



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

# ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτα Ειρήνη Κυριακοπούλου

Επιβλέπουσα: Μενεγάκη Μαρία

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## **ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Παναγιώτα Ειρήνη Κυριακοπούλου

Επιβλέπουσα: Μενεγάκη Μαρία

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 24/07/2023

Μαρία Μενεγάκη

Πάυλος Νομικός

Δημήτριος Λαμπράκης

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

**Copyright © Παναγιώτα Ειρήνη Κυριακοπούλου**

**Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, ο κλάδος του μαρμάρου και της εκμετάλλευσης του είναι ένας παραδοσιακός τομέας, ο οποίος λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης τα τελευταία χρόνια, έχει κάνει άλματα ως προς την συνολική εκμετάλλευση μαρμάρου από το μέτωπο αλλά και μέχρι την τελική επεξεργασία, διανομή πώληση και εγκατάσταση του.

Νέες καινοτομίες και τεχνολογίες στον κλάδο όπως αυτές που συζητάμε στην διπλωματική αυτή, Drones, 3D Printing, LiDAR και VR, αξιοποίηση παραπροϊόντων κλπ., δίνουν μια νέα δυναμική στον κλάδο. Η κάθε τεχνολογία ξεχωριστά αγγίζει κάθε στάδιο στην εκμετάλλευση βοηθώντας σε πληθώρα διεργασιών, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο, στην βελτίωση της παραγωγικότητας όπως ο βαθμός απόληψης, ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης χρόνου επεξεργασίας και λειτουργίας του λατομείου, στη σωστή και καλύτερη διαχείριση παραπροϊόντων και στην ασφάλεια του.

Έτσι γινόμαστε πολύ πιο αποτελεσματικοί στο μέτωπο στην εκτίμηση και διαχείριση του κοιτάσματος, γεγονός που συνδέεται άμεσα την καλύτερη εκμετάλλευση από την αρχή μέχρι και το τελικό προϊόν σε όλα τα προϊόντα ενός λατομείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ

From ancient times until today, the marble industry and its exploitation is a traditional sector, which due to the technological development in recent years, has made leaps and bounds in terms of the overall exploitation of marble from the start and up to its final processing, distribution, sale and installation.

New innovations and technologies in the industry such as those discussed in this thesis, Drones, 3D Printing, LiDAR and VR, by-product utilization, etc., are giving a new dynamic to the industry. Each technology individually touches every stage in the operation helping in a plethora of processes, helping in a multitude of processes, some more than others, improving productivity such as the degree of recoverability, better way of managing processing time and operation of the quarry, proper and better management of by-products and safety of the quarry.

This makes us much more efficient on the front end in the assessment and management of the deposit, which is directly linked to the best exploitation from the beginning to the final product in all the products of a quarry.

## *Ευχαριστίες*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που με στήριξαν στο να καταφέρω τους στόχους μου, την οικογένεια μου αλλά και τους καθηγητές για την επικοινωνία που είχαμε και για τις συμβουλές που μου δώσανε τα τελευταία χρόνια της σταδιοδρομίας μου, αλλά ιδιαιτέρως την κ. Μαρία Μενεγάκη, που με καθοδήγησε σε κάθε κομμάτι της πορείας μου, δε θα μπορούσα να φτάσω ως εδώ χωρίς εκείνη.*

## Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται όλες οι τεχνολογίες που εμφανίζονται στον κλάδο του μαρμάρου των τελευταίων ετών, που βοηθούν στην εκμετάλλευση σε όλα τα στάδια της εξόρυξης, επεξεργασίας και παραγωγής σε ένα λατομείο μαρμάρου. Για τον σκοπό αυτό διερευνήθηκαν οι νέες τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε διάφορα στάδια λειτουργίας, μέσα από κείμενα, ερευνητικά άρθρα και βιβλιογραφικές αναφορές.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, παρουσιάζονται με την σειρά όπου επεμβαίνουν στα στάδια εξόρυξης και επεξεργασίας στο λατομείο νέες τεχνολογίες όπως τα Drones, τα LiDAR αλλά και LiDAR σε συνδυασμό με εικονική πραγματικότητα (VR), Κάμερες κατά την γεώτρηση, Ραντάρ - GPR, ετικέτες R-FID, Machine Learning, LBP και Ιστογράμματα, 3D Printing κλπ. Παρακάτω θα δούμε τι βρίσκεται στην αιχμή της τεχνολογίας στην εκμετάλλευση αλλά και επεξεργασία του μαρμάρου και των παραπροϊόντων του καθώς και τα άλματα που γίνονται σε όλα τα στάδια τεχνολογικά.

Ο κλάδος του μαρμάρου σήμερα, εκμεταλλεζόμενος όλα τα εργαλεία που παρέχονται από την έρευνα και την τεχνολογία, εξελίσσεται με τις απαιτήσεις του σήμερα σε όλα τα στάδια εκμετάλλευσης και παραγωγής του, καθώς γίνεται όλο και πιο καινοτόμος και προηγμένος. Πέρα από την ανάπτυξη μέσα στον ίδιο τον κλάδο, δίνει λύσεις σε προβλήματα που αφορούν κάθε στάδιο στην εκμετάλλευση του. Όλες οι τεχνολογικές αυτές εξελίξεις δίνουν μια νέα δυναμική στον κλάδο του μαρμάρου καθώς οι διαδικασίες πολλές φορές μπορεί να παραμένουν ίδιες αλλά οι διαφορές με την εξέλιξη των μηχανημάτων και της τεχνολογίας αποφέρουν μια αισθητή αλλαγή στην παραγωγικότητα του.



# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1° – Εισαγωγή.....	16
Κεφάλαιο 2° – DRONES: ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ.....	20
2.1 Εισαγωγή των Drones στο χώρο των λατομείων.....	20
2.2 Τα Drone στο μέτωπο.....	21
2.3 Έρευνα με Drones στο Λατομείο Λοράνο, Ιταλία.....	24
2.4 Καταγραφές Ρωγμών.....	26
2.5 Συμπεράσματα στην χρήση των Drone.....	26
Κεφάλαιο 3° : GPR – PANTAP ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....	28
3.1 Εισαγωγή τεχνολογίας GPR.....	28
3.2 Ανάλυση Χρήσης Συστημάτων GPR.....	28
3.3 Έρευνα χρήσης GPR και ERI στο Λατομείο Macael στην Ισπανία.....	31
3.4 Συμπεράσματα Τεχνολογίας GPR και ERI.....	34
Κεφάλαιο 4° : ΚΑΜΕΡΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	35
4.1 Εισαγωγή στις Κάμερες Γεώτρησης.....	35
4.2 Ψηφιακές Πανοραμικές Εικόνες Κάμερας Γεώτρησης.....	36
4.3 Ερμηνεία Επιπέδων Δομής και Συμπεράσματα.....	37
Κεφάλαιο 5° : UAV’s, ΕΝΑΕΡΙΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΙ ΣΕΝΣΟΡΕΣ LiDAR ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ.....	41
5.1 Εισαγωγή.....	41
5.2 Ορισμός Terrestrial LiDAR.....	41
5.3 Μέθοδοι Έρευνας και Εξοπλισμός.....	42
5.4 Αλλαγές στο Έδαφος.....	43
5.5 Αλλαγές στην Κάλυψη της Γης.....	45
5.6 Απόβλητα Κοπής Μαρμάρου.....	45
5.8 Συμπεράσματα Μεθόδων Ανάλυσης.....	46
Κεφάλαιο 6ο : ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΚΡΙΝΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΟΛΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ....	48
6.1 Εισαγωγή στην Τεχνολογία LiDAR VR.....	48
6.2 Μεθοδολογία.....	48
6.3 Σκανάρισμα Περιοχής με Λείζερ.....	49
6.4 Απεικόνιση σε Κοντινή Απόσταση.....	49

6.5 Εικονική Πραγματικότητα – Virtual Reality .....	51
6.6 Αλγόριθμος για την Εξαγωγή Πληροφοριών Συνόλων Δεδομένων.....	52
6.7 Υπολογισμός της Συνολικής Διάταξης από το Σύνολο Γεωμετρικών Δεδομένων	53
6.8 Λατομείο Ρομάννα.....	54
6.8 Στρατηγική Δεδομένων.....	55
6.9 Αποτελέσματα Χαρτογράφησης Ρηγμάτων.....	56
6.10 Αποτελέσματα Έρευνας.....	57
6.11 Συμπεράσματα Τεχνολογίας .....	59
<b>Κεφάλαιο 7° : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΤΙΚΕΤΩΝ R-FID.....</b>	<b>61</b>
7.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία .....	61
7.2 Δυνατότητες των Ετικετών R-FID.....	61
7.3 Ανάλυση Διαδικασίας Αναγνώρισης μέσω Ετικετών R-FID .....	62
7.4 Συμπεράσματα Χρήσης Ετικετών R-FID .....	67
<b>Κεφάλαιο 8° : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ ΜΕ MACHINE LEARNING (ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ), LBP ΚΑΙ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ .....</b>	<b>68</b>
8.1 Εισαγωγή στις τεχνολογίες .....	68
8.2 Μεθοδολογία.....	69
8.3 Μέθοδος LBP – Local Binary Patterns.....	71
8.4 Μέθοδος Ιστογράμματος .....	72
8.5 Η Φάση της Ταξινόμησης.....	74
8.6 Συμπεράσματα Χρήσης Ιστογραμμάτων και Προηγμένης Μηχανικής Μάθησης	76
<b>Κεφάλαιο 9°: ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ..</b>	<b>78</b>
9.1 Παραγωγή και διαχείριση απορριμμάτων .....	78
9.2 Αξιοποίηση Απορριμμάτων και Υποπροϊόντων.....	78
9.3 Παραγωγή σειριακών προϊόντων και προϊόντων χαμηλής τιμής .....	79
9.4 Παραγωγή Πληρωτικών Υλικών .....	79
9.5 Χρήσεις ανθρακικών αλάτων .....	80
9.6 Εισαγωγή στη χρήση Μαρμαρόσκονης.....	80
9.7 Εισαγωγή στη Χρήση Μαρμάρου στο Σκυρόδεμα.....	80
9.8 Χρήση Μαρμαρόσκονης.....	81
9.9 Αντοχή Σκυροδέματος με Μαρμαρόσκονη .....	82
9.10 Υπολογισμός Κόστους.....	82

9.11 Περιβαλλοντικά Συμπεράσματα.....	83
9.12 Χρήση Μαρμαρόσκονης και PLA σε 3D Printing .....	83
9.13 Μελέτες και αποτελέσματα στη χρήση MD και PLA σε 3D Printers .....	84
9.14 Ενσωμάτωση Μαρμαρόσκονης σε PLA για βιομηχανική χρήση.....	84
Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα .....	86
Βιβλιογραφία και Αναφορές.....	90

## Περιεχόμενα Σχημάτων-Εικόνων-Γραφημάτων

Γράφημα 1: Υπουργείο Περιβάλλοντος και ενέργειας – Παραγωγή Ογκομαρμάρων έως το 2019 στην Ελλάδα. ....	16
Εικόνα 1: Χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών στη φωτογραμμετρία για τρισδιάστατες έρευνες. [propelleraero.com].....	20
Εικόνα 2: Χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών στη φωτογραμμετρία για τρισδιάστατες έρευνες . [propelleraero.com].....	22
Εικόνα 3: 3D Απεικόνιση αποθεμάτων ασβεστόλιθου σε λατομείο στην Μαλαισία..	22
Εικόνα 4: Λοράνο, Ιταλία μετά τη κατολίσθηση στο λατομείο μαρμάρου. Τοπογραφία του μετώπου. ....	23
Εικόνα 5: Λοράνο, Ιταλία – Γεωλογικός Χάρτης στις Απουανικές Άλπεις – Τα σημεία P με μαύρο κάδρο, είναι η τοποθεσία του λατομείου Μαρμάρου. ....	24
Εικόνα 6: Λοράνο, Ιταλία – Γεωλογικός Χάρτης στις Απουανικές Άλπεις – Τα σημεία P με μαύρο κάδρο, είναι η τοποθεσία του λατομείου Μαρμάρου. ....	25
Εικόνα 7: Λοράνο, Ιταλία. Πανοραμική όψη των θέσεων της κάμερας. ....	25
Εικόνα 8: Λοράνο, Ιταλία – Έρευνα μέσω προγραμμάτων για τη χαρτογράφηση των συνόλων ασυνεχειών στη Νότια και Ανατολική πλευρά του υποστυλώματος. ....	26
Σχήμα 1: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός παλμικού GPR συστήματος. ( In: Jol, H.M. (Ed.), Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 73–97. ) .....	29
Εικόνα 9: 2a.: Επισκόπηση λατομείο Μαρμάρου στην Ισπανία, περιοχή Macael. 2b: Λεπτομέρειες για τις 3 κάθετες οπές που οριοθετούν τον όγκο. 2c: Κοπή τριγώνων τεμαχίων με σύρμα με διαμάντια παρουσία εκσκαφέα. 2d: Τετραγωνισμός μπλοκ. 2e: Τετραγωνισμός μπλοκ με τρυπάνι και σφήνες κατά μήκος ρωγμής στο πέτρωμα. 2f: Εκσκαφέας με υδραυλικό σφυρί. ....	30
Εικόνα 10: 3a: Επαφή μαρμάρου με σχιστόλιθο , 3b: Θραύσεις και καρστικές κοιλότητες. ....	31
Εικόνα 11: 4a: GPR που πραγματοποιήθηκε σε μαρμαρίνο πάγκο. 4b: Κεραία 250 MHz στη τράπεζα. 4c: Θέση του ERI στον πρωτογενή πάγκο 4d: Ηλεκτρόδιο Πηλού και Χαλκού. ....	32
Εικόνα 12: 6a: Μπροστινή επισκόπηση της πρόσοψης της τράπεζας μαρμάρου που εξετάστηκε. 6b/ 6c: Αποτελέσματα μελέτης για την παρακολούθηση της εναλλαγής του κοιτάσματος και των πετρωμάτων που έχει. ....	33
Εικόνα 13: Αριστερά - Φωτογραφίες οικογένειας ασυνεχειών. Δεξιά- Ένα πιο πολύπλοκο δίκτυο ασυνεχειών. Φωτογραφίες κάμερας από διάτρηση. ....	37
Σχήμα 2: Τα βήματα της αυτόματης ερμηνείας των παραμέτρων του επιπέδου δομής στη γεώτρηση με κάμερα στη κεφαλή της στήλης. ....	38
Εικόνα 14: Αποτέλεσμα διαίρεσης περιοχής των επιπέδων δομής σε μια εικόνα από τη κάμερα στη τομή. ....	39

Εικόνα 15: Τεχνικές επεξεργασίας 3D και 2D για την ταξινόμηση λατομικών περιοχών υψηλής ανάλυσης.....	44
Εικόνα 16: Θέση δείγματος με αλλαγές στην κάλυψη γης μεταξύ 2009 και 2020. ....	45
Εικόνα 17: Ροή εργασιών της γεωμετρικής στρατηγικής που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της τρισδιάστατης όρασης υπολογιστή.....	51
Εικόνα 18: Παράθυρο 3D VR και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ασυνεχειών.....	52
Σχήμα 3: Εξισώσεις για την εκτίμηση διεύθυνσης βύθισης, και της βύθισης των αρθρώσεων χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες των διανυσμάτων χώρου $U_x$ , $U_y$ και $U_z$ .....	54
Εικόνα 19: α. Δορυφορική εικόνα των Απουανικών Άλπεων- ο ένθετος χάρτης δείχνει τη θέση του λατομείου, στην Ιταλία. β. Αεροφωτογραφία ορθοφωτογραφίας και πλανομετρία του υπόγειου λατομείου. ....	54
Εικόνα 20: Παράδειγμα χαρτογράφησης ρωγμών με χρήση επισημάνσεων με συσχετιζόμενα αναγνωριστικά και γεωγραφικές τρισδιάστατες συντεταγμένες. ....	55
Εικόνα 20: Παράδειγμα χαρτογράφησης ρωγμών με χρήση επισημάνσεων με συσχετιζόμενα αναγνωριστικά και γεωγραφικές τρισδιάστατες συντεταγμένες. ....	56
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των συστημάτων ασυνεχειών στο λατομείο Ρομάνα, όπως προέκυψαν από το VR και από τη μηχανική-γεωλογική έρευνα. ....	56
Εικόνα 21: Ρήγμα, η στάση του οποίου χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των μεμονωμένων μετρήσεων με φωτοερμηνεία σε VR- προοπτική άποψη, η γραμμή κλίμακας είναι μόνο ενδεικτική.....	57
Σχήμα 5: Απεικόνιση της σχεδιασμένης στρατηγικής επικοινωνίας και για τις δύο πλατφόρμες. ....	64
Εικόνα 22: Δοκιμές παραμέτρων ενός μπλοκ μαρμάρου στο Πανεπιστήμιο Evora. 1. RFID Αισθητήρας ανάγνωσης/εγγραφής και κεραία, 2. Σύστημα συλλογής δεδομένων, 3. Παθητική ετικέτα RFID, 4. Πηγή ρεύματος και Ψηφιακό πολύμετρο.....	64
Σχήμα 6: Δομή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που αναπτύχθηκε για τον αναγνώστη RFID. ....	65
Σχήμα 7: Δομή της αναπτυχθείσας εφαρμογής Delphi-Application για την ενσωμάτωση RFID. ....	65
Σχήμα 8: Δομή της αναπτυχθείσας διαδικτυακής πλατφόρμας.....	66
Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης μαρμάρων.....	70
Εικόνα 23: Μέθοδος LBP:Αναπαράσταση συνιστωσών σάρωσης για διαφορετικές τιμές P και r.....	71
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Ιστογράμματος .....	72
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ιστογράμματος δεύτερης τάξης.....	72
Εικόνα 24: Επίδειξη διαδικασίας ιστογράμματος χρησιμοποιώντας δείγμα εικόνας μαρμάρου. ....	73
Εικόνα 25: Αρχιτεκτονική ELM.....	74

Πίνακας 4: ELM: απόδοση διασταυρούμενης επικύρωσης ταξινόμησης LBP .....	75
Πίνακας 5: ELM: απόδοση ταξινόμησης με ιστογράμματα διασταυρούμενης επικύρωσης. ....	75
Πίνακας 6: Σύγκριση των επιδόσεων ταξινόμησης με άλλες βιβλιογραφικές μελέτες. ....	76
Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός Πίνακας Τεχνολογιών .....	88

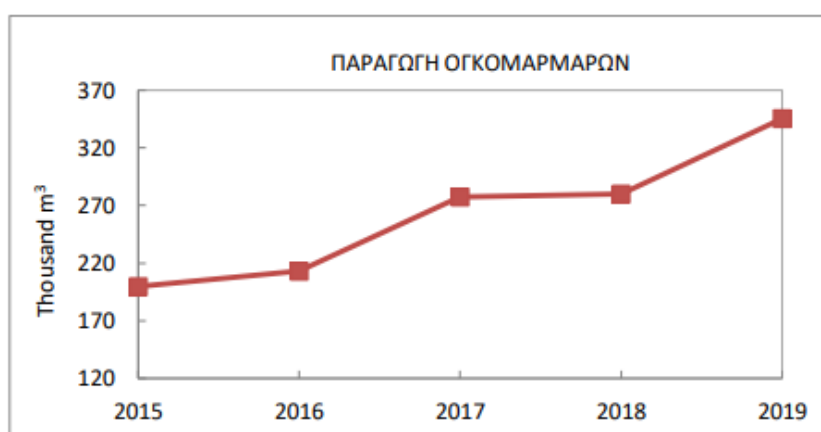


## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Εισαγωγή

Ο κλάδος του μαρμάρου είναι εδώ και αιώνες κλασσικός και διαχρονικός. Από την αρχαιότητα τα Ελληνικά Μάρμαρα είναι παγκοσμίως γνωστά και άρρηκτα συνδεδεμένα με την αρχιτεκτονική μας. Είναι ένας κλάδος που δεν έχει αλλάξει πάρα πολύ από την αρχή στο τρόπο εξόρυξης, τόσο στο μέτωπο, όσο μέχρι και την τελική του επεξεργασία. Τη τελευταία δεκαετία ωστόσο, έχουν γίνει μεγάλα άλματα τεχνολογίας σε όλους τους τομείς και σε όλα τα στάδια επεξεργασίας του, από τον εντοπισμό του μαρμάρου στο μέτωπο μέχρι και το τελικό προϊόν.

*Μάρμαρο [1]* είναι γεωλογικά ένα πέτρωμα το οποίο προέρχεται από μεταμόρφωση των ασβεστολίθων και έχει ως κύριο συστατικό του τον ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ) και τον δολομίτη ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ο οποίος σχηματίζει κρυστάλλους όπου έχουνε πολύ καλό σχισμό σε τρεις διευθύνσεις οι οποίες είναι παράλληλες με τις έδρες ρομβόεδρου. Ο σχισμός που προκύπτει προκαλεί τοπικά ανακλάσεις φωτός όπου παρατηρείται στις σχισμογενείς έδρες των κρυστάλλων που ονομάζονται μαρμαρυγή. Το μάρμαρο σε σχέση με τους ασβεστόλιθους ξέρουμε πως είναι κατάλληλο για να σμιλευτεί.

Το μάρμαρο σαν προϊόν είναι από τα κυριότερα προϊόντα που παράγει η χώρα μας από το υπέδαφος της, τόσο η παραγωγή και οι εξαγωγές μας στην Ελλάδα είναι από τις μεγαλύτερες μεταξύ άλλων πετρωμάτων και ορυκτών πρώτων υλών όπως ο βωξίτης, ο λευκόλιθος κ.α. Η χώρα μας έχει κοιτάσματα μαρμάρου σχεδόν σε όλη της την έκταση, καθώς σε πολλές περιοχές από αυτές τα κοιτάσματα αυτά να είναι σχεδόν ανεξάντλητα. *Λατομική δραστηριότητα* στη χώρα μας παρατηρείτε σε 43 διαφορετικούς νομούς αλλά ανάμεσα σε αυτές, υπάρχει πολύ πιο έντονη λατομική δραστηριότητα σε έξι περιοχές, στη Δράμα, στη Καβάλα, στη Θάσο, στο Άργος, στα Ιωάννινα και στην Αττική και αυτές αποτελούν πάνω από το 80% της παραγωγής μαρμάρου.



Γράφημα 1: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας – Παραγωγή Ογκομαρμάρων έως το 2019 στην Ελλάδα.

Αυτό που παρατηρείτε στον κλάδο του μαρμάρου είναι η συνεχής αύξηση της ζήτησης τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς παρατηρείται τρομερή αύξηση στις εξαγωγές που



κάνει η χώρα μας αλλά και όλες οι χώρες οι οποίες έχουν παραγωγή μαρμάρου. Η χρήση του στο χτίσιμο, την αρχιτεκτονική και τη διακόσμηση σπιτιών είναι ολοένα και πιο επιθυμητή παγκόσμια.

Η εκμετάλλευση μαρμάρου γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους, υπόγεια η υπαίθρια, ανάλογα με το κοίτασμα, τη σχέση αποκαλύψεως αυτού και τη μέγιστη προστασία του περιβάλλοντος. Στην Ελλάδα τα λατομεία μαρμάρων είναι υπαίθριας εκμετάλλευσης.

Η *σχέση αποκάλυψης* [2] του κοιτάσματος είναι η σχέση του όγκου των υπερκειμένων άγονων πετρωμάτων που θα πρέπει να απομακρυνθούν για να αποκαλυφθεί το κοίτασμα, προς τον όγκο του χρήσιμου υλικού που έχουμε να εξορύξουμε. Μέσα στον υπολογισμό αυτό, έχουμε και τον όγκο του πετρώματος που είναι ακατάλληλο για παραγωγή ογκομαρμάρων. Έτσι η σχέση γίνεται ο όγκος ( ή και βάρος) του άχρηστο προϊόντος προς το σύνολο των ογκομαρμάρων που θα εξορύξουμε.

Στην υπόγεια εκμετάλλευση, η οποία είναι λιγότερο συχνή, η επιλογής της συνήθως γίνεται λόγω της προστασίας του τοπίου στο οποίο βρίσκεται το κοίτασμα μας αλλά μόνο εάν αυτό μας συμφέρει οικονομικά. Στα λατομεία μαρμάρων, η κύρια εκμετάλλευση είναι η παραγωγή όγκων μαρμάρου. Οι όγκοι αυτοί είναι ορθογωνισμένοι όγκοι μαρμάρου από ένα έως τρία μέτρα και βάρος μέχρι και 15 τόνους. Οι όγκοι πρέπει να έχουν ορθογωνικό σχήμα για τη μείωση των απωλειών κατά την επεξεργασία αλλά και της αποδοτικότητας της εξόρυξης. Το μέγεθος των όγκων όμως το καθιστά και η ευκολία μεταφοράς από το λατομείο στο μέρος επεξεργασίας αλλά και παράγοντες όπως οι ασυνέχειες που βρίσκονται μέσα στο πέτρωμα, κομμοί και στρωματώσεις του μαρμάρου. Πάντα γίνεται μελέτη πριν την κοπή, ώστε να έχουμε όσο μεγαλύτερο όγκο μαρμάρου μπορούμε, με όσο λιγότερες αλλά και μικρότερες ασυνέχειες.

Πέρα από όγκους μαρμάρου όμως, ένα λατομείο έχει και προϊόντα μαρμάρου που προέρχονται από την κοπή των πάγκων, όπως είναι η λατύπη από την οποία προέρχεται η μαρμαρόσκονη, και μεγαλύτεροι όγκοι από τη λατύπη, ακανόνιστου μεγέθους από την κοπή των όγκων, από τα οποία γίνεται παραγωγή μικρότερων προϊόντων μαρμάρου. Αυτά τα προϊόντα από το λατομείο επειδή έχουν μικρότερο μέγεθος, καθίστανται ως λιγότερο κερδοφόρα, και είναι αρκετά μικρότερης αξίας.

**Η πρώτη φάση της εκμετάλλευσης** είναι η δημιουργία δρόμων προσπελάσεως. Η εκμετάλλευση ξεκινάει με τη κατασκευή δρόμων που να συνδέουν το λατομείο με όλα τα σημαντικά μέρη που χρειάζεται η δραστηριότητα μας. Συνδέουμε έτσι το λατομείο με το οδικό δίκτυο και στη συνέχεια με όλα τα μέρη του λατομείου, όλες τις βαθμίδες και το χώρο απορρίψεως. Οι βαθμίδες και οι δρόμοι που πρέπει να κάνουμε, πρέπει να σχεδιασθούν, και να επιλέγουν οι κατάλληλες κλίσεις και το πλάτος των δρόμων. Οι δρόμοι θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλοι έτσι ώστε να μπορούν δυο φορτηγά αυτοκίνητα να διασταυρωθούν και να περάσουν, άρα τουλάχιστον 3 φορές το πλάτος τους, για ασφάλεια, στα σημεία όπου προβλέπεται να συναντιούνται, και 2 φορές το πλάτος στα σημεία του λατομείου που δε προβλέπεται να διασταυρώνονται. Η κλίση

δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%, ιδανικά όμως θέλουμε κλίση 6-8% και το πλάτος θα πρέπει πάντα να είναι τουλάχιστον 4 μέτρα.

**Στη συνέχεια έχουμε την αποκάλυψη** των άγονων υλικών από το μαρμαροφόρο ορίζοντα που θέλουμε να εξορύξουμε ώστε να μπορέσουμε να ξεκινήσουμε την εκμετάλλευση του. Θα πρέπει να έχουμε αποκαλύψει τόσο πέτρωμα, ώστε να είναι ομαλή η εξόρυξη μαρμάρου σε βάθους κάποιων μηνών.

Στο στάδιο της **προετοιμασίας του μετώπου**, θα πρέπει να προσδιορίσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των άγκων που έχουμε και τις διαστάσεις των επιμέρους όγκων που θα εξορυχθούν. Προσδιορίζονται οι επιφάνειες που θα κοπούν και κοιτάμε να εκμεταλλευτούμε όσο πιο πολύ μπορούμε τις ασυνέχειες που βρίσκουμε στο πέτρωμα.

Κατά την **εξόρυξη των ογκομαρμάρων**, και την απόσπαση μεγάλων όγκων χρησιμοποιούνται διάφορα μηχανικά μέσα όπως παράλληλα διατρήματα κατά το επίπεδο της κοπής, συρματοκοπή, αλυσοπρίονα και ειδικά κοπτικά εργαλεία. Για την απομάκρυνση (αποκόλληση) και απόσπαση των όγκων, χρησιμοποιούνται σφήνες, γρύλλοι ή και ερπυστριοφόρες φορτωτών ή και προωθητών. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ειδικοί φορτωτές και υδραυλικού εκσκαφείς.

Στο λατομείο ολοκληρώνεται ο **ορθογωνισμός των όγκων** και ο τεμαχισμός τους σε μικρότερους όγκους εφόσον χρειάζεται ανάλογα με τον κάθε όγκο και τις ανάγκες η ασυνέχειες του, και φορτώνεται σε φορτηγά αυτοκίνητα για την μεταφορά τους στο εργοστάσιο παραγωγής.

Καθώς έχουμε όλη αυτή τη διαδικασία, σχεδόν σε όλα της τα στάδια εξόρυξης έχουμε και τη παραγωγή λατύπης, μαρμαρόσκονης και άχρηστου πετρώματος. Εάν η λατύπη που έχουμε δεν χρησιμοποιηθεί για παραγωγή άλλων προϊόντων, τότε εναποθέεται σε κατάλληλους χώρους κοντά η και στο λατομείο. Είναι πολύ σημαντική η κατάλληλη μεταφορά και διαχείριση της λατύπης καθώς μπορεί να εμποδίσει την γραμμή εκμετάλλευσης.

Αφού ολοκληρώσουμε την εκμετάλλευση σε ένα λατομείο μαρμάρου, αυτό που ακολουθεί είναι η **αποκατάσταση** αυτού. Συνήθως, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις μιλάμε για εκμετάλλευση ανοιχτού τύπου, το λατομείο μπορεί να είναι εμφανές διότι θα βρίσκεται στο πλάι ενός βουνού ή ενός λόφου. Αυτό που συνιστάται σε αυτή τη περίπτωση είναι η δημιουργία ενός στρώματος φυτικής γης πάνω στις βαθμίδες του μετώπου, για να φυτευτούν μετά το πέρας των εργασιών δέντρα, θάμνοι και πολλά είδη βλάστησης.

Στα επόμενα κεφάλαια ξεκινώντας την ανάλυση μας για τις νέες τεχνολογίες που έχουν εισέλθει στην εκμετάλλευση του μαρμάρου, αναφέρουμε με την σειρά τις τεχνολογίες σε σχέση με τα στάδια της παραγωγής και εκμετάλλευσης όπου αυτές επεμβαίνουν αντίστοιχα, αλλά και πως η κάθε μια βοηθάει το κάθε στάδιο και τι προσφέρει στον κλάδο.

Στο κομμάτι της έρευνας πριν την αποκάλυψη από τον μαρμαροφόρο ορίζοντα συναντάμε τεχνολογίες που μπορούν να γίνουν στο μέτωπο με την χρήση των Drone, μη επανδρωμένων τηλεχειριζόμενων αεροσκαφών, όπου βοηθούν με την εικόνα που παρέχουν να γίνει πολύ πιο μεθοδική και στοχευμένη παρέμβαση στο βουνό και στα άγονα υλικά στο λατομείο. Στην έρευνα αυτή επίσης βοηθούν τα Ραντάρ διείσδυσης στο έδαφος (Ground Penetrating Radars – GPR) όπως και τα UAV's - Εναέριων ή Επίγειων LiDAR στην διαχείριση των λατομείων.

Κατά τη διάρκεια της γεώτρησης, μια πολύ σημαντική τεχνολογία που βοηθάει στα δείγματα που παίρνουμε από το μέτωπο, είναι οι κάμερες. Η εξέλιξη του κλάδου σε αυτό το στάδιο της εξόρυξης μας βοηθάει στο να γίνουμε πιο μεθοδικοί στον σχεδιασμό εκμετάλλευσης του χώρου καθώς μπορούμε να δούμε πιο εύκολα αστοχίες στο πέτρωμα και ενδεχομένως να παραλείψουμε η και να προσπεράσουμε αστοχίες, ακόμα και να τις χρησιμοποιήσουμε υπέρ μας για την εκμετάλλευση.

Καθώς οι ασυνέχειες μας απασχολούν και παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στην εκμετάλλευση, καθορίζουν πολλές φορές την ποιότητα και την αποληψιμότητα των όγκων που θα πάρουμε από το μέτωπο, πολύ σημαντική τεχνολογική εξέλιξη σε αυτό το κομμάτι αναλύουμε στην εργασία την βοήθεια LiDAR με την χρήση τρισδιάστατης πραγματικότητας, για προβολή ασυνεχειών και αποφυγή αυτών, ειδικότερα σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

Κατά την παραγωγή και επεξεργασία του μαρμάρου, τεχνολογίες όπως η αναγνώριση με ετικέτες R-FID αλλά και με χρήση συστημάτων αναγνώρισης με τη βοήθεια Machine Learning και Ιστογραμμάτων, επιταχύνουν και δίνουν νέες προοπτικές στον κλάδο.

Τέλος, στο κομμάτι που απασχολεί την εκμετάλλευση μαρμάρου, την διαχείριση στείρων, καθώς είναι και το μεγαλύτερο κομμάτι της παραγωγής σε ένα λατομείο, και κατ' επέκταση στα λατομεία φυσικών πετρωμάτων, το πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα στείρα και την μαρμαρόσκονη είναι πολύ σημαντικό. Νέες καινοτόμες ιδέες στον κλάδο σχετικά με την εκμετάλλευση των στείρων όπως η χρήση μαρμαρόσκονης σαν πληρωτικό υλικό για τρισδιάστατους εκτυπωτές (3D Printers), η χρήση μαρμαρόσκονης στο σκυρόδεμα αλλά και σε πολλούς άλλους κλάδους όπως παραγωγή τεχνητών υλικών, τη νανοτεχνολογία κ.α., λύνουν ένα μεγάλο πρόβλημα στα λατομεία μαρμάρου και φυσικών πετρωμάτων, δίνοντας μεγάλο προβάδισμα στην διαχείριση των στείρων. Μέσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας ο κλάδος του μαρμάρου γίνεται ολοένα και πιο καινοτόμος σε όλα τα στάδια που τον αφορούν και στην επεξεργασία του.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – DRONES: ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

### 2.1 Εισαγωγή των Drones στο χώρο των λατομείων

Καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία έτσι εξελίσσονται και οι τεχνικές με τις οποίες μπορούμε να κάνουμε ανάλυση στο τοπίο το οποίο βρίσκεται το πέτρωμα που θέλουμε να εξορύξουμε. Τα άλματα στη τεχνολογία, και ιδιαίτερα στον κλάδο της φωτογραφίας συνδυαστικά με την φωτογραμμετρία, βοηθούν πάρα πολύ στην ανάλυση του μετώπου για ασυνέχειες, οριοθέτηση της φλέβας του πετρώματος, βοήθεια στο να βρεθούν τυχόν επικίνδυνα σημεία και πολύ πιο σύντομη χρονικά ανάλυση του τόπου ενδιαφέροντος. Ο χρόνος αυτός μπορεί να βοηθήσει σε άλλους τομείς της εκμετάλλευσης καθώς καθίστανται πάρα πολύ πολύτιμος.

Η χρήση των Drones (μη επανδρωμένα τηλεχειριζόμενα αεροσκάφη χωρίς όμως πιλότο) είναι όλο και πιο συχνή στο μέτωπο. Στην αρχή χρησιμοποιούνταν κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς, αλλά τη τελευταία δεκαετία με την ανάπτυξη στην τεχνολογία χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλούς κλάδους όπως έργα πολιτικών μηχανικών, στη γεωργία και στα τρόφιμα και στο κλάδο μας για εξορυκτικές και λατομικές δραστηριότητες.



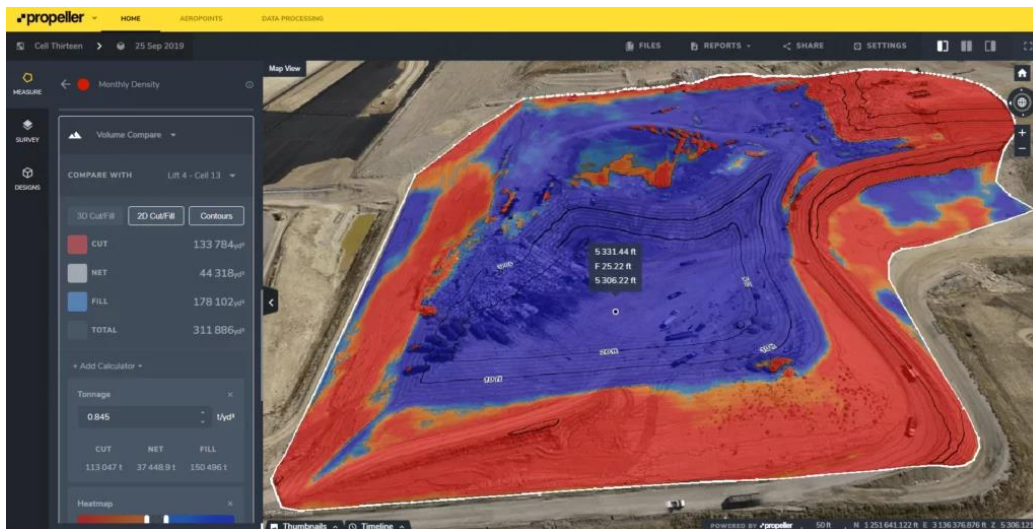
*Εικόνα 1: Χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών στη φωτογραμμετρία για τρισδιάστατες έρευνες.  
[propelleraero.com]*

Οι εξορυκτικές δραστηριότητες που περιλαμβάνουν και τη λατομική δραστηριότητα είναι μια από τις παλαιότερες βιομηχανίες στον κόσμο. Ο όγκος των αποθεμάτων ορυκτών μεταλλευμάτων και αδρανών υλικών στα ορυχεία και τα λατομεία παρακολουθείται συνεχώς για να διασφαλίζεται η συνεχής τροφοδοσία των

καταναλωτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις που ξέρουμε, εφαρμόζεται επί τόπου συμβατική μέθοδο για την εκτίμηση του αποθέματος, η οποία διενεργείται από τον τοπογράφο και τον μεταλλειολόγο μηχανικό για τη μέτρηση της διάστασης του αποθέματος. Άλλες μέθοδοι που εφαρμόζονται επί τόπου είναι η μέτρηση με το μάτι, το φορτίο φορτηγού και η μέθοδος καταμέτρησης κάδων. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι δημιουργούν προβλήματα σχετικά με την προσβασιμότητα και την ασφάλεια των χώρων, το κόστος των χρονοδιαγραμμάτων έρευνας και τα θέματα ασφάλειας και σε αντίθεση με την καταγραφή μέσω αεροφωτογραφιών, δεν είναι σε καμία περίπτωση το ίδιο λεπτομερές ή αντικειμενική. (Tucci *et al.*, 2019)

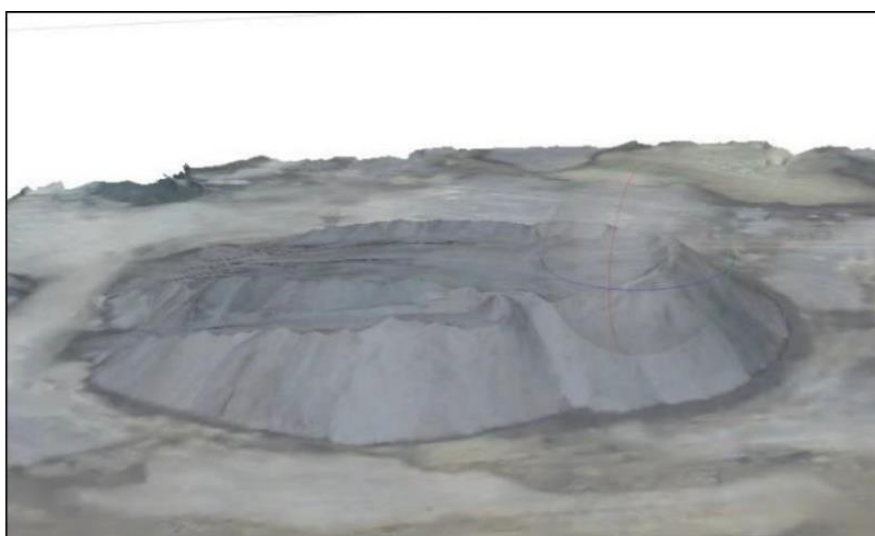
## 2.2 Τα Drone στο μέτωπο

Σε πρόσφατες μελέτες στη χρήση των drone και digital cameras, έγιναν πειράματα με σκοπό την αεροφωτογράφιση και την επίγεια φωτογράφιση με αργότερα επεξεργασία των εικόνων που αποκτήθηκαν με πρωτόκολλο φωτογραμμετρίας προκειμένου να δημιουργηθούν 3D μοντέλα του τοπογραφικού. (Rohizan *et al.*, 2021) Η εφαρμογή της φωτογραμμετρίας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για σκοπούς τοπογραφίας, αντικαθιστώντας έτσι σιγά-σιγά τα κλασικά εργαλεία τοπογραφίας. Η τεχνική της φωτογραμμετρίας είναι ικανή να πραγματοποιεί γρήγορες και σύνθετες δειγματοληψίες σε δύσκολες περιοχές χωρίς άμεση πρόσβαση στις τοποθεσίες, προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια και εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και χρόνου χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια. Στις εξορυκτικές δραστηριότητες, η τεχνική της φωτογραμμετρίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όγκου των αποθεμάτων, καθώς η λατομική δραστηριότητα είναι από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες στον κόσμο, η οποία προμηθεύει αδρανή υλικά κυρίως για την κατασκευή οποιωνδήποτε κτιρίων και κατασκευών. Η συνεχής προμήθεια αδρανών υλικών είναι πολύ σημαντική για να διασφαλιστεί ότι οι κατασκευαστικές δραστηριότητες μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς καθυστερήσεις. Ως εκ τούτου, οι φορείς εκμετάλλευσης λατομείων παρακολουθούν με συνέπεια τον όγκο των αποθεμάτων τους για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του πελάτη.



Εικόνα 2: Χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών στη φωτογραμμετρία για τρισδιάστατες έρευνες . [propelleraero.com]

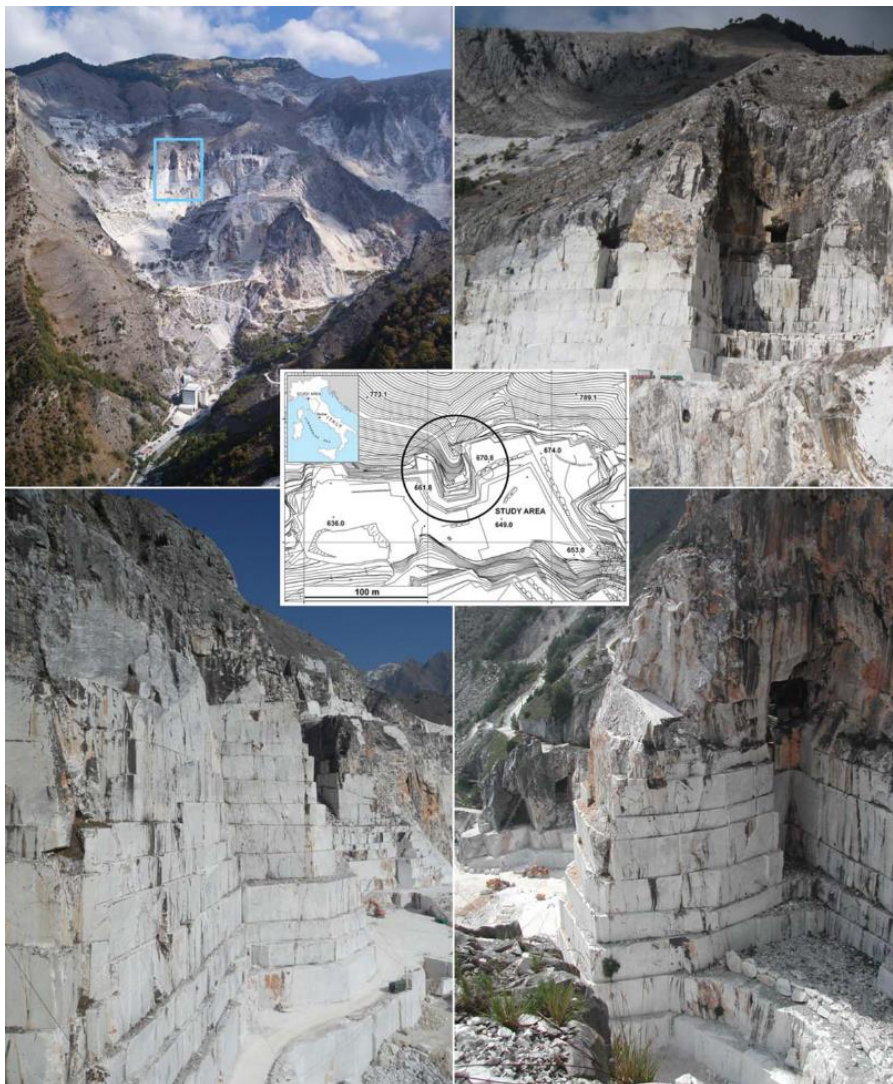
Στην τεχνική της φωτογραμμετρίας, οι εικόνες οι οποίες είναι απλές αεροφωτογραφίες δυδιάστατες (2D) μετατράπηκαν σε τρισδιάστατες μετρήσεις μοντελοποίησης με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας φωτογραφιών. Ωστόσο, μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη φωτογραμμετρική έρευνα είναι η βέλτιστη ανακατασκευή της εικόνας της περιοχής που πρέπει να ερευνηθεί για βέλτιστα αποτελέσματα . Πράγματα που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, ποικίλουν, όπως το θόλωμα της εικόνας λόγω της κίνησης, η ταχύτητα του ανέμου και τα σύννεφα ή το νέφος που πιθανόν να υπάρχει και αυτά συγκαταλέγονται μεταξύ των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της τελικής ορθοανακτιμένης εικόνας. Επιπλέον, παράμετροι όπως το ύψος πτήσης και το ποσοστό επικάλυψης παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ελάχιστης διάρκειας πτήσης και της υπολογιστικής απόδοσης. (Flores-de-Santiago *et al.*, 2020)



Εικόνα 3: 3D Απεικόνιση αποθεμάτων ασβεστόλιθου σε λατομείο στην Μαλαισία.

Τα Drone (UAV's) ειδικά τα τελευταία χρόνια όσο χρησιμοποιούνται στο μέτωπο, μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη ασυνεχειών. Αυτό βοηθάει πάρα πολύ και στον χρόνο που διαθέτει το λατομείο για τη διεργασία αυτή και κατά συνέπεια, σε όλα τα στάδια που πραγματοποιούνται στο μέτωπο για την κοπή και επεξεργασία πάγκων μαρμάρου. Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα στα λατομεία είναι ότι το μέτωπο δεν είναι πάντα εύκολα προσβάσιμο για μελέτη του τοπογραφικού. Στην ύπαρξη κλίσης στο έδαφος, ιδιαίτερα σε μέρη με πολύπλοκη μορφολογία και γεωμετρία είναι συνήθως και τα μέρη στα οποία θα βρούμε ασυνέχειες. Όμως με την χρήση των drone, και τη λήψη των δεδομένων από όλες τις γωνίες που μας ενδιαφέρουν μπορεί να βοηθήσει στο να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό.

Οι φωτογραφίες που παίρνουμε από τη μελέτη μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση όλων των ορατών ασυνεχειών ανεξάρτητα από τη θέση τους και το υψόμετρο τους από το έδαφος. Αυτό μας διευκολύνει ειδικά σε λατομεία όπου τα τείχη τους είναι πάρα πολύ ψηλά και για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τις ασυνέχειες σε μεγάλο υψόμετρο, χρειάζεται αναρρίχηση.

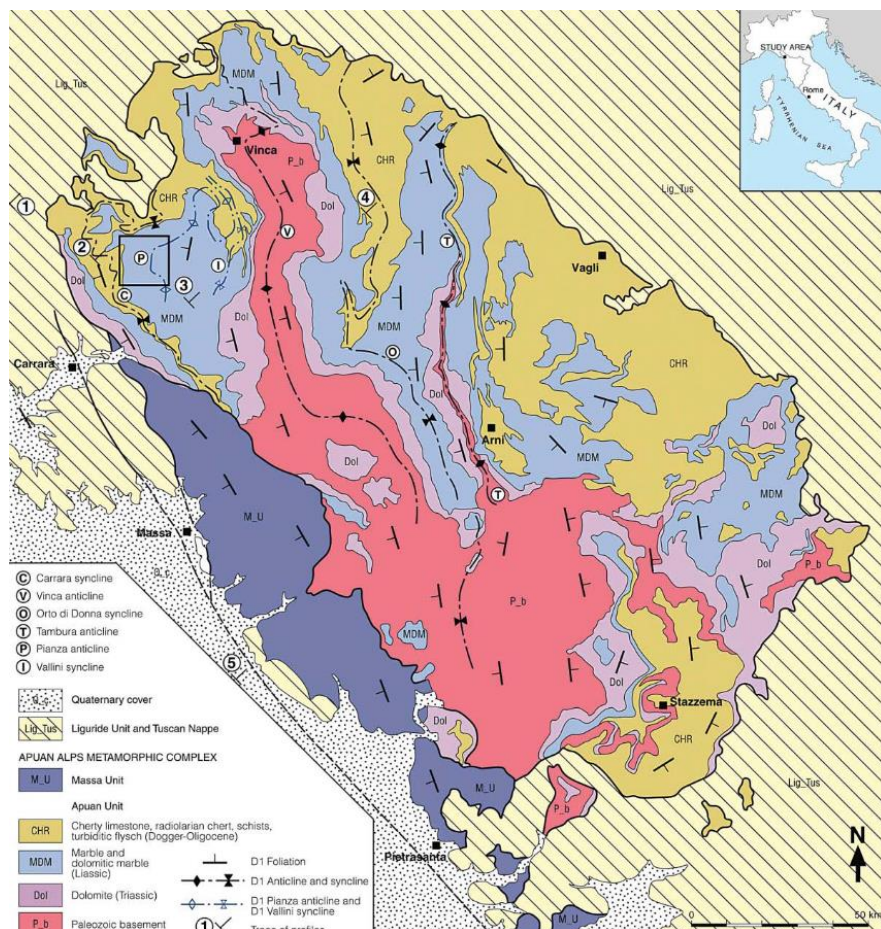


Εικόνα 4: Λοράνο, Ιταλία μετά τη κατολίπηση στο λατομείο μαρμάρου. Τοπογραφία του μετώπου.

Τα δεδομένα μας έτσι ενσωματώνονται με τις πληροφορίες από όλες τις παραδοσιακές τεχνικές και γεωλογικές έρευνες που γίνονται στον χώρο που μας ενδιαφέρει και έχουμε τη παραγωγή σημαντικών πληροφοριών και παραμέτρων για το έδαφος, όπως ο προσανατολισμός του πετρώματος ή της φλέβας, τη πυκνότητα του, το μέγεθος του πετρώματος στα διάφορα μέρη στο βουνό ή το λόφο, και τις ασυνέχειες που μας προβληματίζουν. (Salvini *et al.*, 2017)

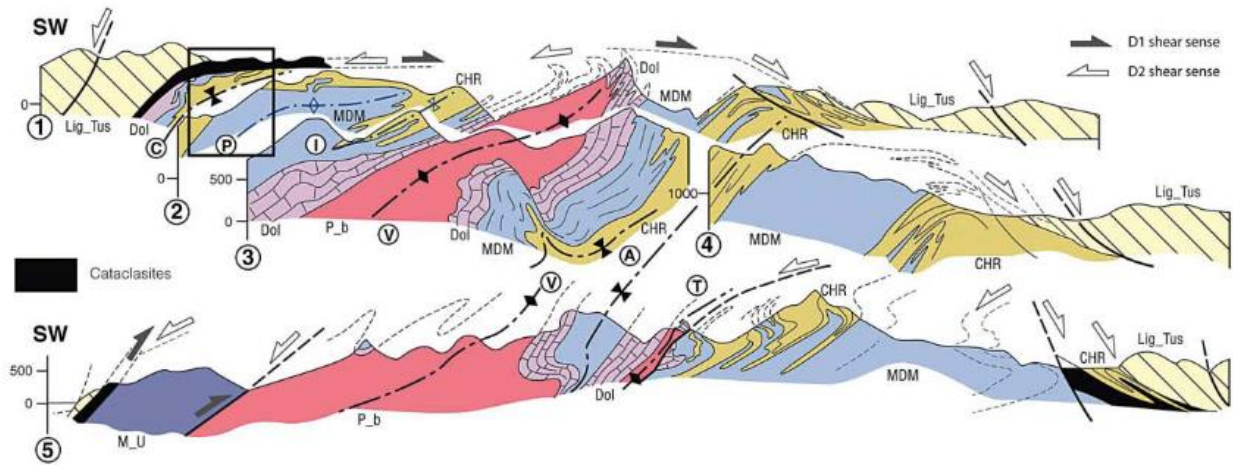
### 2.3 Έρευνα με Drones στο Λατομείο Λοράνο, Ιταλία

Στο Λοράνο, σε λατομείο ανοιχτής εκμετάλλευσης, μια κατολίσθηση παρεμπόδισε την λειτουργία του για αρκετές εβδομάδες. (Salvini *et al.*, 2017) Πραγματοποιήθηκε γεωλογική έρευνα για τον χαρακτηρισμό των γεωμηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Για να είναι εφικτή η έρευνα, συλλέχθηκαν τα δεδομένα σε περιοχές της κατολίσθησης και του λατομείου τα οποία ήταν προσβάσιμα με τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών χαρτογράφησης και σάρωσης ασυνεχειών, και έτσι εντοπίστηκαν 100 ασυνέχειες όπου ήταν μήκος άνω των 10 μέτρων. Τα δεδομένα αυτά συγκρίθηκαν με τα δεδομένα πριν τη κατολίσθηση, καθώς έγινε πάλι συλλογή δεδομένων με drones στις μη προσβάσιμες περιοχές όπου και βρέθηκαν άλλες 236 ασυνέχειες.



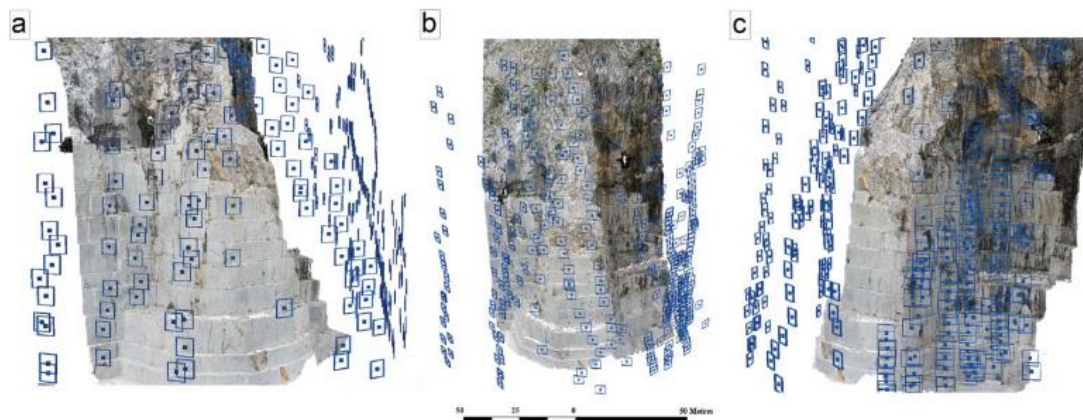
Εικόνα 5: Λοράνο, Ιταλία – Γεωλογικός Χάρτης στις Απουανικές Άλπεις – Τα σημεία P με μαύρο κάδρο, είναι η τοποθεσία του λατομείου Μαρμάρου.





Εικόνα 6: Λοράνο, Ιταλία – Γεωλογικός Χάρτης στις Απουανικές Άλπεις – Τα σημεία P με μαύρο κάδρο, είναι η τοποθεσία του λατομείου Μαρμάρου.

Πραγματοποιήθηκε στη περιοχή φωτογραμμετρική έρευνα με την χρήση Drone (UAV) για τη λήψη ψηφιακών φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης και χρησιμοποιήθηκε το Falcon 8 το οποίο έφερε επάνω του σαν κάμερα την Sony TMNEX-5N . Το Falcon έχει 8 ηλεκτρικούς ρότορες, σύστημα τηλεχειρισμού και ειδικό λογισμικό για διαχείριση σχεδίου πτήσης.

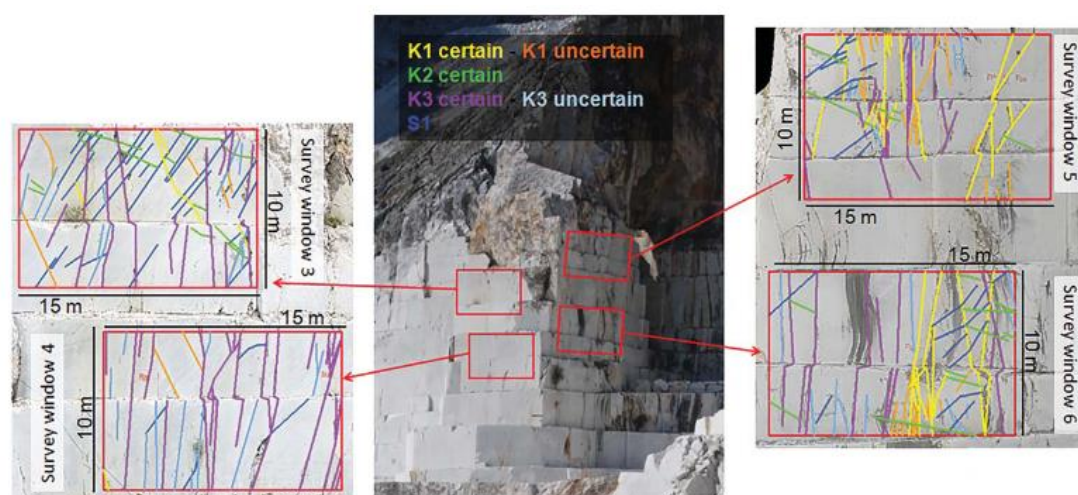


Εικόνα 7: Λοράνο, Ιταλία. Πανοραμική όψη των θέσεων της κάμερας.

Το Falcon έκανε πέντε κατακόρυφες πτήσεις με 80% επικάλυψη της περιοχής, και με 40% πλευρικής κάλυψης έτσι ώστε να εξασφαλίσει ότι θα ληφθούν φωτογραφίες από ολόκληρη τη περιοχή και οι φωτογραφίες λήφθηκαν από μέση απόσταση 30 μέτρων από το πρηνές, δίνοντας εκτιμώμενη απόσταση δειγματοληψίας εδάφους περίπου 1 εκατοστό.

## 2.4 Καταγραφές Ρωγμών

Μετά την καταγραφή των ασυνεχειών μέσω των UAV, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά λογισμικά που επιτρέπουν προσομοιώσεις μοντέλων DFN ( Discrete Fracture Network) τα οποία αποδίδουν τη κατανομή του μήκους τους και την ένταση τους. Στο συγκεκριμένο λατομείο μετά την έρευνα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FracSim3D για να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο DFN. Αυτό το λογισμικό μπορεί να προσομοιώσει 2D και 3D δίκτυα ρωγμών πετρωμάτων χρησιμοποιώντας σημειακές διαδικασίες. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που υποστηρίζονται από αυτό το λογισμικό είναι η θέση του ρήγματος, το μέγεθος (διάμετρος) και ο προσανατολισμός. Οι ιδιότητες αυτές μπορούν να οριστούν με τη χρήση διαφορετικών διαδικασιών και συναρτήσεων κατανομής.



Εικόνα 8: Λοράνο, Ιταλία – Έρευνα μέσω προγραμμάτων για τη χαρτογράφηση των συνόλων ασυνεχειών στη Νότια και Ανατολική πλευρά του υποστυλώματος.

## 2.5 Συμπεράσματα στην χρήση των Drone

Αυτό που βλέπουμε λοιπόν σαν συμπέρασμα στη χρήση των Drone (UAV) στο λατομείο, και σε κάθε μέτωπο που μας ενδιαφέρει η εκμετάλλευσή του, είναι ότι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης τους για μελέτες ευστάθειας βραχιδών πρανών είναι η δυνατότητα λήψης δεδομένων σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπου οι ασυνέχειες και οι ρωγμές μπορεί να μεταβάλλουν τη στάση τους και άλλα θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα σχέδια πτήσης των drone μπορούν να προσαρμοστούν σε κάθε επίπεδο έτσι ώστε να φθάνουν σε οποιοδήποτε ύψος μας ενδιαφέρει να ερευνησουμε πάνω από το έδαφος που βρισκόμαστε ώστε να βελτιστοποιούνται οι παρατηρήσεις και να αποφεύγονται οι αποκλείσεις πάνω στην έρευνα μας. Η συλλογή δεδομένων με Drone είναι μη επεμβατική, περισσότερο ασφαλής πολλές φορές από παραδοσιακούς τρόπους καταγραφής ασυνεχειών και τοπογραφικού και φθηνή σε σύγκριση με τις έρευνες με TLS και ελικόπτερα ( καθώς δεν απαιτείται πλήρωμα) . Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης τους είναι ότι οι έρευνες μπορούν να

ολοκληρωθούν πολύ γρήγορα σε σχέση με κλασσικές τεχνικές. Μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών του πρανούς στο μέτωπο μπορεί να χαρτογραφηθεί με ακρίβεια τόσο δισδιάστατα (2D) όσο και τρισδιάστατα (3D), με μεγάλη ευελιξία στην επεξεργασία των δεδομένων μας. Έτσι οι μελέτες για τις θραύσεις σε βραχόμαζα, μπορούν να επωφεληθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον συγκεκριμένο τύπο προσέγγισης μελέτης τόσο για την απόδοση, όσο και για τη σταθερότητα του λατομείου.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : GPR – ΡΑΝΤΑΡ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

### 3.1 Εισαγωγή τεχνολογίας GPR

Τα Ραντάρ διείσδυσης στο έδαφος, (GPR), (Giannino and Leucci, 2021) παρέχουν υψηλή ανάλυση του υπεδάφους όπου δεν μπορεί να ανιχνευθεί με κάποια άλλη τεχνική. Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη των GPR, ο εξοπλισμός τους αρχίζει και γίνεται ακόμα πιο φορητός, αξιόπιστος και πιο εύκολος στη χρήση του.

Το GPR χρησιμοποιεί ενεργή τεχνική γεωφυσικής έρευνας με ηλεκτρομαγνητικό σήμα στο έδαφος και έχει την ικανότητα να λειτουργεί σε περιβάλλον όπου έχουμε απώλεια σήματος και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν, σκεδάζονται ή απορροφώνται. Κατά τη λειτουργία του, μέρος του σήματος που θα σταλεί από τη συσκευή θα διασκορπιστεί η και εξαφανιστεί στο έδαφος. Ωστόσο ένα μέρος του σήματος ανακλάται από τα στρώματα του υπεδάφους όπου υπάρχει αντίθεση στις διηλεκτρικές ιδιότητες και επιστρέφει στην επιφάνεια, στη συνέχεια το σήμα καταγράφεται και αυτό το μέρος του σήματος χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της στρωματογραφίας του υπεδάφους.

Οι επιφάνειες του εδάφους που αντανακλούν το σήμα του ραντάρ ονομάζονται ανακλαστικές και το σήμα που καταγράφεται στην επιφάνεια ονομάζεται ανάκλαση. Η συχνότητα των σημάτων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπονται από τα συστήματα GPR κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10 και 1000 MHz. Η συχνότητα και η ταχύτητα του εκπεμπόμενου σήματος στο έδαφος ελέγχουν το μήκος κύματος του σήματος ραντάρ. Το μήκος κύματος του σήματος ραντάρ επηρεάζει την ανάλυση και υπάρχει συμβιβασμός μεταξύ του βάθους διείσδυσης του σήματος ραντάρ και της ανάλυσης, διότι τα σήματα χαμηλής συχνότητας με μεγαλύτερο μήκος κύματος έχουν μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης αλλά μικρότερη ανάλυση, ενώ τα σήματα υψηλότερης συχνότητας με μικρό μήκος κύματος έχουν μεγαλύτερη ανάλυση αλλά μικρότερη διείσδυση στο έδαφος. Στις γεωμορφολογικές έρευνες οι τυπικές συχνότητες των ραντάρ κυμαίνονται μεταξύ 50 και 200 MHz. Τα συστήματα υψηλότερων συχνοτήτων (500-1000 MHz) χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για μηχανικές εφαρμογές, όπως η ανίχνευση ράβδων οπλισμού σε σκυρόδεμα ή μελέτες υποδομής, όπου η ανάλυση, για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός κρυμμένου αντικειμένου, είναι πιο σημαντική από το βάθος διείσδυσης στο υπεδάφος. Συστήματα GPR χαμηλότερης συχνότητας έχουν αναπτυχθεί για γεωλογικές εφαρμογές όπως έρευνες εξόρυξης.

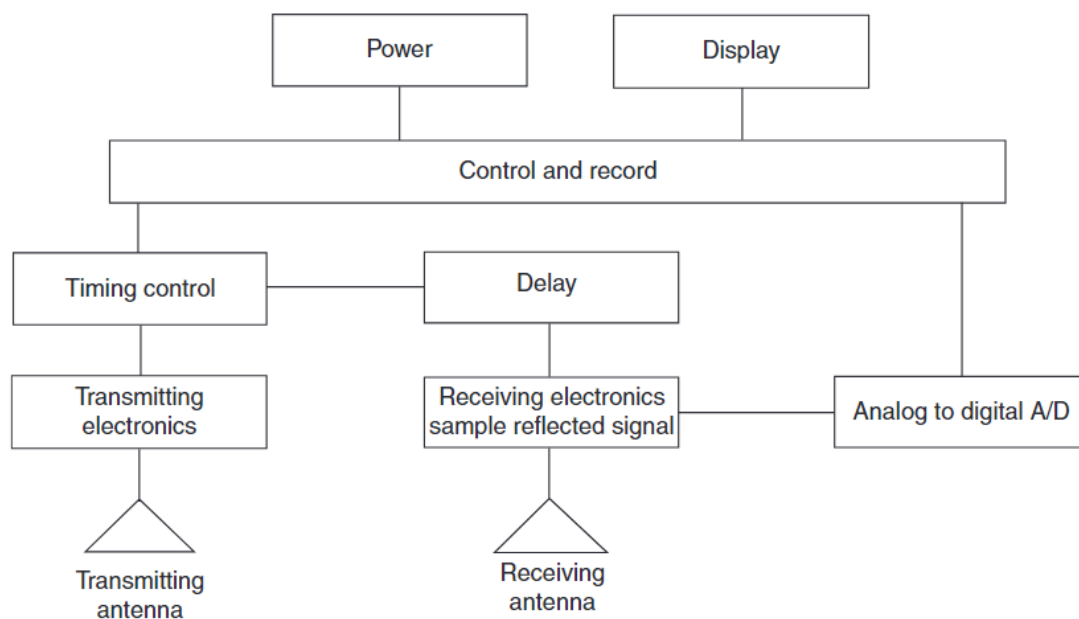
### 3.2 Ανάλυση Χρήσης Συστημάτων GPR

Υπάρχουν δύο κοινοί τύποι GPR, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τον τρόπο λήψης των δεδομένων, είτε στο πεδίο του χρόνου (παλμικό ραντάρ) είτε στο πεδίο της συχνότητας (ραντάρ συνεχούς κύματος και ραντάρ βηματικής συχνότητας).

Τα συστήματα GPR που περιγράφονται εδώ είναι συστήματα παλμικά, όπου εκπέμπεται ένας παλμός και καταγράφεται ο χρόνος που απαιτείται για να ληφθεί η

ανακλώμενη ενέργεια από τις κεραίες. Η κυματομορφή που προκύπτει δείχνει το πλάτος της ενέργειας που σκεδάζεται από τα υπόγεια αντικείμενα στο πεδίο του χρόνου. Το επανακαταγεγραμμένο σήμα εμφανίζεται σε χρόνο αμφίδρομης διαδρομής, δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει κάτω από το έδαφος προς το υπόγειο αντικείμενο και να επιστρέψει πίσω στην επιφάνεια όπου και καταγράφεται.

Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα παλμικού GPR εκπέμπουν πολλαπλά σήματα και στη συνέχεια λαμβάνουν διαδοχικά δείγματα για απεικόνιση, αποθήκευση δεδομένων και μετεπεξεργασία, έτσι ώστε το σήμα που απεικονίζεται να είναι στην πραγματικότητα ένα σύνολο από επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις και ανακλάσεις. Τα πρωτότυπα συστήματα έχουν κατασκευαστεί με μετατροπή με φλας ή με δειγματοληψία πλήρους κυματομορφής, όπου ολόκληρη η κυματομορφή, μετά από έναν πλήρη παλμό, ψηφιοποιείται.



Σχήμα 1: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός παλμικού GPR συστήματος. ( In: Jol, H.M. (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 73–97. )

Ο χαμηλός βαθμός απόληψης στην εξόρυξη διακοσμητικών πετρωμάτων παραμένει ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των διακοσμητικών ορυκτών. (Martínez *et al.*, 2017) Το γεγονός αυτό συνδέεται συνήθως με την παρουσία ανισοτροπιών στο πέτρωμα, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εξαγωγή των τεμαχίων. Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός της εκμετάλλευσης, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της γεωλογικής κατανόησης του πετρώματος που μας αφορά, θα μπορούσε να αυξήσει τις αποδόσεις αυτές. Έτσι χρησιμοποιούμε GPR και ERI (Zaini *et al.*, 2020) (ERI: Απεικονίσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με τη μέθοδο ERI γίνεται μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των υλικών του υπεδάφους.) ως εργαλεία χαρακτηρισμού της γεωλογίας του κοιτάσματος. Είναι γνωστό ότι η μέθοδος ERI παρέχει μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, είναι δυνατόν να διακριθούν τα όρια μεταξύ του μαρμάρου και των υποκειμένων μικροασβεστολίθων, η μορφολογία της προς εκμετάλλευση μονάδας, ακόμη και να εντοπιστούν ζώνες θραύσης. Επομένως, η τεχνική αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα πρώτα στάδια της έρευνας, για την εκτίμηση των αποθεμάτων του κοιτάσματος. Η μεθοδολογία GPR, με μικρότερο βάθος διείσδυσης, είναι σε θέση να προσφέρει λεπτομερέστερες πληροφορίες.

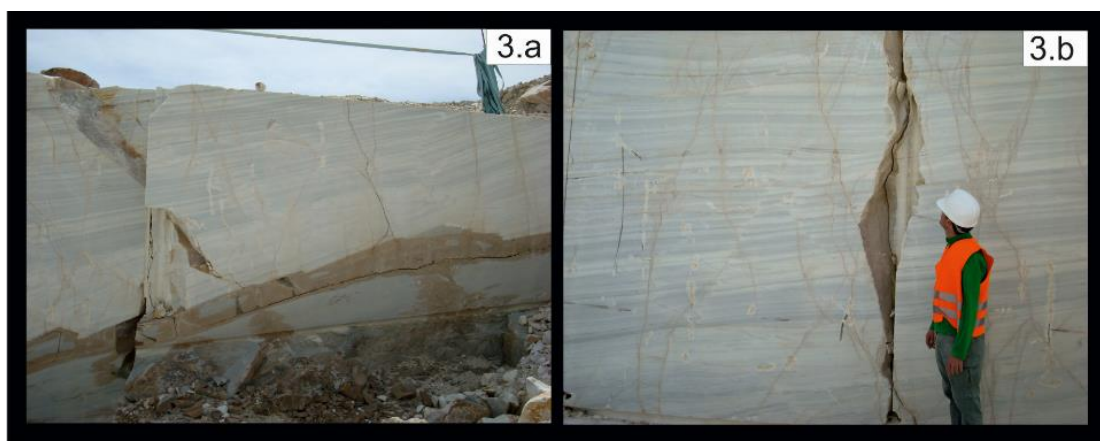


Εικόνα 9: 2a.: Επισκόπηση λατομείο Μαρμάρου στην Ισπανία, περιοχή Mascael. 2b: Λεπτομέρειες για τις 3 κάθετες οπές που οριοθετούν τον όγκο. 2c: Κοπή τριγώνων τεμαχίων με σύρμα με διαμάντια παρουσία εκσκαφέα. 2d: Τετραγωνισμός μπλοκ. 2e: Τετραγωνισμός μπλοκ με τρυπάνι και σφήνες κατά μήκος ρωγμής στο πέτρωμα. 2f: Εκσκαφείας με υδραυλικό σφυρί.

Συγκεκριμένα, ανιχνεύει τις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές της όψης στο εσωτερικό του μαρμάρου, καθώς και τις ανισοτροπίες του πετρώματος (ρωγμές ή οπές). Η τεχνική αυτή θα ήταν κατάλληλη για χρήση σε ένα δεύτερο στάδιο της έρευνας. Αφενός, είναι πολύ χρήσιμη για τον χαρακτηρισμό της υφής και του ιστού του πετρώματος, γεγονός που επιτρέπει τον εκ των προτέρων προσδιορισμό των ιδιοτήτων του και, επομένως, της ποιότητας για διακοσμητική χρήση. Από την άλλη πλευρά, ο εντοπισμός της ανισοτροπίας με την τεχνική GPR θα επιτρέψει τη βελτίωση του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης του πετρώματος με σκοπό την αύξηση των αποδόσεων. Και οι δύο ολοκληρωμένες γεωφυσικές τεχνικές είναι αποτελεσματικές για την εκτίμηση της ποιότητας των καλλωπιστικών πετρωμάτων και, συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμα εργαλεία στο σχεδιασμό των λατομείων για τη βελτίωση των αποδόσεων και του κόστους.

### 3.3 Έρευνα χρήσης GPR και ERI στο Λατομείο Macael στην Ισπανία

Στο λατομείο Macael στην Ισπανία, χρησιμοποιήθηκε GPR και ERI, και επιλέχθηκε πάγκος λατομείου μήκους 48 μέτρων και ύψους 5 μέτρων. Ο πάγκος αποτελείται από μάρμαρο (Macael white), το οποίο χαρακτηρίζεται από κοκκώδη υφή. Υπάρχουν ορισμένες παρεμβολές (περισσότερο ή λιγότερο άφθονες), με λεπιδοβλαστική υφή, οι οποίες επιτρέπουν τον εντοπισμό της αρχικής στρωμάτωσης. Στα τοιχώματα των ανθρακικών πετρωμάτων και στα δύο άκρα του πάγκου, οι υποκείμενοι σχιστόλιθοι αναγνωρίστηκαν από μια βυθιζόμενη σπασμένη επαφή που σχηματίζει το σύγκλινο και με κατακόρυφα κλειστά ρήγματα με βύθιση προς τα βορειοανατολικά τόσο στο μάρμαρο όσο και στον σχιστόλιθο. Αρκετές μη ανεπτυγμένες καρστικές κοιλότητες εντοπίστηκαν επίσης στην επιφάνεια του πάγκου.



Εικόνα 10: 3a: Επαφή μαρμάρου με σχιστόλιθο , 3b: Θραύσεις και καρστικές κοιλότητες.

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το RAMA/GPR μοντέλο Pro-Ex το οποίο κατασκευάστηκε στην Σουηδία. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του λατομείου και του πετρώματος, επιλέγεται και η κατάλληλη κεραία. Από τη μία πλευρά, η διείσδυση σε βάθος ελέγχεται από την κεντρική συχνότητα και την αγωγιμότητα του υλικού. Σε

υλικά με χαμηλές απώλειες, το κατά προσέγγιση μέγιστο βάθος διείσδυσης για συχνότητες 200-250 MHz είναι περίπου 8-20 m, ενώ, όταν χρησιμοποιείται κεραία 100 MHz, είναι περίπου 25 m (Bristow and Jol, 2003) Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση εξαρτάται από τη συχνότητα της κεραίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται μια κεραία 250 MHz επειδή παρέχει την καλύτερη ανάλυση με βάθος διείσδυσης 20 m που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του πετρώματος.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τις ακόλουθες παραμέτρους λειτουργίας: ονομαστική συχνότητα 250 MHz, χρονικό παράθυρο μεταξύ 189,8 ns (περίπου 10 m) και 359,8 ns (περίπου 18 m), διάστημα απόστασης 0,05 m, συχνότητα δειγματοληψίας 2,54 GHz, αριθμός στίβων δύο και η ταχύτητα 100 mm/ns εκτιμήθηκε κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα εκτιμήθηκε με τη δημοφιλή μέθοδο της προσαρμογής υπερβολής (Jol, 2008), η οποία περιλαμβάνεται στο λογισμικό ReflexW κατά την ανάλυση των δεδομένων που ελήφθησαν.

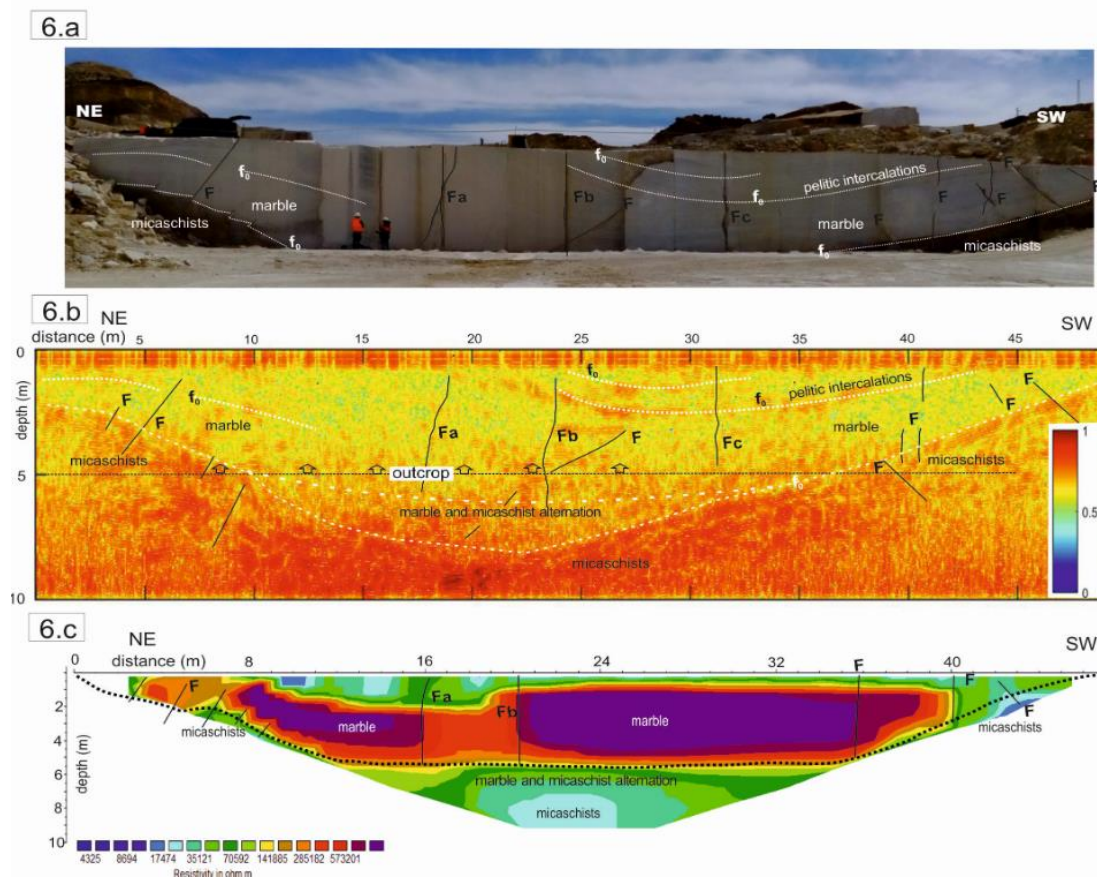


Εικόνα 11: 4a: GPR που πραγματοποιήθηκε σε μαρμάρινο πάγκο. 4b: Κεραία 250 MHz στη τράπεζα. 4c: Θέση του ERI στον πρωτογενή πάγκο 4d: Ηλεκτρόδιο Πηλού και Χαλκού.



Μετά την ανάλυση βρέθηκε ότι αν και το μάρμαρο στην ενδιάμεση ζώνη είναι αρκετά ομοιογενές κατά μήκος της τράπεζας, εντοπίζονται αρκετές ασυνέχειες. Παρατηρούνται ζώνες χαμηλής ειδικής αντίστασης στο μάρμαρο από την προέλευση έως τα 7 μέτρα, μεταξύ 16 και 21 μέτρων και από 40 έως 47 μέτρα, οι οποίες συνδέονται με τις ζώνες με τη μεγαλύτερη θραύση. Θεωρήθηκε ότι οι περιοχές αυτές είναι ζώνες αδυναμίας με υψηλό κίνδυνο θραύσης κατά την κοπή και την αφαίρεση των μπλοκ μαρμάρου. Κατά συνέπεια, οι περιοχές του πάγκου μεταξύ 7 και 16 m και μεταξύ 21 και 40 m φαίνεται να είναι άθικτες και θα επέτρεπαν την περαιτέρω βελτιστοποίηση της κοπής και της αφαίρεσης των τεμαχίων από τον πάγκο εξόρυξης. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους του προφίλ θα μπορούσε να επιτρέψει μεγαλύτερο βάθος διείδυσης. Ωστόσο, δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν αλλαγές στην υφή του μαρμάρου, παρά μόνο περισσότερο ή λιγότερο αλλοιωμένες περιοχές.

Επομένως, η ERI είναι ένα κατάλληλο εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προκαταρκτικό στάδιο της έρευνας, η οποία απαιτεί μια συνολική εικόνα του κοιτάσματος. Σε ένα δεύτερο στάδιο της έρευνας, το GPR θα μπορούσε να προσφέρει λεπτομερέστερες πληροφορίες για τις ανισοτροπίες του προς εκμετάλλευση πετρώματος.



Εικόνα 12: 6a: Μπροσινή επισκόπηση της πρόσοψης της τράπεζας μαρμάρου που εξετάστηκε. 6b/ 6c: Αποτελέσματα μελέτης για την παρακολούθηση της εναλλαγής του κοιτάσματος και των πετρωμάτων που έχει.

### 3.4 Συμπεράσματα Τεχνολογίας GPR και ERI

Η μελέτη στο λατομείο αυτό μας έδειξε ότι το GPR και η ERI τεχνικές παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες για τον προσδιορισμό της ποιότητας των διακοσμητικών πετρωμάτων “in situ” στα λατομεία όσον αφορά τη λιθολογία τους και τη παρουσία ρωγμών και επαφών. Οι τεχνικές παρέχουν συνεπή αποτελέσματα.

Η ERI παρέχει πιο γενικές και βασικές πληροφορίες σχετικά με τη λιθολογική μονάδα, γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμόζεται στα πρώτα στάδια της λατομικής έρευνας. Σε αυτό το παράδειγμα, τα αποτελέσματα μας επέτρεψαν να εντοπίσουμε τρία επίπεδα στην τράπεζα εξόρυξης και να εντοπίσουμε τις περιοχές μέσα στο μάρμαρο με τις περισσότερες ασυνέχειες. Επομένως, η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προκαταρκτικό στάδιο για την εκτίμηση των αποθεμάτων του κοιτάσματος. Ωστόσο, δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την υφή του πετρώματος, οπότε δεν μας δίνει πολλές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του πετρώματος προς εξόρυξη (εμπορική αξία). Μεγάλος αριθμός μικρών ρηγμάτων, αλλά ικανών να σπάσουν ένα μπλοκ κατά τη στιγμή της εξόρυξης, μπορεί να μην εντοπιστούν καθόλου με τη μέθοδο αυτή. Ως εκ τούτου, η μεθοδολογία δεν προσφέρει πολλές δυνατότητες για τον προγραμματισμό της εκμετάλλευσης με σκοπό την αύξηση των αποδόσεων και του βαθμού απόληψης.

Το GPR χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη εικόνων του λατομείου, στις οποίες μπορούν να αναγνωριστούν σαφώς οι διαστάσεις των μαρμάρινων όγκων. Σε αντίθεση με την ERI, τα αποτελέσματα έδειξαν τη χρησιμότητα αυτής της τεχνικής για την αξιολόγηση της ποιότητας του μαρμάρου (επιτρέπει τον προσδιορισμό της στρωματοποίησης, ακόμη και του ιστού και της υφής του πετρώματος) και των δομικών ανωμαλιών (ρωγμές, οπές και λοιπές ασυνέχειες). Έτσι, το GPR μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον λεπτομερέστερο χαρακτηρισμό της μονάδας του πετρώματος, καθώς και για την εμπορική του αξία.

Όλα αυτά βοηθούν στην καλύτερη εκμετάλλευση, καλύτερη χρήση του χρόνου το λατομείου, στην οργάνωση και στον καλύτερο και μεγαλύτερο βαθμό απόληψης αν χρησιμοποιήσουμε αυτές τις δύο τεχνικές σαν γνώμονες για την σωστή κοπή των πάγκων, κάνοντας έτσι τις ασυνέχειες ένα εργαλείο για εκμετάλλευση στο μέτωπο.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : ΚΑΜΕΡΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

### 4.1 Εισαγωγή στις Κάμερες Γεώτρησης

Η τεχνολογία ψηφιακής πανοραμικής κάμερας γεώτρησης (Wang *et al.*, 2017) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε έργα και εκμεταλλεύσεις καθώς μπορεί να ληφθεί ένας μεγάλος αριθμός εικόνων υψηλής και ακρίβειας από αυτές. Οι εικόνες της κάμερας γεώτρησης καταγράφουν με ακρίβεια γεωλογικές πληροφορίες, ιδίως τις παραμέτρους χαρακτηριστικών του επιπέδου δομής. Ωστόσο, δεδομένου ότι η απόκτηση των αυτών των χαρακτηριστικών γίνεται συνήθως με το χέρι, ο φόρτος εργασίας είναι μεγάλος και τα αποτελέσματα μπορεί να επηρεαστούν από το ανθρώπινο λάθος.

Για να επίλυση αυτού του προβλήματος, υπάρχει μια μέθοδο αυτόματης ερμηνείας των παραμέτρων του επιπέδου δομής σε εικόνα κάμερας γεώτρησης. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται τα γκρι εικονοστοιχεία (pixel) της εικόνας, οι τιμές κλίσης και η μέθοδος προβολής για τη διάκριση της περιοχής εμφάνισης των δομικών επιπέδων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η τυπική μέθοδος αντιστοίχισης ημιτονοειδούς συνάρτησης για την αναζήτηση του επιπέδου δομής στην περιοχή. Τέλος, η βέλτιστη καμπύλη ημιτόνου διαλέγεται και υιοθετείται ως χαρακτηριστική καμπύλη του επιπέδου δομής. Οι σχετικές παράμετροι της καμπύλης ημιτόνου αναλύονται και μετατρέπονται σε παραμέτρους του επιπέδου δομής, όπως η κεντρική θέση, ο προσανατολισμός, η γωνία βύθισης και το πλάτος θραύσης των δομικών επιπέδων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προσδιορίζει αυτόματα τα επίπεδα δομής στην εικόνα συνεχώς και γρήγορα, και να λαμβάνει τις αντίστοιχες δομικές παραμέτρους. Η μέθοδος είναι σταθερή και αξιόπιστη και σε μεγάλο βαθμό μπορεί και βελτιώνει την αποδοτικότητα της εργασίας. Μπορεί να εκτελέσει την αυτόματη ερμηνεία των δομικών επιπέδων και την εξαγωγή γεωμετρικών παραμέτρων και να παρέχει μια αποτελεσματική και συνεπή λύση για την απόκτηση πληροφοριών του πετρώματος της εκμετάλλευσης και επεξεργασία σήματος-εικόνας της κάμερας γεώτρησης.

Το ψηφιακό πανοραμικό σύστημα κάμερας γεώτρησης είναι ικανό να παρατηρεί ταυτόχρονα 360 μοίρες της γεώτρησης και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε έργα γεωτεχνικής, πολιτικής, μεταλλευτικής, υδροηλεκτρικής μηχανικής και πρόληψης γεωλογικών καταστροφών. Το σύστημα αυτό μπορεί να λάβει μεγάλο αριθμό εικόνων υψηλής ακρίβειας, οι οποίες καταγράφουν με ακρίβεια τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τις γεωμετρικές παραμέτρους των ασυνεχειών ή του δομικού επιπέδου στο τοίχωμα της γεώτρησης.

Για τη γεώτρηση, η μεταγενέστερη επεξεργασία της κάμερας γεώτρησης για την απόκτηση παραμέτρων δομικού επιπέδου είναι συχνά μια σύντομη, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος, που οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση ανθρώπινου δυναμικού και υλικών πόρων. Επί του παρόντος, η εξαγωγή παραμέτρων των χαρακτηριστικών των δομικών επιπέδων στις εικόνες της κάμερας εξαρτάται βασικά από τη χειροκίνητη λειτουργία και την υποκειμενική ερμηνεία. Ως εκ τούτου, η ακριβώς αυτόματη ερμηνεία των δομικών παραμέτρων των μορφολογικών χαρακτηριστικών των

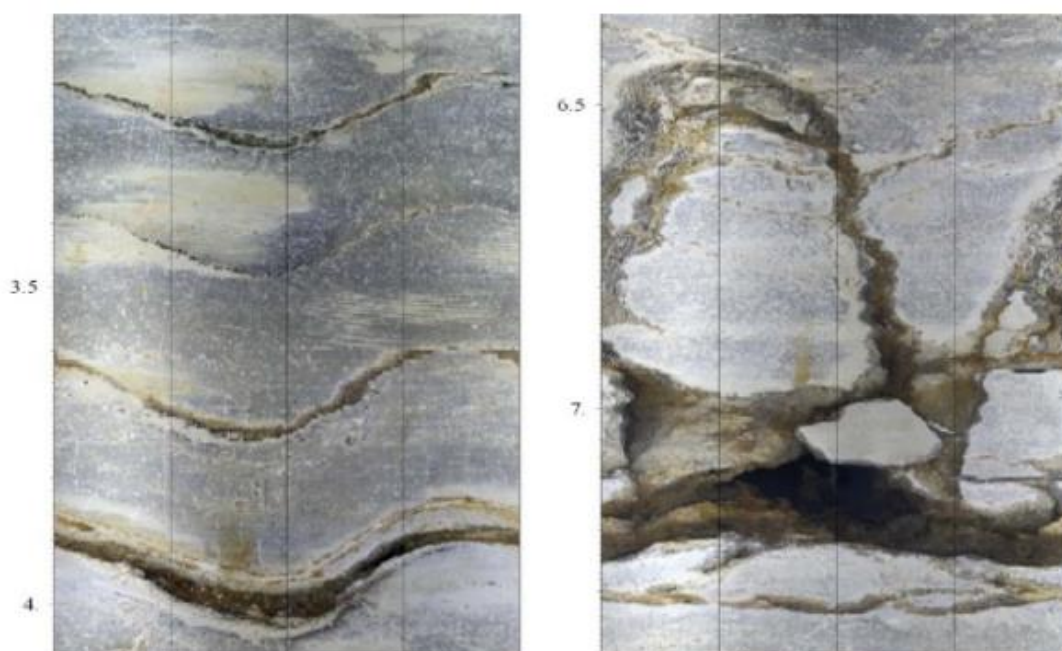
επιπέδων σε εικόνες με κάμερα γεώτρησης έχει μεγάλη πρακτική σημασία, η οποία συμβάλλει επίσης στην περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας απεικόνισης γεωτρήσεων.

Έχει εφευρεθεί μια νέα μέθοδος αυτόματης ερμηνείας των δομικών πεδίων στην εικόνα της κάμερας της κεφαλής η οποία μπορεί να εκτελέσει ευφυή εξαγωγή δομικών παραμέτρων, όπως η κεντρική θέση, η ο προσανατολισμός και η γωνία βύθισης των δομικών επιπέδων. Στη μέθοδο αυτή, τα χαρακτηριστικά κλίσης των pixel της εικόνας από την οπτική απεικόνιση του τοιχώματος της γεώτρησης χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν νέα σήματα για την αυτόματη ερμηνεία των δομικών επιπέδων, όπως το μέγιστο, το ελάχιστο τιμή της κλίμακας του γκρι και η μέγιστη τιμή κλίσης κάθε γραμμής στην εικόνα. Στην εικόνα της κάμερας γεώτρησης, δεδομένου ότι το επίπεδο δομής είναι παρόμοιο με ένα σχήμα ημιτονοειδούς καμπύλης ή παρόμοιο με τη γεωμετρία της ημιτονοειδούς καμπύλης, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την πρότυπη ημιτονοειδή συνάρτηση για την επαναληπτική λειτουργία αντιστοίχισης.

## 4.2 Ψηφιακές Πανοραμικές Εικόνες Κάμερας Γεώτρησης

Η δομή και η σύνθεση του τοιχώματος της γεώτρησης καθορίζουν το χαρακτηριστικό απεικόνισης της εικόνας της κάμερας γεώτρησης. Ως εκ τούτου, η γεώτρηση αποτελείται από δύο μέρη: το ένα είναι η απεικόνιση του πετρώματος, και το άλλο είναι η απεικόνιση των επιπέδων δομής ή των ασυνεχειών. Λόγω των εγγενώς διαφορετικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, το χρώμα και το βάθος των διαφορετικών πετρωμάτων και ασυνεχειών στην εικόνα της κάμερας είναι διαφορετικά. Όταν το πέτρωμα ή τα ορυκτά είναι σκοτεινά ή η αντανάκλαση είναι φτωχή, η κάμερα προσδίδει σκοτεινές φωτογραφίες και αντιθέτως όταν τα πετρώματα είναι ανοιχτόχρωμα όπως το μάρμαρο, η εικόνα της κάμερας είναι φωτεινή. Επιπλέον, το επίπεδο δομής του τρύπας γεώτρησης-τοιχώματος εμφανίζεται συχνά ως μια μαύρη κορδέλα ή μια καμπύλη της περιοχής, η οποία είναι σχετικά εμφανής.

Όταν τοποθετείται η κεφαλή της κάμερας στη γεώτρηση, η κάμερα CCD λαμβάνει την ακτίνα αντανάκλασης του τοιχώματος της γεώτρησης, η οποία ποικίλλει λόγω της διαφορετικής ανάκλασης διαφορετικών πετρωμάτων ή πλήρωσης υλικού, επομένως η δομή της εικόνας της κάμερας έχει διαφορετική φωτεινότητα και απόχρωση. Εάν το επίπεδο της δομής είναι από χαλαζία, μάρμαρα και αστρίους, το τοίχωμα της οπής είναι πλήρης και η ανάκλαση του προσπίπτοντος φωτός είναι καλή και η εικόνα της κάμερας είναι κοντά στην πραγματική κατάσταση του τοιχώματος της οπής.



Εικόνα 13: Αριστερά - Φωτογραφίες οικογένειας ασυνεχειών. Δεξιά- Ένα πιο πολύπλοκο δίκτυο ασυνεχειών. Φωτογραφίες κάμερας από διάτρηση.

Εάν η δομή είναι γεμάτη με λάσπη και άμμο, θα προκαλέσει κακή αντανάκλαση και μια σκοτεινή εικόνα- αν η δομή είναι ανοιχτή και το προσπίπτον φως δεν αντανακλάται πίσω στη φωτογραφική μηχανή CCD, το επίπεδο της δομής της εικόνας της κάμερας γεώτρησης εμφανίζεται ως μαύρο.

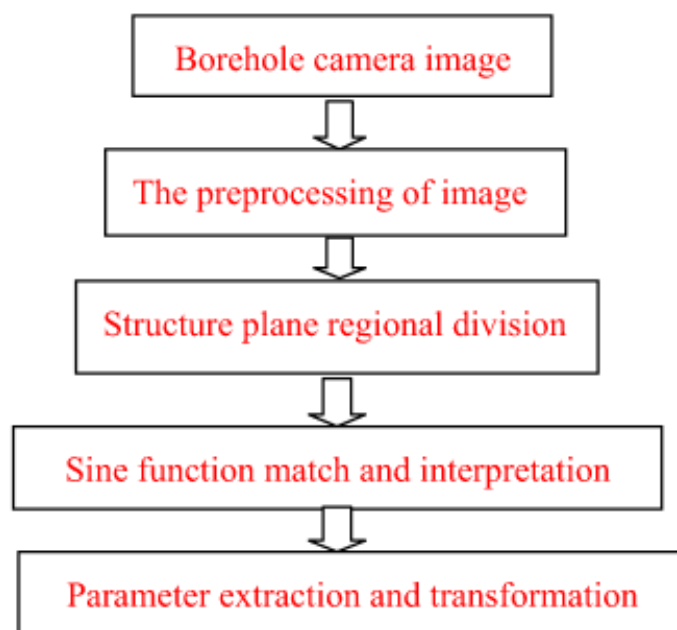
#### 4.3 Ερμηνεία Επιπέδων Δομής και Συμπεράσματα

Τα διάφορα επίπεδα δομής παρουσιάζουν κάποιες διαφορές λόγω διαφορετικών μορφολογικών και φυσικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων. Στην κάμερα γεώτρησης το βάθος χρώματος, η μεταβολή του σχήματος και το πλάτος της ζώνης είναι τα κύρια χαρακτηριστικά της απεικόνισης των επιπέδων δομής. Τα σχήματα των επιπέδων δομής στην εικόνα της γεώτρησης μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικά από μια πρότυπη συνάρτηση. Επιπλέον, τα επίπεδα δομής μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση τεσσάρων παραμέτρων: βάθος ή θέση (δηλ. θέση της γραμμής σάρωσης),

προσανατολισμός  $\alpha$ , γωνία βύθισης  $\beta$  (δηλ. η γωνία μεταξύ του επιπέδου της δομής και του οριζόντιου επιπέδου), και πλάτος θραύσης  $d$  του επιπέδου της δομής.

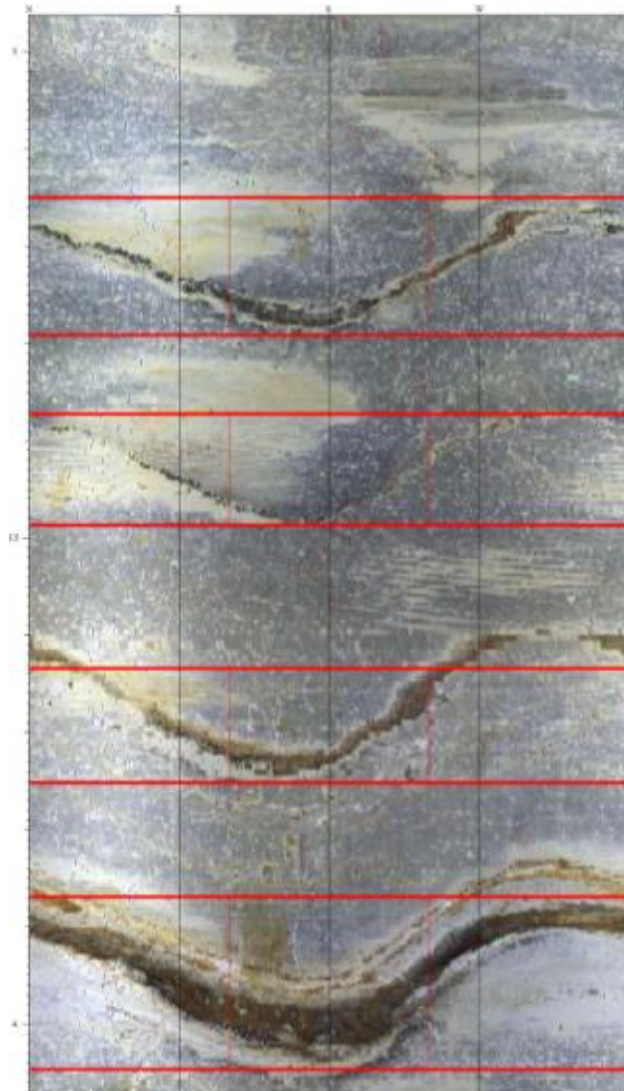
Σύμφωνα με τη μορφολογία των επιπέδων δομής στη γεώτρηση, η εκδήλωση των επιπέδων δομής είναι παρόμοια με μια ζώνη ημιτονοειδούς καμπύλης. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται η πρότυπη ημιτονοειδή συνάρτηση για να επαναλαμβάνονται τα σημεία των δομικών επιπέδων και των περιβαλλόντων περιοχών. Εάν η επαναλαμβανόμενη καμπύλη είναι σύμφωνη με τη δομή επίπεδου ή όχι, καθορίζεται μετρώντας τον αριθμό των σημείων που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις. Επιπλέον, η αναζήτηση μιας νέας χαρακτηριστικής τιμής για μια ομαδοποίηση αποτελεσμάτων βοηθάει στο να περιγράψει την δομή του επιπέδου. Στη συνέχεια μπορεί να επιτευχθεί η αυτόματη ερμηνεία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε συνδυασμό με την ιδέα της επαναληπτικής αντιστοίχισης των αποτελεσμάτων που έχουμε λάβει.

Σε μια σύνθετη εικόνα κάμερας γεώτρησης, αβέβαιοι παράγοντες όπως η ρήξη και η ασυνέχεια μπορεί να δημιουργήσουν επίπεδα δομής πολλαπλών σχισμών, οπότε μπορεί επίσης να υπάρχουν επίπεδα δομής ή σχισμές στην περιοχή όπου υπάρχουν τα μεγαλύτερα σημεία και οι ταχύτερες μεταβολές. Επομένως, σύμφωνα με τη διαφορά του προσανατολισμού ή της θέσης της καμπύλης, επιλέγεται το σημείο όπου εμφανίζεται μέγιστες τιμές σε κάθε περίπτωση και αναλύονται για την εύρεση προβληματικών περιοχών.



Σχήμα 2: Τα βήματα της αυτόματης ερμηνείας των παραμέτρων του επιπέδου δομής στη γεώτρηση με κάμερα στη κεφαλή της στήλης.

Στην παραπάνω διαδικασία, η τελική συντεταγμένη των pixel είναι η γραμμή-συντεταγμένη της καμπύλης στην παρούσα αναλυόμενη περιοχή. Το πραγματικό βάθος θέσης του επιπέδου δομής πρέπει να μετατραπεί στο πραγματικό βάθος. Ομοίως, η τελικά λαμβανόμενη γωνία βύθισης είναι ακριβώς η γωνία βύθισης του επιπέδου της δομής.



*Εικόνα 14: Αποτέλεσμα διαίρεσης περιοχής των επιπέδων δομής σε μια εικόνα από τη κάμερα στη τομή.*

Όταν λάβουμε όλες τις εικόνες και τα δεδομένα μας, αφού τα αντιστοιχήσουμε ανακαλύπτουμε αποτελεσματικά το δομικό επίπεδο στην εικόνα της κάμερας της γεώτρησης. Αυτές οι συναρτήσεις τιμών περιγράφουν αποτελεσματικά την κατανομή της δομής του πετρώματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προσδιορίσει αυτόματα τα χαρακτηριστικά ολόκληρης της εικόνας της κάμερας της και να λάβει κάποιες σημαντικές παραμέτρους, όπως η κεντρική θέση, ο προσανατολισμός, η βύθιση γωνίας και το πλάτος θραύσης των δομικών επιπέδων.

Προκειμένου να δούμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αυτόματης ερμηνείας, μπορεί να γίνει και παραδοσιακή μέθοδος χειροκίνητης ανάλυσης. Η μέθοδος χειροκίνητης ανάλυσης είναι η εξής: με τρία σημεία ελέγχου που δίνονται στην εικόνα

από ανάλυση που γίνεται στο χέρι γίνεται χρήση τυπικής ημιτονοειδούς καμπύλης για την προσαρμογή του δομικού επιπέδου με υπολογιστή, και στη συνέχεια προσδιορίζεται εάν η καμπύλη προσαρμογής είναι συνεπής με το αρχικό επίπεδο δομής ή όχι. Στη συνέχεια η κεντρική θέση, ο προσανατολισμός, η γωνία βύθισης και το πλάτος της ρωγμής υπολογίζονται και πάλι με ανάλυση που μπορεί να γίνει στο χέρι και όχι αυτόματη καταγραφή αποτελεσμάτων όπως αναλύσαμε.

Λόγω του αντίκτυπου του ανθρώπινου λάθους και διαφόρων αβέβαιων παραγόντων, είναι δύσκολο να λάβουμε ένα ακριβές αποτέλεσμα ερμηνείας την πρώτη φορά, έτσι θα πρέπει στη συνέχεια να επαναλάβουμε τη διαδικασία χειροκίνητης ανάλυσης και να λάβουμε και από τις δύο τον μέσο όρο των τιμών.



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : UAV's, ΕΝΑΕΡΙΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΙ ΣΕΝΣΟΡΕΣ LiDAR ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Τα δεδομένα και οι τεχνικές απομακρυσμένης παρακολούθησης παίζουν μεγάλο ρόλο στα λατομεία για την παρακολούθηση της εξορυκτικής δραστηριότητας. Τα LiDAR και οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στη διαχείριση λατομείων για την αξιολόγηση των φάσεων εξόρυξης καθώς και σε όλα τα στάδια της εργασίας. Η περιβαλλοντική διαχείριση μεγάλων λατομείων απαιτεί όχι μόνο ακριβή τρισδιάστατα δεδομένα για την αξιολόγηση των ετήσιων μεταβολών του όγκου, αλλά και διαθεσιμότητα συνόλων δεδομένων χρήσιμων για την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με τη φυσική κατανάλωση του εδάφους, των διατάξεων και των κανόνων διαχείρισης νερού και αποβλήτων εξόρυξης που έχουν εκδοθεί από τις δημόσιες αρχές.

Ενσωμάτωση συστημάτων απομακρυσμένης παρακολούθησης και περιβαλλοντικών πληροφοριών απαιτείται για τον καθορισμό δεικτών παραγωγής και των αποβλήτων που σχετίζονται με τις δραστηριότητες εξόρυξης. Παρακάτω αναλύεται ένα νέο σύνολο δεικτών για την εξορυκτική λεκάνη Carrara όπου προτάθηκε από την ενσωμάτωση των μεταβολών της επιφάνειας και του όγκου με την πάροδο των ετών. Οι προτεινόμενοι δείκτες αξιολογήθηκαν σε όλες τις ενεργές περιοχές στον χώρο του λατομείου που βρίσκονται στη λεκάνη εξόρυξης Carrara.

Οι δείκτες, ενσωματωμένοι σε ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (DSS), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση όλων των λατομείων με βάση τη βαθμολογία των επιδόσεων περιβαλλοντικής διαχείρισης, επιτρέποντας έτσι το σχεδιασμό επιτόπου ελέγχων που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτων και των αποβλήτων λατομείου μαρμάρου και της κοπής (MQW/MCW) σύμφωνα με ποσοτικά κριτήρια διαχείρισης κινδύνου.

Η προτυποποίηση χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων σε δυναμικούς χάρτες και τρισδιάστατες επιφάνειες πλοήγησης βοηθούν στην υποστήριξη των σχεδιαστών περιβαλλοντικών ελέγχων στην ετήσια παραγωγή αποβλήτων εξόρυξης και στην παρακολούθηση των αλλαγών της κάλυψης γης.

### 5.2 Ορισμός Terrestrial LiDAR

Οι παραδοσιακές μέθοδοι έρευνας χώρων για τους συντηρητές πολιτιστικής κληρονομιάς και τους αρχαιολόγους είναι συχνά χρονοβόρες και περιλαμβάνουν τη χρήση υποκειμενικών τεχνικών, όπως σκίτσα και σχέδια πεδίου, σχέδια που προέρχονται από εικόνες και χαρτογράφηση με τοπικά συστήματα αναφοράς που δεν διαθέτουν παγκόσμιες συντεταγμένες. Η τεκμηρίωση των χαρακτηριστικών και των

αντικειμένων εντός ενός χώρου ή μιας δομής πραγματοποιείται επίσης συχνά με υποκειμενικές ή χρονοβόρες στρατηγικές διαστατικής καταγραφής, συμπεριλαμβανομένων των χειροποίητων και μετρημένων απεικονίσεων ή των σχεδίων με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) που βασίζονται σε χειροποίητες μετρήσεις και απαιτούν φυσική πρόσβαση στο αντικείμενο ή την περιοχή που τεκμηριώνεται. Οι εφαρμογές έρευνας με LiDAR (Collins, 2018) και σάρωσης με λέιζερ, ιδίως όταν συνδυάζονται με άλλες μορφές χωρικής έρευνας και τεκμηρίωσης, προσφέρουν νέες δυνατότητες για ταχύτερη, ισχυρότερη και ακριβέστερη καταγραφή του εδάφους και των φαινομένων που μας ενδιαφέρουν.

### 5.3 Μέθοδοι Έρευνας και Εξοπλισμός

Οι τεχνικές απομακρυσμένης παρακολούθησης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ετήσια παρακολούθηση των δραστηριοτήτων εξόρυξης στη βιομηχανική λεκάνη Carrara: ενώ τα UAV ή/και το επίγειο LiDAR χρησιμοποιούνται συχνά για έρευνες σε μεμονωμένα λατομεία, η έκταση και η μορφολογία της λεκάνης καθιστούν πολύ δύσκολη τη χρήση τους σε κλίμακα λεκάνης. Οι εναέριες και δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης και οι εναέριες έρευνες LiDAR επιτρέπουν μια οικονομικά αποδοτική κάλυψη της λεκάνης- οι εναέριες ορθοφωτογραφίες (orthoimages) υψηλής ανάλυσης που αποκτώνται σε τριετή βάση από την Εθνική Υπηρεσία Ίδρυσης Γεωργίας (AGEA) διανέμονται δημόσια από το Περιφερειακό Σύστημα Πληροφοριών μέσω της υπηρεσίας χαρτών GeoscorpioWeb (WMS).

Αρχειοθετημένες δορυφορικές εικόνες από τον δορυφόρο Pléiades υψηλής ανάλυσης για το 2018 που καλύπτουν τη βιομηχανική λεκάνη Carrara παραχωρήθηκαν στην Περιφερειακή Περιβαλλοντική Υπηρεσία της Τοσκάνης (ARPAT) από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA). Η μεγάλη διαθεσιμότητα ορθοφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης μεταξύ 2009 και 2020 επιτρέπει τον εντοπισμό σχεδόν ετήσιων αλλαγών στην κάλυψη γης, ενώ τα εναέρια δεδομένα LiDAR επιτρέπουν την ανίχνευση αλλαγών στο υψόμετρο μεταξύ των χρόνων λειτουργίας του λατομείου. Η στερεοσκοπική επεξεργασία της τρι-στερεοσκοπικής απόκτησης του 2020 επιτρέπει την πρόσθετη ανίχνευση αλλαγών υψομέτρου μεταξύ των μοντέλων εδάφους LiDAR του 2017 και του στερεοσκοπικού εξαγόμενου μοντέλου του 2020.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ιδιοκτήτες λατομείων πρέπει να αποστέλλουν ετήσια στοιχεία παραγωγής στους τοπικούς και περιφερειακούς φορείς που εμπλέκονται στη διαχείριση των αδειών. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τον όγκο παραγωγής (α) διακοσμητικών λίθων (πρωτογενές προϊόν), (β) άλλων δευτερογενών προϊόντων που χρησιμοποιούνται σε πέτρινα προϊόντα, (γ) θραυσμάτων. Επιλέχθηκαν τα 15 κορυφαία λατομεία με τους υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής διακοσμητικών λίθων για περαιτέρω σύγκριση των δηλωθέντων όγκων παραγωγής και των διαπιστωμένων μεταβολών του όγκου μεταξύ 2017 και 2020. Η εθνική αναφορά αποβλήτων που είναι πραγματικά υπεύθυνη για τους ιδιοκτήτες λατομείων περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα αποβλήτων που προέρχονται από τις δραστηριότητες εξόρυξης. Μόνο οι ετήσιες αναφορές μεταξύ 2009 και 2019 των MCW σε διάφορες φυσικές καταστάσεις - χαλικώδης, αμμώδης, ιλυώδης και πολτός - έχουν εξαχθεί για

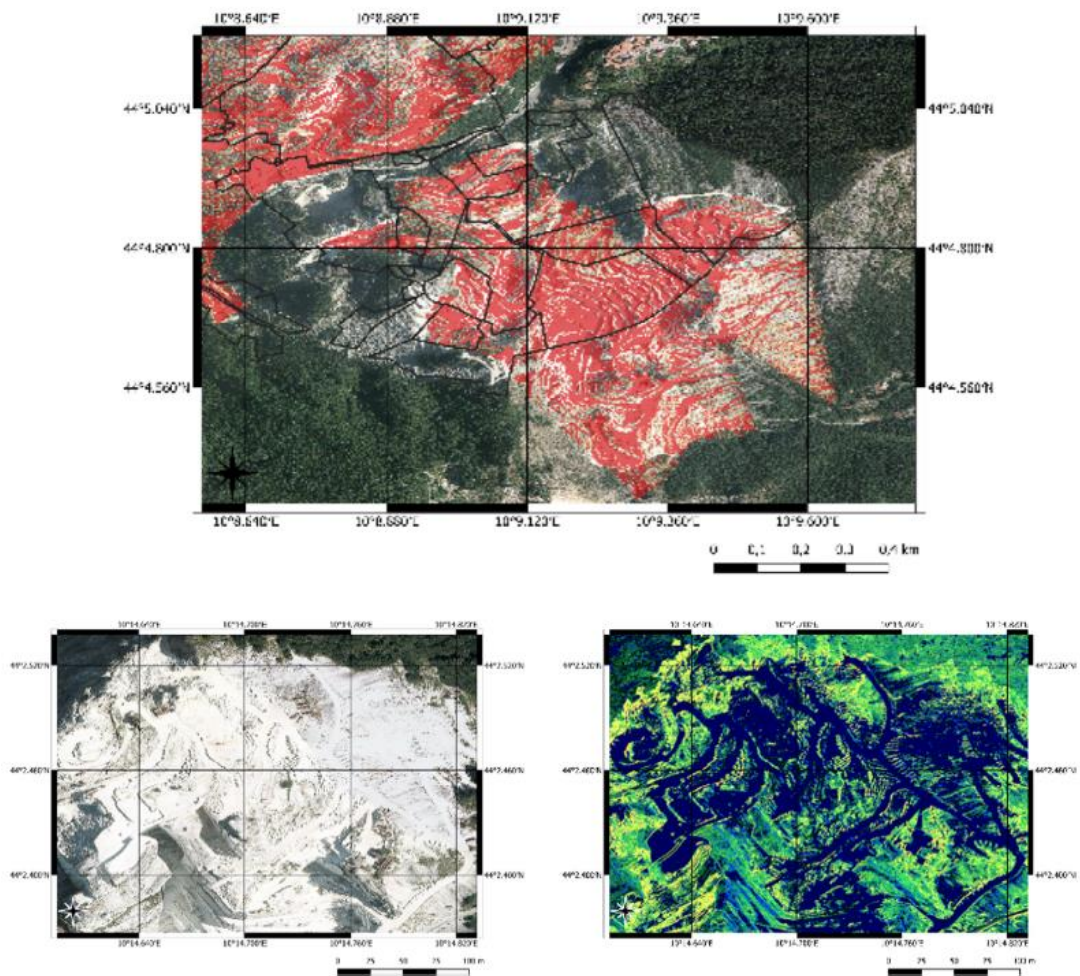
κάθε λατομείο που βρίσκεται στην εξορυκτική λεκάνη Carrara και έχουν συνδεθεί με τα διανυσματικά σημειακά επίπεδα που αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των λατομείων.

#### 5.4 Αλλαγές στο Έδαφος

Οι δραστηριότητες εξόρυξης οδηγούν σε διάφορες αλλαγές της εδαφικής κάλυψης. Η φυσική απώλεια εδάφους συμβαίνει όταν αφαιρούνται τμήματα βράχου ή φυτεμένου εδάφους για την πρόσβαση σε στρώματα μαρμάρου. Η φυσική απώλεια εδάφους μπορεί να χαρτογραφηθεί με

- ❖ οπτική ερμηνεία φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης ή
- ❖ αυτόματες και ημιαυτόματες τεχνικές φασματικής ταξινόμησης.

Λόγω της πολυπλοκότητας των τεχνητών διεργασιών που αφορούν τις λατομικές περιοχές, η οπτική επιθεώρηση και οι ερμηνείες μπορούν να θεωρηθούν ως η προτιμώμενη μέθοδος για την παρακολούθηση των αλλαγών στην κάλυψη γης, ενώ η φασματική ταξινόμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την πρόχειρη αναγνώριση τόσο των φυτεμένων όσο και των τεχνητών περιοχών. Μόνο προηγμένες τεχνικές ανάλυσης όρασης και υψής υπολογιστών (Haralick, Dinstein and Shanmugam, 1973) (Huang, Zhang and Li, 2007) σε συνδυασμό με τρισδιάστατες πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση περιοχών εξόρυξης που χαρακτηρίζονται από τακτικές κοπές μπλοκ, περιοχές εξυπηρέτησης κ.α. Οι επεξεργασμένες εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικές ζώνες για την απόκτηση καλύτερης φασματικής διαχωρισιμότητας σε ταξινομητές εικόνων με βάση τη φασματική απόσταση τους.



Εικόνα 15: Τεχνικές επεξεργασίας 3D και 2D για την ταξινόμηση λατομικών περιοχών υψηλής ανάλυσης.

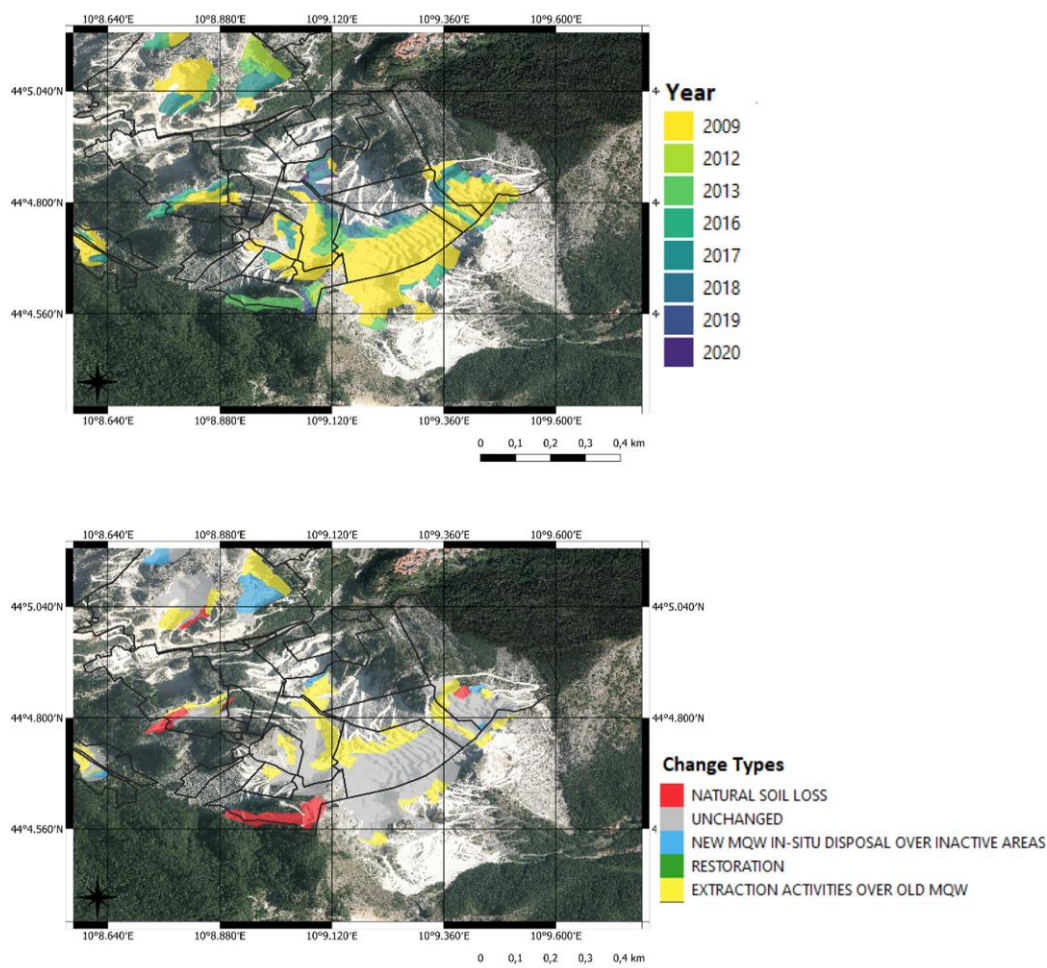
Οι κλάσεις ερμηνείας των εικόνων οργανώθηκαν ώστε να προκύψουν τέσσερις σχετικές κατηγορίες αλλαγών στην κάλυψη γης:

- ❖ φυσική απώλεια εδάφους,
- ❖ αποκατάσταση ανενεργών λατομείων με χρήση μάζων,
- ❖ επιτόπου απομάκρυνση αποβλήτων κοπής μαρμάρων/λατομείων (MCW/MQW) και
- ❖ ανάπτυξη βλάστησης πάνω από ανενεργά λατομεία και παλαιές αποθέσεις MCW.

Ο προσδιορισμός αυτών των αλλαγών απαιτεί χαρτογράφηση τεσσάρων κατηγοριών: ενεργές περιοχές, επιτόπου αποθέσεις MCW/MQW, γυμνό έδαφος/πέτρα και αλλαγές στη βλάστηση. Οι κλάσεις αυτές είναι σύμφωνες με τις κλάσεις κάλυψης γης και επιπέδου που ορίζονται στο σύνολο δεδομένων Regional Official Land Cover- οι ίδιες κλάσεις χρησιμοποιήθηκαν στο σχέδιο των λεκανών εξόρυξης του δήμου Carrara.

## 5.5 Αλλαγές στην Κάλυψη της Γης

Τόσο οι αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης όσο και οι δορυφορικές φωτογραφίες 2018/2020 χρησιμοποιήθηκαν σε ψηφιοποίηση των αλλαγών από το 2009 έως το 2020. Η ψηφιοποίηση όλων των κατηγοριών κάλυψης γης γίνεται σε όλες τις διαθέσιμες εικόνες εντός κάθε εγκεκριμένης λατομικής περιοχής.



Εικόνα 16: Θέση δείγματος με αλλαγές στην κάλυψη γης μεταξύ 2009 και 2020.

## 5.6 Απόβλητα Κοπής Μαρμάρου

Τα χαλικώδη, αμμώδη, ιλυώδη και λασπώδη προϊόντα μαρμάρου κατά την εξόρυξη του, δεσμεύονται σε εξωτερικές εγκαταστάσεις ή χρησιμοποιούνται σε λατομικές περιοχές για δρόμους εξυπηρέτησης και διαχείριση τοίχων- στην τελευταία περίπτωση μπορούν να μεταναστεύουν μέσω υποθαλάσσιων λεκανών στα επιφανειακά ύδατα. Οι εκθέσεις για τα δεσμευμένα παραπροϊόντα του μαρμάρου πρέπει να αποστέλλονται στις εθνικές αρχές. Κάθε κατηγορία αποβλήτων που επεξεργάζονται εκτός των χώρων παραγωγής απαιτεί προηγούμενη ταξινόμηση με βάση τους κωδικούς αποβλήτων που έχουν καθιερωθεί σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Τα παραπροϊόντα ταξινομούνται με τον κωδικό 010413, δηλαδή "απόβλητα από την κοπή και το πριόνισμα λίθων" και έχουν κωδικοποιηθεί γεωγραφικά και αντιστοιχιστούν σε κάθε λατομείο προκειμένου να εξαχθούν τιμές όγκου και βάρους προϊόντων μαρμάρου, λαμβάνοντας υπόψη ειδικές περιπτώσεις και των δύο των ιδιοκτητών λατομείων και εργοστασίων. Προκειμένου να ελεγχθεί η συνέπεια των αναφερόμενων ποσοτήτων με τις εκτιμώμενες τιμές από την αναφερόμενη παραγωγή μπλοκ, οι ιλυώδεις αποθέσεις απαιτούν στάθμιση με τη μέση εκτιμώμενη συγκέντρωση του διαλύματος, συνήθως μεταξύ 70% και 80%. Αποφεύγοντας αυτή τη στάθμιση οδηγεί σε υπερεκτίμηση των αναφερόμενων ποσοτήτων παραπροϊόντων.

Η μέση αναλογία μεταξύ αναφερόμενης και εκτιμώμενης λατύπης είναι περίπου 25%, ενώ ένα μικρό μέρος του δείγματος παρουσιάζει πολύ μικρή συμφωνία μεταξύ εκτιμώμενης και αναφερόμενης παραγωγής λόγω των επιτόπιων απορρίψεων. Αντίθετα, φαίνεται μια διαφορετική πορεία για λατομεία με χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής (<1.000 T μαρμάρινων όγκων). Τέτοια αποτελέσματα ήταν κατά κάποιο τρόπο αναμενόμενα λόγω των μικρών δυνατοτήτων στη διάθεση λατύπης για βιομηχανικούς σκοπούς.

## 5.8 Συμπεράσματα Μεθόδων Ανάλυσης

Οι δείκτες διαχείρισης αποβλήτων και αλλαγής της εδαφικής κάλυψης της γης, σε σύγκριση με τα δεδομένα παραγωγής και τις ετήσιες εκθέσεις αποβλήτων, επιτρέπουν την αξιολόγηση των επιδόσεων διαχείρισης αποβλήτων που επιτυγχάνονται από κάθε λατομείο. Δεδομένου ότι απαγορεύεται η μακροχρόνια απόρριψη παραπροϊόντων εξόρυξης μαρμάρου των λατομικών περιοχών, εκτός από την κατασκευή νέων υποδομών εξυπηρέτησης ή την επισκευή αυτών, οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την παρακολούθηση της επιτόπου διαχείρισης αποβλήτων κατά τη διάρκεια των ετών λειτουργίας του λατομείου.

Ενώ έχουν θεσπιστεί γενικά κριτήρια για τους περιβαλλοντικούς ελέγχους σε λατομεία και ορυχεία και έχουν προταθεί μέθοδοι εκτίμησης κινδύνου για την ιεράρχηση των ελέγχων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με υψηλό πιθανό περιβαλλοντικό αντίκτυπο από το Δίκτυο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την εφαρμογή και την επιβολή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας (IMPEL) το κενό μεταξύ των ανωτέρω πλαισίων και του σχεδιασμού των ελέγχων στα λατομεία πρέπει να καλυφθεί. Αυτοί οι δείκτες, που καθορίζονται σε επίπεδο λατομείου, προορίζονται να ενσωματωθούν σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για να δώσουν μια "βαθμολογία κινδύνου" που σχετίζεται κυρίως με τις επιδόσεις διαχείρισης αποβλήτων.

Οι υφιστάμενοι δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που βασίζονται σε μεθόδους αξιολόγησης του κύκλου ζωής, αν και χρήσιμοι για τη μέτρηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών επιδόσεων των εξορυκτικών δραστηριοτήτων, δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η επιτόπια απόρριψη εξορυκτικού παραπροϊόντος, η οποία αποδεδειγμένα αποτελεί πηγή απώλειας της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων σε πολλές περιπτώσεις.

Πρέπει να γίνουν πρόσθετες εργασίες για τη βελτίωση της διαθεσιμότητας των μοντέλων εδάφους με την πάροδο των ετών με την ενσωμάτωση της λήψης στερεοσκοπικών στοιχείων από αέρος/δορυφόρου και περιοδικών τοπικών ερευνών σε

λατομεία με σύνθετη μορφολογία που δεν είναι κατάλληλα για στερεοσκοπική εξαγωγή μοντέλων εδάφους. Οι προτεινόμενοι δείκτες πρέπει να σταθμιστούν κατάλληλα ώστε να προκύψει μια ενιαία βαθμολογία εκτίμησης περιβαλλοντικού κινδύνου. Όταν ενσωματωθούν με άλλους δείκτες που σχετίζονται με τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τις μεταβολές της κάλυψης γης, μπορεί να είναι χρήσιμοι σε υψηλού επιπέδου περιβαλλοντική παρακολούθηση και σχεδιασμό κατάλληλων ελέγχων που μπορεί να χρειάζονται.

## Κεφάλαιο 6ο : ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΚΡΙΝΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΟΛΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

### 6.1 Εισαγωγή στην Τεχνολογία LiDAR VR

Μια βραχώμαζα είναι ένα φυσικό σύστημα που αποτελείται από άθικτα πετρώματα που διαχωρίζονται από ένα δίκτυο ρωγμών (Goodman, 1989; Brady and Brown, 2006) το οποίο μπορεί να επηρεάσει τη φυσικομηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της βραχομάζας. Οι ασυνέχειες, συμπεριλαμβανομένων των αρθρώσεων, των επιπέδων στρώσης, των ρηγμάτων και άλλων τύπων ρηγμάτων, μπορούν να παρέχουν προτιμητέες οδούς για την κυκλοφορία των ρευστών και να αντιπροσωπεύουν επιφάνειες αδυναμίας και αλλοίωσης που οδηγούν σε αστοχίες από μπλοκ και σφήνες. Οι ασυνέχειες επηρεάζουν επίσης τον προσανατολισμό και το μέγεθος των τοπικών τάσεων. Διάφοροι κλάδοι, όπως η πολιτική μηχανική, η μηχανική γεωλογία (π.χ. εξόρυξη και σταθερότητα φραγμάτων), η γεωλογία πετρελαίου και η υδρογεωλογία, απαιτούν επομένως βαθιά κατανόηση των δομών της βραχώμαζας, συμπεριλαμβανομένης της λεπτομερούς γνώσης των μορφών θραύσης.

Στην έρευνα που έγινε στο υπόγειο λατομείο Μαρμάρου Romana, χρησιμοποιήθηκε δωρεάν κώδικας VR για τη χαρτογράφηση και τη μέτρηση των ασυνεχειών και την παρουσίαση και αποθήκευση των γεωμηχανικών τους ιδιοτήτων.

### 6.2 Μεθοδολογία

Οι ασυνέχειες της βραχώμαζας εμφανίζονται γενικά ως επιφάνειες ρηγμάτων ή ίχνη ρηγμάτων: τα πρώτα είναι τρισδιάστατα γεωμετρικά στοιχεία, ενώ τα δεύτερα είναι δισδιάστατα στοιχεία που αναπαριστούν τη διασταύρωση μεταξύ των ρηγμάτων και της επιφανειακής όψης. Οι επιφάνειες μπορούν να ανιχνευθούν και να μετρηθούν με τη χρήση δεδομένων LiDAR, ενώ τα ίχνη μπορούν να χαρτογραφηθούν καλύτερα σε εικονική πραγματικότητα μετά την αντιστοίχιση εικόνων HD και νέφη σημείων (cloud points) (π.χ. από LiDAR, UAV - μη επανδρωμένο εναέριο όχημα). Τα σημειακά δεδομένα χωρίς φωτογραφίες HD, εκτός αν είναι πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, είναι δύσκολο να διαχειριστούν και να ερμηνευτούν. Τα δεδομένα αυτά δεν επιτρέπουν λεπτομερείς παρατηρήσεις ή εύκολη αναγνώριση και κατανόηση των cloud points για τον υπολογισμό τους. Τα τοιχώματα των λατομείων μαρμάρου είναι συνήθως πολύ επίπεδα, ειδικά μέσα στο υπόγειο λατομείο. Δεδομένης της ανάγκης ανάλυσης των ιχνών θραύσης για μελέτες ευστάθειας πρανών, δοκιμάστηκε μια συγκεκριμένη προσέγγιση για τον εντοπισμό ασυνεχειών και τη μέτρηση του προσανατολισμού τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν όχι μόνο σε cloud points με τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (η συνήθης διαδικασία σε ανοικτούς λάκκους ή φυσικά



πρανή,(Abellán *et al.*, 2014) αλλά και αξιοποιώντας φωτογραφίες μεγάλης ευκρίνειας και ανοιχτού λογισμικού για απεικόνιση και χαρτογράφηση VR (Virtual Reality).

Αυτή η μεθοδολογία απεικόνισης, επεξεργασίας και ανάλυσης τρισδιάστατων δεδομένων έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές χαρτογράφησης με το χέρι για την ανακατασκευή του μορφολογικού περιβάλλοντος μιας βραχομάζας. Για παράδειγμα, η γεωμετρία, η θέση και η απόσταση των αρθρώσεων και ο όγκος των μπλοκ που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου είναι συχνά ανακριβείς λόγω της έλλειψης δεδομένων των αποκλίσεων της πυξίδα- επιπλέον, αυτή η κλασική προσέγγιση είναι χρονοβόρα και περιορίζεται από την ασφαλής πρόσβαση στις αποκαλύψεις.(Assali *et al.*, 2014) Σε αυτό το πλαίσιο, το πρόσθετο αυτό παρέχει ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα- μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση και τον έλεγχο τόσο των δεδομένων LiDAR όσο και των δεδομένων RGB και, το σημαντικότερο, για τη μέτρηση των αρθρώσεων με την εξαγωγή τρισδιάστατων σειρών ή συστοιχιών ευθυγραμμισμένων σημείων με βάση τη γεωαναφορά.

### 6.3 Σκανάρισμα Περιοχής με Λείζερ

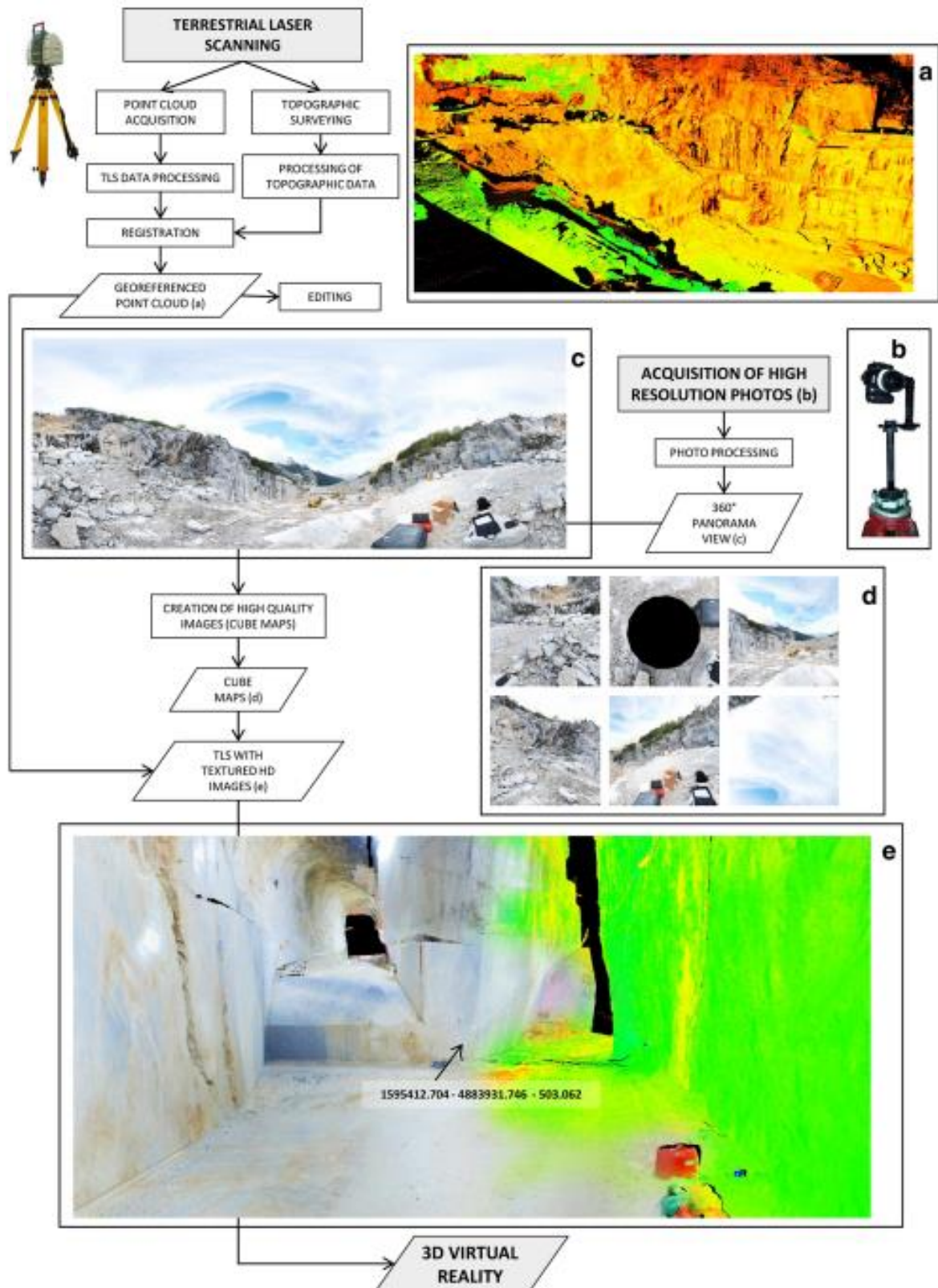
Το LiDAR είναι μια τεχνολογία τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιεί μια δέσμη λέιζερ (με μήκος κύματος που κυμαίνεται μεταξύ του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου τμήματος του φάσματος - 532 nm) για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ ενός σημείου πηγής και μιας ανακλαστικής επιφάνειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο cloud point των επιφανειών και των αντικειμένων που εμπίπτουν στο οπτικό πεδίο του σαρωτή.

Προκειμένου να δημιουργηθούν ρεαλιστικά μοντέλα επιφανειών, συλλέχθηκαν οι απόλυτες συντεταγμένες xyz των cloud point, η ανακλαστικότητα (ανακλαστικότητα) των επιφανειών και δεδομένα RGB από τις σχετικές φωτογραφικές εικόνες.

### 6.4 Απεικόνιση σε Κοντινή Απόσταση

Η απεικόνιση κοντινής εμβέλειας είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία φωτομωσαϊκών υψηλής ανάλυσης, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν με cloud points των LiDAR, προκειμένου να παραχθούν τρισδιάστατα φωτορεαλιστικά μοντέλα κατάλληλα για φωτοερμηνεία. Έπειτα πρέπει να ληφθούν εικόνες υψηλής ανάλυσης με την αντικατάσταση του σαρωτή λέιζερ στην κορυφή του τριπόδου, με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή κατάλληλα τοποθετημένη σε ειδικό βραχίονα και τοποθετημένη στο τρίποδο του επίγειου σαρωτή λέιζερ. Η αντικατάσταση αυτή γίνεται προσεκτικά χωρίς να μετακινηθεί το τρίποδο και η κυψέλη του σαρωτή λέιζερ [εικόνα 17]. Για να αποκτηθεί μια πανοραμική εικόνα, οι φωτογραφίες λήφθηκαν σε προκαθορισμένες γωνίες με επαρκή επικάλυψη σε σχέση με την επιλεγμένη εστιακή απόσταση για παράδειγμα, ένας φακός fish eye (όψη ματιού ψαριού) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη μόνο έξι φωτογραφιών (κάθε 60 μοίρες), ενώ ένα

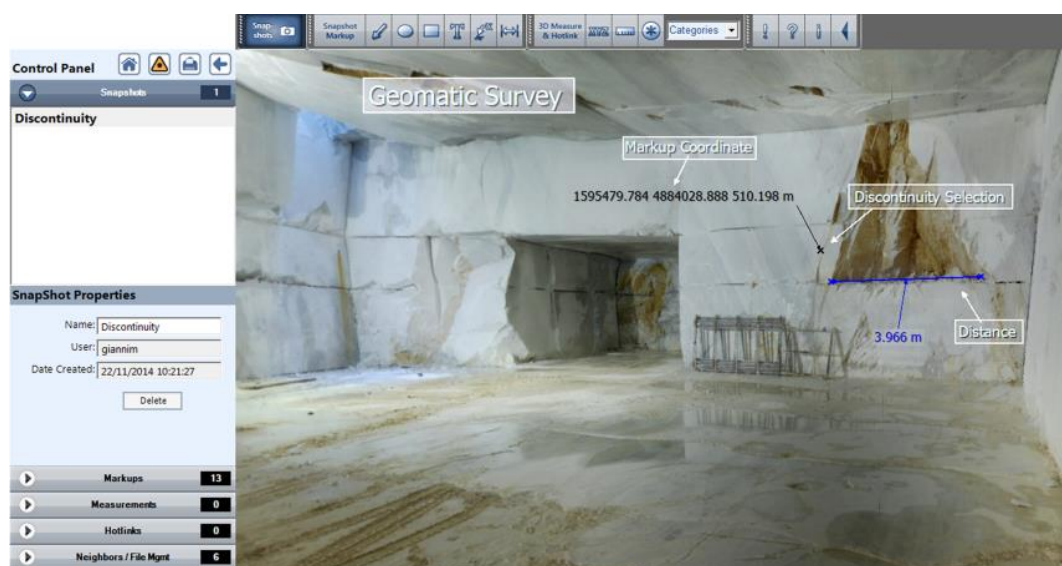
διαφορετικό οπτικό σύστημα με μικρότερες προκαθορισμένες γωνίες διαφράγματος της κάμερας απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό φωτογραφιών. Στη συνέχεια οι φωτογραφίες επεξεργάζονται με ειδικό λογισμικό για τη δημιουργία ισόπλευρων εικόνων.



Εικόνα 17: Ροή εργασιών της γεωμετρικής στρατηγικής που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της τρισδιάστατης όρασης υπολογιστή.

## 6.5 Εικονική Πραγματικότητα – Virtual Reality

Το Leica TruView είναι μια πρόσθετη επέκταση που επιτρέπει την απεικόνιση τρισδιάστατης εικονικής πραγματικότητας και μπορεί να εκτελεστεί στον Internet Explorer. Το σύνολο δεδομένων δημιουργείται από την ευθυγράμμιση εικόνων υψηλής ανάλυσης με δεδομένα LiDAR και μπορεί να αναπαραστήσει οποιαδήποτε εικονική πραγματικότητα, συμπεριλαμβανομένων φυσικών πρηνών, κοπής βράχων και ασυνεχειών, με πολύ υψηλή τρισδιάστατη γεωμετρική ανάλυση σε συμπαγή μορφή. Ειδικότερα, αυτός ο πανοραμικός προβολέας επιτρέπει την πλοήγηση από κάθε θέση σαρωτή λέιζερ σε εικονικά περιβάλλοντα και την αλληλεπίδραση σε μια μη εμβαθυμένη εικονική πραγματικότητα (non-immersive desktop VR). Αυτό το πρόσθετο επιτρέπει επίσης τη μέτρηση αποστάσεων και την εξαγωγή τρισδιάστατων πραγματικών συντεταγμένων (εικόνα 18) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό, την αναγνώριση και την αναπαράσταση ασυνεχειών. Κάθε κλικ στην προβολή εικονικής πραγματικότητας αντιστοιχεί σε ένα cloud point με αντίστοιχες συντεταγμένες που μπορούν να αποθηκευτούν και να εξαχθούν.



Εικόνα 18: Παράθυρο 3D VR και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ασυνεχειών.

## 6.6 Αλγόριθμος για την Εξαγωγή Πληροφοριών Συνόλων Δεδομένων

Ο κώδικας για τρισδιάστατη απεικόνιση VR επιτρέπει στους χρήστες να εξάγουν πληροφορίες από το σύνολο δεδομένων μέσω αρχείων επεκτάσιμης γλώσσας σήμανσης (μορφή \*.xml). Δεδομένης της πολυπλοκότητας και της ποσότητας των πληροφοριών που περιέχονται σε ένα αρχείο \*.xml σχετικά με τα σημειακά και γραμμικά δεδομένα που μετρήθηκαν στα τείχη στο λατομείο, το σύνολο των γεωμετρικών δεδομένων επεξεργάστηκε με τη χρήση αλγορίθμου που δημιουργήθηκε ειδικά από τους συγγραφείς στο Visual Basic. Το πρόγραμμα απαιτεί ένα αρχείο κειμένου (είσοδος), το οποίο αναπαρίσταται από ένα αυτοπεριγραφόμενο μορφότυπο

δεδομένων, που δημιουργήθηκε στο 3D VR και περιέχει τις ακόλουθες πληροφορίες: (1) View Name, (2) Mark Pos, και (3) Text. Η συμβολοσειρά "View Name" αντιπροσωπεύει τον αριθμό της πανοραμικής προβολής που περιλαμβάνει ένα ίχνος ρωγμής- η συμβολοσειρά "Mark Pos" αναφέρεται στις τρισδιάστατες συντεταγμένες ευθυγραμμισμένων σημείων (Markup) ενός ίχνους ρωγμής- η συμβολοσειρά "Text" δημιουργείται ειδικά για την ενσωμάτωση μηχανικών-γεωλογικών πληροφοριών από εργασίες πεδίου.

Αφού μεταφορτωθεί το αρχείο "Markup.xml", ο αλγόριθμος δημιουργεί έναν πίνακα, που ονομάζεται "Fracture", ο οποίος χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των πληροφοριών που περιέχονται στις προαναφερθείσες συμβολοσειρές. Το λειτουργικό περιβάλλον που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των εντολών δημιουργείται αυτόματα. Το πρόγραμμα προτρέπει τον χρήστη να εισάγει τον αριθμό σάρωσης εμφανίζοντας το κουμπί που δημιουργήθηκε και δημιουργεί ένα προσωρινό αρχείο εξόδου.

Χρησιμοποιώντας τον πρώτο βρόχο, ο αλγόριθμος σαρώνει το κείμενο και αναζητά τη συμβολοσειρά "View Name", ενώ στον δεύτερο βρόχο αναζητά τη συμβολοσειρά "Mark Pos" προκειμένου να συλλέξει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες Markup από τα δεδομένα LiDAR, ενώ στη συνέχεια ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα αρχείο εξόδου που περιλαμβάνει τις συντεταγμένες xyz, το όνομα της όψης και τον αριθμό σάρωσης μέσω ενός κώδικα δομημένης γλώσσας ερωτημάτων. Όταν οι προαναφερόμενοι βρόχοι δεν επαληθεύονται, ο κώδικας αναζητά το αλφαριθμητικό "Text" και το γράφει στο αρχείο εξόδου. Η τελική έξοδος της διαδικασίας αντιπροσωπεύεται από ένα αρχείο ASCII που περιέχει συντεταγμένες xyz και αναγνωριστικά (ετικέτα, άποψη και αριθμό σάρωσης) για κάθε άρθρωση.

Με βάση τα γεωμετρικά δεδομένα κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της βύθισης και της διεύθυνσης βύθισης των ρηγμάτων με τη χρήση του κώδικα Leica Cyclone. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μηχανικών-γεωλογικών δεδομένων επέτρεψε τη δημιουργία ενός νέου συνόλου χωρικών δεδομένων που περιλαμβάνει πανοραμικές εικόνες υψηλής ανάλυσης που συμπληρώνονται από δομικές και γεωμηχανικές πληροφορίες.

## 6.7 Υπολογισμός της Συνολικής Διάταξης από το Σύνολο Γεωμετρικών Δεδομένων

Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε το Leica Cyclone, ένα ειδικό λογισμικό για τη διαχείριση, επεξεργασία και ανάλυση των cloud points, για τον προσδιορισμό της στάσης των ρηγμάτων που απεικονίζονται στον κώδικα εικονικής πραγματικότητας (VR) και επεξεργάζονται ως αρχεία ASCII. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη χαρτογράφηση πρόσθετων ρηγμάτων βραχόμαζας απευθείας στα τρισδιάστατα cloud points και για την τεχνητή μοντελοποίηση των ρηγμάτων με τη βοήθεια πολλών συμπλεγματικών σημείων. Πράγματι, για τον υπολογισμό της στάσης των ιχνών των αρθρώσεων απαιτούνται δύο ευθυγραμμίσεις σημείων που συμπίπτουν με την υπό εξέταση επιφάνεια (οι αρθρώσεις που αποτελούνται από μία μόνο γραμμή αποκλείονται από τον υπολογισμό). Από την άλλη πλευρά, όταν η επιφάνεια της

άρθρωσης είναι πλήρως ορατή, απαιτούνται τουλάχιστον τρία σημεία για τον προσδιορισμό του επιπέδου. Δεδομένου ότι μόνο ένα επίπεδο διέρχεται από τρία σημεία στο χώρο, οι τριγωνομετρικές εξισώσεις (1) και (2) χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της διεύθυνσης βύθισης (a) και της βύθισης (b) των αρθρώσεων χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες των διανυσμάτων χώρου  $u_x$ ,  $u_y$  και  $u_z$ . (Francioni *et al.*, 2014) Υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις:

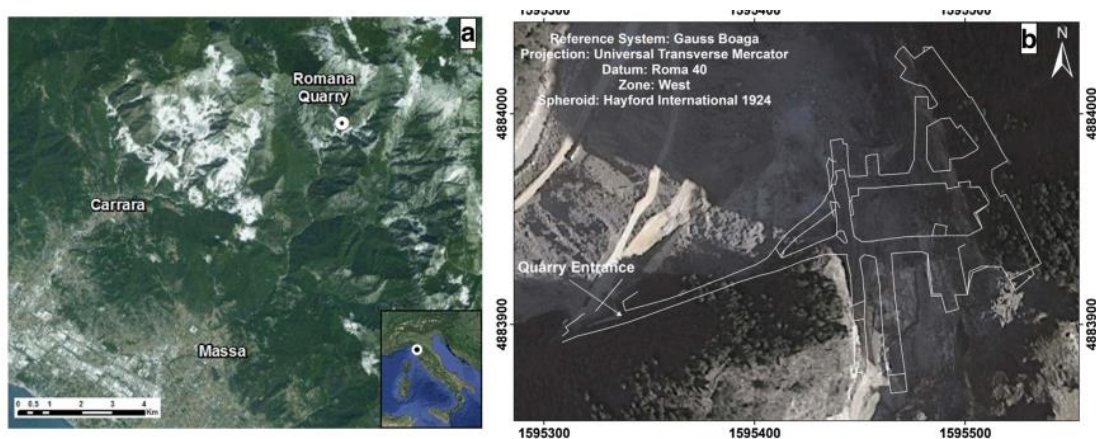
$$\alpha = \arctan\left(\frac{u_x}{u_y}\right) + q, \quad (1)$$

$$\beta = \arctan\left[\frac{u_z}{\sqrt{(u_x^2 + u_y^2)}}\right]. \quad (2)$$

Σχήμα 3: Εξισώσεις για την εκτίμηση διεύθυνσης βύθισης, και της βύθισης των αρθρώσεων χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες των διανυσμάτων χώρου  $U_x$ ,  $U_y$  και  $U_z$ .

## 6.8 Λατομείο Ρομάνα

Το υπόγειο λατομείο μαρμάρου Romana βρίσκεται στο Επαρχία Massa (Τοσκάνη) και αποτελείται από ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων σηράγγων συνολικού μήκους περίπου 600 μ. (εικόνα 19)



Εικόνα 19: α. Δορυφορική εικόνα των Απουανικών Άλπεων- ο ένθετος χάρτης δείχνει τη θέση του λατομείου, στην Ιταλία. β. Αεροφωτογραφία ορθοφωτογραφίας και πλανομετρία του υπόγειου λατομείου.

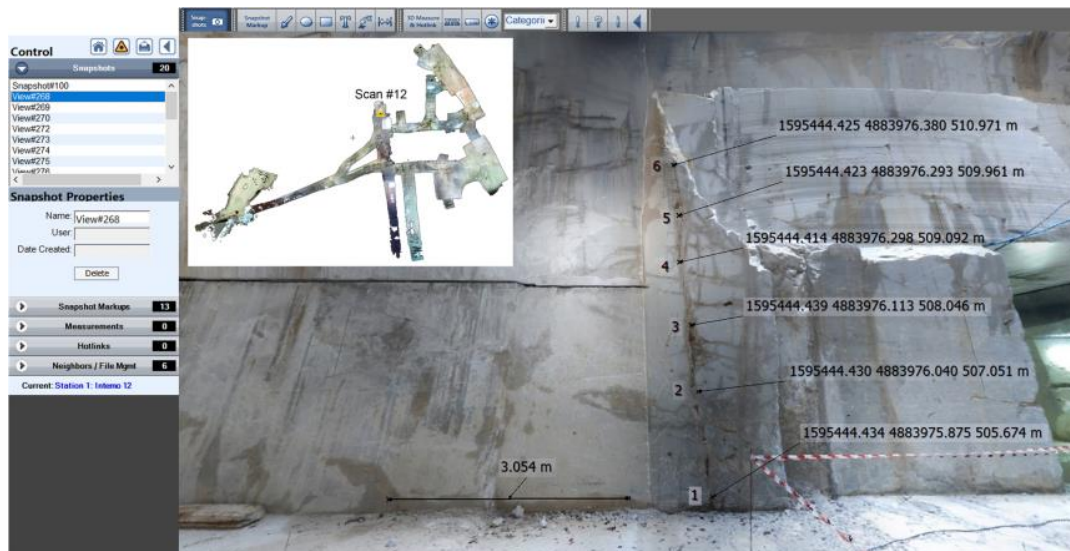
Από γεωλογική άποψη, το λατομείο βρίσκεται στο πολυπαραμορφωμένο και μεταμορφωμένο σύμπλεγμα των Απουανικών Άλπεων. Συγκεκριμένα, βρίσκεται εντός του "Monte Rasori" μιας γεωλογικής δομής πτυχών που βρίσκεται στο ανεστραμμένο άκρο του σύγκλινου "Orto di Donna". Οι ποικιλίες μαρμάρων που εμφανίζονται ανήκουν στην ομάδα των λευκών μαρμάρων, των φλεβωδών μαρμάρων και των δολομιτικών μαρμάρων.

Η γεωλογική και δομική μελέτη της βραχώμαζας πραγματοποιήθηκε με συνδυασμό επίγειων δεδομένων LiDAR και μηχανικών γεωλογικών ερευνών. Η χωρική ανάλυση των cloud points και των δεδομένων εικόνας στην επέκταση που χρησιμοποιήθηκε για την εικονική πραγματικότητα (VR) επέτρεψε τη μέτρηση της θέσης, της ανθεκτικότητας και της απόστασης των ρηγμάτων. Τα παραδοσιακά δεδομένα επιτόπιας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των ασυνεχειών και τον προσδιορισμό άλλων θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων θραύσης. Η ακρίβεια των γεωμετρικών δεδομένων αξιολογήθηκε μέσω σύγκρισης με δεδομένα από την παραδοσιακή μηχανική-γεωλογική έρευνα (με χρήση γεωλογικής πυξίδας σε προσβάσιμες περιοχές) και μέσω στερεογραφικών προβολών. Τέλος, η ενσωμάτωση των μηχανικών και γεωλογικών δεδομένων επέτρεψε τη δημιουργία ενός νέου συνόλου χωρικών δεδομένων που περιλαμβάνει τρισδιάστατες εικόνες υψηλής ανάλυσης, δεδομένα LiDAR και γεωδομικές μηχανικές πληροφορίες.

## 6.8 Στρατηγική Δεδομένων

Το σύνολο γεωμετρικών δεδομένων χαρακτηρίζεται από 12 διαφορετικές σάρωσεις (η πρώτη σάρωση αντιστοιχεί στην περιοχή εξυπηρέτησης εκτός του υπόγειου λατομείου) που περιέχουν μεταβλητό αριθμό τρισδιάστατων προβολών και γεωαναφερόμενων σημάνσεων με σχετικές ταυτότητες (ετικέτες). Οι επισημάνσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση και την αναπαράσταση ιχνών ασυνεχειών. Κάθε όψη περιέχει μόνο ένα ρήγμα, έτσι ώστε ο αριθμός σάρωσης και ο αριθμός όψης να αναφέρονται σε ένα μόνο ρήγμα με τις σχετικές επισημάνσεις και ετικέτες (εικόνα 20).

Η γεωμετρική μελέτη, που πραγματοποιήθηκε για την υποστήριξη της χαρτογράφησης των ρηγμάτων, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών. Παρά την ευκολία με την οποία μπορούν να μετρηθούν η ανθεκτικότητα και η απόσταση των ασυνεχειών, η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή άλλων θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας-ειδικότερα, δείκτες όπως η τραχύτητα (Barton, 1973) η αλλοίωση, η αντοχή σε θλίψη των τοιχωμάτων των ασυνεχειών (Deere and Miller, 1966) το άνοιγμα, η πλήρωση, ο τερματισμός και η διαρροή, όπου δεν μπορούν να προκύψουν από τα γεωμετρικά δεδομένα. Ωστόσο, η μηχανική-γεωλογική έρευνα επωφελήθηκε από τη χαρτογράφηση των ρωγμών απευθείας στο λογισμικό 3D VR και επέτρεψε την ενσωμάτωση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών και τον εντοπισμό πρόσθετων ασυνεχειών εντός του λατομείου. Κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου, το σύνολο δεδομένων από τη χαρτογράφηση VR χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα ίδια αναγνωριστικά για τις ασυνέχειες, να εκτιμηθεί η στάση τους και να ενσωματωθούν οι πληροφορίες.



Εικόνα 20: Παράδειγμα χαρτογράφησης ρωγμών με χρήση επισημάνσεων με συσχετιζόμενα αναγνωριστικά και γεωγραφικές τρισδιάστατες συντεταγμένες.

## 6.9 Αποτελέσματα Χαρτογράφησης Ρηγμάτων

Η έρευνα TLS που διεξήχθη στο λατομείο Ρομάνο, χρησιμοποιήθηκε για τη χαρτογράφηση συνολικά 710 σημείων, που αντιστοιχούν σε 150 ασυνέχειες, μέσω εικονικής πραγματικότητας (VR).

Τα δεδομένα αναλύθηκαν στατιστικά με τη χρήση του λογισμικού Rocscience Dips για τον εντοπισμό πιθανών τοπικών κατανομών και τον προσδιορισμό των κύριων συνόλων ασυνεχειών (Πίνακας 1). Τα Σχήματα χα και χβ (εικόνα 20) απεικονίζουν τη στερεογραφική προβολή των ασυνεχειών που μετρήθηκαν αντίστοιχα σε εικονική πραγματικότητα (VR) και με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας κατά τη διάρκεια μιας παραδοσιακής μηχανικής-γεωλογικής έρευνας (μέθοδος αναπαράστασης ίσων επιφανειών Schmidt, κάτω ημισφαίριο). Η σύγκριση μεταξύ της διεύθυνσης βύθισης αποκαλύπτει γωνιακή διαφορά από 1 έως 11 μεταξύ των δύο σειρών δεδομένων.

Set	Dip\dip direction mean value (VR)		Dip\dip direction standard deviation (VR)		Dip\dip direction mean value (field measurement)		Dip\dip direction standard deviation (field measurement)		Difference between dip\dip direction mean values	
K1a/b	86/268	86/90	2.49/5.15	3.84/5.50	83/265	85/81	4.39/9.87	3.81/6.17	3/3	1/9
K2a/b	81/188	85/1	0.71/4.35	2.58/3.78	86/199	80/8	1.22/4.88	8.33/7.96	5/11	5/7
K3a/b	85/144	85/332	2.82/3.71	3.05/3.78	84/143	86/326	4.02/9.85	2.71/14.80	1/1	1/6

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των συστημάτων ασυνεχειών στο λατομείο Ρομάνο, όπως προέκυψαν από το VR και από τη μηχανική-γεωλογική έρευνα.



Ως παράδειγμα της σύγκρισης μεταξύ μεμονωμένων θραύσεων σχεδίων, η επόμενη εικόνα (εικόνα 21) δείχνει ένα ίχνος ρήγματος με ένα υπολογισμένο (VR) στη θέση 16/87 και (γεωλογική πυξίδα) στη θέση 10/85.



Εικόνα 21: Ρήγμα, η στάση του οποίου χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των μεμονωμένων μετρήσεων με φωτοερμηνεία σε VR-προοπτική άποψη, η γραμμή κλίμακας είναι μόνο ενδεικτική.

Η ενσωμάτωση μηχανικών-γεωλογικών δεδομένων επέτρεψε τη δημιουργία ενός νέου συνόλου χωρικών δεδομένων που περιλαμβάνει πανοραμικές εικόνες υψηλής ανάλυσης, οι οποίες συμπληρώνονται από δομικές και γεωμηχανικές πληροφορίες. Αυτό επιτεύχθηκε εύκολα με την πληκτρολόγηση μηχανικών-γεωλογικών πληροφοριών απευθείας στο πρόσθετο VR. Εναλλακτικά, οι πληροφορίες μπορούν να αντιγραφούν στο αρχείο \*.xml. Η ίδια προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί για όλα τα χαρτογραφημένα ρήγματα, παρέχοντας ένα ισχυρό, εύχρηστο και συμπαγές εργαλείο για μηχανικές και γεωλογικές μελέτες.

## 6.10 Αποτελέσματα Έρευνας

Τα αποτελέσματα από τις παρουσιαζόμενες μελέτες που είδαμε στην χρήση LiDAR και τρισδιάστατης απεικόνισης, αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Καθώς τα προγράμματα Leica TruView χρησιμοποιούν έναν μηχανισμό αποθήκευσης όπου αποτελείται από ψηφιακές εικόνες για οπτικοποίηση και μια κωδικοποιημένη αναπαράσταση των σημείων σάρωσης, η προτεινόμενη προσέγγιση δεν επηρεάζεται από σφάλματα που

οφείλονται στη δημιουργία ενός συνόλου γεωμετρικών δεδομένων. Κάθε σύνολο δεδομένων περιέχει δεδομένα σάρωσης και εικόνας σε σχέση με μία μόνο θέση. Ο κώδικας βασίζεται στην εικόνα και αποθηκεύει το πολύ ένα σημείο σάρωσης ανά εικονοστοιχείο εικόνας, δεδομένου ότι ο χρήστης δεν θα είχε τρόπο να αναγνωρίσει διαφορετικά σημεία σάρωσης εάν αυτά εμφανίζονταν στο ίδιο εικονοστοιχείο. Ως αποτέλεσμα, οι μικρότερες εικόνες περιέχουν λιγότερα σημεία σάρωσης από τις μεγαλύτερες- επειδή το σύνολο δεδομένων περιέχει λιγότερα σημεία από την αρχική σάρωση, όπου το καθιστά ευκολότερο στη χρήση.

Επιπλέον, οι μετρήσεις μέσω τρισδιάστατης εικονικής πραγματικότητας δεν περιέχουν σφάλματα που μπορούν να επηρεάσουν τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω των παραδοσιακών χαρτογραφικών ερευνών (π.χ. προσεγγίσεις στον εντοπισμό της γεωλογικής πυξίδα, δυσκολίες στην επιθεώρηση δυσπρόσιτων περιοχών, ανησυχίες για την ασφάλεια κάτω από τα τοιχώματα των εκσκαφών). Αντίθετα, ο κώδικας της εικονικής πραγματικότητας (VR) παράγει ένα σφάλμα, λόγω του συμπαγούς συνόλου δεδομένων του. Ως αποτέλεσμα, τα σημεία μετατοπίζονται ελαφρώς σε σχέση με την αρχική τους θέση. Μια άλλη πηγή σφάλματος σχετίζεται με την οριζόντια και κατακόρυφη ακρίβεια του εγκεκριμένου σαρωτή λείζερ.

Το συνολικό σφάλμα στο σύνολο δεδομένων είναι επομένως ένας συνδυασμός των σφαλμάτων ως συνάρτηση του εύρους. Λαμβάνοντας υπόψη το χιλιοστομετρικό σφάλμα που οφείλεται στη διαδικασία καταχώρισης και το εύρος της απόστασης σάρωσης (μέγιστο 200 m), το σύνολο των σφαλμάτων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο στη χαρτογράφηση των ρωγμών, αλλά θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεάσει τις μετρήσεις της στάσης.

Εν πάση περιπτώσει, αυτό δεν αποτέλεσε πρόβλημα για τις περιοχές δοκιμών. Ένας άλλος περιορισμός του χρησιμοποιούμενου πρόσθετου προγράμματος είναι ότι η χαρτογράφηση των ρωγμών είναι δυνατή μόνο για ίχνη αρμών που παρατηρούνται σε τουλάχιστον δύο επιφάνειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι αδύνατο να μοντελοποιηθεί μια επιφάνεια χρησιμοποιώντας μια μόνο γραμμή σημείων. Αυτό αποτέλεσε πρόβλημα στην περίπτωση των τεχνητών ομαλών τομών εντός του υπόγειου λατομείου. Για τον λόγο αυτό, δοκιμάζονται επί του παρόντος άλλα λογισμικά, όπως το 3DM Analyst Mine Mapping Suite (ADAM Technology™) ή εναλλακτικές μέθοδοι (Kemeny and Post 2002- Maerz and Otoo 2014) που μπορούν να ξεπεράσουν αυτό το πρόβλημα.

Αρκετές εργασίες έχουν δείξει τη χρήση και την αξιοπιστία αυτόματων και ημιαυτόματων διαδικασιών που μπορούν να υιοθετηθούν στη χαρτογράφηση ρωγμών με βάση τις εικόνες και τα cloud points. Παρόλο που έχουν δοκιμαστεί από τους συγγραφείς διάφορα αυτόματα λογισμικά, όπως το Terranum™ Coltop 3D, το Split-FXTM, το CloudCompare TM και το Maptek™ I-Site Studio , εδώ υιοθετήθηκε μια πλήρως χειροκίνητη προσέγγιση προκειμένου να εγγυηθούμε τη συνέπεια και την υψηλή ποιότητα των ερμηνευμένων ασυνεχειών, καθώς και να έχουμε πλήρη έλεγχο της διαδικασίας.

Σύμφωνα με την εμπειρία μας, η αξιοπιστία και η εγκυρότητα της αυτόματης χαρτογράφησης εξαρτάται από τη βαθμονόμηση του λογισμικού και, κυρίως, από τη μορφολογία των λατομικών όψεων. Επιπλέον, μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικά

αποτελέσματα κατά τη χρήση ενός τρισδιάστατου cloud point ή ενός μοντέλου (π.χ. πλέγματος) στην αυτοματοποιημένη αναγνώριση των γεωλογικών δομών. Στο πλαίσιο ορισμένων λογισμικών η ανακατασκευή πλέγματος μπορεί να αποτελέσει ένα δύσκολο ζήτημα που μπορεί να προκαλέσει τοπική απώλεια ακρίβειας λόγω της πυκνότητας των σημείων, της παρουσίας σκιών και της μεθόδου παρεμβολής.

Στην παρούσα μελέτη, η χειροκίνητη προσέγγιση που υιοθετήθηκε ήταν ιδιαίτερα κατάλληλη, επειδή τα λατομεία των Απουανικών Άλπεων χαρακτηρίζονται συνήθως από λείες επιφάνειες κοπής όπου είναι ορατά μόνο ίχνη ασυνεχειών- αυτό σημαίνει ότι ο αυτόματος εντοπισμός γεωλογικών δομών ήταν άχρηστος στη διαδικασία επιλογής. Επιπλέον, η παρουσία τοπικών περιοχών ανατινάξεων μπορεί να δημιουργήσει αφύσικες επιφάνειες που αυξάνουν τα σφάλματα και τις αβεβαιότητες στον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών. Για τη σωστή χρήση ενός αυτόματου λογισμικού, είναι επίσης απαραίτητο να απομονωθούν τμήματα βραχώμαζας που αποτελούνται μόνο από φυσικές ρωγμές ή να επιλεγούν φυσικές ασυνέχειες από τα αυτόματα μοντέλα. Και οι δύο αυτές προσεγγίσεις μπορεί να είναι πιο χρονοβόρες από τη χειροκίνητη επιλογή. Η χειροκίνητη ντετερμινιστική χαρτογράφηση των ρωγμών αυξάνει το επίπεδο ελέγχου της διαδικασίας και είναι απαραίτητη σε αυτές τις συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης. Τα πρηνή του λατομείου χαρακτηρίζονται από πολυάριθμες περιοχές ανατινάξεων που δημιουργούν ασάφεια στον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών. Εν κατακλείδι, απαιτείται πάντοτε ένας τελικός οπτικός έλεγχος, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται κωδικοί για τον αυτόματο εντοπισμό των ασυνεχειών.

## 6.11 Συμπεράσματα Τεχνολογίας

Στην παρούσα τεχνολογία είδαμε την περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μεγάλων τρισδιάστατων εικονικών αποθετηρίων γεωλογικών-δομικών και γεωμηχανικών πληροφοριών μαζί με εικόνες υψηλής ανάλυσης ( ακόμη και εικόνας 360 μοιρών). Η τρισδιάστατη απεικόνιση και η μετέπειτα επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός δωρεάν plug-in (επιπρόσθετου λογισμικού).

Στο λατομείο Ρομάνο η χαρτογράφηση των ρωγμών με βάση μηχανικούς και τεχνικογεωλογικούς ελέγχους επέτρεψε τον εντοπισμό τριών συνόλων ασυνεχειών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε υψηλή συνοχή μεταξύ των παραδοσιακών επί τόπου μετρήσεων και της διαδραστικής εικονικής χαρτογράφησης δεδομένων LiDAR με χρήση τη χρήση εικονικής πραγματικότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση των εργαλείων που αναλύσαμε όταν χρησιμοποιείται σε συνέργεια με τις παραδοσιακές τεχνικές, αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη των βραχωμαζών και την εκτέλεση αναλύσεων ευστάθειας. Μεγάλες ποσότητες δεδομένων που λαμβάνονται από διαφορετικές πηγές είναι συχνά διάσπαρτες σε σύνολα δεδομένων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα αυτά είναι επομένως δύσκολο να αντιμετωπιστούν σε ένα περιβάλλον. Η διαβούλευση και η ανάλυση δεδομένων (ακόμη και από τρίτους), όπως φωτογραφίες HD, cloud points, γεωλογικοί και δομικοί χάρτες και γεωμηχανικά φύλλα, απαιτεί συνήθως διαφορετικό, ενίοτε

ακριβό λογισμικό. Η μέθοδος που παρουσιάζεται επιτρέπει τη συμπίεση cloud points που θα μπορούσαν εύκολα να φτάσουν σε μέγεθος αρκετά μεγάλο, διευκολύνοντας τη διαχείριση των δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση ενός ενιαίου εργαλείου μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά την επεξεργασία και την διαχείριση των δεδομένων καθώς και την προσβασιμότητα.

Τα δεδομένα μπορούν να ομαδοποιηθούν, να χρησιμοποιηθούν, να αναλυθούν και να διαμοιραστούν μέσα σε ένα ενιαίο αρχείο, όπου ένα λογισμικό ικανό να περιέχει ποικίλες πληροφορίες και μια τρισδιάστατη απεικόνιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ολοκληρωθεί η λεπτομερής χαρτογράφηση των δομικών ασυνεχειών και ο χαρακτηρισμός της βραχόμαζας με τη χρήση του απλού αλγορίθμου που δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται ειδικά στην παρούσα τεχνολογία. Αυτό παρέχει ένα ισχυρό, εύχρηστο και συμπαγές εργαλείο για μηχανικές καθώς και γεωλογικές μελέτες.

Εν κατακλείδι, η προτεινόμενη διαδικασία δεν πρέπει να θεωρείται εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές επιτόπιες έρευνες, αλλά ένα συμπληρωματικό εργαλείο για την ανάλυση των δεδομένων. Πράγματι, απαιτούνται ακόμη εργασίες πεδίου για την εξαγωγή των θεμελιωδών γεωμηχανικών ιδιοτήτων των μεμονωμένων ασυνεχειών, όπως η αντοχή σε θλίψη, το στενό άνοιγμα, η πλήρωση κ.α.. Παρά τις τεράστιες τεχνολογικές εξελίξεις στη γεωλογία, οι κλασικές μέθοδοι έρευνας εξακολουθούν επομένως να είναι σημαντικές για τη διασφάλιση της ασφάλειας και του κέρδους στην εξόρυξη.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΤΙΚΕΤΩΝ R-FID

### 7.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία

Στη γραμμή παραγωγής του μαρμάρου, υπάρχουν τεχνολογικές εξελίξεις όπου προτείνουν νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις που αφορούν τα συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID).

Το RFID είναι τα αρχικά του όρου Radio Frequency Identification, η απόδοση του στα ελληνικά ορίζεται ως «ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνότητας». Τα συστήματα RFID αποτελούν ένα υποσύνολο των Συστημάτων Αυτόματου Προσδιορισμού (Automatic Identification Systems). Ειδικότερα λειτουργεί ως γενικός όρος των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να προσδιορίσουν αυτόματα ανθρώπους ή αντικείμενα και αποτελεί την τεχνολογική εξέλιξη των ραβδωτών κωδίκων (barcodes). (Finkenzeller, 2010)

### 7.2 Δυνατότητες των Ετικετών R-FID

Οι δυναμικές δυνατότητες των ετικετών ανάγνωσης και εγγραφής RFID επιτρέπουν τη μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών των μπλοκ μαρμάρων, σύμφωνα με δοκιμές ηλεκτρικού, υπερηχητικού και τρισδιάστατου χαρακτηρισμού εικόνας. Αυτές οι μη καταστροφικές δοκιμές χαρακτηρισμού επιτρέπουν την αξιολόγηση των σημαντικών παραμέτρων του αρχικού πετρώματος, μέσω της ανάλυσης της εσωτερικής δομής των πετρώματος. Στη συνέχεια, αυτές οι παράμετροι μπορούν να αποθηκευτούν σε βάσεις δεδομένων μέσω των ετικετών RFID, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι επακόλουθες διαδικασίες κοπής και μετασχηματισμού τους. Η τεχνολογία ταυτοποίησης RFID, όταν ενσωματώνεται σε ένα δίκτυο επικοινωνιών Ethernet, επιτρέπει την αυτόματη επικοινωνία με τον εξοπλισμό κοπής και επεξεργασίας, δημιουργώντας μια έξυπνη βιομηχανική πλατφόρμα, ενσωματώνοντας PCs και PLCs σε μια βιομηχανία. Ένα άλλο τεράστιο πλεονέκτημα της τεχνολογίας RFID είναι ότι επιτρέπει την πλήρη ιχνηλασιμότητα των προϊόντων, επιτρέποντας δηλαδή στον τελικό καταναλωτή να αλλάξει την πορεία παραγωγής.

Οι δυναμικές δυνατότητες των ετικετών RFID (ανάγνωσης-εγγραφής) επιτρέπουν τον φυσικό χαρακτηρισμό του αρχικού προϊόντος, μέσω μετρημένων παραμέτρων, που προκύπτουν από μη καταστροφικές δοκιμές που αναλύουν την εσωτερική δομή των τεμαχίων, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των επακόλουθων διαδικασιών κοπής και μετατροπής τους.

Οι βιομηχανικές τεχνολογίες αναγνώρισης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο όσον αφορά την ακεραιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων στη βιομηχανία. Βελτιώνουν την ποιότητα των δεδομένων και, ως εκ τούτου, επιτρέπουν πιο αποτελεσματικές ρυθμιστικές δράσεις βελτιστοποιώντας τη διαδικασία λήψης

αποφάσεων. (Gladysz *et al.*, 2020) Η βιομηχανική ταυτοποίηση εισάγει λειτουργική εξοικονόμηση και βελτιωμένη αποδοτικότητα, έχοντας θετικό αντίκτυπο στην κοινή γνώμη, προσφέροντας διαφάνεια και εμπιστοσύνη στους πελάτες και τους εταίρους για τα προϊόντα. Τα συστήματα RFID επιτρέπουν την αυτόματη και ανεξάρτητη ταυτοποίηση αντικειμένων και ατόμων, κυρίως σε εσωτερικούς χώρους.

### 7.3 Ανάλυση Διαδικασίας Αναγνώρισης μέσω Ετικετών R-FID

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ ετικετών και αναγνωστών, μέσω κεραιών, και με την αποστολή και λήψη ενός μοναδικού σήματος αναγνώρισης μέσω ραδιοκυμάτων.(Denuwara, Maijala and Hakovirta, 2019) Οι θεμελιώδεις περιορισμοί της τεχνολογίας RFID εμφανίζονται στους ηλεκτρομαγνητικούς περιορισμούς, δηλαδή στις ιδιότητες ακτινοβολίας των κεραιών και των φαινόμενα διάδοσης.(Škiljo *et al.*, 2020) Οι ιδιότητες της RFID εξαρτώνται κυρίως από τη ζώνη συχνοτήτων (από χαμηλής συχνότητας έως μικροκύματα). Τα συστήματα RFID υψηλής συχνότητας (HF) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεσαία και συμπαγή περιβάλλοντα (<30 cm), ενώ τα συστήματα RFID υπερύψηλης συχνότητας (UHF) επιτρέπουν τη μαζική ανάγνωση και για σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις (≈10 m), λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης. Οι ετικέτες RFID είναι μοναδικές ετικέτες αναγνώρισης που περιέχουν δεδομένα τα οποία μπορούν να προσαρτηθούν σε αντικείμενα. Μια ετικέτα αποτελείται συνήθως από τρία στοιχεία: (i) ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που αποθηκεύει δεδομένα και αποκωδικοποιεί/κωδικοποιεί σήματα ραδιοσυχνοτήτων- (ii) μια κεραία για τη λήψη των σημάτων- (iii) και ένα τρίτο σύστημα που ενεργοποιείται από ένα σήμα αναγνώστη. Όταν μια ετικέτα περνάει κοντά στο πεδίο του αναγνώστη, η κεραία της αποθηκεύει ενέργεια, επιτρέποντας στην ετικέτα να στείλει ραδιοκύματα. (Dolgui and Proth, 2008)

Οι ετικέτες αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- ❖ **Παθητικές ετικέτες**, όπου εξαρτώνται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον αναγνώστη RFID σε
- ❖ **Ενεργητικές ετικέτες**, όπου διαθέτουν ενσωματωμένες μπαταρίες που αυξάνουν την εμβέλεια ολόκληρου του συστήματος. Καθώς οι ετικέτες δεν εξαρτώνται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του αναγνώστη για να ενεργοποιηθούν
- ❖ **Ημιενεργές ετικέτες** όπου αυτές οι ετικέτες διαθέτουν μπαταρίες- ωστόσο, μπορούν να λειτουργούν όπως οι παθητικές ετικέτες, επιτρέποντας την ενεργοποίηση χωρίς εσωτερική πηγή ενέργειας.

Οι κοινές ετικέτες μπορούν να περιλαμβάνουν δεδομένα μόνο για ανάγνωση, εγγραφή μόνο μία φορά. Οι ετικέτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση δεδομένων, ειδικά οι παθητικές- ωστόσο, ένα πρόβλημα είναι η περιορισμένη ποσότητα των μνήμης, οπότε είναι πολύ συνηθισμένο να καταχωρείται μόνο το αναγνωριστικό της ετικέτας στη βάση δεδομένων και να χρησιμοποιείται ως δείκτης για την πρόσβαση στα επιθυμητά δεδομένα. Οι ετικέτες RFID μπορούν να έχουν πολλαπλά φυσικά χαρακτηριστικά: εύκαμπτα/άκαμπτα, μεγάλα/μικρά,

εύθραυστα/ανθεκτικά και, ανάλογα με την εφαρμογή, να έχουν μία ή πολλαπλές χρήσεις. Η απόδοση της ετικέτας εξαρτάται από ιδιότητες του επισημασμένου προϊόντος, δεδομένου ότι μπορεί να είναι στερεό, σκόνη ή υγρό, επηρεάζοντας τις διηλεκτρικές ιδιότητες και την επιτρεπτικότητα και, κατά συνέπεια, το εύρος ανάγνωσης.

Όπως αναφέρθηκε συνοπτικά παραπάνω, η τεχνολογία RFID μπορεί να διαφοροποιηθεί από τις συχνότητες στις οποίες λειτουργεί το σύστημα. Συνήθως, διαφορετικές εφαρμογές κατανέμονται σε διαφορετικές συχνότητες με διαφορετικό εύρος συχνοτήτων.

#### Πλεονεκτήματα των ετικετών RFID:

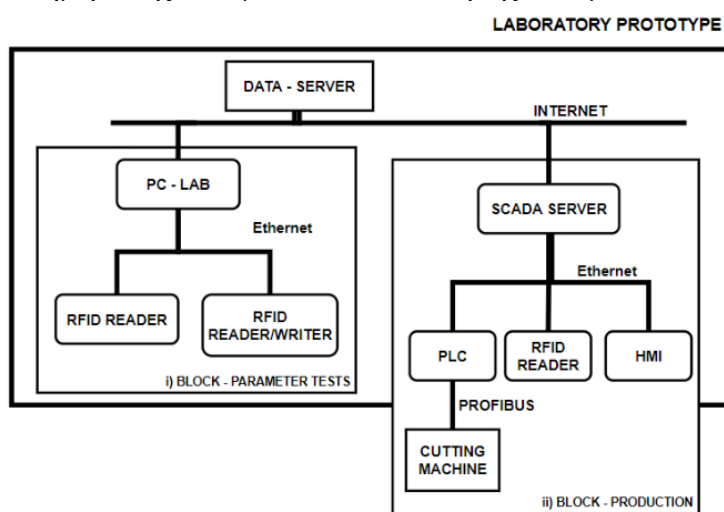
- ❖ Δραστική μείωση του φόρτου εργασίας. Ενώ τα συστήματα γραμμωτού κώδικα μπορούν να διαβάσουν μόνο τα αντικείμενα, ένα προς ένα, τα συστήματα RFID επιτρέπουν την ανάγνωση πολλαπλών ετικετών.
- ❖ Τα συστήματα RFID επιτρέπουν μετρήσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις (συνήθως έως 10 m), ενώ τα συστήματα Barcode χρειάζεται οπτική επαφή.
- ❖ Τα συστήματα RFID επιτρέπουν την ανάγνωση και εγγραφή νέων δεδομένων, ενημερώνοντας τα αποθηκευμένα δεδομένα. Τα barcode μπορούν να διαβάσουν μόνο στατικά δεδομένα.

#### Μειονεκτήματα των ετικετών RFID:

- ❖ Τα συστήματα RFID είναι πιο ακριβά από τα συστήματα Barcode, ιδίως όταν πρόκειται για ενεργές ετικέτες.

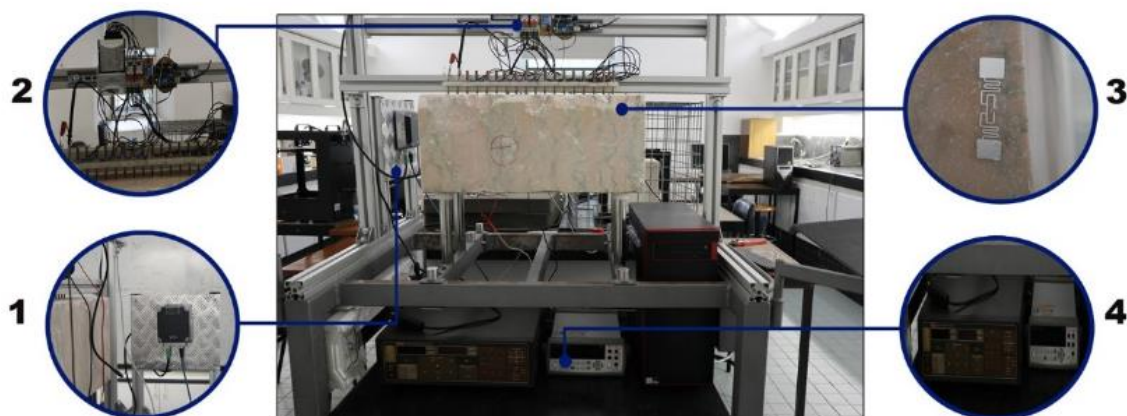
Το σημείο εκκίνησης της βιομηχανίας μαρμάρου είναι η εξόρυξη των φυσικών όγκων (Akkoçun, 2010) με τη χρήση διαφόρων μεθόδων και εργαλείων. Οι φυσικοί όγκοι κόβονται κατάλληλα σε ορισμένο μέγεθος, σύμφωνα με τους περιορισμούς ποιότητας της πέτρας και τα αιτήματα των πελατών, και στη συνέχεια αποστέλλονται σε εταιρείες παραγωγής. Περαιτέρω, σε αυτές τις εταιρείες, κατασκευάζονται πολλά διαφορετικά προϊόντα μαρμάρου με τη χρήση διαφορετικών τεχνικών, όπως κοπή, αλλαγή μεγέθους, αρχειοθέτηση, βαθμονόμηση και στίλβωση. Ένα κρίσιμο σημείο στην αλυσίδα της βιομηχανίας εξόρυξης είναι η βελτιστοποίηση των επιφανειών κοπής προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα και οι διαστάσεις των όγκων αποφεύγοντας τις ασυνέχειες χρώματος και υφής που οφείλονται σε διαφορετικές συνθέσεις πετρωμάτων. Ως εκ τούτου, η ανίχνευση των εν λόγω ασυνεχειών μέσω μη καταστροφικών δοκιμών αποτελεί ένα συνεχές ενεργό πεδίο έρευνας. Τρεις από αυτές τις μεθόδους που αναλύουν την εσωτερική δομή των πετρωμάτων, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι επακόλουθες διαδικασίες κοπής και μετατροπής τους, ενισχύοντας έτσι την αγοραστική τους αξία, μειώνοντας τα απόβλητα, το περιβαλλοντικό κόστος και το κόστος μεταφοράς, είναι γνωστές ως Ηλεκτρικές μετρήσεις, μετρήσεις με υπερήχους και μετρήσεις με εικόνες. Μια από τις μη καταστροφικές μετρήσεις είναι η ERT ( Ηλεκτρική Τομογραφία Ειδικής Αντίστασης) με τη μέτρηση της εσωτερικής ειδικής αντίστασης σε διάφορα σημεία του πετρώματος.

Ένα πρωτότυπο proof-of-concept, παρουσιάζει ένα τρόπο ψηφιοποίησης νέων επιστημονικών πληροφοριών στον τομέα της βιομηχανίας εξόρυξης μαρμάρου, όπου η ταυτοποίηση RFID είναι ο βασικός παράγοντας για τη συγκέντρωση των επιστημονικών εργαστηριακών δοκιμών με τις online βάσεις δεδομένων που απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κοπής και μετατροπής στο εργοστάσιο. Το πρωτότυπο που υλοποιήθηκε επικεντρώνεται στη μελέτη δύο φάσεων του κύκλου ζωής του μαρμάρου όπου είναι οι δοκιμές παραμέτρων μπλοκ (εργαστηριακές μετρήσεις) και παραγωγή μπλοκ (κοπή). Στο Σχήμα παρακάτω (σχήμα 5) απεικονίζεται η σχεδιασμένη στρατηγική επικοινωνίας και για τις δύο πλατφόρμες, όπου τα συστήματα RFID διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαδικασία αποθήκευσης δεδομένων, ενημέρωσης δεδομένων και ανάκτησης δεδομένων.



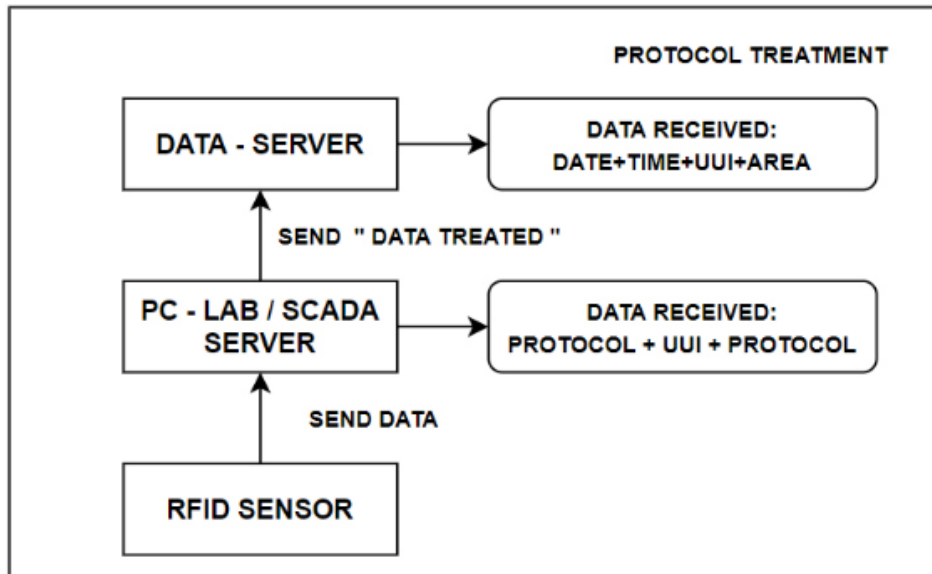
Σχήμα 5: Απεικόνιση της σχεδιασμένης στρατηγικής επικοινωνίας και για τις δύο πλατφόρμες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πρωτότυπο που υλοποιήθηκε επικεντρώνεται στη μελέτη της ενσωμάτωσης των συστημάτων RFID για τη βελτίωση της βιομηχανίας εξόρυξης μπλοκ μαρμάρου. Ως εκ τούτου, ένα RFID σύστημα προστέθηκε σε αυτή τη φάση, δείχνοντας τις τεράστιες δυνατότητες που προσφέρει η ψηφιοποίηση στη διαδικασία μέτρησης και αποθήκευσης δεδομένων μπλοκ, χρησιμοποιώντας τα συστήματα RFID ως όχημα για την προώθηση αυτής της ενσωμάτωσης.



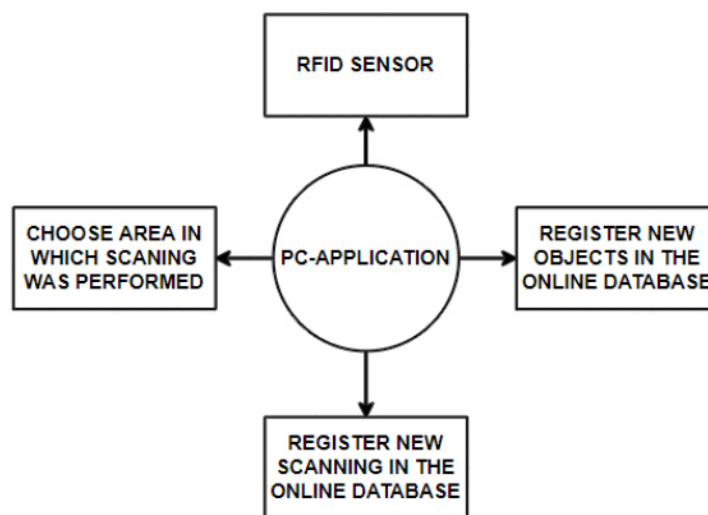
Εικόνα 22: Δοκιμές παραμέτρων ενός μπλοκ μαρμάρου στο Πανεπιστήμιο Evora. 1. RFID Αισθητήρας ανάγνωσης/εγγραφής και κεραία, 2. Σύστημα συλλογής δεδομένων, 3. Παθητική ετικέτα RFID, 4. Πηγή ρεύματος και Ψηφιακό πολύμετρο.





Σχήμα 6: Δομή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που αναπτύχθηκε για τον αναγνώστη RFID.

Τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να καταγράφονται για κάθε μπλοκ μαρμάρου ξεπερνούν σε μεγάλο βαθμό το όριο μνήμης των συνηθισμένων ετικετών RFID. Συνεπώς δημιουργήθηκε ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για τον αναγνώστη RFID. Η εφαρμογή H/Y αναπτύχθηκε σε γλώσσα Delphi για να λειτουργεί με τους αναγνώστες RFID, ακολουθώντας το πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε. Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή της εφαρμογής. Η εφαρμογή διαθέτει διάφορες λειτουργίες που αναπτύχθηκαν, όπως Σύνδεση TCP/IP- σε απευθείας σύνδεση με βάση δεδομένων- εγγραφή νέου αντικειμένου, επιλογή περιοχής.



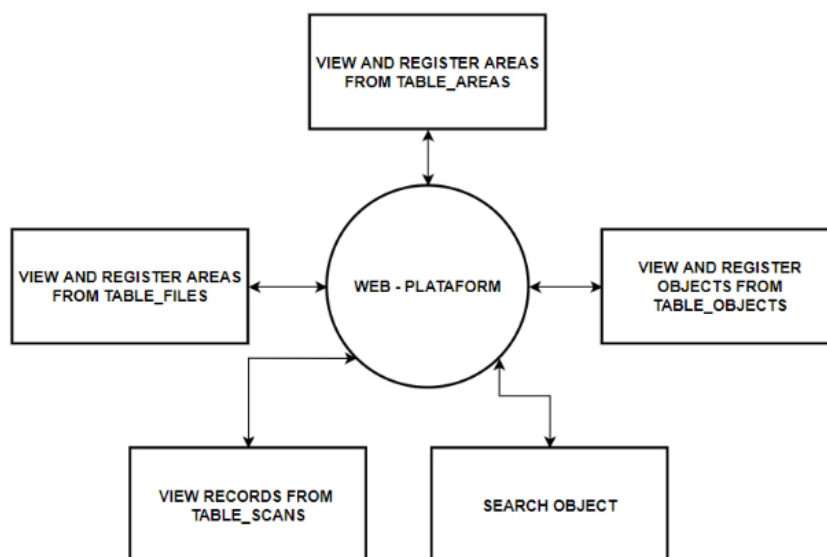
Σχήμα 7: Δομή της αναπτυχθείσας εφαρμογής Delphi-Application για την ενσωμάτωση RFID.

Ακολουθεί μια σύντομη επεξήγηση των λειτουργιών του Delphi-Ap που αναπτύχθηκε

- ❖ **TCP/IP:** Η χρήση αυτού του πρωτοκόλλου εξαρτήθηκε από τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, κυρίως επειδή είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται ευρέως και εισάγεται εύκολα σε εμπορικά συστήματα.
- ❖ **ONLINE ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ:** Η ηλεκτρονική βάση δεδομένων είναι ένα απαραίτητο εργαλείο όταν οι λύσεις πρέπει να βρίσκονται σε πραγματικό χρόνο. Αυτός ο τύπος δομών είναι πολύ πιο κατάλληλος σε σύγκριση με τις υπάρχουσες δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων σε αρχεία (txt, excel ή ακόμη και τοπικές βάσεις).
- ❖ **ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙΝΟΥΡΙΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΒΑΣΗ:** Επιτρέπει στο σύστημα που λειτουργεί από το PC-LAB να προσθέτει αμέσως νέα αντικείμενα και να καταχωρεί νέα αρχεία δεδομένων.
- ❖ **ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ:** Ακολουθώντας την ιδέα ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί το αντικείμενο σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, ο χρήστης μπορεί να υποδείξει την τοποθεσία όπου βρίσκεται το αντικείμενο και που ανταποκρίνεται στα δεδομένα που λαμβάνει. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το σύστημα επεκτάσιμο.

Αντίστοιχα στην διαδικτυακή πλατφόρμα του συστήματος έχουν ενταχθεί οι εξής λειτουργίες:

- ❖ **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ:** Εγγραφή ή διαγραφή νέων αντικειμένων από τον πίνακα της βάσης δεδομένων ("TABLE\_OBJECTS")
- ❖ **ΠΕΡΙΟΧΕΣ:** Εγγραφή ή αφαίρεση νέων περιοχών από τον πίνακα της βάσης δεδομένων ("TABLE\_AREAS")
- ❖ **ΑΡΧΕΙΑ:** Καταχώρηση ή διαγραφή νέων αρχείων από τον πίνακα της βάσης δεδομένων ("TABLE\_FILES")
- ❖ **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ:** Αναζήτηση στη βάση δεδομένων για εγγραφές (σαρώσεις και αρχεία) που δείχνουν το όνομα του αντικειμένου
- ❖ **SCANS:** Προβολή όλων των σαρώσεων που έχουν καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων.



Σχήμα 8: Δομή της αναπτυχθείσας διαδικτυακής πλατφόρμας.

## 7.4 Συμπεράσματα Χρήσης Ετικετών R-FID

Η παρούσα ανάλυση για τα RFID παρουσιάζει μια στρατηγική υλοποίησης που θεωρείται πολύτιμο πλεονέκτημα για τη βιομηχανία μαρμάρου, καθώς αποδεικνύει μέσω ενός πρωτότυπου Proof-of-concept πώς η ενσωμάτωση των συστημάτων RFID και των διαδικτυακών πλατφορμών, είναι βασικοί παράγοντες για την υποστήριξη της συνδεσιμότητας των συστημάτων RFID και των διαδικτυακών πλατφορμών μεταξύ των επιχειρηματικών εταιρών στην αλυσίδα παραγωγής. Η χρήση των συστημάτων RFID σε συνδυασμό με τις αναπτυγμένες πλατφόρμες ιστού δημιουργούν ένα νέο πλαίσιο ψηφιοποίησης, όπου όλοι οι εταίροι (τελικοί πελάτες, μηχανικοί, αρχιτέκτονες) θα μπορούν να επιλέγουν τα κατάλληλα μαρμάρινα προϊόντα σύμφωνα με τις οπτικές τους επιφάνειες ή τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες, ακόμη και πριν από την κοπή της πέτρας στο λατομείο. Αυτό παρέχει στον κλάδο μια εξαιρετικά καινοτόμα ιδέα, όχι μόνο από άποψη εξοικονόμησης χρόνου μέσα στη γραμμή παραγωγής αλλά μέχρι το τελικό στάδιο επιλογής και αγοράς του τελικού προϊόντος.

Παρουσιάζεται λοιπόν ένας νέος τρόπος ψηφιοποίησης νέων επιστημονικών πληροφοριών στον τομέα της βιομηχανίας εξόρυξης μαρμάρου, όπου η ταυτοποίηση με RFID είναι ο βασικός παράγοντας για τη συγκέντρωση των επιστημονικών εργαστηριακών δοκιμών με τις online βάσεις δεδομένων που απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κοπής και μετατροπής στο εργοστάσιο.

Για μελλοντικές εργασίες πάνω στο κλάδο και στη γραμμή παραγωγής, προβλέπεται ο σχεδιασμός ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την κοπή του υλικού. Το σύστημα θα έχει τη δυνατότητα να προτείνει σχέδια κοπής βάσει κριτηρίων για τη βελτιστοποίηση του υλικού, της ενέργειας και άλλων δαπανών επεξεργασίας που σχετίζονται με τα ορατά μοτίβα στην επιφάνεια του υλικού, που προκύπτουν από την κοπή. Αυτά τα μοτίβα θα αναλύονται σε μια βάση δεδομένων από ευφυείς αλγόριθμους, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος σύμφωνα με τη ζήτηση της αγοράς.

## Κεφάλαιο 8° : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ ΜΕ MACHINE LEARNING (ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ), LBP ΚΑΙ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

### 8.1 Εισαγωγή στις τεχνολογίες

Η ταξινόμηση μαρμάρων στις εγκαταστάσεις και στη γραμμή παραγωγής είναι μια ευαίσθητη εφαρμογή, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την υποκειμενική λήψη αποφάσεων από εμπειρογνώμονες. Ο εμπειρογνώμονας ταξινομεί το μάρμαρο χειροκίνητα με το χρώμα, την ομοιογένεια και την υφή του. Ένας ευφυής ταξινομητής μαρμάρου με βάση την επεξεργασία εικόνας μπορεί να δώσει λύσεις στα τρέχοντα προβλήματα του κλάδου. Μπορούμε όμως να εισάγουμε έναν ευφυή ταξινομητή για την ταξινόμηση μαρμάρων σε όλες τις διαφορετικές κατηγορίες σε πραγματικό πεδίο χρόνου πάνω στη παραγωγή.

Ο σκοπός της νέας τεχνολογίας αυτής είναι να αυτοματοποιήσει και να βελτιώσει τη σημερινή χειροκίνητη διαδικασία ταξινόμησης. Τα τοπικά δυαδικά μοτίβα και τα ιστογράμμάτα χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών του κάθε μαρμάρου όπου εκεί μια μηχανή προηγμένης εκμάθησης σχεδιάζεται ως ευφυής ταξινομητής. Οι αποφάσεις, η μηχανή διανύσματος υποστήριξης και οι δομές τεχνητού νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται επίσης για την περαιτέρω ανάλυση της απόδοσης της ταξινόμησης των μαρμάρων. Τα ευρήματα (ποσοστό επιτυχούς δοκιμής 97,5%) αποκαλύπτουν υψηλή απόδοση σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μελέτες. (Turan, Ucar and Dandil, 2021)

Ένα φυσικό και μοναδικό πέτρωμα, το μάρμαρο, που σχηματίζεται από ασβεστόλιθο και δολομιτικά συστατικά που ενώνονται για πολλά χρόνια, χρησιμοποιείται σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, ιδίως στον κατασκευαστικό τομέα. Περίπου 90%-98% της σύνθεσης του μαρμάρου αποτελείται από  $\text{CaCO}_3$  (ανθρακικό ασβέστιο), ενώ το υπόλοιπο μέρος αποτελείται από  $\text{MgCO}_3$  (ανθρακικό μαγνήσιο) σε μεταβλητή αναλογία. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που καθιστά το μάρμαρο ανώτερο από τα φυσικά πετρώματα όπως ο τραβερτίνης και ο γρανίτης είναι ότι έχει μοναδική υφή με τις μεταβλητές ποσότητες οργανικών και ανόργανων συστατικών.

Η ταξινόμηση της μορφής των μαρμάρων είναι η διαδικασία ταξινόμησης των μορφών ανάλογα με το χρώμα, την ομοιογένεια και τα στοιχεία του μαρμάρου σε πρώτο πλάνο. Είναι επιθυμητό να υπάρχουν πλάκες της ίδιας μορφής στην περιοχή όπου χρησιμοποιείται το μάρμαρο. Ο προσδιορισμός μαρμάρινων πλακών της ίδιας μορφής είναι μια δύσκολη διαδικασία που απαιτεί εμπειρογνωμοσύνη και συχνά βασίζεται σε προσωπικές αποφάσεις στον κλάδο.

Τα κριτήρια ταξινόμησης των μαρμάρινων πλακών με πολυάριθμους τύπους και μοναδικές μορφές και όψεις μπορεί να διαφέρουν. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν μεθόδους μηχανικής μάθησης με βάση την επεξεργασία εικόνας. Σε αυτές τις μελέτες, οι εικόνες μαρμάρου

λαμβάνονται από τις κάμερες σε πραγματικό χρόνο. Οι εικόνες λαμβάνονται από τις κάμερες που είναι τοποθετημένες στο κλειστό κομμάτι της μεταφορικής ταινίας.

Δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής χρησιμοποιούν μεταβλητούς μάντες μεταφοράς και χειροκίνητα συστήματα μεταφοράς μαρμάρου, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν τα συστήματα αυτά σε όλους τους χώρους παραγωγής. Ωστόσο, οι μελέτες αυτές αποτέλεσαν τη βάση βιομηχανικών εφαρμογών για την ταξινόμηση των μαρμάρων. Στη βιβλιογραφία που έχουμε σήμερα υπάρχουν και άλλες μελέτες που περιλαμβάνουν συμβατικές μεθόδους ταξινόμησης των εικόνων μαρμάρου, όπως η ταξινόμηση των εικόνων μαρμάρου με βάση τη μορφολογική διαίρεση με εικόνες μακροσκοπικής κλίμακας. Η χρήση ενός αλγορίθμου τμηματοποίησης όμως είναι μια διαδικασία με μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Παρόμοια με τη διαδικασία ταξινόμησης μαρμάρων, υπάρχει και η ταξινόμηση εικόνων πετρωμάτων με βάση την αναγνώριση προτύπων.

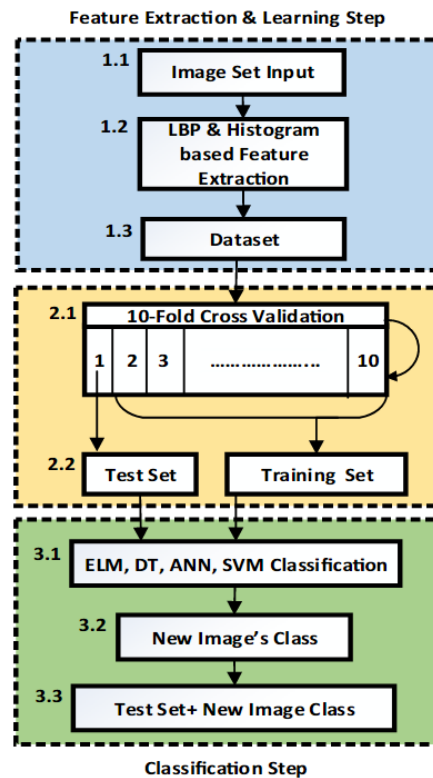
Υπάρχουν πολλές μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών μαρμάρου για την απόκτηση ψηφιακών χαρακτηριστικών από εικόνες. Η μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών Local Binary Patterns (LBP) (Kumar *et al.*, 2019) χρησιμοποιείται στην ταξινόμηση των μαρμάρων λόγω της χαμηλής κατανάλωσης μνήμης και του γρήγορου υπολογισμού της. Δεδομένου ότι η LBP μειώνει το υπολογιστικό κόστος που προκαλείται από τα περιττά σημεία εικονοστοιχείων, παρέχει βελτίωση στην ταξινόμηση επιφανειακών μορφών, όσον αφορά τη χρήση μνήμης και το χρόνο επεξεργασίας. (Hoang *et al.*, 2017) Εκτός από την ταξινόμηση διαφορετικών τύπων μαρμάρων, είναι πιο δύσκολο να ταξινομηθεί ο ίδιος τύπος μαρμάρων μεταξύ τους και έτσι υπάρχει ταξινόμηση συγκεκριμένα για αυτό που είναι βασισμένη στη μέθοδο εξαγωγής χαρακτηριστικών LBP που ταξινομεί μάρμαρα του ίδιου τύπου. Η μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών με βάση το ιστόγραμμα είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται για την ανάλυση εικόνων και τη μίξη τους. Το ιστόγραμμα παρέχει μια πολύ κατάλληλη δομή για τη διαδικασία ταξινόμησης εικόνων μαρμάρων λόγω του χαμηλού υπολογιστικού κόστους, της εύκολης εφαρμογής και της ικανότητάς του να παράγει διακριτά χαρακτηριστικά. Στόχος της εξαγωγής και επιλογής χαρακτηριστικών είναι η δημιουργία πιο αποτελεσματικών συναρτήσεων ταξινόμησης.

## 8.2 Μεθοδολογία

Η μέθοδος ELM είναι η βάση του ταξινομητή που βασίζεται στη μηχανική εκμάθηση. Το βήμα εξαγωγής χαρακτηριστικών επιτρέπει στον ταξινομητή να χειρίζεται τα επεξεργασμένα δεδομένα αντί για το ακατέργαστο σύνολο δεδομένων. Όσο περισσότερα διακριτικά χαρακτηριστικά εξάγονται, τόσο υψηλότερες επιδόσεις ταξινόμησης επιτυγχάνονται. Ο ταξινομητής ELM παράγει τη συνάρτηση ταξινόμησης φτάνοντας στα τοπικά ελάχιστα σε μία μόνο επανάληψη. Αυτό του επιτρέπει να εκτελεί λειτουργίες σε μικρότερο χρόνο.

Μία από τις μεθόδους στο στάδιο εξαγωγής χαρακτηριστικών είναι η LBP. Με τον υπολογισμό LBP, λαμβάνονται οι τιμές ιστογράμματος των ομοιόμορφων και μη ομοιόμορφων σημείων. Οι πιθανολογικές τιμές των σημείων στο ιστόγραμμα LBP

αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά της εικόνας με βάση την LBP. Οι μη ομοιόμορφες εικόνες απορρίπτονται και ο χρόνος επεξεργασίας μειώνεται. Στη μέθοδο εξαγωγής χαρακτηριστικών ιστογράμματος, μετά τη μετατροπή της εικόνας σε επίπεδο γκρι, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά πρώτης και δεύτερης τάξης και συντίθεται ένα σύνολο δεδομένων. Μετά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων που λαμβάνεται, νέα δεδομένα προστίθενται στο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης για να βελτιωθεί η μελλοντική μαθησιακή απόδοση.



Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης μαρμάρων.

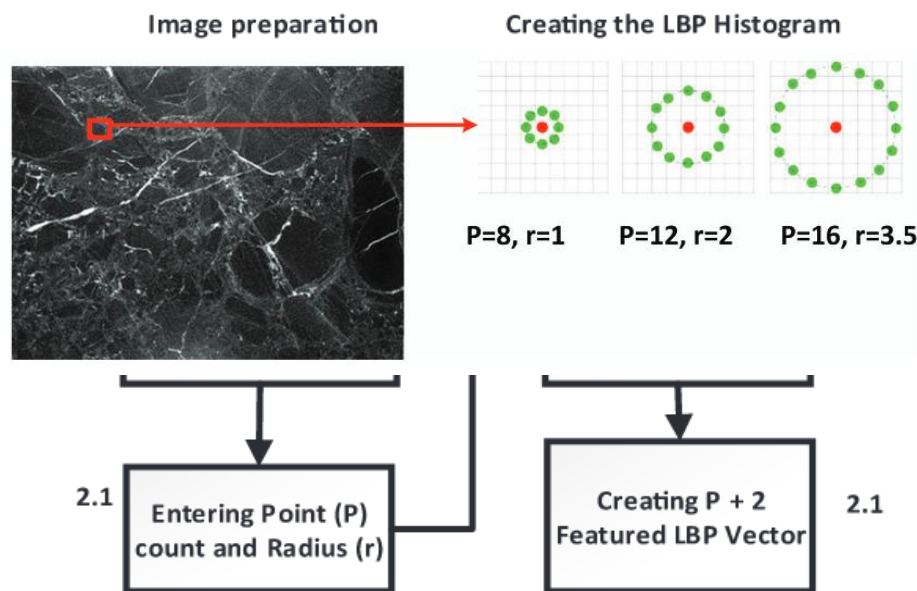
Οι μορφές που αποτελούνται από μια γεωμετρική διάταξη των χρωμάτων που συνθέτουν την εικόνα έχουν ως αποτέλεσμα το συνδυασμό και το διαχωρισμό των εικόνων σε διαδικασίες ταξινόμησης εικόνων. Τα χρώματα που σχηματίζουν την μορφή περιλαμβάνουν τη συχνότητα, τη φάση, την τυχαιότητα, την ομοιομορφία, την πυκνότητα και τη γραμμικότητα της εικόνας. Στη φάση της εξαγωγής χαρακτηριστικών, οι εικόνες μαρμάρου λαμβάνουν ετικέτες με αριθμητικά χαρακτηριστικά. Στο στάδιο εξαγωγής χαρακτηριστικών, οι ακατέργαστες εικόνες μαρμάρων μετατρέπονται σε ένα σύνολο δεδομένων με αριθμητική ακολουθία. Το σύνολο εκπαίδευσης που αποτελείται από τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται από τις εικόνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ταξινόμησης και ομαδοποίησης.

### 8.3 Μέθοδος LBP – Local Binary Patterns

Η μέθοδος LBP μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένας επιτυχημένος αλγόριθμος διαλογής, ο οποίος αναγνωρίζει τις υφές. Χρησιμοποιείται στην ταξινόμηση και ομαδοποίηση των μορφών μαρμάρου. Η LBP αποκαλύπτει τα διακριτικά και σημαντικά χαρακτηριστικά της μορφής τους. Τα δείγματα χαρακτηριστικών συνδυάζονται στο γράφημα ιστογράμματος για τη δημιουργία ενός συνόλου χαρακτηριστικών. Ο ανιχνευτής LBP σχηματίζει ένα γειτονικό διάλυμα για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. Το γειτονικό διάλυμα υποδεικνύει τη σχέση του δείγματος με τα σημεία γύρω από το κεντρικό σημείο. Τα βήματα επεξεργασίας για τη δημιουργία του συνόλου χαρακτηριστικών LBP έχουν ως εξής:

**Προετοιμασία της εικόνας:** Σε αυτό το βήμα, οι εικόνες αλλάζουν το μέγεθος. Όλες οι εικόνες του συνόλου δεδομένων μετατρέπονται σε επίπεδο κλίμακας του γκρι και είναι έτοιμες για την εξαγωγή χαρακτηριστικών LBP. Στην εικόνα του γκρι, ορίζεται ο αριθμός των σημείων δείγματος και η τιμή ακτίνας για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ των δειγμάτων.  $P$  (αριθμός σημείων δείγματος) και  $r$  (ακτίνα).

Η ακολουθία LBP προετοιμάζεται σύμφωνα με τις τιμές  $P$  και  $r$ . Μια μεγαλύτερη τιμή  $P$  θα διευρύνει το ιστόγραμμα- αυξάνει επίσης το υπολογιστικό κόστος. Η εισαγωγή μικρής τιμής  $P$  προκαλεί απώλεια πληροφοριών στην ανάλυση υφής. Το  $r$  είναι η απόσταση των γειτονικών σημείων από το κεντρικό σημείο. Η εισαγωγή διαφορετικών τιμών  $r$  καθιστά δυνατή την ανάλυση υφών διαφορετικών μεγεθών.



Εικόνα 23: Μέθοδος LBP: Αναπαράσταση συνιστωσών σάρωσης για διαφορετικές τιμές  $P$  και  $r$ .

## 8.4 Μέθοδος Ιστογράμματος

Μία από τις μεθόδους εξαγωγής χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση αριθμητικών ορισμών από την εικόνα μορφής μαρμάρου είναι η μέθοδος που βασίζεται στο ιστόγραμμα. Τα χαρακτηριστικά πρώτης τάξης με βάση το ιστόγραμμα που χρησιμοποιούνται είναι οι τιμές "Mean", "Variance", "Skewness" και "Kurtosis", "Energy" και "Entropy". Τα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης που βασίζονται στο ιστόγραμμα είναι η "αντίθεση", η "ενέργεια", η "ομοιογένεια" και η "συσχέτιση". Η εικόνα μετατρέπεται σε επίπεδο κλίμακας του γκρι για την εξαγωγή χαρακτηριστικών με βάση το ιστόγραμμα. Το ιστόγραμμα επιπέδου του γκρι δίνει το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων που περιέχουν επίπεδα χρώματος. Τα χαρακτηριστικά ιστογράμματος πρώτης τάξης των ακατέργαστων εικόνων δίνονται στον πρώτο πίνακα. (πίνακας 2)

<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Ορισμός</b>
<i>Mean</i> (μέσος όρος)	Το άθροισμα του μέσου όρου των επιπέδων χρώματος του γκρι στην εικόνα.
<i>Variance</i> (διακύμανση)	Μεταβολή της έντασης επί του μέσου όρου του γκριζών επιπέδου χρώματος.
<i>Skewness</i> (λοξότητα)	Μέτρο συμμετρίας.
<i>Kurtosis</i> (κύρτωση)	Ευκρίνεια και την κύρτωση του ιστογράμματος
<i>Energy</i> (ενέργεια)	Άθροισμα των τετραγώνων του μέσου όρου των γκριζών επιπέδων χρώματος.
<i>Entropy</i> (εντροπία)	Μέτρηση της ομοιομορφίας του ιστογράμματος

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Ιστογράμματος

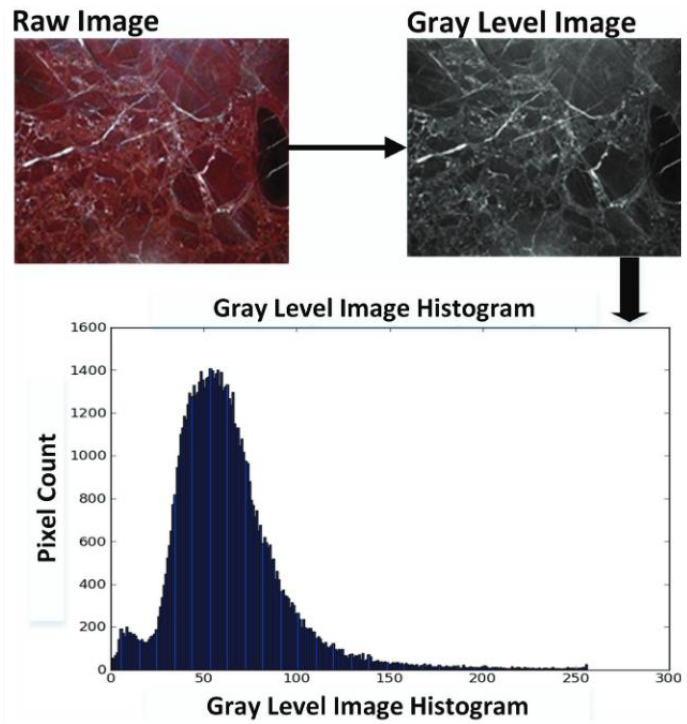
Τα χαρακτηριστικά του ιστογράμματος δεύτερης τάξης είναι αυτά που λαμβάνονται από τον πίνακα συνεμφάνισης του ιστογράμματος πρώτης τάξης. Ο πίνακας συνεμφάνισης έχει αποφασιστικότητα για την αποκάλυψη της σχέσης των δειγμάτων δεδομένων μεταξύ τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά του ιστογράμματος δεύτερης τάξης (συνεμφάνισης) δίνονται στον δεύτερο πίνακα. (πίνακας 3)

<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Ορισμός</b>
<i>Energy</i> (ενέργεια)	Παράγεται για τη μέτρηση της ομοιότητας του ιστογράμματος
<i>Contrast</i> (αντίθεση)	Η διαφορά μεταξύ του πιο φωτεινού και του πιο σκοτεινού σημείου σύμφωνα με το επίπεδο χρώματος της εικόνας.
<i>Homogeneity</i> (Ομοιογένεια)	Το μέτρο της κατανομής των χρωμάτων που σχηματίζουν τις υφές μέσα στην εικόνα.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ιστογράμματος δεύτερης τάξης



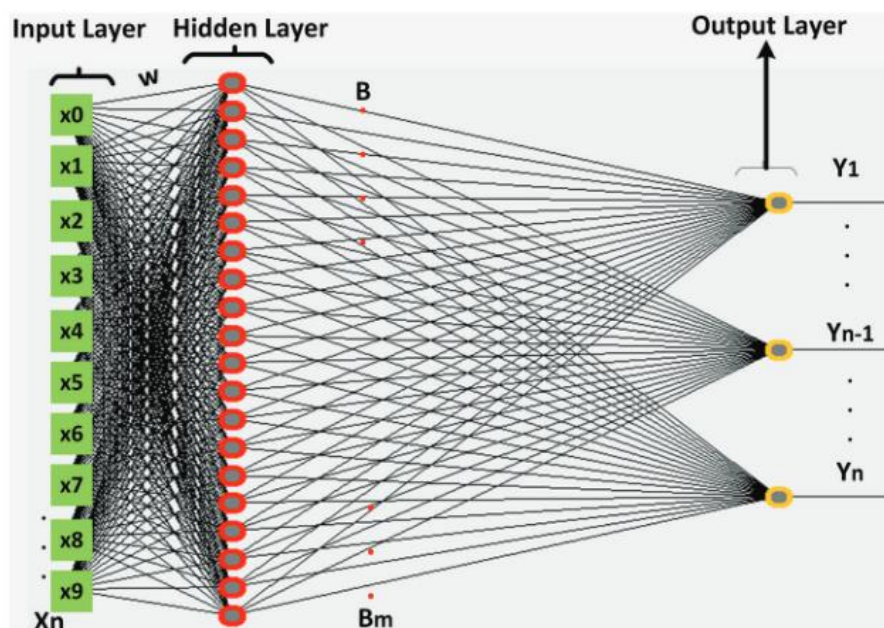
Αφού η ακατέργαστη εικόνα μετατραπεί σε εικόνα επιπέδου γκρι, εκτελείται η μέθοδος ιστογράμματος. Στην εικόνα παρακάτω παρουσιάζεται μια περίληψη της μεθόδου ιστογράμματος στις εικόνες από το σύνολο δεδομένων μαρμάρων που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 24: Επίδειξη διαδικασίας ιστογράμματος χρησιμοποιώντας δείγμα εικόνας μαρμάρου.

## 8.5 Η Φάση της Ταξινόμησης

Η δομή ταξινομητή ELM (εικόνα 25) που βασίζεται στη προηγμένη μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση του συνόλου δεδομένων εισόδου που λαμβάνεται από το στάδιο εξαγωγής χαρακτηριστικών. Προκειμένου να αξιολογηθεί αποτελεσματικά η μέθοδος, αναλύθηκαν επίσης τα αποτελέσματα των δομών ταξινομητών DT, ANN και SVM, οι οποίες συγκαταλέγονται μεταξύ των πλέον προτιμώμενων παραδοσιακών μεθόδων σε πολλούς τομείς.

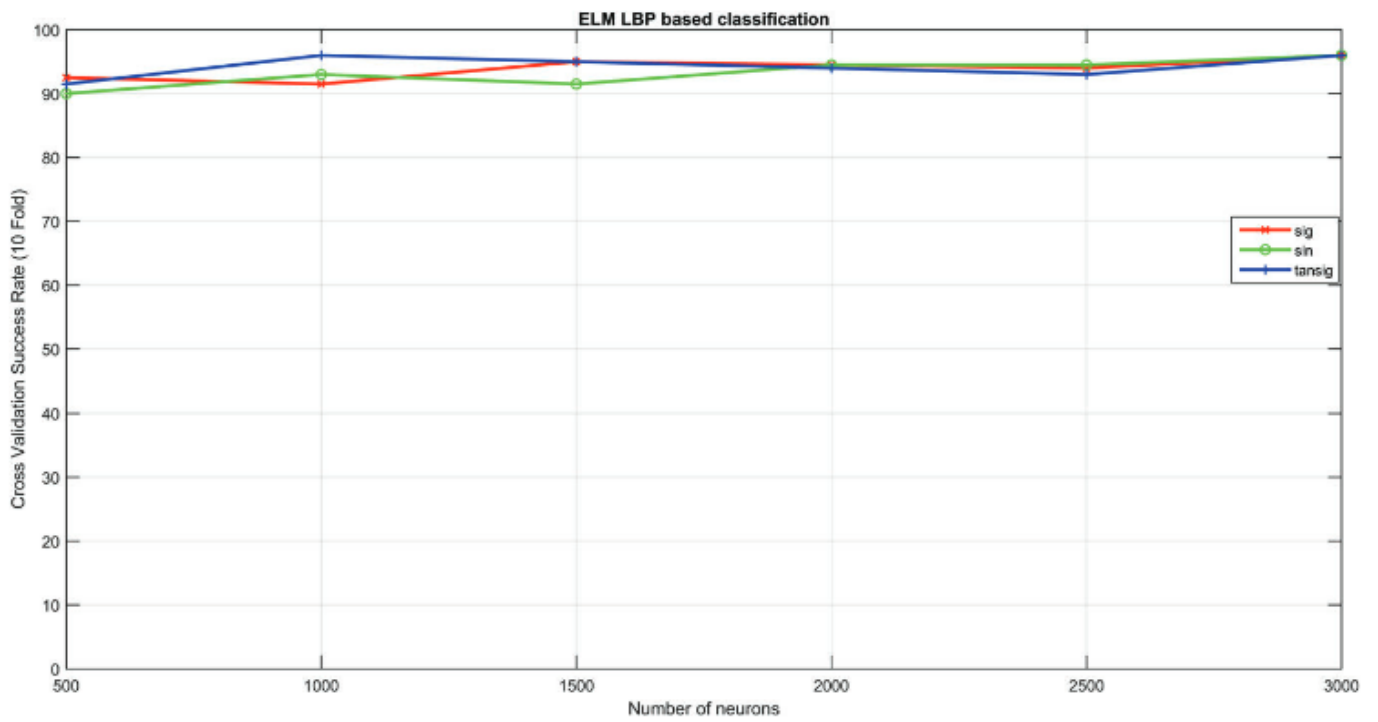


Εικόνα 25: Αρχιτεκτονική ELM.

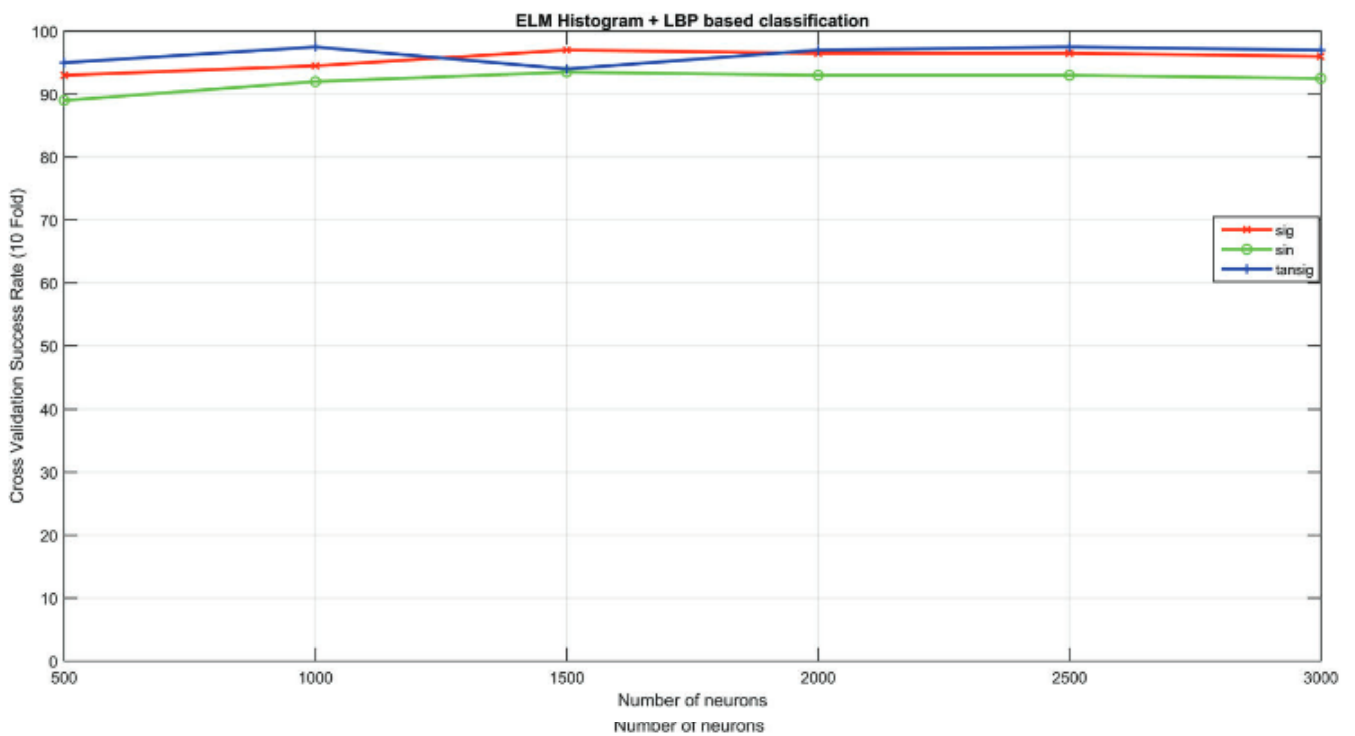
Οι επιδόσεις ταξινόμησης των επιλεγμένων αλγορίθμων ποικίλλουν ανάλογα με τις καθορισμένες παραμέτρους του καθενός. Στη φάση δοκιμής της μελέτης, οι ταξινομητές ELM, DT, ANN και SVM εκπαιδεύονται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας σύνολα χαρακτηριστικών εκπαίδευσης με βάση το LBP και το ιστόγραμμα.

Η συνάρτηση ενεργοποίησης και ο αριθμός των νευρώνων του κρυφού στρώματος στον ELM είναι παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της ταξινόμησης. Τα γραφήματα απόδοσης της ταξινόμησης με δεκαπλό cross-validation σύμφωνα με τη συνάρτηση ενεργοποίησης και τη μεταβολή του αριθμού των νευρώνων δίνονται στα παρακάτω γραφήματα. Τα γραφήματα αποτελεσμάτων απεικονίζονται για τα σύνολα χαρακτηριστικών LBP, Histogram και Histogram+LBP, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στους πίνακες 4,5 και 6, ο υψηλότερος δείκτης απόδοσης διασταυρούμενης επικύρωσης επιτυγχάνεται με τη μέθοδο ELM με βάση το ιστόγραμμα +LBP με 97,5% (το μοντέλο χρησιμοποιεί τη συνάρτηση ενεργοποίησης "tansig"). Ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων, ο χρόνος επεξεργασίας μεταβάλλεται γραμμικά. Τα πειράματα της μεθόδου ELM αποκαλύπτουν επίσης μια λεπτομερή ανάλυση του μοντέλου όσον αφορά τον αριθμό των νευρώνων και τη μεταβολή της συνάρτησης ενεργοποίησης.



Πίνακας 4: ELM: απόδοση διασταυρούμενης επικύρωσης ταξινόμησης LBP



Πίνακας 5: ELM: απόδοση ταξινόμησης με ιστογράμματα διασταυρούμενης επικύρωσης.

Παρακάτω παρέχεται πίνακας (πίνακας 7) σύγκρισης και των κλασικών μεθόδων που έχουμε σήμερα για την αναγνώριση και ταξινόμηση μαρμάρων, καθώς φαίνεται η επιτυχία της ταξινόμησης με ELM σε σχέση με τις άλλες:

Reference	Classifier	Average performance values
3	K-Means	76.5%
4	ANN	75.2%
5	ANN	93.3%
31	ANN	92%
34	SVM	75%
<b>OURS</b>	<b>ELM</b>	<b>97.5%</b>

Πίνακας 6: Σύγκριση των επιδόσεων ταξινόμησης με άλλες βιβλιογραφικές μελέτες.

Όπως φαίνεται, το σύνολο δεδομένων εισόδου που προκύπτει από το συνδυασμό των χαρακτηριστικών των Ιστογραμμάτων και LBP παράγει την υψηλότερη απόδοση με το μοντέλο που βασίζεται στην ELM. Η τιμή απόδοσης, η οποία είναι υψηλότερη από την αναφερόμενη βιβλιογραφία, παράγεται από το προτεινόμενο μοντέλο ELM. Το σύνολο χαρακτηριστικών Histogram + LBP συμβάλλει στην επιτευχθείσα απόδοση ταξινόμησης. Παρόλο που το μοντέλο ANN πιάνει την απόδοση του ELM, το γνωστό υπολογιστικό του κόστος και η επαναληπτική διαδικασία το καθιστούν μειονεκτικό για την εφαρμογή ταξινόμησης μαρμάρων. Το μοντέλο ELM με σύνολο χαρακτηριστικών LBP + Histogram είναι το μοντέλο που επισημαίνεται για τους ειδικούς σχετικά με την ταξινόμηση μαρμάρων.

## 8.6 Συμπεράσματα Χρήσης Ιστογραμμάτων και Προηγμένης Μηχανικής Μάθησης

Στη βιομηχανία, η διαδικασία ταξινόμησης μαρμάρων με βάση την απόφαση ενός εμπειρογνώμονα είναι μια υποκειμενική διαδικασία. Το γεγονός ότι η διαδικασία ταξινόμησης είναι ανθρώπινης προέλευσης, μπορεί να προκαλέσει απώλειες σε χρόνο παραγωγής και οικονομικές παραμέτρους. Το ταξινομημένο, επεξεργασμένο, εξειδικευμένο μάρμαρο παρέχει υψηλότερο κέρδος από το μάρμαρο το οποίο είναι ακόμα σε μορφή μπλοκ.

Σε περίπτωση λανθασμένης ταξινόμησης μαρμάρων, μπορεί να ζημιωθεί η επιχείρηση στις εγχώριες πωλήσεις και να ζημιωθεί η φήμη του κλάδου των χωρών στις εξαγωγές. Για όλα αυτά τα ζητήματα, η υποκειμενική εφαρμογή της διαδικασίας

ταξινόμησης μαρμάρων που βασίζεται σε ανθρώπινες αποφάσεις θα πρέπει να μετατραπεί σε μια δομή που βασίζεται σε μηχανική εκμάθηση. Εδώ προτείνεται μια έξυπνη μέθοδος για την ταξινόμηση εικόνων μαρμάρων που συλλέγονται από το βιομηχανικό πεδίο. Για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση ταξινόμησης, εφαρμόζονται μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών με βάση το ιστόγραμμα και την LBP στο σύνολο εικόνων για το σχεδιασμό του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης. Ο ταξινομητής της μελέτης είναι ο ELM με την εξαιρετικά γρήγορη διαδικασία γενίκευσης. Το μοντέλο το οποίο εκτελεί αυτόματη διαδικασία ταξινόμησης μαρμάρων, επιτυγχάνει τιμή απόδοσης 97,5% με δεκαπλό cross-validation. Η τιμή απόδοσης μπορεί να αυξηθεί με τον εμπλουτισμό του συνόλου δεδομένων. Το μοντέλο είναι κατάλληλο για τις ενσωματωμένες συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν στο πεδίο με την ελαφριά δομή του.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>: ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

### 9.1 Παραγωγή και διαχείριση απορριμμάτων

Ένα από τα πράγματα που απασχολούν πολύ τον κλάδο του μαρμάρου καθώς και της εξόρυξης όλων των φυσικών πετρωμάτων, είναι ότι παράγουν πολύ μεγάλες ποσότητες αποβλήτων. Πολλές φορές η παραγωγή αυτή ισούται και με το 95% του εξορισμένου πετρώματος που έχουμε.

Τα απόβλητα αυτά, παρόλο που έχουν την ίδια υλική ουσία, καθώς έχουν αποσυντεθεί και πολλές μεταφερθεί στον χώρο του λατομείου, δεν βρίσκονται στην ίδια φυσική κατάσταση. Ο όγκος και κατά συνέπεια η επιφάνεια που απαιτείται για τη διάθεση των αποβλήτων αυξάνεται με την μείωση του μεγέθους και των σωματιδίων και έτσι τα απόβλητα καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του λατομείου, τα απόβλητα είναι απαραίτητο να συσσωρεύονται σε μεγάλες εκτάσεις, επειδή δεν είναι πρακτικό να επιστρέφουν πίσω στο λατομείο. Αυτό προκαλεί τη δημιουργία τεράστιων χωματερών, οι οποίες δεν είναι οπτικά ελκυστικές. Μια τεχνικά ορθή διάθεση, εάν το υλικό δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές, πρέπει να προβλεφθεί, να προγραμματιστεί και να υλοποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψη τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα και τη σταδιακή αποκατάσταση του περιβάλλοντος και του τοπίου.

Τα λεπτόκοκκα υπολείμματα που προκύπτουν από τις εργασίες κοπής και στίλβωσης μπορούν να ελεγχθούν με τη χρήση λιμνών συγκράτησης και δεξαμενών καθίζησης, όπου διαχωρίζονται από το νερό, προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν.

### 9.2 Αξιοποίηση Απορριμμάτων και Υποπροϊόντων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα λατομεία παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη κατάσταση όσον αφορά τόσο τη φύση των αποβλήτων όσο και τις τεράστιες ποσότητες του υλικού αυτού σε σχέση με τη συνολική παραγωγή. Το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων έχει ορυκτολογική σύσταση και χημικές ιδιότητες ίδιες με εκείνες του χρήσιμου πετρώματος- κατά συνέπεια, η διάκριση μεταξύ "εμπορεύσιμου προϊόντος" και "αποβλήτων" παρουσιάζει αξιοσημείωτο βαθμό ελαστικότητας, ανάλογα με τις διάφορες χρήσεις και τις πιθανές επαναχρησιμοποιήσεις.

Από μια ευρύτερη οπτική γωνία, κατάλληλη για την πολιτική της βιώσιμης ανάπτυξης, φαίνεται ότι είναι πιο βολικό να αναφερόμαστε στη διαχείριση των αποβλήτων με όρους "επεξεργασίας" παρά "διάθεσης", προκειμένου να ευνοήσουμε μια όσο το δυνατόν πιο εκτεταμένη ανάκτηση. Επιπλέον, η αξιοποίηση των αποβλήτων μαρμάρου θα συμβάλει ουσιαστικά στην ανάκτηση σημαντικής οικονομικής αξίας για το λατομείο.

Από τεχνική άποψη, μπορούν να βρεθούν ορισμένες χρήσεις που θα επιτρέψουν τον επαναπροσδιορισμό των αποβλήτων ως "υποπροϊόντα" ή "συμπροϊόντα" για όλους σχεδόν τους τύπους αποβλήτων λατομείου. Ωστόσο, η βασική προϋπόθεση για την ορθή υλοποίηση αυτής της τεχνικής δυνατότητας με οικονομικά αποδεκτά αποτελέσματα είναι η πρωταρχική επιλογή των αποβλήτων κατά την παραγωγή τους σε συνδυασμό με την αποτελεσματική οργάνωση της διάθεσής τους, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος χειρισμού και μεταφοράς.

### 9.3 Παραγωγή σειριακών προϊόντων και προϊόντων χαμηλής τιμής

Ελαττωματικοί ή "τρίτης επιλογής" μπλοκ υλικού χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σειριακών προϊόντων και προϊόντων χαμηλής τιμής, για εξωτερικά δάπεδα, αστική επίπλωση κ.λπ. Τα μπλοκ που δεν είναι πρώτης ποιότητας μπορούν να αποθηκευτούν και στη συνέχεια να υποστούν κερδοφόρα επεξεργασία με την ευκαιρία συχνών παραγγελιών που ζητούν γρήγορα μεγάλες ποσότητες χωρίς ποιοτικά πρότυπα αριστείας.

Οι άμορφοι όγκοι μεγάλου μεγέθους, όταν παρουσιάζουν τα κατάλληλα φυσικό-μηχανικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια ευρέως ως πέτρες οπλισμού, μειώνοντας την ανάγκη για άνοιγμα νέων λατομείων για το σκοπό αυτό. Οι περισσότεροι άμορφοι όγκοι γρανίτη (όγκος μεγαλύτερος από 0,2 m<sup>3</sup>) μπορούν να βρουν εφαρμογή στον τομέα αυτό, ενώ στην περίπτωση των μαρμάρων, άμορφοι όγκοι καλής ποιότητας μπορούν να πριονιστούν σε πλακάκια για επενδύσεις και δάπεδα.

Για μπλοκ χωρίς σχήμα μικρού μεγέθους (π.χ. με γραμμική διάσταση μικρότερη από 0,5 m), η καταλληλότερη επιλογή για επαναχρησιμοποίηση είναι η θραύση και η ταξινόμηση για την παραγωγή αδρανών υλικών. Αυτή η λύση ωστόσο, δεν είναι πάντοτε εφικτή.

### 9.4 Παραγωγή Πληρωτικών Υλικών

Για τα ασβεστολιθικά απόβλητα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε CaCO<sub>3</sub>, έχουν ήδη προταθεί διάφορες δυνατότητες ανακύκλωσης σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, καθιστώντας την επαναχρησιμοποίησή τους σαφώς πιο "επιθυμητή" σε σύγκριση με τα απόβλητα γρανίτη. Τα ασβεστολιθικά απορρίμματα μαρμάρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή αλεσμένου ανθρακικού ασβεστίου, ενός προϊόντος υψηλής προστιθέμενης αξίας, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως ιδίως από τη χημική βιομηχανία. Σύμφωνα με το DIN 559439, το πληρωτικό υλικό είναι μια ουσία που αποτελείται από σωματίδια τα οποία είναι σχεδόν αδιάλυτα στο μέσο εφαρμογής και χρησιμοποιούνται για τη μεγέθυνση του όγκου, την επίτευξη ή τη βελτίωση των τεχνικών ιδιοτήτων ή/και την επίδραση των οπτικών χαρακτηριστικών.

Ιστορικά, η προσθήκη ενός πληρωτικού υλικού αποσκοπούσε στη μείωση του κόστους κατασκευής ενός προϊόντος στο οποίο προστίθετο. Ωστόσο, σταδιακά αναγνωρίστηκε ότι η προσθήκη τέτοιων ουσιών μπορούσε να βελτιώσει άλλες ιδιότητες του τελικού

προϊόντος και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και ο όρος λειτουργικό πληρωτικό υλικό.

## 9.5 Χρήσεις ανθρακικών αλάτων

Οι πιθανές χρήσεις των ανθρακικών αλάτων που λαμβάνονται από την επεξεργασία των απορριμμάτων μαρμάρου περιλαμβάνουν τους ακόλουθους τομείς: παραγωγή τσιμέντου, παραγωγή χαρτιού, παραγωγή γυαλιού, στον παραγωγικό κύκλο των υδατοχρωμάτων, στη χημική βιομηχανία, στην παραγωγή λιπασμάτων και βελτιωτικών ουσιών για τη γεωργία, στην αποθείωση των καυσαερίων των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, κ.λπ.

## 9.6 Εισαγωγή στη χρήση Μαρμαρόσκονης

Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι ένας από τους σημαντικότερους τομείς που προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η παραγωγή τσιμέντου απαιτεί τεράστιες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, οι οποίες εκπέμπονται με τη μορφή θερμότητας, θορύβου και καυσίμων όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η εξόρυξη άμμου από τον πυθμένα ποταμού ή ωκεανού και μεγάλων ανοικτών αμμοληπιών, οδηγεί σε φυσική καταστροφή του περιβάλλοντος που διαταράσσει τον βιότοπο των υδρόβιων ζώων και των μικροοργανισμών. Έτσι, μελετώνται τα πλεονεκτήματα των διαφόρων βιώσιμων υλικών για την αντικατάσταση του τσιμέντου και της άμμου με σκοπό τη μείωση της απόρριψης διαφόρων προϊόντων στο περιβάλλον. Η σκόνη μαρμάρου είναι ένα τέτοιο προϊόν που χρησιμοποιείται για την υγειονομική ταφή και προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Παρουσιάζεται λοιπόν μια ανασκόπηση σχετικά με τη χρήση της μαρμαρόσκονης ως ανανεώσιμου υλικού στην κατασκευαστική βιομηχανία. Παρακάτω αναλύεται η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος με τη χρήση διαφορετικών ποσοστών μαρμαρόσκονης ως υλικού πλήρωσης. Η ανασκόπηση παρατηρεί μια αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, με την προσθήκη μαρμαρόσκονης. Παρατηρούνται επίσης συγκρίσεις με βάση τις διαφορετικές τιμές της θλιπτικής αντοχής μη ταυτόσημων ποιοτήτων σκυροδέματος και κονιάματος με διαφορετικές αναλογίες νερού-τσιμέντου. Υπογραμμίζεται επίσης η αυξημένη ανθεκτικότητα και ανάλυση κόστους του σκυροδέματος με μαρμαρόσκονη. Συμπεραίνεται ότι το κόστος παραγωγής μειώνεται ανάλογα με το ποσοστό της μαρμαρόσκονης που χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του τσιμέντου.

## 9.7 Εισαγωγή στη Χρήση Μαρμάρου στο Σκυρόδεμα



Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα και αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο για την ανάπτυξη της παγκόσμιας υποδομής. Περιλαμβάνει τρία συστατικά, δηλαδή νερό, αδρανή που αποτελούνται από χονδρόκοκκα αδρανή (ΧΑ) και λεπτόκοκκα αδρανή και τσιμέντο. Το τσιμέντο σε μορφή σκόνης χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό όταν αναμιγνύεται με το νερό και τα αδρανή. Ανατρέχοντας στην ιστορία του σκυροδέματος, τα πρώτα αρχεία δείχνουν ότι οι Ρωμαίοι (που κατάγονται από την Ευρώπη) χρησιμοποίησαν το σκυρόδεμα αυστηρά κατά την περίοδο 300 π.Χ.-476 μ.Χ. (Moore, D. (1995) Το περίφημο ιστορικό μνημείο Κολοσσαίο στη Ρώμη κατασκευάστηκε με σκυρόδεμα. Ένα άλλο ιστορικό μνημείο που ονομάζεται Πάνθεον είναι γνωστό για τον μεγαλύτερο θόλο από άοπλο σκυρόδεμα στον κόσμο. Το σκυρόδεμα ήταν ένα μοναδικό και προηγμένο υλικό για τους Ρωμαίους. Σκληραίνεται γρήγορα σε μια άκαμπτη μορφή, με καλή αντοχή σε θλίψη, γεγονός που έλυσε προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι κατασκευαστές σε παρόμοιες κατασκευές που χρησιμοποιούσαν τούβλα ή πέτρα ως δομικά υλικά.

Ωστόσο, καθώς δεν χρησιμοποιούνταν οπλισμός, το σκυρόδεμα είχε αντοχή σε εφελκυσμό πολύ μικρότερη από το σημερινό οπλισμένο σκυρόδεμα. Μετά τη λήξη της ρωμαϊκής κυριαρχίας, η χρήση του σκυροδέματος δεν παρατηρήθηκε μέχρι την επαναστατική αλλαγή στην τεχνολογία του σκυροδέματος. Ο Joseph Aspedin το 1824 ανέπτυξε τη μέθοδο παραγωγής τσιμέντου Πόρτλαντ και το 1849 εφηύρε το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο αποτέλεσε το μεγαλύτερο βήμα στη σύγχρονη τεχνολογία σκυροδέματος. (Chiemela *et al.*, 2014) Η παγκόσμια χρήση του σκυροδέματος στις κατασκευές είναι διπλάσια από το σύνολο όλων των διαφορετικών δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται. Σήμερα το σκυρόδεμα είναι το υλικό που καταναλώνεται περισσότερο, με τρεις τόνους ετησίως για κάθε άτομο στον κόσμο. (Chiemela *et al.*, 2014)

Το απλό σκυρόδεμα είναι καλό σε θλίψη, αλλά αδύναμο σε εφελκυσμό, με πολύ περιορισμένη ολκιμότητα και μικρή αντίσταση στη ρηγμάτωση. Η παραγωγή σκυροδέματος λέγεται ότι ευθύνεται για το 8% του παγκόσμιου διοξειδίου του άνθρακα, με το τσιμέντο Πόρτλαντ να είναι ο κύριος συντελεστής. (Anwar *et al.*, 2015) , (Jang and Lee, 2016) Το τσιμέντο ή ιδίως το τσιμέντο Πόρτλαντ στο σκυρόδεμα, απελευθερώνει σκόνη σκυροδέματος κατά την κατεδάφιση κτιρίων ή από τη δράση φυσικών καταστροφών, η οποία αποτελεί σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης. (Woolley and Kimmins, 2003) Οι εργαζόμενοι που κόβουν και αλέθουν ή γυαλίζουν το σκυρόδεμα κινδυνεύουν να εισπνεύσουν διοξείδιο του πυριτίου που μεταφέρεται στον αέρα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει πυριτίαση μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα. (Ergün, 2011) Ως εκ τούτου μια λύση για τη μερική αντικατάσταση του τσιμέντου μπορεί να μειώσει την επίδρασή του. Παρακάτω διερευνάται και εξετάζεται ένα βιώσιμο φιλικό προς το περιβάλλον υλικό μαρμαρόσκονης.

## 9.8 Χρήση Μαρμαρόσκονης

Από την αρχαιότητα, το μάρμαρο χρησιμοποιείται ευρέως ως δομικό υλικό. Στην πράξη, τα απόβλητα μαρμάρου που παράγονται ως παραπροϊόντα, είναι ένα ζωτικής σημασίας υλικό που απαιτεί κατάλληλη περιβαλλοντική διάθεση, αλλιώς προκαλεί

προβλήματα υγειονομικής (André et al., 2014, 389–396). Επιπλέον, η ανακύκλωση των αποβλήτων που δεν διαχειρίζεται σωστά αποτελεί σπατάλη. (Desai, 2018, 441–448) Κατά τη διαδικασία κοπής, παράγεται μεγάλη ποσότητα σκόνης (Rana, Kalla and Csetenyi, 2015, 304-311) Ως αποτέλεσμα, σχεδόν το 25% του βάρους του μαρμάρου μειώνεται και μετατρέπεται σε απόβλητα μαρμαρόσκονης (AM). Αυτό προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Η μαρμαρόσκονη (ΜΣ) αποτελείται κυρίως από οξείδια του ασβεστίου, του μαγνησίου, του αργιλίου, του πυριτίου και του σιδήρου. Οι ενώσεις αυτές είναι επικίνδυνες για τους εργαζόμενους που εργάζονται καθημερινά στη βιομηχανία μαρμάρου. Οι εργάτες σμιλεύουν την πέτρα του μαρμάρου με πολλά μηχανικά μέσα, παράγοντας έτσι μαρμαρόσκονη. Αυτή η σκόνη όταν εισπνέεται προκαλεί με την πάροδο του χρόνου βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα. Η παρατεταμένη επίδραση προκαλεί πυριτίαση, η οποία καταστρέφει τα κύτταρα των πνευμόνων και οδηγεί επίσης σε κίνδυνο φυματίωσης. Η λείανση και η στίλβωση της μαρμαρόσκονης μπορεί να προκαλέσει έντονο ερεθισμό των ματιών, ενώ η έκθεση της στο δέρμα μπορεί να οδηγήσει σε μια ασθένεια που ονομάζεται σκληρόδερμα, η οποία είναι μια σπάνια λοίμωξη που προκαλεί σκλήρυνση και σύσφιξη του δέρματος και των συνδετικών ιστών.

## 9.9 Αντοχή Σκυροδέματος με Μαρμαρόσκονη

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Μελέτη του Demirel (Demirel, 2010, 1372-1380) στην Τουρκία με αντικατάσταση λεπτόκοκκης άμμου με σωματίδια μικρότερα από 0,25 mm δείχνει μείωση του πορώδους. Το πορώδες μειώνεται στο σκυρόδεμα καθώς το συνδετικό υλικό (δηλαδή η ψιλή άμμος) αντικαθίσταται τώρα με μαρμαρόσκονη. Το μειωμένο πορώδες αποφεύγει την αύξηση της διαστολής του σκυροδέματος βελτιώνοντας έτσι την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

## 9.10 Υπολογισμός Κόστους

Η αξιολόγηση του κόστους παρέχει μια εικόνα στους ερευνητές. Για πρακτικούς σκοπούς, το κόστος παραγωγής του σκυροδέματος πρέπει να είναι εφικτό και προσιτό, καθώς το αυξημένο κόστος του αναμεμιγμένου σκυροδέματος MD θα μπορούσε να προκαλέσει οικονομικά προβλήματα για μια κατασκευαστική εταιρεία. Πραγματοποιείται ανάλυση κόστους και σύγκριση μεταξύ των δύο μελετών με γραφική αναπαράσταση. Υπολογίζετε ότι το κόστος σκυροδέματος ανά κυβικό μέτρο για κάθε αύξηση 10% στην αντικατάσταση του τσιμέντου. Με την αντικατάσταση 50% τσιμέντου στο σκυρόδεμα, το κόστος μειώνεται δραστικά κατά 35,9%. Εφόσον είναι εφικτή η προσθήκη 10% απορρίμματος μαρμαρόσκονης στο σκυρόδεμα, η μείωση του κόστους είναι 7,18%, γεγονός που εξοικονομεί τεράστιο κεφάλαιο σε κάθε κατασκευαστικό έργο.

Όταν η άμμος αντικαταστάθηκε με σκυροδέμα, η πλειονότητα των μελετών δείχνει ότι η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος αυξάνεται με την προσθήκη μαρμαρόσκονης μέχρι 50% και στη συνέχεια η προσθήκη περισσότερης ακόμα μαρμαρόσκονης προκαλεί μείωση της αντοχής σε θλίψη. Ορισμένες μελέτες διεξήχθησαν μόνο μέχρι 10-15% αντικατάσταση της άμμου, όπου παρατηρήθηκε συνδυασμός μικρότερης αύξησης και μικρότερης μείωσης της αντοχής. Το πορώδες του σκυροδέματος μειώνεται με την αντικατάσταση της άμμου. Έτσι, βελτιώνεται η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και παρέχεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο σκυροδέμα.

## 9.11 Περιβαλλοντικά Συμπεράσματα

Ένας τόνος σκυροδέματος με αποτύπωμα άνθρακα (εκπομπές CO<sub>2</sub>) 410 kg/m<sup>3</sup> μειώνεται σε 350 kg/m<sup>3</sup> με την αντικατάσταση 15% μαρμαρόσκονης στο σκυροδέμα. Η παραγωγή τσιμέντου απαιτεί ενέργεια 1,18GJ/τόνο, ενώ ένα σκυροδέμα με 15% με αντικατάσταση μαρμαρόσκονης έχει 1,05% λιγότερη χρήση, η οποία είναι μια τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας.

Ως μηχανικοί θα πρέπει επίσης να ενδιαφερόμαστε για το περιβάλλον. Οι φυσικοί πόροι άμμου διατηρούνται και χρησιμοποιούνται απόβλητα προϊόντα μαρμαρόσκονής τα οποία λύνουν τα προβλήματα υγειονομικής ταφής, οπότε πρόκειται για ένα προϊόν φιλικό προς το περιβάλλον. Σε σύγκριση με το απλό τσιμεντένιο σκυροδέμα, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του σκυροδέματος με απόρριμμα μαρμαρόσκονης παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα.

## 9.12 Χρήση Μαρμαρόσκονης και PLA σε 3D Printing

Τα τεχνικά υλικά διαδραματίζουν εξέχοντα ρόλο στον σύγχρονο πολιτισμό. Με την αυξανόμενη ευαισθητοποίηση της κοινωνίας υπάρχει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση υλικών που έχουν παρασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη και τις περιβαλλοντικές απόψεις. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί μεγάλος όγκος βιβλιογραφίας σχετικά με την παρασκευή νέων υλικών με στόχο την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης. Η βιωσιμότητα καλύπτει πολλές πτυχές στον τομέα της μηχανικής υλικών, συμπεριλαμβανομένης της παρασκευής φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, (Siracusa *et al.*, 2008) της προώθησης των διαδικασιών αποικοδόμησης των υλικών (ιδίως για τα πολυμερή) και της δυνατότητας ανακύκλωσης των απορριπτόμενων υλικών.

Το μάρμαρο είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, ιδίως στον τομέα της πολιτικής μηχανικής. Με μερίδιο αγοράς περίπου 50% θεωρείται ως το φυσικό πέτρωμα που χρησιμοποιείται περισσότερο σε όλο τον κόσμο. (Kore and Vyas, 2016)

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες υπάρχει ένα συνεχώς αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη βιοπολυμερών προκειμένου να αντικαταστήσουν τα λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον συνθετικά πλαστικά. Μεταξύ των διαφόρων

εμπορικά διαθέσιμων πολυμερών βιολογικής προέλευσης το πιο υποσχόμενο είναι προφανώς το PLA. Το PLA είναι ένας βιοαποικοδομήσιμος πολυεστέρας που παράγεται κυρίως με χημική σύνθεση ή μέσω της ζύμωσης αγροτικών προϊόντων πλούσιων σε άμυλο, όπως ζαχαρότευτλα, ζαχαροκάλαμα, καλαμπόκι, σιτάρι και πολλά άλλα.

Στο παρελθόν δεν υπήρχαν πολλές μελέτες για την διερεύνηση και τη δυνατότητα εφαρμογής των αποβλήτων MD ως πληρωτικό υλικό για βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή. Πραγματοποιήθηκαν έρευνες που αποσκοπούν στην παρασκευή σύνθετων υλικών με βάση PLA και MD (0-20 wt%) μέσω της σύνθεσης τήγματος. (Lendvai *et al.*, 2021) Οι σχέσεις δομής-ιδιοτήτων αναλύθηκαν με βάση μηχανικές, μορφολογικές, θερμικές μετρήσεις και μετρήσεις φθοράς ολίσθησης. Οι μηχανικές ιδιότητες μελετήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης. Η πυκνότητα των δοκιμών και το κλάσμα των κενών προσδιορίστηκαν με τη χρήση της τυπικής τεχνικής εκτόπισης νερού. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές φθοράς ολίσθησης προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της MD στις ιδιότητες αντίστασης στη φθορά του PLA. Η μορφολογία της επιφάνειας των δειγμάτων χαρακτηρίστηκε με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Η κινητική κρυστάλλωσης των δειγμάτων αναλύθηκε με μέτρηση θερμοδομετρίας διαφορικής σάρωσης (DSC).

### 9.13 Μελέτες και αποτελέσματα στη χρήση MD και PLA σε 3D Printers

Η παρουσία των σωματιδίων μαρμάρου επηρέασε προφανώς τη μηχανική συμπεριφορά της πολυμερικής δομής. Γενικά, οι τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό μειώθηκαν ελαφρώς με τη παρουσία MD. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, όλα τα σύνθετα PLA/MD υπερτερούν έναντι του καθαρού δείγματος PLA. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται συνήθως στο σχηματισμό άκαμπτων διεπιφανειών εντός της πολυμερικής δομής παρουσία μικρού μεγέθους ορυκτών προσθέτων υψηλής ακαμψίας.

Σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη του PLA, φαίνεται ότι μπορεί να ενισχυθεί σε κάποιο βαθμό εάν η κατάλληλη ποσότητα MD εισαχθεί στο σύστημα. Επίσης παρατηρείται μειωμένη φθορά στο σύνθετο υλικό PLA\_20MD η οποία φαίνεται να αποδίδεται στο γεγονός ότι το πληρωτικό υλικό καλύπτει τη μέγιστη περιοχή και φέρει το μέγιστο φορτίο κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, το οποίο προστατεύει τη μήτρα (matrix) από το γδάρισμα και την αποκόλληση και είχε ως αποτέλεσμα τη μειωμένη φθορά του σύνθετου υλικού.

### 9.14 Ενσωμάτωση Μαρμαρόσκονης σε PLA για βιομηχανική χρήση

Σήμερα, υπάρχει μια αυξανόμενη ποσότητα σκόνης που παράγεται κατά τη διαδικασία κοπής των μαρμαρίνων πάγκων. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει γενική λύση για το χειρισμό της MD, εγείρονται σοβαρές περιβαλλοντικές ανησυχίες. Η εξεύρεση κατάλληλων εφαρμογών για τη σκόνη αποτελεί μεγάλη πρόκληση.

Η δυνατότητα εφαρμογής του MD ως πληρωτικού υλικού σε πολυμερή σύνθετα υλικά είναι ένα πολύ μεγάλο βήμα στον κλάδο για την αξιοποίηση παραπροϊόντων μαρμάρου. Λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων επιλέχθηκε ως υλικό ένα βιοπολυμερές, το PLA. Οι συνήθεις θερμοπλαστικές τεχνικές, δηλαδή η εξώθηση και η χύτευση με έγχυση, εφαρμόστηκαν για την προετοιμασία κατάλληλων προδιαγραφών για τον χαρακτηρισμό των σύνθετων υλικών.

Με βάση δεδομένα που έχουμε από μελέτες για την εισαγωγή μαρμαρόσκονης σε PLA μπορεί να θεωρηθεί ότι η ενσωμάτωση της έχει μεγάλη σημασία για βιομηχανική χρήση. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες είτε βελτιώθηκαν είτε μειώθηκαν ελάχιστα. Κατά συνέπεια, το πλεονέκτημα της χρήσης MD σε σύνθετα υλικά με βάση το PLA είναι τριπλό. Πρώτον, δεδομένου ότι μια σημαντική ποσότητα PLA μπορεί να αντικατασταθεί από MD -που είναι ουσιαστικά δωρεάν- το κόστος του βιοπολυμερούς μπορεί να μειωθεί σημαντικά, γεγονός που θα μπορούσε να βοηθήσει στην παγκόσμια εξάπλωσή του. Δεύτερον, θα μπορούσαν να μετριαστούν τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκαλούνται από τα απορρίμματα MD που απορρίπτονται. Και τρίτον, οι αυξημένες ιδιότητες του PLA που επιτυγχάνονται με την ενσωμάτωση σωματιδίων μαρμάρου θα μπορούσαν να αυξήσουν τα πιθανά πεδία εφαρμογής του.

## Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκαν νέες τεχνολογίες οι οποίες εφαρμόζονται σήμερα στον κλάδο του μαρμάρου και εξετάστηκαν τα οφέλη που έχουν για τον κλάδο.

Από την διερεύνηση που έγινε σε όλα τα κεφάλαια βλέπουμε πως οι νέες τεχνολογίες αυτές έχουν εισαχθεί για τα καλά στον κλάδο με πολλές καινοτομίες που μπορούν να βοηθήσουν σε όλα τα στάδια όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 9. Μέσα από την ανάλυση που έγινε για κάθε τεχνολογία, γίνεται μια εκτίμηση της χρησιμότητας και της αποδοτικότητας της κάθε μιας, σε κάθε κομμάτι στο οποίο επεμβαίνει.

*Τα Drone* στο μέτωπο, εμπλουτίζουν την έρευνα που γίνεται στην εκτίμηση αποθεμάτων η μεγάλων ασυνεχειών. Στο πρωταρχικό στάδιο της εκμετάλλευσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα που επιφέρει, αξιολογείται ως μια τεχνολογία εύκολα προσβάσιμη και απορροφήσιμη από τον κλάδο.

*Τα ραντάρ διείσδυσης στο έδαφος (GPR)* παρέχουν υψηλή ανάλυση του υπεδάφους όπου αυτή δεν είναι εφικτή με άλλες τεχνικές καθώς δίνουν και μια εκτίμηση των αποθεμάτων του κοιτάσματος σε ένα προκαταρκτικό στάδιο. Η τεχνολογία αυτή βοηθάει εντατικά στην καλύτερη χρήση του χρόνου του λατομείου και στην οργάνωση καθώς αυξάνει δραστικά και τον βαθμό απόληψης. Κρίνεται ως μια τεχνική η οποία είναι εύκολο να υιοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί σαν γνώμονας για την σωστή κοπή των πάγκων, κάνοντας έτσι τις ασυνέχειες ένα εργαλείο για εκμετάλλευση στο μέτωπο.

*Οι ψηφιακές πανοραμικές κάμερες γεώτρησης*, χρησιμοποιούνται ευρέως σε έργα εκμετάλλευσης καθώς παρέχουν μεγάλο όγκο εικόνων υψηλής ακρίβειας. Παρέχουν με ακρίβεια γεωλογικές πληροφορίες ειδικότερα των επιπέδων δομής του εδάφους. Σαν τεχνολογία η πανοραμική κάμερα είναι ικανή να παρατηρεί ταυτόχρονα 360 μοίρες. Είναι εύκολο να υιοθετηθεί σαν τεχνολογία στην μελέτη μας αλλά δυστυχώς προϋποθέτει την ύπαρξη γεώτρησης, που πολλές φορές δεν υφίσταται στο μέτωπο λόγω του μεγάλου κόστους.

*Η απομακρυσμένη παρακολούθηση με τη χρήση LiDAR και δορυφόρων* στην διαχείριση των λατομείων χρησιμοποιούνται ευρέως στην αξιολόγηση των φάσεων εξόρυξης και στην καλύτερη εκτίμηση των αποθεμάτων. Είναι εύκολο να υιοθετηθεί στο λατομείο καθώς ανανεώνεται οι εναέριες ορθοφωτογραφίες που αποκτώνται από τους δορυφόρους σε τριετή βάση, δίνοντας έτσι άλλο ένα εργαλείο εκτίμηση αποθεμάτων και εργασιών του λατομείου. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι η λήψη στερεοσκοπικών στοιχείων πρέπει να γίνει πιο κατάλληλη για την χρήση σε λατομεία με σύνθετη μορφολογία.

*Η αναγνώριση πλακών και προϊόντων μαρμάρου με την βοήθεια ετικετών R-FID* επιτρέπει την μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών του μαρμάρου και την πλήρη ιχνηλασιμότητα των προϊόντων μεταξύ άλλων καινοτομιών. Μέσω της βελτίωσης της ποιότητας των δεδομένων σε μια γραμμή παραγωγής εισάγεται η λειτουργική εξοικονόμηση και βελτιωμένη αποδοτικότητα προσφέροντας έτσι διαφάνεια και εμπιστοσύνη στους πελάτες και τους εταίρους για τα προϊόντα.

Λόγο του κόστους της εγκατάστασης είναι καλό να ενσωματώνεται στην παραγωγή από το στήσιμο του εργοστασίου, καθώς έτσι αποφέρει και περισσότερα πλεονεκτήματα. Αυτό παρέχει στον κλάδο μια εξαιρετικά καινοτόμα ιδέα η οποία εάν υλοποιηθεί από την αρχή, εξοικονομεί χρόνο σε πολλά στάδια μέχρι και το τέλος, το στάδιο επιλογής και αγοράς του προϊόντος από τον αγοραστή.

*Το σύστημα ταξινόμησης και αναγνώρισης μαρμάρων με την χρήση machine learning, LBP και Ιστογραμμάτων, έχει ως σκοπό την αυτοματοποίηση και την βελτίωση της σημερινής χειροκίνητης διαδικασίας ταξινόμησης μαρμάρων. Μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο καθώς και να μειώσει πάρα πολύ ή και εξαλείψει ανθρώπινα λάθη ταξινόμησης από εμπειρογνώμονες που συχνά βασίζονται σε προσωπικές αποφάσεις στον κλάδο. Σε περίπτωση λανθασμένης ταξινόμησης μαρμάρων, μπορεί να ζημιωθεί η επιχείρηση στις εγχώριες πωλήσεις και να ζημιωθεί η φήμη του κλάδου και οι εξαγωγές. Δυστυχώς και αυτή η τεχνολογία έχει μεγάλο κόστος εγκατάστασης αλλά αν υιοθετηθεί από την αρχή, το κόστος αυτό απορροφάται από την μεγάλη αποδοτικότητα της ταξινόμησης.*

*Η χρήση απορριμμάτων λατομείου μαρμάρου βοηθά στην εκμετάλλευση παραπροϊόντων που έχουμε στο μέτωπο, καθώς τα απορρίμματα σε ένα λατομείου μαρμάρου είναι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής, και έτσι δίνουμε καινοτόμες ιδέες και εφαρμογές σε άλλους τομείς με την ένταξη και την χρήση των παραπροϊόντων αυτών. Επιπλέον, η αξιοποίηση των απορριμμάτων μαρμάρου θα συμβάλει ουσιαστικά στην ανάκτηση σημαντικής οικονομικής αξίας για το λατομείο.*

Η αξιοποίηση απορριμμάτων έχει πολλά πλεονεκτήματα σε μεγάλο βαθμό και κυρίως τα μειονεκτήματα που συναντάμε περιορίζονται μόνο σε κάποιους τομείς όπου χρειάζεται κάποια πιθανή ακριβή εγκατάσταση αυξάνοντας το κόστος υλοποίησης.

*Χρήση απορριμμάτων λατομείου βλέπουμε στον κατασκευαστικό τομέα με τη χρήση μαρμαρόσκονης ως συνδετικό υλικό στο σκυρόδεμα, την παραγωγή αλεσμένου ανθρακικού ασβεστίου, ενός προϊόντος με υψηλή προστιθέμενη αξία, στην παραγωγή χαρτιού, γυαλιού, στην χημική βιομηχανία, στην παραγωγή λιπασμάτων και στην γεωργία, στην αποθείωση των καυσαερίων την ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, στην ναυοτεχνολογία αλλά και στην λειτουργία των 3D Printers όπου γίνεται χρήση μαρμαρόσκονης και PLA για την μείωση κόστους των βιοπολυμερών βοηθώντας έτσι και το περιβάλλον.*

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός Πίνακας Τεχνολογιών

<b>Τεχνολογία</b>	<b>Χρήση στη Παραγωγή</b>	<b>Επέμβαση στα στάδια λειτουργίας</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>DRONES</b>	<i>Μελέτη πριν την Εκμετάλλευση</i>	<i>Εκτίμηση κοιτάσματος- αύξηση βαθμού απόληψης</i>	<i>Πιθανοί περιορισμοί λόγω περιορισμού πτήσης</i>
<b>Ραντάρ Διείσδυσης στο Έδαφος (GRP)</b>	<i>Επέμβαση κατά την Εκμετάλλευση</i>	<i>Εκτίμηση κοιτάσματος- αύξηση βαθμού απόληψης</i>	<i>Προϋποθέτει γεώτρηση</i>
<b>Ψηφιακή Πανοραμική Κάμερα Γεώτρησης</b>	<i>Επέμβαση κατά την Εξόρυξη</i>	<i>Αύξηση βαθμού απόληψης</i>	<i>Προϋποθέτει γεώτρηση</i>
<b>Αναγνώριση Μαρμάρου με Ετικέτες R-FID</b>	<i>Διευκόλυνση γραμμής Παραγωγής εργοστασίου</i>	<i>Εξέλιξη Γραμμής Παραγωγής</i>	<i>Μεγάλο κόστος</i>
<b>Αναγνώριση Μαρμάρου με Machine Learning- Ιστογράμματα</b>	<i>Διευκόλυνση γραμμής Παραγωγής και Πώληση</i>	<i>Εξέλιξη Γραμμής Παραγωγής</i>	<i>Μεγάλο κόστος</i>
<b>Απομακρυσμένη Παρακολούθηση με τη Χρήση LiDAR και Δορυφόρου</b>	<i>Μελέτη κατά την Εκμετάλλευση</i>	<i>Εξέλιξη Γραμμής Παραγωγής</i>	<i>Εξέλιξη για λατομεία με συνθέτη μορφολογία</i>
<b>LiDAR και Τρισδιάστατη Εικονική Πραγματικότητα Ασυνεχειών</b>	<i>Επέμβαση κατά την Εξόρυξη Μαρμάρου</i>	<i>Εκτίμηση κοιτάσματος- αξιολόγηση εργασιών λατομείου</i>	<i>Κόστος, Απαίτηση εργασιών πεδίου πάραυτα</i>
<b>Παραπροϊόντα Μαρμάρου από τη Παραγωγή</b>	<i>Αξιοποίηση Παρα- προϊόντων Μαρμάρου</i>	<i>Χρήση σε πολλούς τομείς (Κατασκευαστικά, Γεωργία, Νανοτεχνολογία κ.α)</i>	<i>Μπορεί να απαιτήσει πρόσθετες εγκαταστάσεις - Κόστος</i>





## Βιβλιογραφία και Αναφορές

- Abellán, A. *et al.* (2014) ‘Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities’, *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1). Available at: <https://doi.org/10.1002/esp.3493>.
- Akkoyun, O. (2010) ‘An evaluation of image processing methods applied to marble quality classification’, in *ICCTD 2010 - 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development, Proceedings*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICCTD.2010.5646128>.
- André, A. *et al.* (2014) ‘Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste’, *Journal of Cleaner Production*, 65. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.037>.
- Anwar, A. *et al.* (2015) ‘Salvage of Ceramic Waste and Marble Dust for the Refinement of Sustainable Concrete’, *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET)*, 6.
- Assali, P. *et al.* (2014) ‘Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection’, *Journal of Structural Geology*, 66. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.014>.
- Barton, N. (1973) ‘Review of a new shear-strength criterion for rock joints’, *Engineering Geology*. Available at: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6).
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (2006) *Rock Mechanics for underground mining: Third edition*, *Rock Mechanics for underground mining: Third edition*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9>.
- Bristow, C.S. and Jol, H.M. (2003) ‘An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments’, *Geological Society Special Publication*, 211. Available at: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.01>.
- Chiemela, C. *et al.* (2014) ‘Comparing the Compressive Strengths of Concrete Made with River Sand and Quarry Dust as Fine Aggregates’, *International Letters of Natural Sciences*, 20. Available at: <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ilns.20.179>.
- Collins, L.D. (2018) ‘Terrestrial Lidar’, in *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0575>.
- Deere, D.U. and Miller, R.P. (1966) ‘Engineering classification and index properties for intact rock’, *Technical Report, Air Force Weapons Laboratory*, 1.
- Demirel, B. (2010) ‘The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete’, *International Journal of Physical Sciences*, 5(9).
- Denuwara, N., Majjala, J. and Hakovirta, M. (2019) ‘Sustainability benefits of RFID technology in the apparel industry’, *Sustainability (Switzerland)*. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11226477>.
- Desai, B.H. (2018) ‘14. United Nations Environment Program (UNEP)’, *Yearbook of International Environmental Law*, 29. Available at: <https://doi.org/10.1093/yiel/yvz038>.
- Dolgui, A. and Proth, J. –Marie (2008) ‘RFID TECHNOLOGY IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES’, *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2). Available at: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-kr-1001.00753>.

Ergün, A. (2011) 'Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete', *Construction and Building Materials*, 25(2). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>.

Finkenzeller, K. (2010) *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*. Available at: <https://doi.org/10.1002/9780470665121>.

Flores-de-Santiago, F. *et al.* (2020) 'Assessing the effect of flight altitude and overlap on orthoimage generation for UAV estimates of coastal wetlands', *Journal of Coastal Conservation*, 24(3). Available at: <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00753-9>.

Francioni, M. *et al.* (2014) 'A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area, Italy', *Engineering Geology*, 183. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.09.003>.

Giannino, F. and Leucci, G. (2021) 'GPR Surveying', in *Electromagnetic Methods in Geophysics*. Wiley, pp. 31–82. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119771012.ch3>.

Gladysz, B. *et al.* (2020) 'A method for an integrated sustainability assessment of rfid technology', *Resources*, 9(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/resources9090107>.

Goodman, R.E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics Second Edition, Practical Rock Mechanics*.

Haralick, R.M., Dinstein, I. and Shanmugam, K. (1973) 'Textural Features for Image Classification', *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(6). Available at: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.

Hoang, V.T. *et al.* (2017) 'LBP parameter tuning for texture analysis of lace images', in *IPAS 2016 - 2nd International Image Processing, Applications and Systems Conference*. Available at: <https://doi.org/10.1109/IPAS.2016.7880063>.

Huang, G. bin, Zhu, Q.Y. and Siew, C.K. (2006) 'Extreme learning machine: Theory and applications', *Neurocomputing*, 70(1–3). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126>.

Huang, X., Zhang, L. and Li, P. (2007) 'Classification and extraction of spatial features in urban areas using high-resolution multispectral imagery', *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(2). Available at: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.890540>.

Jang, J.G. and Lee, H.K. (2016) 'Microstructural densification and CO<sub>2</sub> uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement', *Cement and Concrete Research*, 82. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>.

Jol, H.M. (2008) *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.x0001-4>.

Kore, S.D. and Vyas, A.K. (2016) 'Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete', *Case Studies in Construction Materials*, 4. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.01.002>.

- Kumar, P.S.V.V.S.R. *et al.* (2019) 'Local ternary pattern alphabet shape features for stone texture classification', in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1906-8\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1906-8_44).
- Lendvai, L. *et al.* (2021) 'Utilization of Waste Marble Dust in Poly(Lactic Acid)-Based Biocomposites: Mechanical, Thermal and Wear Properties', *Journal of Polymers and the Environment*, 29(9). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02091-9>.
- Martínez, J. *et al.* (2017) 'Utilization of integrated geophysical techniques to delineate the extraction of mining bench of ornamental rocks (marble)', *Remote Sensing*, 9(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs9121322>.
- Rana, A., Kalla, P. and Csetenyi, L.J. (2015) 'Sustainable use of marble slurry in concrete', *Journal of Cleaner Production*, 94. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.053>.
- Rohizan, M.H. *et al.* (2021) 'Application of Photogrammetry Technique for quarry stockpile estimation', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/920/1/012040>.
- Salvini, R. *et al.* (2017) 'The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling', *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1). Available at: <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1199053>.
- Siracusa, V. *et al.* (2008) 'Biodegradable polymers for food packaging: a review', *Trends in Food Science and Technology*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>.
- Škiljo, M. *et al.* (2020) 'Analysis of passive RFID applicability in a retail store: What can we expect?', *Sensors (Switzerland)*, 20(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/s20072038>.
- Tucci, G. *et al.* (2019) 'Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying', *Remote Sensing*, 11(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11121471>.
- Turan, E., Ucar, F. and Dandil, B. (2021) 'A novel marble recognition system using extreme learning machine with LBP and histogram features', *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(21). Available at: <https://doi.org/10.1002/cpe.6428>.
- Wang, C. *et al.* (2017) 'The automatic interpretation of structural plane parameters in borehole camera images from drilling engineering', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 154, pp. 417–424. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2017.03.038>.
- Woolley, T. and Kimmins, S. (2003) *Green building handbook: Volume 2: A guide to building products and their impact on the environment*, *Green Building Handbook: Volume 2: A Guide to Building Products and their Impact on the Environment*. Available at: <https://doi.org/10.4324/9780203301715>.
- Zaini, M.S.I. *et al.* (2020) 'Granite Exploration by using Electrical Resistivity Imaging (ERI): A Case Study in Johor', *International Journal of Integrated Engineering*, 12(8). Available at: <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.08.032>.

[1] Σημειώσεις μαθήματος Μάρμαρα και Βιομηχανικά Ορυκτά

[2] Μάρμαρα και Βιομηχανικά Ορυκτά - Αποστολίδη