος εντοπισμού ( <a href="https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html">https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html</a> ) .....	40
Εικόνα 4.6: Το σύστημα αυτόνομης σάρωσης Hovermap σε (A) κατακόρυφο προσανατολισμό που χρησιμοποιείται για κατακόρυφες εκσκαφές και σε (B) οριζόντιο προσανατολισμό που προτιμάται για χρήση σε οριζόντιες εκσκαφές (Jones, et al., 2019).....	42
Εικόνα 5.1: Λευκόλιθος (κρυπτοκρυσταλλικός μαγνησίτης), Βασιλικά Θεσσαλονίκης ( <a href="http://www.orykta.gr">www.orykta.gr</a> ).....	43
Εικόνα 5.2: Καυστική μαγνησία ( <a href="http://www.orykta.gr">www.orykta.gr</a> ) .....	44
Εικόνα 5.3: Δίπυρος μαγνησία ( <a href="http://www.orykta.gr">www.orykta.gr</a> ).....	45
Εικόνα 5.4: Οι εφαρμογές του μαγνησίτη και των προϊόντων επεξεργασίας του ( <a href="http://www.orykta.gr">www.orykta.gr</a> ) .....	46
Εικόνα 5.5: Μετάλλευμα μαγνησίτη τύπου πλέγματος φλεβών (Stockwork) (λευκό χρώμα) σε υπερβασικό πέτρωμα (σκούρο χρώμα), (Βόρειος τομέας κοιτάσματος Γερορέματος Βορείου Ευβοίας) ( <a href="http://www.orykta.gr">www.orykta.gr</a> ).....	47
Εικόνα 5.6: Φλέβα μεταλλεύματος μαγνησίτη (Βόρειος τομέας κοιτάσματος Γερορέματος Βορείου Ευβοίας) ( <a href="http://www.pilievia.gr">www.pilievia.gr</a> ).....	47
Εικόνα 5.7: Διάκριση περιδοτίτη, σερπεντινίτη και λευκόλιθου σε καρτό ερευνητικής γεώτρησης στην περιοχή του Πηλίου (Προσωπικό αρχείο) .....	49
Εικόνα 5.8: Δημιουργία μαγνησίτη ως κοίτασμα αντικατάστασης.....	49
Εικόνα 5.9: Καρτό ερευνητικής γεώτρησης (Περιοχή Πηλίου) (Προσωπικό αρχείο).....	50
Εικόνα 5.10: Φλεβίδια μαγνησίτη και stockwork στο εσωτερικό μεταλλείου.....	50
Εικόνα 5.11: Κεκλιμένη ερευνητική γεώτρηση στην περιοχή .....	51
Εικόνα 5.12: Εγκαταλελειμμένες εγκαταστάσεις μεταφοράς, αποθήκευσης και επεξεργασίας λευκόλιθου στην περιοχή του Πηλίου (Προσωπικό αρχείο) ( <a href="http://www.pilievia.gr">www.pilievia.gr</a> ). .....	54

Εικόνα 5.13: Σημερινή εικόνα εισόδου κεντρικής στοάς ενός εκ των ορυχείων, περιοχή Πηλίου (Προσωπικό αρχείο) .....	55
Εικόνα 5.14: Πυλώνας εναέριας μεταφοράς (www.monumenta.org).....	56
Εικόνα 5.15: Φρεατοκάμινος στη θέση Βοριά Ρέμα, περιοχή Λίμνης (www.monumenta.org) .....	57
Εικόνα 5.16: Κάθετος φούρνος και γέφυρα μεταφορών (www.monumenta.org).....	57
Εικόνα 6.1: Σαρωτής ZEB HORIZON της GeoSLAM (www.geoslam.com) .....	58
Εικόνα 6.2: Το λογότυπο του CloudCompare (www.cloudcompare.org).....	60
Εικόνα 6.3: Σήμανση κορυφών όδευσης κεντρικής στοάς.....	61
Εικόνα 6.4: Τοποθεσία μεταλλείου .....	62
Εικόνα 6.5: Πρόσβαση μεταλλείου και ένδειξη εισόδου κεντρικής στοάς.....	62
Εικόνα 6.6: Έκταση και διεύθυνση μεταλλείου .....	63
Εικόνα 6.7: Συσχέτιση τρισδιάστατων και δορυφορικών δεδομένων.....	63
Εικόνα 6.8: Κάτοψη μεταλλείου .....	64
Εικόνα 6.9: Αστοχία τύπου σφήνας στο ταβάνι της κεντρικής στοάς (αριστερά) και ίχνος διατρήματος για τοποθέτηση εκρηκτικών υλών (δυναμίτης) (δεξιά) .....	65
Εικόνα 6.10: Σιδηροτροχιές για την κίνηση μεταλλευτικών κάδων και αγωγός αέρα για τη χρήση μηχανημάτων αέρος.....	65
Εικόνα 6.11: Διατομές από 3D δεδομένα.....	67
Εικόνα 6.12: Μέτρηση εμβαδού διατομής 4 .....	68
Εικόνα 6.13: Μέτρηση εμβαδού διατομής 3 .....	68
Εικόνα 6.14: Διατομή 4 υπό μορφή νέφους σημείων και υπό μορφή πλέγματος .....	69
Εικόνα 6.15: Διατομή 3 υπό μορφή νέφους σημείων και υπό μορφή πλέγματος .....	70
Εικόνα 6.16: Τμήματα στα οποία πραγματοποιήθηκε υπολογισμός όγκου .....	71
Εικόνα 6.17: Μέτρηση όγκου με τη χρήση εργαλείου του CloudCompare .....	71
Εικόνα 6.18: Μέτρηση όγκου τμήματος στοάς μέσω της προσαρμογής μαθηματικής επιφάνειας .....	72
Εικόνα 6.19: Μέτρηση όγκου τμήματος στοάς μετά τη μοντελοποίησή του.....	72
Εικόνα 6.20: Μέτρηση όγκου φελονιού με τη χρήση εργαλείου του CloudCompare .....	73
Εικόνα 6.21: Μέτρηση όγκου φελονιού για την προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας .....	74
Εικόνα 6.22: Μέτρηση όγκου φελονιού μετά την μοντελοποίησή του.....	74
Εικόνα 6.23: Κάτοψη μεταλλείου .....	76
Εικόνα 6.24: Κλίση και διεύθυνση κλίσης στρώσεων μεταλλείου .....	77
Εικόνα 6.25: Κλίση και διεύθυνση κλίσης στρώσεων μεταλλείου με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής πυξίδας.....	79
Εικόνα 6.26: Ενδείξεις πυξίδων για τις γωνίες κλίσεις και τις διευθύνσεις της βύθισης .....	80



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Η σημασία χαρτογράφησης των υπόγειων χώρων

Ο in-situ χαρακτηρισμός και η αποτύπωση της επιφάνειας της βραχώμαζας σε ένα υπόγειο έργο αποτελούν τα πιο σημαντικά βήματα κατά τη συλλογή δεδομένων, τα οποία στη συνέχεια αποτελούν στοιχεία εισόδου για αριθμητική ανάλυση, σχεδιασμό και μοντελοποίηση των επιφανειών. Η ποιότητα και η ποσότητα των in-situ δεδομένων χαρτογράφησης παίζουν σημαντικό ρόλο για τα αποτελέσματα των επόμενων βημάτων. Η ανάγκη για γρήγορη χαρτογράφηση και εξερεύνηση σύνθετων περιβαλλόντων προέρχεται από διάφορους χώρους, όπως είναι ο βιομηχανικός κλάδος, η αρχιτεκτονική, η γεωργία και ο κατασκευαστικός κλάδος σπηραγγών και μεταλλείων.

Η χαρτογράφηση υπόγειων μεταλλείων έχει τεράστια κοινωνική σημασία, καθώς η έλλειψη χαρτών ακριβείας ανενεργών υπόγειων χώρων εκμεταλλεύσεως αποτελεί σοβαρή απειλή για τη δημόσια ασφάλεια. Σύμφωνα με έρευνες, «δεκάδες χιλιάδες, ίσως ακόμη και εκατοντάδες χιλιάδες καταγεγραμμένων εγκαταλελειμμένων μεταλλείων υπάρχουν σήμερα παγκοσμίως (Nuchter, et al., 2004). Η έλλειψη χαρτών ακριβείας για τέτοιου είδους μεταλλεία προκαλεί συχνά ατυχήματα. Ακόμα και όταν υπάρχουν ακριβείς χάρτες, παρέχουν πληροφορίες μόνο σε δύο διαστάσεις, το οποίο συνήθως δεν επαρκεί για την αξιολόγηση της δομής και του συντελεστή ασφαλείας των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων. Ακριβή τρισδιάστατα μοντέλα τέτοιων μεταλλείων έχουν μεγάλη σημασία για ένα πλήθος προβλημάτων που επηρεάζουν άμεσα τους ανθρώπους που ζουν ή εργάζονται κοντά τους. Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι η καθίζηση, καθώς δομικές αστοχίες μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση στην επιφάνεια του εδάφους. Η μόλυνση των υπόγειων υδάτων είναι ένα ακόμη πρόβλημα μεγάλης σημασίας, και δεδομένης της τοποθεσίας, του όγκου και της κατάστασης ενός εγκαταλελειμμένου ορυχείου μπορεί η πληροφορία αυτή να είναι εξαιρετικά χρήσιμη στον σχεδιασμό και την εκτέλεση παρεμβάσεων. Οι ακριβείς ογκομετρικοί χάρτες έχουν επίσης μεγάλο εμπορικό και οικονομικό ενδιαφέρον για πολλούς λόγους, όπως είναι η εκτίμηση του όγκου εκσκαφής. Η γνώση του όγκου του υλικού που έχει αφαιρεθεί από μία υπόγεια εκμετάλλευση έχει μεγάλο ενδιαφέρον κατά την αξιολόγηση της κερδοφορίας της εξόρυξης και της ύπαρξης αποθεμάτων.

Η υπόγεια εξόρυξη παρουσιάζει πολλές προκλήσεις προσβασιμότητας. Για υπόγεια με πρόσθετες προκλήσεις, όπως η σεισμικότητα, η διαχείριση των πιθανών κινδύνων γίνεται δυσκολότερη και τα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται γίνονται πιο αυστηρά. Η προθυμία εταιρειών για έκθεση των εργαζομένων σε τέτοιους κινδύνους έχει μειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες, και παράλληλα έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην ασφάλεια διενεργώντας πρόσθετες έρευνες και επιθεωρήσεις του χώρου. Οι επικίνδυνες συνθήκες εργασίας και η δυσκολία πρόσβασης στα υπόγεια μεταλλεία/ορυχεία ενθαρρύνουν όλο και περισσότερο τη χαρτογράφηση υπογείων με τη βοήθεια μη επανδρωμένων συστημάτων, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται η απομακρυσμένη απόκτηση δεδομένων από επικίνδυνες και μη προσβάσιμες περιοχές, επιτρέποντας την επιθεώρηση και ανάλυση χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια προσωπικού (Nuchter, et al., 2004).

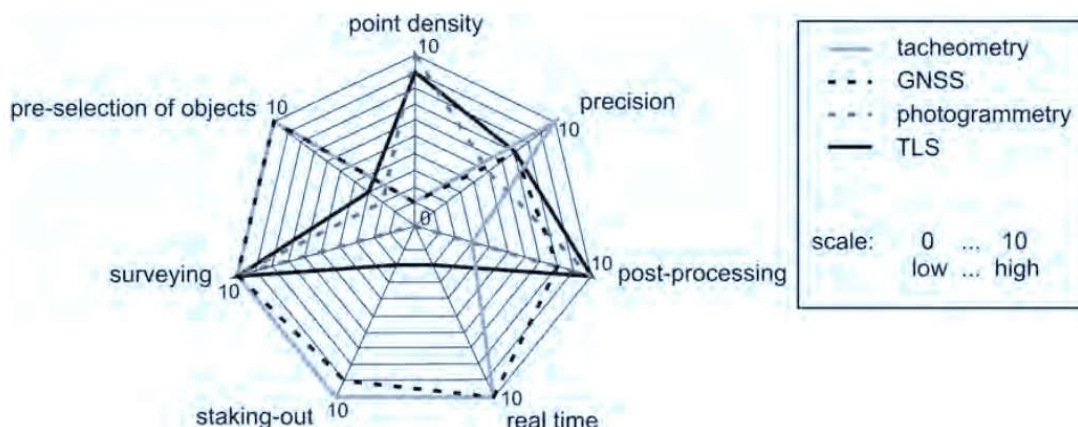
## 1.2 Εξέλιξη τεχνικών χαρτογράφησης

Η χαρτογράφηση υπόγειων χώρων ξεκίνησε να γίνεται με οπτικές μεθόδους και καταγραφή σε χαρτί, μέθοδοι που είναι χρονοβόρες, ανακριβείς, υποκειμενικές, δύσκολες και μερικές φορές επικίνδυνες. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι μέθοδοι αυτές αντικαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό αρχικά με θεοδολίχους και στη συνέχεια με ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς, εξαλείφοντας πολλές δυσκολίες και εξοικονομώντας χρόνο. Παρόλ' αυτά, ακόμα και με τις νέες αυτές τεχνικές υπήρχαν πολλές δυσκολίες, με αυτές να επικεντρώνονται κυρίως στον χρόνο εκτέλεσης των εργασιών πεδίου και γραφείου, στην επικινδυνότητα των εργασιών πεδίου, καθώς και στην μικρή ποσότητα εξαγόμενων πληροφοριών. Γι' αυτούς τους λόγους, τις τελευταίες δεκαετίες ένα τεχνολογικό άλμα έρχεται να συμπληρώσει τους γεωδαιτικούς σταθμούς με μεθόδους τρισδιάστατης σάρωσης. Η τεχνολογία της βασίζεται στην πυκνή καταγραφή εκατομμυρίων σημείων του περιβάλλοντος χώρου, παράγοντας λεπτομερή τρισδιάστατη πληροφορία ανεξαρτήτως φωτισμού, κάτι που θα ήταν αδύνατο με τις κλασικές γεωδαιτικές μεθόδους. Η τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης είναι ιδιαίτερα αποδοτική και ταχεία δεδομένου του μεγάλου γωνιακού εύρους σάρωσης, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου εγκατάστασης του οργάνου και των εργασιών εντοπισμού και προσανατολισμού του. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από χαμηλό φόρτο εργασιών πεδίου, δεδομένου ότι αυτές περιορίζονται στον εντοπισμό του σαρωτή και στους απαιτούμενους χειρισμούς για την εκκίνηση της διαδικασίας σάρωσης. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης, δεν απαιτούνται εργασίες χάραξης των θέσεων στάσης του σαρωτή, παρά μόνον η λήψη στοιχειώδους μέριμνας ώστε η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών στάσεων να μην υπερβαίνει τις αποστάσεις που ορίζει ο κατασκευαστής για κάθε εφαρμογή, προκειμένου να μην προκύψουν κενά ή δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Τέλος, δεν απαιτείται φυσική επαφή με το αντικείμενο, κάτι που καθιστά την τεχνική κατάλληλη για περιβάλλοντα τα οποία είναι δύσκολα στην πρόσβαση ή επικίνδυνα, ενώ οι σύγχρονοι σαρωτές έχουν και τη δυνατότητα λήψης έγχρωμων εικόνων του αντικειμένου σάρωσης.

Τα βασικά αρνητικά στοιχεία της μεθόδου της τρισδιάστατης σάρωσης είναι ο αυξημένος όγκος των δεδομένων, ο χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων και το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς του σαρωτή και του κατάλληλου Η/Υ.

Στην Εικόνα 1.1 που ακολουθεί απεικονίζεται η σύγκριση των μεθόδων της ταχυμετρίας, του δορυφορικού εντοπισμού θέσης, της φωτογραμμετρίας και των επίγειων σαρωτών laser.





Εικόνα 1.1: Σύγκριση των επίγειων σαρωτών με την ταχυμετρία, GNSS και την φωτογραμμετρία (Zogg, 2008)

Ωστόσο, δεδομένου της ταχείας ανάπτυξης της μη επανδρωμένης οδήγησης στο έδαφος και δεδομένου του δύσκολου περιβάλλοντος των υπόγειων εκμεταλλεύσεων, προκειμένου να βελτιωθεί η κατάσταση ασφάλειας των υπόγειων μεταφορών και να μεγιστοποιηθούν τα οικονομικά οφέλη των εξορυκτικών επιχειρήσεων, η χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων σε περιβάλλοντα υπόγειων ορυχείων είναι μια αναπόφευκτη λύση. Ο αποτελεσματικός και ακριβής εντοπισμός στο υπόγειο μεταλλευτικό περιβάλλον είναι το κλειδί για αυτό το βήμα. Ωστόσο, είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν σήματα GPS για εντοπισμό στο περιβάλλον των υπόγειων περιορισμένων χώρων όπως τα υπόγεια ορυχεία και οι σήραγγες μετρό. Για αυτόν το λόγο, ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις χαμηλής συχνότητας, υπερηχητικές μετρήσεις ανίχνευσης, και οπτική πλοήγηση ραδιοφάρων χρησιμοποιήθηκαν για εντοπισμό και παρακολούθηση της τροχιάς σε υπόγεια περιβάλλοντα. Τεχνολογίες εντοπισμού που βασίζονται σε WiFi, Bluetooth, αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID), Ultra Wideband (UWB) και σε υπερήχους έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης ευρέως. Ωστόσο, στις παραπάνω μεθόδους εντοπισμού και χαρτογράφησης, οι αντίστοιχες βοηθητικές συσκευές εντοπισμού πρέπει να εγκατασταθούν στο υπόγειο περιβάλλον. Επομένως, αν και η ακρίβεια εντοπισμού μπορεί να βελτιωθεί, απαιτείται μεγάλο πλήθος συσκευών και υψηλό κόστος συντήρησης. Ταυτόχρονα, λόγω του δυσμενούς υπόγειου περιβάλλοντος, είναι εύκολο να προκληθεί κάποιο σωρευτικό σφάλμα κατά τη διαδικασία εντοπισμού.

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των σχετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, μια τεχνολογία των τελευταίων ετών, η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM) κερδίζει συνεχώς έδαφος στην αγορά και τείνει να αντικαταστήσει τους στατικούς σαρωτές για εργασίες σε υπόγεια περιβάλλοντα. Η τεχνική του SLAM αποτελεί σήμερα μια σημαντική εξέλιξη στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των υπογείων έργων (πχ ορυχεία), καθώς και στον σχεδιασμό διαδρομών και την αυτόνομη πλοήγηση εξοπλισμού εξόρυξης. Τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη ταχύτητα καταγραφής δεδομένων, η ψηφιακή μορφή των δεδομένων, δυνατότητα συνδυασμού με πολλούς αισθητήρες, η δυνατότητα απομακρυσμένης λήψης δεδομένων και η δυνατότητα εντοπισμού της θέσης του συστήματος σάρωσης χωρίς επιπλέον βοηθητικές συσκευές στον χώρο.

Συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους απεικόνισης θεωρείται κάπως ακριβή αλλά η χρησιμοποίηση της σε πολλές περιπτώσεις είναι μονόδρομος. Φυσικά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υποβαθμίζεται η αξία και οι δυνατότητες των κλασικών γεωδαιτικών σταθμών. Ούτε φυσικά να υιοθετούνται ακραίες τάσεις όπως: «Οι σαρωτές Laser έφεραν τον θάνατο της κλασικής Τοπογραφίας». Όπως η Φωτογραμμετρία και το GPS, έτσι και το Laser Scanner ήρθε, για να πάρει την σωστή του θέση στην επιστημονική κοινότητα (Κυριακής, 2018).

### 1.3 Δομή εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας της τρισδιάστατης σάρωσης και ειδικότερα της μεθόδου SLAM, η αξιολόγηση της σε πραγματικές συνθήκες και η αξιολόγηση των προϊόντων για εφαρμογή σε υπόγεια έργα. Η μελέτη της μεθόδου έγινε τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά εφαρμόζοντας την μέθοδο της τρισδιάστατης σάρωσης SLAM σε υπόγειο μεταλλείο. Επίσης, στην παρούσα εργασία γίνεται μία σύγκριση των μεθόδων τρισδιάστατης σάρωσης με τις κλασικές τοπογραφικές μεθόδους.

Η εργασία αποτελείται από τα εξής επτά κεφάλαια:

Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και αναφέρεται στη σημασία της χαρτογράφησης υπόγειων χώρων, τόσο για την οικονομία όσο και για την δημόσια ασφάλεια. Επίσης παρουσιάζεται η εξέλιξη των τεχνικών χαρτογράφησης υπόγειων χώρων καθώς και η σύγχρονη τάση των μεθόδων χαρτογράφησης με τη χρήση της τεχνολογίας SLAM.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα 3D δεδομένα και η μέθοδος της τρισδιάστατης σάρωσης. Παράλληλα διεξάγεται μια διάκριση στα είδη των τρισδιάστατων σαρωτών σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους και έπειτα ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών των σαρωτών laser. Το κεφάλαιο τελειώνει με την παράθεση παραδειγμάτων εφαρμογών της τρισδιάστατης σάρωσης στον κλάδο της μηχανικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα στάδια επεξεργασίας των 3D δεδομένων. Αρχικά γίνεται αναφορά στους μετασχηματισμούς των συστημάτων αναφοράς των νεφών σημείων με στόχο τη συνένωσή τους. Έπειτα γίνεται παράθεση των πιο βασικών αλγορίθμων συνένωσης νεφών επίγειων σαρώσεων και στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία της γεωαναφοράς των νεφών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εισαγωγή στην τεχνολογία των κινητών συστημάτων σάρωσης και η μετάβαση από τους επίγειους σαρωτές laser στα συστήματα ταυτόχρονης χαρτογράφησης και εντοπισμού θέσης (SLAM). Στη συνέχεια γίνεται εκτενής παρουσίαση της τεχνολογίας SLAM και των αλγορίθμων της, ενώ κλείνοντας γίνεται αναφορά στα σφάλματα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς καθώς και στις προκλήσεις με τις οποίες έρχεται αντιμέτωπη η τεχνολογία SLAM.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται γνωριμία με το μέταλλευμα του μαγνησίτη και με την περιοχή μελέτης, στην οποία πραγματοποιήθηκε το πρακτικό τμήμα της εργασίας αυτής. Έτσι λοιπόν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μαγνησίτη ως μέταλλευμα, τα παραγόμενα προϊόντα και οι χρήσεις τους. Έπειτα, ακολουθεί εκτενής αναφορά στη γεωλογία των κοιτασμάτων του ελληνικού χώρου. Τέλος, αναλύεται η περίπτωση των

κοιτασμάτων της Βόρειας Εύβοιας ως προς τη γεωλογία της περιοχής αλλά και ως προς τη διάρθρωση και την ιστορία που στιγματίζει τα μεταλλεία της περιοχής από τη δημιουργία τους έως και σήμερα.

Στο έκτο κεφάλαιο ακολουθεί η παρουσίαση του τοπογραφικού εξοπλισμού και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων.

Στο έβδομο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα σχετικά με την τεχνολογία της τρισδιάστατης σάρωσης SLAM, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς και ενδιαφέρουσες προτάσεις έρευνας για μελλοντικές εργασίες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **3D ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΑΡΩΤΕΣ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα 3D δεδομένα, τα οποία απασχολούν όλο και περισσότερο την επιστημονική κοινότητα. Επίσης γίνεται εκτενής παρουσίαση της τεχνολογίας των 3D σαρωτών, των διαφόρων τύπων τους, των χαρακτηριστικών τους καθώς και μια σειρά εφαρμογών της μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης στο χώρο της μηχανικής.

#### **2.2 Σάρωση laser**

Οι σαρωτές laser (Laser Scanner) είναι μια τεχνολογία η οποία βοηθάει στην απόκτηση δεδομένων σε τρισδιάστατη μορφή και πολλές φορές τους συναντάμε και με την ονομασία LiDAR (Light Detection And Ranging). Οι σαρωτές laser είναι όργανα που με τη βοήθεια ενός περιστρεφόμενου καθρέφτη έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν πολλές και διαφορετικές μετρήσεις, που μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλο χώρο, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές μπορούν να προσδιορίζουν τις θέσεις σημείων σε τρεις διαστάσεις ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, μετρώντας την απόσταση, την κατακόρυφη και την οριζόντια γωνία προς αυτά. Η λειτουργία τους είναι όμοια με αυτή ενός γεωδαιτικού σταθμού με τη διαφορά ότι απουσιάζει η οπτική διάταξη σκόπευσης (Marshall & Stutz, 2011, Riveiro & Lindenbergh, 2020). Επίσης, σε αρκετά όργανα δεν υπάρχει η δυνατότητα κέντρωσης και οριζοντίωσης, η οποία αντικαθίσταται με τη χρήση ειδικών τεχνικών (σκόπευση από γνωστές θέσεις και σάρωση αντικειμένων γνωστών θέσεων και διαστάσεων κ.α.).

Όλα τα όργανα αυτής της κατηγορίας, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες, μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν και τη δυνατότητα λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται.

Το πλήθος των σημείων που λαμβάνονται σε μία σάρωση εξαρτάται από τη γωνιακή ανάλυση του οργάνου, η οποία είναι συνάρτηση του γωνιακού βήματος των κινητήρων που περιστρέφουν τη μετρητική κεφαλή γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα. Ο αριθμός των σημείων που μπορεί να μετρήσει ένας σύγχρονος σαρωτής φτάνει έως και μερικά εκατομμύρια σημεία ανά δευτερόλεπτο (Reshetyuk, 2009).

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν ορισμένα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης. Ένα από τα κυριότερα είναι το γεγονός ότι εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτούνται ιδιαίτερα αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες και επίπονη δουλειά γραφείου για την αφαίρεση της περιττής πληροφορίας από τα νέφη σημείων. Για το λόγο αυτό μόλις τα τελευταία χρόνια διαδόθηκε ευρέως η χρήση τέτοιων οργάνων, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας H/Y (Yuwei et al., 2018). Ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία των νεφών αντισταθμίζεται εν μέρει από την μικρή απαίτηση σε χρόνο στο ύπαιθρο και την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων. Επίσης, ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το κόστος απόκτησης του εξοπλισμού, το οποίο στην περίπτωση ενοικίασης μειώνεται σημαντικά.

Στην ουσία είναι μια συσκευή η οποία έχει την ικανότητα να καταγράφει το υπό-μελέτη αντικείμενο ως έχει στην πραγματικότητα, αποδίδοντάς το με μεγάλη ακρίβεια στο σχήμα αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις με το πραγματικό του χρώμα και τη πραγματική θέση του στο χώρο (το χρώμα και η θέση εξαρτώνται από τον ποιο σαρωτή λέιζερ θα χρησιμοποιήσουμε και πόσο εξελιγμένος μπορεί να είναι).

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι σαρωτών laser για την αποτύπωση αντικειμένων ποικίλων μεγεθών.

Τα **Airborne Laser Scanners** χρησιμοποιούνται από εναέρια μέσα και σαρώσουν κυρίως μεγάλες περιοχές όπως είναι οι αγροτικές περιοχές, δάση κτλ.

Τα **Terrestrial Laser Scanners** χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της γεωμετρίας των αντικειμένων και του χώρου για μεσαίας έκτασης περιοχές.

Τα **Micro Laser Scanners** χρησιμοποιούνται για να σαρώσουν μικρότερα αντικείμενα και κυρίως σε μικρές αποστάσεις.

Οι σαρωτές **Micro** και **Airborne** δεν αναφέρονται στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας και επομένως δε θα αναλυθούν περαιτέρω.

Επίσης, οι παραπάνω τύποι σαρωτών laser χωρίζονται ανάλογα με τη τεχνολογία που χρησιμοποιούν σε άλλες υποκατηγορίες:

- Σαρωτές μέτρησης απόστασης, οι οποίοι χωρίζονται με την σειρά τους σε:

- Σαρωτές με μέτρηση καθυστέρησης χρόνου πτήσης (TOF)

Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών, που βασίζονται στην μέθοδο μέτρησης διαφοράς χρόνου, είναι ίδια με αυτή των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης των μηκών (electronic distance measurement – EDM) και βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος που εκπέμπεται από τον σαρωτή και θεωρώντας γνωστή την ταχύτητα του φωτός. Κατά τη διαδικασία μέτρησης με τη μέθοδο του παλμού, ο σαρωτής εκπέμπει μία συγκεντρωμένη φωτεινή ενέργεια σε τακτά χρονικά διαστήματα που μετά την ανάκλαση της σε κάποια επιφάνεια προσλαμβάνεται από τον φωτοανιχνευτή του οργάνου.

Οι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της μέτρησης της διαφοράς χρόνου είναι οι πιο συνηθισμένοι σαρωτές που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εργασίες λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας που έχουν (συνήθως 125 με 1000 μέτρα με μέγιστο τα 6000 μέτρα) και ο ρυθμός λήψης σημείων κυμαίνεται σε 500.000 σημεία/ δευτερόλεπτο. Παραδείγματα τέτοιων σαρωτών εμφανίζονται στην εικόνα 2.1 (Yuwei, et al., 2018).

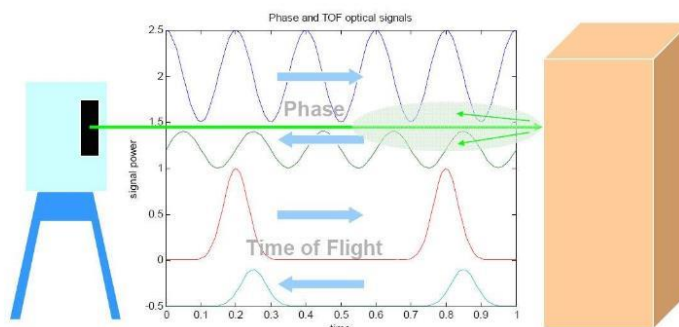


Εικόνα 2.1: Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο TOF (<https://regi.tankonyvtar.hu>)

- Σαρωτές με μέτρηση διαφοράς φάσης (Phase Based)

Σε σχέση με τους σαρωτές TOF οι σαρωτές που μετράνε τη διαφορά φάσης (Phase based) διαθέτουν υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης, μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων (έως και 2.000.000 σημεία/δευτερόλεπτο) και μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά μικρότερη ακτίνα σάρωσης (συνήθως μεταξύ 25 και 75 μέτρων και μέγιστο τα 300 μέτρα). Σε αυτή τη περίπτωση η εκπεμπόμενη ακτίνα έχει μια αρμονική κυματοειδή μορφή και η απόσταση υπολογίζεται με τη διαφορά φάσης ( $\Delta\phi$ ) μεταξύ του εκπεμπόμενου κύματος και του κύματος που λαμβάνεται πίσω από το δέκτη του σαρωτή. Η μέθοδος μέτρησης της διαφοράς φάσης δεν απαιτεί την ύπαρξη χρονομέτρου μεγάλης ακρίβειας, αλλά προβλέπει μια απλή ηλεκτρονική διάταξη για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης και τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης – επιστροφής του σήματος.

Η τεχνολογία των σαρωτών διαφοράς φάσης απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 2.2. Οι σαρωτές με μέτρηση διαφοράς φάσης κατατάσσονται ως σαρωτές μεσαίου εύρους και η ακρίβειά τους βρίσκεται μεταξύ των σαρωτών TOF και του τριγωνισμού. Ωστόσο υπερέχουν σε ταχύτητα και σε εύρος σάρωσης χάρη στην κατακόρυφη και οριζόντια περιστροφή 360° (Yuwei, et al., 2018).

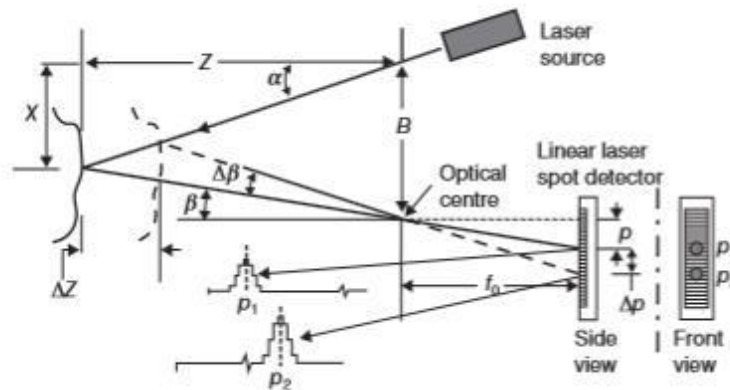


Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας phase based και της τεχνολογίας TOF. ( Hiremagalur, et al., 2011)

- Σαρωτές τριγωνισμού (Triangulation Based)

Ενώ οι σαρωτές laser μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας βασίζονται συνήθως στην τεχνολογία του TOF τα συστήματα που σχεδιάζονται για τη μέτρηση αποστάσεων μικρότερων από περίπου 5m συχνά χρησιμοποιούν την αρχή τριγωνισμού. Τα τρίγωνα αποτελούν μια βασική μέθοδο μέτρησης και έχουν πολλαπλές εφαρμογές. Τα τρίγωνα χρησιμοποιήθηκαν και στην αρχαιότητα για βασικές γεωδαιτικές μετρήσεις αλλά χρησιμοποιούνται και σήμερα π.χ. στη τοπογραφία (Vosselman & Maas, 2010).

Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η βασική αρχή του οπτικού τριγωνισμού για μια δέσμη laser. Μια πηγή laser εκπέμπει μια δέσμη φωτός η οποία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια ενδιαφέροντος και συλλέγεται από έναν αισθητήρα που είναι σε ξεχωριστή θέση από αυτή που προβάλλει τη δέσμη φωτός (Yuwei, et al., 2018).



Εικόνα 2.3: Οπτική τριγωνοποίηση ενός σημείου βασισμένη σε μία απλή δέσμη laser και ανιχνευτή ευαισθησίας θέσης. (Vosselman & Maas, 2010)

- Σαρωτές με τη μέθοδο της συμβολομετρίας

Η συμβολομετρία εκμεταλλεύεται την συμφωνία ενός κύματος για τον υπολογισμό της απόστασης και προσφέρει πολύ υψηλή ακρίβεια αλλά δεν εφαρμόζεται στη τεχνική μέτρησης των σαρωτών laser και επομένως δεν θα γίνει η ανάπτυξή της.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα είδη και τις αρχές λειτουργίας των διαφόρων μεθόδων σάρωσης προτείνεται η αναδρομή στην ακόλουθη βιβλιογραφία (Riveiro & Lindenbergh, 2020, Shan & Toth, 2009, Yuwei, et al., 2018).

### 2.3 Επίγειοι σαρωτές laser

Οι επίγειοι σαρωτές laser ανήκουν στην κατηγορία των **στατικών σαρωτών**. Πρόκειται για τους σαρωτές οι οποίοι παραμένουν σταθεροί κατά τη διαδικασία της σάρωσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν μεγάλη ακρίβεια και μεγάλη πυκνότητα λήψης σημείων. Οι περισσότεροι στατικοί σαρωτές αφορούν περιπτώσεις επίγειων σαρωτών.

Οι επίγειοι σαρωτές laser (TLS) είναι όργανα ενεργής απεικόνισης που δουλεύουν με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και δίνουν σε πραγματικό χρόνο τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου, καταγράφοντας την γεωμετρία και μερικές φορές πληροφορίες υψής για τις ορατές επιφάνειες των αντικειμένων και των χώρων (Quanhong , 2012). Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των γεωδαιτικών σταθμών (total station) που μετρούν αποστάσεις χωρίς την χρήση ανακλαστήρα, δηλαδή χρησιμοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσδιορίζουν την απόσταση. Όμως υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν, στην ποσότητα και την ταχύτητα με την οποία προσλαμβάνουν δεδομένα, τις εργασίες πεδίου, την επεξεργασία των μετρήσεων, τα σφάλματα των μετρήσεων, κλπ. Οι σαρωτές παράγουν μία ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση (νέφος σημείων) μιας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο οπτικό πεδίο με μία ορισμένη αβεβαιότητα μετρήσεων.

Το μεγάλο μειονέκτημα των στατικών σαρωτών αποτελεί η απαίτηση ίδρυσης στάσεων και η τοποθέτηση τους σε αυτές προκειμένου να ληφθούν δεδομένα, κάτι που οδηγεί σε αυξημένο χρόνο στο πεδίο.

Το παραγόμενο προϊόν από μία σάρωση, που χαρακτηρίζεται ως νέφος σημείων, παρέχει ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου το οποίο σαρώνεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λεπτομερή χαρτογράφηση αντικειμένων, όπως αρχαιολογικοί χώροι, φράγματα κλπ.

Στους επίγειους σαρωτές όπως και σε όλες τις τεχνολογίες laser χωρίς χρήση ανακλαστήρα ( reflectorless ), η λειτουργία τους επηρεάζεται και περιορίζεται τόσο από παράγοντες όπως είναι η απόσταση, το μήκος κύματος του παλμού laser, το μέγεθος και ο τύπος του στόχου, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ανάκλασης και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και από φυσικούς νόμους της ανακλαστικότητας, τις οπτικές ιδιότητες του υλικού, την περιλαμβανόμενη διάθλαση και το αποτέλεσμα της εσωτερικής διάθλασης (Αναγνωστόπουλος, 2013).

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των στατικών σαρωτών είναι η ανάλυση και αναφέρεται κυρίως στην απόσταση όπου ορίζεται ως το μέτρο της διαχωριστικής ικανότητας μεταξύ των δύο στόχων στην ίδια διεύθυνση θέασης (σάρωσης). Είναι η μικρότερη φαινόμενη απόσταση που μπορεί να μετρηθεί. Η ανάλυση είναι συνάρτηση της ανάλυσης μέτρησης του χρόνου και κατ' επέκταση του εύρους ζώνης συχνοτήτων του δέκτη.

Οι στατικοί σαρωτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία γκάμα εργασιών, όπως για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων, για την γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της αρχαιολογίας, καθώς και την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων, σαν μια εναλλακτική πρόταση στις κλασσικές μεθόδους γεωδαισίας.

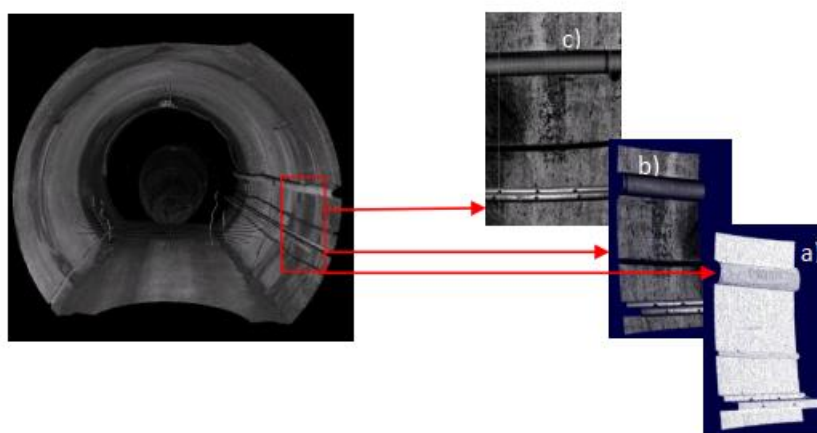
Εκτός από τους στατικούς υπάρχουν και οι **δυναμικοί σαρωτές**, οι οποίοι συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των στατικών σαρωτών με τη διαφορά ότι αφενός δεν απαιτούνται γνωστές στάσεις τοποθέτησης του σαρωτή και αφετέρου δεν υπάρχει το μεγάλο βάρος και ο όγκος των στατικών σαρωτών. Οι δυναμικοί σαρωτές συνήθως εδράζονται σε μία κινητή πλατφόρμα ή κρατιούνται στο χέρι. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν υπάρχουν στάσεις από τις οποίες γίνεται η σάρωση αλλά αυτή πραγματοποιείται κατά την κίνηση του συστήματος. Επομένως για τον καθορισμό



της τροχιάς τους σε ένα άγνωστο περιβάλλον συνήθως απαιτούνται πιο πολύπλοκα επιπρόσθετα συστήματα εντοπισμού θέσης, όπως δέκτες GPS και αδρανειακά συστήματα INS, τα οποία βεβαίως αυξάνουν και το κόστος απόκτησης. Παραδείγματα δυναμικών σαρωτών είναι οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές (airborne laser scanners), σαρωτές ενταγμένοι σε ένα κινούμενο όχημα (mobile laser scanners) ή σε ένα μη επανδρωμένο όχημα που ίπταται (UAV), ακόμη και σαρωτές χειρός όπως πρόσφατα έχουν κάνει την εμφάνισή τους οι σαρωτές τεχνολογίας SLAM (Quintero et al., 2008). Ιδιαίτερα η τεχνολογία SLAM θα αναπτυχθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 4.

Για την εκάστοτε εφαρμογή τρισδιάστατης σάρωσης πρέπει να γίνεται η κατάλληλη επιλογή παραμέτρων, όπως είναι η ανάλυση σάρωσης, το εύρος σάρωσης, η θέση κάθε σάρωσης, ο αριθμός και η θέση των στόχων αναφοράς κτλ. Επιπλέον, ορισμένα συστήματα σάρωσης είναι ευαίσθητα στις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η πυκνότητα του αέρα, ακόμη και η ανακλαστικότητα των αντικειμένων. Αυτές οι παράμετροι και παράγοντες πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά για να ληφθούν καλής ποιότητας δεδομένα σάρωσης.

Για τους περισσότερους σαρωτές διαφοράς φάσης, τα πρωτογενή δεδομένα σάρωσης περιλαμβάνουν και πληροφορία σχετικά με την ένταση, με αποτέλεσμα να μπορεί να ληφθεί η αντίστοιχη εικόνα έντασης τόσο σε 2D όσο και σε 3D, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αναγνώριση και τον προσδιορισμό των αντικειμένων με λεπτομέρεια. Η εικόνα 2.4 δείχνει τα πρωτογενή δεδομένα σάρωσης που συνήθως λαμβάνονται από έναν τέτοιο σαρωτή.



Εικόνα 2.4: Παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων από σαρωτή διαφοράς φάσης. a) Νέφος σημείων b) 3D εικόνα laser c) 2D εικόνα laser (Feng, 2012)

Οι σαρωτές πραγματικού χρώματος είναι ακόμη υπό ανάπτυξη, και προς το παρόν είναι δυνατή μόνο η σάρωση μικρών αντικειμένων, αλλά στην πράξη δεν είναι δυνατή η σάρωση μεγάλων επιφανειών. Ωστόσο, ως μια εναλλακτική λύση, πραγματοποιείται ο συνδυασμός δεδομένων σάρωσης με έγχρωμες φωτογραφίες σε κατάλληλο λογισμικό. Κατά τη σάρωση μιας επιφάνειας, λαμβάνονται έγχρωμες εικόνες από μια ψηφιακή κάμερα ταυτόχρονα, και στη συνέχεια οι έγχρωμες αυτές εικόνες σε συνδυασμό με τα δεδομένα του σαρωτή έχουν σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου με πραγματικά χρώματα (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Τρισδιάστατο μοντέλο υπόγειας εκσκαφής με πραγματικά χρώματα (Feng, 2012)

## 2.4 Παραγωγή νεφών σημείων

Η ανάγκη παραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων διαρκώς μεγαλώνει, δεδομένης της προώθησης ψηφιακού περιεχομένου σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών, με τις μεθόδους παραγωγής τους να γίνονται πιο εύκολες, γρήγορες, αποτελεσματικές και οικονομικές. Η τρισδιάστατη αποτύπωση επιφανειών όπως και άλλες εφαρμογές της φωτογραμμετρίας και άλλων επιστημονικών κλάδων, όπως για παράδειγμα της ρομποτικής και της υπολογιστικής όρασης, μπορούν να επιτευχθούν μέσα από τη παραγωγή πυκνών νεφών σημείων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα ικανών ακόμα και να περιγράψουν την πιο σύνθετη γεωμετρικά επιφάνεια. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία διεθνώς αναφέρονται αρκετές μέθοδοι και τεχνικές παραγωγής νεφών σημείων. Κυρίως αυτές χωρίζονται σε τεχνικές με βάση την εικόνα, δηλαδή την κλασική μέθοδο απόκτησης τρισδιάστατης πληροφορίας που ακολουθεί η φωτογραμμετρία, σε τεχνικές που έχουν ως βάση τους την μέτρηση της απόστασης, δηλαδή τη χρήση κυρίως συστημάτων σαρωτών, και τέλος σε τεχνικές που ουσιαστικά είναι συνδυασμός των δύο μεθόδων (Βέργος, 2015).

Τα νέφη σημείων που δημιουργούνται από τους σαρωτές είναι ένα σύνολο κορυφών σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταμένων. Οι κορυφές αυτές συνήθως ορίζονται από τις καρτεσιανές  $(x,y,z)$  και αντιπροσωπεύουν κάποιου είδους επιφάνεια. Τα νέφη σημείων χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και για σκοπούς απεικόνισης.

Μόλις ένα νέφος σημείων παραχθεί από τον σαρωτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του αντικειμένου, έτσι ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα των μετρήσεων καθώς και αν ολόκληρο το αντικείμενο έχει σαρωθεί. Παρόλο που η απεικόνιση των

νεφών σημείων είναι χρήσιμη στις περισσότερες εφαρμογές, τα περισσότερα έργα θα χρειαστούν περαιτέρω επεξεργασία για να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες όπως επιφάνειες, πυκνότητα σημείων κλπ. Για την πραγματοποίηση της κατάλληλης επεξεργασίας και επομένως την εξαγωγή αυτών των πληροφοριών, είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν ορισμένες επιπλέον δομές δεδομένων (octree κλπ. ) (Αναγνωστόπουλος, 2013).

## **2.5 Εφαρμογές μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης σε έργα μηχανικού**

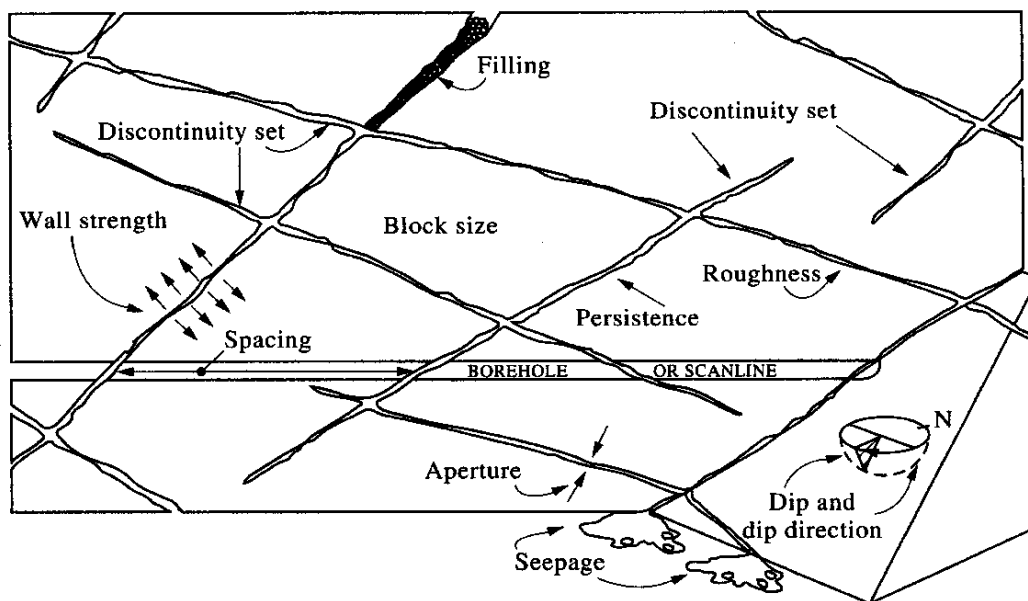
Η σάρωση με 3D laser παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και συνεπώς μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής σε διαφορετικά έργα της μηχανικής. Μερικές τυπικές εφαρμογές συνοψίζονται στη συνέχεια (Kajzar, et al., 2015, Wang, et al., 2014).

### **2.5.1 Χαρακτηρισμός βραχόμαζας**

Μία τυπική εφαρμογή της τρισδιάστατης σάρωσης laser είναι η διαδικασία χαρακτηρισμού ενός γεωλογικού σχηματισμού. Μέχρι και σήμερα, η χαρτογράφηση της επιφάνειας ενός σχηματισμού εκτελείται κυρίως με παραδοσιακές μεθόδους, με τη χρήση οργάνων όπως η γεωλογική πυξίδα με ενσωματωμένο κλισίμετρο για τη μέτρηση της τιμής και της φοράς της μέγιστης κλίσης των επιφανειών, η καταγραφή σε κάποιο σημειωματάριο, η λήψη μερικών φωτογραφιών για τεκμηρίωση κλπ.

Ωστόσο, η εφαρμογή της μεθόδου 3D σάρωσης με laser προσφέρει:

- i. Συλλογή δεδομένων χωρίς τη φυσική παρουσία του προσωπικού, συνεπάγοντας ελαχιστοποίηση του κινδύνου και των ατυχημάτων
- ii. Γρήγορη, πλήρης και ακριβής καταγραφή δεδομένων
- iii. Συλλογή τρισδιάστατων δεδομένων σε ψηφιακή μορφή, οπότε τα πρωτογενή δεδομένα υποβάλλονται σε άμεση επεξεργασία από υπολογιστικούς πόρους
- iv. Όλα τα δεδομένα, από τα πρωτογενή έως τα τελικά αποτελέσματα, μπορούν να αποθηκευτούν και να προσπελαστούν άμεσα, καθώς και να μετατραπούν από τη μία μορφή σε κάποια άλλη για χρήση σε διαφορετικά λογισμικά
- v. Τα πρωτογενή δεδομένα και τα αποτελέσματα μπορούν να ανακτηθούν και επομένως να ελεγχθούν, κάτι που καθιστά τα δεδομένα περισσότερο αξιόπιστα



Εικόνα 2.6: Παράμετροι χαρακτηρισμού βραχόμαζας (Hudson, 1989)

Για τον χαρακτηρισμό μιας βραχόμαζας με χρήση σαρωτή laser είναι απαραίτητο οι πληροφορίες να είναι επαρκείς έτσι ώστε κατ' ελάχιστο να αντικαταστήσουν την παρατήρηση in-situ και τη μέτρηση που λαμβανόταν με τις παραδοσιακές μεθόδους. Σε γενικές γραμμές, τέτοιου είδους πληροφορίες είναι:

- 1) Γεωμετρικές πληροφορίες  
Οι γεωμετρικές πληροφορίες αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για την ερμηνεία μίας αποτύπωσης, όπως για παράδειγμα είναι ο προσανατολισμός του ρήγματος, το μέγεθος των τεμαχών, η απόσταση των ασυνεχειών, η τραχύτητα των ασυνεχειών κτλ. Οι ψηφιακές μέθοδοι είναι σε θέση να συλλαμβάνουν τρισδιάστατα ψηφιακά δεδομένα και επομένως να παρέχουν τρισδιάστατες γεωμετρικές πληροφορίες.
- 2) Φυσικές πληροφορίες  
Τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας βραχόμαζας, όπως το είδος του σχηματισμού, οι μηχανικές του ιδιότητες, η αντοχή των τοιχωμάτων μιας στοάς, η πλήρωση των ασυνεχειών κτλ, αποτελούν βασικό συστατικό μίας χαρτογράφησης. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατό να συλλεχθούν μέσω έγχρωμων εικόνων και εικόνων έντασης laser, έχοντας ωστόσο περιορισμένη αξία στην εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων (πχ αντοχή)
- 3) Οπτικές πληροφορίες  
Οι οπτικές πληροφορίες, όπως έγχρωμες εικόνες και εικόνες έντασης, προέρχονται από κάμερες και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του τύπου των πετρωμάτων, τα σύνολα ασυνεχειών και τη διαρροή νερού.
- 4) Χωρικές πληροφορίες  
Οι χωρικές πληροφορίες μπορούν να παρέχουν τη θέση και τον προσανατολισμό μιας επιφάνειας στο χώρο, και μπορούν να ληφθούν με τις ψηφιακές μεθόδους μέσω μέτρησης ορισμένων σημείων αναφοράς, και στη συνέχεια τη μετατροπή τους σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς.

## 2.5.2 Ποιοτικός έλεγχος ανατίναξης της σήραγγας

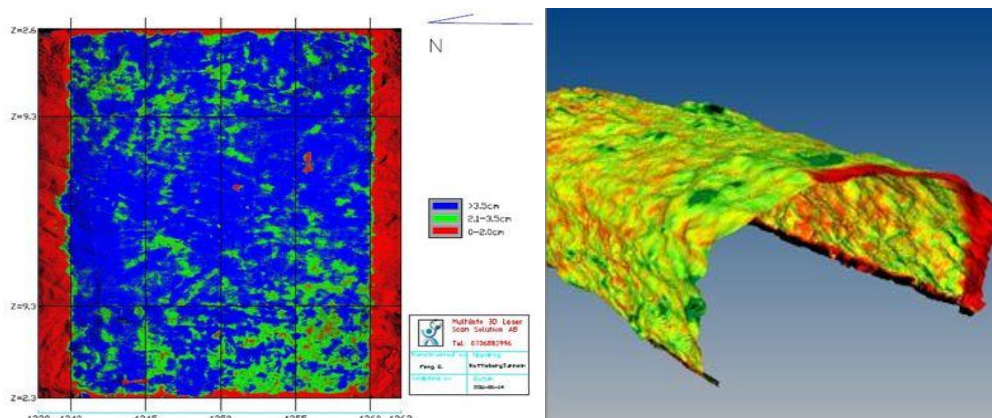
Κατά τη φάση κατασκευής μίας σήραγγας, ο πιο συνηθισμένος και οικονομικός τρόπος προχώρησης του μετώπου είναι με τη χρήση ανατινάξεων. Σε αυτή την περίπτωση, η μέθοδος των 3D σαρώσεων laser συνεισφέρει στα ακόλουθα:

### 1) Έλεγχος της ποιότητας της ανατίναξης της σήραγγας

Για μια νέα σήραγγα και κατά τη διάρκεια της περιόδου κατασκευής, είναι σημαντικό να ελέγχονται οι υπερ-εκσκαφές και οι υπο-εκσκαφές. Χρησιμοποιώντας σαρωτή laser, η ποιότητα της ανατίναξης μπορεί να παρουσιαστεί με ακρίβεια.

### 2) Έλεγχος του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντικό για την υποστήριξη μίας σήραγγας. Παραδοσιακά, ελέγχεται απλώς από ένα ραβδί επιλέγοντας τυχαία κάποια σημεία. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας την πλήρη κάλυψη δεδομένων σάρωσης από έναν σαρωτή laser, το πάχος του σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια και να παρουσιαστεί είτε σε 2D χάρτη είτε σε 3D μοντέλο (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που δημιουργήθηκε από τη σάρωση δεδομένων σε μία σήραγγα χάρτης (αριστερά) και τρισδιάστατο μοντέλο (δεξιά) (Feng, 2012)

## 2.5.3 Παρακολούθηση παραμορφώσεων

Μια βραχομάζα δύναται να παραμορφωθεί τόσο από τεχνητές όσο και από φυσικές δυνάμεις, όπως είναι σε μία σήραγγα η περίπτωση της εξόρυξης και του σεισμού αντίστοιχα. Τέτοιου είδους δυνάμεις μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή τόσο για τους ανθρώπους όσο και για τις εγκαταστάσεις. Ως εκ τούτου, μία από τις σημαντικότερες ενέργειες τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας τέτοιου είδους έργων (πχ σήραγγες, υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης, πρανή δρόμου) αποτελεί η παρακολούθηση των μικρο-μετακινήσεων και των παραμορφώσεων. Παραδοσιακά, η βραχομάζα παρακολουθείται μετρώντας τη μετατόπιση σημείων ελέγχου σε καθορισμένες θέσεις, οπότε η παρακολούθηση περιορίζεται σε αυτά τα επιλεγμένα μέρη, χωρίς να υπάρχει συνολικός έλεγχος και εποπτεία της πλήρους επιφάνειάς της.

Με τη χρήση σαρωτή laser, η επιφάνεια της βραχομάζας μπορεί να σαρωθεί με υψηλή πυκνότητα σημείων στο επίπεδο του χιλιοστού, ώστε η επιφάνεια να μπορεί να παρακολουθείται ως σύνολο και να είναι δυνατός ο έλεγχος παραμορφώσεων σε όλη την έκταση της επιφάνειας. Επίσης, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, η σάρωση με laser προσφέρει τη δυνατότητα τρισδιάστατης οπτικοποίησης των αντικειμένων και την αναγνώρισή τους, καθώς επίσης και την ερμηνεία των πιθανών αιτιών που προκάλεσαν την παραμόρφωση (πχ μέσω της σύγκρισης διατομών ή ακόμη και εμβადού και όγκου επιφανειών).

Αν και οι τεχνικές σάρωσης laser δείχνουν τη δυναμική παρακολούθησης παραμορφώσεων, εξακολουθεί να είναι δύσκολη η παρακολούθηση μικρών παραμορφώσεων και το σύστημα περιορίζεται σε μερικά χιλιοστά τόσο για σαρωτές μεγάλης εμβέλειας όσο και για σαρωτές μικρής εμβέλειας.

#### **2.5.4 Βελτίωση δεδομένων εισαγωγής για αριθμητική μοντελοποίηση**

Στον χώρο της μηχανικής, η αριθμητική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση και την προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός γεωλογικού σχηματισμού υπό ορισμένες γεωμετρικές, γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης, σε σχέση με την πραγματικότητα, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον καθορισμό των παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών. Επομένως, για τη διαδικασία της αριθμητικής μοντελοποίησης είναι σημαντικό να εισάγονται παράμετροι που περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Με τη μέθοδο της σάρωσης laser, τα δεδομένα εισόδου μπορούν να βελτιωθούν και τότε τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης είναι πιο κοντά στην πραγματική συμπεριφορά της βραχομάζας.

#### **2.5.5 Επιθεώρηση και ανάλυση στοών**

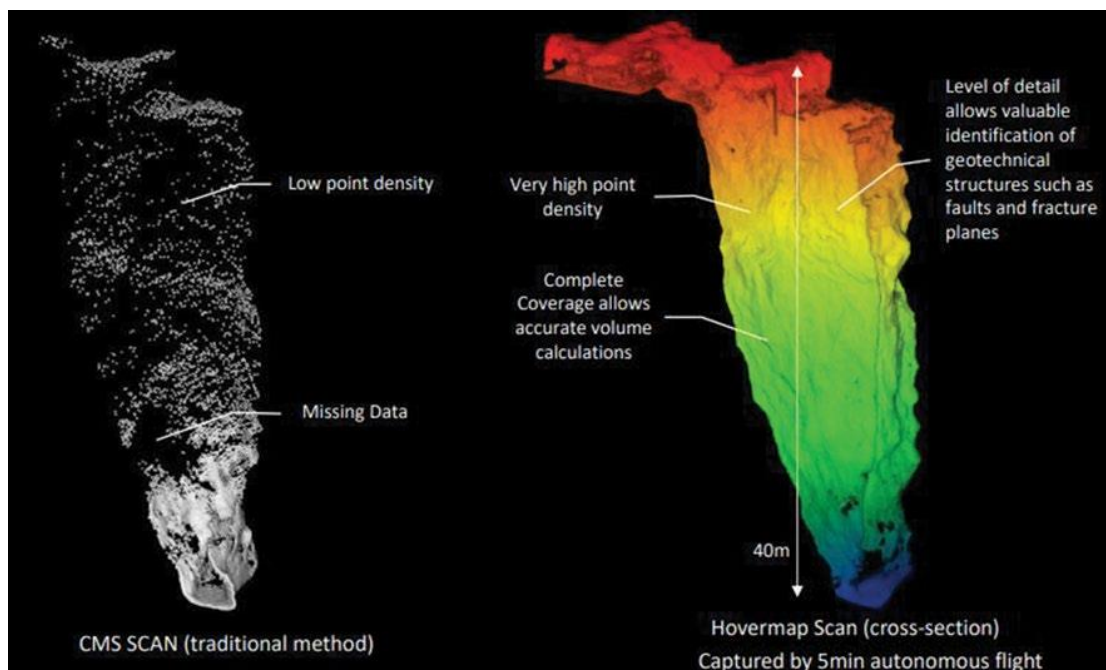
Κατά τη λήψη δεδομένων σε μια στοά, ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται όσο μειώνεται η έκθεση (από την άποψη τόσο της εγγύτητας όσο και της διάρκειας) του προσωπικού που πραγματοποιεί την επιθεώρηση κοντά ή μέσα στην στοά. Τα μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενα συστήματα παρακολούθησης (Cavity Monitoring Systems), ως επί τω πλείστον σε περιπτώσεις εξοφλήσεων, απαιτούσαν επιθεωρητές για πρόσβαση στη στοά όσο το δυνατόν πιο κοντά, έτσι ώστε ο σαρωτής του συστήματος να μπορεί να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο βαθιά στη στοά (πχ. με τη βοήθεια κονταριού-μπούμας). Ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί να εκθέσει το προσωπικό σε διάφορους κινδύνους, όπως ξαφνικές καταπτώσεις υλικού εντός της στοάς ή υποχώρηση του δαπέδου. Έπειτα, κατά την ολοκλήρωση της σάρωσης το προσωπικό πρέπει να ανακτήσει τον σαρωτή, με αποτέλεσμα να εκτίθεται στον κίνδυνο για ακόμη μία φορά.

Μία εναλλακτική λύση, με χρήση ειδικών drone, έχει αρχίσει να εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της νέας αυτής μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ασφαλή απόσταση από τη στοά, ελαχιστοποιώντας εντελώς τον κίνδυνο που ενέχουν οι παλαιότερες μέθοδοι. Η αποτελεσματικότητα της συλλογής δεδομένων βελτιώνεται καθώς η διάρκεια της ρύθμισης, της πτήσης και της



επιστροφής είναι συνήθως μικρότερη από 15 λεπτά. Τα αποτελέσματα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για μία εξέταση των συνθηκών της στοάς σε βάθος.

Σε γενικές γραμμές, η κατανομή των μετρήσεων είναι τέτοια που υπάρχει υψηλή πυκνότητα δεδομένων κοντά στον σαρωτή, και μειώνεται σταδιακά με την απόσταση. Η χωρική ανάλυση των δεδομένων στη μέθοδο CMS κυμαίνεται από μερικές χιλιάδες σημεία έως και ένα σημείο ανά τετραγωνικό μέτρο. Συγκριτικά, με τη μέθοδο της 3D σάρωσης laser με χρήση drone τα δεδομένα βρίσκονται σταθερά στο ανώτερο εύρος σε όλες τις περιοχές της στοάς. Ένα τέτοιο παράδειγμα εμφανίζεται στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Σύγκριση σαρώσεων μεταξύ της μεθόδου CMS (αριστερά) και της μεθόδου με drone (δεξιά) που απεικονίζουν το τελικό σχήμα μιας στοάς

Το νέφος σημείου υψηλής ανάλυσης που παράγεται από το drone δύναται να αξιοποιηθεί με πολλούς τρόπους και να παρέχει πληροφορίες, όπως είναι όγκοι εξόρυξης, αναγνώριση δομικών ιχνών και επιπέδων αστοχίας, διεύθυνση και κλίση βύθισης, τραχύτητα επιφανειών, αποστάσεις και μέγεθος ασυνεχειών.

Η ταχεία απόκτηση λεπτομερών νεφών σημείων οδηγεί στην υιοθέτηση ενός προγράμματος με πιο τακτικούς ελέγχους των στοών, με επικαιροποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων και αναγνώριση τυχόν ασταθειών και παραμορφώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί να περιγράψει τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων προκειμένου να παραχθούν τα ζητούμενα αποτελέσματα. Ο κύριος όγκος της επεξεργασίας αφορά στις διαδικασίες συνένωσης και γεωαναφοράς των νεφών σημείων.

#### 3.2 Συστήματα αναφοράς και σύνδεση νεφών σημείων

Ο μετασχηματισμός συντεταγμένων είναι μια μαθηματική διαδικασία, η οποία μεταφέρει τις συντεταγμένες ενός σημείου από ένα σύστημα συντεταγμένων στις συντεταγμένες του ίδιου σημείου σε ένα δεύτερο σύστημα συντεταγμένων. Οι μετασχηματισμοί συντεταγμένων από ένα δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) σύστημα σε ένα άλλο δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) σύστημα συντεταγμένων αντίστοιχα είναι μια διαδικασία ιδιαίτερα χρήσιμη. Οι μετασχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως δομικά εργαλεία του επιστημονικού αντικειμένου του τοπογράφου μηχανικού και αποτελούν βασικό στάδιο για όλες τις διαδικασίες, τόσο τις αναλυτικές όσο και τις σύγχρονες ψηφιακές (Βέργος, 2015).

Σε γενικές γραμμές, το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού σε δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) αντικείμενο μπορεί να ποικίλλει από μια απλή αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού, χωρίς αλλαγή στο σχήμα ή το μέγεθος, μέχρι ένα συντελεστή ενιαίας κλίμακας (δεν υπάρχει αλλαγή στο σχήμα), ή μέχρι και σε αλλαγές στο σχήμα και το μέγεθος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αρχικά οι απλές μαθηματικές αρχές των μετασχηματισμών στον τρισδιάστατο χώρο, έπειτα η γενικότερη μορφή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας και τέλος η ειδική περίπτωση του, αυτή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος που ενδιαφέρει ιδιαίτερος την παρούσα εργασία, καθώς αποτελεί τη μαθηματική περιγραφή του μοντέλου της συνένωσης των νεφών σημείων (Πατιάς, 1991, Καρράς, 1998).

Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στους συνηθέστερους μετασχηματισμούς στον δισδιάστατο και τρισδιάστατο χώρο, δίνοντας τελικά έμφαση στον μετασχηματισμό στερεού σώματος, δηλαδή τον μετασχηματισμό που βρίσκει εφαρμογή στην μέθοδο της τρισδιάστατης σάρωσης.

#### *Μετάθεση*

Όταν οι συντεταγμένες της αρχής του ενός τρισσορθογώνιου συστήματος ως προς τις αντίστοιχες συντεταγμένες αρχής ενός δεύτερου τρισσορθογώνιου συστήματος είναι μετατοπισμένες κατά  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ .



### Στροφή - Πίνακας $R$

Δύο τυπικά τρισσορθογώνια συστήματα στο χώρο συνδέονται συνήθως μεταξύ τους με τρεις στροφές και τρεις μεταθέσεις. Οι στροφές αυτές συνήθως ονομάζονται  $\Omega$ ,  $\Phi$ ,  $K$ , και αναφέρονται σε στροφές περί τους άξονες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  αντίστοιχα. Ο πίνακας στροφής  $R$  που θα παρουσιαστεί ουσιαστικά συνδέει τα δύο συστήματα περιγράφοντας τη σχέση μεταξύ τους, δηλαδή τις στροφές που πρέπει να υποστεί το δεύτερο σύστημα έτσι ώστε να γίνει παράλληλο με το πρώτο.

$$R_{\Omega\Phi K} = R_K * R_\Phi * R_\Omega = \begin{bmatrix} \cos \Phi \cos K & \cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K & \sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K \\ -\cos \Phi \sin K & \cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K & \sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K \\ \sin \Phi & -\sin \Omega \cos \Phi & \cos \Omega \cos \Phi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### Αλλαγή Κλίμακας

Όταν δύο συστήματα συντεταγμένων έχουν διαφορετική κλίμακα, τότε για τη μεταφορά από το ένα στο άλλο απαιτείται να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής κλίμακας  $m$  που ορίζεται από τον λόγο ενός μήκους στο δεύτερο σύστημα προς το αντίστοιχο στο πρώτο σύστημα.

### Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας

Ο μετασχηματισμός ομοιότητας είναι σύμμορφος, εμπλέκοντας 7 βαθμούς ελευθερίας, που εκφράζονται με τις εξής 7 παραμέτρους: 3 συνιστώσες  $X_0, Y_0, Z_0$  της μετάθεσης ( $t$ ) κατά τους τρεις (3) άξονες  $X, Y, Z$  αντίστοιχα, τρεις (3) στροφές κατά τις γωνίες  $\Omega, \Phi, K$  περί τους ίδιους άξονες  $X, Y, Z$  αντίστοιχα που στη συνέχεια συντελούν στη δημιουργία του πίνακα στροφής ( $R$ ), αλλά και τον συντελεστή ενιαίας κλίμακας ( $m$ ) κατά  $x$  και κατά  $y$  (Καρράς, 1998).

### Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος

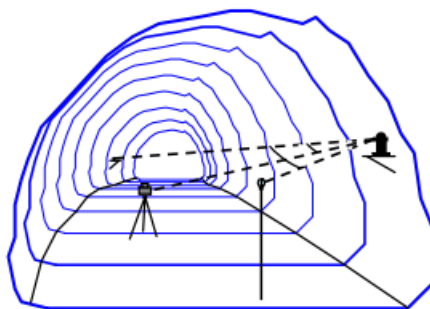
Ο προσδιορισμός της σχετικής θέσης δύο νεφών σημείων περιγράφεται μέσω του μαθηματικού μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D rigid body transformation). Από την σάρωση του αντικειμένου σε δύο διαφορετικές θέσεις προκύπτουν δύο νέφη σημείων, κάθε ένα από τα οποία θεωρείται ως στερεό σώμα, δεδομένου ότι μετά τον μετασχηματισμό αυτά δεν μεταβάλλονται κατά σχήμα και μέγεθος. (Κυπαρίσση, 2011). Γεωμετρικά το “στερεό σώμα” ορίζεται ως ένα τρισδιάστατο σημειοσύνολο  $XYZ$ , το οποίο μετασχηματιζόμενο, δεν μεταβάλλεται κατά σχήμα και μέγεθος (Καρράς, 1998).

Υπό τον παραπάνω ορισμό το πρόβλημα της συνένωσης νεφών σημείων μπορεί να περιγραφεί με το μαθηματικό μοντέλο του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος. Έχοντας ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με τους τρεις άξονες  $XYZ$ , ο μετασχηματισμός προκύπτει πως διαθέτει έξι (6) βαθμούς ελευθερίας εκφραζόμενους από έξι (6) παραμέτρους, πιο συγκεκριμένα: τρεις συνιστώσες  $X_0, Y_0, Z_0$  του διανύσματος της μετάθεσης ( $t$ ) κατά τους τρεις (3) άξονες  $X, Y, Z$  αντίστοιχα, τρεις (3) στροφές κατά τις γωνίες  $\Omega, \Phi, K$  περί τους ίδιους άξονες  $X, Y, Z$  αντίστοιχα που

στη συνέχεια συντελούν στη δημιουργία του πίνακα στροφής (**R**). Κάθε γνωστό σημείο και στα δυο συστήματα προσφέρει τρεις εξισώσεις, με αποτέλεσμα να χρειάζονται τουλάχιστον δύο σημεία για τον υπολογισμό των έξι συντελεστών του μετασχηματισμού που απαιτούνται. Παρ' όλ' αυτά δεν επαρκούν δύο σημεία για τον περαιτέρω υπολογισμό αλλά τρία σημεία κατ' ελάχιστο. Ο λόγος είναι πως με τη συμμετοχή στην επίλυση μόνο δύο σημείων παραμένει η στροφή περί την ευθεία που ορίζουν τα δύο σημεία που χρησιμοποιούνται, παραμένει δηλαδή ένας βαθμός ελευθερίας χωρίς δέσμευση (Κυπαρίσση, 2011).

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων μετασχηματισμού σε εφαρμογές υπόγειων έργων μπορεί να επιτευχθεί με 2 τρόπους:

Ο 1<sup>ος</sup> τρόπος απαιτεί την τοποθέτηση στόχων εντός του πεδίου εμβέλειας του σαρωτή και ο προσδιορισμός της θέσης του στο σύστημα αναφοράς του έργου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Στη φάση επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης, οι στόχοι επισημαίνονται εύκολα λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς του μέσω του λογισμικού που συνοδεύει το όργανο. Οι παράμετροι μετασχηματισμού προκύπτουν με βάση τις γνωστές συντεταγμένες των στόχων στα δύο συστήματα αναφοράς. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο σύγχυσης των στόχων με κοντινά αντικείμενα υψηλής ανακλαστικότητας, είναι αναγκαίο η διαδικασία αναγνώρισής του να επαληθεύεται από το χρήστη, τόσο κατά τη συλλογή, όσο και κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.



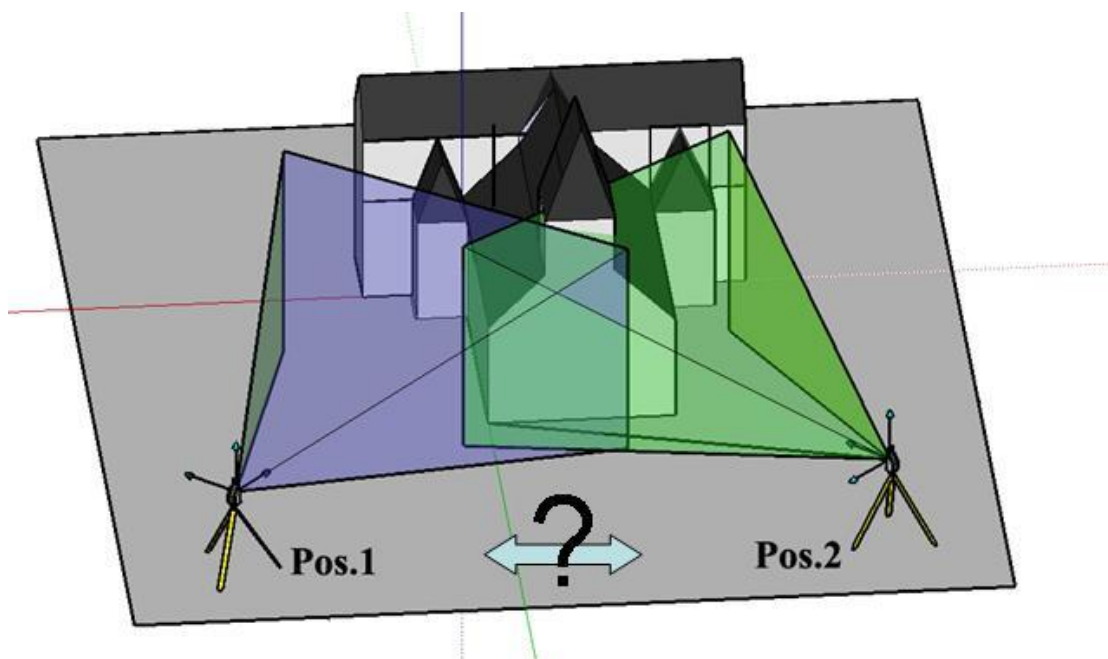
Εικόνα 3.1: Προσανατολισμός νέφους σημείων (Γκίκας, et al., 2007)

Ο 2<sup>ος</sup> τρόπος αφορά μία μεθοδολογία σύνδεσης “Fuzzy Join”, κατά την οποία τα γειτονικά νέφη σημείων συνενώνονται με τη βοήθεια ομόλογων σημείων, τα οποία είναι κοινά και στα δύο νέφη. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται το ποσοστό των κοινών σημείων να ανέρχεται κατ' ελάχιστον στο 20% του συνόλου των σημείων στα δύο νέφη.

### 3.3 Συνένωση νεφών επίγειων σαρώσεων

Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής απευθείας τρισδιάστατων συντεταγμένων μεγάλου πλήθους σημείων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα με σκοπό τη παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων. Όμως, όπως ήδη αναφέρθηκε, το αντικείμενο της σάρωσης συνήθως δεν μπορεί να σαρωθεί ολόκληρο από μια θέση. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η σάρωσή

του από πολλαπλές θέσεις για τη συνολική του τελική ανακατασκευή και την αποφυγή περιοχών με αποκρύψεις (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Συνένωση μεταξύ δύο θέσεων σάρωσης (Quintero et al., 2008)

Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ανεξάρτητα νέφη σημείων ευρισκόμενα κάθε φορά στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς του σαρωτή κατά τη σάρωση στην αντίστοιχη θέση. Για την ορθή αναπαράσταση του συνόλου των νεφών όλα αυτά τα τοπικά νέφη σημείων πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται συνήθως ως ταυτοποίηση ή συνένωση (registration, alignment). Η συνένωση νεφών σημείων του χώρου δηλαδή τρισδιάστατων νεφών (3D point cloud registration, 3D surface matching) αποτελεί τη συνολική διαδικασία και σειρά ενεργειών που ακολουθείται ώστε οι ανεξάρτητες σαρώσεις να ενταχθούν σε ένα ενιαίο – κοινό σύστημα αναφοράς. Ο καθορισμός αυτός της σχέσης μεταξύ δύο διαφορετικών τρισδιάστατων συστημάτων συντεταγμένων μέσω της χρήσης αντίστοιχων στοιχείων, τα οποία προέρχονται από μετρήσεις, αποτελεί το λεγόμενο ως απόλυτο πρόβλημα προσανατολισμού. Οι μέθοδοι της συνένωσης χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες, το οποίο εξαρτάται από τον τρόπο επίλυσης που θα επιλεγεί (Toldo et. al., 2010, Κυπαρίσση, 2011).

### 3.3.1 Άμεση μέθοδος

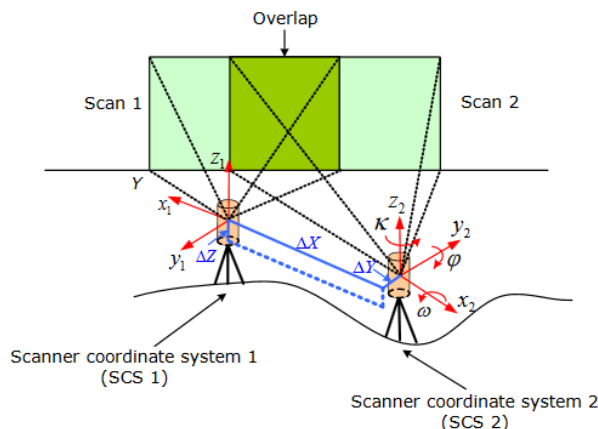
Άμεση συνένωση σημαίνει πως η θέση και ο προσανατολισμός του σαρωτή, και κατά συνέπεια και του παραγόμενου νέφους, υπολογίζεται άμεσα. Η άμεση μέθοδος μπορεί να ονομαστεί αλλιώς και γεωαναφορά, όπου η θέση της στάσης και ο προσανατολισμός του οργάνου είναι γνωστά, γεγονός το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να πραγματοποιήσει μετρήσεις κατευθείαν γεωαναφερμένες. Ο τρόπος απόκτησης της πληροφορίας για την γεωαναφορά ποικίλλει σε σχέση με τον εξοπλισμό και τις δυνατότητές του. Μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση ειδικών σημείων αναφοράς είτε με

την τοποθέτηση ενός δέκτη GPS στον σαρωτή. Αυτή η μέθοδος μειώνει τον αριθμό των στόχων που τοποθετούνται και έτσι αποφεύγεται και η απαιτητική διαδικασία παραμετροποίησης των στόχων κατά τη διάρκεια της εργασίας. Η ακρίβεια όμως με την οποία δίνεται η θέση του σαρωτή από τον δέκτη GPS εξαρτάται από τη μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί (RTK ή Static) Οι σαρώσεις σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζονται αλληλοεπικάλυψη (Quintero et al., 2008).

### 3.3.2 Έμμεση μέθοδος

Η έμμεση μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη και αναγνώριση στοιχείων συνταύτισης στα διαφορετικά τοπικά συστήματα συντεταγμένων. Η σχέση μεταξύ δύο συστημάτων σάρωσης δίνεται με ένα σύνολο έξι παραμέτρων, επομένως χρειάζονται τουλάχιστον 3 ομόλογα σημεία για την επίλυση. Σε κάθε περίπτωση θεωρείται απαραίτητο να υπάρχουν περισσότερες από τις ελάχιστες παρατηρήσεις για τον εντοπισμό σφαλμάτων του μετασχηματισμού. Σε αυτή την περίπτωση, είναι πολύ σημαντικό όταν πραγματοποιείται λήψη του αντικειμένου να μπορούμε να έχουμε αλληλοεπικάλυψη των σαρώσεων για να είναι δυνατή μετέπειτα η συνένωση των νεφών (Εικόνα 3.3). Συνηθίζεται να ορίζεται μία σάρωση ως «σάρωση αναφοράς» (reference scan) και με βάση αυτήν να γίνεται η ταυτοποίηση των νεφών. Για παράδειγμα στην εικόνα 3.3 που τίθεται ως σάρωση αναφοράς το scan 1, για να μεταφερθεί το scan 2 στις συντεταγμένες του scan 1 πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες παράμετροι (βαθμοί ελευθερίας):

- Τρεις μεταθέσεις: κατά άξονα  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$
- Τρεις τύπους στροφών: κατά  $\varphi$ ,  $\omega$  και  $\kappa$



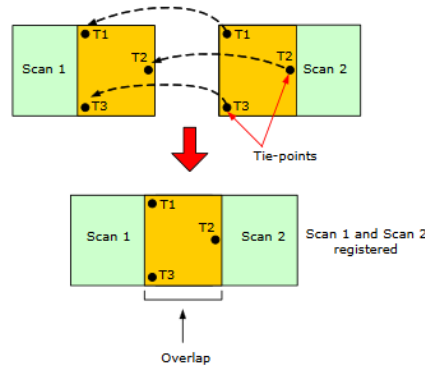
Εικόνα 3.3: Επικάλυψη σκαναρισμάτων και βαθμοί ελευθερίας για τη μετατροπή σε κοινό σύστημα συντεταγμένων (Reshetyuk , 2009)

Στην περίπτωση της έμμεσης μεθόδου υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για την πραγματοποίηση της συνένωσης ή ταυτοποίησης των διαδοχικών νεφών σημείων:

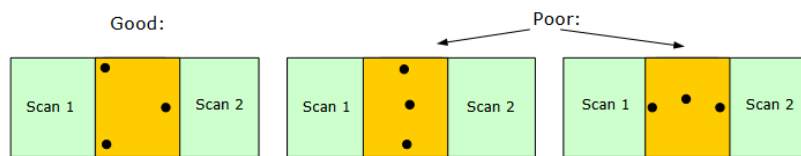
#### ✓ ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΜΕ ΑΚΡΙΒΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΣΗΜΕΙΩΝ

- Χρήση ειδικών στόχων που είναι ορατοί σε κάθε τρισδιάστατο νέφος σημείων (target based registration ή point to point)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, και αν η πρόσβαση το επιτρέπει, η έμμεση μέθοδος συνένωσης γίνεται με τη χρήση στόχων, σφαιρών ή τεχνητών προτύπων που αναγνωρίζονται από το όργανο σάρωσης και αποδίδουν υψηλής ακρίβειας μετρήσεις σε αυτά. Τα λογισμικά αυτού του είδους τη συνένωση την ονομάζουν “target to target” ή “point-to-point”. Για να γίνει η συνένωση απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία (στόχοι) τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται σε σημείο ορατό και από τις δύο σαρώσεις (overlap) (Εικόνα 3.4). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι στόχοι δεν πρέπει να βρίσκονται στην ίδια ευθεία (Εικόνα 3.5) (Reshetyuk , 2009).

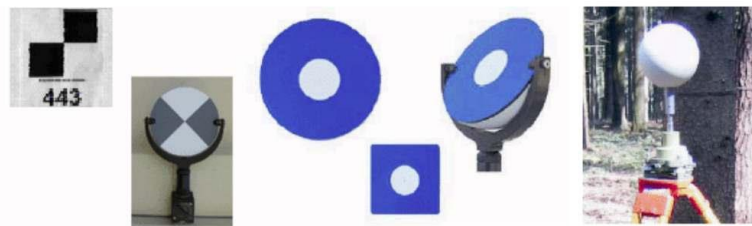


Εικόνα 3.4: Registration με τη χρήση στόχων. (Reshetyuk , 2009)



Εικόνα 3.5: Αριστερά απεικονίζεται μια καλή κατανομή στόχων (good) και δεξιά μια ελλιπής κατανομή στόχων (poor) (Reshetyuk , 2009)

Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται πρώτα με σφαίρες μετά με στόχους και τέλος με τυπωμένα πρότυπα ιδανικά κατανομημένα στον τρισδιάστατο χώρο. Το ακριβές σχήμα των στόχων διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή των οργάνων. Το κοινό χαρακτηριστικό που έχουν όλοι οι στόχοι είναι έντονη αντίθεση μεταξύ των στοιχείων του στόχου έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής εντοπισμός του κέντρου του στόχου χρησιμοποιώντας κάποια μορφή επεξεργασίας σήματος.



Εικόνα 3.6: Τεχνητοί Στόχοι και Σφαίρα ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

✓ ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΧΩΡΙΣ ΑΚΡΙΒΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΣΗΜΕΙΩΝ

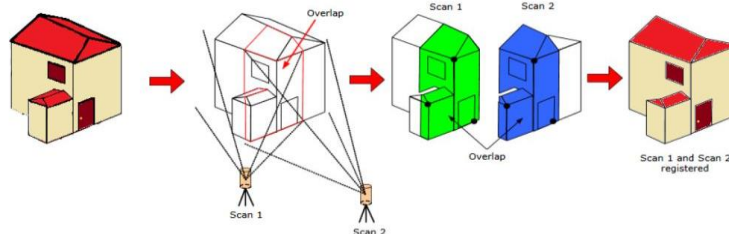
ii. Ταυτοποίηση με τη χρήση φυσικών στοιχείων (natural point features)

Κάποιες φορές δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση στόχων ή δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση επαρκών στόχων, έτσι γίνεται η χρήση φυσικών χαρακτηριστικών του προς σάρωση αντικειμένου, όπως είναι ακμές κτηρίων, γωνίες παραθύρων κτλ.

Αυτός ο τρόπος συνένωσης δύο νεφών σημείων (cloud to cloud) προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς επικάλυψης των νεφών. Αν τα δύο νέφη έχουν αρκετή επικάλυψη της τάξης του 30-40 % τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος ICP για τη συνένωση των σετ των δεδομένων (Quintero et al., 2008). Η τεχνική αυτή απαιτεί από το χρήστη να επιλέξει χειροκίνητα τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία στα προς συνένωση νέφη σημείων. Εφόσον τα σημεία αυτά ποτέ δεν θα είναι ακριβώς τα ίδια ο αλγόριθμος επαναληπτικά ελέγχει την απόσταση μεταξύ όλων των σημείων των νεφών και εκτιμά τον μετασχηματισμό έτσι ώστε να συνενώσει τα σύνολα των δεδομένων με το μικρότερο σφάλμα. Η χρήση της μεθόδου χρειάζεται προσοχή καθώς όταν σαρώνονται γραμμικές κατασκευές μεγάλου μήκους και χρειάζονται πολλές στάσεις τα μικρά σφάλματα σε κάθε ζεύγος συνένωσης μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλα καθολικά σφάλματα (Yuwei, et al., 2018).

iii. Ταυτοποίηση με ταίριασμα επιφανειών (surface matching)

Η μεθοδολογία συνένωσης νεφών “surface-to-surface” πραγματοποιείται μέσω της συνταύτισης των γεωμετρικών επιφανειών των δύο σαρώσεων (Gruen, 2006). Η μέθοδος αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία για οποιαδήποτε τρισδιάστατη συνταύτιση μιας επιφάνειας με άλλη, όπως και στατιστικά εργαλεία για την ανάλυση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η συνένωση επιφανειών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν οι σαρώσεις εμπεριέχουν σημαντικές ποσότητες θορύβου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι καλύτερο πρώτα οι ξεχωριστές σαρώσεις να καθαριστούν και να εναρμονιστούν έτσι ώστε να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία με τις απαραίτητες ρυθμίσεις. Όταν όλες οι σαρώσεις μετασχηματιστούν σε επιφάνειες μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος (Quintero et al., 2008, Moussa, 2014).



Εικόνα 3.7: Σάρωση κτηρίου από 2 πλευρές και συνένωση με surface matching (κοινές επιφάνειες είναι η μπλε και η πράσινη) (Reshetyuk , 2009)

iv. Χρησιμοποιώντας κοινά γεωμετρικά στοιχεία (common geometrical objects)



Μία άλλη μέθοδος συνένωσης των νεφών γίνεται με τη χρήση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (feature-based registration). Αυτά περιλαμβάνουν σημεία, γραμμές και επιφάνειες που μπορεί να υπάρχουν στο νέφος. Εκτός από τις γεωμετρικές πληροφορίες, κάποιες από αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούν και τις πληροφορίες έντασης ή χρώματος. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν και να υπολογίσουν τη σχέση μεταξύ δύο νεφών σημείων. Αυτή η σχέση, χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο πίνακας στροφής και το διάνυμα μετάθεσης μεταξύ των δύο νεφών, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων ανάμεσα στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

#### v. Ταυτοποίηση με χρήση εικόνων

Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες δείχνουν πως διακριτά ομόλογα στοιχεία μεταξύ των σάρωσεων μπορούν επίσης να εξαχθούν αυτόματα από τα δεδομένα σάρωσης με τη χρήση εικόνων που παρέχονται ταυτόχρονα με το νέφος σημείων από μηχανή πάνω στον σαρωτή ή χρήση εικόνων που παράγονται από την ένταση της ανάκλασης της ακτινοβολίας των τρισδιάστατων δεδομένων (εικόνες έντασης). Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την τρισδιάστατη πληροφορία των δεδομένων σάρωσης με την δισδιάστατη εικόνα χωρίς την απαίτηση για αρχικές τιμές της σχετικής θέσης των νεφών προς συνένωση. Τα αντίστοιχα στοιχεία μπορούν και εντοπίζονται με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους (Van Gool et. al., 2002, Κυπαρίσση, 2011, Johnson, 1997, Wu et al., 2008, Moussa, 2014).

### **3.4 Αλγόριθμοι υπολογισμού έμμεσης συνένωσης νεφών**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο κυριότερος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σήμερα για την έμμεση συνένωση νεφών, ο αλγόριθμος του εγγύτερου σημείου. Στόχος είναι να αξιολογηθούν και να εκτιμηθούν οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος, ώστε να μετασχηματιστούν και να συνενωθούν τα δεδομένα των σάρωσεων σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων με τα βέλτιστα αποτελέσματα. Εκτός από αυτόν τον αλγόριθμο, έχει χρησιμοποιηθεί και αλγόριθμος ελαχιστοτετραγωνικής επίλυσης (Αναγνωστόπουλος, 2013). Η μέθοδος υπολογίζει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού μεταξύ των τρισδιάστατων συστημάτων αναφοράς των τρισδιάστατων επιφανειών, με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Η ποσότητα που ελαχιστοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των δύο επιφανειών. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει πλέον εγκαταλειφθεί και δε θα γίνει αναφορά στην παρούσα εργασία.

#### **3.4.1 Ο Αλγόριθμος του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου**

Η χρήση αλγορίθμου ICP είναι μια μέθοδος προσαρμογής σημείου προς σημείο, και είναι ίδια μεθοδολογία όπως η συνόρθωση των τοπογραφικών δικτύων στη γεωδαισία. Ο ICP έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις διαφορές μεταξύ δύο

νεφών σημείων και η λειτουργία του είναι απλή. Η βασική αρχή του ICP είναι ότι μετασχηματίζει το ένα νέφος σημείων έτσι ώστε να εφαρμόζει όσο το δυνατόν καλύτερα στο άλλο ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων του ενός νέφους και των σημείων του άλλου νέφους. Ο αλγόριθμος του επαναληπτικά εγγύτερου σημείου χρησιμοποιείται για την εύρεση και εξαγωγή των παραμέτρων του μετασχηματισμού μεταξύ δύο συνόλων σημείων. Αυτά είναι το σημειοσύνολο αναφοράς και το δεύτερο προς μετασχηματισμό σημειοσύνολο. Δηλαδή ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τη συνένωση δισδιάστατων (2D) ή τρισδιάστατων (3D) σχημάτων (Wild, 2010).

Το έτος 1992, ο αλγόριθμος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Besl και McKay, ενώ αρκετές βελτιώσεις στη λειτουργία του έχουν προταθεί από τους Zhang (1992, 1994) και Chen & Medioni (1992). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ήταν και παραμένει ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος για την λύση του προβλήματος προσδιορισμού της συνένωσης νεφών και από την παρουσίασή του έως σήμερα οι σχετικές με αυτόν εφαρμογές, τροποποιήσεις και δημοσιεύσεις ακολουθούν αύξουσα πορεία. Σύμφωνα με το γεγονός αυτό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος φαίνεται να αποτελεί την βέλτιστη λύση για την επίλυση του προβλήματος της συνένωσης (Besl & McKay, 1992, Wild, 2010, Κυπαρίσση, 2011).

Ο ICP μπορεί να καλύψει και να εφαρμοστεί σε προβλήματα συνένωσης που αφορούν διάφορες γεωμετρικές οντότητες, όπως σημειοσύνολα, ευθείες, καμπύλες, πλέγματα τριγώνων και επιφάνειες. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις για τη λειτουργία του απαιτείται αρχικά η απλοποίηση των διάφορων γεωμετρικών οντοτήτων και περιγραφή τους σε σημεία, για παράδειγμα οι ευθείες από δύο κόμβους αυτούς της αρχής και του τέλους, τα τρίγωνα από τους κόμβους των κορυφών τους κ.ο.κ.

Ο ICP έχει καταστεί η κύρια μέθοδος για την συνένωση νεφών σημείων και τρισδιάστατων μοντέλων. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλές παραλλαγές και βελτιώσεις του αλγορίθμου, επηρεάζοντας είτε την επιλογή των σημείων είτε τη μέθοδο αντιστοιχίας τους.

Το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου ICP εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των σημείων. Η μείωση δεδομένων μειώνει και τον χρόνο που απαιτείται για τη συνένωση. Έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις με σκοπό τη μείωση των δεδομένων με διάφορες δειγματοληψίες, συμπεριλαμβανομένων των δειγματοληψιών randomized, uniform, normal-space και covariance. Η διαδικασία της μείωσης δεδομένων πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία της σάρωσης, δηλαδή της σφαιρικής και συνεχούς μέτρησης σημείων από το laser scanner. Η σάρωση περιέχει αρκετό θόρυβο και είναι πιθανό να συμβούν μικρά σφάλματα. Εμφανίζονται κυρίως δύο είδη σφαλμάτων: ο Γκαουσιανός θόρυβος (Gaussian noise) και ο λεγόμενος θόρυβος αλατιού και πιπεριού (salt and pepper noise). Ο τελευταίος, για παράδειγμα, εμφανίζεται στις άκρες, όπου η ακτίνα λέιζερ του σαρωτή χτυπά δύο επιφάνειες, με αποτέλεσμα την εξαγωγή μίας μέσης και λανθασμένης τιμής. Σε λανθασμένα δεδομένα οδηγούν επίσης και οι αντανakλάσεις, γι' αυτό και είναι αναγκαίο να εντοπίζονται και να αφαιρούνται. Χωρίς την εφαρμογή των απαραίτητων φίλτρων, μερικά μόνο ακραία σημεία μπορεί να οδηγήσουν σε πολλαπλά λανθασμένα ζεύγη σημείων κατά τη φάση της συνένωσης και σε λανθασμένη τρισδιάστατη συρραφή των νεφών (Βέργος, 2015).



### 3.5 Γεωαναφορά Νεφών Σημείων

Κατά τη σάρωση ενός αντικειμένου στο χώρο και την εισαγωγή του στον υπολογιστή δεν έχει τις πραγματικές του συντεταγμένες αλλά τις συντεταγμένες του εκάστοτε σαρωτή. Επίσης σε διαφορετικές περιόδους μέτρησης, η θέση και ο προσανατολισμός των σαρώσεων δεν είναι ίδια. Κάθε νέφος σημείων έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Συνεπώς πρέπει με κάποιο τρόπο τα νέφη σημείων να αναφερθούν σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς. Αυτό γίνεται με τη διαδικασία της γεωαναφοράς. Η διαδικασία αυτή είναι επίσης απαραίτητη για την ενσωμάτωση των σαρώσεων με άλλες γεωχωρικές πληροφορίες, όπως ψηφιακοί χάρτες ή ψηφιακά μοντέλα εδάφους (digital terrain model-DTM) (Reshetyuk , 2009).

**Γεωαναφορά** είναι η διαδικασία κατά την οποία το αντικείμενο ενδιαφέροντος μεταφέρεται σε ένα γνωστό σύστημα συντεταγμένων, είτε εθνικό είτε τοπικό. Στην ουσία όταν οι σαρώσεις εισαχθούν στο λογισμικό επεξεργασίας βρίσκονται σε τυχαία θέση στο χώρο και δεν έχουν τις πραγματικές τους συντεταγμένες, οπότε πρέπει με κάποιο τρόπο να υπάρξει ένα κοινό σύστημα αναφοράς. Η γεωαναφορά στα δεδομένα τριών διαστάσεων είναι σημαντικό να είναι αρκετά ακριβής για να είναι δυνατή η σύγκριση δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές χρονικές στιγμές (Ogundare , 2015).

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι γεωαναφοράς στα 3D δεδομένα:

1) Άμεση μέθοδος (direct method) με τη χρήση sensor driven

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι ότι έχει λιγότερο κόστος αλλά και ο χρόνος διεξαγωγής της είναι μικρότερος. Ένα ακόμα μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη σημείων αναφοράς κατά τη λήψη των σαρώσεων και ότι δεν χρειάζεται αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των σαρώσεων. Συνήθως σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα GPS, το οποίο τοποθετείται κοντά στον άξονα περιστροφής του σαρωτή λέιζερ οπότε ταυτόχρονα με τη διαδικασία σάρωσης λαμβάνονται και οι συντεταγμένες. (Schuhmacher & Böhm , 2005). Επίσης, εναλλακτικά ένας ειδικός ανακλαστήρας μπορεί και τοποθετείται στη κορυφή του σαρωτή στον κατακόρυφο άξονα περιστροφής του και να μετρηθεί με ένα γεωδαιτικό σταθμό. Πολλές φορές, το GPS από μόνο του δεν είναι ικανό να δώσει τον προσανατολισμό, τη κλίση και την έκθεση των σαρώσεων συνεπώς πρέπει να γίνει και η χρήση μιας πυξίδας και ενός κλινομέτρου (Böhm, 2006, Akmalia et al, 2013).

2) Έμμεση μέθοδος (indirect method) με τη χρήση data driven ή με τη χρήση control points

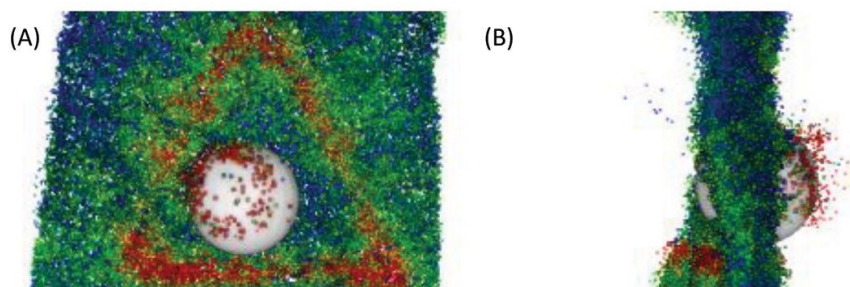
Η έμμεση μέθοδος σημαίνει ότι το νέφος σημείων μετασχηματίζεται μετά τη διαδικασία σάρωσης. Σε αυτή τη μέθοδο υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: τα σημεία ελέγχου (control points) και η data driven μέθοδος.

Η προσέγγιση με σημεία ελέγχου (**control points**) χρησιμοποιεί total station για να βρεθεί η θέση των σημείων ελέγχου στο πεδίο. Για τη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται

τουλάχιστον τρεις στόχοι που τοποθετούνται σε μη γραμμικό σχηματισμό πάνω ή κοντά στο προς σάρωση αντικείμενο ως σημεία ελέγχου. Κατά τη σάρωση αφιερώνεται λίγο επιπλέον χρόνος για τη σάρωση των σημείων ελέγχου, δημιουργώντας έτσι ένα υψηλής πυκνότητας νέφος σημείων γύρω από τον στόχο επιτρέποντας την εύκολη αναγνώρισή του κατά το στάδιο της επεξεργασίας. Αφού αναγνωρισθεί η περιοχή αυτή, αντιστοιχίζεται με το αντίστοιχο σημείο ελέγχου (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Μία σφαίρα-στόχος τοποθετημένη στο τοίχωμα σήραγγας



Εικόνα 3.9: (A) Τα αποτελέσματα από τη σάρωση μίας σφαίρας (B) Σφαίρες με υψηλή ανακλαστικότητα παράγουν υψηλά ποσοστά θορύβου, μειώνοντας την ακρίβεια της θέσης της σφαίρας (Jones, et al., 2019)

Στην προσέγγιση με τη μέθοδο **data driven**, η διαδικασία γεωαναφοράς πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας δεδομένα που είδη υπάρχουν, τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι κάποιο μοντέλο 3D ή το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Surface Model - DSM). Αυτή η διαδικασία γίνεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο επαναληπτικής προσέγγισης (ICP). Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται πολύ καλά σε υπόγεια μεταλλευτικά περιβάλλοντα καθώς σε κάθε εκσκαφή υπάρχει πλήθος γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τομών, στα οποία μπορεί να βασιστεί ο αλγόριθμος ICP. Συγκεκριμένα οι τομές που προκύπτουν περιορίζουν τους βαθμούς ελευθερίας του νέφους, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας της τελικής γεωαναφοράς. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, δεν απαιτείται η ύπαρξη σημείων ελέγχου και χρόνος για τη μέτρησή τους (Akmalia et al, 2013, Αγγελακοπούλου, 2018).

Σε κάθε περίπτωση, η ακρίβεια της τελικής γεωαναφοράς του νέφους σημείων επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η ανακλαστικότητα των επιφανειών σάρωσης και τα σφάλματα των οργάνων. Η επιλογή της καταλληλότερης

μεθόδου εξαρτάται μερικώς από την διαθεσιμότητα πληροφοριών και την ζητούμενη ακρίβεια της γεωαναφοράς (Jones, et al., 2019).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SLAM

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εξέλιξη των συστημάτων τρισδιάστατης σάρωσης και γίνεται αντιπαράθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης. Επίσης παρουσιάζεται η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, η οποία είναι σχετικά πρόσφατη στο χώρο αλλά εμφανίζει μεγάλη δυναμική και βρίσκει εφαρμογή σε συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εργασιών. Τέλος, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) τονίζοντας τόσο τα οφέλη όσο και τις δυσκολίες που εισάγουν στο χώρο της χαρτογράφησης.

### 4.2 Η τεχνολογία των κινητών συστημάτων σάρωσης laser

Τα 3D νέφη σημείων που παράγονται από τους στατικούς σαρωτές είναι αρκετά πυκνά ώστε να αποδίδουν τη χωρική κατανομή με μεγάλη λεπτομέρεια και να αποτυπώνουν τη γεωμετρία των αντικειμένων με υψηλή ανάλυση. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα τους σχετικά με την ακριβή αποτύπωση του περιβάλλοντα χώρου, ο χρόνος που απαιτείται για τη συλλογή δεδομένων και την επεξεργασία των νεφών σημείων, λόγω της στατικής τους φύσης, καθιστούν τη μέθοδο δύσχρηστη και χρονοβόρα σε ορισμένα περιβάλλοντα εργασίας.

Τα κινητά συστήματα σάρωσης (MLS-Mobile Laser Systems) συνδυάζουν την τεχνολογία σάρωσης laser με άλλους αισθητήρες, όπως είναι οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU), σε φορητό εξοπλισμό για ψηφιοποίηση ακόμη και σύνθετων περιβαλλόντων. Όσον αφορά την ποιότητα των δεδομένων, αυτές οι συσκευές προσφέρουν συνήθως ακρίβεια της τάξεως του εκατοστού και μια ανάλυση που εξαρτάται από την ταχύτητα απόκτησης των δεδομένων και την απόσταση από το αντικείμενο σε κάθε στιγμή. Αν και αυτές οι συσκευές είναι περισσότερο κατάλληλες για χρήση σε εσωτερικούς χώρους λόγω της μεγάλης παραγωγικότητας και αποτελεσματικότητάς τους, έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και σε περιπτώσεις εξωτερικού χώρου, πχ εφαρμογές στην πολιτιστική κληρονομιά και στον κατασκευαστικό κλάδο (Cabo, et al., 2018).

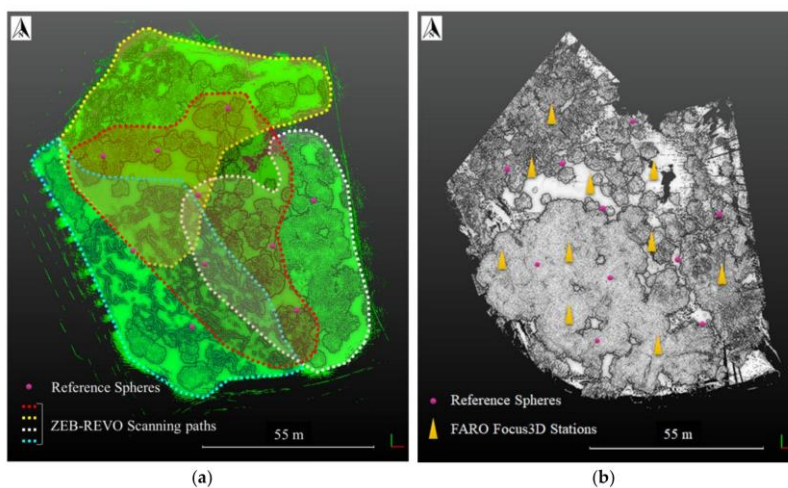
Η συλλογή δεδομένων με τα συστήματα MLS απαιτεί προκαταρκτική επιθεώρηση της περιοχής ενδιαφέροντος προκειμένου να προγραμματιστεί μια κατάλληλη διαδρομή για τη συλλογή δεδομένων, να γίνει ανίχνευση πιθανών εμποδίων (πχ δέντρα, αντικείμενα κ.λπ.) που θα επηρέαζαν τη σάρωση και να εντοπιστούν πιθανά δυσμενή σενάρια για την ευθυγράμμιση των νεφών. Το τελευταίο αφορά σε περιβάλλοντα που συνήθως στερούνται χαρακτηριστικών στοιχείων που βοηθούν την εκτίμηση της τροχιάς του αισθητήρα και συνεπώς την επιτυχή απόδοση των αλγορίθμων, όπως σε διαδρόμους ή σήραγγες όπου υπάρχουν επαναλαμβανόμενα στοιχεία.

Ο κυριότερος προβληματισμός που υπάρχει στην περίπτωση των κινητών συστημάτων σάρωσης είναι ότι προκειμένου να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο

ακρίβειας του τελικού προϊόντος, η τροχιά του φορητού σαρωτή λέιζερ πρέπει να είναι γνωστή με ένα ορισμένο επίπεδο ακρίβειας. Σε εξωτερικό περιβάλλον, αυτό επιλύεται με τη χρήση του GNSS. Ωστόσο σε εσωτερικό περιβάλλον η εμφάνιση τεχνολογιών όπως το SLAM, που δεν χρειάζονται το GNSS, έχει ανοίξει μια πόρτα για το MLS να χρησιμοποιείται σε χώρους που δεν υπάρχει επικοινωνία του δέκτη με το GNSS (πχ υπόγεια έργα) ή ακόμη και σε περιπτώσεις που οι δορυφορικοί αισθητήρες παύουν να λειτουργούν πλήρως, ιδιαίτερα σε περιόδους στρατιωτικής σύγκρουσης που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ορισμένες εφαρμογές ρομποτικής στρατολογικής σημασίας (Cabo, et al., 2018).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από ένα MLS (πχ το ZEB-REVO) υποβάλλονται σε αυτόματη επεξεργασία μέσω του κατάλληλου λογισμικού. Αρχικά, δημιουργούνται τρισδιάστατα μοντέλα για κάθε μεμονωμένη σάρωση. Στη συνέχεια, εάν είναι περισσότερες από μία σάρωση απαιτείται, μια διαδικασία ευθυγράμμισης και συνένωσης μεταξύ των διαφόρων νεφών σάρωσης για να ληφθεί το τελικό 3D μοντέλο. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να διασφαλιστεί επαρκής επικάλυψη μεταξύ των διαδοχικών σαρώσεων. Εάν χρησιμοποιείται ένα δίκτυο στόχων αναφοράς, τουλάχιστον τρεις κοινοί στόχοι πρέπει να καταγράφονται μεταξύ διαδοχικών σαρώσεων. Η εικόνα 4.1(a) δείχνει τις τμηματικές σαρώσεις που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μίας περιοχής μελέτης.

Από την άλλη, η ευθυγράμμιση των μεμονωμένων νεφών σημείων ενός TLS γίνεται με έναν τρισδιάστατο μετασχηματισμό, χρησιμοποιώντας το δίκτυο στόχων αναφοράς, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1(b). Σε αυτή την περίπτωση αναμένεται υψηλή τελική ακρίβεια, της τάξεως των μερικών mm, στις συντεταγμένες του κέντρου των στόχων αναφοράς.



Εικόνα 4.1: Αποτέλεσμα σάρωσης μίας περιοχής μελέτης με δύο σαρωτές (α) τον φορητό σαρωτή laser ZEB-REVO (WLS) και (β) τη συσκευή επίγεια σάρωσης laser FARO Focus3D (TLS) (Cabo, et al., 2018)

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί το πλεονέκτημα της χρήσης MLS έναντι συσκευών TLS ως προς τον χρόνο που απαιτείται για την απόκτηση δεδομένων και την επεξεργασία τους. Για σύνθετα σενάρια και μεγάλες περιοχές μελέτης, η τεχνολογία MLS επιτρέπει την επίτευξη ενός τελικού μοντέλου 3D στο μισό χρόνο που απαιτείται

κατά τη χρήση της τεχνολογίας TLS. Για απλούστερες ή μικρότερες περιοχές μελέτης, όπου απαιτείται μία διαδρομή MLS, ο χρόνος λήψης και επεξεργασίας δεδομένων μειώνεται στο ένα τέταρτο αυτού που απαιτείται από την τεχνολογία TLS (Cabo, et al., 2018).

### 4.3 Τι είναι το SLAM

Τα 3D δεδομένα έχουν πολλές εφαρμογές στη χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων, υπόγειων και σκηνών ατυχημάτων. Τα ακριβή δεδομένα είναι εξαιρετικά σημαντικά για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, είτε πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για αξιολόγηση ακινήτων, προσομοίωση ατυχημάτων, προγραμματισμό έκτακτης ανάγκης ή για τη δημιουργία 3D μοντέλων.

Ωστόσο, η απόκτηση 3D δεδομένων σε κλειστούς χώρους αποτελεί συχνά πρόκληση. Αν και τόσο η στατική όσο και η κινητή σάρωση laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή δεδομένων, το μεγαλύτερο εμπόδιο έγκειται στην απουσία του σήματος GNSS εξαιτίας του αποκλεισμού του σήματος ραδιοσυχνότητας (RF). Έτσι, οι συμβατικές τεχνικές χαρτογράφησης που βασίζονται στο σύστημα παγκόσμιου εντοπισμού θέσης δε μπορούν να εφαρμοστούν. Η χρήση των στατικών μεθόδων γεωδαισίας και χαρτογράφησης μπορεί να εφαρμοστεί για την απόκτηση ακριβών αποτελεσμάτων χαρτογράφησης σε εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι απαιτούν εκτεταμένη εργασία πεδίου και ότι έχουν χαμηλή απόδοση στις εργασίες χαρτογράφησης εσωτερικών χώρων και ενημέρωσης υφιστάμενου χάρτη ή μοντέλου.

Επομένως, παρόλο που η χρήση στατικών σαρωτών laser είναι σήμερα μια από τις επικρατέστερες μεθόδους για απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την γεωμετρία ενός αντικειμένου, σε πολλές περιπτώσεις η πραγματοποίηση μετρήσεων με τη χρήση τέτοιων οργάνων είναι πολύ χρονοβόρα λόγω του μεγάλου αριθμού σταθμών μέτρησης. Σφάλματα, όπως πχ τα ελλiptή μοντέλα 3D, συχνά προκύπτουν από την επιλογή ακατάλληλων σταθμών και την επακόλουθη ασυνέχεια της επιφάνειας του πλέγματος. Μία προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των παραπάνω αρνητικών παραγόντων, είναι η ανάπτυξη και η χρήση της τεχνολογίας SLAM.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM επιτρέπει τη συλλογή των δεδομένων μέτρησης παράλληλα με τη συλλογή των δεδομένων πλοήγησης. Η εφαρμογή κατάλληλων φίλτρων (πχ φίλτρα Kalman) επιτρέπει την ενσωμάτωση των παρατηρήσεων LiDAR (Light Detection and Ranging) με δεδομένα από άλλους αισθητήρες, όπως των αδρανειακών μονάδων IMU (Inertial Measurement Unit). Μαζί με τις μετρήσεις LiDAR, καθώς ο σαρωτής περνά μέσω του προς σάρωση περιβάλλοντος, η τρισδιάστατη τροχιά του αισθητήρα καταγράφεται βάσει της ενσωματωμένης μονάδας IMU (Wajs, et al., 2018). Το SLAM χρησιμοποιεί αισθητήρες για τη συλλογή ορατών δεδομένων (κάμερα) ή / και μη ορατών δεδομένων (RADAR, SONAR, LiDAR) με τα βασικά δεδομένα θέσης να συλλέγονται χρησιμοποιώντας τη μονάδα αδρανούς μέτρησης (IMU) (GIS Resources, 2020).

Η προέλευση του SLAM το έχει πει πιο πάνω μπορεί να εντοπιστεί από τη δεκαετία του 1980 και του 1990 όταν η βιομηχανία ρομποτικής δημιούργησε ρομπότ για τις βιομηχανίες. Οι μηχανικοί ήθελαν να αναπτύξουν ρομπότ με δυνατότητα πλοήγησης

στον χώρο του εργαστηρίου χωρίς να συγκρούονται στους τοίχους και άλλα αντικείμενα. Η ιδέα αυτή στη συνέχεια οδήγησε την ανάπτυξη των αλγορίθμων SLAM.

Η μέθοδος SLAM αναπτύχθηκε αρχικά από τους Hugh Durrant-Whyte και John J. Leonard (2006), οι οποίοι βασίστηκαν στις προηγούμενες εργασίες των Smith και Cheeseman (1985). Η διαδικασία ονομάστηκε αρχικά SMAL αλλά άλλαξε στη συνέχεια για να δώσει μία καλύτερη επίδραση. Στη ρομποτική χαρτογράφηση, ο ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM) είναι το υπολογιστικό πρόβλημα της κατασκευής ή ενημέρωσης ενός χάρτη ενός άγνωστου περιβάλλοντα χώρου, ενώ ταυτόχρονα γίνεται η παρακολούθηση της απόλυτης θέσης του δέκτη μέσα σε αυτό σε σχέση με τον χάρτη. Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων ενισχύεται η διαδικασία εντοπισμού αναγνωρίζοντας περιοχές από όπου έχει ξαναπεράσει σε προηγούμενη φάση το όργανο. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως διαδικασία κλεισίματος βρόχου (loop closing). Σε περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα κλεισίματος η εναλλακτική που χρησιμοποιείται είναι η τοποθέτηση τουλάχιστον 3 φωτοσταθερών σε κάθε τμήμα σάρωσης και η συνόρθωση τους πριν τη διαδικασία της συνένωσης. Το μειονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η μέθοδος γίνεται ημι-αυτόματη, με την έννοια ότι απαιτούνται ενέργειες του προσωπικού για την τοποθέτηση και τον εντοπισμό των στόχων στο νέφος σημείων (Κόρδιτς, 2017, GIS Resources, 2020).

Αμέσως μετά από την εμφάνιση της τεχνικής SLAM, έκαναν την εμφάνισή τους και οι πρώτες πιθανολογικές προσεγγίσεις (φίλτρα Kalman (KF), φίλτρα σωματιδίων (PF) και μέθοδοι μεγιστοποίησης προσδοκίας (EM)). Οι τρεις τεχνικές είναι μαθηματικές διαιρέσεις του επαναληπτικού κανόνα Bayes. Ο κύριος λόγος της δημοσιότητας αυτών των πιθανολογικών τεχνικών είναι το γεγονός ότι η «ρομποτική» χαρτογράφηση χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα και θόρυβο από τους αισθητήρες, και οι πιθανολογικοί αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα με τη μοντελοποίηση των διαφορετικών πηγών θορύβου και τις επιπτώσεις τους στις μετρήσεις (Aulinas, et al., 2008).

Η όλη διαδικασία αποτελείται από πολλά βήματα. Το βασικό ζήτημα είναι, χρησιμοποιώντας τον περιβάλλοντα χώρο του σαρωτή, να ενημερώνεται η θέση του. Ο σαρωτής laser λαμβάνει δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον του, από το οποίο εξάγονται χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Το όργανο μετρά τη θέση των χαρακτηριστικών αυτών με τη βοήθεια του Lidar. Όταν η θέση αλλάζει, π.χ. εξαιτίας ανθρώπινης κίνησης, η νέα κατά προσέγγιση θέση προσδιορίζεται μέσω της αδρανειακής πλοήγησης. Στη νέα θέση, εξάγονται εκ νέου χαρακτηριστικά από το περιβάλλον. Ο αλγόριθμος ταιριάζει τα νέα χαρακτηριστικά με τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν από προηγούμενες θέσεις, χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση τους για τη διόρθωση της νέας θέσης. Τα χαρακτηριστικά που δεν είχαν εντοπιστεί στην προηγούμενη φάση προστίθενται ως νέες παρατηρήσεις, ώστε να μπορούν να παρατηρηθούν ξανά αργότερα. Και ούτω καθεξής με κάθε νέα αλλαγή της θέσης. Ο αλγόριθμος SLAM χρησιμοποιεί μια επαναληπτική διαδικασία για τη βελτίωση της εκτιμώμενης θέσης με τις νέες πληροφορίες θέσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η επαναληπτική διαδικασία, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια θέσης. Αυτό απαιτεί περισσότερο χρόνο και έχει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος με παράλληλες δυνατότητες επεξεργασίας από τις κάρτες γραφικών (GPU).

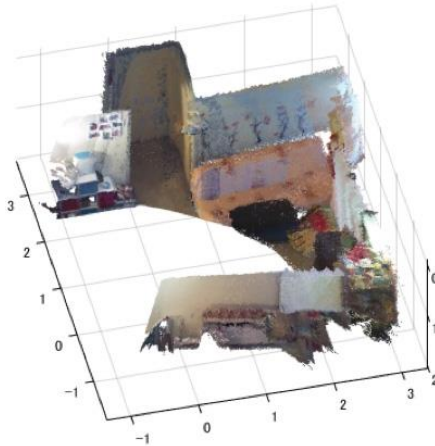
Αυτό μπορεί να ακούγεται απλό αλλά στην πραγματικότητα απαιτεί τεράστιους μαθηματικούς υπολογισμούς και επεξεργασία για τη συγχώνευση δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες (κάμερα, LiDAR και IMU) και την τοποθέτησή τους σε έναν χάρτη με πληροφορίες θέσης (Aulinas et al., 2008).

Για την κατανόηση της χρησιμότητας του SLAM είναι σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής του. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι οικιακές σκούπες ρομπότ. Χωρίς SLAM, θα κινείται απλά τυχαία μέσα σε ένα δωμάτιο και μπορεί να μην είναι σε θέση να καθαρίσει ολόκληρη την επιφάνεια του δαπέδου. Επιπλέον, σε αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιεί υπερβολική ισχύ, οπότε η μπαταρία θα εξαντληθεί πιο γρήγορα. Από την άλλη πλευρά, τα ρομπότ με SLAM μπορούν να χρησιμοποιήσουν πληροφορίες όπως ο αριθμός περιστροφών τροχών και δεδομένα από κάμερες και άλλους αισθητήρες απεικόνισης για να προσδιορίσουν την απαιτούμενη κίνηση. Αυτό ονομάζεται **εντοπισμός**. Το ρομπότ μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα την κάμερα και άλλους αισθητήρες για να δημιουργήσει έναν χάρτη των εμποδίων στο περιβάλλον του και να αποφύγει τον καθαρισμό της ίδιας περιοχής δύο φορές. Αυτό ονομάζεται **χαρτογράφηση**. Το SLAM είναι χρήσιμο σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως η πλοήγηση σε ένα στόλο κινητών ρομπότ για την τακτοποίηση ραφιών σε μια αποθήκη, τη στάθμευση ενός αυτοκινούμενου οχήματος σε κενό σημείο ή την παράδοση ενός πακέτου πλοηγώντας ένα drone σε ένα άγνωστο περιβάλλον (MathWorks, n.d., Ninot, 2017).

Η τεχνική του SLAM συνήθως συνεργάζεται με φωτογραφικούς αισθητήρες (πχ κάμερες), αισθητήρες εύρους (πχ ραντάρ) και Lidar ή κάμερες βάθους (πχ το Microsoft Kinect). Ανάλογα με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως Visual SLAM, Lidar SLAM και RGB-D SLAM, που είναι οι τρεις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές SLAM.

Το **Visual SLAM** (vSLAM), όπως υποδηλώνει το όνομα του, χρησιμοποιεί εικόνες που αποκτήθηκαν από κάμερες και άλλους αισθητήρες εικόνας για την απόκτηση ή τη συλλογή εικόνων του περιβάλλοντος χώρου. Το Visual SLAM μπορεί να χρησιμοποιεί απλές κάμερες (πανοραμική κάμερα 360 μοιρών, κάμερα ευρείας γωνίας και fish-eye), σύνθετες κάμερες (στερεοφωνικές και πολλαπλές κάμερες) και κάμερες RGB-D (κάμερες βάθους και κάμερες ToF) (Εικόνα 4.2). Η εφαρμογή του Visual SLAM είναι γενικά χαμηλού κόστους καθώς χρησιμοποιούν σχετικά φθηνές κάμερες. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι κάμερες παρέχουν μεγάλο όγκο πληροφοριών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ορόσημων (θέσεις που είχαν ήδη μετρηθεί). Τέλος, το «μονόφθαλμο» SLAM (monocular SLAM) είναι όταν το vSLAM χρησιμοποιεί μία μόνο κάμερα ως τον μοναδικό αισθητήρα, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον ορισμό του βάθους. Αυτό μπορεί να επιλυθεί είτε ανιχνεύοντας δείκτες AR, πίνακες ελέγχου ή άλλα γνωστά αντικείμενα στην εικόνα για εντοπισμό ή συγχωνεύοντας τις πληροφορίες της κάμερας με έναν άλλο αισθητήρα, όπως μονάδες αδρανειακής μέτρησης (IMU), οι οποίοι μπορούν να μετρήσουν φυσικές ποσότητες, όπως ταχύτητα και προσανατολισμό.

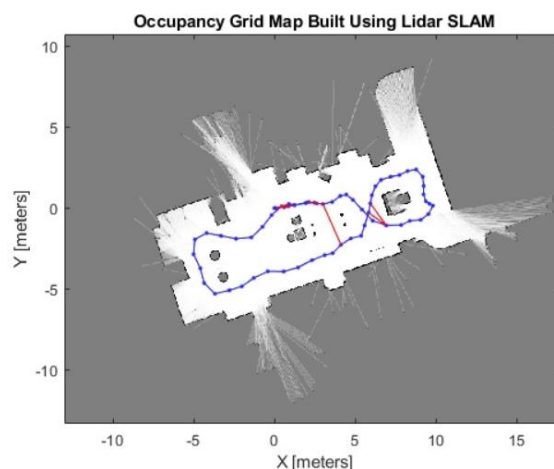




Εικόνα 4.2 Visual SLAM από RGB-D κάμερες  
(<https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>)

Το **Lidar SLAM** χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα laser (ή αισθητήρα απόστασης). Σε σύγκριση με το Visual SLAM που χρησιμοποιεί κάμερες, τα laser είναι πιο λεπτομερή και ακριβή. Ο υψηλός ρυθμός λήψης δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια επιτρέπει στους αισθητήρες Lidar να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, όπως κινούμενα οχήματα, drones και αυτοκινούμενα οχήματα. (Εικόνα 4.3). Τα δεδομένα εξόδου των αισθητήρων LiDAR που συχνά ονομάζονται νέφη σημείων και είναι διαθέσιμα σε μορφή 2D (x, y) ή 3D (x, y, z).

Το νέφος σημείων που παράγεται από αισθητήρα laser παρέχει μετρήσεις απόστασης υψηλής ακρίβειας και λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά για την κατασκευή χαρτών με τη βοήθεια αλγορίθμων SLAM. Από την άλλη πλευρά, τα νέφη σημείων δεν προσφέρουν όλη την πληροφορία μιας εικόνας, όσον αφορά την πυκνότητα, και δεν παρέχουν πάντα επαρκή χαρακτηριστικά για αντιστοίχιση, γι' αυτό συνήθως συνδυάζονται με μετρήσεις άλλων αισθητήρων. Για παράδειγμα, σε μέρη όπου υπάρχουν λίγα εμπόδια, είναι δύσκολο να ευθυγραμμιστούν τα νέφη σημείων και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της διαδρομής της θέσης του οχήματος.



Εικόνα 4.3 SLAM από 2D Lidar (<https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>)

Το **RGB-D SLAM** είναι ένα είδος SLAM που παρέχει εικόνες RGB με πληροφορίες βάθους, οι οποίες είναι σε κάποιο βαθμό ένας συνδυασμός κάμερας και αισθητήρα Lidar.

Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι SLAM που υποστηρίζονται από διαφορετικά τεχνικά μέσα. Ωστόσο, αυτό καθιστά δύσκολη την επιλογή της καλύτερης λύσης για μια δεδομένη εφαρμογή με περιορισμένο προϋπολογισμό (Yuwei, et al., 2018).

Περαιτέρω ταξινόμηση των αλγορίθμων SLAM μπορεί να γίνει με βάση το εργασιακό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα εσωτερικό χώρο, εξωτερικό χώρο, εναέρια ή υποβρύχια. Το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών έως σήμερα αφορούν κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, λιγότερες είναι οι αερομεταφερόμενες εφαρμογές και ακόμη λιγότερες παρουσιάζουν το SLAM σε υποβρύχια συνθήκες όπου γενικά λειτουργούν με ακουστικά δεδομένα.

Η μέθοδος SLAM που βασίζεται στην τεχνολογία laser έχει μεγαλύτερη εφαρμογή σε υπόγειους χώρους. Σε σύγκριση με τους οπτικούς αισθητήρες (πχ κάμερες), το Lidar παρέχει πληροφορίες μετρήσεων που είναι πιο αξιόπιστες, ακριβείς και σταθερές σε επίπεδο θορύβου και δεν είναι ευαίσθητες σε αλλαγές των συνθηκών φωτισμού και στις συνθήκες του περιβάλλοντος (πχ σκόνη). Ο μεγαλύτερος όγκος εργασίας στην περίπτωση του 3D laser αφορά στην αντιστοίχιση και τη συνένωση των παραγόμενων νεφών σημείων.

Σε αντίθεση με το 3D SLAM, το δισδιάστατο (2D) SLAM έχει χαμηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις και μπορεί να κατασκευαστεί χάρτης ακόμη και σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα του 2D SLAM είναι ότι στην περίπτωση μεγάλων διαδρόμων με μεγάλη ομοιότητα είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί η διαδικασία συνταύτισης με ακρίβεια, επειδή σε ένα επίπεδο σάρωσης υπάρχουν πολύ λίγα χαρακτηριστικά διαθέσιμα (Zhuli, et al., 2019).

#### **4.4 Σφάλματα αλγορίθμων SLAM**

Η ακρίβεια της τεχνολογίας σάρωσης laser 3D εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, εκ των οποίων οι σημαντικότεροι είναι το εύρος και η γωνιακή ακρίβεια του σαρωτή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις, όπως αυτή των υπόγειων έργων, που δεν υπάρχει σήμα από τα συστήματα GNSS, απαιτείται η χρήση άλλων αισθητήρων για την επίτευξη της ζητούμενης ακρίβειας. Γι αυτό λοιπόν το λόγο χρησιμοποιούνται όργανα, όπως οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU). Και σε αυτήν όμως την περίπτωση η ακρίβεια της τοποθεσίας από την IMU θα χειροτερεύει με την πάροδο του χρόνου. Επομένως απαιτείται η χρήση και ενός οργάνου μέτρησης απόστασης για τη διόρθωση της ακρίβειας πλοήγησης, το οποίο παρέχει μια κατεύθυνση των πληροφοριών απόστασης για την IMU που βοηθά στην ολοκληρωμένη πλοήγηση. Επομένως σε αυτή την περίπτωση, απαιτούνται κι άλλα μέσα για τη βελτίωση της ακρίβειας της πλοήγησης.

Ειδικότερα, για την κατανόηση της ακρίβειας μιας συσκευής SLAM, πρέπει να γίνει κατανόηση μιας βασικής διαφοράς στον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα TLS και MLS καταγράφουν δεδομένα.

Ένας **στατικός σαρωτής laser** συλλαμβάνει ένα περιβάλλον περιστρέφοντας έναν αισθητήρα laser σε 360° και λαμβάνοντας μετρήσεις. Δεδομένου ότι σκοπεύει από μια σταθερή θέση, κάθε μέτρηση που καταγράφει στο νέφος σημείων έχει ήδη οριστεί με ακρίβεια στο χώρο σε σχέση με τον σαρωτή.

Ένα **κινητό σύστημα χαρτογράφησης (MLS)** περιστρέφει επίσης έναν αισθητήρα laser σε 360°, αλλά όχι από μια σταθερή θέση. Κατά τη σάρωση εν κινήσει, μετακινείται και ο αισθητήρας ενώ περιστρέφεται. Αυτό προκαλεί σφάλματα ευθυγράμμισης για κάθε μέτρηση και υποβαθμίζει την ακρίβεια του τελικού νέφους σημείων.

Ένα παρόμοιο και καθημερινό φαινόμενο παρατηρείται κατά τη λήψη μιας νυχτερινής φωτογραφίας κουνώντας την κάμερα, με αποτέλεσμα να προκαλείται θόλωση. Ομοίως, με μία ματιά στα ανεπεξέργαστα δεδομένα από ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης πριν από την επεξεργασία τους από έναν αλγόριθμο SLAM, παρατηρείται ότι τα σημεία φαίνονται ακατάστατα και απλωμένα στον χώρο.

Ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διορθώνει αυτά τα σφάλματα ευθυγράμμισης και να παράγει ένα καθαρό και ακριβές νέφος σημείων. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται η τροχιά που καταγράφεται από τον αλγόριθμο SLAM. Αυτά τα δεδομένα του επιτρέπουν να προσδιορίζει τη θέση του σαρωτή τη στιγμή που καταγράφηκε κάθε μέτρηση και να ευθυγραμμιστούν αυτά τα σημεία με ακρίβεια στον χώρο.

Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια ενός συστήματος χαρτογράφησης που βασίζεται στην τεχνολογία SLAM εξαρτάται από πολλούς περισσότερους παράγοντες από ότι από την ακρίβεια του ίδιου του αισθητήρα, όπως από το πόσο καλά ο αλγόριθμος SLAM παρακολουθεί την πορεία του.

Για την ανάπτυξη αλγορίθμων SLAM που παρακολουθούν την τροχιά του οργάνου με ακρίβεια και παράγουν ένα νέφος σημείων υψηλής ποιότητας, οι κατασκευαστές ήρθαν αντιμέτωποι με την μεγάλη πρόκληση να διορθώσουν δύο βασικά είδη σφαλμάτων.

Το πρώτο ονομάζεται **σφάλμα εντοπισμού θέσης**. Το σφάλμα εντοπισμού συμβαίνει επειδή οι αλγόριθμοι SLAM αντιμετωπίζουν προβλήματα σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Ένας επιμήκης διάδρομος, για παράδειγμα, συνήθως στερείται των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στα οποία βασίζεται ένα SLAM, το οποίο μπορεί να προκαλέσει την απώλεια της τοποθεσίας του συστήματος.

Το δεύτερο είδος σφάλματος ονομάζεται **drift**. Το drift συμβαίνει επειδή ο αλγόριθμος SLAM χρησιμοποιεί τα δεδομένα των αισθητήρων για να υπολογίσει τη θέση του συστήματος και όλοι οι αισθητήρες προκαλούν σφάλματα μέτρησης. Λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν οι αλγόριθμοι SLAM, δηλαδή υπολογίζοντας κάθε θέση βάσει των προηγούμενων θέσεων, όπως σε μια πολυγωνομετρία, τα σφάλματα των αισθητήρων συσσωρεύονται κατά τη σάρωση. Αυτό προκαλεί την αλλοίωση της ακρίβειας της τροχιάς και την υποβάθμιση της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων.

Στα πρώιμα κινητά συστήματα χαρτογράφησης, αυτά τα σφάλματα επηρέαζαν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των τελικών δεδομένων. Τα καλά νέα είναι ότι τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης έχουν πλέον αναπτυχθεί και ωριμάσει από την εισαγωγή

τους στην αγορά. Οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει αλγόριθμους SLAM που μειώνουν αυτόματα τα σφάλματα εντοπισμού και μετατόπισης, ενώ ταυτόχρονα έχουν αναπτυχθεί και εργαλεία για τη διόρθωση σφαλμάτων με χειροκίνητο τρόπο με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας του τελικού αποτελέσματος.

Η πιο δημοφιλής διαδικασία για τη διόρθωση σφαλμάτων ονομάζεται **κλείσιμο βρόγχου**. Για την εκτέλεση ενός κλεισίματος βρόγχου, απαιτείται η επιστροφή σε ένα σημείο που έχει ήδη σαρωθεί, και ο αλγόριθμος SLAM αναγνωρίζει επικαλυπτόμενα σημεία. Αυτό δίνει στον αλγόριθμο όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για τον υπολογισμό τυχόν σφαλμάτων μετατόπισης ή εντοπισμού θέσης που έχουν συμβεί και πραγματοποιεί τις απαραίτητες διορθώσεις. Το κλείσιμο ενός βρόγχου μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία που αυτοματοποιεί το κλείσιμο μιας όδευσης.

Αν και το κλείσιμο βρόγχου είναι αποτελεσματικό σε μεγάλους χώρους όπως γυμναστήρια, εξωτερικούς χώρους ή ακόμη και σε μεγάλα γραφεία, ορισμένα περιβάλλοντα μπορεί να κάνουν το κλείσιμο βρόγχου δύσκολο (για παράδειγμα, οι επιμήκεις διάδρομοι). Για αυτές τις περιπτώσεις, τα πιο προηγμένα συστήματα χαρτογράφησης προσφέρουν μια δυνατότητα κλειδώματος των δεδομένων σάρωσης σε σημεία ελέγχου. Αυτή η διαδικασία είναι επίσης απλή και περιλαμβάνει την τοποθέτηση τοπογραφικών σημείων ελέγχου, όπως στόχους σκακιέρας, σε όλο τον χώρο που πρέπει να καταγραφεί. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι συντεταγμένες τους χρησιμοποιώντας ένα σύστημα με υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας από το σύστημα χαρτογράφησης, όπως ένας γεωδαιτικός σταθμός. Κατά τη σάρωση του χώρου, καταγράφονται και τα σημεία ελέγχου. Το σύστημα χαρτογράφησης χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να τοποθετήσει το νέφος σημείων στη σωστή θέση, να μειώσει το σφάλμα και να παράγει υψηλή ακρίβεια ακόμη και στα πιο δύσκολα περιβάλλοντα. Όταν η ακρίβεια είναι ύψιστης σημασίας, αυτή είναι η μέθοδος χρήσης (Youmei, et al., 2016).

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κανένα από τα δύο αυτά αντίμετρα το αθροιστικό σφάλμα, κυρίως σε περιπτώσεις επιμήκων σαρώσεων, είναι απαγορευτικό καθώς μπορεί για απόσταση 300 m να ξεπεράσει ακόμη και το 1.5 m.

Υπάρχουν διάφοροι σαρωτές laser διαθέσιμοι στην αγορά που χρησιμοποιούν το SLAM. Μία λύση προσφέρεται για παράδειγμα από το ZEB-REVO RT της Geoslam. Είναι ένας φορητός σαρωτής λέιζερ που συλλέγει και επεξεργάζεται δεδομένα σάρωσης, ταυτόχρονα εν κινήσει. Μια άλλη επιλογή έχει εισαχθεί από τη Leica, και συγκεκριμένα πρόκειται για τη φορητή λύση χαρτογράφησης Leica Pegasus: Backpack. Τέλος, συνεχώς και περισσότερες είναι οι εταιρίες που αναπτύσσουν τέτοιου είδους συστήματα, όπως η Kaarta που προσφέρει μια αυτόνομη λύση σάρωσης, το Stencil (The Pointscene Diaries, 2018).

## 4.5 Προκλήσεις για το SLAM

Παρόλο που το SLAM χρησιμοποιείται για μεγάλο πλήθος πρακτικών εφαρμογών, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκλήσεις που αποτρέπουν την ευρύτερη υιοθέτησή του, για τις οποίες ωστόσο υπάρχουν αντίμετρα με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να ξεπεραστεί το εμπόδιο. Οι κυριότερες προκλήσεις στην εφαρμογή της μεθόδου SLAM αφορούν:

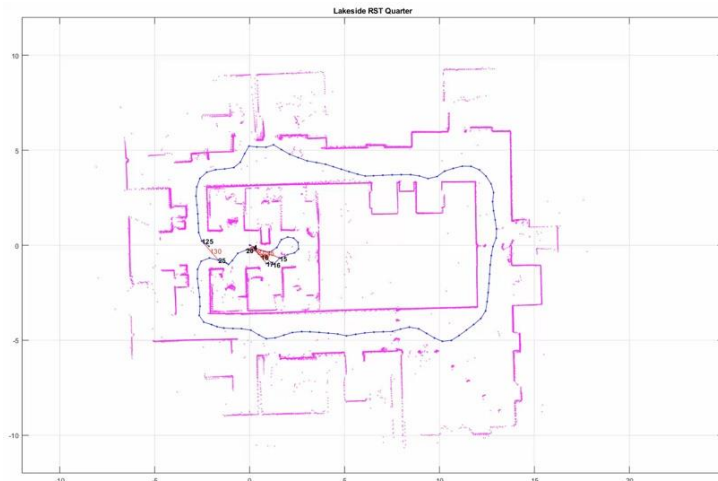
## 1. Συσσώρευση σφαλμάτων αισθητήρων, προκαλώντας σημαντική απόκλιση από τις πραγματικές τιμές

Το SLAM εκτιμά τη διαδοχική κίνηση, η οποία περιλαμβάνει κάποιο περιθώριο σφάλματος. Το σφάλμα συσσωρεύεται με την πάροδο του χρόνου, προκαλώντας τελικά σημαντική απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Μπορεί επίσης να προκαλέσει κατάρρευση ή παραμόρφωση των δεδομένων του χάρτη, καθιστώντας τις επόμενες αναζητήσεις δύσκολες. Για παράδειγμα, η οδήγηση γύρω από ένα τετράγωνο πέρασμα. Καθώς το σφάλμα συσσωρεύεται, το σημείο έναρξης και λήξης του ρομπότ δεν ταιριάζει πλέον. Αυτό ονομάζεται πρόβλημα κλεισίματος βρόχου (Εικόνα 4.4). Σφάλματα εκτίμησης θέσης όπως αυτά είναι αναπόφευκτα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ανιχνευθεί το κλείσιμο του βρόχου και να καθοριστεί ο τρόπος διόρθωσης του συσσωρευμένου σφάλματος.



Εικόνα 4.4: Παράδειγμα προβλήματος στο κλείσιμο βρόχου (<https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>)

Ένα μέτρο αντιμετώπισης είναι να ορισθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του χώρου ως ορόσημα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα εντοπισμού. Επιλύοντας την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορούν να δημιουργηθούν πιο ακριβή δεδομένα (Εικόνα 4.5) (MathWorks, n.d.).



Εικόνα 4.5: Γράφημα θέσης μετά από ελαχιστοποίηση του σφάλματος εντοπισμού (<https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>)

## 2. Αποτυχία εντοπισμού και απώλεια θέσης στον χάρτη

Η χαρτογράφηση μέσω εικόνας και νέφους σημείων δεν λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της κίνησης ενός ρομπότ. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτή η προσέγγιση μπορεί να δημιουργήσει ασυνέχειες στην εκτίμηση της θέσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ένα αποτέλεσμα υπολογισμού που δείχνει ότι ένα ρομπότ κινείται με ταχύτητα 1 m/s και πήδηξε ξαφνικά κατά 10 μέτρα. Αυτό το είδος αστοχίας εντοπισμού μπορεί να αποφευχθεί είτε χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ανάκτησης είτε συγχωνεύοντας το μοντέλο κίνησης με πολλούς αισθητήρες για να γίνουν οι υπολογισμοί με βάση τα δεδομένα του αισθητήρα.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη χρήση ενός μοντέλου κίνησης με συγχώνευση πληροφοριών αισθητήρα. Μια κοινή μέθοδος είναι η χρήση του φίλτρου Kalman για εντοπισμό θέσης. Δεδομένου ότι τα περισσότερα ρομπότ διαφορικής κίνησης και τα τετράτροχα οχήματα χρησιμοποιούν γενικά μη γραμμικά μοντέλα κίνησης, χρησιμοποιούνται συχνά εκτεταμένα φίλτρα Kalman και φίλτρα σωματιδίων (εντοπισμός Monte Carlo). Μερικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αδρανειακές συσκευές μέτρησης, όπως η IMU, Attitude and Heading Reference System ή AHRS, Information Network Systems ή INS, επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, και μαγνητικοί αισθητήρες. Οι αισθητήρες τροχών που συνδέονται με το όχημα χρησιμοποιούνται συχνά για την οδομετρία (MathWorks, n.d.).

## 3. Υψηλό υπολογιστικό κόστος για επεξεργασία εικόνας, νεφών σημείων και βελτιστοποίηση

Το υπολογιστικό κόστος είναι ένα πρόβλημα κατά την εφαρμογή της μεθόδου SLAM. Ο υπολογισμός εκτελείται συνήθως σε συμπαγείς και χαμηλής ενέργειας ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές που έχουν περιορισμένη ισχύ επεξεργασίας. Για την επίτευξη ακριβούς εντοπισμού, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί επεξεργασία εικόνας και ταίριασμα των νεφών σημείων σε υψηλή συχνότητα. Επιπλέον, οι υπολογισμοί βελτιστοποίησης, όπως το κλείσιμο βρόγχου, είναι υψηλής απαίτησης διαδικασίες υπολογισμού. Η πρόκληση είναι να βρεθεί ο τρόπος εκτέλεσης μιας τέτοιας, υπολογιστικά απαιτητικής, επεξεργασίας σε ενσωματωμένους μικροϋπολογιστές.

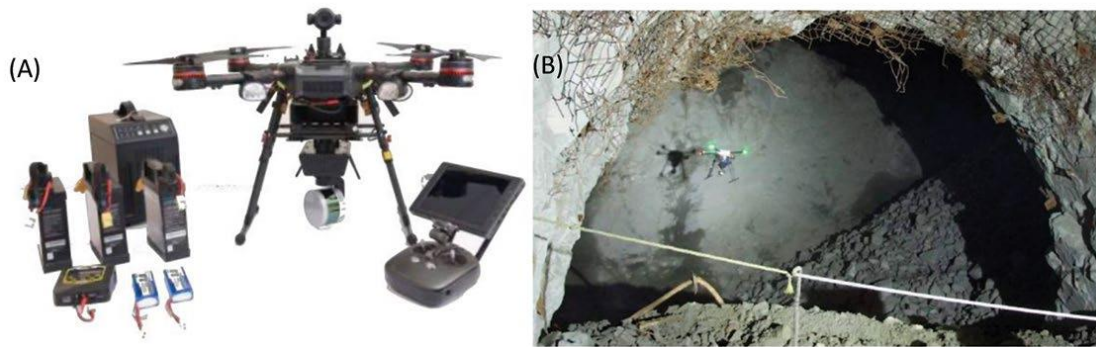
Ένα αντίμετρο είναι η παράλληλη εκτέλεση διαφορετικών διαδικασιών. Υπάρχουν αρκετές τέτοιες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα η εξαγωγή χαρακτηριστικών, η οποία είναι προεπεξεργασία της διαδικασίας αντιστοίχισης, οι οποίες είναι κατάλληλες για παράλληλη επεξεργασία. Η χρήση επεξεργαστών (CPU) πολλαπλών πυρήνων, η εκτέλεση μίας εντολής/διαδικασίας σε πολλαπλά δεδομένα ταυτόχρονα (SIMD) και η χρήση ενσωματωμένων GPUs μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τις ταχύτητες σε ορισμένες περιπτώσεις (MathWorks, n.d.).

#### **4.6 Εφαρμογή τρισδιάστατης σάρωσης με τη χρήση drone**

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, ο Οργανισμός Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας της Κοινοπολιτείας της Αυστραλίας (CSIRO) ήταν στην πρώτη γραμμή της έρευνας για τη βιομηχανική ρομποτική και την ανάπτυξη αλγορίθμων ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης 3D (SLAM) (Zlot and Bosse, 2012). Μία εξειδικευμένη ομάδα εντός του CSIRO δημιουργήθηκε για να συνδυάσει αυτές τις δύο διαδικασίες, επιτρέποντας την αυτόνομη πτήση drone σε περιβάλλον που δεν υπάρχει επικοινωνία με GPS. Τα αυτόνομα αυτά drones με βάση το SLAM ήταν τα πρωτότυπα για αυτό που είναι τώρα γνωστό ως Hovermap. Η Emesent, ένα παρακλάδι του CSIRO, έχει εμπορευματοποιηθεί την τεχνολογία αυτόνομων drone, χρησιμοποιώντας επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο αλγορίθμων 3D SLAM και αναπτύσσοντας την τεχνολογία της αυτονομίας των drone. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός νέφους σημείων υψηλής ανάλυσης του περιβάλλοντος χώρου κατά τη διάρκεια της πτήσης του drone κατά μήκος μίας διαδρομής για λόγους ανάλυσης και επιθεώρησης.

Το Hovermap, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6, είναι ένα φορητό σύστημα σαρωτή LiDAR που μπορεί να είναι τοποθετημένο κάτω από ένα drone, επιτρέποντας την αυτόνομη πλοήγησή του σε περιβάλλοντα χωρίς GPS. Αποτελείται από ένα Lidar πολλαπλών καναλιών, μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU) και ένα ενσωματωμένο υπολογιστή. Ο αισθητήρας LiDAR περιστρέφεται μηχανικά, παράγοντας ένα σφαιρικό οπτικό πεδίο. Για αναγνώριση της θέσης του αισθητήρα, το Lidar συνδυάζεται με μία αδρανειακή μονάδα (IMU). Τα δεδομένα IMU και τα αποτελέσματα Lidar επεξεργάζονται εν πτήση, σε πραγματικό χρόνο, με τη βοήθεια των αλγορίθμων SLAM με σκοπό την δημιουργία του νέφους σημείων του σαρωμένου περιβάλλοντος. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από τους αλγορίθμους SLAM αξιοποιούνται για την πλοήγηση του drone και την αποφυγή σύγκρουσης σε κάθε κατεύθυνση, για επιτόπου στάση του drone, και γενικότερα είναι απαραίτητη πληροφορία για τον προγραμματισμό πτήσεων σε περιβάλλοντα που δεν είναι δυνατή η επικοινωνία με τα συστήματα GNSS και σε σκοτεινά περιβάλλοντα, όπως δηλαδή αυτά που σχετίζονται με υπόγειες εργασίες εκμετάλλευσης.





Εικόνα 4.6: Το σύστημα αυτόνομης σάρωσης Hovermap σε (A) κατακόρυφο προσανατολισμό που χρησιμοποιείται για κατακόρυφες εκσκαφές και σε (B) οριζόντιο προσανατολισμό που προτιμάται για χρήση σε οριζόντιες εκσκαφές (Jones, et al., 2019)

Η απαιτούμενη διάρκεια σάρωσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων παραγόντων:

- Η περιοχή της συλλογής δεδομένων
- Η απαιτούμενη πυκνότητα του νέφους σημείων
- Η πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών της περιοχής σάρωσης
- Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του drone
- Οι πιθανοί περιορισμοί πρόσβασης

Οι ταχύτητες πτήσης σε υπόγεια περιβάλλοντα ποικίλλουν ανάλογα για το σκοπό της πτήσης, την ταχύτητα ροής του αέρα και την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος. Συνηθισμένες ταχύτητες πτήσης επί του παρόντος είναι 1-2 m/s. Ο ρυθμός απόκτησης δεδομένων είναι περίπου 300 MB / λεπτό. Μετά από τη σάρωση, τα δεδομένα μεταφέρονται σε υπολογιστή για την επεξεργασία τους και την διενέργεια του αλγορίθμου SLAM.

Η επεξεργασία SLAM πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Το **πρώτο στάδιο** συμβαίνει κατά τη διάρκεια της σάρωσης, παρέχοντας μια «τοπική» επίλυση. Αυτή η τοπική λύση παρέχει τη σχετική τοποθέτηση κάθε νέου νέφους σημείων σχετικά με τα προηγούμενα νέφη και χαρακτηριστικά. Αυτή η τοπική «εικόνα» του τρέχοντος περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παροχή πληροφοριών πλοήγησης του drone. Το **δεύτερο στάδιο** της επεξεργασίας SLAM πραγματοποιείται μετά τη σάρωση, σε ξεχωριστό υπολογιστή, παρέχοντας την ολοκληρωμένη λύση SLAM και το τελικό νέφος σημείων. Αυτή η ολοκληρωμένη λύση χρησιμοποιεί ένα σύνολο δεδομένων από την τοπική λύση SLAM, τη μονάδα IMU, τη διαδρομή πτήσης και την αναγνώριση χαρακτηριστικών σε ολόκληρη την έκταση της σάρωσης για να παραχθεί μία γεωαναφερμένη λύση με σωστή κλίμακα. Εάν πολλαπλές πτήσεις έχουν κάποια αλληλεπικαλυπτόμενη περιοχή, το λογισμικό επεξεργασίας συγχωνεύει με ακρίβεια τα τμήματα αυτά κατά την επεξεργασία της ολοκληρωμένης λύσης SLAM.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο μετάλλευμα του μαγνησίτη, στα παράγωγα προϊόντα του, στην προέλευσή του και στην ορυκτολογία του. Επίσης παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, στην οποία έγινε η εφαρμογή των μετρήσεων, όσον αφορά την τοποθεσία, την γεωλογία και την μεταλλοφορία της. Τέλος, γίνεται μία ιστορική αναδρομή στη μεταλλευτική δραστηριότητα της περιοχής και στον τρόπο εξόρυξης του μεταλλεύματος του λευκόλιθου από την ανακάλυψη του κοιτάσματος μέχρι σήμερα.

#### 5.2 Μαγνησίτης

Ο λευκόλιθος ή αλλιώς μαγνησίτης ( $MgCO_3$ ) είναι ένα ανθρακικό ορυκτό του μαγνησίου, παρόμοιος με τον ασβεστόλιθο, αλλά πολύ σπανιότερος. Ο ασβεστόλιθος είναι καθαρό ανθρακικό ασβέστιο ( $CaCO_3$ ), ο δολομίτης είναι μείγμα ανθρακικού ασβεστίου ( $CaCO_3$ ) και ανθρακικού μαγνησίου ( $MgCO_3$ ), και ο λευκόλιθος είναι καθαρό ανθρακικό μαγνήσιο ( $MgCO_3$ ). Είναι πολύ δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ των τριών αυτών ειδών ανθρακικών αλάτων. Έχει χρώμα άσπρο μέχρι ασπροκίτρινο, είναι σχετικά μαλακός, απορροφητικός και χημικά αδρανής, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 5.1.

Λευκόλιθος υπάρχει στην Αυστρία, στη Γιουγκοσλαβία και σε πολλά μέρη της Ελλάδας. Αποτελεί ένα από τα κυριότερα μεταλλεύματα της χώρας μας και είναι πολύ υψηλής ποιότητας. Θεωρείται από τους καλύτερους του κόσμου ενώ η ζήτηση του αυξάνει συνεχώς σε διεθνές επίπεδο. (TSIMILIOITIS, 2015, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π. και Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, n.d.).



Εικόνα 5.1: Λευκόλιθος (κρυπτοκρυσταλλικός μαγνησίτης), Βασιλικά Θεσσαλονίκης (www.orykta.gr)

### 5.3 Προϊόντα και χρήσεις μαγνησίτη

Ο μαγνησίτης στην αρχική του μορφή δεν έχει πολλές εφαρμογές όταν όμως ψηθεί βγαίνει το διοξείδιο του άνθρακα και μένει οξείδιο του μαγνησίου όπου αυτό ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία ψήνεται αποκτά διαφορετικές ιδιότητες, πχ κάτω από 800° C είναι πολύ ενεργό υλικό δηλαδή έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια περίπου 300, ενώ πάνω από τους 800° C πχ 1600° C γίνεται αδρανές και αποκτά πυρίμαχες ιδιότητες.

Τα προϊόντα της κατεργασίας του μαγνησίτη είναι η **καυστική** και η **δίπυρος μαγνησία** (Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών , Ε.Μ.Π. και Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, n.d.).

- Η **καυστική μαγνησία** (MgO) (caustic calcined magnesia), είναι το προϊόν, που παράγεται όταν θερμανθεί ο μαγνησίτης στους 800° C - 1200° C, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο τμήμα του CO<sub>2</sub> να απομακρύνεται, ενώ παραμένει 2-7% CO<sub>2</sub>, ανάλογα με τη θερμοκρασία ψήσιματος. Η **καυστική μαγνησία** (Εικόνα 5.2) χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή πυρίμαχων υλικών. Επίσης, χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία, ως χημικός επιταχυντής, στην κατασκευή ελαστικών, στη σωληνουργία, στη γεωργία ως βελτιωτικό εδαφών, στην παραγωγή ζωοτροφών και λιπασμάτων, στη φαρμακοβιομηχανία και τη βιομηχανία καλλυντικών και ως επιβραδυντικό φωτιάς σε καλώδια και ηλεκτρικές συσκευές. Παράλληλα έχει πολλές εφαρμογές στην περιβαλλοντική τεχνολογία, όπως στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη και ύδατα, στη διαχείριση και αδρανοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων και όξινων απορροών, στη σταθεροποίηση στερεών αποβλήτων κ.α.



Εικόνα 5.2: Καυστική μαγνησία ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr))

- Με περαιτέρω θέρμανση, πάνω από 1450° C (συνήθως 1800° C) για αρκετή ώρα παράγεται ένα συμπαγές, αδρανές υλικό που δε διαβρώνεται και χρησιμοποιείται ως πυρίμαχο υλικό, η **δίπυρος μαγνησία** ή πυρίμαχη μαγνησία, ή πλήρως καμένος (deadburned) μαγνησίτης, που έχει λιγότερο από 0,5% CO<sub>2</sub>. Η **δίπυρος μαγνησία** (Εικόνα 5.3) θεωρείται υψηλού βαθμού πυρίμαχο και χρησιμοποιείται κύρια στην κατασκευή πυρίμαχων πλίνθων (τούβλων). Επίσης χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό σωληνωτών

αντιστάσεων, στα μαγνησιακά φωσφορικά τσιμέντα και σε μονώσεις καλωδίων. Ο ορυκτολογικός όρος «περίκλαστο» χρησιμοποιείται στο εμπόριο για τη δίπυρη μαγνησία, η οποία έχει υψηλό περιεχόμενο σε MgO (οξείδιο του Μαγνησίου ή Μαγνησία).



Εικόνα 5.3: Δίπυρος μαγνησία ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr))

#### 5.4 Ο μαγνησίτης ως πρώτη ύλη

Ο μαγνησίτης, ως πρώτη ύλη, χρησιμοποιείται για πολλούς λόγους, εκ των οποίων οι σημαντικότεροι είναι: (Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π. και Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, n.d.)

- **Την παραγωγή μαγνησίου**

Το μαγνήσιο είναι μέταλλο που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαφρών κραμάτων για τις ατράκτους των αεροσκαφών, εξαρτημάτων μηχανών αερίωθησης, πυραύλων και βλημάτων, φωτογραφικών μηχανών και οπτικών οργάνων. Καθώς το μαγνήσιο καίγεται με ένα εκπληκτικό έντονο λευκό φως, χρησιμοποιείται στα πυροτεχνήματα και σε άλλες μορφές πυροτεχνικής, όπως οι φωτοβολίδες.

- **Σε βιομηχανίες όπως:**

Στη βιομηχανία χάλυβα, στη βιομηχανία θειικού οξέος, ζάχαρης, λιπασμάτων, υαλουργίας, φαρμάκων και γεωργικών φαρμάκων. Ως πληρωτικό υλικό στην παραγωγή χρωμάτων, χάρτου, πλαστικών και ελαστικών.

- **Στην παραγωγή πυρίμαχων υλικών όπως:**

Τα χρώμιο-μαγνησιούχα με την προσθήκη πυρίμαχου χρωμίτη ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 > 57\%$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 30\%$ ). Τα πυρίμαχα αυτά, έχουν ευρεία χρήση στην επένδυση εσωτερικών επιφανειών φούρνων.

- **Στη μεταλλουργία, ιδιαίτερα στην παραγωγή βιομηχανικών κραμάτων, όπως:**

- Ηλεκτρονικά μέταλλα με 90% Mg και 10% Al, Zn, Mn κ.α.
- Μαγνάλιο με 10-30% Al και 90-70% Mg
- Ντουραλουμίνιο με 0,5-2% Mg και το υπόλοιπο Al και λίγο Si

- Στην εξουδετέρωση ή κατακράτηση ρύπων



Εικόνα 5.4: Οι εφαρμογές του μαγνησίτη και των προϊόντων επεξεργασίας του ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr))

## 5.5 Γεωλογία των κοιτασμάτων του Ελληνικού χώρου

Τα κοιτάσματα λευκολίθου του Ελληνικού χώρου φιλοξενούνται σε υπερβασικά πετρώματα των οφιολιθικών συμπλεγμάτων. Τα πετρώματα αυτά μπορεί να είναι υγιή ή σερπετινωμένα. Δεν έχει παρατηρηθεί κάποια συστηματική σχέση ανάμεσα στο μετάλλευμα και στο είδος του υπερβασικού πετρώματος. Τα κοιτάσματα αναπτύσσονται συνήθως σε βάθη έως και 300m από την επιφάνεια, όπως έχει προκύψει από τις γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιήσει οι μεταλλευτικές εταιρείες.

Το μετάλλευμα του μαγνησίτη βρίσκεται κάτω από τεκτονικό έλεγχο, ακολουθώντας ρηξιγενείς γραμμές. Σε μεγάλο βάθος παρατηρούνται φλέβες πάχους αρκετών μέτρων, που ακολουθούν εφελκυστικά ρήγματα από θραυσιγενή τεκτονική. Το πάχος των φλεβών αυτών σταδιακά μειώνεται προς τα ανώτερα τμήματα, ενώ ταυτόχρονα ο αριθμός των φλεβών και φλεβιδίων μαγνησίτη αυξάνεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του μαγνησίτη είναι ότι γεμίζει κενό χώρο των φλεβών (open space filling), γεγονός που υποδηλώνει ότι αποτέθηκε κατά τη διάρκεια του ανοίγματος των φλεβών και της κυκλοφορίας ρευστής φάσης σε ένα εφελκυστικό πεδίο τάσεων. Γωνιώδη τεμάχια υπερβασικού πετρώματος είναι συνήθη μέσα στις φλέβες. Επίσης τεμάχια μαγνησίτη που αποτέθηκε σε πρώιμο στάδιο συγκολλώνται από μαγνησίτη που δημιουργήθηκε αργότερα (Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π. και Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, n.d.).





Εικόνα 5.5: Μετάλλευμα μαγνησίτη τύπου πλέγματος φλεβών (Stockwork) (λευκό χρώμα) σε υπερβασικό πέτρωμα (σκούρο χρώμα), (Βόρειος τομέας κοιτάσματος Γερορέματος Βορείου Ευβοίας) ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr))



Εικόνα 5.6: Φλέβα μεταλλεύματος μαγνησίτη (Βόρειος τομέας κοιτάσματος Γερορέματος Βορείου Ευβοίας) ([www.pilievia.gr](http://www.pilievia.gr))

Τα περισσότερα κοιτάσματα διαβρώθηκαν στα ανώτερα τμήματά τους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τεμάχια μαγνησίτη να εγκλωβισθούν σε χερσαίες ή ποταμοχειμάρριες κλαστικές αποθέσεις, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις κάλυψαν τα πρωτογενή κοιτάσματα.

Προς την επιφάνεια τα φλεβίδια γίνονται λεπτά και αλληλοτέμνονται ακολουθώντας τις επιφάνειες διακλάσεων του υπερβασικού πετρώματος, δημιουργώντας εντυπωσιακές μορφές «πλέγματος φλεβιδίων» (stockwork). Σε μία απλουστευμένη τομή κάθετη στη ρηξιγενή ζώνη το κοίτασμα θα έμοιαζε με βεντάλια. Κατά κανόνα τα κοιτάσματα μαγνησίτη δεν είναι παραμορφωμένα. Οι φλέβες σε ορισμένες περιπτώσεις τέμνονται από νεώτερα ρήγματα, τα οποία δεν μεταλλοφορούν.

Γενικά, τα κοιτάσματα μαγνησίτη εμφανίζονται σε 3 μορφές:

- Φλέβες πάχους 0,5 - 4 m (Εικόνα 5.6)
- Πλέγμα φλεβών (stockwork) που προκύπτει από τον κατακερματισμό του πετρώματος (Εικόνα 5.5)
- Ανώμαλοι όγκοι (σωροί) ως φακοί ποικίλων διαστάσεων, ενίοτε πολλών m<sup>3</sup>.

Επειδή κατά την εξόρυξη το μέταλλευμα αναμιγνύεται με τεμάχια του περιβάλλοντος πετρώματος απαιτείται εμπλουτισμός. Ο λευκόλιθος εμπλουτίζεται με χειροδιαλογή, επίπλευση, μαγνητικές μεθόδους ή με φωτομετρικό διαχωρισμό.

Ο λευκόλιθος συνήθως εξορύσσεται ή λατομείται κατά πλειοψηφία σε ορυχεία ανοιχτού χώρου (όπως στο Κάκαβο) Οι χαμηλές ποσότητες σε γενικές γραμμές κάνουν ασύμφορη την υπόγεια εξόρυξη. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμη ορισμένα υπόγεια ορυχεία λευκολίθου, κυρίως ιστορικά ορυχεία.

Στις μέρες μας, στην Ελλάδα, στον τομέα του λευκολίθου και των μαγνησιακών προϊόντων δραστηριοποιούνται οι εταιρείες «**Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.**» και «**ΤΕΡΝΑ ΛΕΥΚΟΛΙΘΟΙ Α.Ε.**», η οποία προσπαθεί να επαναδραστηριοποιήσει την παραγωγή μαγνησιακών προϊόντων στην περιοχή της Β. Ευβοίας, ως διάδοχο σχήμα της FIMISCO και της παλιάς BIOMAGN που λειτούργησε από το 1996 έως το 2000.

### **5.5.1 Γεωλογία της περιοχής μελέτης**

Σημαντικές εργασίες έχουν δημοσιευθεί για τα κοιτάσματα της Καλιφόρνιας, της Αυστρίας και της Γιουγκοσλαβίας. Ο ελληνικός χώρος έδωσε την ευκαιρία σε Έλληνες και ξένους γεωλόγους να μελετήσουν τις συνθήκες σχηματισμού του μαγνησίτη σε υπερβασικά πετρώματα. Παρά το γεγονός ότι σημαντικές εργασίες έχουν δημοσιευθεί την τελευταία εικοσαετία για τον τρόπο ανάπτυξης, την ορυκτολογία και τη γεωχημεία σταθερών ισοτόπων του μαγνησίτη, υπάρχει ακόμη διάσταση απόψεων για τον τρόπο γένεσης και τις γεωδυναμικές συνθήκες που ελέγχουν τη δημιουργία τους. Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης καθώς και ο μηχανισμός δημιουργίας των κοιτασμάτων μαγνησίτη στην περιοχή.

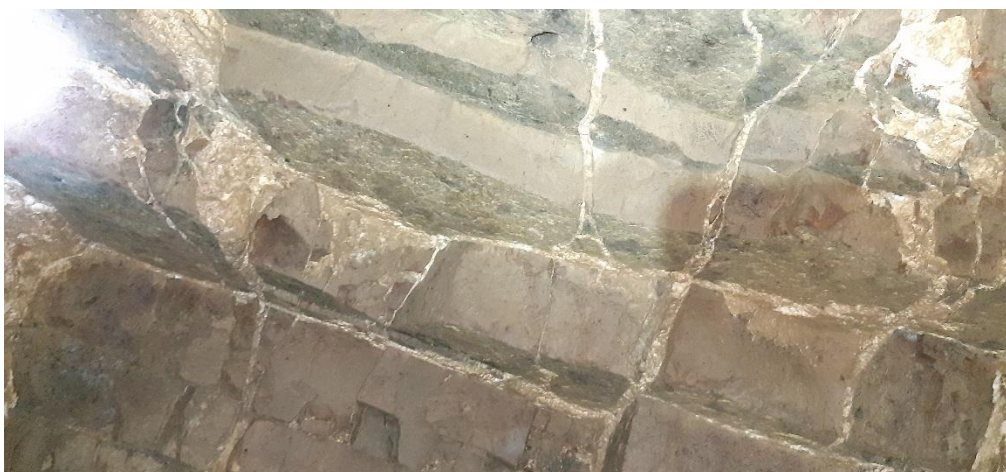
Το πέτρωμα στην περιοχή μελέτης (Πήλι Β. Εύβοιας) είναι οφιόλιθος, ο οποίος αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις περιδοτίτη, ψαμμίτη, αργιλοπυριτικών και άλλων υλικών και βρίσκεται στο ευρύτερο σύμπλεγμα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης της περιοχής.

Συγκεκριμένα, το πέτρωμα το οποίο συναντάται στην περιοχή και στο βάθος των μεταλλείων είναι κυρίως περιδοτίτης. Με την πάροδο των χρόνων, ο περιδοτίτης ανεβαίνει προς την επιφάνεια με αποτέλεσμα να εξαλλοιώνεται από την δράση των υδάτων και να μετατρέπεται σε σερπεντινίτη (καφέ απόχρωση), ο οποίος κοντά στην επιφάνεια αποσαθρώνεται και τελικά δημιουργείται ένας μανδύας αποσάθρωσης που γίνεται χώμα, το οποίο ευνοεί είναι αυτό που ευνοεί και την πυκνή βλάστηση της περιοχής (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7: Διάκριση περιδοτίτη, σερπεντινίτη και λευκόλιθου σε καρότο ερευνητικής γεώτρησης στην περιοχή του Πηλίου (Προσωπικό αρχείο)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που οι περιδοτίτες είναι από τα πιο παλιά πετρώματα της γης, φαίνεται να συναντώνται σχεδόν στην επιφάνεια, και όχι σε βάθος πολλών χιλιομέτρων όπως θα ήταν το αναμενόμενο. Επομένως, το γεγονός αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη μίας εποχής επώθησης του περιδοτίτη επάνω από τον ασβεστόλιθο. Κατά τη διαδικασία της επώθησης, ο περιδοτίτης θρυμματίστηκε, δίνοντας διακλάσεις και ρήγματα παρόμοιων διευθύνσεων. Το πέτρωμα στα σημεία των διακλάσεων ήταν δουνίτης (δηλαδή περιδοτίτης με πάνω από 90% ολιβίνη, με έντονο πράσινο χρώμα). Με την πάροδο του χρόνου, καθώς το νερό διείσδυσε στο πέτρωμα, εξαλλοιώθηκε ο ολιβίνης και μετατράπηκε σε περιδοτίτη. Στην περιοχή των διακλάσεων, κύλησε μεγαλύτερη ποσότητα νερού ξεπλένοντας τα περισσότερα υλικά, αφήνοντας το οξείδιο του μαγνησίου (δηλαδή τον μαγνησίτη). Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση ο μαγνησίτης αποτελεί κοίτασμα αντικατάστασης. Στην εικόνα 5.8 παρουσιάζεται μία τέτοια περίπτωση στο εσωτερικό της κεντρικής στοάς μεταλλείου, με τον μαγνησίτη να έχει δημιουργηθεί ενδιάμεσα στις στρώσεις του περιδοτίτη.



Εικόνα 5.8: Δημιουργία μαγνησίτη ως κοίτασμα αντικατάστασης



Ο μαγνησίτης συναντάται κυρίως σε δύο μορφές, ανάλογα με τον βαθμό μετατροπής του περιδοτίτη σε μαγνησίτη. Όταν ο βαθμός αυτός είναι μικρός τα αποθέματα συναντώνται υπό την μορφή ακανόνιστων φλεβιδίων μέσα στη μάζα του περιδοτίτη και ονομάζονται «stockwork», με την εκμετάλλευσή τους να είναι επιφανειακή. Αντίθετα, όταν ο βαθμός μετατροπής είναι μεγάλος τα αποθέματα συναντώνται σε φλέβες (φελόνια), με το πάχος του να είναι της τάξεως των λίγων μέτρων (πχ 2-3 μέτρα) (Εικόνες 5.9-5.10).



Εικόνα 5.9: Καρότο ερευνητικής γεώτρησης (Περιοχή Πηλίου) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 5.10: Φλεβίδια μαγνησίτη και stockwork στο εσωτερικό μεταλλείου

Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζεται μία ερευνητική γεώτρηση που πραγματοποιείται στην περιοχή μελέτης με σκοπό τον εντοπισμό της συνέχειας της μεταλλοφορίας μπροστά από το μέτωπο.





Εικόνα 5.11: Κεκλιμένη ερευνητική γεώτρηση στην περιοχή

## 5.6 Κοιτάσματα λευκολίθου στην Ελλάδα

Όλα τα πρωτογενή κοιτάσματα λευκολίθου της Ελλάδας απαντούν μέσα σε σερπετινωμένους περιδοτίτες. Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα βρίσκονται στη Χαλκιδική (Βάβδο, Πολύγωνο, Γερακινή, Σήμαντρα) και στην Εύβοια (Μαντούδι, Προκόπι, Λίμνη, Αφράτι, Βασιλικά). Μικρότερα κοιτάσματα απαντούν στη Λέσβο (Βασιλικά, Βουβάρι), στις Σέρρες (Νιγρίτα), στην Αταλάντη, στα Γρεβενά και στην Κοζάνη. Τα συνολικά αποθέματα στις υπόλοιπες περιοχές της Ελλάδας υπολογίζονται στους 500.000 tn.

Στη **Βόρεια Εύβοια** υπάρχουν δύο ζώνες κοιτασμάτων λευκολίθου, που έχουν συνολικό μήκος 30 χλμ. και πλάτος 16-20 χλμ. Η ανατολική ζώνη περιλαμβάνει τα μεταλλεία Μαντούδι, Γαλατάκι, **Πήλι** κ.τ.λ. ενώ η δυτική τα μεταλλεία Βαριά – Ρέμα, Τρούπι κ.ά. Στο Πήλι αλλά και στους πρώην οικισμούς Αγία Τρίτη και Λιβαδάκια, υπήρχε μεγάλη μεταλλευτική δραστηριότητα κυρίως προπολεμικά, αλλά και μεταπολεμικά. Σε αυτές τις τοποθεσίες γινόταν εξόρυξη, μεταφορά μεταλλείου με εναέρια και σταθερά βαγονέτα, επεξεργασία, αποθήκευση και ξανά μεταφορά με βαγονέτα μέσω της θαλάσσιας σκάλας που είχε κατασκευαστεί στην παραλία Πηλίου προς τα καράβια με τις μαούνες αλλά και προς τον όρμο του Ατάλαντου μέσω βαγονιών από τα Λιβαδάκια.

Το μεγαλύτερο κοιτάσμα λευκολίθου της Ελλάδας βρίσκεται στο χωριό Βάβδος της **Χαλκιδικής**. Ο λευκόλιθος απαντά εδώ, όπως και στις άλλες περιοχές της Χαλκιδικής, μέσα σε σερπετινωμένο περιδοτίτη υπό μορφή φλεβών πάχους 0,1m - 1,5m και υπό μορφή stockworks με πάχος φλεβιδίων 4 cm - 40 cm. Η εκμετάλλευση είναι επιφανειακή, με την περιεκτικότητα του πετρώματος σε  $MgCO_3$  να ανέρχεται περίπου σε 10%.

Μετά το πρώτο στάδιο του εμπλουτισμού, που γίνεται με χειροδιαλογή, ή με φωτοκύτταρα, ακολουθεί το κύριο στάδιο του εμπλουτισμού που βασίζεται στο διαφορετικό ειδικό βάρος του καθαρού λευκόλιθου ( $2,8gr*/cm^3$ - $3,1gr*/cm^3$ ) από τον μη αμιγή λευκόλιθο που περιέχει προσμίξεις  $CaCO_3$  και  $SiO_2$  και του οποίου το ειδικό βάρος, κυμαίνεται από  $2,5 gr*/cm^3$ - $2,7 gr*/cm^3$  (TSIMILLOTIS, n.d., Σχολή

### 5.6.1 Ιστορική αναδρομή κοιτασμάτων Β. Εύβοιας

Η ιστορία του λευκόλιθου ξεκινάει από πολύ παλιά, περί το 1790, και συγκεκριμένα από την Αυστρία, με τους Αυστριακούς να είναι οι πρώτοι που αναγνώρισαν τον λευκόλιθο σαν μέταλλευμα και ανακάλυψαν τις χρήσεις του. Ο εντοπισμός των πρώτων κοιτασμάτων έγινε σε δύο χωριά της Αυστρίας, στο Κράουμπαθ και στο Φάιτς.

Υπάρχουν δυο ειδών μαγνησίτες: τύπου Φάιτς και τύπου Κράουμπαθ, με τις ονομασίες να έχουν προκύψει σε κάθε περίπτωση από το ομώνυμο χωριό που βρέθηκε το κοιτάσμα. Ο μαγνησίτης **τύπου Κράουμπαθ** ή αλλιώς Λευκόλιθος (εξαιτίας του λευκού χρώματος του) είναι το είδος μαγνησίτη που απαντάται και στην Β. Εύβοια και υπερτερεί σε ποιότητα έναντι του μαγνησίτη τύπου Φάιτς. Ο μαγνησίτης **τύπου Φάιτς** έχει γκρι απόχρωση και έχει την ίδια χημική σύσταση με τον τύπου Κράουμπαθ. Ο μαγνησίτης τύπου Φάιτς είναι υποδεέστερης ποιότητας και καλύπτει σε παγκόσμια κλίμακα περίπου το 70% των κοιτασμάτων. Οι μαγνησίτες τύπου Φάιτς και τύπου Κράουμπαθ έχουν παρόμοιες ιδιότητες και παράγουν τα ίδια προϊόντα. Η διαφορά έγκειται στο ότι ο λευκόλιθος έχει καλύτερες ιδιότητες σε κάποια ιχνοστοιχεία και χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολύ εξειδικευμένων προϊόντων.

Από τότε οι αυστριακοί απέκτησαν το «know how» και αρχίσαν να πουλάνε προϊόντα μαγνησίτη σε όλο τον κόσμο. Μετά την επανάσταση του 1821, πολύ μεγάλες εκτάσεις της Εύβοιας κατέληξαν στην ιδιοκτησία των Άγγλων. Συγκεκριμένα ένα μεγάλο μέρος από την Χαλκίδα μέχρι περίπου την Αγία Άννα πουλήθηκε στον Noel, έναν Άγγλο βουλευτή. Ο Noel σε συνεργασία με τον αυστριακό Miler ήταν οι πρώτοι που αρχίσαν να κάνουν εξόρυξη και εξαγωγή λευκόλιθου στο εξωτερικό.

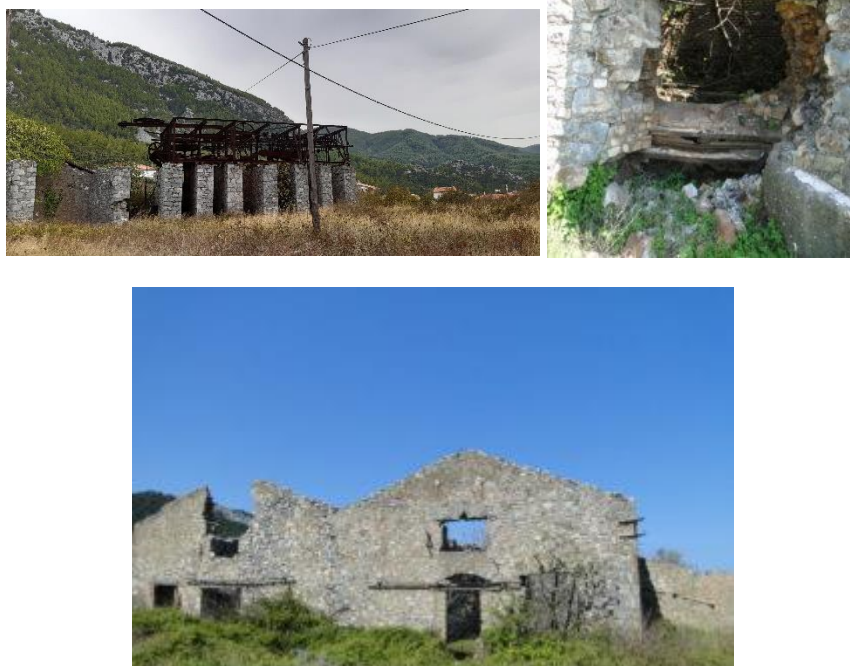
Στα πιο πρόσφατά χρόνια περίπου το 1910 και μέχρι περίπου το 1959 αυτοί οι οποίοι αγόρασαν όλα τα κοιτάσματα λευκόλιθου στην Ελλάδα δηλαδή στην Εύβοια, κοντά στο Πόρτο Χέλι, στην Λέσβο και στην Χαλκιδική ήταν μία εταιρεία αγγλικών συμφερόντων, επονομαζόμενη ως «Anglo-Greek Mining Co.», και βάσει συμφωνητικών της παραχωρήθηκαν, από το Ελληνικό Δημόσιο, οι εκτάσεις στην παραλία Πηλίου, για όσο διαρκούσαν οι εργασίες εξόρυξης και επεξεργασίας λευκόλιθου και ενώ εργάζεται σε αυτές εργατικό δυναμικό της περιοχής.

Στη συνέχεια, το 1959 τα μεταλλεία στην περιοχή της Εύβοιας τα αγόρασε ο κ. Λαμπρινίδης, πρόγονος του σημερινού ιδιοκτήτη κ. Πόρτολου. Ταυτόχρονα τα άλλα μεταλλεία στην περιοχή τα αγόρασε ο κ. Σκαλιστήρης, γνωστός στην ελληνική μεταλλεία. Από το 1960 μέχρι και το 1990 τα μεταλλεία της Ελλάδας ως επί το πλείστον ανήκαν στον κ. Σκαλιστήρη (Λευκόλιθος και Βωξίτες) και στον κ. Μποδοσάκη (Ελληνικός Χρυσός). Η βιομηχανική δραστηριοποίηση στον τομέα αυτό δημιούργησε πλήθος οικονομικών, πληθυσμιακών και κοινωνικών ανακατατάξεων στη βόρεια Εύβοια και ήταν σχεδόν αδιάκοπη κατά την πάροδο των δεκαετιών, με αποκορύφωμα τις δεκαετίες 1960-80, όπου ο κλάδος των εξορυκτικών-μεταλλευτικών επιχειρήσεων απέκτησε έναν ισχυρό ανταγωνιστή. Η σημαντική αυτή δραστηριότητα, άφησε πολύτιμα ίχνη στο πέρασμά της, κάποια ορατά, όπως βιομηχανικά κτήρια,

ορυχεία, συστήματα μεταφοράς, σκάλες φόρτωσης και άλλα που έχουν εγγραφεί στις μνήμες των ανθρώπων που έζησαν εκείνη την περίοδο, ενώ μαρτυρούνται και στα πάσης φύσεως οικονομικά, δημογραφικά και διοικητικά έγγραφα της εποχής. Εμφανή σήμερα είναι, επίσης, και τα σημάδια που άφησε αυτή η δραστηριότητα στο φυσικό ανάγλυφο της περιοχής.

Από το 1959 έως και σήμερα, η εταιρεία που ιδρύθηκε από τον Γ. Πόρτολο «**Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.**» υπάρχει από το 1959 και σήμερα αποτελεί τη μακροβιότερη ελληνική μεταλλευτική εταιρεία. Αντίθετα, για παράδειγμα τους βωξίτες τους έχει αγοράσει σχεδόν αποκλειστικά μια Γαλλική εταιρεία η IMERYS, η οποία έχει μεταλλεία σε όλο τον κόσμο και είναι η πρώτη σε μεταλλεία με βιομηχανικά ορυκτά παγκοσμίως. Τον Ελληνικό χρυσό τον έχει Καναδική εταιρεία, ενώ τον λευκόλιθο όπως αναφέρθηκε τον έχει ο Γ. Πόρτολος και τα τελευταία χρόνια αγόρασε κάποια μεταλλεία η ΤΕΡΝΑ. Οι εγκαταλελειμμένες εγκαταστάσεις (κτίρια, αποθήκες, φούρνοι κτλ) τόσο στην παραλία Πηλίου όσο και στον οικισμό της Αγ. Τρίτης, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 5.12, φαίνεται να ανήκουν στον ιδιώτη Γ. Πόρτολο, κατέχοντας μια ξεχωριστή θέση στην ιστορία της οικονομικής και μεταλλευτικής δραστηριότητας της περιοχής της Β. Εύβοιας και του Πηλίου ειδικότερα (GRECIAN MAGNESITE - Mining Industrial Shipping And Commercial SA, 2020).

Η «**Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.**» είναι η μοναδική παραγωγός μαγνησίας στην Ελλάδα. Αποτελεί την μεγαλύτερη εξαγωγική επιχείρηση λευκολίθου στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την μεγαλύτερη σε πωλήσεις καυστικής μαγνησίας παγκοσμίως. Η εταιρεία έχει ετήσια παραγωγή της τάξεως των 400-450.000 τόνων λευκολίθου και 180-200.000 τόνων τελικών προϊόντων (καυστική & δίπυρη μαγνησία, πυρίμαχες μάζες). Η νέα εταιρία «**ΤΕΡΝΑ ΛΕΥΚΟΛΙΘΟΙ Α.Ε.**» διαθέτει 14 κοιτάσματα λευκόλιθου στη Β. Εύβοια με βέβαια αποθέματα 15 εκατ. τόνους και άλλα 4 κοιτάσματα στη Χαλκιδική με βέβαια αποθέματα 450.000 τόνους.



Εικόνα 5.12: Εγκαταλελειμμένες εγκαταστάσεις μεταφοράς, αποθήκευσης και επεξεργασίας λευκολίθου στην περιοχή του Πηλίου (Προσωπικό αρχείο) ([www.pilievia.gr](http://www.pilievia.gr))

### 5.6.2 Διάρθρωση των μεταλλείων λευκολίθου

#### Ορυχεία

Τα ορυχεία εξόρυξης λευκόλιθου βρίσκονται στους ορεινούς όγκους του βορειοκεντρικού τμήματος της Εύβοιας. Αρχικά, η εξόρυξη γινόταν επιφανειακά, με τη χρήση πυρίτιδας και έπειτα ακολουθούσαν τη φλέβα σε βάθος μέχρι να εξαντληθεί, διανοίγοντας στοές, γνωστές ως γαλαρίες. Η εικόνα που παρουσιάζουν σήμερα τα περισσότερα ορυχεία είναι αποτέλεσμα της σύγχρονης μεθόδου εξόρυξης και πρόκειται για κρατήρες με διαμορφωμένους αναβαθμούς στην περιφέρεια αυτών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σταδιακή αποκατάσταση και η ένταξη των ορυχείων στο φυσικό περιβάλλον. Το παράδειγμα του ορυχείου στο Παρασκευόρεμμα Μαντουδίου που μετατράπηκε σε λίμνη από την εκτόνωση υπογείων ρευμάτων αποτελεί ένα μάθημα διαχείρισης της φυσικής και της ανθρωπογενούς κληρονομιάς. Ένα όχι ιδιαίτερα αξιόλογο “τεχνικό μνημείο” μετατράπηκε σε σημαντικό για το μικροκλίμα και την πανίδα, φυσικό μνημείο.





Εικόνα 5.13: Σημερινή εικόνα εισόδου κεντρικής στοάς ενός εκ των ορυχείων, περιοχή Πηλίου (Προσωπικό αρχείο)

### Συστήματα μεταφοράς

Η περίπτωση των εγκαταστάσεων εξόρυξης και επεξεργασίας λευκολίθου στην Εύβοια προσφέρεται για την παρακολούθηση των σημαντικότερων συστημάτων μεταφοράς του προϊόντος από το λατομείο στον τερματικό σταθμό. Τα συστήματα μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας των μεταλλείων, ήταν τα ακόλουθα:

1. Αρχικά η μεταφορά του προϊόντος από το ορυχείο γινόταν με βοϊδάμαξες και από το σιλό φορτωνόταν με καλάθια μέσα στα πλοία.
2. Γραμμή Decauville. Η μεταφορά από το ορυχείο στον τερματικό σταθμό επεξεργασίας του λευκολίθου γινόταν μέσω ενός δικτύου σιδηροτροχιών. Ατμομηχανές με καύσιμη ύλη το κάρβουνο κινούσαν τέσσερα φορτωμένα με λευκόλιθο βαγόνια, ενός τόνου. Αργότερα, κατά τη δεύτερη δεκαετία του 20ου αι., χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανές Diesel στο σύστημα μεταφοράς.
3. Ο εναέριος. Την επίγεια μεταφορά διαδέχτηκε ένα σύστημα εναέριας μεταφοράς, όπου η κίνηση γινόταν με ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω συστήματος τριών συρματόσχοινων. Το μήκος διαδρομής ποικίλλει κατά περίπτωση, ανάλογα με την απόσταση του σημείου έναρξης της εναέριας μεταφοράς και του τερματικού σταθμού. Για τη μεταφορά των κάδων εξυπηρετούσαν 2 καλώδια, οι μεταφορείς, μήκους ίσου με αυτό της απόστασης μεταξύ των δύο σταθμών και ο ατέρμονας έλξης που είναι διπλάσιου μήκους. Οι κάδοι συνδέονται με ένα μηχανισμό κύλησης, μέσω του σκελετού ανάρτησης. Στην περίπτωση του μεταλλείου στο Πήλι, οι κάδοι κατέληγαν σε ένα μηχανισμό με τη βοήθεια του οποίου οι γεμάτοι με λευκόλιθο κάδοι αποσυνδέονταν από το σύστημα του εναερίου, για να συνεχίσουν την πορεία τους πάνω σε σιδηροτροχιές, αλλά και επανασυνδέονταν άδεια πλέον, για να ακολουθήσουν την αντίστροφη πορεία προς το ορυχείο. Τμήματα των εγκαταστάσεων της

εναέριας μεταφοράς υπάρχουν ακόμη και σήμερα στην περιοχή, όπως ο πυλώνας της εικόνας 5.14.



Εικόνα 5.14: Πυλώνας εναέριας μεταφοράς (www.monumenta.org)

### **Ενδιάμεσοι και τερματικοί σταθμοί**

Οι ενδιάμεσοι σταθμοί ήταν εγκαταστάσεις τοποθετημένες μεταξύ του ορυχείου και των τερματικών σταθμών και φαίνεται ότι είχαν δημιουργηθεί για ποικίλους λόγους, ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες, που κατά περίπτωση είχε κάθε επιχείρηση. Ενδιάμεσος σταθμός σώζεται στο μεταλλείο Πηλίου, στον οποίο γινόταν η φόρτωση του προερχομένου από το ορυχείο λευκόλιθου, στο εναέριο σύστημα μεταφοράς.

Μετά την εξόρυξη, το ορυκτό ακολουθούσε κάποια στάδια διαλογής και επεξεργασίας, πριν φορτωθεί στα πλοία και αποσταλεί στις ευρωπαϊκές αγορές. Αυτό γινόταν στους τερματικούς σταθμούς, όπου συναντώνται κτήρια διοίκησης, οι φούρνοι, χημεία, λεβητοστάσια, κατοικίες εργατών και διευθυντικού προσωπικού, αντλιοστάσια, αναβατόρια, μηχανισμοί εναέριας μεταφοράς, γερανοί, αποθήκες και προβλήτες φόρτωσης (Εικόνες 5.15-5.16) Οι τερματικοί των βιομηχανιών είναι εγκατεστημένοι δίπλα σε ακτές για λόγους μεταφοράς του προϊόντος.

Η επεξεργασία του μεταλλεύματος ακολουθούσε αρχικά μία διαδικασία αρχικής χειροδιαλογής, έπειτα ψήσιμο στους λεγόμενους φούρνους και τελικά δεύτερη

χειροδιαλογή και αποθήκευση σε μεγάλες αποθήκες, κοντά στην παραλία.



Εικόνα 5.15: Φρεατοκάμινοι στη θέση Βοριά Ρέμα, περιοχή Λίμνης  
([www.monumenta.org](http://www.monumenta.org))



Εικόνα 5.16: Κάθετος φούρνος και γέφυρα μεταφορών ([www.monumenta.org](http://www.monumenta.org))

### Σκάλες φόρτωσης

Το τελικό προϊόν οδηγούνταν στις σκάλες φόρτωσης με ανατρεπόμενα βαγονέτα που σύρονταν σε σιδηροτροχιές και φορτωνόταν σε ‘μαούνες’, οι οποίες το μετέφεραν στα αγκυροβολημένα στον κόλπο ατμόπλοια. Τις μαούνες και απλές βάρκες διαδέχθηκαν οι λεγόμενες ‘λάντζες’. Αυτή ήταν η μέθοδος που ακολουθούνταν για πολλά χρόνια μέχρι το 1960, όταν κατασκευάστηκαν οι σύγχρονες σκάλες φόρτωσης, μέσω της οποίας το προϊόν φορτωνόταν κατευθείαν πάνω στα πλοία (Χρυσάνθη, 2010).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

#### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των μετρήσεων και του λογισμικού επεξεργασίας των δεδομένων. Έπειτα θα γίνει αναφορά στην διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων και του λογισμικού με το οποίο αυτή πραγματοποιήθηκε.

#### 6.2 Τοπογραφικός εξοπλισμός

Για τη διενέργεια των τοπογραφικών εργασιών στις στοές της περιοχής χρησιμοποιήθηκε τοπογραφικός εξοπλισμός αποτελούμενος από έναν ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό, έναν δορυφορικό δέκτη εντοπισμού θέσης και έναν σαρωτή laser.

Ο ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός και ο δορυφορικός δέκτης ήταν της εταιρίας Leica και χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση όδευσης κατά μήκος της κεντρικής στοάς του μεταλλείου και την εξάρτηση από το ένα άκρο της από το ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87. Ο αρχικός σχεδιασμός ήταν να πραγματοποιηθεί αποτύπωση του μεταλλείου με τη χρήση του γεωδαιτικού σταθμού. Γρήγορα το εγχείρημα αυτό εγκαταλείφθηκε λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας και έκτασης του χώρου. Αντ' αυτού αναζητήθηκε εναλλακτική λύση η οποία θα ξεπερνούσε τους περιορισμούς αυτούς και θα μείωνε τον χρόνο έκθεσης στο περιβάλλον του μεταλλείου.

Η εναλλακτική λύση που βρέθηκε ήταν η χρήση τρισδιάστατου σαρωτή laser με την τεχνολογία SLAM. Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε για την 3D σάρωση του μεταλλείου ήταν ο «ZEB-HORIZON» της εταιρίας GeoSLAM, ο οποίος απεικονίζεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Σαρωτής ZEB HORIZON της GeoSLAM ([www.geoslam.com](http://www.geoslam.com))



Το γεγονός ότι οι δορυφορικοί δέκτες δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εσωτερικούς χώρους, καθώς χρειάζονται οπτική επαφή με τους δορυφόρους, καθιστά δύσκολη την αποτύπωση εσωτερικών κτηρίων, ορυχείων και κλειστών χώρων. Εταιρίες του χώρου, έχουν δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους Simultaneous Localisation & Mapping (SLAM), επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αποτύπωση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων χωρίς τη χρήση GPS.

Οι αλγόριθμοι SLAM επεξεργάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του laser μαζί με τα δεδομένα θέσης του IMU και εφαρμόζουν αλγόριθμους αναγνώρισης χαρακτηριστικών για να εκτελέσουν το «cloud-to-cloud registration», αυτόματα και με υψηλό επίπεδο ακρίβειας, στα δεδομένα των μετρήσεων.

Τα συστήματα αυτά συνοδεύονται από λογισμικό που επιτρέπουν την κίνηση των συσκευών κατά τη διάρκεια της σάρωσης και δε χρειάζεται να έχουν οπτική επαφή με τον ουρανό για να χρησιμοποιούν τους δορυφόρους του GPS.

Επίσης, δεν απαιτείται η ύπαρξη στόχων, αλλά το λογισμικό κάνει αυτόματα τη συνένωση των νεφών, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται και σχεδόν να μηδενίζεται η δουλειά γραφείου για την παραγωγή του συνολικού νέφους σημείων.

Συγκεκριμένα ο σαρωτής ZEB-HORIZON είναι το πιο πρόσφατο 3D φορητό περιστρεφόμενο laser scanner της GeoSLAM. Το ZEB-HORIZON είναι κατάλληλο για χρήση τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους, συνδυάζοντας τη μεγάλη εμβέλεια των 100m και την ελαφριά και μικρών διαστάσεων σχεδίασή του.

Η ακρίβεια που πετυχαίνει είναι της τάξης των 1-3cm και η ταχύτητα σάρωσης είναι 300.000 σημεία/δευτερόλεπτο. Καλύπτει τις ανάγκες αποτύπωσης και χαρτογράφησης για πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών εσωτερικών, εξωτερικών και υπόγειων χώρων και μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε κινητή πλατφόρμα (GeoSLAM, n.d.).

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή αναγράφονται στον πίνακα 6.1:

<b>Technical specification</b>	
Range	100m
FOV	360° x 270°
Protection class	IP 54
Processing	Post
Data logger carrier	Backpack or shoulder strap
Scanner head weight	1.5kg
Datalogger weight (incl. battery)	1.3kg
Colourised point cloud	✓*
Intensity	✓
Referenced imagery	✓*
Scanner points per second	300,000
No. of sensors	16
Relative accuracy	1 - 3 cm**
Raw data file size	100-200MB /min

\*with ZEB Cam  
\*\*environment dependent

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ZEB REVO ([www.geoslam.com](http://www.geoslam.com))

### 6.3 Λογισμικό

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει οδηγήσει στην ύπαρξη μιας πλειάδας λογισμικών κατάλληλων για την επεξεργασία των νεφών σημείων. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το λογισμικό CloudCompare, το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα και χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των αλγορίθμων καθώς και για την πραγματοποίηση της μετέπειτα επεξεργασίας.

Το CloudCompare είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων. Δημιουργήθηκε αρχικά το 2003 κατά τη διάρκεια συνεργασίας μεταξύ της Telecom Paris Tech και της R&D που είναι τμήμα της EDF, από τον διδακτορικό φοιτητή Daniel Girardeau-Montaut, ο οποίος εργαζόταν πάνω στην ανίχνευση αλλαγών σε τρισδιάστατα δεδομένα. Εκείνη την εποχή, ο κύριος σκοπός του ήταν η ανίχνευση αλλαγών σε υψηλής πυκνότητας τρισδιάστατα νέφη σημείων, τα οποία είχαν παραχθεί από σαρωτές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή σε εργοτάξια. Βασίζεται σε μία συγκεκριμένη δομή octree που του επιτρέπει μεγάλες επιδόσεις σε σχέση με την συγκεκριμένη λειτουργία.



Εικόνα 6.2: Το λογότυπο του CloudCompare ([www.cloudcompare.org](http://www.cloudcompare.org))

Στη συνέχεια, προστέθηκαν πολλοί αλγόριθμοι για την επεξεργασία των νεφών σημείων. Το CloudCompare παρέχει μια σειρά από βασικά εργαλεία για την επεξεργασία και την απόδοση των νεφών σημείων. Ακόμα προσφέρει και αρκετά προηγμένους αλγορίθμους, μεταξύ των οποίων είναι και οι μέθοδοι για την εκτέλεση:

- Προβολών (με βάση κάποιον άξονα, κυλινδρική ή κωνική,...)
- Συνένωση νεφών (ICP,...)
- Δημιουργία επιφανειών πλέγματος (mesh)
- Υπολογισμό απόστασης (νέφος προς νέφος,...)
- Στατιστικά στοιχεία υπολογισμού (κατανομή  $\chi^2$ ,...)
- Κατάτμηση σε τμήματα
- Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πυκνότητα, καμπυλότητα, τραχύτητα, γεωλογικός προσανατολισμός του επιπέδου,...)

Το cloudCompare μπορεί να τρέξει σε Windows, Linux και Mac OS X πλατφόρμες, τόσο για 32bit όσο και 64bit αρχιτεκτονικές. Αναπτύσσεται σε C++ με Qt, είναι ανοιχτού κώδικα και ελεύθερο λογισμικό και εκδίδεται υπό την άδεια GPL (CloudCompare, n.d.).

## 6.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Οι προς επεξεργασία μετρήσεις αφορούν σε ένα από τα 10 μεταλλεία της περιοχής και αποτελούνται από τα νέφη σημείων που σαρώθηκαν με τον σαρωτή ZEB-HORIZON της GeoSLAM. Να σημειωθεί ότι τα νέφη σημείων έχουν υποστεί συνένωση από την ίδια την εταιρεία. Η γεωαναφορά πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια σφαιρών, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε θέσεις γνωστών συντεταγμένων (με χρήση GPS). Οι θέσεις αυτές προσδιορίστηκαν μέσω της πολυγωνομετρίας που πραγματοποιήθηκε σε όλο το μήκος της κεντρικής στοάς με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Η όδευση (εικόνα 6.3) είναι ανοιχτή και εξαρτημένη από το ένα άκρο με τη βοήθεια συστήματος GPS έξω από τη στοά. Η διαδικασία της συνένωσης δύναται να πραγματοποιηθεί και από τον ίδιο τον χρήστη σε κατάλληλο λογισμικό, με βασική προϋπόθεση να αποτελεί η ύπαρξη ικανού αριθμού κοινών σημείων με αποτέλεσμα να μην παρεμποδίζεται η αλληλοεπικάλυψη. Αν δεν ικανοποιείται η τελευταία προϋπόθεση μπορεί να διορθωθεί είτε με χειροκίνητη αναγνώριση κοινών σημείων είτε με επιπρόσθετη σάρωση.



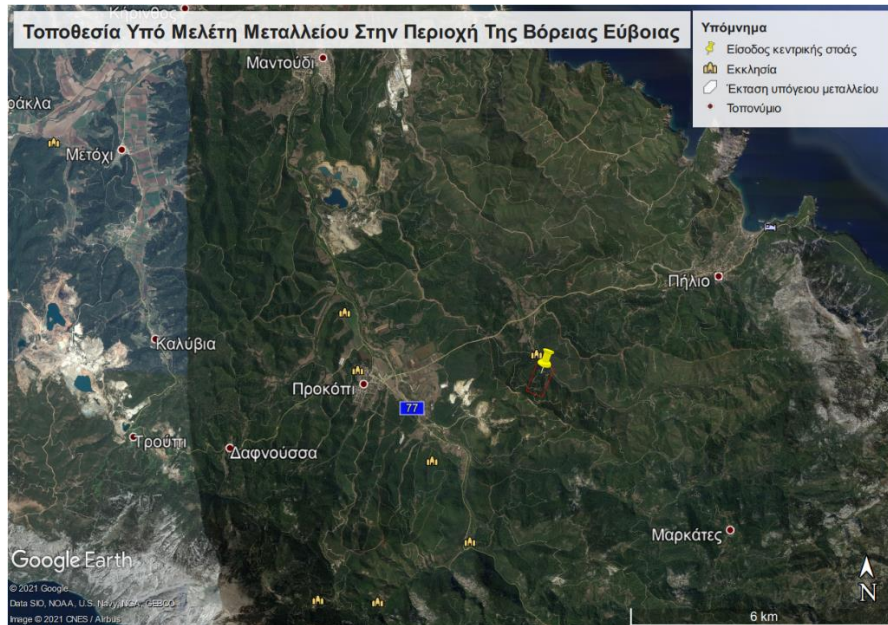
Εικόνα 6.3: Σήμανση κορυφών όδευσης κεντρικής στοάς

Στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης είναι η απόκτηση πληροφοριών που αφορούν στην συσχέτιση των 3D σαρώσεων με την πραγματικότητα, στην τρισδιάστατη παρουσίαση ενός υπόγειου χώρου εκμετάλλευσης, στην εξαγωγή διατομών σε οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο, στην ογκομέτρηση τμημάτων του χώρου, και τέλος στην εξαγωγή δομικών στοιχείων όπως είναι η κλίση και η γωνία διεύθυνσης των στρώσεων με άμεσο οικονομικό αντίκτυπο στην υπόγεια εκμετάλλευση.

### 6.4.1 Συσχέτιση 3D δεδομένων με πραγματικότητα

Στο πρώτο στάδιο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν τα δεδομένα ενός 3D σαρωτή και να συσχετιστούν με την πραγματική εικόνα της περιοχής, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η θέση αλλά και το μέγεθος του υπό μελέτη μεταλλείου. Έτσι στην εικόνα 6.4 παρουσιάζεται η τοποθεσία που βρίσκεται το μεταλλείο στην ευρύτερη περιοχή της Β. Εύβοιας.





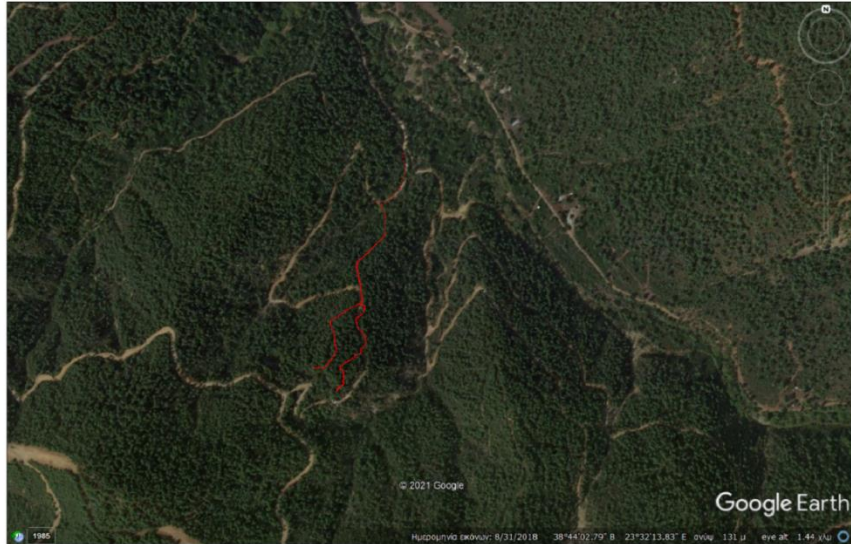
Εικόνα 6.4: Τοποθεσία μεταλλείου

Στην εικόνα 6.5 εμφανίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το σημείο της εισόδου της κεντρικής στοάς του μεταλλείου καθώς και η πρόσβαση σε αυτή.



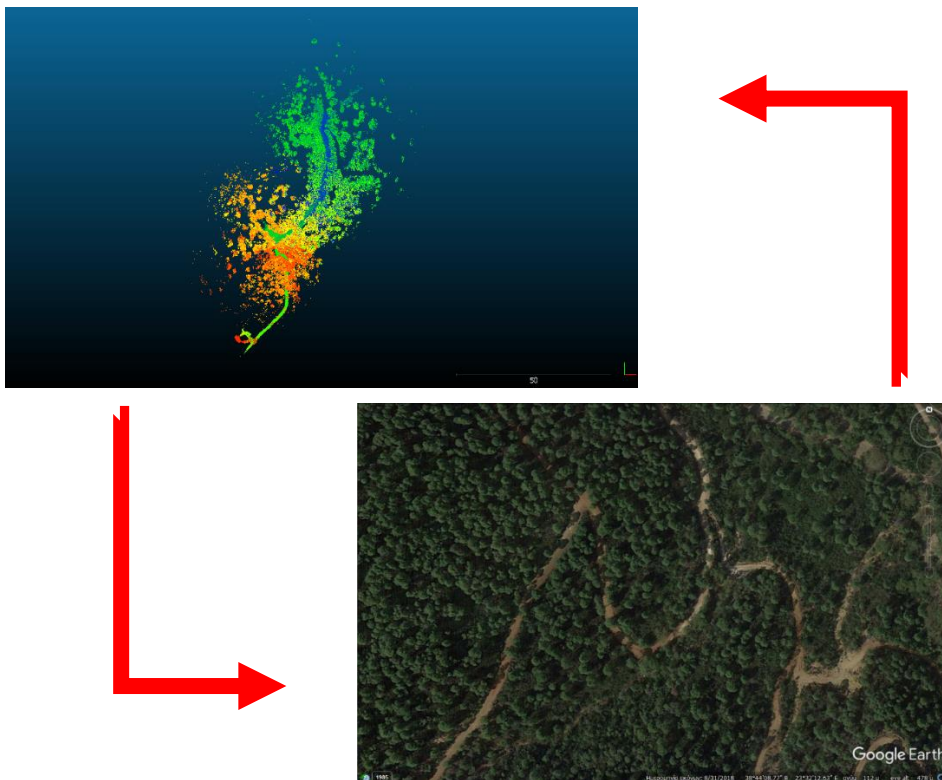
Εικόνα 6.5: Πρόσβαση μεταλλείου και ένδειξη εισόδου κεντρικής στοάς

Στη συνέχεια, στην εικόνα 6.6 παρουσιάζεται η έκταση της κύριας στοάς του μεταλλείου στο υπέδαφος με τη διεύθυνσή του να είναι N-NΔ με γωνία διεύθυνσης περί τις 195°. Το ίχνος της κεντρικής στοάς του μεταλλείου εμφανίζεται με κόκκινο και έχει προκύψει από τη λήψη χαρακτηριστικών σημείων από το σύνολο των σαρώσεων.



Εικόνα 6.6: Έκταση και διεύθυνση μεταλλείου

Στην εικόνα 6.7 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τρισδιάστατων δεδομένων του σαρωτή με την αντίστοιχη δορυφορική εικόνα από το τμήμα εισόδου της κεντρικής στοάς. Στο νέφος σημείων διακρίνονται με ευκολία τόσο η βλάστηση της περιοχής όσο και ο δρόμος.

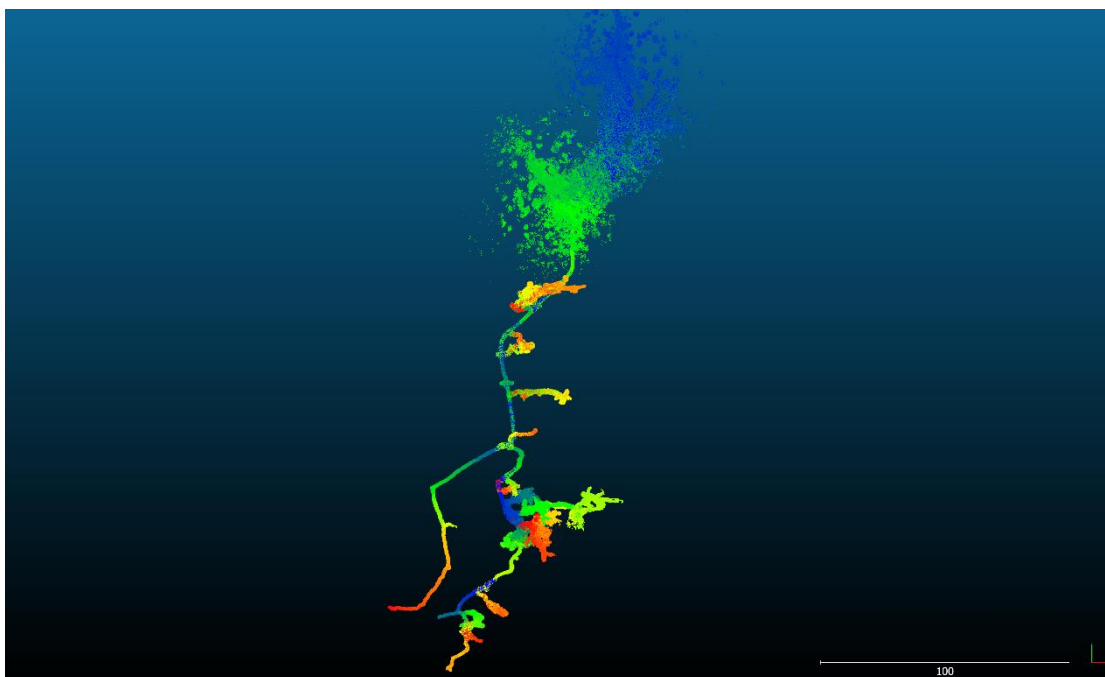


Εικόνα 6.7: Συσχέτιση τρισδιάστατων και δορυφορικών δεδομένων

Επομένως παρατηρείται ότι το παραγόμενο προϊόν μίας τρισδιάστατης σάρωσης με τη μέθοδο Lidar SLAM, προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα, ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει ενσωματωμένη κάμερα στον σαρωτή για τη λήψη

έγχρωμων εικόνων. Ωστόσο, μία σάρωση με τη χρήση των κατάλληλων αισθητήρων δύναται να επιφέρει ποικιλία δεδομένων, όπως έγχρωμη εικόνα, τιμές ανακλαστικότητας, υπέρυθη εικόνα κτλ. Αποτελέσματα που είναι σχεδόν αδύνατον να επιτευχθούν με τις κλασικές μεθόδους αποτύπωσης και χαρτογράφησης ενός μεταλλείου με επικρατέστερη τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού και οπτική παρατήρηση. Λόγοι που δυσκολεύουν το έργο αυτό είναι η μικρή πυκνότητα σημείων, η περιορισμένη πρόσβαση σε απρόσιτα σημεία, ο περιορισμένος όγκος πληροφοριών και η χρονοβόρα εργασία ψηφιοποίησης των συλλεγόμενων δεδομένων.

Τέλος στην εικόνα 6.8 παρουσιάζεται η κάτοψη του μεταλλείου όπως προέκυψε από την εισαγωγή των γεωαναφερμένων νεφών σημείων στο λογισμικό του CloudCompare. Το μήκος της κεντρικής στοάς είναι περίπου 290 μέτρα και οι εκσκαφές εκατέρωθεν της είναι ακανόνιστες, ανηφορικές και ακολουθούν τα φελόνια του μεταλλεύματος.



Εικόνα 6.8: Κάτοψη μεταλλείου

Για την πλήρη κατανόηση της τρισδιάστατης υπόστασης και διάρθρωσης του μεταλλείου επισυνάπτεται μία προσομοίωση πτήση κατά μήκος της στοάς. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα φελόνια είναι ανηφορικά και αυτό συμβαίνει διότι η εξόρυξη του μεταλλεύματος γινόταν με τη βοήθεια της βαρύτητας, ενώ στην περίπτωση κατηφορικού φελονιού ήταν απαραίτητη η χρήση βαρούλκων για την εξόρυξη του μεταλλεύματος.

Στις εικόνες 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται εικόνες από το εσωτερικό του μεταλλείου.





Εικόνα 6.9: Αστοχία τύπου σφήνας στο ταβάνι της κεντρικής στοάς (αριστερά) και ίχνος διατρήματος για τοποθέτηση εκρηκτικών υλών (δυναμίτης) (δεξιά)



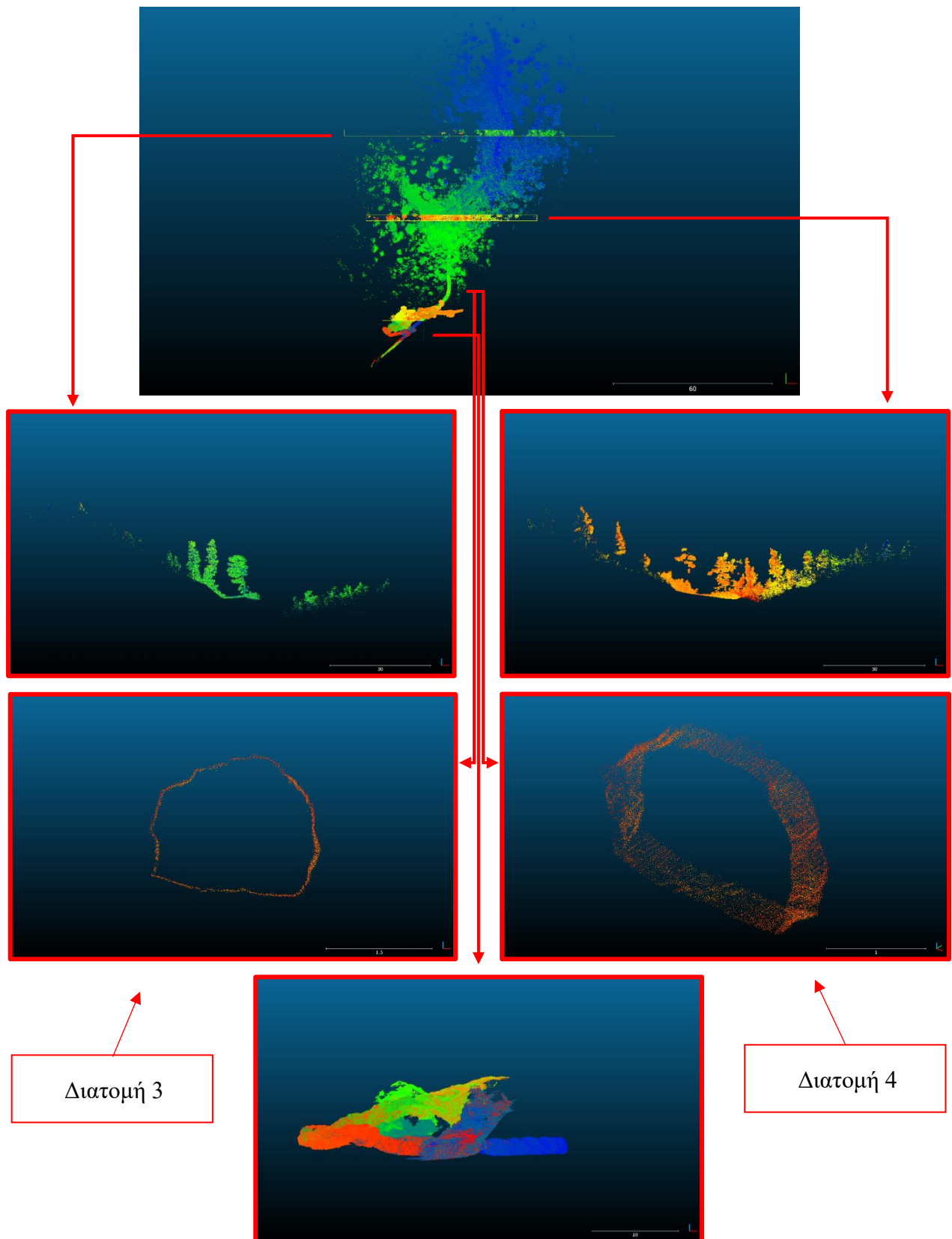
Εικόνα 6.10: Σιδηροτροχιές για την κίνηση μεταλλευτικών κάδων και αγωγός αέρα για τη χρήση μηχανημάτων αέρος

## 6.4.2 Εξαγωγή διατομών

Η διαδικασία λήψης διατομών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι μίας τοπογραφικής εργασίας ιδίως στην κατηγορία των υπόγειων έργων. Η εξαγωγή διατομών από τρισδιάστατα δεδομένα, είτε αυτά είναι νέφη σημείων είτε είναι τρισδιάστατα μοντέλα είναι μία απλή διαδικασία που γίνεται εκ των υστέρων. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους, όπως είναι η χρήση γεωδαιτικού σταθμού, δύναται να εξαχθούν διατομές από οποιοδήποτε σημείο του έργου και όχι μόνο σε προκαθορισμένες θέσεις. Επίσης μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο χρόνος που απαιτείται είναι ελάχιστος και δεν απαιτείται επιπλέον φυσική παρουσία του προσωπικού στον χώρο πέρα από τη διαδικασία της σάρωσης.

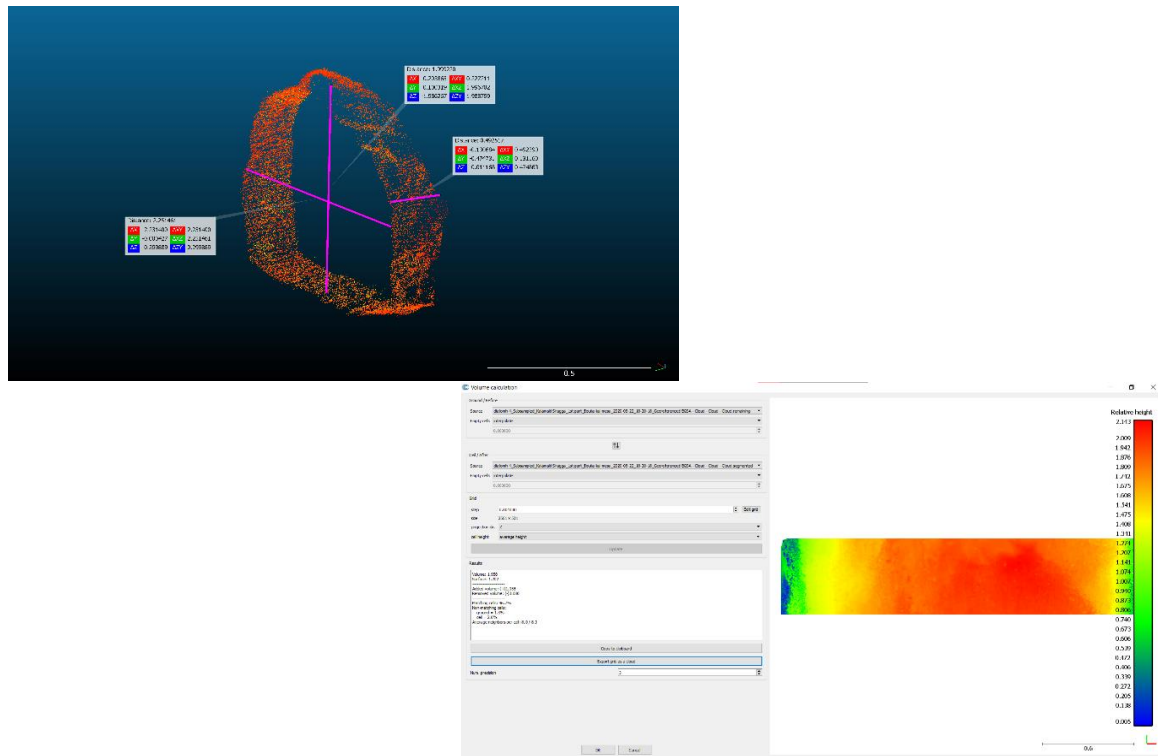
Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζονται 5 διατομές του πρώτου τμήματος της στοάς που προέκυψαν μέσω της επεξεργασίας των τρισδιάστατων δεδομένων. Να σημειωθεί ότι η τελευταία διατομή είναι πλάτους 7 μέτρων και έχει ως στόχο να απεικονίσει μία ευρύτερη περιοχή και όχι μία συνηθισμένη διατομή.



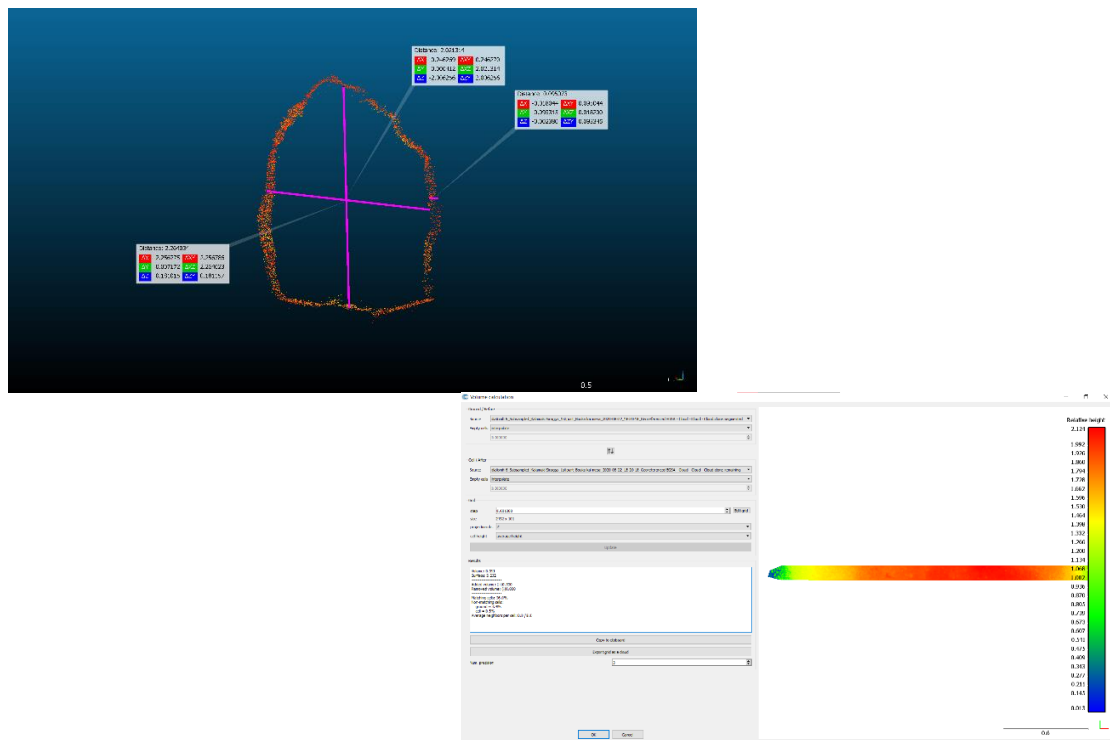


Εικόνα 6.11: Διατομές από 3D δεδομένα

Για τις διατομές 3 και 4 πραγματοποιήθηκε μέτρηση του εμβαδού τους με δύο τρόπους, προσεγγιστικά με την προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας και με τη βοήθεια του λογισμικού. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις εικόνες 6.12 – 6.13 και στον πίνακα 6.2.



Εικόνα 6.12: Μέτρηση εμβαδού διατομής 4



Εικόνα 6.13: Μέτρηση εμβαδού διατομής 3

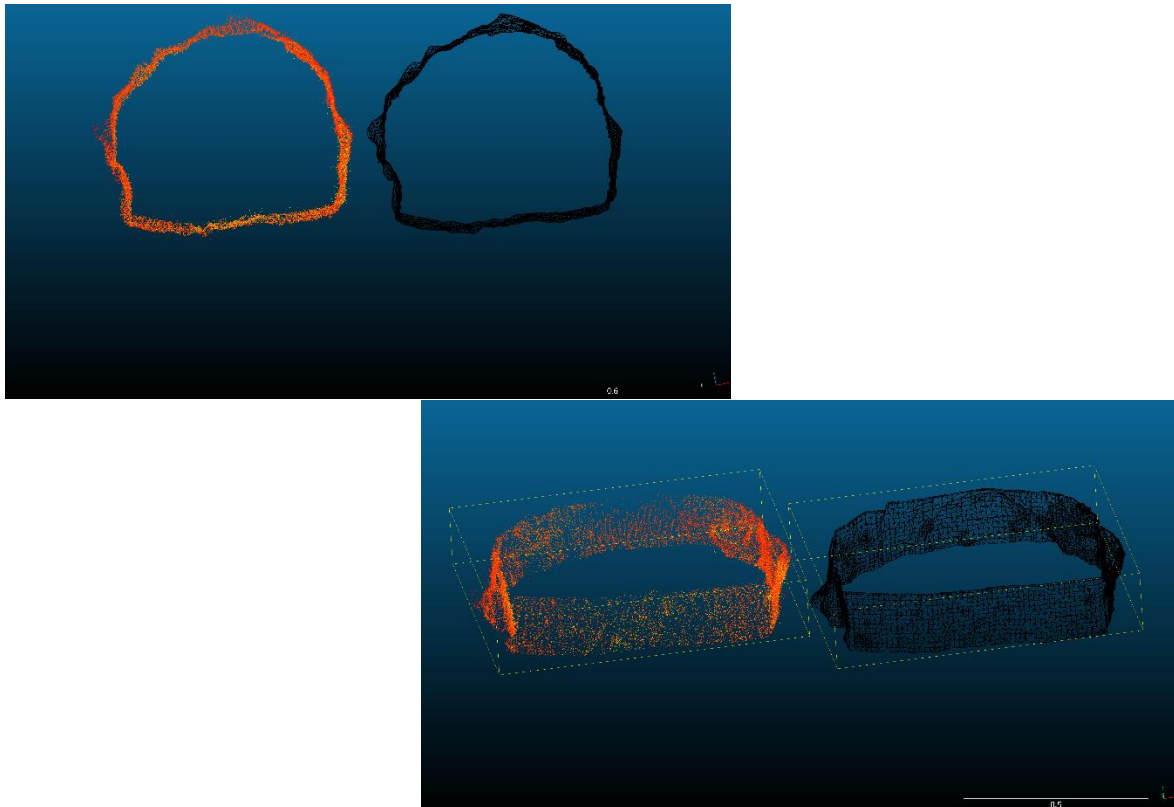
Στον πίνακα 6.2 εμφανίζεται το εμβαδόν των διατομών και παρατηρείται ότι σχεδόν ταυτίζεται, κάτι το αναμενόμενο καθώς οι διατομές βρίσκονται κοντά η μία με την άλλη. Η προσεγγιστική μέθοδος αφορά στον υπολογισμό μίας μέσης ακτίνας των διατομών, θεωρώντας ότι είναι κύκλοι, και τον υπολογισμό του εμβαδού τους.

ΕΜΒΑΔΟΝ			
ΔΙΑΤΟΜΗ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΔΙΑΦΟΡΑ
3	3.5 m <sup>2</sup>	3.8 m <sup>2</sup>	0.3 m <sup>2</sup>
4	3.5 m <sup>2</sup>	3.9 m <sup>2</sup>	0.4 m <sup>2</sup>

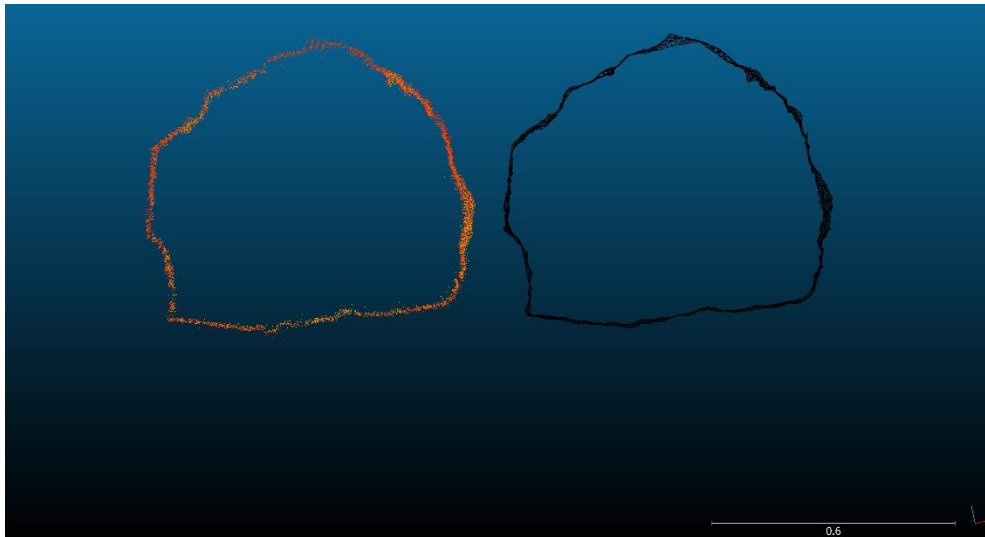
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μέτρησης εμβαδού διατομών

Από τη σύγκριση του εμβαδού των διατομών με τις δύο διαφορετικές μεθόδους προκύπτει ότι οι διαφορές είναι αμελητέες και δικαιολογημένες δεδομένου ότι η μέθοδος προσαρμογής επιφάνειας είναι πιο προσεγγιστική. Ωστόσο και οι δύο τρόποι θεωρούνται αξιόπιστοι για τον υπολογισμό του εμβαδού μίας διατομής.

Ακολούθησε η δημιουργία πλέγματος του τμήματος των διατομών 3 και 4 και η εκ νέου εξαγωγή των διατομών υπό τη μορφή πλέγματος (triangulated mesh). Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην εικόνα 6.14 και 6.15 για σύγκριση ως προς την ακρίβεια αποτύπωσης της διατομής.



Εικόνα 6.14: Διατομή 4 υπό μορφή νέφους σημείων και υπό μορφή πλέγματος



Εικόνα 6.15: Διατομή 3 υπό μορφή νέφους σημείων και υπό μορφή πλέγματος

Από την παράθεση των διατομών υπό μορφή νέφους σημείων και υπό μορφή πλέγματος είναι εμφανές ότι η γεωμετρία των διατομών αποτυπώνεται με ακριβέστερο τρόπο και με μικρότερο θόρυβο στην περίπτωση του πλέγματος τριγώνων σε σύγκριση με το νέφος σημείων.

### 6.4.3 Ογκομέτρηση

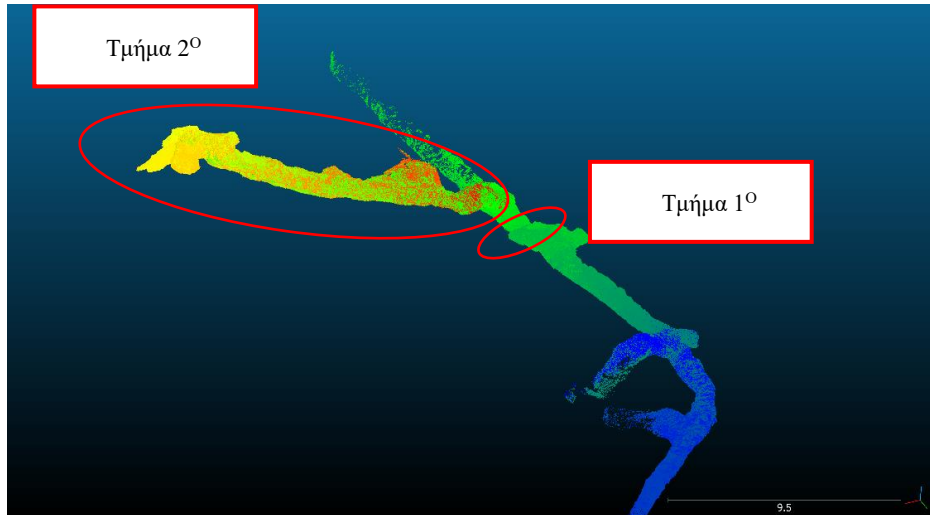
Μία διαδικασία υψίστης σημασίας για την οικονομική διαχείριση μίας εκμετάλλευσης αποτελεί ο ακριβής υπολογισμός του όγκου εκσκαφής. Σε ένα υπόγειο περιβάλλον η διαδικασία αυτή είναι σαφώς πιο δύσκολη σε σχέση με τα επίγεια έργα εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν, της επικινδυνότητας και της προσβασιμότητας. Η προσεγγιστική μέτρηση του όγκου μπορεί να επιφέρει εύκολα οικονομικούς κινδύνους και είναι μείζονος σημασίας για τους διαχειριστές ενός έργου, ενώ η συνήθης μέθοδος της χρήσης πλάστιγγας για ζύγιση των φορτηγών με το μέταλλευμα είναι χρονοβόρα και αντικοινωνική.

Με την χρήση 3D σαρωτών η μέτρηση όγκων εκσκαφής αποτελεί μία εύκολη και με ακριβές αποτέλεσμα εργασία. Ο υπολογισμός του εκσκαπτόμενου όγκου προϋποθέτει τη σάρωση σε δύο φάσεις, ενώ για τον απλό υπολογισμό του όγκου της στοάς ή τμήματός της αρκεί η σάρωση σε μία φάση. Η διαδικασία υπολογισμού του όγκου γίνεται εκ των υστέρων, απαιτώντας λιγότερο χρόνο και εξασφαλίζοντας μεγάλη λεπτομέρεια.

Για αυτό τον λόγο διερευνάται ο υπολογισμός του όγκου τμήματος της στοάς με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση αφορά στην μέτρηση του όγκου άμεσα από το νέφος σημείων με τη χρήση ειδικού εργαλείου του λογισμικού, η χρήση του οποίου προϋποθέτει την κατάλληλη επεξεργασία του νέφους σημείων, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του όγκου ανοιχτού σχήματος. Επομένως απαιτείται ο διαχωρισμός δύο επιφανειών, του δαπέδου και της οροφής, μεταξύ των οποίων υπολογίζεται έπειτα όγκος που περικλείεται. Η δεύτερη προσέγγιση επικεντρώνεται στην προσαρμογή μίας μαθηματικής επιφάνειας στο προς μέτρηση τμήμα, χωρίς όμως να είναι πάντα εύκολο κάτι τέτοιο. Και η τρίτη προσέγγιση αφορά

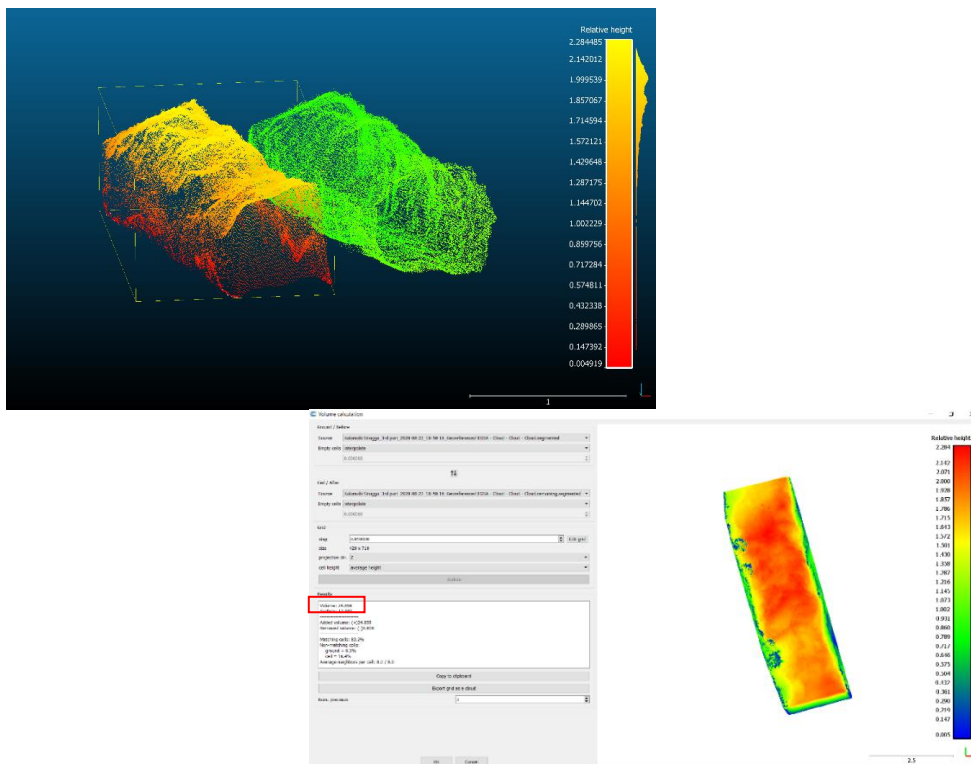
στη μέτρηση του όγκου αφού προηγηθεί η μετατροπή του νέφους σημείων σε επιφάνεια πλέγματος τριγώνων.

Τα τμήματα στα οποία θα πραγματοποιηθεί μέτρηση του όγκου βρίσκονται στο πρώτα μέτρα από την είσοδο της κεντρικής στοάς, και συγκεκριμένα είναι ένα τμήμα της κεντρικής στοάς και το πρώτο μεγάλο φελόνι που συναντάται. Τα τμήματα αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα 6.16.



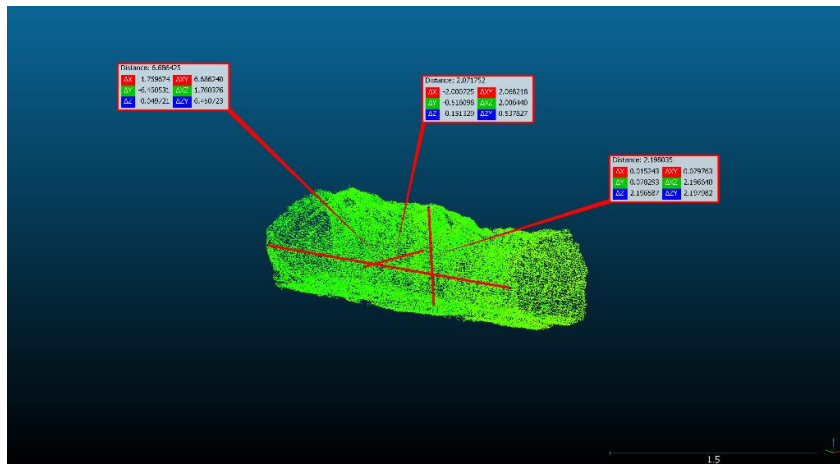
Εικόνα 6.16: Τμήματα στα οποία πραγματοποιήθηκε υπολογισμός όγκου

Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζεται η μέτρηση του όγκου τμήματος της κεντρικής στοάς, με τη βοήθεια του ειδικού εργαλείου που διαθέτει το λογισμικό του CloudCompare κατευθείαν στα νέφη σημείων. Ο όγκος υπολογίστηκε ίσος με  $24.9 \text{ m}^3$ .



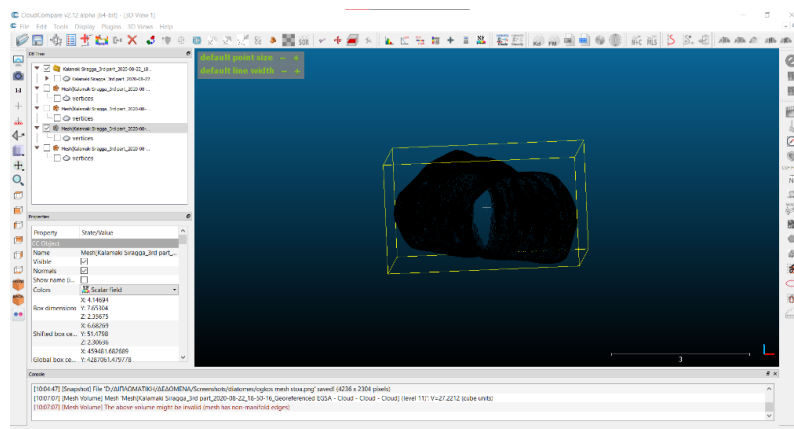
Εικόνα 6.17: Μέτρηση όγκου με τη χρήση εργαλείου του CloudCompare

Αντίστοιχα, στην εικόνα 6.18 υπολογίστηκε ο όγκος του ίδιου τμήματος μέσω της προσαρμογής της μαθηματικής επιφάνειας ενός κυλίνδρου με διάμετρο 2.1 m και ύψος 6.7 m. Ο όγκος που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι προσεγγιστικός και ίσος με 23.2 m<sup>3</sup>.



Εικόνα 6.18: Μέτρηση όγκου τμήματος στοάς μέσω της προσαρμογής μαθηματικής επιφάνειας

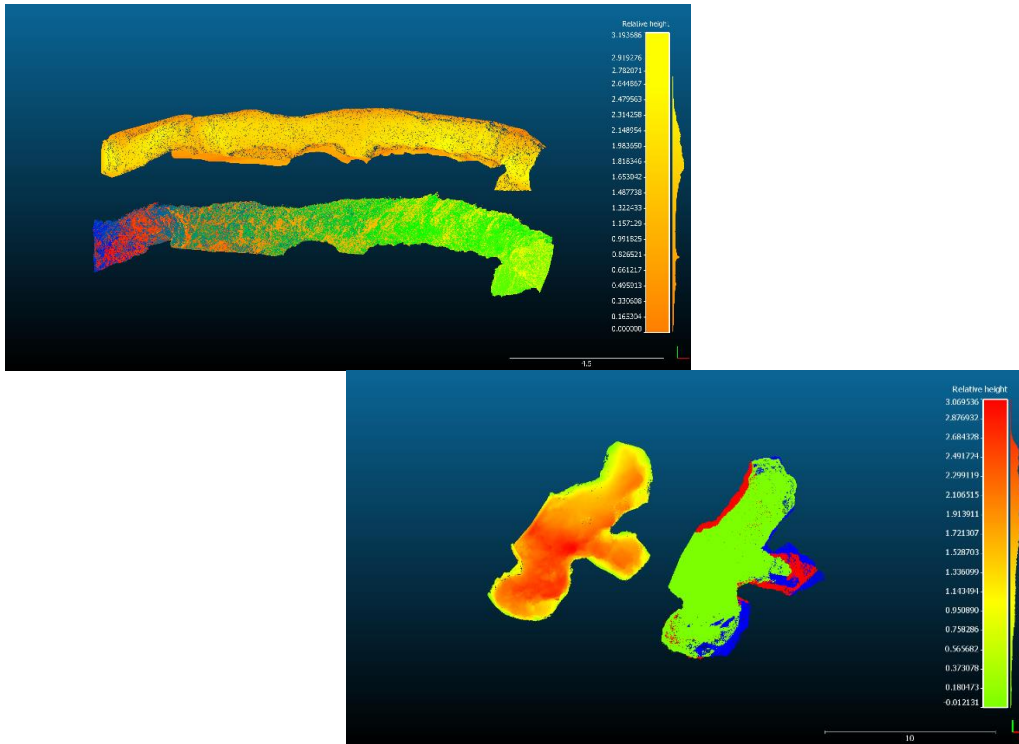
Τέλος, από την επιφάνεια τριγώνων (triangulated mesh) η μέτρηση του όγκου του 1<sup>ου</sup> τμήματος προκύπτει τιμή ίση με 27.2 m<sup>3</sup> (εικόνα 6.19).



Εικόνα 6.19: Μέτρηση όγκου τμήματος στοάς μετά τη μοντελοποίησή του

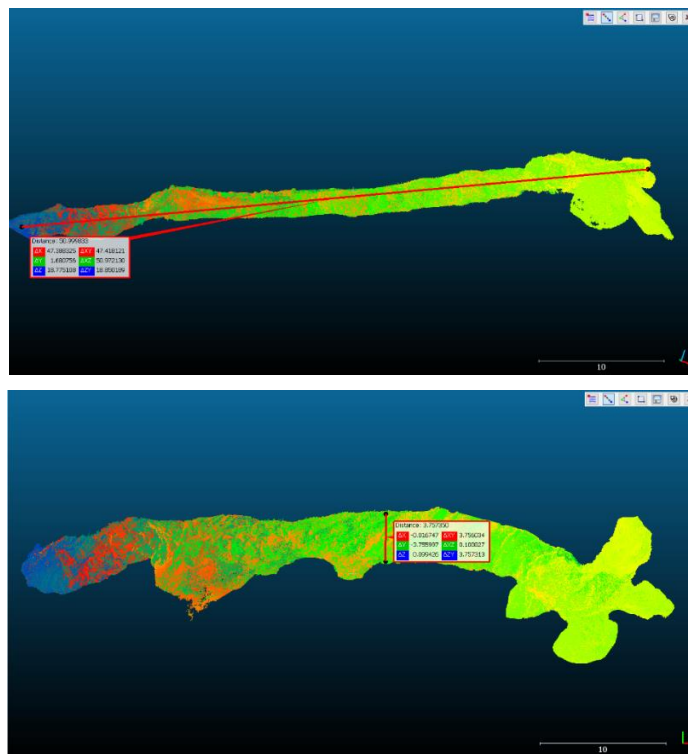
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για το φελόνι, το οποίο λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του χωρίστηκε σε δύο μέρη. Αρχικά, υπολογίστηκε ο όγκος τους από το νέφος σημείων μέσω του λογισμικού (εικόνα 6.20). Ο όγκος υπολογίστηκε ίσος με 413.4 m<sup>3</sup>.

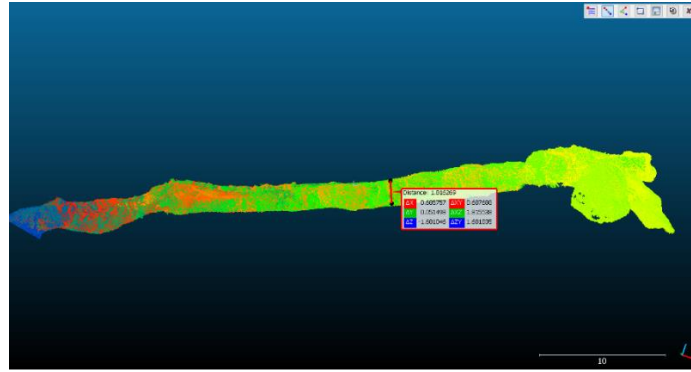




Εικόνα 6.20: Μέτρηση όγκου φελονιού με τη χρήση εργαλείου του CloudCompare

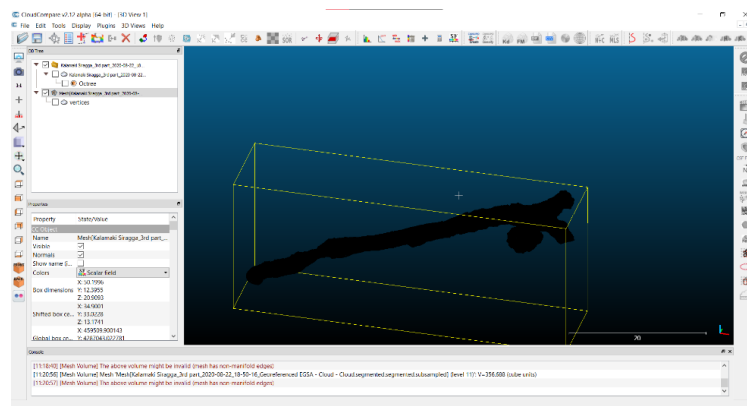
Έπειτα για το ίδιο φελόνι έγινε προσαρμογή της μαθηματικής επιφάνειας ενός ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου μήκος 50.1 m, πλάτος 3.8 m και ύψος 1.8 m. Ο όγκος που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι προσεγγιστικός και ίσος με 342.7 m<sup>3</sup>.





Εικόνα 6.21: Μέτρηση όγκου φελονιού για την προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας

Τέλος, ακολούθησε η μετατροπή σε πλέγμα τριγώνων του τμήματος του φελονιού και ο υπολογισμός του όγκου του, ο οποίος προέκυψε ίσος με  $356.7 \text{ m}^3$  (εικόνα 6.22).



Εικόνα 6.22: Μέτρηση όγκου φελονιού μετά την μοντελοποίησή του

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ότι η μέθοδος προσαρμογής μίας μαθηματικής επιφάνειας φαίνεται να έχει πολύ καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις απλής γεωμετρίας, όπως φάνηκε στην πρώτη περίπτωση, αλλά όχι σε περιπτώσεις που η γεωμετρία γίνεται ακανόνιστη και περίπλοκη, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην ογκομέτρηση του φελονιού.

Επίσης, η ογκομέτρηση από το νέφος σημείων παρουσιάζει αδυναμία σε σύνθετη γεωμετρία και πολλές ακμές καθώς ο αλγόριθμος υπολογίζει τον όγκο ενός νέφους σημείων προβάλλοντας το σε ένα καθορισμένο επίπεδο είτε εάν πρόκειται για δύο νέφη σημείων υπολογίζεται ο όγκος που περικλύεται μεταξύ των δύο νεφών. Με την προβολή των νεφών σημείων δημιουργούνται τρισδιάστατα κελιά με τον συνολικό όγκο να ισούται με το άθροισμα των όγκων των επιμέρους κελιών. Ωστόσο, στην περίπτωση σύνθετης γεωμετρίας η προβολή των νεφών δεν είναι πλήρως επιτυχημένη, γι' αυτό τον λόγο πρέπει το βήμα δημιουργίας των κελιών να είναι τέτοιο ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα κενά κελιά, τα οποία και αγνοούνται επηρεάζοντας την εκτίμηση του όγκου.

Τέλος, ο όγκος που υπολογίζεται σε επιφάνειες υπό τη μορφή πλέγματος ενδέχεται να είναι ελαφρώς αυξημένος, κάτι που οφείλεται στο κλείσιμο των άκρων του μοντέλου, το οποίο αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό του όγκου. Επίσης, για τον ορθό υπολογισμό του όγκου χρειάζεται προσοχή ώστε να μην

υπάρχουν αλληλο-επικαλυπτόμενες κορυφές (non-manifold edges) κατά τη διαδικασία της δημιουργίας του πλέγματος.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των όγκων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.3.

ΤΜΗΜΑ	ΟΓΚΟΣ			ΔΙΑΦΟΡΑ		
	ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	TRIANGULATED MESH	N.Σ. - M.E.	M.E - T.M.	N.Σ. - T.M.
1 <sup>ο</sup>	24.9 m <sup>3</sup>	23.2 m <sup>3</sup>	27.2 m <sup>3</sup>	1.7 m <sup>3</sup>	4 m <sup>3</sup>	2.3 m <sup>3</sup>
2 <sup>ο</sup>	413.4 m <sup>3</sup>	342.7 m <sup>3</sup>	356.7 m <sup>3</sup>	70.7 m <sup>3</sup>	14 m <sup>3</sup>	56.7 m <sup>3</sup>

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα υπολογισμού όγκων

Σύμφωνα με τον πίνακα 6.3 παρατηρείται ότι στην περίπτωση απλής γεωμετρίας οι διαφορές μεταξύ των τριών μεθόδων να είναι μικρές, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζεται μεταξύ των μεθόδων τριγωνισμού με προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας και του νέφους σημείων με τον τριγωνισμό. Αντίστοιχα, στην περίπτωση πιο σύνθετης γεωμετρίας παρατηρείται ότι οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων είναι μεγαλύτερες και αρκετά σημαντικές, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται μεταξύ των μεθόδων νέφους σημείων με μαθηματική επιφάνεια και νέφους σημείων με τριγωνισμό. Ταυτόχρονα, η διαφορά μεταξύ των μεθόδων μαθηματικής επιφάνειας και τριγωνισμού είναι μικρή. Ως συνδυασμός των παραπάνω προκύπτει ότι στην περίπτωση **απλής γεωμετρίας** με λίγες ακμές προτείνονται οι μέθοδοι του νέφους σημείων και της προσαρμογής μαθηματικής επιφάνειας, ενώ στην **περίπτωση σύνθετης γεωμετρίας** προτείνεται η μέθοδος της δημιουργίας πλέγματος και με προσοχή η μέθοδος προσαρμογής μαθηματικής επιφάνειας.

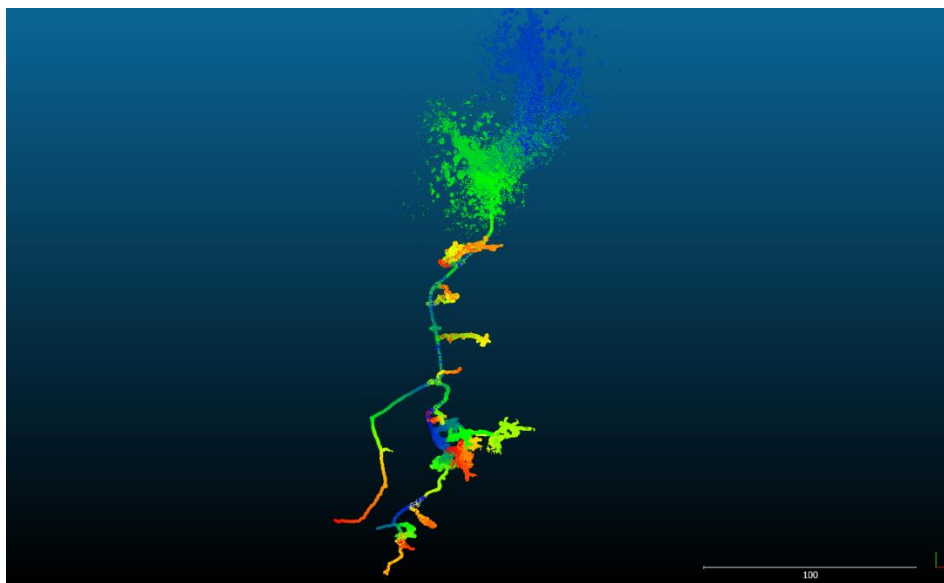
#### 6.4.4 Εξαγωγή δομικών στοιχείων

Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας, πραγματοποιείται η εξαγωγή δομικών στοιχείων του μεταλλείου, και συγκεκριμένα της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης των φελονιών. Οι πληροφορίες αυτές είναι μείζονος σημασίας για την οικονομική ανάπτυξη ενός τέτοιου έργου και την πραγματοποίηση μίας στοχευμένης έρευνας μεταλλοφορίας. Για παράδειγμα εάν το τρισδιάστατο μοντέλο όλων των μεταλλείων υποδεικνύει μία ή δύο βασικές διευθύνσεις φελονιών τότε συγχρόνως υποδεικνύει την πιθανή εξέλιξη του μεταλλεύματος και επομένως τα σημεία στα οποία πρέπει να πραγματοποιηθούν ερευνητικές γεωτρήσεις. Ενδεικτικά, μία λάθος γεώτρηση επιφέρει ζημία τουλάχιστον 20.000-30.000 €.

Η κλασική και επικρατέστερη μέχρι σήμερα προσέγγιση είναι η χρήση γεωλογικής πυξίδας και περιλαμβάνει τη μέτρηση των στρώσεων με γεωλογική πυξίδα από έναν γεωλόγο και την χειρόγραφη καταγραφή των ενδείξεων. Πέραν από τη δυσκολία και την επικινδυνότητα μίας τέτοιας εργασίας σε ένα υπόγειο περιβάλλον μεταλλείου, το βασικό πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν είναι εφικτό να εξετασθεί το μεταλλείο σαν σύνολο και να οπτικοποιηθεί η πληροφορία που συλλέγεται. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να επιλύσει η τρισδιάστατη σάρωση του έργου και μετέπειτα

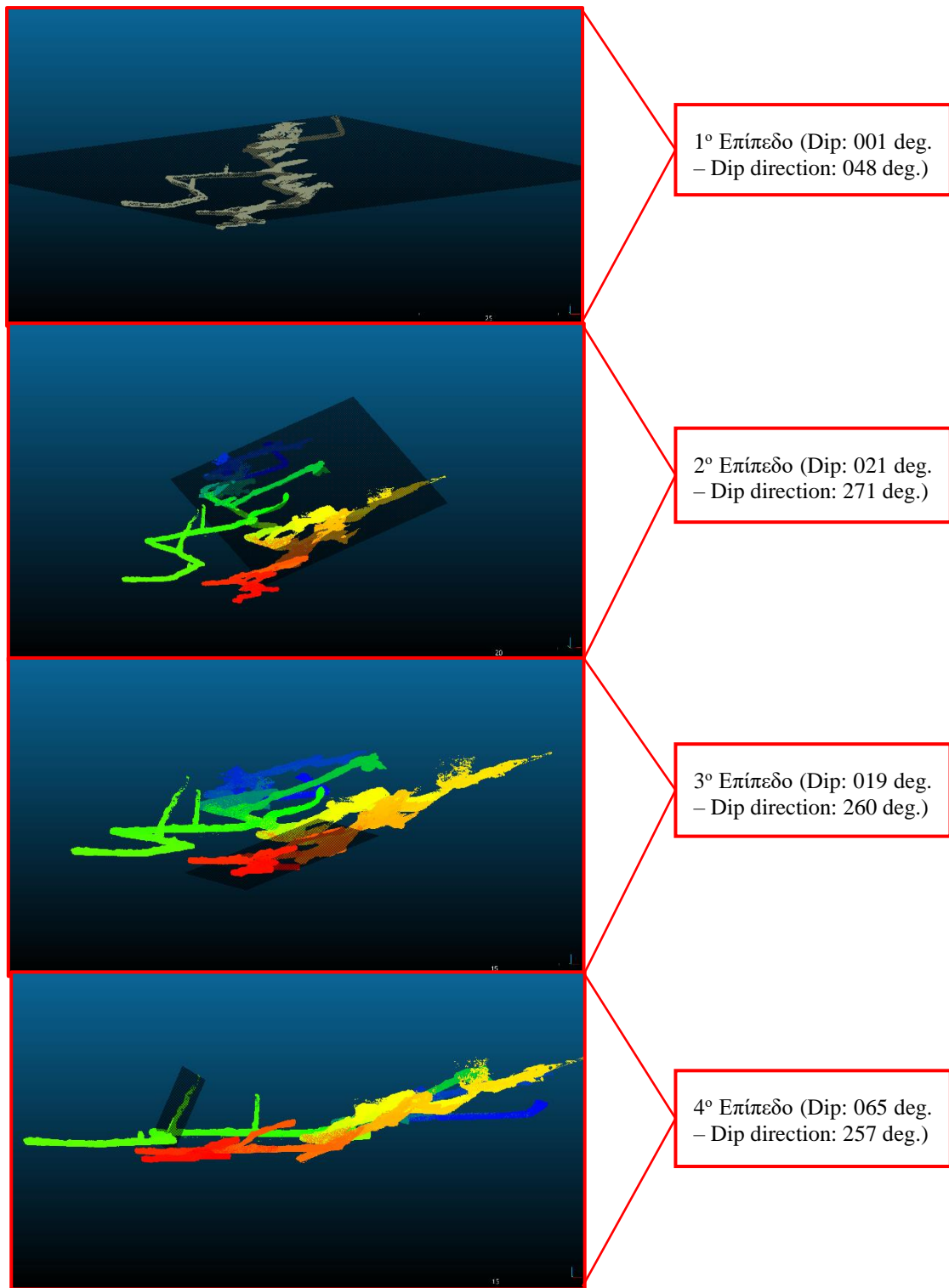
η επεξεργασία των δεδομένων με τελικό στόχο την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τα δομικά στοιχεία, αντιμετωπίζοντας πλέον το έργο σαν ολότητα και όχι σαν μεμονωμένα και ασύνδετα τμήματα. Η απόκτηση ενός τέτοιου είδους πληροφορίας οδηγεί στην στοχευμένη ανάπτυξη και επέκταση του μεταλλείου προς γνωστή διεύθυνση και σε σωστό βάθος. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι καθοριστικοί τόσο για την τοποθέτηση μίας ερευνητικής γεώτρησης όσο και για την εκτίμηση της μεταλλοφορίας της περιοχής. Επίσης, στην περίπτωση της μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης η εργασία γίνεται πιο εύκολη, πιο οικονομική και πιο ασφαλής σε σύγκριση με την κλασική μέθοδο της πυξίδας.

Έτσι λοιπόν κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η διαδικασία αυτή σε ένα λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων δεδομένων. Αρχικά, στην εικόνα 6.23 παρουσιάζεται η κάτοψη του μεταλλείου.



Εικόνα 6.23: Κάτοψη μεταλλείου

Στη συνέχεια, από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζονται τα 4 βασικά επίπεδα που εμφανίζονται στο μεταλλείο καθώς και οι πληροφορίες κλίσης και διεύθυνσης βύθισης που τα χαρακτηρίζουν. Για την εξαγωγή των πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο προσαρμογής επιπέδου που διαθέτει το λογισμικό(εικόνα 6.24).



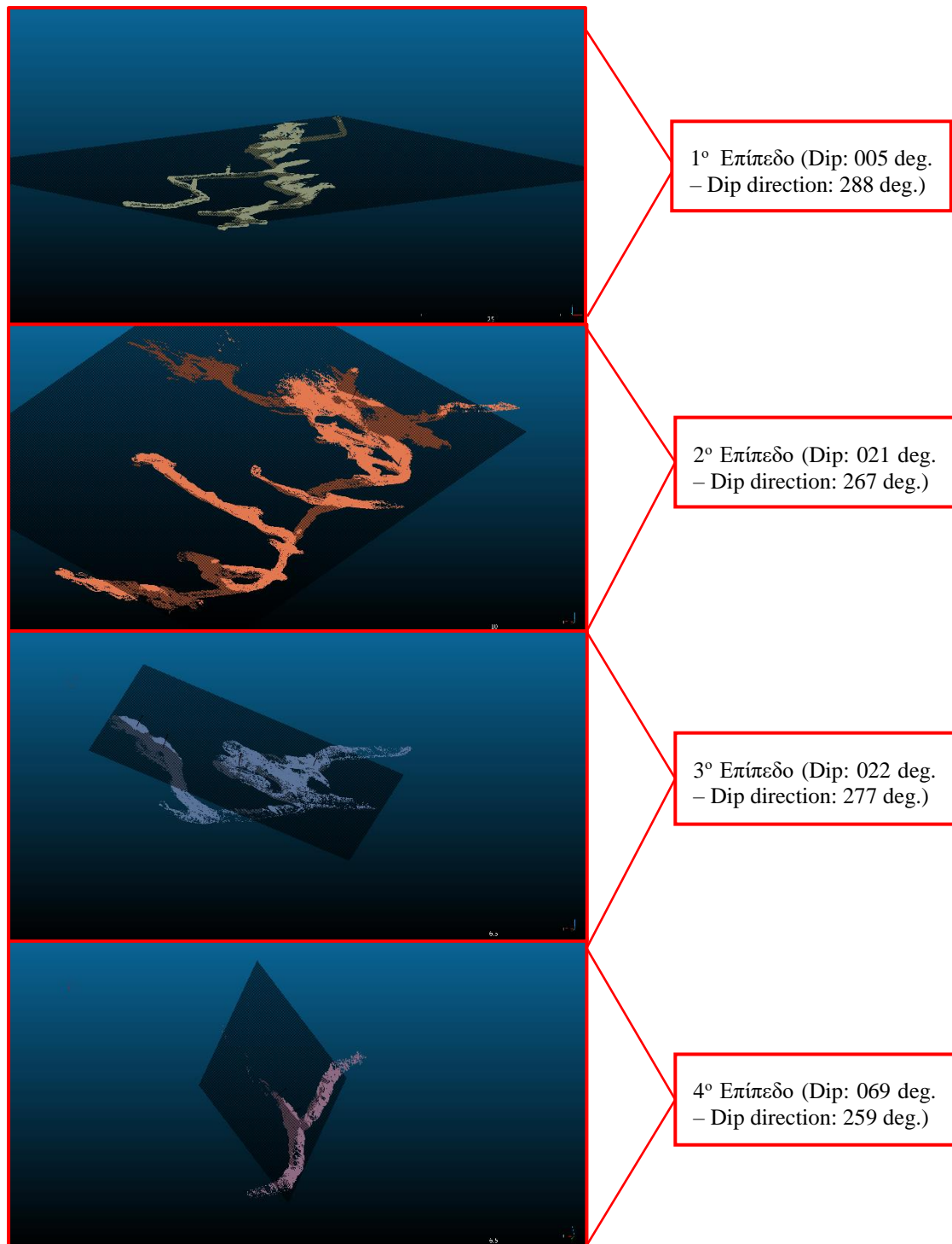
Εικόνα 6.24: Κλίση και διεύθυνση κλίσης στρώσεων μεταλλείου

Το 1° επίπεδο αναφέρεται σε αυτό της κεντρικής στοάς, γι' αυτό και έχει σχεδόν μηδενική κλίση / βύθιση. Τα επίπεδα που είναι βαρύνουσας σημασίας είναι τα υπόλοιπα τρία, βάση των οποίων φαίνεται η διεύθυνση βύθισης και η κλίση προς στην οποία εκτείνεται το μετάλλευμα. Επομένως με αυτή την πληροφορία μπορεί πολύ

εύκολα να σχεδιαστεί μία ερευνητική γεώτρηση μπροστά από το μεταλλείο για τη διερεύνηση πιθανής μεταλλοφορίας.

Ένας δεύτερος τρόπος για την απόκτηση αυτής της πληροφορίας είναι η χρήση του εργαλείου γεωλογικής πυξίδας που διαθέτει το λογισμικό. Με το εργαλείο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κλίσης και της διεύθυνσης βύθισης οποιασδήποτε επιφάνειας στον χώρο. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην εικόνα 6.25 και δε διαφέρουν πολύ από την προηγούμενη μέθοδο. Ωστόσο η χρήση της πυξίδας χρειάζεται μεγάλη προσοχή διότι θα πρέπει το σημείο εφαρμογής της να είναι αντιπροσωπευτικό της επιφάνειας.

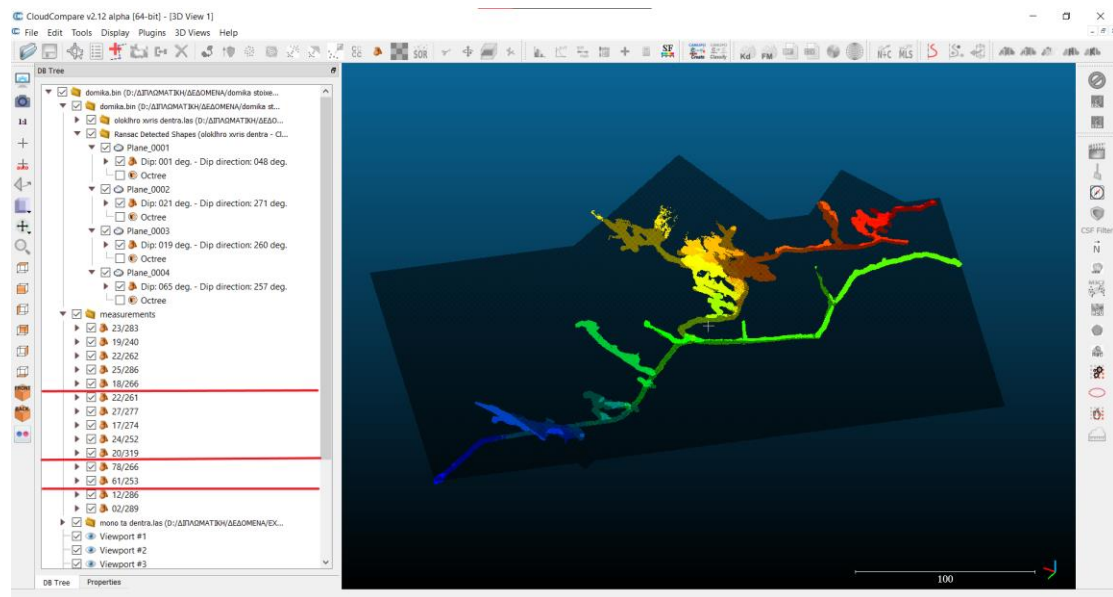




Εικόνα 6.25: Κλίση και διεύθυνση κλίσης στρώσεων μεταλλείου με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής πυξίδας

Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει ως μέσος όρος από την ανάγνωση περισσότερων της μίας πυξίδας σε διάφορα σημεία του κάθε στρώματος (εικόνα 6.26), και οι τελικές τιμές διαφέρουν από αυτές της πρώτης μεθόδου έως 4 deg. για τη γωνία κλίσης και έως 17 deg. για τη διεύθυνση βύθισης. Αυτό είναι κάτι το αναμενόμενο καθώς η τοποθέτηση κάποιας πυξίδας μπορεί να είναι εσφαλμένη και να μην είναι

αντιπροσωπευτική του επιπέδου βύθισης. Εξάιρεση αποτελεί το 1° επίπεδο στο οποίο υπάρχει σχετική συμφωνία ως προς την κλίση αλλά όχι ως προς τη διεύθυνση βύθισης, κάτι που οφείλεται στην πολυπλοκότητα της επιφάνειας της κεντρικής στοάς.



Εικόνα 6.26: Ενδείξεις τυξίδων για τις γωνίες κλίσεις και τις διευθύνσεις της βύθισης

Στους πίνακες 6.4 και 6.5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία βύθισης και διεύθυνσης βύθισης των βασικών επιπέδων του μεταλλείου με τη βοήθεια προσαρμογής επιφάνειας επιπέδου και με τη βοήθεια ψηφιακής γεωλογικής τυξίδας.

ΕΠΙΠΕΔΑ	ΒΥΘΙΣΗ (ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ)	ΒΥΘΙΣΗ (ΠΥΞΙΔΑ)	ΔΙΑΦΟΡΑ
1°	1°	5°	4°
2°	21°	21°	0°
3°	19°	22°	3°
4°	65°	69°	4°

Πίνακας 6.4: Κλίση επιπέδων με προσαρμογή επιπέδου και με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής τυξίδας

ΕΠΙΠΕΔΑ	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΒΥΘΙΣΗΣ (ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΒΥΘΙΣΗΣ (ΠΥΞΙΔΑ)	ΔΙΑΦΟΡΑ
1 <sup>ο</sup>	48 <sup>ο</sup>	288 <sup>ο</sup>	240 <sup>ο</sup>
2 <sup>ο</sup>	271 <sup>ο</sup>	267 <sup>ο</sup>	4 <sup>ο</sup>
3 <sup>ο</sup>	260 <sup>ο</sup>	277 <sup>ο</sup>	17 <sup>ο</sup>
4 <sup>ο</sup>	257 <sup>ο</sup>	259 <sup>ο</sup>	2 <sup>ο</sup>

Πίνακας 6.5: Διεύθυνση βύθισης επιπέδων με προσαρμογή επιπέδου και με τη χρήση ψηφιακής γεωλογικής πυξίδας

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων δεν είναι σημαντικές, υπό την προϋπόθεση ότι οι θέσεις των πυξίδων έχουν επιλεγεί προσεκτικά. Συγκεκριμένα, οι διαφορές που αφορούν στις γωνίες βύθισης των επιπέδων είναι αμελητέες ενώ οι διαφορές που αφορούν στη διεύθυνση βύθισης των επιπέδων είναι μεγαλύτερες, τονίζοντας με αυτό τον τρόπο την ευαισθησία της μεθόδου της γεωλογικής πυξίδας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 Εισαγωγή

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM για τρισδιάστατη σάρωση υπόγειου χώρου εκμετάλλευσης, καθώς και ενδιαφέρουσες προτάσεις έρευνας και ενασχόλησης με το αντικείμενο της τεχνολογίας SLAM σε μελλοντικές εργασίες.

### 7.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα στο οποία κατέληξε η παρούσα εργασία ομαδοποιούνται στις ενότητες των δεδομένων, του λογισμικού και της επεξεργασίας των μετρήσεων.

#### 7.2.1 Δεδομένα

Τα συμπεράσματα σχετικά με τα δεδομένα της τρισδιάστατης σάρωσης είναι τα εξής:

- Ο όγκος των δεδομένων ήταν ιδιαίτερα μεγάλος (για σάρωση τμήματος 100 μέτρων ο όγκος των δεδομένων μπορεί να αγγίζει και τα 5Gb) λόγω της μεγάλης πυκνότητας κατά τη σάρωση του χώρου με αποτέλεσμα να χρειαστεί υπολογιστικό σύστημα με υψηλές προδιαγραφές τόσο σε μνήμη Ram όσο και σε κάρτα γραφικών.
- Η σάρωση του μεταλλείου έγινε σε 9 διαδοχικά τμήματα, δηλαδή 9 νέφη σημείων, καθώς η σάρωση όλου του μεταλλείου και η αποθήκευσή του σε ένα αρχείο καθιστά το αρχείο τεράστιο (400GB) και επομένως μη διαχειρίσιμο.
- Ο ρυθμός λήψης σημείων είναι δεδομένος από τον κατασκευαστή του σαρωτή και ισούται με 300.000 σημεία/δευτερόλεπτο, ενώ η πυκνότητα των σημείων (σημεία/τετ.μέτρα) δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του σαρωτή. Μικρότερη ταχύτητα συνεπάγεται μεγαλύτερη πυκνότητα και περισσότερη λεπτομέρεια.
- Η απόκτηση των δεδομένων με τον σαρωτή χειρός τεχνολογίας SLAM που χρησιμοποιήθηκε, ήταν πολύ απλή και γρήγορη σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, χάρη στην αυτοματοποιημένη διαδικασία λήψης σημείων. Ενδεικτικά ο χρόνος που απαιτήθηκε για τη σάρωση 290 μέτρων κεντρικής στοάς και άλλων περίπου 200 μέτρων εγκάρσιων τομών ήταν 1 ώρα. Ωστόσο αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας της σάρωσης αποτελεί και η ίδρυση εξαρτημένης όδευσης εντός του μεταλλείου για την τοποθέτηση των φωτοσταθερών που απαιτούνται για τη διαδικασία της γεωαναφοράς. Οι εργασίες ίδρυσης των στάσεων διήρκησαν 2 ημέρες.
- Το αποτέλεσμα της σάρωσης με την πληροφορία της ανακλαστικότητας, ακόμη και χωρίς τη χρήση κάμερας, ήταν εύκολα αντιληπτό και αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας.

- Η διαδικασία συνένωσης των διαδοχικών νεφών σημείων έγινε από την εταιρία του σαρωτή, GeoSLAM. Η συνένωση δύο διαδοχικών νεφών πραγματοποιείται όταν βρεθεί ένας προκαθορισμένος αριθμός ομόλογων σημείων.
- Στα τμήματα της στοάς με παρουσία ύδατος στο πάτωμα υπήρχε μεγάλος θόρυβος εξαιτίας του φαινομένου ανάκλασης και διάθλασης της δέσμης laser στην επιφάνεια του νερού.
- Σε περίπτωση που κατά τη σάρωση δεν πραγματοποιηθεί κλείσιμο βρόγχου και δεν τοποθετηθούν φωτοσταθερά κατά μήκος της στοάς, στο πέρας της (290 m) προκύπτει σφάλμα (drift error) της τάξεως του 1-1.5 m.
- Για την επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε απομείωση σε ποσοστό 20-50% τόσο για λόγους υπολογιστικής ισχύος όσο και για λόγους επίτευξης καλύτερου αποτελέσματος σε κάποιες περιπτώσεις (πχ. δημιουργία πλέγματος τριγώνων.)

## 7.2.2 Λογισμικό

Τα συμπεράσματα που αφορούν στη χρήση λογισμικών επεξεργασίας τρισδιάστατων δεδομένων είναι τα ακόλουθα:

- Το λογισμικό “CloudCompare” που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα με μεγάλες δυνατότητες και ποικιλία εργαλείων στην επεξεργασία νεφών σημείων.
- Τα τμήματα του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν ως επί τω πλείστων ήταν τα εργαλεία δειγματοληψίας των νεφών, αποκοπής νεφών, μεταφοράς και στροφής, κλωνοποίησης νεφών, δημιουργίας διατομών, φίλτρων για εξάλειψη θορύβου και βλάστησης, μέτρησης απόστασης, μέτρησης όγκου, προσαρμογής μαθηματικών επιφανειών και δημιουργίας πλέγματος πολυγώνων.
- Όσον αφορά στην επεξεργασία πολυγωνικών πλεγμάτων (mesh surfaces) δεν υπάρχουν ισχυρά εργαλεία επεξεργασίας στο συγκεκριμένο λογισμικό, γι’ αυτό και για την επεξεργασία τους προτείνονται άλλα λογισμικά, όπως είναι το “MeshLab”.
- Βασικές επιλογές που ζητήθηκε να γίνουν ήταν στο ποσοστό δειγματοληψίας στην εκάστοτε περίπτωση, στις συντομικές συνθήκες και το μέγεθος των τριγώνων κατά τη διαδικασία της δημιουργίας πλέγματος και πλήθος παραμέτρων για τον καθαρισμό της βλάστησης, τη μείωση του θορύβου και την ογκομέτρηση, οι τελικές τιμές των οποίων καθορίστηκαν κατόπιν δοκιμών και βέλτιστου αποτελέσματος.
- Για τον καθορισμό της βλάστησης έγινε η χρήση του “Cloth Simulation Filter” και οι βασικές επιλογές που ζητούνται από τον χρήστη είναι το πόσο έντονο είναι το ανάγλυφο του εδάφους και το βήμα του κανάβου που καθορίζει την τραχύτητα του μοντέλου εδάφους που θα προκύψει.
- Για τον υπολογισμό του όγκου χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο “volume 2.5D” για τη λειτουργία του οποίου χρειάστηκε να επιλεγεί ποια επιφάνεια είναι το «πάτωμα» και ποια το «ταβάνι» και στη συνέχεια το κατάλληλο βήμα του κανάβου, έτσι ώστε να είναι το αποτέλεσμα όσο το δυνατόν πιο λεπτομερές χωρίς όμως ταυτόχρονα να υπάρξουν πολλά κενά κελιά.

### 7.2.3 Επεξεργασία

Τα συμπεράσματα σχετικά με την επεξεργασία των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Η επικαιροποίηση του τοπογραφικού με τη χρήση της τεχνολογίας SLAM, ακόμη και στην περίπτωση σύνθετης γεωμετρίας, είναι άμεση χωρίς να απαιτείται διακοπή των υπόλοιπων εργασιών για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Παρατηρήθηκε ότι η απεικόνιση των διατομών με τη βοήθεια πλέγματος τριγώνων (triangulated mesh) ήταν πιο ακριβής και λεπτομερής σε σχέση με την απεικόνιση μέσω του νέφους σημείων.
- Ο υπολογισμός του εμβαδού των διατομών με την προσεγγιστική μέθοδο της προσαρμογής επιφάνειας και με την αναλυτική μέθοδο που προσφέρει το λογισμικό επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα, με τις διαφορές να είναι έως  $0.5 \text{ m}^2$ .
- Ο υπολογισμός του όγκου στις περιπτώσεις απλής γεωμετρίας γίνεται αποτελεσματικά είτε με τη βοήθεια προσαρμογής της κατάλληλης μαθηματικής επιφάνειας στο νέφος σημείων είτε απευθείας πάνω στο νέφος σημείων με τη βοήθεια του κατάλληλου εργαλείου του λογισμικού, με τη διαφορά των δύο μεθόδων να είναι της τάξεως του  $1.5 \text{ m}^3$  σε ένα σύνολο όγκου  $25 \text{ m}^3$  (απόκλιση 6%). Ο υπολογισμός του όγκου μέσω του πλέγματος τριγώνων είχε απόκλιση από τις δύο προηγούμενες μεθόδους της τάξεως του 16% και 10% αντίστοιχα.
- Αντίθετα, ο υπολογισμός του όγκου σε περιπτώσεις σύνθετης γεωμετρίας προτείνεται να γίνει με τη βοήθεια πλέγματος τριγώνων και προσαρμογής μαθηματικής επιφάνειας με προσοχή και υπό προϋποθέσεις. Η απόκλιση των δύο μεθόδων είναι της τάξης του 4%, ενώ η απόκλισή τους από τον υπολογισμό του όγκου κατευθείαν από το νέφος σημείων είναι της τάξεως του 16% και 20% αντίστοιχα.
- Σχετικά με την εξαγωγή δομικών στοιχείων του χώρου, διακρίθηκαν 4 βασικά επίπεδα, εκ των οποίων το 1<sup>ο</sup> είναι το επίπεδο της κεντρικής στοάς. Τα δομικά στοιχεία της βύθισης και της διεύθυνσης βύθισης εξήχθησαν πιο εύκολα και αποτελεσματικά με τη βοήθεια της προσαρμογής επιπέδου. Σε αντίθεση, η μέθοδος της ψηφιακής πυξίδας είναι επιρρεπής σε σφάλματα λόγω μη ορθής χρήσης του εργαλείου. Ωστόσο, με προσεκτική χρήση του εργαλείου της πυξίδας, προέκυψαν μέγιστες διαφορές μεταξύ των μεθόδων της τάξης των 4<sup>ο</sup> για τη γωνία βύθισης και 17<sup>ο</sup> για τη διεύθυνση της βύθισης.

### 7.3 Προτάσεις

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στοχεύει συνεχώς στην ελαχιστοποίηση της έκθεσης του ανθρώπινου δυναμικού σε καταστάσεις υψηλής επικινδυνότητας σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος. Μία τέτοια εξέλιξη αποτελεί και η τεχνολογία της τρισδιάστατης σάρωσης SLAM, η οποία αποδεικνύεται ότι όχι μόνο δεν βρίσκεται αντιμέτωπη με τα κλασικά γεωδαιτικά όργανα αλλά αντιθέτως



συμπληρώνει την φαρέτρα των τοπογραφικών εργαλείων. Προς αυτή την κατεύθυνση, ενδιαφέρουσα πρόταση για μελλοντική έρευνα αποτελεί:

- Η μελέτη της αποτύπωσης υπόγειων χώρων υψηλής επικινδυνότητας με τη βοήθεια της τεχνολογίας SLAM σε συνδυασμό με τη χρήση ενός ή περισσότερων drones
- Η ενασχόληση με τη βελτίωση των αλγορίθμων της τεχνολογίας SLAM με στόχο την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που οφείλονται κυρίως στη συνένωση των νεφών σημείων. Το σφάλμα συνένωσης είναι πολύ σημαντικό διότι αφενός υπεισέρχεται σε κάθε διαδικασία σάρωσης και αφετέρου δρα αθροιστικά και επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια της σάρωσης.
- Η μελέτη της τεχνολογίας SLAM σε εξωτερικό περιβάλλον και η σύγκριση με τους στατικούς σαρωτές ως προς την ταχύτητα, την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια.

## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση

- Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J. & Llado, X., 2008. *The SLAM problem: a survey*. Sant Martí d'Empúries, Spain, Artificial Intelligence Research and Development.
- Besl, P. & McKay, N., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 02, pp. 239-256.
- Cabo, C. και συν., 2018. Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level. *Remote sensing*, 01 04, p. 16.
- Feng, Q., 2012. *PRACTICAL APPLICATION OF 3D LASER SCANNING TECHNIQUES TO UNDERGROUND PROJECTS*, Stockholm: ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION.
- Jones, E. και συν., 2019. *Applications for the Hovermap autonomous drone system in underground mining operations*, Muldersdrift: The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Kajzar, V., Kukutsch, R. & Heroldova, N., 2015. VERIFYING THE POSSIBILITIES OF USING A 3D LASER SCANNER IN THE MINING UNDERGROUND. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 02, p. 9.
- Marshall, G. & Stutz, G., 2011. *Handbook of Optical and Laser Scanning*. 2η επιμ. New York: CRC Press.
- Ninot, J., 2017. What the Heck is SLAM ...?. *LiDAR Magazine*, p. 4.
- Nuchter, A., Surmann, H., Lingemann, K. & Hertzberg, J., 2004. *6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping*. New Orleans, LA, USA, IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Reshetyuk, Y., 2009. *Terrestrial laser scanning: Error sources, self-calibration and direct georeferencing*. German: VDM Verlag .
- Riveiro, B. & Lindenbergh, R., 2020. *Laser Scanning: An Emerging Technology in Structural Engineering*. 1 επιμ. Hong Kong: CRC Press.
- Shan, J. & Toth, C., 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. New York: CRC Press.
- Wajs, J., Kasza, D., Zagozdzon, P. & Zagozdzon, K., 2018. *3D modeling of underground objects with the use of SLAM technology on the example of historical mine in Ciechanowice (Olowiane Range, The Sudetes)*, Wroclaw, Poland: EDP Sciences.
- Wang, W. και συν., 2014. Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. *Traffic and Transportation Engineering*, 05 01, p. 13.
- Youmei, H., Yang, B. & Zhen, Y., 2016. *Mobile 3D laser scanning technology application in the surveying of urban undergroundrail transit*. Beijing, China, s.n.
- Yuwei, C. και συν., 2018. The Accuracy Comparison of Three Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Based Indoor Mapping Technologies. *Sensors*, 15 09, p. 24.

Zhuli, R., Liguan, W. & Lin, B., 2019. Robust GICP-Based 3D LiDAR SLAM for Underground Mining Environment. *Sensors*, 01 07, p. 19.

CloudCompare, n.d. *CloudCompare*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://cloudcompare.org/> [Πρόσβαση 19 11 2020].

GeoSLAM, n.d. *GeoSLAM*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://geoslam.com/> [Πρόσβαση 01 12 2020].

GIS Resources, 2020. *GIS Resources*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.gisresources.com/what-is-slam-algorithm-and-why-slam-matters/> [Πρόσβαση 02 12 2020].

Higgins, S., 2020. *NAVVIS*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.navvis.com/blog/how-slam-affects-the-accuracy-of-your-scan-and-how-to-improve-it> [Πρόσβαση 25 11 2020].

MathWorks, n.d. *MathWorks*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html> [Πρόσβαση 02 12 2020].

The Pointscene Diaries, 2018. *POINTSCENE*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://medium.com/the-pointscene-diaries/all-you-need-is-slam-f77b30996317> [Πρόσβαση 23 11 2020].

### **Ελληνόγλωσση**

Αγγελακοπούλου, Φ., 2018. *ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΑΡΩΤΗ ΛΕΙΖΕΡ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΒΡΙΣΑΣ ΛΕΣΒΟΥ*, Μυτιλήνη: U.O.T.A..

Αναγνωστόπουλος, Β.-Θ., 2013. *Διερεύνηση αλγορίθμων για την ανίχνευση παραμορφώσεων από νέφη σημείων επίγειου σαρωτή laser*, Αθήνα: Ε.Μ.Π..

Αποστολόπουλος, Β., 2010. *Υπολογισμός της υπερεκκαφής στο μέτωπο σήραγγας με τη χρήση επίγειου σαρωτή laser – Εφαρμογή στην υπό διάνοιξη σήραγγα Τεμπών Τ1*, Αθήνα: Ε.Μ.Π..

Βέργος, Κ., 2015. *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ*, ΑΘΗΝΑ: Ε.Μ.Π..

Γκίκας, Β., Καραμήτσος, Σ. & Κώτσης, Ι., 2007. Χρήση Τρισδιάστατου Σαρωτή Laser στην Αποτύπωση Διατομών Σηράγγων. *Επιστημονικές Εκδόσεις Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ*, 01 08, p. 11.

Κόρδιτς, Β., 2017. *Διερεύνηση και Υλοποίηση Μεθόδου Χαρτογράφησης και Εντοπισμού Θέσης από οπτικά δεδομένα Αυτόνομου Υποβρύχιου Οχήματος*, Αθήνα: Ε.Μ.Π..

Κυριακής, Δ., 2018. *ΤΕΕ ΤΚΜ*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <http://tkm.tee.gr/gnwmes>

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π. και Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, n.d. *orykta*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.orykta.gr/oryktes-protres-yles-tis-ellados> [Πρόσβαση 09 11 2020].

Χρυσάνθη, Α., 2010. *MONUMENTA*. [Ηλεκτρονικό] Available at:  
<https://www.monumenta.org> [Πρόσβαση 28 11 2020].

GRECIAN MAGNESITE - Mining Industrial Shipping And Commercial SA,  
2020. *GRECIAN MAGNESITE*. [Ηλεκτρονικό] Available at:  
<http://www.grecianmagnesite.gr/> [Πρόσβαση 12 11 2020].

TSIMILIOTIS, N., n.d. *Πήλι Ευβοίας*. [Ηλεκτρονικό] Available at:  
<https://pilievia.com/oikonomiki-drasi/o-lefkolithos/> [Πρόσβαση 09 11 2020].