

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Εφαρμογή της Μεθόδου του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) για την Εκτίμηση της Ποιότητας σε Εξορυγμένα Τεμάχη Μαρμάρου»

ΑΡΙΑΝΝΑ ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΥ

Πτυχιούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Επιβλέπουσα:

Δρ. Ν. Διαμαντή,

Επιστημονικό & Διδακτικό Προσωπικό Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2024



ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΕ ΕΞΟΡΥΓΜΕΝΑ ΤΕΜΑΧΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ



ΑΡΙΑΝΝΑ ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΥ

Πτυχιούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GROUND PENETRATING RADAR – GPR) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΞΟΡΥΓΜΕΝΑ ΤΕΜΑΧΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.: ‘Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία’, με κατεύθυνση: ‘Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και Σεισμολογία’

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 29/01/2024

Τριμελής Συμβουλευτική & Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Νεκταρία Διαμαντή, Ε.ΔΙ.Π. Α.Π.Θ.: Επιβλέπουσα

Δρ. Γεώργιος Βαργεμέζης, Καθηγητής Α.Π.Θ.: Μέλος Τριμελούς Επιτροπής

Δρ. Παναγιώτης Τσούρλος, Καθηγητής Α.Π.Θ.: Μέλος Τριμελούς Επιτροπής

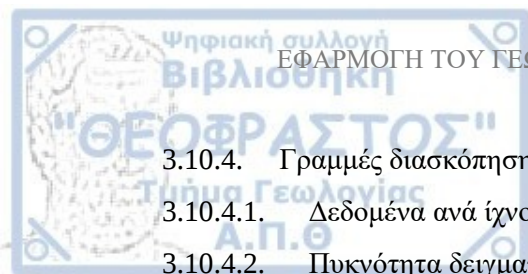
Βιβλιογραφική Αναφορά:

Κουφοπούλου Α., 2024. Εφαρμογή της Μεθόδου του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) για την Εκτίμηση της Ποιότητας σε Εξορυγμένα Τεμάχια Μαρμάρου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Α.Π.Θ.

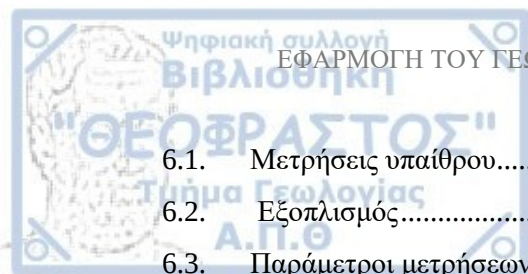


Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°	22
Εισαγωγή.....	22
1.1. Εφαρμοσμένη γεωφυσική.....	22
1.2. Αντικείμενο διατριβής.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°	27
Περιοχή Έρευνας.....	27
2.1. Εισαγωγή.....	27
2.2. Μάρμαρα.....	27
2.3. Λατομικός χώρος.....	28
2.4. Γεωλογία - Υδρογεωλογία.....	29
2.5. Hemarus Grey.....	31
2.5.1. Γενικά χαρακτηριστικά	33
2.5.2. Σύσταση.....	33
2.5.3. Φυσικές ιδιότητες	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°	36
Μέθοδος του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR).....	36
3.1. Ιστορική εξέλιξη.....	37
3.2. Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική (H/M) θεωρία.....	39
3.3. Αρχή λειτουργίας GPR.....	40
3.3.1. Καταστατικές εξισώσεις.....	41
3.4. Φυσικές ιδιότητες.....	42
3.4.1. Διηλεκτρική διαπερατότητα	43
3.4.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	44
3.4.3. Μαγνητική διαπερατότητα	45
3.5. Διεσδυτική ικανότητα	45
3.6. Ταχύτητα διάδοσης.....	47
3.7. Κατηγορίες GPR κυμάτων/ καταγραφών.....	49
3.8. Εξοπλισμός GPR	52
3.9.1. Κατηγορίες συστημάτων	54
3.10. Μετρήσεις υπαίθρου.....	56
3.10.1. Συχνότητα εκπομπής	58
3.10.2. Ολικός χρόνος καταγραφής.....	59
3.10.3. Διάστημα δειγματοληψίας.....	59



3.10.4.	Γραμμές διασκόπησης.....	60
3.10.4.1.	Δεδομένα ανά ίχνος.....	60
3.10.4.2.	Πυκνότητα δειγματοληψίας.....	61
3.10.5.	Ιδιότητες κεραίων.....	62
3.10.5.1.	Απόσταση κεραίων.....	63
3.11.	Διατάξεις λειτουργίας.....	63
3.11.1.	Μέθοδος σταθερής απόστασης πομπού - δέκτη.....	64
3.11.2.	Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (CMP).....	65
3.11.3.	Διάταξη ευρυγώνιας ανάκλασης και διάθλασης (WARR).....	66
3.11.4.	Μέθοδος τομογραφίας.....	67
3.12.	Εφαρμογές.....	67
3.13.	Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μεθόδου GPR.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°		71
Επεξεργασία & Απεικόνιση Δεδομένων GPR.....		71
4.1.	Συλλογή δεδομένων.....	72
4.2.	Προεργασία	72
4.3.	Βασική επεξεργασία.....	72
4.3.1.	Ενίσχυση σήματος.....	72
4.3.2.	Φίλτρα	75
4.4.	Ειδική επεξεργασία	76
4.4.1.	Αναλυτικό σήμα και μιγαδικά χαρακτηριστικά	76
4.4.2.	Διαδικασία αντιστροφής.....	77
4.4.3.	Φίλτρα ειδικής επεξεργασίας	78
4.5.	Απεικόνιση δεδομένων.....	80
4.5.1.	Μονοδιάστατα ίχνη	80
4.5.2.	Δισδιάστατη απεικόνιση.....	81
4.5.3.	Τρισδιάστατη απεικόνιση.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°		85
GPR & Ασυνέχειες Πετρωμάτων.....		85
5.1.	Εισαγωγή.....	85
5.2.	Χρήση σε λατομεία	85
5.3.	Χρήση σε τεμάχη μαρμάρου	86
5.4.	Παραδείγματα εφαρμογών	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°		89
Εφαρμογή GPR σε Τεμάχη Μαρμάρου.....		89



6.1.	Μετρήσεις υπαίθρου.....	90
6.2.	Εξοπλισμός.....	90
6.3.	Παράμετροι μετρήσεων.....	92
6.4.	Επεξεργασία δεδομένων.....	93
6.4.1.	Ταχύτητα Η/Μ κυμάτων στο μάρμαρο	96
6.5.	Εναλλακτικοί τρόποι μετρήσεων.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο		101
Αποτελέσματα 2D & 3D τομών		101
7.1.	Συμπαγή τεμάχη	101
7.2.	Ρωγματοωμένα τεμάχη.....	102
7.3.	Χρήση φελιζόλ	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο		109
Ανάπτυξη Αλγορίθμων.....		109
8.1.	Συνοπτική περιγραφή	109
8.1.1.	1 ^{ος} αλγόριθμος.....	110
8.1.2.	2 ^{ος} αλγόριθμος	114
8.1.3.	3 ^{ος} αλγόριθμος.....	116
8.1.4.	4 ^{ος} αλγόριθμος.....	119
8.1.5.	5 ^{ος} αλγόριθμος.....	121
8.1.6.	6 ^{ος} αλγόριθμος.....	123
8.1.7.	Συμπληρωματικός αλγόριθμος.....	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο		126
Αποτελέσματα Αλγοριθμικής Επεξεργασίας.....		126
9.1.	Αποτελέσματα Εφαρμογής Αλγορίθμων.....	126
9.1.1.	Μάρμαρα Hemarus Grey.....	129
9.1.2.	Γραμμές διασκόπησης.....	134
9.1.3.	Συστήματα GPR	138
9.1.4.	Χρήση φελιζόλ	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10ο		142
Συμπεράσματα & Σχόλια.....		142
10.1.	Γενικά συμπεράσματα.....	142
10.2.	Σχόλια και προτάσεις	146
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		148
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α': Αποτελέσματα - Πίνακες.....		155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β': Αποτελέσματα – Διαγράμματα κ.α.		160

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διαδικασία συγγραφής της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, διετελέσε μια πολύτιμη εμπειρία, τα ευεργετήματα της οποίας αποτελούν εφόδια για την μετέπειτα εξέλιξή μου. Δεδομένου, ότι ακόμα και το σύμπαν από κάπου προήλθε, υπακούοντας στο αξίωμα του αιτίου-αιτιατού, η προσπάθειά μου αυτή, δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή και τη βοήθεια συγκεκριμένων ανθρώπων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κάτωθι: Πρώτη από όλους, την κ. Νεκταρία Διαμαντή, η οποία ήταν η κινητήριος δύναμη στην ενασχόληση μου με τη μέθοδο του γεωραντάρ, επέβλεψε τη μεταπτυχιακή μου διατριβή, με συμβούλεψε και με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια της, αποτελώντας πρότυπο ανθρώπου, καθηγήτριας και επιστήμονα. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές μου κ. Γιώργο Βαργεμέζη και κ. Παναγιώτη Τσούρλο, καθηγητές του Α.Π.Θ., οι οποίοι ήταν δίπλα μου έμπρακτα κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου πορείας. Ακόμη, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ σε όλες και όλους τους καθηγητές και ερευνητικό προσωπικό που πλαισιώνουν το εργαστήριο Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. και το μεταπτυχιακό πρόγραμμα στο οποίο φοίτησα, αφού χάρη σε αυτούς τους ανθρώπους, κατάφερα να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου πάνω στο γνωστικό αντικείμενο που αγάπησα και επέλεξα να εντρυφήσω, το οποίο δεν είναι άλλο από τη Γεωφυσική. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία MARMOR Stone Group International και ιδιαίτερα όλους τους εργαζόμενους του λατομείου στην τοποθεσία «Νικητές» στο Μακρυχώρι Καβάλας, τόσο για τη φιλοξενία, όσο και για τη δυνατότητα πρόσβασης που μας παρείχαν στο λατομικό χώρο, με σκοπό τη διεκπεραίωση όλων των απαραίτητων μετρήσεων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, περατώθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών μου σπουδών με τίτλο «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» στο τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Η πρόσβαση στη μαρμαροφόρο περιοχή του Μακρυχωρίου Καβάλας και πιο συγκεκριμένα, στο λατομείο «Νικητές» που ανήκει στην εταιρεία Stone Group International, όπου διεξήχθη η συλλογή των δεδομένων της γεωφυσικής μεθόδου του ραντάρ υπεδάφους / γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR), πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος Ανατολική Μακεδονία και Θράκη «2014–2020», με τίτλο «Marble-GPR».

Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε με απώτερο σκοπό να βοηθήσει τις εξορυκτικές και λατομικές δραστηριότητες της εταιρείας, καθώς και την εμπορική εκμετάλλευση προϊόντων μαρμάρου στο λατομείο λευκού, γκρι και ημίλευκου μαρμάρου “Hemarus Grey”, βελτιστοποιώντας τη συνολική δραστηριότητά της στον κλάδο του μαρμάρου και των φυσικών πετρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, αφορά την εκτίμηση της ποιότητας των τελικών τεμαχών μαρμάρου, στην προσπάθεια βελτίωσης της αποληψιμότητας του μαρμάρου κατά την εκμετάλλευσή του στο υπό μελέτη λατομείο. Η εκτίμηση της ποιότητας, βασίστηκε σε δεδομένα που συλλέχτηκαν με την μη-καταστρεπτική γεωφυσική μέθοδο του γεωραντάρ (GPR).



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει σαν κύριο στόχο την εκτίμηση της ποιότητας του ημίλευκου μαρμάρου “Hemarus Grey” αφότου αυτό αποσπαστεί από το μητρικό πέτρωμα, μέσω της ανάλυσης των τιμών του πλάτους των ηλεκτρομαγνητικών (H/M) κυμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR) σε τεμάχη μαρμάρου. Οι μετρήσεις πεδίου διεξήχθησαν σε λατομείο μαρμάρου της εταιρείας Stone Group International, στην περιοχή «Νικητές», στο Μακρυχώρι του Ν. Καβάλας, χρησιμοποιώντας κυρίως το σύστημα GPR TR1000 της εταιρείας Sensors & Software, το οποίο διαθέτει κεραία κεντρικής συχνότητας ίση με 1000 MHz. Για την υλοποίηση του παραπάνω στόχου, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB, με τίτλο «Μελέτη της Ποιότητας Τεμαχών Μαρμάρου», απαρτιζόμενο από έξι διαφορετικούς αλγορίθμους, μέσω των οποίων μελετήθηκαν οι διακυμάνσεις στην ανακλαστικότητα επιλεγμένων εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρου, που προέκυψαν εξαιτίας της ύπαρξης (ή μη) εσωτερικών ετερογενειών στο μάρμαρο. Η συγκεκριμένη έρευνα, υπογραμμίζει τη σημασία της αξιολόγησης της ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου βάσει των τιμών του H/M πλάτους, τονίζοντας την προσεκτική επιλογή των βημάτων επεξεργασίας των δεδομένων GPR και της απόστασης μεταξύ των γραμμών μέτρησης. Τέλος, εισάγει διάφορες μεθόδους μέτρησης και συστήματα GPR, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση του ελέγχου ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου και την ανάλυση των διακυμάνσεων στις τιμές του H/M πλάτους.

ABSTRACT

The present postgraduate thesis aims to assess the quality of the semi-white marble, "Hemarus Grey" after its extraction procedure, by analyzing electromagnetic (EM) amplitude values obtained with Ground Penetrating Radar (GPR). The study was conducted in a marble quarry owned by Stone Group International, located in the Nikites region of Northern Greece, utilizing the GPR system TR1000 by Sensors & Software, equipped with a central frequency of 1000 MHz. To achieve the aforementioned objective, a program entitled "Study Marble Blocks Quality" was developed using the MATLAB programming language. This program consists of six different algorithms that were used to examine variations in the reflectivity of selected extracted marble blocks caused by internal heterogeneities. This research highlights the significance of evaluating the quality of marble blocks based on the variation of EM amplitude values, with an emphasis on the careful selection of data processing steps and GPR measurement line spacing. The study also discusses different measurement methods and GPR systems that were employed to enhance the quality control of marble blocks and analyze variations in GPR signals' amplitudes.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Απεικονίζεται το λατομείο διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας, το οποίο βρίσκεται στην τοποθεσία Νικητές, στο Μακρυχώρι της Καβάλας, στη Βόρεια Ελλάδα.	28
Εικόνα 2. Ο γεωλογικός χάρτης με τα λατομικά κέντρα της Ανατολικής Μακεδονίας (Χατζηπαναγής Ι. & Βουγιούκας Δ., 2005). Σε κόκκινο πλαίσιο εντοπίζεται η υπό μελέτη περιοχή (Στενωπός), η οποία ανήκει ως γεωλογική ενότητα στα μεταμορφωμένα πετρώματα.	31
Εικόνα 3. Απεικόνιση ενός τεμάχους μαρμάρου “Hemarus Grey”	33
Εικόνα 4. Απεικόνιση της λειτουργίας του γεωραντάρ (GPR), πάνω σε ένα μοντέλο της Γης αποτελούμενο από δύο υπεδάφια στρώματα, όπου ο δέκτης έχει τοποθετηθεί σε απόσταση από τον πομπό.	37
Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση ενός επίπεδου H/M κύματος, που έχει δημιουργηθεί από πυκνωτή εκκένωσης ή από ένα ταλαντευόμενο μοριακό δίπολο, και διαδίδεται σε ομογενή χώρο σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ταλάντωσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.	40
Εικόνα 6. Βάθι διείσδυσης (probing distance) του H/M σήματος σε διάφορα υλικά, για ένα εύρος συχνοτήτων από 1-1000MHz (Cook, 1975).	47
Εικόνα 7. Κατηγορίες H/M κυμάτων (Βαφείδης, 2001; Σπανουδάκης, 2001).	52
Εικόνα 8. Απεικονίζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό σύστημα GPR.	54
Εικόνα 9. Φωτογραφία του διστατικού συστήματος GPR pulseEKKO PRO Ultra Rx, κεντρικής συχνότητας 100MHz.	56
Εικόνα 10. Διάγραμμα βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας και της διακριτικής ικανότητας (Αποστολόπουλος, 2013).	58
Εικόνα 11. Διάγραμμα επιλογής της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών και διακριτών μετρήσεων (Αποστολόπουλος, 2013).	62
Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου σταθερής απόστασης πομπού - δέκτη ενός διστατικού συστήματος γεωραντάρ.	65
Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου συλλογής δεδομένων GPR του κοινού μεσαίου σημείου.	66
Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης της ευρυγώνιας ανάκλασης ενός συστήματος γεωραντάρ.	67
Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της τομογραφίας ενός συστήματος γεωραντάρ. ..	67
Εικόνα 16. Διάγραμμα ροής των δεδομένων γεωραντάρ (Annan, 2009).	71
Εικόνα 17. Απεικόνιση της ενίσχυσης AGC και της επίδρασής της στο σήμα καταγραφής (Πουλιούδης, 1999).	73
Εικόνα 18. Η ενίσχυση SEC (Πουλιούδης, 1999).	74
Εικόνα 19. Τα βήματα της διαδικασίας της αντιστροφής των αποκρίσεων του γεωραντάρ (Annan, 2003).	78
Εικόνα 20. Απεικονίζεται η καταγραφή πολλών ιχνών στη σειρά (μαύρα βέλη).	81

Εικόνα 21. (α) Ραδιόγραμμα στο οποίο είναι διακριτά τα ίχνη από τα οποία αποτελείται. **(β)** Παράδειγμα δισδιάστατης τομής GPR, κωδικοποιημένη σε χρωματική κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρι, σχηματιζόμενη από την υπέρθεση πολλαπλών μονοδιάστατων ιχνών.....82

Εικόνα 22. Παράδειγμα τρισδιάστατης απεικόνισης (3D) δεδομένων γεωραντάρ που λήφθηκαν από την έρευνα ενός εξορυχθέντος τεμάχους μαρμάρου.84

Εικόνα 23. Απεικονίζονται: **(α)** Φωτογραφία ορισμένων εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρων στο λατομείο μαρμάρου “Hemarus Grey” στην τοποθεσία Νικητές, στην Καβάλα. **(β)** Η φωτογραφία ενός επιφανειακά ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου “Hemarus Grey”.90

Εικόνα 24. (α) Στη φωτογραφία παρουσιάζεται το σύστημα GPR TR1000 κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ενός τεμάχους μαρμάρου. Πιο συγκεκριμένα, στα δεξιά της φωτογραφίας απεικονίζονται **(β)** τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το σύστημα GPR TR1000. **(c)** Με μαύρο βέλος, απεικονίζεται το GPR TR1000, ενώ με πορτοκαλί βέλη σημειώνονται ονομαστικά όλα τα στοιχεία από τα οποία αυτός αποτελείται.91

Εικόνα 25. Στις φωτογραφίες **(α)** και **(β)** απεικονίζεται το «πέτασμα» το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων τεμαχών μαρμάρου, με το σύστημα GPR TR1000.92

Εικόνα 26. Απεικονίζονται τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων GPR. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται: **(α)** Τα ακατέργαστα δεδομένα, όπως λήφθηκαν μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων και έπειτα από τη διόρθωση της ταχύτητας του σήματος του GPR στο μάρμαρο. Με πράσινη διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το απευθείας κύμα (Direct wave), ενώ με μπορντό διακεκομμένη γραμμή παρατηρείται η διεπιφάνεια του τεμάχους μαρμάρου με το έδαφος ή με τον αέρα (Block's backside response). **(β)** Τα δεδομένα μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης “SEC2 Gain”, του φίλτρου “Background Subtraction” και ύστερα από τη δυναμική περικοπή χρόνων (Dynamic Time Truncation). Με μπλε βέλη σημειώνονται τεχνητές ανακλάσεις που δημιουργούνται λόγω των γωνιών του τεμάχους μαρμάρου («γωνιακοί ανακλαστήρες» ή corner reflectors). Ειδικότερα, για να διαπιστωθεί πως οι συγκεκριμένες ανακλάσεις δεν αποτελούν κύματα αέρα (Air waves), υπολογίστηκε η κλίση της γωνίας τους, η οποία και διαφέρει από την κλίση των κυμάτων αέρα (ίση με $1/c$, καθώς τα σήματα αυτά ταξιδεύουν μέσω του αέρα με την ταχύτητα του φωτός). Τέλος, **(c)** τα δεδομένα μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μετανάστευσης (FK Migration), το οποίο απαλείφει τους «γωνιακούς ανακλαστήρες» αλλά δημιουργεί ψευδείς ανακλάσεις (Migration artifacts) κατά την εφαρμογή του (μαύρα βέλη).95

Εικόνα 27. Απεικονίζονται: Η στιγμή κατά την οποία η μεταλλική πλάκα ακουμπά στο τέμαχος μαρμάρου παρουσιάζεται στο σκαρίφημα **(α)**, ενώ όταν αυτή απομακρύνεται από εκείνο, παρουσιάζεται στο σκαρίφημα **(β)**. Φωτογραφία από το υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου **(c)**, πάχους 1.52m, καθώς και η μεταλλική πλάκα (περιβάλλεται σε μαύρο κύκλο) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας του σήματος GPR στο μάρμαρο “Hemarus Grey”. **(d)** Το ραδιόγραμμα που προέκυψε από μία γραμμή διασκόπησης, που υλοποιήθηκε κατά τη διεύθυνση X στο υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου. Το πάχος του μαρμάρου υποδεικνύεται με μπορντό διακεκομμένη γραμμή, η οποία αντιστοιχεί στη σωστή ταχύτητα διάδοσης των H/M κυμάτων στο μάρμαρο (0.104 m/ns).97

Εικόνα 28. Μετρήσεις με δύο διαφορετικά συστήματα GPR, στο ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου «F». **(α)** Στο τέμαχος μαρμάρου, με γκρι διακεκομμένη γραμμή, σημειώνεται μια επιφανειακή ρωγμή, με το

σημείο *A* να βρίσκεται σε ύψος 75cm από την κορυφή του τεμάχους και σε πλάτος 0cm από την αριστερή πλευρά του (όπως φαίνεται στη φωτογραφία), το σημείο *B* να βρίσκεται σε ύψος 53cm και πλάτος 60cm, και το σημείο *Γ* εντοπίζεται σε ύψος 6cm και πλάτος 170cm. Ακόμη, με κόκκινο βέλος απεικονίζεται ποιοτικά μια γραμμή μέτρησης κατά τον άξονα *Y*, και με κίτρινη βούλα σημειώνεται το σημείο όπου η γραμμή διασκόπησης περνάει πάνω από την επιφανειακή και υπό μελέτη ρωγμή. **(b)** Επιπλέον, απεικονίζονται οι μετρήσεις με το σύστημα GPR TR1000, **(c)** και οι μετρήσεις με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO 1000, κεντρικής συχνότητας 1000MHz. Τέλος, στα **(d)** και **(e)** απεικονίζονται δύο ραδιογράμματα που προέκυψαν από τη μέτρηση κατά τη διεύθυνση του κόκκινου βέλους, με χρήση των συστημάτων GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000, αντίστοιχα. Σε κίτρινο κύκλο σημειώνεται και στα δύο ραδιογράμματα, η ανάκλαση σε βάθος περίπου ίση με 0.2m, που είναι πιθανό να οφείλεται στην επιφανειακή ρωγμή, στο σημείο της κίτρινης βούλας. 99

Εικόνα 29. Χρήση φελιζόλ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με δύο διαφορετικά συστήματα GPR, στο ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου «F». Αναλυτικότερα, απεικονίζονται **(a)** οι μετρήσεις με το σύστημα GPR TR1000, πάνω από φελιζόλ πάχους 2.5cm, **(b)** και οι μετρήσεις με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO, κεντρικής συχνότητας 1000MHz, πάνω από φελιζόλ πάχους 2cm. 100

Εικόνα 30. (a) Η πρώτη «φέτα» βάθους της ψευδό-τρισιδιάστατης απεικόνισης, αντιστοιχεί στην μπροστινή πλευρά του τεμάχους μαρμάρου (Frontside of the block), όπου και διακρίνονται διάφορα «ελαττώματα» μικρής κλίμακας. Με κόκκινα βέλη, αντιστοιχίζονται οι επιφανειακές «ατέλειες» του τεμάχους μαρμάρου, με τις «φέτες» βάθους, στις οποίες και εντοπίζονται. **(b)** Ψευδό-τρισιδιάστατη απεικόνιση ενός υγιούς τεμάχους μαρμάρου, το οποίο εμφανίζει κάποια επιφανειακά «ελαττώματα», που εκτείνονται σε βάθος ίσο μέχρι τα 0.105m. **(c)** Η πίσω πλευρά του τεμάχους μαρμάρου (Backside of the block), που αντιστοιχεί στην τελευταία «φέτα» βάθους της ψευδό-τρισιδιάστατης απεικόνισης, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές του *H/M* πλάτους, λόγω της εγγύτητας της διεπιφάνειας αυτής με τον αέρα. 102

Εικόνα 31. Απεικονίζονται οι φωτογραφίες από δύο μετρούμενες πλευρές (Grid 1 & 2) ενός επιφανειακά ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου με όνομα «D», και από κάτω τους παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά ραδιογράμματα που προέκυψαν από τη μέτρηση της κάθε πλευράς αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, στα ραδιογράμματα σημειώνονται: **A.** Οι «γωνιακοί ανακλαστήρες» (corner reflectors), ως αποτέλεσμα της επαφής του συστήματος GPR με τις γωνίες του τεμάχους μαρμάρου (μπλε βέλη). **B.** Διάφορες ανακλάσεις ως αποτέλεσμα της εσωτερικής ρωγμάτωσης (internal fracture) του τεμάχους μαρμάρου (κίτρινα βέλη), που εντοπίζονται στα ραδιογράμματα a_2 , b_2 σε βάθος 0.8m και στα ραδιογράμματα a_1 , b_1 σε βάθος 0.7m. Μελετώντας τα παραπάνω βάθη, η εσωτερική αυτή ρωγμάτωση φαίνεται να παρουσιάζει κλίση, καθώς το βάθος που αυτή εντοπίζεται μεγαλώνει, όσο οι γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα *X* πλησιάζουν το έδαφος. **Γ.** Μέρος ενός πιθανού επιπέδου ασυνέχειας μικρής κλίμακας, σε βάθος περίπου ίσο με 1.25m (μαύρο πλαίσιο). **Δ.** Στα δεξιά από τα ραδιογράμματα b_1 και b_2 , έχουν τοποθετηθεί ενδεικτικά τα αντίστοιχα ραδιογράμματα στα οποία έχει εφαρμοστεί το φίλτρο της μετανάστευσης (Migrated data). **Ε.** Τα «τεχνουργήματα» (artifacts) ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της διαδικασίας της μετανάστευσης (μαύρα βέλη). 103

Εικόνα 32. Απεικονίζεται η ψευδό-τρισιδιάστατη εικόνα ενός επιφανειακά ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου με όνομα «C». Σε αυτό, παρατηρείται μία επιφανειακή λεπτή και υπό-κατακόρυφη ρωγμάτωση (γκρι διακεκομμένη γραμμή). Με μπλε βέλη, σημειώνονται οι ανακλάσεις, εξαιτίας των γωνιών του τεμάχους μαρμάρου, όταν σε αυτές πλησιάζει το μηχάνημα GPR («γωνιακοί ανακλαστήρες»). Παράλληλα, απεικονίζονται ποιοτικά δύο ενδεικτικές γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα X, οι οποίες διασχίζουν την παρατηρούμενη επιφανειακή ρωγμάτωση (GRP line 1 & 2). Με μαύρη βούλα, σημειώνεται το σημείο στο οποίο η πρώτη γραμμή διασκόπησης (GPR line 1) διασχίζει τη ρωγμάτωση, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάκλαση που σημειώνεται εντός του μαύρου κύκλου στο πάνω ραδιόγραμμα. Αντίστοιχα, με πράσινη βούλα σημειώνεται άλλο ένα σημείο στο οποίο μια δεύτερη γραμμή διασκόπησης (GPR line 2) διασχίζει την επιφανειακή ρωγμάτωση, προκαλώντας τη δημιουργία της ανάκλασης που εντοπίζεται εντός του πράσινου κύκλου, στο κάτω ραδιόγραμμα. Στο συγκεκριμένο σημείο, η επιφανειακή ρωγμάτωση φαίνεται να εκτείνεται σε βάθος μέχρι τα 0.2m περίπου. Τέλος, σε βάθη περίπου ίσα με 0.35m και 0.7m, παρατηρούνται ανακλάσεις (ροζ βέλη), οι οποίες φανερώσουν εσωτερικές ρωγμές που δεν εκτείνονται επιφανειακά, και για το λόγο αυτόν, δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν κατά την οπτική παρατήρηση του τεμάχους μαρμάρου. 104

Εικόνα 33. Απεικονίζεται (α) μία φωτογραφία της μετρούμενης πλευράς του τεμάχους μαρμάρου «C» με το σύστημα GPR TR1000, στο οποίο είναι τοποθετημένο το «πέτασμα», δηλαδή το πανί με τον κατασκευασμένο κάνναβο, καθώς και (b) η ίσο-επιφάνεια που προέκυψε από τις μετρήσεις της άνω πλευράς του τεμάχους, όπως καταδεικνύεται με το κόκκινο βέλος που συμβολίζει μια ενδεικτική όδωση. Γίνεται αντιληπτό, πως το τέμαχος μαρμάρου εμφανίζει εσωτερικές λεπτές ρωγματώσεις, τόσο κοντά στην μετρούμενη επιφάνεια και απέναντι αυτής, όσο και εσωτερικά. 105

Εικόνα 34. Παρουσιάζονται στις φωτογραφίες (α), (b) δύο πλευρές του τεμάχους μαρμάρου «E», όπου στην μία εκ των δύο, σημειώνεται με κίτρινο κύκλο το αποτύπωμα μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης. (c) Οι ανακλάσεις οι οποίες προκλήθηκαν εξαιτίας της τρύπας που δημιουργήθηκε στο τέμαχος μαρμάρου, σημειώνονται αντίστοιχα με κίτρινους κύκλους στα ραδιογράμματα. Αναλυτικότερα, στο σχήμα (c) παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά ραδιογράμματα, τα οποία προέκυψαν από δύο γραμμές μέτρησης, μία κατά τον άξονα X και μία κατά τον άξονα Y, αλλά και η παραγόμενη «φέτα» βάθους (depth slice) ίση με 0.546m. Ακόμη, απεικονίζεται (d) η ίσο-επιφάνεια που προέκυψε ως αποτέλεσμα των μετρήσεων, σύμφωνα με την οποία γίνεται φανερό πως το κενό που δημιουργήθηκε από τη γεώτρηση, εκτείνεται σε δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους (σχηματίζοντας έναν σταυρό), αντί σε έναν, όπως αρχικά θεωρήθηκε ύστερα από την οπτική διασκόπηση του τεμάχους, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται και από την τομή βάθους. Τέλος, στην ίσο-επιφάνεια παρατηρούνται κάποιες εσωτερικές μικρό-ρωγματώσεις, οι οποίες δε φαίνεται να σχετίζονται με τη διαταραχή του συμπαγούς μαρμάρου από τη χρήση της δειγματοληπτικής γεώτρησης. 106

Εικόνα 35. Απεικονίζονται τα ραδιογράμματα που προέκυψαν από τις τρεις γραμμές μέτρησης GPR (L1, L2 και L3) που πραγματοποιήθηκαν στην ίδια πλευρά του τεμάχους μαρμάρου «F». Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα ραδιογράμματα που προέκυψαν: (L1) Χωρίς φελιζόλ με το σύστημα GPR TR1000. Με μπλε βέλη σημειώνονται οι «γωνιακοί ανακλαστήρες». (L2) Με φελιζόλ πάχους 2.5cm, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPR TR1000. (L3) Με φελιζόλ πάχους 2cm, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPR pE1000. Με

πράσινα βέλη σημειώνονται κάποιες περιοχές στα ραδιογράμματα οι οποίες αποτελούν παρεμβολές από διάφορες ηλεκτρονικές πηγές. 108

Εικόνα 36. Κύριο μενού του προγράμματος “Study Marble Blocks Quality” («Μελέτη Ποιότητας Τεμαχών Μαρμάρου»), το οποίο αποτελείται από έξι διαφορετικούς αλγόριθμους, ως βήματα επεξεργασίας των τιμών H/M πλάτους. Οι αλγόριθμοι 1 έως 3 εκτελούνται για κάθε τέμαχος μαρμάρου ξεχωριστά κι έπειτα, εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι 4 και 5 για το σύνολο των μετρούμενων τεμαχών μαρμάρου. Η χρήση του 6^{ου} αλγόριθμου είναι προαιρετική. 110

Εικόνα 37. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 1^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: (1) Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου αλγορίθμου. (2) Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει τον κάρναβο που θέλει να επεξεργαστεί. (3) Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το χρόνο (σε ns) κάτω από τον οποίο επιθυμεί να «κόψει» τα δεδομένα. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους για κάθε μέθοδο «κανονικοποίησης» και για κάθε κατεύθυνση μέτρησης X , Y και $X&Y$. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων), για την 1^η (“Normalization using the maximum line count”) και την 2^η μέθοδο «κανονικοποίησης» (“Normalization using the total trace count”) των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους αντίστοιχα. 113

Εικόνα 38. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 2^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: (1) Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. (2) Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των καννάβων που έχει πραγματοποιηθεί σε ένα τέμαχος μαρμάρου. (3) Στο βήμα 3^ο δίνεται η οδηγία επιλογής των αρχείων excel που δημιουργήθηκαν από το 1^ο πρόγραμμα και τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους κατά τους άξονες X , Y και $X&Y$, για κάθε μετρούμενη πλευρά αντίστοιχα. (4) Στο 4^ο βήμα επιλέγεται το χρώμα του γραφήματος, αναφορικά με τον αν αυτό είναι υγιές/συμπαγές τέμαχος (μπλε χρώμα) ή αν αυτό έχει χαρακτηριστεί ως ρωγματομένο (ροζ χρώμα). Τέλος, παρουσιάζονται οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες απόλυτες τιμές πλάτους για κάθε άξονα μέτρησης (X , Y και $X&Y$) για το επιλεγμένο τέμαχος μαρμάρου. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων). 115

Εικόνα 39. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 3^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: (1) Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. (2) Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει τον επιθυμητό κάρναβο. (3) Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το χρόνο (σε ns) κάτω από τον οποίο επιθυμεί να «κόψει» τα δεδομένα. (4) Στο 4^ο βήμα δίνεται η οδηγία στο χρήστη, για το πως να πληκτρολογήσει το επιθυμητό βήμα δειγματοληψίας στο αμέσως επόμενο παράθυρο του αλγορίθμου. (5) Στο 5^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί το επιθυμητό βήμα δειγματοληψίας (σε dm) για τον άξονα X και Y αντίστοιχα και (6) στο 6^ο βήμα, δίνεται η οδηγία επιλογής του κατάλληλου αρχείου excel, που κατασκευάστηκε από τον 2^ο αλγόριθμο, και περιέχει τα εύρη διακύμανσης των τιμών του πλάτους, στο υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου. Τέλος, παρουσιάζονται οι αποδεκτές αποστάσεις μεταξύ των γραμμών διασκόπησης και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων). 118

Εικόνα 40. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 4^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει το σύνολο των τεμαχών μαρμάρου, για τα οποία επιθυμεί να υπολογίσει την ιδανική απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδανικής απόστασης μεταξύ των γραμμών μέτρησης, για κάθε σύνολο τεμαχών μαρμάρου που έχει επιλεγεί (υγιή και ρωγματομένα). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν τα υγιή τεμάχια μαρμάρου «Α» και «Β» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων). 120

Εικόνα 41. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 5^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί τον αριθμό των συμπαγών αλλά και των ρωγματομένων τεμαχών μαρμάρου που επιθυμεί να μελετήσει. **(3)** Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει τα αρχεία excel (τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους για τις διευθύνσεις X , Y και $X&Y$) που κατασκευάστηκαν από το 2^ο αλγόριθμο και αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα συμπαγή ή ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου, που έχει δηλώσει ο χρήστης στο 2^ο βήμα της επεξεργασίας. **(4)** Στο 4^ο βήμα εμφανίζεται στην οθόνη του χρήστη ένα παράθυρο το οποίο αναφέρει τα ονόματα των υγιών και ρωγματομένων τεμαχών μαρμάρου που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα της επεξεργασίας. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους για τις κατευθύνσεις X , Y και $X&Y$, που αφορούν τα υγιή και τα ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τεμάχια μαρμάρου «Α», «Β», «C», «D» και «E» (βλ. πίνακα 8 με τις παραμέτρους των μετρήσεων). 122

Εικόνα 42. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 6^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί τον αριθμό των καννάβων που μέτρησε σε ένα τέμαχος μαρμάρου, με τη χρήση και χωρίς τη χρήση του φελιζόλ αντίστοιχα. **(3)** Στο 3^ο βήμα δίνεται η οδηγία επιλογής των αρχείων excel που δημιουργήθηκαν από το 2^ο πρόγραμμα, τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους για τις διευθύνσεις X , Y και $X&Y$, που αντιστοιχούν στο επιλεγμένο τέμαχος μαρμάρου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, δηλαδή οι τιμές μέσου πλάτους για τις κατευθύνσεις X , Y και $X&Y$ που προκύπτουν από τη χρήση και μη του κομματιού φελιζόλ. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν το ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου «E» (βλ. πίνακα 8 με τις παραμέτρους των μετρήσεων). 124

Εικόνα 43. Διαγράμματα σύγκρισης των δύο μεθόδων «κανονικοποίησης» των δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους για το συμπαγές μαρμαρίνο τέμαχος «Α», σε κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X , Y και $X&Y$). Η 1^η μέθοδος αντιπροσωπεύει τη μέθοδο «κανονικοποίησης» βάσει του μέγιστου αριθμού γραμμών ανά κατεύθυνση, ενώ η 2^η μέθοδος βασίζεται στο συνολικό αριθμό ιχνών ανά κατεύθυνση. Οι δύο μέθοδοι «κανονικοποίησης» δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, με τα πλάτη να κυμαίνονται μεταξύ 2.5-3mV. 127

Εικόνα 44. Δύο διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα, κατά την εφαρμογή του φίλτρου μετανάστευσης (FK Migration) στα δεδομένα GPR. Στην αριστερή πλευρά, εμφανίζεται η ποσοστιαία μείωση στις τιμές του μέσου πλάτους για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α». Συγκεκριμένα, στην κατεύθυνση X , τα πλάτη μειώθηκαν κατά 24.4%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν κατά

38.5%, και στις δύο κατευθύνσεις $X&Y$, η μείωση ήταν ίση με 32%. Αντίθετα, στα διαγράμματα της δεξιάς πλευράς, φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των τιμών μέσου πλάτους για το επιφανειακά ρωγματωμένο τεμάχος μαρμάρου «C». Στην κατεύθυνση X , τα πλάτη μειώθηκαν κατά 7.1%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν κατά 23.4%, και στις δύο κατευθύνσεις $X&Y$, η μείωση ήταν της τάξης του 15.2%. 129

Εικόνα 45. Διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται οι τιμές μέσου πλάτους για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου Hemarus Grey «A», για κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X , Y και $X&Y$). Τα πλάτη κυμαίνονται μεταξύ 2.5-3mV..... 130

Εικόνα 46. Διάγραμμα απεικόνισης των τιμών μέσου πλάτους για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου Hemarus Grey «A», για κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X , Y και $X&Y$). 130

Εικόνα 48. Διάγραμμα απεικόνισης των τιμών μέσου πλάτους σε κάθε κάρναβο μέτρησης του επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου Hemarus Grey «C», για κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X , Y και $X&Y$). 131

Εικόνα 47. Διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται οι τιμές μέσου πλάτους σε κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X , Y και $X&Y$), του επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου Hemarus Grey «C». Τα πλάτη κυμαίνονται μεταξύ 3-3.5mV..... 131

Εικόνα 49. Διάγραμμα απεικόνισης των μέγιστων τιμών μέσου πλάτους του συνόλου των μετρούμενων συμπαγών (Solid Blocks) και ρωγματωμένων τεμαχών (Fractured Blocks) μαρμάρου Hemarus Grey, για κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X , Y και $X&Y$). Η διαφορά στις τιμές του πλάτους μεταξύ των υγιών τεμαχών μαρμάρου και των ρωγματωμένων τεμαχών, δεν είναι μεγάλη, με τα υγιή μάρμαρα να εμφανίζουν πλάτη περίπου ίσα με 2.5-3mV, και τα ρωγματωμένα μάρμαρα να χαρακτηρίζονται από πλάτη περίπου ίσα με 3-3.5mV..... 132

Εικόνα 50. Διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μεταβολή της ανακλαστικότητας από τα υγιή τεμάχη μαρμάρου, στα ρωγματωμένα τεμάχη μαρμάρου, σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X , Y and $X&Y$). Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται πως από τα υγιή στα ρωγματωμένα τεμάχη μαρμάρου, η ανακλαστικότητα αυξάνεται, λόγω της ύπαρξης εσωτερικών ρωγματώσεων. Ωστόσο, η αύξηση αυτή, παρατηρείται σε μικρά ποσοστά προς κάθε κατεύθυνση, υποδηλώνοντας την υψηλή ποιότητα του μαρμάρου Hemarus Grey. Για τα τεμάχη μαρμάρου «C», «D» και «E», τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 18.5%, 5.9% και 15.9% στην κατεύθυνση X και 19.4%, 6.6% και 15.3% στην κατεύθυνση Y , αντίστοιχα. Στο συνδυασμό των κατευθύνσεων $X&Y$, η αύξηση στην ανακλαστικότητα ήταν περίπου ίση με 19%, 6.3% και 15.6%, για τα τεμάχη «C», «D» και «E». 133

Εικόνα 51. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης διαφορετική από 0.1m, για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου «A» και το επιφανειακά ρωγματωμένο τεμάχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X , Y and $X&Y$). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους όταν χρησιμοποιήθηκε απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης ίση με 0.2m. Για το τεμάχος «A», στην κατεύθυνση X τα πλάτη μειώθηκαν περίπου 0.1%, αυξήθηκαν περίπου 0.15% στην κατεύθυνση Y και αυξήθηκαν περίπου 0.004% και στις δύο κατευθύνσεις $X&Y$. Για το τεμάχος «C», στην κατεύθυνση X τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.008%, μειώθηκαν περίπου 0.15% στην κατεύθυνση Y και μειώθηκαν περίπου 0.06% και στις δύο κατευθύνσεις $X&Y$ 134

Εικόνα 52. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης ίση με 0.5m για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α», καθώς και για το επιφανειακά ρωγματομένο τέμαχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους, που προκύπτει κατά την υλοποίηση 2-3 γραμμών μέτρησης, ξεκινώντας από το κέντρο του κάθε τεμάχους και για κάθε κατεύθυνση (GPR lines – κόκκινα βέλη). Για το τέμαχος μαρμάρου «Α», στην κατεύθυνση X τα πλάτη μειώθηκαν περίπου 0.16%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν περίπου 0.1%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η μείωση ήταν της τάξης του 0.006%. Για το τέμαχος μαρμάρου «C», στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.45%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν περίπου 0.06%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.35%. 136

Εικόνα 53. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης διαφορετική από 0.1m, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το επιφανειακά ρωγματομένο τέμαχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους, που προκύπτει κατά τη χρήση μίας γραμμής μέτρησης στο κέντρο του κάθε τεμάχους κατεύθυνση (GPR lines – κόκκινα βέλη). Για το τέμαχος μαρμάρου «Α», στην κατεύθυνση X τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.2%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν περίπου 0.4%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.3%. Για το τέμαχος μαρμάρου «C», στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.5%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν περίπου 0.9%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.1%. 137

Εικόνα 54. Απεικονίζονται δύο ραδιογράμματα τα οποία προέκυψαν από την ίδια γραμμή μέτρησης στο τέμαχος μαρμάρου «F», χρησιμοποιώντας τα συστήματα GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000 αντίστοιχα. Σε μαύρο κύκλο στο αριστερό ραδιόγραμμα (TR1000) σημειώνονται κάποιες ανακλάσεις οι οποίες όμως δεν αποτυπώνονται ξεκάθαρα στην αντίστοιχη θέση, εντός του μαύρου κύκλου, στο δεξί ραδιόγραμμα (pulseEKKO PRO 1000) μιας και τα πλάτη στη δεύτερη αυτή περίπτωση είναι μικρότερα. 139

Εικόνα 55. Η σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα σε κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X, Y και X&Y), που προκύπτει από τη χρήση φελιζόλ πάχους 2.5cm κατά τη διάρκεια μέτρησης του τεμάχους μαρμάρου «F», με το σύστημα GPR TR1000. Στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν κατά 10.1%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν κατά 9.7% και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν 9.9%. 140

Εικόνα 56. Η σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα σε κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X, Y και X&Y), που προκύπτει από τη χρήση φελιζόλ πάχους 2cm κατά τη διάρκεια μέτρησης του τεμάχους μαρμάρου «F», με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO 1000 (κεντρικής συχνότητας 1000MHz). Στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν κατά 12%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν κατά 13.6% και προς τις δύο κατευθύνσεις (X&Y) η αύξηση ήταν 12.8%. 141

Εικόνα 57. (α) Στα αριστερά απεικονίζονται οι μετρήσεις σε ένα υγιές τέμαχος μαρμάρου, με το σύστημα GPR TR1000 κεντρικής συχνότητας 1000MHz. **(β)** Στο ραδιόγραμμα στα δεξιά, σημειώνονται οι ανακλάσεις (μαύρα αριθμημένα βέλη), που οφείλονται στις πέτρες (κίτρινοι κύκλοι με τους αντίστοιχους αριθμούς) που έχουν τοποθετηθεί πάνω στο «πέτασμα», για να το συγκρατούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. 143

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των ευρέως χρησιμοποιούμενων γεωφυσικών μεθόδων σύμφωνα με το μετρούμενο μέγεθος, τη φυσική ιδιότητα και το στόχο αναζήτησης.	24
Πίνακας 2. Χημική – ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου “Hemarus Grey” (Πηγή: IFME).	34
Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου “Hemarus Grey”.	35
Πίνακας 4. Στον πίνακα παρατίθενται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r), της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ), οι ταχύτητες διάδοσης (V) και απόσβεσης (α) των H/M κυμάτων, για διάφορους τύπους υλικών, με κεραία συχνότητας 100MHz.	43
Πίνακας 5. Επιπτώσεις της συχνότητας εκπομπής στη διασκόπηση με γεωραντάρ (Annan, 2001; Molenaar and De Vreng, 2004).	58
Πίνακας 6. Εύρος χρήσεων της μεθόδου GPR (Reynolds, 1998; Mellet, 1995; Toshioka et al., 1995; Tsoflis, 1999).	68
Πίνακας 7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής της μεθόδου του γεωραντάρ.	69
Πίνακας 8. Οι παράμετροι των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν με το σύστημα GPR TR1000, κεντρικής συχνότητας 1000MHz, στα εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου.	93
Πίνακας 9. Τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων GPR με χρήση του λογισμικού πακέτου EKKO_Project.	94
Πίνακας 10. Οι επιλεγμένοι χρόνοι (ns) μεγαλύτεροι των οποίων «κόπηκαν» τα δεδομένα πλάτους, για τα υπό μελέτη συμπαγή τεμάχια μαρμάρου.	155
Πίνακας 11. Οι επιλεγμένοι χρόνοι (ns) μεγαλύτεροι των οποίων «κόπηκαν» τα δεδομένα πλάτους, για τα υπό μελέτη ρωγματοωμένα τεμάχια μαρμάρου.	155
Πίνακας 12. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν με την εφαρμογή των δύο μεθόδων «κανονικοποίησης» των δεδομένων, αναφορικά με το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α».	155
Πίνακας 13. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν με την εφαρμογή του φίλτρου της μετανάστευσης στα δεδομένα (FK Migration), αναφορικά με το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματοωμένο τέμαχος «C».	156
Πίνακας 14. Τιμές μέσου πλάτους για κάθε κάρναβο και σε κάθε άξονα μέτρησης (X, Y και X&Y), για τα συμπαγή τεμάχια μαρμάρου.	156
Πίνακας 15. Τιμές μέσου πλάτους για κάθε κάρναβο και σε κάθε άξονα μέτρησης (X, Y και X&Y), για τα ρωγματοωμένα τεμάχια μαρμάρου.	156
Πίνακας 16. Τιμές μέσου πλάτους για τους άξονες μετρήσεων X, Y και X&Y, για τα συμπαγή τεμάχια μαρμάρου Hemarus.	157
Πίνακας 17. Τιμές μέσου πλάτους για τους άξονες μετρήσεων X, Y και X&Y, για τα επιφανειακά ρωγματοωμένα τεμάχια μαρμάρου Hemarus.	157
Πίνακας 18. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν από απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης του GPR ίση με 0.2m, για τους άξονες μετρήσεων (X, Y και X&Y) και σε κάθε κάρναβο, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματοωμένο τέμαχος «C».	157

Πίνακας 19. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν από δύο γραμμές μέτρησης του GPR ανά κατεύθυνση (X, Y και X&Y) και στο κέντρο κάθε καννάβου, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματομένο τέμαχος «C»..... 158

Πίνακας 20. Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των γραμμών όδευσης του GPR και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους, για κάθε άξονα μέτρησης και για κάθε κάνναβο στα συμπαγή τεμάχη μαρμάρου. 158

Πίνακας 21. Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των γραμμών όδευσης του GPR και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους, για κάθε άξονα μέτρησης και για κάθε κάνναβο στα ρωγματομένα τεμάχη μαρμάρου. 159

Πίνακας 22. Αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους κατά την εφαρμογή των συστημάτων GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000, με ή χωρίς τη χρήση φελιζόλ. 159

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 1^ο

Εισαγωγή

1.1. Εφαρμοσμένη γεωφυσική

Η επιστήμη της **εφαρμοσμένης γεωφυσικής** ασχολείται με την μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών της Γης, αξιοποιώντας θεμελιώδεις νόμους της φυσικής. Με τις γεωφυσικές μεθόδους έρευνας, συλλέγονται μετρήσεις που πραγματοποιούνται απευθείας στη φύση με κατάλληλα όργανα και διατάξεις. Οι μετρήσεις αυτές, έχουν ως στόχο τον εντοπισμό και την αποτύπωση υπεδάφινων σχηματισμών, που παρουσιάζουν επιστημονικό και οικονομικό ενδιαφέρον. Ο εντοπισμός μετρήσιμων διαφοροποιήσεων στις ιδιότητες των πετρωμάτων, η κατάλληλη ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων, αποτελούν το βασικό στόχο μιας γεωφυσικής έρευνας. Τέτοιες ιδιότητες, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη φύση και τη δομή των υπεδάφινων σχηματισμών, κρίνουν ποια μέθοδος είναι ευαίσθητη ως προς αυτές, και ως εκ τούτου, μπορεί να δώσει αποτελέσματα άξια περαιτέρω επεξεργασίας. Η έρευνα περισσότερων φυσικών ιδιοτήτων, με την εφαρμογή διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων, παρέχει ένα συσχετισμό των αποτελεσμάτων και αυξάνει την αξιοπιστία της ερμηνείας της (Sharma, 1997).

Η γεωφυσική έρευνα, αν και δίνει μια πολύ καλή εκτίμηση της εικόνας της περιοχής της έρευνας, εντούτοις δεν μπορεί να δώσει μοναδικές και μονοσήμαντες λύσεις για μια δεδομένη κατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί γεωλογικών σχηματισμών, θα είχαν ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή παρατηρούμενης μέτρησης. Το γεγονός αυτό, αποτελεί έναν γενικό περιορισμό, σύμφωνα με τον οποίο δεν μπορούμε να διακρίνουμε οτιδήποτε το ομογενές στη φύση. Μπορούμε μόνο να ξεχωρίσουμε κάτι το οποίο παρουσιάζει κάποιας μορφής χωρική ή χρονική διαφοροποίηση. Επιπλέον, το γεγονός ότι κάθε έρευνα πεδίου εμπεριέχει ένα ποσοστό πειραματικού σφάλματος, και πως η λήψη των μετρήσεων είναι

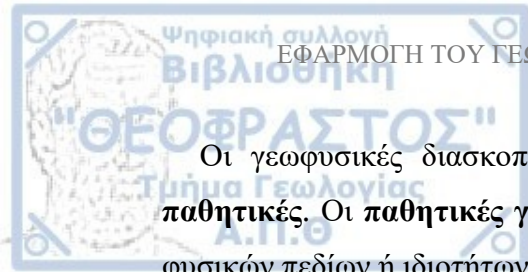
επιλεκτική¹, καθιστά προσεγγιστικά τα αποτελέσματα της έρευνας και όχι με ακρίβεια που καθορίζεται από την πυκνότητα των μετρήσεων.

Βασική προϋπόθεση για τον εντοπισμό ενός στόχου, εκτός από τις διαστάσεις του, είναι το κατά πόσο υπάρχουν διαφορές στις φυσικές του ιδιότητες συγκριτικά με αυτές του περιβάλλοντος σχηματισμού. Ωστόσο, η διακριτική ικανότητα μιας γεωφυσικής μεθόδου, δεν εξαρτάται μόνο από τις διαστάσεις και τις γεωφυσικές ιδιότητες του στόχου, αλλά και από τις παραμέτρους των μετρήσεων, όπως είναι για παράδειγμα η απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης. Εξίσου σημαντικό, είναι όταν πραγματοποιείται έρευνα σε μια εκτεταμένη περιοχή με γεωφυσικά προφίλ, η διασφάλιση τέτοιας διεύθυνσης (προτιμάται εγκάρσια στην παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών) και απόστασης μεταξύ των προφίλ, ώστε να υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες εντοπισμού του στόχου.

Οι γεωφυσικές έρευνες, παρόλο που ενδεχομένως ενέχουν ασάφειες και αβεβαιότητες ερμηνείας, παρέχουν ένα εργαλείο γρήγορης και αξιόπιστης διασκόπησης του υπεδάφους. Η καθιέρωση των γεωφυσικών μεθόδων, εκτός από το γεγονός πως μειώνει την αβεβαιότητα πριν την έναρξη των έργων, έχει και μεγάλο οικονομικό όφελος, αφού το κόστος των γεωφυσικών μεθόδων, είναι κατά πολύ μικρότερο από το κόστος που απαιτείται για τη διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων για παράδειγμα, όταν αυτές εφαρμόζονται στη μεταλλευτική έρευνα. Αξίζει να σημειωθεί, πως η γεωφυσική έρευνα εξαρτάται άμεσα από την ανάπτυξη της τεχνολογίας, καθώς νέες τεχνολογίες καθιστούν την επιστήμη της εφαρμοσμένης γεωφυσικής ολοένα πιο αξιόπιστη και αναγκαία.

Για την ορθή επιλογή και εφαρμογή μίας γεωφυσικής μεθόδου, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν δομές του υπεδάφους στις οποίες κάποια φυσική ιδιότητα, παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τον περιβάλλοντα χώρο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να ανιχνευθεί μετέπειτα το βάθος του υπό μελέτη στόχου, η φύση και το πάχος του υπερκείμενου στρώματος.

¹ Κατά την κρίση του ο ερευνητής, επιλέγει τις τιμές των μετρήσεων τις οποίες θεωρεί «λογικές» συγκριτικά με τις υπόλοιπες.



Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε **ενεργητικές** και **παθητικές**. Οι **παθητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις** συμπεριλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών πεδίων ή ιδιοτήτων της γης, στις οποίες χρησιμοποιούνται φυσικά πεδία. Στα πεδία αυτά, μετρούνται οι χωρικές μεταβολές στην προσπάθειά αξιολόγησης των συμπερασμάτων, για την υπεδάφια γεωλογία της υπό μελέτης περιοχής. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διεξαγωγή των **ενεργητικών γεωφυσικών διασκοπήσεων**, παράγονται σήματα² τα οποία εκπέμπονται προς τη Γη, και έπειτα μετράται η γήινη απόκριση. Η ταξινόμηση των σημαντικότερων μεθόδων γεωφυσικής έρευνας, σύμφωνα με το μετρούμενο μέγεθος, τη φυσική ιδιότητα και το στόχο αναζήτησης, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των ευρέως χρησιμοποιούμενων γεωφυσικών μεθόδων σύμφωνα με το μετρούμενο μέγεθος, τη φυσική ιδιότητα και το στόχο αναζήτησης.

Γεωφυσικές Μέθοδοι	Μετρούμενο Μέγεθος	Φυσική Ιδιότητα	Στόχος
Βαρυτομετρική Μέθοδος	Χωρικές μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας	Πυκνότητα	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας υπεδάφικών σχηματισμών
Μαγνητική Μέθοδος	Χωρικές μεταβολές στην ένταση του μαγνητικού πεδίου	- Μαγνητική επιδεκτικότητα - Παραμένων μαγνητισμός	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων
Θερμική μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης	Θερμοκρασία	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων
Ηλεκτρομαγνητικές (H/M) Μέθοδοι	Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική (H/M) Μέθοδος	- Ηλεκτρική αγωγιμότητα - Μαγνητική επιδεκτικότητα	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής επιφανειακών στρωμάτων
	Μέθοδος Γεωραντάρ	- Διηλεκτρική σταθερά - Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Εντοπισμός ασυνεχειών, υπεδάφιας στόχων
Ηλεκτρικές Μέθοδοι	Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής επιφανειακών στρωμάτων
	Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού	Ηλεκτροκινητικό δυναμικό	

² Τα σήματα αυτά μπορούν να έχουν μια πληθώρα μορφών, όπως μετατόπιση ή ηλεκτρικό ρεύμα.

Σεισμικές Μέθοδοι	Επαγόμενη Πόλωση	Φορτιστικότητα	Ηλεκτρική χωρητικότητα	Εντοπισμός υπόγειου νερού, σουλφιδίων, οξειδίων και χαλκού
	Μέθοδος Σεισμικής Ανάκλασης Κυμάτων		- Πυκνότητα - Ελαστικότητα - Σεισμική ταχύτητα	
	Μέθοδος Σεισμικής Διάθλασης Κυμάτων	Χρόνος διάδοσης, πλάτη και περίοδοι σεισμικών κυμάτων		Καθορισμός της δομής επιφανειακών στρωμάτων
	Μέθοδος Πολλαπλών Καναλιών Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων		Ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων	
	Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Ακτινοβολία	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων

1.2. Αντικείμενο διατριβής

Σκοπός της διεξαχθείσας γεωφυσικής έρευνας, είναι να εκτιμηθεί η ποιότητα του ημίλευκου μαρμάρου "Hemarus Grey", μετά την απόσπασή του από το μητρικό πέτρωμα, μέσω της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR). Πιο λεπτομερώς, η ακόλουθη μελέτη αποσκοπεί στην καταγραφή και ανάλυση των διακυμάνσεων στις τιμές του ηλεκτρομαγνητικού (H/M) πλάτους, λόγω των ετερογενειών εσωτερικά των τεμαχών μαρμάρου, ώστε να συμβάλει στη μελλοντική αξιολόγηση και τη μετέπειτα σύγκριση τους. Συμπληρωματικά, επιδιώχθηκε να εντοπιστεί η ιδανικότερη συνθήκη μέτρησης που αφορά τα τεμάχη μαρμάρου, για τη βελτίωση του ελέγχου ποιότητας τους, καθώς και η απλοποίηση των μετρήσεων για μελλοντικούς χειριστές του GPR. Ιδιαίτερη σημασία, δόθηκε στην προσεκτική επιλογή των βημάτων επεξεργασίας των δεδομένων GPR και στη μελέτη της απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, που πραγματοποιούνται κατά τη διεκπεραίωση των μετρήσεων.

Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων, κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB, με τίτλο «Μελέτη της Ποιότητας Τεμαχών Μαρμάρου» ("Study Marble Blocks Quality"), απαρτιζόμενο από έξι διαφορετικούς αλγορίθμους, μέσω των οποίων μελετήθηκαν οι διακυμάνσεις στην ανακλαστικότητα. Η ταξινόμηση των τεμαχών μαρμάρου ως προς την ποιότητά τους, επρόκειτο να συμβάλει σημαντικά στην περαιτέρω επεξεργασία τους. Η παρούσα μελέτη, δύναται να συμβάλει επίσης στην αύξηση της παραγωγής και της

βελτιστοποίησης της απόληψης του μαρμάρου, με ταυτόχρονη μείωση της ποσότητας των στείρων υλικών που παράγονται, με αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της λειτουργίας του λατομείου στην περιοχή. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα διασφαλιστεί η μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των τεμαχών μαρμάρου, για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, όπως πλάκες και πλακίδια.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 2^ο

Περιοχή Έρευνας

2.1. Εισαγωγή

Η εξόρυξη μαρμάρων στην Ελλάδα, αποτελεί σημαντικό κομμάτι της πολιτισμικής της κληρονομιάς. Η Ελλάδα θεωρείται η χώρα με τη μεγαλύτερη ποικιλία σε ανοιχτόχρωμα μάρμαρα, λευκά και υπόλευκα, ενώ παράλληλα διαθέτει και πολλούς τύπους χρωματιστών μαρμάρων (γκρι, πράσινα, μαύρα, κόκκινα κλπ.). Εργαστηριακές δοκιμές έχουν αναδείξει τις εξαιρετικές ιδιότητες των ελληνικών μαρμάρων, τα οποία δύναται να ανταποκριθούν σε κατασκευές υψηλών προδιαγραφών, με ορισμένα λευκά μάρμαρα να θεωρούνται από τα καλύτερα στον κόσμο. Το γεγονός πως τα αποθέματα των κοιτασμάτων μαρμάρων στην Ελλάδα θεωρούνται τεράστια, και πρακτικά ανεξάντλητα, ενισχύει τη σημαντικότητα τους, με τον αριθμό των ενεργών εγχώριων λατομείων, να ανέρχεται σε 210 περίπου (Πηγή: stonenews.eu).

2.2. Μάρμαρα

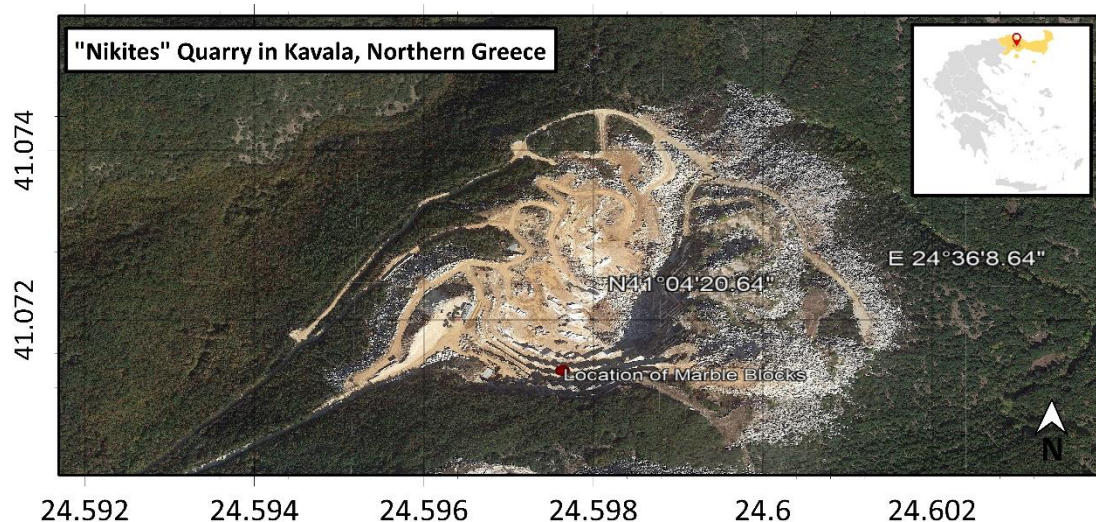
Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Επιτροπή Δοκιμών Υλικών (American Society of Testing Materials, ASTM C119), ως μάρμαρο ορίζεται το ανθρακικό πέτρωμα το οποίο έχει κρυσταλλική δομή που προκαλείται συνήθως από πίεση ή θέρμανση κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσής του, και το οποίο αποτελείται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, δολομίτη ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ή ασβεστίτη (CaCO_3), σε συνδυασμό ή χωρίς δολομίτη (Εξαδάκτυλος, 2007). Συνήθως, περιέχει και προσμίξεις αργιλικών ή πυριτικών ορυκτών όπως χλωρίτη, μαρμαρυγία, σερπεντίνη, χαλαζία και άλλων ορυκτών, σε μικρές αναλογίες. Η σύσταση των πετρωμάτων από τα οποία προέρχεται το μάρμαρο, καθώς και ο βαθμός μεταμόρφωσής του, καθορίζει την τελική του ποιότητα.

Εκτός από τα πετρώματα που η γεωλογική επιστήμη χαρακτηρίζει ως μάρμαρα, ως προς τον Νόμο 4512/2018, υπάρχουν και άλλα πετρώματα που χαρακτηρίζονται «ως μάρμαρα και φυσικοί λίθοι» με την εμπορική ονομασία. Ως μάρμαρα, χαρακτηρίζονται και άλλα ιζηματογενή πετρώματα όπως είναι οι ασβεστόλιθοι, οι δολομίτες, οι

ψαμμίτες, ενώ λοιποί «διακοσμητικοί» λίθοι³ είναι μεταμορφωμένα πετρώματα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι) αλλά και πυριγενή (γάββροι, γρανίτες, σερπεντινίτες), τα οποία έχουν τεχνικά χαρακτηριστικά παρόμοια (εξορύσσονται σε όγκους, κοπή σε πλάκες κ.α.) και χρησιμοποιούνται στη διακόσμηση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, αλλά και στον κατασκευαστικό τομέα.

2.3. Λατομικός χώρος

Το λατομείο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές μετρήσεις, ανήκει στην εταιρεία Stone Group International και βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Νέστου, του νομού Καβάλας. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζεται στην τοποθεσία Νικητές, στο Μακρυχώρι της Ανατολικής Μακεδονίας (εικ. 1), σε ύψος περίπου 400m στα όρη Λεκάνης. Η τοποθεσία του λατομείου, επιτρέπει την άμεση και εύκολη μεταφορά του εξαγόμενου μαρμάρου σε όλο τον κόσμο, καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στα λιμάνια της Θεσσαλονίκης και της Καβάλας, αλλά και στις μονάδες επεξεργασίας της εταιρείας σε Δράμα και Θεσσαλονίκη. Ο λατομικός χώρος αποτελεί συνεκμετάλλευση τεσσάρων αδειοδοτημένων λατομικών χώρων και καλύπτει συνολική έκταση περίπου 150.000m². Παράλληλα, η ετήσια παραγωγικότητά του ανέρχεται τουλάχιστον σε 30.000t σε όγκους, με την έκταση του κοιτάσματος να φτάνει τα 30.615,58m² (Πηγή: stonegroup.gr).



Εικόνα 1. Απεικονίζεται το λατομείο διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας, το οποίο βρίσκεται στην τοποθεσία Νικητές, στο Μακρυχώρι της Καβάλας, στη Βόρεια Ελλάδα.

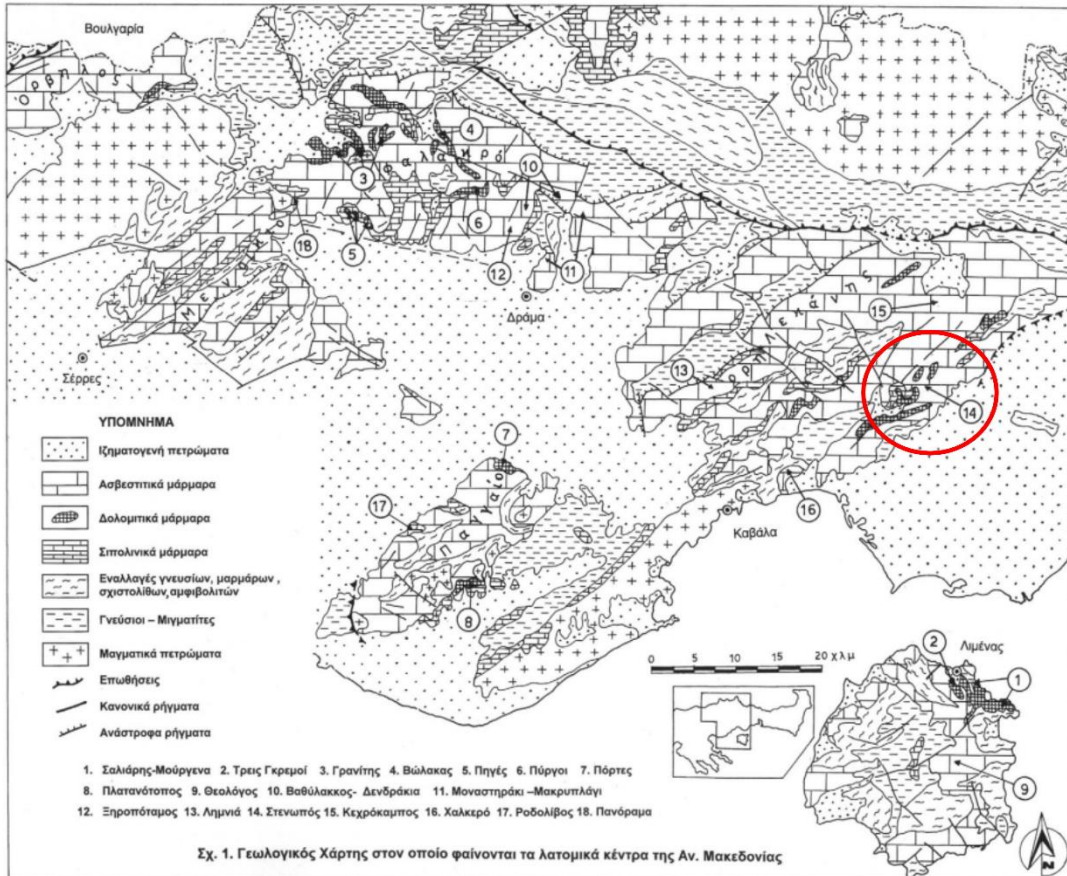
³ Ως «διακοσμητικοί» λίθοι ορίζονται οι πρώτες ύλες με δυνητική οικονομική αξία, που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές για κατασκευές ή σκοπούς κύρους

2.4. Γεωλογία - Υδρογεωλογία

Γεωτεκτονικά η περιοχή ανήκει στη μάζα της Ροδόπης. Η όλη μάζα κυριαρχείται από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα. Στη μάζα αυτή ανήκει η Θράκη, η Ανατολική Μακεδονία, με δυτικό όριο τη γραμμή του ποταμού Στρυμόνα, η Θάσος καθώς και ένα τμήμα της Βουλγαρίας. Ο γεωτεκτονικός χαρακτήρας της μάζας της Ροδόπης σύμφωνα με τα νεότερα μοντέλα λιθοσφαιρικών πλακών για την εξέλιξη της Μεσογείου, είναι καθαρά ηπειρωτικός και θεωρείται ότι η προέλευση της μάζας είναι από την πλάκα της Λαυρασίας. Τεκτονικά, η μάζα διαιρείται στην ανώτερη μονάδα του Σιδηρόνερου στα βόρεια, κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων, και στην κατώτερη μονάδα του Παγγαίου, που καταλαμβάνει τη δυτική και νοτιοδυτική Ροδόπη. Η ενότητα του Σιδηρόνερου εφίππευει την ενότητα του Παγγαίου κατά μήκος μιας μεγάλου μήκους τεκτονικής γραμμής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Η τεκτονική ανάλυση του κρυσταλλοσχιστώδους διαπίστωσε τρεις φάσεις πτυχώσεων, την πρώτη φάση με πτυχές ισοκλινείς ηλικίας παλαιοζωικού, τη δεύτερη φάση με πτυχές υποϊσοκλινείς Ιουρασικής ηλικίας και την τρίτη φάση με πτυχές ανοιχτής διεύθυνσης (Τριτογενές) (Ιωαννίδου Ε. & ΣΙΑ Ο.Ε., 2004). Από γεωλογικής και υδρογεωλογικής πλευράς, τα υλικά που δομούν το νομό Καβάλας (εικ. 2), ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες (Τρίτσης, 2023):

- **Κρυσταλλικά πετρώματα (γρανίτης, γνεύσιοι):** Πρόκειται για σκληρά συμπαγή πετρώματα, θεωρητικά αδιαπέρατα από το νερό. Όμως λόγω των τεκτονικών διαταραχών που έχει υποστεί η ευρύτερη περιοχή, τα πετρώματα αυτά έχουν ρωγματοωθεί και φιλοξενούν στο σύστημα των ρωγμών υδροφόρα στρώματα ποικίλου δυναμικού. Οι γρανίτες καταλαμβάνουν το 90% του Συμβόλου όρους, οι οποίοι λόγω των ρωγματώσεων, έχουν επιφανειακά αποσαθρωθεί και έτσι προσφέρονται σήμερα για διάφορες καλλιέργειες. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί, ότι τα γρανιτικά πετρώματα της περιοχής σε μεγαλύτερο βάθος, φιλοξενούν θερμομεταλλικά νερά, τα οποία πολλές φορές εκδηλώνονται μέσα από τις αρδευτικές υδρογεωτρήσεις. Τα γνευσιακά πετρώματα εντοπίζονται στο Παγγαίο όρος, στα όρη της Λεκάνης και στη νήσο Θάσο, και η επιφάνειά τους δεν προσφέρεται για καλλιέργεια.

- **Μεταμορφωμένα πετρώματα (γνευσιακά, σχιστόλιθοι):** Η τεκτονική δραστηριότητα στην περιοχή, είναι έντονα αποτυπωμένη και στα μεταμορφωμένα πετρώματα, κυρίως με την εμφάνιση ρωγματώσεων σε όλη την έκτασή τους.
- **Μάρμαρα:** Τα μάρμαρα αποτελούν την κυριότερη υδρογεωλογική μονάδα του νομού. Σήμερα, η μάζα της κύριας εξάπλωσης του μαρμάρου, παρατηρείται στο Παγγαίο όρος, στα όρη Λεκάνης και στη Θάσο. Το μέσο πάχος των στρωμάτων μαρμάρου κυμαίνεται στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ 150-180m. Λόγω των επανειλημμένων τεκτονικών καταπονήσεων, τα μάρμαρα σε ολόκληρη τη σειρά της Ροδοπικής μάζας εμφανίζονται καρστικοποιημένα και σε μεγάλο βαθμό ρωγματωμένα, πληρωμένα με αργιλικά υλικά και αέρα, δυσκολεύοντας την συνολική αποληψιμότητά τους. Επιφανειακά το μαρμαροφόρο κοίτασμα καλύπτεται από διαβρωμένο μάρμαρο πάχους 1-2m περίπου, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλό συντελεστή απόληψης εμπορεύσιμου μαρμάρου. Αξίζει να σημειωθεί, πως στην υπό μελέτη περιοχή, παρατηρούνται δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων κατά την εξάπλωση των μαρμάρων καθώς και πολλά υπό-κατακόρυφα επίπεδα ρωγμών (πληροφορίες από προσωπική επικοινωνία με εργαζόμενο στο λατομείο). Πιο συγκεκριμένα, οι μαρμαροφόρες εμφανίσεις διακρίνονται σε (*Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας Διακοσμητικών Πετρωμάτων «Λίθος», Ε.Α.Γ.Μ.Ε.*):
 - Μάρμαρα με ατελή στρώση ή συμπαγή, λευκά μάρμαρα μεγάλου πάχους (που πιθανόν προέρχονται από υφαλογενείς ασβεστολίθους).
 - Τοπικά αποσφηνούμενες μεταβάσεις από τα συμπαγή μάρμαρα, σε τεφρά μάρμαρα με καλή στρώση, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους ή γνευσίους.
 - Ανοιχτόχρωμα ή σκοτεινότεφρα, ζωνώδη μάρμαρα, με καλή ή λεπτή στρώση σε στρώματα ή φακούς. Τα τεφρά μάρμαρα, περιέχουν σε κυμαινόμενα ποσά χαλαζία, μοσχοβίτη και αλβίτη.
- **Ιζηματογενή πετρώματα:** Τα ιζηματογενή πετρώματα υποδιαιρούνται στα παλαιότερα, τα οποία εντοπίζονται σε λοφώδη ανάγλυφα και στα κράσπεδα των ορεινών περιοχών, καθώς και στις νεότερες αποθέσεις, που εντοπίζονται στα πεδινά κυρίως τμήματα. Τα ιζήματα αυτά λοιπόν, αποτελούνται από υλικά τόσο διαφορετικών ηλικιών, όσο και διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης.



Εικόνα 2. Ο γεωλογικός χάρτης με τα λατομικά κέντρα της Ανατολικής Μακεδονίας (Χατζηπαναγής Ι. & Βουγιούκας Δ., 2005). Σε **κόκκινο πλαίσιο** εντοπίζεται η υπό μελέτη περιοχή (Στενωπός), η οποία ανήκει ως γεωλογική ενότητα στα μεταμορφωμένα πετρώματα.

2.5. Hemarus Grey

Από το υπό μελέτη λατομείο, εξορύσσεται το σκληρό ασβεστίτικο μάρμαρο “Hemarus Grey”, της ενότητας Παγγαίου της μάζας Ροδόπης. Αναλυτικότερα, οι εξορυγμένες μαρμάρινες «φέτες» μήκους έως 9m, πλένονται και κόβονται στο λατομείο σε παραλληλόγραμμους ορθογωνισμένους όγκους⁴, μεγέθους μικρότερου από $3\text{m} \times 2\text{m} \times 1.8\text{m}^5$ και μάζας 6 - 7tn, λόγω του περιορισμένου μεγέθους κοπής του

⁴ Πριν την μεταφορά του εξορυγμένου ογκομαρμάρου στο εργοστάσιο για την κυρίως επεξεργασία, γίνεται μια πρώτη επεξεργασία, συνήθως στην πλατεία του λατομείου, η οποία ονομάζεται ορθογωνισμός. Συνήθως, πραγματοποιείται με τα γνωστά μέσα που χρησιμοποιούνται και στην εξόρυξη μαρμάρου, όπως η μέθοδος της συρματοκοπής, η χρήση αλυσοπρίονου και με την διάνοιξη πυκνών διατηρημάτων μικρής διαμέτρου 33mm, όπου με την βοήθεια σφηνών αποκολλάται το τμήμα αυτό. Αρκετές φορές, εάν οι όγκοι έχουν μία τουλάχιστον επίπεδη επιφάνεια, μπορούν να μεταφερθούν στο εργοστάσιο, όπου εκεί με καταλληλότερα μέσα θα ορθογωνιστούν (δίσκος κοπής, μονόλαμα, μονόσυρμα κ.ά.).

⁵ Το εύρος των τυπικών διαστάσεων τους (μήκος $\times$ πλάτος $\times$ ύψος) πρέπει να είναι μεταξύ $2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ και $3.2\text{m} \times 2\text{m} \times 1.8\text{m}$ (United Nations, 1976).

μηχανήματος, καθώς και της μέγιστης επιτρεπόμενης μάζας μεταφοράς, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 25tn⁶ (πληροφορίες από προσωπική επικοινωνία με εργαζόμενο στο λατομείο). Αμέσως μετά, καθορίζεται η ποιότητα των τεμαχών μαρμάρου ή ογκομαρμάρων⁷, σύμφωνα με το χρώμα, τις διαστάσεις αλλά και τις περιεχόμενες σε αυτά ρωγματώσεις και φθορές⁸. Έπειτα, τα εξορυγμένα τεμάχη μαρμάρου, μεταφέρονται για περαιτέρω επεξεργασία στα εργοστάσια που διατηρεί η εταιρεία.

Παράλληλα με τα ογκομάρμαρα, παράγονται δύο ακόμα υποπροϊόντα, τα «ξωφάρια» και οι «λατύπες». Τα «ξωφάρια» είναι όγκοι ακανόνιστου σχήματος και σχετικά μεγάλων διαστάσεων, από τους οποίους είναι δυνατή η παραγωγή πλακών. Λόγω όμως του ακανόνιστου σχήματός τους, οι πλάκες που παράγονται από τα «ξωφάρια» εμφανίζουν μεγάλο ποσοστό απωλειών, και συνήθως είναι μικρότερων διαστάσεων και επομένως μικρότερης αξίας ανά m². Οι «λατύπες» από την άλλη πλευρά, όπως και τα «ξωφάρια», είναι κομμάτια μαρμάρου ακανόνιστου σχήματος, πολύ μικρών όμως διαστάσεων, έτσι ώστε να μην επιτρέπουν την παραγωγή πλακών. Οι «λατύπες» χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή υποπροϊόντων του λατομείου, δηλαδή για την παραγωγή μαρμαροψηφίδων, μαρμαρόσκονης, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά, καλλυντικά ή και να αξιοποιηθούν από άλλες εταιρείες (Πηγή: orykta.gr). Σε ορισμένες περιπτώσεις, ακολουθώντας σύγχρονες τεχνικές, επιλέγεται η εφαρμογή ρητίνης, δείκτη και πλέγματος για την κάλυψη των ρωγμών, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

⁶ Το μέγεθος ενός τεμάχους μαρμάρου, είναι συνάρτηση του βάρους του και αποτελεί ζήτημα ασφάλειας της μεταφοράς, του χειρισμού και της επεξεργασίας του (Mosch et al, 2011).

⁷ Τα εξορυγμένα τεμάχη μαρμάρου διακρίνονται στις ποιότητες Α, Β και τις υποκατηγορίες τους.

⁸ Επιδιώκεται τα τεμάχη μαρμάρου να είναι «υγιή», δηλαδή, απαλλαγμένα από εσωτερικά ελαττώματα και οι διαστάσεις τους να είναι οι μεγαλύτερες δυνατές, αφού η τιμή πώλησης ενός υλικού σε μεγάλους ορθογωνισμένους κύβους, κυβισμού μέχρι 10m³ και βάρους μέχρι 28tn, είναι υψηλότερη από την τιμή σε όγκους μικρότερων διαστάσεων.

2.5.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Το μάρμαρο “Hemarus Grey” (εικ. 3), είναι ομοιογενές με λευκό και υπόλευκο φόντο, με έντονες γκρι βένες (αποκαλούμενες και «νερά» ή «ραβδώσεις») πάχους 0.5-1cm, το οποίο προσφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά μοτίβα. Με οριζόντιες βένες, με διαγώνιες βένες, σε ένα μοτίβο που στη γλώσσα του κλάδου του μαρμάρου συχνά αποκαλείται ως «συννεφάτο», και σε ένα μοτίβο με χαρακτηριστικά έντονη κίνηση. Ο κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους του “Hemarus Grey”, προσδίδει ένα τελείως διαφορετικό αισθητικό αποτέλεσμα και προσφέρει πολλαπλές διακοσμητικές λύσεις. Το συγκεκριμένο μάρμαρο, είναι ιδανικό τόσο για εσωτερική, όσο και για εξωτερική χρήση, καθώς ενδείκνυται ακόμα και για πολύ δύσκολες κλιματικές συνθήκες (Πηγή: stonegroup.gr).



Εικόνα 3. Απεικόνιση ενός τεμάχους μαρμάρου “Hemarus Grey”

2.5.2. Σύσταση

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, καταδεικνύουν την ύπαρξη ενός καθαρού ασβεστιτικού μαρμάρου, το οποίο καταλαμβάνει μεγάλη έκταση στον συγκεκριμένο λατομικό χώρο. Αναλυτικότερα, η κοκκομετρική ανάλυση, έδειξε ότι πρόκειται για ένα συμπαγές και μεσόκοκκο πέτρωμα. Η κύρια ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου, αποτελείται από κρυσταλλική μάζα ημίλευκου χρώματος με ευμεγέθεις κρυστάλλους ασβεστίτη, ενώ ως επουσιώδες συμμετέχει ο δολομίτης, καθώς παρατηρείται μικρή δολομιτίωση στους κρυστάλλους ασβεστίτη. Παράλληλα, διακρίνονται στην κρυσταλλική μάζα και αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά. Αναλυτικότερα, η χημική και ορυκτολογική σύσταση του συγκεκριμένου μαρμάρου,

της ευρύτερης περιοχής του λατομικού χώρου, σύμφωνα με τις αναλύσεις του ΙΓΜΕ, δίνονται στον **Πίνακα 2** (Ιωαννίδου Ε. & ΣΙΑ Ο.Ε., 2004).

Πίνακας 2. Χημική – ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου “Hemarus Grey” (Πηγή: ΙΓΜΕ).

Χημική Ένωση	Περιεκτικότητα	Ορυκτολογική Σύσταση	
CaO	54.50%	Ασβεστίτης	97%
MgO	0.64%		
Al ₂ O ₃	< 0.05%		
Fe ₂ O ₃	< 0.05%	Δολομίτης	1%
SiO ₂	0.2 %	Χαλαζίας	2%
K ₂ O	< 0.01%		
Na ₂ O	0.01%		
MnO	< 0.01%		
Πτητικά	43.60%		

2.5.3. Φυσικές ιδιότητες

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής των μαρμάρων, διότι η συγκεκριμένη αντοχή, παίζει ρόλο καθοριστικής σημασίας για τη χρήση των μαρμάρων σε εσωτερικές και εξωτερικές δαπεδοστρώσεις κατοικιών και κοινόχρηστων χώρων. Για τον υπολογισμό του καθαρού εφελκυσμού, εφαρμόστηκαν μέθοδοι έμμεσου εφελκυσμού, όπως κάμψη (δοκιμή τριών σημείων), διαμετρική θλίψη (δοκιμή αιχμής) κ.α. Λόγω της ασβεστιτικής του ιδιότητας και των υπόλοιπων τεχνικών του χαρακτηριστικών, το συγκεκριμένο μάρμαρο μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία σε κάθε κατασκευαστικό έργο, χωρίς πιθανά τεχνικά προβλήματα κατά την εγκατάστασή του. Στον **Πίνακα 3**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών, αναφορικά με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου (Ιωαννίδου Ε. & ΣΙΑ Ο.Ε., 2004).

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου “Hemarus Grey”.

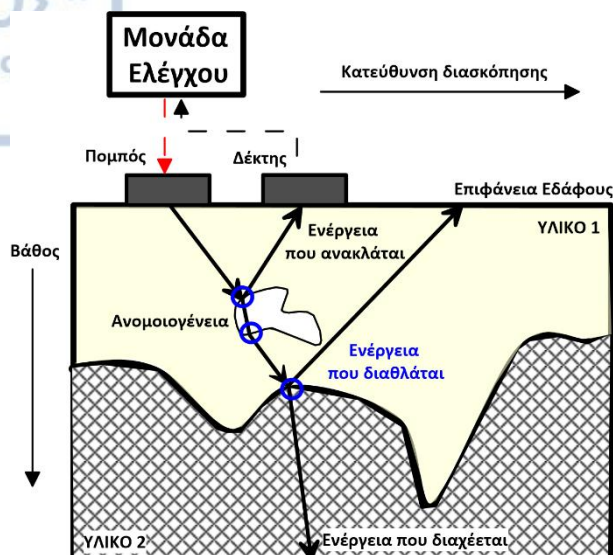
A/A	Φυσικές Ιδιότητες	Τιμή
1	Φαινόμενο ειδικό βάρος DIN 52102	Kgr/m ³ 2,711.00
2	Συντελεστής ανοικτού πορώδους DIN 52102	Wt% 0.24
3	Συντελεστής απορροφητικότητας DIN 52103	Wt% 0.09
4	Μέτρο ελαστικότητας ASTM C-170	GPa 29.00
5	Αντοχή σε θλίψη (ξηρά κατάσταση) DIN 52105	N/mm ² 57.85
6	Αντοχή σε θλίψη (υγρή κατάσταση) DIN 52105	N/mm ² 51.30
7	Αντοχή σε κάμψη (ξηρά κατάσταση) DIN 52112	MPa 16.35
8	Αντοχή σε κάμψη (ξηρά κατάσταση) DIN 52112	MPa 16.35
9	Αντοχή σε θλίψη (μετά από ψύξη - απόψυξη) DIN 52104 & 105	N/mm ² 54.78

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 3^ο

Μέθοδος του Γεωραντάρ

(Ground Penetrating Radar – GPR)

Η μέθοδος του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR) είναι μια σύγχρονη, υψηλής ανάλυσης (Davis & Annan, 1989) και μη-καταστρεπτική γεωφυσική μέθοδος (Non-Destructive Testing, NDT). Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη διάδοση και σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών (H/M) παλμών στο υπέδαφος, μικρής διάρκειας 1-20ns (Prego et al., 2017) και συχνότητας εύρους 10MHz-1GHz (Haenninen et al., 1992). Όταν τα H/M κύματα συναντήσουν μία διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, τότε ένα μέρος της ενέργειάς τους ανακλάται στη διεπιφάνεια και η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διέρχεται από τη διεπιφάνεια προς το βαθύτερο υλικό (εικ. 4). Τα H/M κύματα που ανακλώνται, ανιχνεύονται και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής τους και το πλάτος τους (Burger et al., 2006; Witten, 2006), υπό την προϋπόθεση πως το σήμα επιστροφής από το στόχο, είναι μεγαλύτερου πλάτους από τα άλλα σήματα θορύβου. Οι ανακλάσεις καταγράφονται συνεχώς, με αποτέλεσμα για κάθε οριζόντια θέση του εξοπλισμού στο έδαφος να υπάρχουν χιλιάδες μετρήσεις. Η μετέπειτα επεξεργασία αυτών των καταγραφών, οδηγεί στη δημιουργία συνεχών τομών του υπεδάφους, στις οποίες παρέχονται σημαντικές πληροφορίες και απεικονίζονται τόσο η θέση των υπεδάφιων στόχων, όσο και τα χαρακτηριστικά των μέσων διάδοσης, κυρίως για τη μελέτη ρηχών δομών, π.χ. για τον έλεγχο του οδοστρώματος, καθώς και για την εξέταση αστοχιών σε γέφυρες και κατασκευές (Daniels et al., 1997-1998).



Εικόνα 4. Απεικόνιση της λειτουργίας του γεωραντάρ (GPR), πάνω σε ένα μοντέλο της Γης αποτελούμενο από δύο υπεδάφια στρώματα, όπου ο δέκτης έχει τοποθετηθεί σε απόσταση από τον πομπό.

3.1. Ιστορική εξέλιξη

Η ιστορία του ραντάρ ξεκινά από το φυσικό Heinrich Hertz, ο οποίος κατασκεύασε τις πρώτες κεραίες, με σκοπό την εξακρίβωση της H/M θεωρίας του James Clerk Maxwell (Skolnic, 1980). Η πρώτη παγκόσμια απόπειρα χρήσης των H/M κυμάτων για τη διασκόπηση του εδάφους, έλαβε χώρα το 1904 από τον Christian Hulsmeyer και ακολούθησε η περιγραφή της χρήσης τους για τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων, από τους Heinrich Löwy και Gotthelf Leimbach το 1910 στη Γερμανία, όπου χρησιμοποιήθηκαν συνεχή κύματα, μέχρι το 1926 που χρησιμοποιήθηκε η διάδοση παροδικών κυμάτων, από τον Dr. Hülsenbeck. Το πρώτο σύστημα ραντάρ αναπτύχθηκε το 1935 από τον Sir Robert WatsonWatt, το οποίο και αξιοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, καθώς και κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ. Από το 1930 και έπειτα, η χρήση των H/M κυμάτων εφαρμόστηκε με σκοπό την απεικόνιση του βάθους της στάθμης του νερού το 1956 σε αποθέσεις αλάτων, στη μελέτη παγετώνων (Waite & Schmidt, 1962), με την πρώτη απόπειρα να έχει καταγραφεί από τον W. Stern το 1929.

Μέχρι το 1980, η σκέδαση των H/M κυμάτων στους παγετώνες έγινε πιο κατανοητή, καθώς και η ανάγκη χρήσης χαμηλότερης συχνότητας (Watts, 1976), με το Γεωλογικό Ινστιτούτο του Καναδά το 1975, να διεξάγει έρευνες με κύριο στόχο την κατανόηση του παγετώνα στην καναδική Αρκτική. Το 1976, οι Moffat και Puskar κατασκεύασαν

ένα από τα πρώτα συστήματα GPR που χρησιμοποιήθηκαν σε γεωλογικές εφαρμογές, ενώ παράλληλα συνέισφεραν στην ανάπτυξη των βασικών αρχών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των H/M κυμάτων. Την ίδια χρονιά, η NASA χρησιμοποίησε το πρώτο ψηφιακό παλμικό ραντάρ στην αποστολή της “Apollo 17” στη Σελήνη, με σκοπό να χαρτογραφηθεί το υπέδαφός της (Simmons *et al.*, 1972). Οι ανωμαλίες που εντοπίστηκαν, ονομάστηκαν “Radar Echoes”, και τα βάθη τους υπολογίστηκαν με προσεγγιστικές μετρήσεις ταχυτήτων, που προσδιορίστηκαν με βάση τα εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Βασική ανακάλυψη αποτέλεσε η κατανόηση των κυματικών πεδίων σχετικά με τις κεραίες στην επιφάνεια του εδάφους και η τροποποιημένη κατευθυντικότητα της κεραίας. Παράλληλα, την ίδια χρονιά πραγματοποιήθηκε η πρώτη εφαρμογή του GPR στην αρχαιολογία στο Νέο Μεξικό (Vickers *et al.*, 1976) για τον εντοπισμό θαμμένης τοιχοποιίας. Λίγα χρόνια αργότερα, πειράματα με το GPR πραγματοποιήθηκαν και από το Ινστιτούτο Ερευνών του Stanford, όπου έγιναν μετρήσεις από τον Dolphin (1978) για αρχαιολογικές εφαρμογές. Εκτεταμένες εργασίες πραγματοποιήθηκαν επίσης σε ανθρακωρυχεία στον δυτικό Καναδά, αφού ο άνθρακας αποτελεί ένα διηλεκτρικό υλικό χαμηλής απώλειας.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε εξοπλισμός για αστικούς σκοπούς, αρχικά από την GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.) αλλά και από άλλες κατασκευάστριες εταιρείες συστημάτων GPR, όπως είναι η Sensors & Software Inc., η ERA Technologies, και η Radarteam. Αναλυτικότερα, το 1981 ιδρύθηκε από τον A. Peter Annan η εταιρεία A-Cubed Inc., με σκοπό την ανάπτυξη νέων συστημάτων GPR τα οποία διατέθηκαν στο εμπόριο με την ίδρυση της Sensors & Software. Ένα χρόνο μετά, ο Ulriksen και άλλοι επιστήμονες, ανέπτυξαν βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ. Στα τέλη της ίδιας δεκαετίας, η OYO Corporation of Japan ανέπτυξε ένα προϊόν ραντάρ που το ονόμασε “Georadar”, το οποίο και γνώρισε κάποια εμπορική επιτυχία στην Ευρώπη. Σύμφωνα με την Wollny, τα πρώτα οικονομικά προσιτά συστήματα GPR πωλήθηκαν το 1985 και τα πρώτα ολοκληρωμένα βιβλία αναφοράς, γράφηκαν στη δεκαετία του 1990.

Τις επόμενες δεκαετίες, η τεχνική της διάδοσης παροδικών H/M κυμάτων εξελίχθηκε σημαντικά, με αποτέλεσμα να γίνουν εκτεταμένες μελέτες σε παγετώνες, ενώ αργότερα το ενδιαφέρον στράφηκε στην μελέτη κατασκευών και των αστοχιών σε αυτές, καθώς και πολλών εν εξελίξει ερευνών, οι οποίες διεξάγονται από

στρατιωτικούς αλλά και εμπορικούς οργανισμούς (Dolphin, 1997). Η εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, είχε ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα κατασκευής φορητών συσκευών GPR, ψηφιακής καταγραφής του σήματος και χρήσης καλωδίων οπτικών ινών, την πολλαπλή απόκτηση, ψηφιακή επεξεργασία και 3D απεικόνιση των δεδομένων. Σήμερα, υπάρχουν διάφορες εταιρείες που παράγουν συστήματα GPR ενώ άλλες παρέχουν υπηρεσίες μετρήσεων. Επιπλέον, τα πανεπιστήμια παγκοσμίως διεξάγουν έρευνες στον τομέα των συστημάτων ραντάρ διείσδυσης εδάφους.

3.2. Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική (H/M) θεωρία

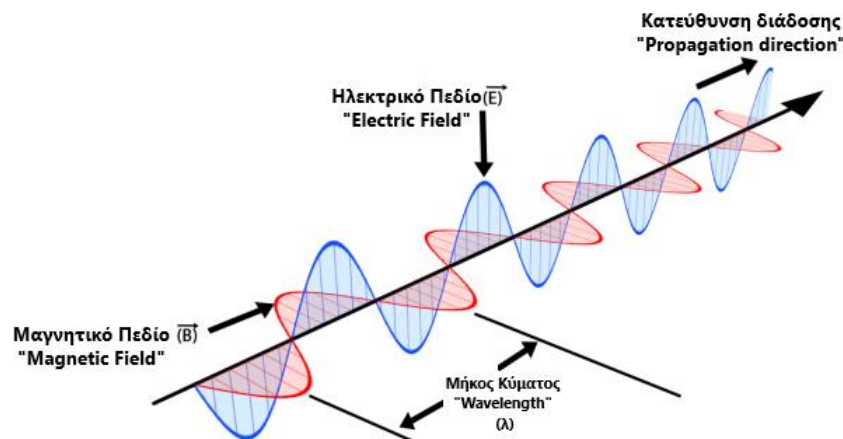
Από τα πρώτα πειράματα του Θαλή τον 6ο αιώνα π.Χ. μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα μ.Χ., οι επιστήμονες μελετούσαν τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό, ως δύο διαφορετικές και ασύνδετες μεταξύ τους θεωρίες. Παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Hans Christian Oersted, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί φαινόμενα μαγνητισμού περνώντας από έναν αγωγό, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι οι δύο προαναφερθέντες κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους. Πολλοί ερευνητές, όπως ο Michael Faraday και ο Heinrich Rudolf Hertz, συνέβαλαν στη βελτίωση και την ανάπτυξη της νέας αυτής επιστήμης, ενώ ο Άγγλος φυσικός James Clerk Maxwell ανέπτυξε το 1857 τη θεωρία της H/M ακτινοβολίας και την τελειοποίησε το 1873, η οποία αποτελεί μέχρι και σήμερα τη βασική μαθηματική εξήγηση της συμπεριφοράς των H/M κυμάτων.

Καθώς δημιουργείται εναλλασσόμενο ρεύμα στη διάταξη του διακένου σπινθήρων (Oscillating Molecular Dipole), στη χαρακτηριστική συχνότητα κυκλώματος δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, το οποίο ταλαντεύεται σε οριζόντιο επίπεδο. Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, με τη σειρά του, διεγείρει ένα ηλεκτρικό πεδίο έτσι ώστε μία σειρά ηλεκτρικών και μαγνητικών ταλαντώσεων να συνδυάζονται κατά την ακτινοβολία και διάδοση του H/M κύματος στον ελεύθερο χώρο, με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Τα H/M κύματα δηλαδή, ορίζονται ως υπερτιθέμενες ταλαντώσεις ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου, οι οποίες είναι κάθετες η μία στην άλλη και κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης, οι οποίες αφού συζευχτούν, παρουσιάζουν τυπική κυματική συμπεριφορά (εικ. 5). Οι διαφορές μεταξύ των ποικίλων τύπων των H/M κυμάτων, σχετίζονται με τη συχνότητα (f) και το μήκος κύματός τους (λ), ενώ ταυτόχρονα εξαρτώνται από την ταχύτητα και υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$V = f\lambda \quad (3.1)$$

Οι ιδιότητες της διάδοσης των Η/Μ κυμάτων στο κενό είναι οι εξής:

- Διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός
- Απαιτούν μέσο για διάδοση
- Είναι εγκάρσια
- Δεν εκτρέπονται από ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο
- Μπορεί να είναι πολωμένα



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση ενός επίπεδου Η/Μ κύματος, που έχει δημιουργηθεί από πυκνωτή εκκένωσης ή από ένα ταλαντευόμενο μοριακό δίπολο, και διαδίδεται σε ομογενή χώρο σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ταλάντωσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

3.3. Αρχή λειτουργίας GPR

Η λειτουργία του GPR βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά των Η/Μ πεδίων, καθώς και την αλληλεπίδραση αυτών με την ύλη (Annan, 2003). Για ετερογενή, ιστροπικά, γραμμικά και στατικά μέσα οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell στην κλασική, διαφορική τους μορφή περιγράφονται ως εξής (Stratton, 1941):

1. **Νόμος επαγωγής του Faraday**, ο οποίος ορίζει ότι ένα ηλεκτρικό πεδίο παράγεται από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

2. **Νόμος του Ampere – Maxwell**, ο οποίος ορίζει ότι το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα ή από ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.3)$$

3. **Νόμος του Gauss**, ο οποίος συσχετίζει ένα ηλεκτρικό πεδίο με τις πηγές του.

$$\nabla \times \vec{D} = q \quad (3.4)$$

4. **Νόμος του Gauss** για τον μαγνητισμό.

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (3.5)$$

Όπου:

- $\vec{E}$ είναι το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)
- $\vec{B}$ είναι το διάνυσμα πυκνότητας της μαγνητικής ροής (Tesla ή Weber/m²)
- $\vec{D}$ είναι το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης (C/m²)
- $\vec{H}$ είναι το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε (A/m)
- q είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου (C/m³)
- $\vec{J}$ είναι το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος σε (A/m²)
- t είναι ο χρόνος (s)

3.3.1. Καταστατικές εξισώσεις

Οι **καταστατικές εξισώσεις (Constitutive equations)** παρέχουν μια μακροσκοπική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο τα ηλεκτρόνια, άτομα και μόρια ενός υλικού αποκρίνονται μαζικά όταν εφαρμόζεται ένα H/M πεδίο και εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού μέσου (Jol, 2009). Αν λοιπόν θεωρηθεί η ιδεατή περίπτωση ενός ομοιόμορφου, ομογενούς και ισότροπου μέσου, οι εξισώσεις που συνδέουν τη διηλεκτρική μετατόπιση (D) με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E), και την μαγνητική επαγωγή (B) με την ένταση του μαγνητικού πεδίου (H), διατυπώνονται αντιστοίχως ως εξής:

$$D = \varepsilon \times E \quad (3.6)$$

$$B = \mu \times H \quad (3.7)$$

Η συμπλήρωση των παραπάνω καταστατικών σχέσεων, γίνεται με τη συμπερίληψη του νόμου του Ohm στη γενική του μορφή:

$$J = \sigma \times E \quad (3.8)$$

Όπου, ϵ είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου (F/m), μ είναι μαγνητική διαπερατότητα του μέσου (H/m) και σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου (S/m).

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω εξισώσεων και παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα:

$$\Delta^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

$$\Delta^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Η λύση των δύο παραπάνω εξισώσεων έχει την μορφή:

$$V(z) = V_0 e^{-\alpha r} e^{i(\omega t - \beta r)} \quad (3.11)$$

Όπου:

- $i = \sqrt{-1}$
- α : Συντελεστής απόσβεσης (dB/m)
- β : Συντελεστής διάδοσης ή φάσης (rad/m)
- ω : Γωνιακή συχνότητα (rad/s)
- f : Συχνότητα (1/s)
- V : Ταχύτητα φάσης ($V = \omega/\beta$) (m/s)
- λ : Μήκος κύματος ($\lambda = 2\pi/\beta$) (m)

3.4. Φυσικές ιδιότητες

Στις περισσότερες εφαρμογές του GPR, η δυνατότητα διάκρισης μεταξύ υλικών και η χαρτογράφηση διεπιφανειών στο υπέδαφος, εξαρτάται από τη διαφορά στις ηλεκτρικές ιδιότητές τους (καθώς οι μαγνητικές διακυμάνσεις θεωρούνται συνήθως ανύπαρκτες), με αποτέλεσμα μέρος των H/M κυμάτων να ανακλώνται, διαθλώνται και να εξασθενούν (αποσβένουν). Κατ' επέκταση, επιδρούν στην ταχύτητα διάδοσης, στο πλάτος, στο μήκος κύματος καθώς και στο βάθος διείσδυσης των κυμάτων, προκαλώντας διαφοροποιήσεις στην απόκριση του GPR. Οι ιδιότητες αυτές είναι η **διηλεκτρική διαπερατότητα**, η **ηλεκτρική αγωγιμότητα** και η **μαγνητική διαπερατότητα**. Στις πρακτικές εφαρμογές με την τεχνική του γεωραντάρ, οι παράμετροι αυτές λαμβάνονται ως βαθμωτά μεγέθη, συχνά αναφερόμενες και ως

«διηλεκτρικές ιδιότητες» των υλικών, ενώ για ανισότροπα υλικά είναι τανυστές και επίσης δύναται να είναι μη γραμμικές. Στον πίνακα που ακολουθεί, δίνονται προσεγγιστικά τιμές της σχετικής διαπερατότητας (ή αλλιώς, διηλεκτρικής σταθεράς), της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας διάδοσης και της απόσβεσης των Η/Μ κυμάτων για διάφορους τύπους υλικών (Annan, 2003).

Πίνακας 4. Στον πίνακα παρατίθενται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r), της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ), οι ταχύτητες διάδοσης (V) και απόσβεσης (α) των Η/Μ κυμάτων, για διάφορους τύπους υλικών, με κεραία συχνότητας 100MHz.

Τύποι Υλικών	Διηλεκτρική Σταθερά	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	Ταχύτητα	Απόσβεση
	ϵ_r	σ (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Αέρας	1	0	0.3	0
Αποσταγμένο νερό	80	0.01	0.033	0.003
Γλυκό νερό	80	0.5	0.033	0.1
Θαλασσινό νερό	80	3000	0.01	1000
Ξηρά άμμος	3-5	0.01	0.15	0.01
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0.09	1-100
Ιλύς	5-30	1-100	0.07	1-100
Άργιλος	5-40	2-1000	0.06	1-300
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ξηρό άλας	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Πάγος	3-4	0.01	0.16	0.01

3.4.1. Διηλεκτρική διαπερατότητα

Η διηλεκτρική επιτρεπτότητα ή διηλεκτρική διαπερατότητα ϵ (Dielectric Permittivity) είναι ένα μιγαδικό, εξαρτώμενο από τη συχνότητα μέγεθος, χαρακτηριστικό του κάθε διηλεκτρικού μέσου⁹. Εκφράζει την ικανότητα του υλικού μέσου να αποθηκεύει και να απελευθερώνει Η/Μ ενέργεια, υπό τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου (Sheriff, 1997; Annan, 2009). Εναλλακτικά, περιγράφει το βαθμό της ηλεκτρικής πόλωσης ενός υλικού, υπό την επίδραση εφαρμοζόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου (Olhoeft, 1998; Baker et al., 2007). Η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα είναι ένας πολύ πιο βολικός τρόπος έκφρασης της διαπερατότητας και αποτελεί πιο εύκολο τρόπο σύγκρισης των υλικών (Annan, 2003). Πρακτικά, η

⁹ Η διηλεκτρική σταθερά είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης (ευκολία πόλωσης ενός υλικού) και της συχνότητας.

διαπερατότητα σε χαμηλές συχνότητες ($\leq 1\text{GHz}$) αποτελείται μόνο από το πραγματικό της μέρος (Chen & Zhang, 2009). Επομένως, η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής μετατόπισης προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και δίνεται από τη σχέση (Takahashi et al., 2012):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.12)$$

Όπου, ε είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου με μονάδες F/m, ε_r είναι η σχετική διαπερατότητα και ε_0 είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού (8.8542×10^{-12} F/m).

Ο κυριότερος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στη διηλεκτρική διαπερατότητα είναι η υγρασία (Conyers, 2004). Για παράδειγμα, υλικά με περισσότερη υγρασία έχουν μεγαλύτερη τιμή διηλεκτρικής διαπερατότητας, συνεπώς καλύτερη κατακόρυφη διακριτική ικανότητα και μικρότερο βάθος διείσδυσης, σε αντίθεση με τα άνυδρα υλικά. Ακόμη, μπορεί να επηρεαστεί και από τη θερμοκρασία.

3.4.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα σ (Electrical Conductivity)** εκφράζει την ικανότητα ή την ευκολία διέλευσης ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων από ένα υλικό, όταν σε αυτό εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (Saarenketo, 1998; Jol, 2009). Εξαρτάται από τη λιθολογία, τη στρωματογραφία, τη ροή των υπόγειων υδάτων, την παρουσία αργίλων, το πορώδες και την υγρασία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα περιγράφεται μέσω της γενικής μορφής του νόμου του Ohm, ο οποίος ορίζει ότι για πολλά υλικά (συμπεριλαμβανομένων και των περισσότερων μετάλλων) ο λόγος της πυκνότητας του ρεύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο είναι ίσος με σ και ανεξάρτητος από το πεδίο που παράγει το ρεύμα (Serway, 1990). Επομένως, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ελέγχει τις ωμικές ιδιότητες του μέσου και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ (S/m)} \quad (3.13)$$

Όπου, ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ωm).

Για υλικά με υγρασία, η αγωγιμότητα μέσω του νόμου του Archie για την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα (Archie, 1942) είναι η εξής:

$$\sigma = \alpha \varphi^m s^n \sigma_w + \sigma_c \text{ (S/m)} \quad (3.14)$$

Όπου, m είναι σταθερά ίση με 1.3–2.5, α είναι σταθερά ίση με 0.4–2, s είναι ο κορεσμός του νερού, n είναι σταθερά ίση με περίπου 2, σ_w είναι η αγωγιμότητα των ρευστών των πόρων (S/m) και σ_c είναι η επιφανειακή αγωγιμότητα ενός εδάφους (S/m).

3.4.3. Μαγνητική διαπερατότητα

Ως **μαγνητική διαπερατότητα μ (Magnetic Permeability)** ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να μαγνητίζεται παρουσία ενός H/M πεδίου. Τα υλικά που είναι πιο μαγνητικά διαπερατά θα διεγείρονται περισσότερο και θα αποσβένουν το μαγνητικό πεδίο εξασθενώντας τελικά το H/M κύμα και καταλήγοντας σε ρηχή υπεδάφια απεικόνιση (Annan, 2009; Conyers, 2004). Ομοίως με την ηλεκτρική διαπερατότητα και την αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα είναι ένας μιγαδικός αριθμός, ως αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων, όπου η πραγματική του συνιστώσα αντιπροσωπεύει την αποθηκευμένη ενέργεια και η φανταστική του συνιστώσα αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας, όταν υπόκειται σε μαγνητικό πεδίο (Powers, 1997). Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ενός μέσου δίνεται από την σχέση:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.15)$$

Όπου, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m είναι η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό.

Για τα περισσότερα ιζήματα, πετρώματα και εδάφη που αποτελούνται από μη σιδηρομαγνητικά ορυκτά, η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι μικρή και περίπου ίση με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού (Ulaby et al., 2015), δηλαδή κοντά στη μονάδα. Στην περίπτωση που αυτά αποτελούνται από σιδηρομαγνητικά υλικά, δηλαδή όταν ο σίδηρος ή τα οξείδια του σιδήρου είναι παρόντα σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στο υπέδαφος (van Dam & Schlager, 2000), τότε η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι μεγαλύτερη της μονάδας. Ωστόσο, για τα σιδηρομαγνητικά υλικά, η μαγνητική διαπερατότητα έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα του κύματος και στην εξασθένηση του σήματος.

3.5. Διεσδυτική ικανότητα

Στο GPR τα H/M κύματα διαδίδονται και εξασθενούν συναρτήσει του βάθους (**εικ. 6**). Η **εξασθένηση** ορίζεται ως ο ρυθμός απώλειας σε πλάτος για ένα H/M κύμα που διαδίδεται μέσω ενός υλικού, μετριέται σε dB και συμβαίνει να είναι ίδια αθροιστικά τόσο για την ένταση του πεδίου, όσο και για την πυκνότητα ισχύος. Στο κενό η έννοια

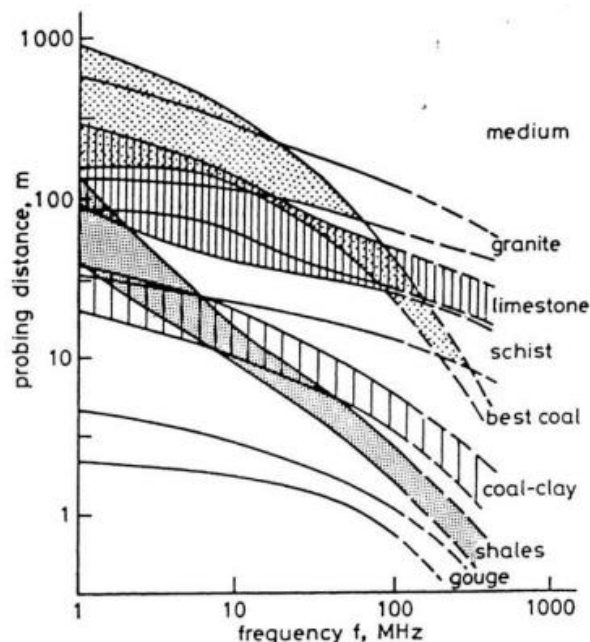
της απορρόφησης των H/M κυμάτων δεν υφίσταται, μιας και δεν υπάρχει τίποτα που να εμποδίζει τη διάδοση τους. Ωστόσο, στην ατμόσφαιρα μέρος της ενέργειας των H/M κυμάτων απορροφάται από τα άτομα και μόρια, με αποτέλεσμα αυτά να ταλαντώνονται. Η απόσβεση την οποία υφίστανται τα H/M πεδία, είναι λιγότερο εξαρτώμενη από τη συχνότητα εκπομπής σε πεπερασμένο εύρος φάσματος (1-1000MHz) (Annan, 2002). Η εξασθένιση του H/M σήματος, είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι:

- Η σφαιρική απόσβεση (γεωμετρική διασπορά), η οποία αναφέρεται στην ενέργεια που διαχέεται στο μέτωπο του κύματος, που είναι ένας καθαρός γεωμετρικός παράγοντας. Η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή των H/M κυμάτων. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα, εάν το υπόγειο μέρος της Γης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως τέλειο διηλεκτρικό (σταθερή ταχύτητα διάδοσης, $\alpha=0$), και τότε ο λαμβανόμενος διαδιδόμενος παλμός θα έχει το ίδιο σχήμα με τον παλμό εκκίνησης. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα.
- Μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης, συνεπάγεται μεγαλύτερη εξασθένιση του H/M κύματος (Annan, 2009; Conyers, 2004). Το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους είναι έστω και λίγο αγωγίμο, υπό την παρουσία ηλεκτρολυτών, αλάτων και αργιλικών ορυκτών, τα οποία συχνά κατακρατούν υγρασία, και έτσι μέρος της ενέργειας που διοχετεύεται, μετριάζεται ή μετατρέπεται σε ηλεκτρικά ρεύματα και διασκορπίζεται προτού φθάσει στο δέκτη (Conyers, 2004). Επομένως, η κεντρική συχνότητα του φάσματος της ακτινοβολίας που λαμβάνει η κεραία του δέκτη, είναι μικρότερη από την κεντρική συχνότητα εκπομπής. Για να αντιμετωπιστεί η απώλεια αυτή, το σήμα που λαμβάνεται, ενισχύεται, ώστε να είναι δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Conyers, 2004)¹⁰. Όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους ξεπερνά τα 10mS/m, η μέθοδος του γεωραντάρ δεν ενδείκνυται. Αντίθετα, στην περίπτωση «στεγνών» πετρωμάτων τα σήματα GPR διαδίδονται ως καθαρά κύματα, κυρίως δια ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, η θεώρηση ότι η διεξαγωγή μετρήσεων σε ξηρά περιβάλλοντα με την μέθοδο του γεωραντάρ είναι ιδανική, δεν αποτελεί πάντα

¹⁰ Βλ. υπό ενότητα 4.3.1

κανόνα. Αναλυτικότερα, η ενέργεια που χάνεται εξαιτίας της αγωγιμότητας οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς:

- Τα ηλεκτρόνια για να κινηθούν απορροφούν ενέργεια.
- Κατά την κίνηση τους μέσα στην μάζα του αγωγού, συγκρούονται με άλλα σωματίδια και μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε θερμική, λόγω των επαγωγικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού.
- Η μετακίνηση των ηλεκτρικών φορτίων δημιουργεί δευτερογενές Η/Μ πεδίο που αποσβένει μέρος της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Ανακλάσεις σε υπεδάφιους στόχους καθώς και η σκέδαση του Η/Μ κύματος από ανομοιογένειες διαστάσεων της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματός τους (ανακλαστήρες).



Εικόνα 6. Βάθη διείσδυσης (probing distance) του Η/Μ σήματος σε διάφορα υλικά, για ένα εύρος συχνοτήτων από 1-1000MHz (Cook, 1975).

3.6. Ταχύτητα διάδοσης

Τα Η/Μ κύματα ταξιδεύουν στα περισσότερα γεωλογικά υλικά (θεωρώντας πως τα περισσότερα είναι μη μαγνητικά) με συγκεκριμένη ταχύτητα που καθορίζεται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητά τους και άρα, διαφέρει μεταξύ υλικών διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Όσο μικρότερη είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα, τόσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ κυμάτων που διέρχονται από τα υλικά μέσα. Από τη στιγμή που η ηλεκτρική διαπερατότητα των Γήινων υλικών είναι πάντα

μεγαλύτερη από την διηλεκτρική διαπερατότητα του αέρα, η ταχύτητα του κύματος σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από 0.3m/ns (Daniels, 2004). Σημειώνεται, ότι για την πλειοψηφία των γεωλογικών σχηματισμών, οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων GPR έχουν εύρος 0.06-0.17m/ns. Επιπλέον, το πορώδες τους επηρεάζει την ταχύτητα λόγω της ύπαρξης αέρα, νερού ή/και κάποιου άλλου υλικού πλήρωσης στους πόρους τους, η οποία είναι ανάλογη του πορώδους. Συνεπώς, η εκτίμηση της ταχύτητας των H/M κυμάτων σε ένα μέσο, εξυπηρετεί δύο κύριους σκοπούς:

1. Την τοποθέτηση υπό-επιφανειακών ανωμαλιών στο πραγματικό τους βάθος και την εφαρμογή της επεξεργασίας της μετανάστευση των ανακλάσεων στα σωστά γεωμετρικά τους σχήματα (Yelf, 2007).
2. Την εκτίμηση των υδρογεωλογικών παραμέτρων του εδάφους ή του πετρώματος, όπως είναι η περιεκτικότητα σε νερό και το πορώδες (Dannowski & Yaramanci, 1999; Gacitúa et al., 2012).

Θεωρητικά, η ταχύτητα διάδοσης υπολογίζεται από την εξίσωση (Stratton, 1941):

$$V = \frac{\omega}{\text{Im}\{k\}} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r\mu_r}{2} (\sqrt{(P^2 + 1)} + 1)}}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{\epsilon_r\mu_r}{2} \sqrt{((\frac{\sigma}{\epsilon\omega})^2 + 1) + 1}}} \quad (3.16)$$

Όπου, c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2} \cong 0.3 \text{ m/ns}$), $\omega=2\pi f$ είναι η γωνιακή ταχύτητα (rad/s), f είναι η συχνότητα του παλμού (Hz), $\sigma/\omega\epsilon$ είναι ο παράγοντας απώλειας (P) και ϵ_r και μ_r είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μέσου διάδοσης, αντίστοιχα.

Η ταχύτητα διάδοσης του H/M κύματος μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις που ορίζουν τις αλληλεπιδράσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Οι εξισώσεις του Maxwell αποδεικνύουν ότι η ταχύτητα διάδοσης σε ένα μέσο ισούται με την ταχύτητα του φωτός στο κενό διαιρούμενο με την τετραγωνική ρίζα της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου αν θεωρηθεί ένα μέσο διάδοσης με μη μαγνητικές ιδιότητες ($\mu_r=1$) και μικρές απώλειες ($P \ll 1$) και εφόσον τα υλικά δε χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα:

$$V = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} \quad (3.17)$$

Από την παραπάνω σχέση, φαίνεται πως στην πράξη οι υπολογισμοί της ταχύτητας διάδοσης και του μήκους κύματος των H/M κυμάτων, γίνονται κατά προσέγγιση απλοποιώντας την τιμή της μιγαδικής ηλεκτρικής διαπερατότητας του υλικού, στο σταθερό και στατικό πραγματικό μέρος της, ενώ το φανταστικό μέρος της συνήθως αγνοείται. Συνεπώς, η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα την ταχύτητα διάδοσης των H/M κυμάτων και ανάλογα το βάθος διασκόπησης, πράγμα που αποδεικνύεται μαθηματικά παρακάτω:

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (3.18)$$

Όπου, λ είναι το μήκος κύματος, f είναι η συχνότητα του παλμού και $\omega = 2\pi f$ είναι η γωνιακή συχνότητα.

Για τα γεωλογικά υλικά που έχουν έναν σχετικά αντιστατικό ιστό με κορεσμένο ή ακόρεστο πορώδες (διφασικά μέσα), οι διηλεκτρικές ιδιότητές τους είναι συνήθως ο μέσος όρος των ιδιοτήτων των δύο φάσεων:

$$\varepsilon = (1 - \varphi)\varepsilon_{\mu} + \varepsilon_v \quad (3.19)$$

Επομένως, η ταχύτητα των σημάτων υπολογίζεται ως εξής:

$$V = \frac{c}{\sqrt{(1 - \varphi)\varepsilon_{\mu} + \varepsilon_v}} \quad (3.20)$$

Όπου, φ είναι το ολικό πορώδες του σχηματισμού και ε_{μ} , ε_v οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές του ιστού και του ρευστού των πόρων αντίστοιχα, με τις ανακλάσεις να παράγονται από μεταβολές στην ταχύτητα διάδοσης, αντικατοπτρίζοντας αλλαγές στο περιεχόμενο υγρό κλάσμα.

3.7. Κατηγορίες GPR κυμάτων/ καταγραφών

Ένα H/M GPR κύμα που εκπέμπεται από μία σημειακή πηγή διαδίδεται στον αέρα σφαιρικά και ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση τοποθέτησης στην επιφάνεια του εδάφους ενός συστήματος καταγραφής των αφίξεων των GPR κυμάτων και λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του H/M παλμού, αν το όργανο αρχίσει να καταγράφει τη στιγμή που εκπέμπει ο πομπός GPR, δυο κύρια είδη κυμάτων πρόκειται να καταγραφούν (Molenaar & De Vreng, 2004):

- **Απευθείας κύματα (πρώτες αφίξεις):** Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη GPR χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια και διακρίνονται στα **απευθείας κύματα αέρα (direct air waves)** και **εδάφους (direct ground waves)**.

Τα συγκεκριμένα κύματα διανύουν μικρές αποστάσεις, οπότε οι ενεργειακές απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα (Diamanti & Annan, 2017).

- Τα **απευθείας κύματα αέρα** φτάνουν πρώτα στο δέκτη, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή και ίση με τη ταχύτητα του φωτός.
- Αμέσως μετά, καταγράφονται τα **απευθείας κύματα εδάφους**, τα οποία μεταδίδονται από τον πομπό στον δέκτη μέσω του υπεδάφους, χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια. Οι χρόνοι άφιξής τους, αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της απόστασης των κεραιών.

Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής (t) γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

$$t = \frac{x}{V_{\alpha\epsilon\rho\alpha}} \quad (3.21)$$

$$t = \frac{x}{V_{\epsilon\delta\alpha\phi\omicron\varsigma}} \quad (3.22)$$

Όπου, x είναι απόσταση των κεραιών πομπού–δέκτη και V είναι οι ταχύτητες των Η/Μ κυμάτων στον αέρα και το έδαφος αντίστοιχα.

Έπειτα από την καταγραφή των απευθείας κυμάτων, καταγράφονται τα κύματα τα οποία μεταδίδονται από τον πομπό στο δέκτη GPR μέσω του υπεδάφους, και είναι τα ακόλουθα (Diamanti & Annan, 2017):

- **Ανακλώμενα κύματα (Reflected waves):** Τα κύματα αυτά διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν υλικό με διαφορετικές ιδιότητες, όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στο δέκτη GPR. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των ηλεκτρικών ιδιοτήτων μεταξύ δύο υλικών του υπεδάφους, τόσο πιο δυνατό είναι το ανακλώμενο σήμα, και επομένως τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων. Η ιδανική κατάσταση είναι μια μέτρια διαφορά στις ηλεκτρικές ιδιότητες των μέσων, έτσι ώστε οι ανακλάσεις να είναι αρκετά ισχυρές για να ανιχνευθούν οι διεπιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών, αλλά όχι τόσο

ισχυρές γεγονόσ που θα οδηγούσε στην ανάκλαση του μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας και θα περιόριζε τη διάδοσή της σε μεγαλύτερα βάθη. Ο αριθμός των ανακλάσεων που θα καταγραφούν, εξαρτάται από την ανομοιογένεια του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται το κύμα. Αξίζει να προστεθεί, πως πολλά ανακλώμενα κύματα κατευθύνονται μακριά από τη λαμβάνουσα κεραία, έτσι μόνο ένα μέρος των ανακλάσεων καταγράφεται πραγματικά. Ο χρόνος διαδρομής (t), ο οποίος εξαρτάται από την πορεία διάδοσης τους, δηλαδή το είδος των κυμάτων, ισούται με (Annan, 2009):

$$t_{reflected} = \frac{\sqrt{(4D^2 + x^2)}}{V} \quad (3.23)$$

Το βάθος και η γεωμετρία του στόχου ή μιας ανακλαστικής επιφάνειας, μελετώνται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των H/M κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα. Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάκλαση, καθώς και η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των H/M κυμάτων στο μέσο διάδοσης είναι καθοριστικής σημασίας για τον υπολογισμό του βάθους των υπεδάφίων αντικειμένων και των επιφανειών, επιλέγοντας μία από τις παρακάτω δύο εξισώσεις:

$$d = V \frac{2WTT}{2} \quad (3.24)$$

$$d_{reflected} = \frac{\sqrt{(t_{reflected}V)^2 - x^2}}{2} \quad (3.25)$$

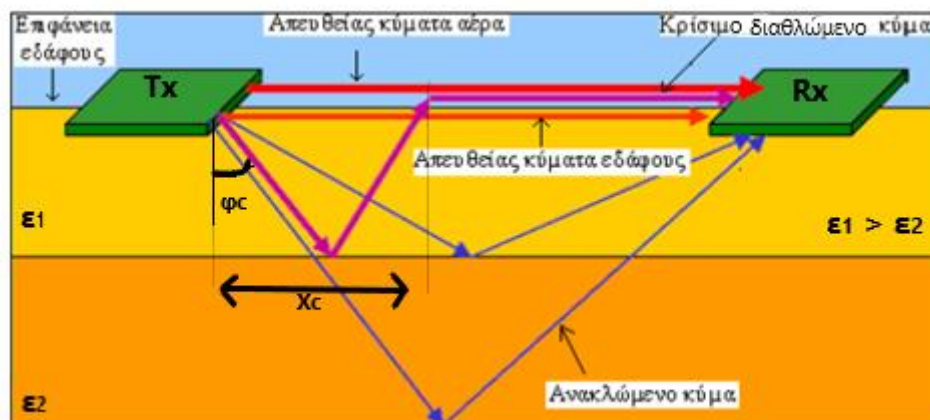
Όπου, x είναι η απόσταση πομπού-δέκτη, d είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ανακλαστική επιφάνεια ή ο στόχος (m), V είναι η ταχύτητα διάδοσης του H/M κύματος στο υλικό (m/ns), και $2WTT$ (Two-way Travel Time) είναι ο χρόνος διπλής διαδρομής, δηλαδή ο χρόνος καθόδου (από τον πομπό στον ανακλαστήρα) και ανόδου (από τον ανακλαστήρα στο δέκτη) του H/M κύματος.

- **Κρίσιμα διαθλώμενα (Refracted waves) ή πλευρικά κύματα (Lateral waves):**
Όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου ή σταθερού πομπού και κινούμενου δέκτη¹¹, η απόσταση πομπού-δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c , τότε

¹¹ Βλ. υπό ενότητα 3.11

το κύμα ανακλάται στην πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια του εδάφους και διαδίδεται προς τον πομπό μέσω του αέρα.

- **Κύματα λόγω περίθλασης (Scattering):** Όταν ο H/M παλμός εντοπίζει πολύ μικρά αντικείμενα που τείνουν να εμποδίσουν τη διάδοση αυτού, δημιουργείται το φαινόμενο της περίθλασης. Στο φαινόμενο αυτό ο H/M παλμός διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Δεδομένου ότι το σύστημα GPR δεν εντοπίζει την κατεύθυνση από την οποία λαμβάνονται τα κύματα, υποθέτει ότι όλες οι ανακλάσεις πραγματοποιούνται κατ' ευθείαν κάτω από το ραντάρ, με αποτέλεσμα να παράγονται οι υπερβολικές ανακλάσεις που προέρχονται από μια πηγή σημείου (Conyers, 2004; Witten, 2006).
- **Κύματα λόγω αντήχησης:** Η αντήχηση συμβαίνει όταν το H/M κύμα «εγκλωβιστεί» σε ένα γεωλογικό στρώμα, με αποτέλεσμα να ανακλάται πολλές φορές μέσα σε αυτό. Για παράδειγμα, τα κύματα μπορούν να περάσουν μέσω μιας διεπιφάνειας, όπως είναι η οροφή ενός στρώματος αργίλου, και κατόπιν να «εγκλωβιστούν» μέσα στο στρώμα αυτό. Εάν μερικά από αυτά τα σήματα φθάνουν τελικά στην κεραία, κάθε ανάκλαση που καταγράφεται δίνει την εντύπωση πως υπάρχουν πολλαπλές διεπιφάνειες. Οι ανακλάσεις αυτές καλούνται πολλαπλές ανακλάσεις (Conyers, 2004).



Εικόνα 7. Κατηγορίες H/M κυμάτων (Βαφειδής, 2001; Σπανουδάκης, 2001)

3.8. Εξοπλισμός GPR

Το GPR μπορεί να περιγραφεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον τύπο του, την κεντρική συχνότητα της κεραίας που χρησιμοποιεί, το μέγεθος και το βάρος του οργάνου. Τα βασικά μέρη και οι λειτουργίες που περιλαμβάνονται σε μια διαδικασία



μέτρησης με εξοπλισμό γεωραντάρ (**εικ. 8**), τα οποία στις μέρες μας κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μετακινούνται μαζί με ευκολία, είναι τα ακόλουθα:

4. **Σύστημα κεραιών** αποτελούμενο από:

- Μία **κεραία εκπομπής σήματος – πομπός (Transmitting antenna, Tx)** η οποία, μέσω ενός ηλεκτρονικού συστήματος, μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια Η/Μ κυμάτων, με ελεγχόμενο τρόπο. Η διάρκεια και η κυματομορφή του εκπεμπόμενου παλμού εξαρτάται από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας, αλλά τυπικά είναι μικρότερη των 20ns.
- Μία **κεραία ανίχνευσης / καταγραφής – δέκτης (Receiving antenna, Rx)**, η οποία, μέσω ενός ηλεκτρονικού συστήματος, μπορεί να ανιχνεύσει τα ανακλώμενα Η/Μ κύματα, και να τα μετασχηματίσει σε χρονικά κυμαινόμενες ηλεκτρικές τάσεις (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο) στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων, που μπορεί να επεξεργαστεί και να καταγραφεί ψηφιακά με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης.

5. Μία **ψηφιακή μονάδα ελέγχου**, ένας **υπολογιστής** και μια **μπαταρία**:

- Η **ψηφιακή μονάδα ελέγχου** συνδέεται με το σύστημα κεραιών και χρησιμοποιείται για την εκπομπή και την καταγραφή των σημάτων GPR με τα αντίστοιχα πλάτη τους, καθώς και της καταγραφής του χρόνου διάδοσης του Η/Μ παλμού από τον πομπό στο δέκτη. Η μονάδα ελέγχου στο σύστημα GPR μετρά το χρόνο που απαιτείται για τη διέλευση του σήματος από την εκπομπή του στον στόχο και πίσω στον δέκτη, του οποίου η διάρκεια δεν ξεπερνά συνήθως τα 1000ns.
- Επιπλέον, η μονάδα ελέγχου έχει ενσωματωμένο έναν **ηλεκτρονικό υπολογιστή**, παρέχοντας εκτός από την οπτικοποίηση των GPR σημάτων σε πραγματικό χρόνο, και τη δυνατότητα για επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων.

6. Ένα **οδόμετρο (ερευνητική ρόδα με κωδικοποιητή)**, η οποία καταγράφει την απόσταση που διανύει το σύστημα GPR.



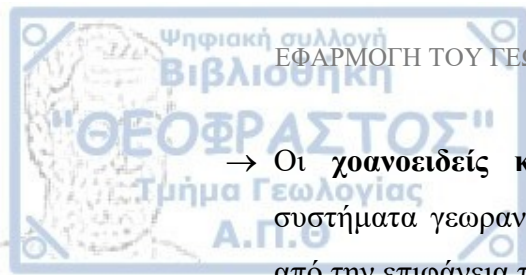
Εικόνα 8. Απεικονίζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό σύστημα GPR.

3.9.1. Κατηγορίες συστημάτων

Τα συστήματα γεωραντάρ διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το πεδίο στο οποίο λειτουργούν.

- **Πεδίο του χρόνου (Time Domain):** Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη διάδοση διακριτών παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (ns) από έναν πομπό, με μία δεδομένη περιοδικότητα ή συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency, RPF) και καταγραφή του επιστρέφοντος σήματος από το δέκτη συναρτήσει του χρόνου καθυστέρησης.

→ Οι πιο διαδεδομένες κεραίες που χρησιμοποιούνται ευρέως από τα συστήματα που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου και σε γειτνίαση ή επαφή με το έδαφος (Ground-Coupled GPR) είναι οι **διπολικές κεραίες**, οι οποίες έχουν πολύ ευρεία κυματοδεσμική γωνία (Beam width) και οριζόντια πόλωση. Τα διπολικά στοιχεία περικλείονται συνήθως σε μεταλλικό κέλυφος (shield) το οποίο είναι θωρακισμένο, δρώντας ως προστατευτικό κάλυμμα για την εξάλειψη πιθανών ανεπιθύμητων ανακλάσεων και τη μέγιστη κατευθυντικότητα της Η/Μ ακτινοβολίας προς το έδαφος, για την αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.



→ Οι **χοανοειδείς κεραίες (Horn)** χρησιμοποιούνται συνήθως από τα συστήματα γεωραντάρ που λειτουργούν σε συγκεκριμένη απόσταση πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (Air-Coupled GPR).

- **Πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain):** Στα συγκεκριμένα συστήματα, το σήμα μεταδίδεται ως ημιτονοειδές κύμα συνεχούς κυματομορφής (Continuous Waveform, CW), του οποίου η συχνότητα φέροντος (Carrier Frequency) μεταβάλλεται είτε συνεχώς, πάνω σε μία δεδομένη ζώνη συχνοτήτων (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW), είτε σε καθορισμένα βήματα (Stepped Frequency). Η απόκριση στο πεδίο του χρόνου μπορεί να ληφθεί μέσω αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier της απόκρισης στο πεδίο συχνοτήτων¹².

Ταυτόχρονα, εκτός από το πεδίο λειτουργίας τους, τα συστήματα γεωραντάρ ανάλογα με τη διάταξη, χρήση και τον αριθμό των κεραιών που διαθέτουν, διακρίνονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- **Μονοστατικά συστήματα (Monostatic Systems):** Χρησιμοποιούν μόνο μία κεραία, η οποία χρησιμεύει ταυτόχρονα ως πομπός και δέκτης¹³. Ωστόσο, ως μονοστατικά, εσφαλμένα θεωρούνται και τα συστήματα που χρησιμοποιούν κεραίες οι οποίες βρίσκονται έγκλειστες μέσα στο ίδιο περίβλημα, σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους και ως εκ τούτου δε δύνανται να διαχωριστούν. Τα συστήματα αυτά πραγματοποιούν μετρήσεις κατά μήκος μίας γραμμής σάρωσης (GPR Profile Line), παρέχοντας συνεχή και ταχεία λήψη δεδομένων με μικρό διάστημα δειγματοληψίας¹⁴ κατά τον οριζόντιο άξονα (Horizontal Sampling Interval). Τα συστήματα αυτά, παρόλο που είναι πιο μικρά σε μέγεθος, είναι τεχνολογικώς πιο περίπλοκα από τα διστατικά.

¹² Επεξήγηση στην υπό ενότητα 4.4.1

¹³ Η κεραία εκπέμπει H/M παλμούς, στη συνέχεια αλλάζει λειτουργία όπου δέχεται και καταγράφει το επιστρέφον σήμα, εν συνεχεία αλλάζει πάλι λειτουργία όπου και εκπέμπει κλπ.

¹⁴ Επεξήγηση στην υπό ενότητα 3.10.3

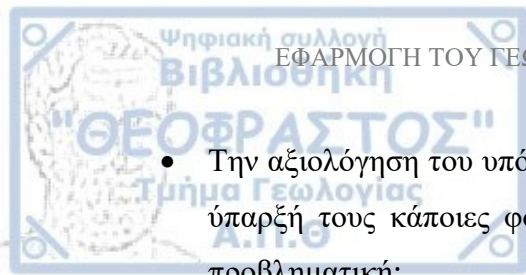
- **Διστατικά συστήματα (Bistatic Systems):** Χρησιμοποιούν ξεχωριστές κεραίες για τον πομπό και τον δέκτη. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, οι κεραίες μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους με πλαίσιο για να διατηρείται η απόστασή τους σταθερή. Επίσης, υπάρχουν και τα πολυκάναλα συστήματα GPR με πολλαπλούς πομπούς και δέκτες, τα οποία επιτρέπουν την ταυτόχρονη συλλογή των δεδομένων, βελτιώνοντας σημαντικά το χρόνο συλλογής τους. Στην **εικόνα 9** παρουσιάζεται μία φωτογραφία ενός διστατικού συστήματος γεωραντάρ, όπου φαίνεται η μονάδα ελέγχου του συστήματος, αποτελούμενη από τον καταγραφέα και την οθόνη, καθώς και ο πομπός και ο δέκτης με τις αντίστοιχες κεραίες, όλα μαζί τοποθετημένα σε ένα σύστημα εφοδιασμένο με οδόμετρο (*SmartCart*).



Εικόνα 9. Φωτογραφία του διστατικού συστήματος GPR pulseEKKO PRO Ultra Rx, κεντρικής συχνότητας 100MHz.

3.10. Μετρήσεις υπαίθρου

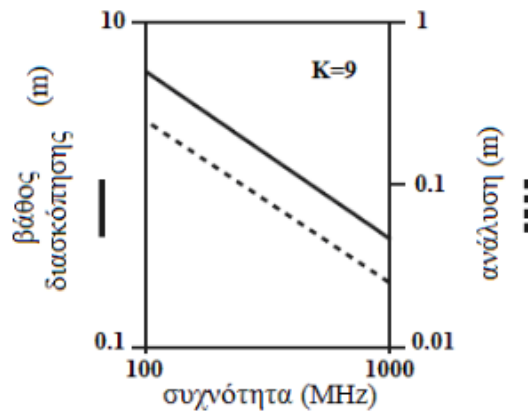
Πριν ξεκινήσει η γεωφυσική έρευνα, θεωρείται σκόπιμο να μελετηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν την επιτυχή της έκβαση. Το συγκεκριμένο στάδιο είναι κρίσιμο, προκειμένου οι μετρήσεις να είναι ακριβείς και να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα τα οποία θα δώσουν λανθασμένες πληροφορίες. Συνεπώς, ο ερευνητής πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία καλείται να αποσαφηνίσει το πρόβλημα πλήρως και να σχεδιάσει τη διασκόπηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός της έρευνας αποτελείται από τρία βασικά στάδια:



- Την αξιολόγηση του υπό μελέτη περιβάλλοντος ως προς τα παρακάτω, μιας και η ύπαρξή τους κάποιες φορές είναι δυνατόν να κάνουν την εφαρμογή του GPR προβληματική:
 - Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πηγές ραδιοκυμάτων (αναμεταδότες τηλεόρασης, ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες κινητής τηλεφωνίας κλπ.).
 - Περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές.
 - Περιοχές με υπεδάφιους σχηματισμούς με μεγάλη αγωγιμότητα που βρίσκονται σε μικρό βάθος.
 - Οι κλιματικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχή έκβαση της διασκόπησης.
 - Η παρουσία ενός τραχέος ανάγλυφου και υψηλής βλάστησης, εμποδίζει την Η/Μ σύζευξη μεταξύ της κεραίας και του εδάφους, παράγοντας ανεπιθύμητες ανακλάσεις.
- Την αξιολόγηση της γεωμετρίας και του βάθους του αναζητούμενου στόχου, το οποίο μελετάται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των Η/Μ κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα (*Bernabini et. al., 1995; Jol, 1995; Hamran et.al., 1995*). Η ανιχνευσιμότητα των υπεδάφινων στόχων εξαρτάται από:
 - Τη φύση του στόχου
 - Την ισχύ και την κεντρική συχνότητα του πομπού
- Τον προσδιορισμό των εξής παραμέτρων:
 - Κεντρική συχνότητα εκπομπής
 - Ολικός χρόνος καταγραφής
 - Διάστημα δειγματοληψίας
 - Παράμετροι που αφορούν τις γραμμές διασκόπησης

3.10.1. Συχνότητα εκπομπής

Πρόκειται για την κεντρική συχνότητα λειτουργίας (operating frequency) της κεραίας, η οποία εκπέμπει σε ένα φάσμα συχνοτήτων 0.5 με 1.5 φορές τη συχνότητα της κεντρικής (Annan, 2003).



Εικόνα 10. Διάγραμμα βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας και της διακριτικής ικανότητας (Αποστολόπουλος, 2013).

Η διάρκεια και η κυματομορφή του εκπεμπόμενου παλμού που παράγεται από τον πομπό, εξαρτάται από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Η συχνότητα εκπομπής συνήθως επιλέγεται μεταξύ ~10-2500MHz. Το βάθος διείσδυσης και η διακριτική ικανότητα, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος του Η/Μ σήματος, συνδέονται άμεσα με τη συχνότητα (εικ. 10, Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Επιπτώσεις της συχνότητας εκπομπής στη διασκόπηση με γεωραντάρ (Annan, 2001; Molenaar and De Vreng, 2004).

Χαμηλές Συχνότητες	Υψηλές Συχνότητες
Μακρύτερης διάρκειας παλμός	Βραχύτερης διάρκειας παλμός
Μεγάλο μήκος κύματος (πιο πλατύς παλμός)	Μικρό μήκος κύματος (πιο στενός παλμός)
Επηρεάζεται από μεγάλα αντικείμενα	Επηρεάζεται από μικρά αντικείμενα
Μεγάλο βάθος διασκόπησης	Μικρό βάθος διασκόπησης
Αραιή δειγματοληψία	Πυκνή δειγματοληψία
Μεγάλη διάρκεια μέτρησης	Μικρή διάρκεια μέτρησης
Μικρή διακριτική ικανότητα	Μεγάλη διακριτική ικανότητα
Εντοπισμός μεγάλου πάχους στρωμάτων	Εντοπισμός λεπτών στρωμάτων

3.10.2. Ολικός χρόνος καταγραφής

Το **χρονικό παράθυρο (Time Window, TW)** είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής δεδομένων και μετράται σε νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} s). Εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης που επιθυμείται για τη διασκόπηση και είναι ανάλογο αυτού, καθώς και από την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι μεγάλος χρόνος διαδρομής του H/M κύματος από τον πομπό και προς τον δέκτη, μπορεί να απαιτεί μεγάλο αριθμό σημείων ανά σάρωση, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική ανάλυση δεδομένων. Αν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι πολύ μικρός, ο στόχος ίσως να μην εντοπισθεί. Αντίθετα, αν ο στόχος βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, το συνολικό χρονικό παράθυρο και ο συνολικός όγκος των δεδομένων αυξάνει με δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγικότητα. Ο *Conyers (2004)* προτείνει το χρονικό παράθυρο να είναι τουλάχιστον όσο το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να επιτευχθεί το μέγιστο επιθυμητό βάθος διασκόπησης, όπου για ένα ενδεικτικό βάθος $\sim 2\text{-}3\text{m}$, το προτεινόμενο χρονικό διάστημα καταγραφής είναι 100ns. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στην εξίσωση:

$$W = \frac{2.6d_{\max}}{V} \quad (3.26)$$

Όπου, W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής (ns), V είναι η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης του H/M παλμού στο εκάστοτε μέσο (m/ns) και $d_{\max}$ είναι το μέγιστο επιθυμητό βάθος διείσδυσης (m). Οι *Annan και Cosway (1992)* προτείνουν δύο εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό του μέγιστου βάθους διείσδυσης ($d_{\max}$):

$$d_{\max} = \frac{35}{\sigma} \quad (3.27)$$

$$d_{\max} < \frac{30}{a} \quad (3.28)$$

Όπου, σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (S/m) και a είναι ο συντελεστής απόσβεσης (dB/m). Η εξίσωση (3.28) ισχύει για μέσες και υψηλές τιμές εξασθένησης ($<0.1\text{dB/m}$). Επιπλέον, αυξάνει το χρόνο καταγραφής κατά 30%, ώστε να προβλέψει τα σφάλματα από τους υπολογισμούς (*Annan, 1999*).

3.10.3. Διάστημα δειγματοληψίας

Σύμφωνα με το κριτήριο της συχνότητας Nyquist (f_N), η **χρονική διαφορά (Δt) μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (Temporal Sampling Interval)**, δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της περιόδου, που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη συχνότητα του

μετρούμενου σήματος. Μικρότερο διάστημα δειγματοληψίας συνεπάγεται καλύτερη ανάλυση δεδομένων. Αν το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας είναι μεγάλο, τότε πολλές πληροφορίες χάνονται, ενώ αν είναι πολύ μικρό, τότε ο συνολικός όγκος των δεδομένων είναι υπερβολικά μεγάλος. Το φάσμα εκπομπής του γεωραντάρ κυμαίνεται από $0.5f$ - $1.5f$, όπου f είναι η κεντρική συχνότητα εκπομπής. Πολλές φορές, αν το ζητούμενο είναι η ταχύτητα λήψης των δεδομένων, το Δt αυξάνεται ελαφρώς. Αν ληφθεί υπ' όψη ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με 2, τότε προκύπτουν οι σχέσεις (Annan, 1999):

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \rightarrow 1.5f = \frac{1}{2\Delta t} \xrightarrow{\text{Συντελεστής ασφαλείας} = 2} f = \frac{1}{6\Delta t} \quad (3.29)$$

Όπου, Δt είναι το διάστημα δειγματοληψίας (ns) και f είναι η κεντρική συχνότητα (MHz).

3.10.4. Γραμμές διασκόπησης

Τα γεωφυσικά δεδομένα GPR συλλέγονται συνήθως σε παράλληλες ευθείες γραμμές με την κίνηση των κεραιών στην εξεταζόμενη περιοχή έχοντας σταθερή και ορισμένη απόσταση μεταξύ τους, με διεύθυνση όσο το δυνατόν κάθετα στη μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, έτσι ώστε οι πιθανότητες εντοπισμού τους να είναι αυξημένες και ο απαιτούμενος αριθμός τους να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Η **απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης (line spacing)**, αλλά και η **πυκνότητα της δειγματοληψίας (sampling interval)** κατά μήκος της κάθε γραμμής, αποτελούν σημεία μεγάλης προσοχής για μία σωστή μελέτη.

3.10.4.1. Δεδομένα ανά ίχνος

Ο αριθμός των σημείων (δειγμάτων) από τα οποία αποτελείται η κάθε καταγραφή επηρεάζει την ανάλυση των δεδομένων, καθώς η συλλογή περισσότερων σημείων ανά ίχνος, οδηγεί σε υψηλότερη ανάλυση της ανακλώμενης κυματομορφής (Conyers, 2004). Μεγαλύτερος αριθμός σημείων έχει ως αποτέλεσμα ομαλότερη καμπύλη, αλλά πιο αργή συλλογή δεδομένων. Ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων που συλλέγονται ανά ίχνος στις περισσότερες έρευνες GPR είναι είτε 512, είτε 1024, είτε 2048 ανά ίχνος (Conyers, 2004). Ο αριθμός των δειγμάτων ανά ίχνος ποικίλλει ανάλογα με το χρονικό παράθυρο και το διάστημα δειγματοληψίας, όπως περιγράφεται από την εξίσωση:

$$s = \frac{W}{\Delta t} \quad (3.30)$$

Όπου, S είναι τα δείγματα ανά ίχνος, W είναι το χρονικό παράθυρο (ns) και Δt είναι το διάστημα δειγματοληψίας (ns). Επομένως, περισσότερα σημεία ανά ίχνος, απαιτούν μεγαλύτερα χρονικά παράθυρα για τη συλλογή τους.

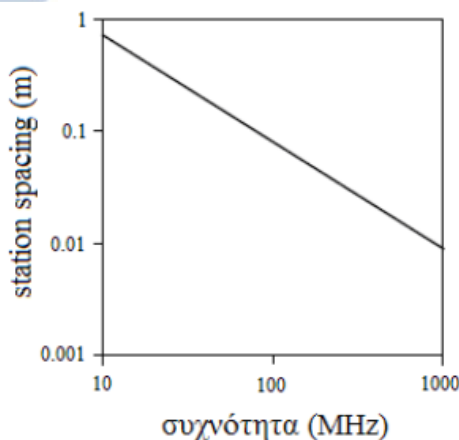
3.10.4.2. Πυκνότητα δειγματοληψίας

Το είδος, το μέγεθος και το βάθος του στόχου που επιδιώκεται να ανιχνευθεί, είναι οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την **πυκνότητα της δειγματοληψίας**, δηλαδή τον αριθμό των ιχνών που καταγράφονται ανά μονάδα μήκους ή επιφάνειας. Η πιθανότητα ανίχνευσης μικρών δομών βελτιώνεται με την αύξηση στην πυκνότητα της δειγματοληψίας. Αυτό συμβαίνει γιατί το μικρότερο στοιχείο («στόχος»), είναι λιγότερο πιθανό να είναι ακριβώς κάτω ή κοντά στις γραμμές των τομών, με αποτέλεσμα το καταγεγραμμένο σήμα να παραγάγει μια μικρότερη ανωμαλία, που ίσως αντιπροσωπεύεται από μόνο μια μέτρηση. Ακόμη, η ανωμαλία από ένα μικρότερο στοιχείο, είναι λιγότερο πιθανό να πάρει μια ευπροσδιόριστη μορφή (τετραγωνική, γραμμική ή κυκλική), καθιστώντας το δυσκολότερο να διακριθεί από τον περιβάλλοντα χώρο. Ένα στοιχείο για να εντοπιστεί με αξιοπιστία, πρέπει να καταγραφεί από τουλάχιστον δύο σαρώσεις του οργάνου. Η πυκνότητα των ιχνών κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης, εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία κινείται το όργανο, η οποία ελέγχεται από την ερευνητική ρόδα (οδόμετρο). Η αραιή δειγματοληψία μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα σε χρονοσειρές, με αποτέλεσμα την επαναδίπλωση των συχνοτήτων μιας κυματομορφής και τη δυσκολία χαρτογράφησης του στόχου.

Η επιλογή του **βήματος διασκόπησης (step size)**, δηλαδή της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών καταγραφών πάνω στη γραμμή μελέτης (Spatial sampling interval), συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα των κεραιών (**εικ. 11**). Έτσι, προτείνεται το βήμα δειγματοληψίας Nyquist (n_x) το οποίο ισούται με:

$$n_x = \frac{\lambda}{4} = \frac{75}{\varepsilon_r^{1/2} f} \quad (3.31)$$

Όπου, λ είναι το μήκος κύματος, ϵ_r είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου και f είναι η συχνότητα εκπομπής.



Εικόνα 11. Διάγραμμα επιλογής της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών και διακριτών μετρήσεων (Αποστολόπουλος, 2013).

Αξίζει να σημειωθεί, πως πραγματοποιώντας αυτόματα πολλαπλές μετρήσεις σε κάθε σταθμό της γραμμής μελέτης, τα πλάτη των πολλαπλών ανακλάσεων αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους, με στόχο την απομάκρυνση του θορύβου¹⁵. Η συγκεκριμένη διαδικασία ονομάζεται σώρευση (stacking) και αυξάνει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο, καθώς η φάση των κυμάτων είναι ίδια σε κάθε επανάληψη, οπότε τα πλάτη συμβάλλουν μεταξύ τους. Αντίθετα, επειδή ο θόρυβος είναι τυχαίος τα σήματα που προέρχονται από αυτόν αλληλοαναιρούνται. Η διαδικασία της σώρευσης βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων, ταυτόχρονα όμως αυξάνει σημαντικά το χρόνο της διασκόπησης. Ο αριθμός των «στοιβών» (stacks) ορίζεται συνήθως σε 4, 16, 32 και 64, ενώ σε πιο σύγχρονα συστήματα μπορεί να φτάσει και αρκετές χιλιάδες.

3.10.5. Ιδιότητες κεραιών

Η σχεδίαση κατάλληλων ευρυζωνικών κεραιών αποτελεί μία σημαντική ερευνητική διαδικασία για τη διείσδυση του H/M κύματος στο υπέδαφος που μπορεί να βελτιώσει

¹⁵ Ο θόρυβος στα γεωφυσικά δεδομένα, περιλαμβάνει οτιδήποτε δεν σχετίζεται με το στόχο που μελετάται, του οποίου οι κύριες συχνότητες βρίσκονται εκτός του εύρους ζώνης του GPR. Τα παραδείγματα του θορύβου είναι είτε υψίσυχνα δεδομένα (εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές συχνότητες, συχνά προκαλούμενες από τοπικές μετρήσεις, που περιβάλλονται συνήθως από τις έγκυρες μετρήσεις), είτε τυχαίες ή περιοδικές μετρήσεις σχετιζόμενες με τις γεωφυσικές μεθόδους. Θόρυβο αποτελούν επίσης οι παρεμβολές του οργάνου, η σκέδαση των κυμάτων καθώς και το φαινόμενο “ringing”, λόγω παγιδευμένης ενέργειας σε κάποιο γεωλογικό στρώμα.

ουσιαστικά τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας. Για την αποφυγή καταγραφής θορύβου, δίνεται μεγάλη σημασία στα παρακάτω σημεία:

- Στην επίδραση των αντικειμένων σε γειτνίαση με τις κεραίες.
- Στην καλή σύζευξη κεραίας–εδάφους.
- Στις απώλειες ενέργειας από το ίδιο το σύστημα κεραιών

3.10.5.1. Απόσταση κεραιών

Εξαιτίας του ποσοστού της ενέργειας που απορροφάται από το έδαφος και τον αέρα, το πλάτος του σήματος που λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη μειώνεται αυξανόμενης της απόστασης των κεραιών. Συνεπώς, για να μπορέσει να καταγραφεί ένα σήμα, θα πρέπει η απόσταση μεταξύ των κεραιών να είναι σχετικά μικρή, ανάλογα βέβαια και με τις εδαφικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα, σε ένα ξηρό αμμώδες έδαφος, η απόσταση των κεραιών μπορεί να αυξηθεί (μιας και οι «απώλειες» λόγω ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι μικρές), με σκοπό να βελτιωθεί η εμβέλεια της καταγραφής. Επίσης, σε μια τέτοια περίπτωση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κεραίες υψηλής κεντρικής συχνότητας, με σκοπό την αύξηση της διακριτικής ικανότητας. Με άλλα λόγια, η αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης, δηλαδή αύξηση της εξασθένισης του κύματος, αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση προκειμένου να φτάσει στο δέκτη. Συμπερασματικά, η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των κεραιών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S = \frac{2d}{(\epsilon_r - 1)^{1/2}} \quad (3.32)$$

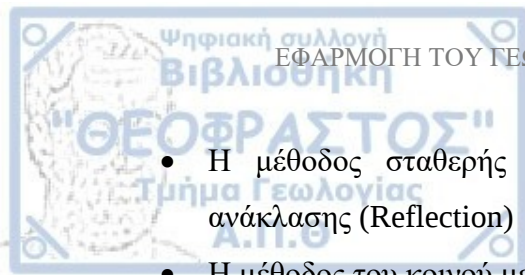
Όταν οι πληροφορίες που αφορούν την περιοχή διασκόπησης είναι λιγοστές (άγνωστο ϵ_r), ένας ασφαλής κανόνας προσδιορισμού της απόστασης των κεραιών, δίνεται από την εξής σχέση:

$$S = 0.2d \quad (3.33)$$

Όπου, d είναι το βάθος του στόχου.

3.11. Διατάξεις λειτουργίας

Οι κύριες διατάξεις λειτουργίας του πομπού και δέκτη ενός συστήματος γεωραντάρ, ανάλογα με το σκοπό της έρευνας, είναι οι ακόλουθες:



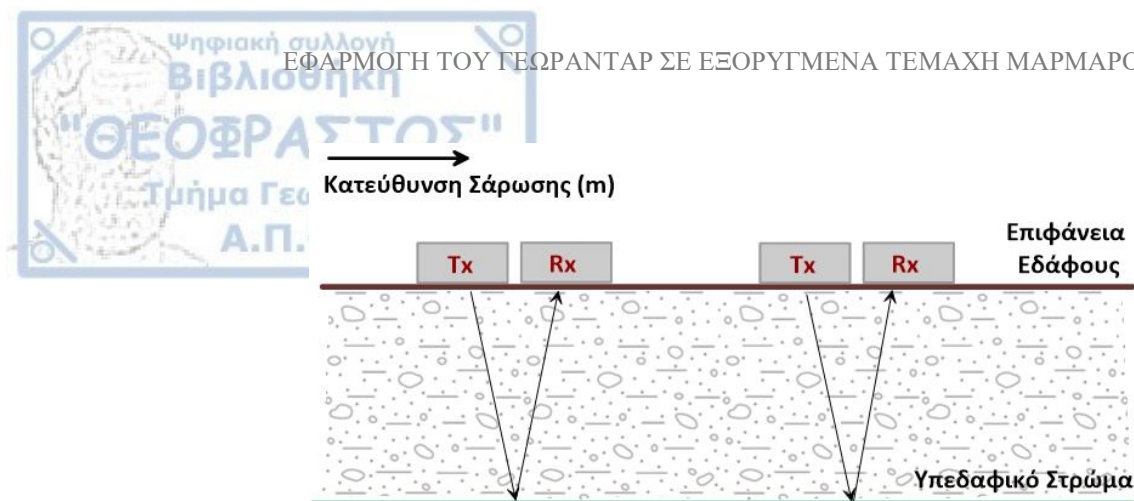
- Η μέθοδος σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη (Common Offset, CO) ή ανάκλασης (Reflection)
- Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου (Common Midpoint, CMP)
- Διάταξη ευρυγώνιας ανάκλασης και διάθλασης (Wide Angle Reflection and Refraction, WARR) ή διάταξη κοινού σημείου βάθους (Common-Depth Point, CDP)
- Μέθοδος τομογραφίας (Transillumination)

Τα συστήματα GPR των οποίων πομπός (Tx) και δέκτης (Rx), περιλαμβάνονται σε ένα μόνο κουτί μπορούν να λειτουργήσουν μόνο στη λειτουργία ανάκλασης CO, η οποία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη (Annan, 2003). Οι υπόλοιπες διατάξεις, αφορούν συστήματα GPR των οποίων οι Tx και Rx βρίσκονται σε διαφορετικά κουτιά και οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιούνται είτε απομακρύνοντας τις δύο κεραίες από το κέντρο της μεταξύ τους απόστασης ταυτόχρονα (μέθοδος CMP), είτε διατηρώντας την κεραία του πομπού σταθερή σε ένα συγκεκριμένο σημείο και απομακρύνοντας αυτήν του δέκτη (μέθοδος WARR) (Annan, 2003).

3.11.1. Μέθοδος σταθερής απόστασης πομπού - δέκτη

Σε αυτήν την μέθοδο, ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους και η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη μετακίνηση και των δύο κατά μήκος μίας γραμμής διασκόπησης (εικ. 12). Θεωρείται απαραίτητο σε αστικά περιβάλλοντα, οι δύο κεραίες να τοποθετούνται σε θωρακισμένο κουτί (shielding), ώστε να αποφεύγονται οι ανακλάσεις από επιφανειακά αντικείμενα (Jol, 2009).

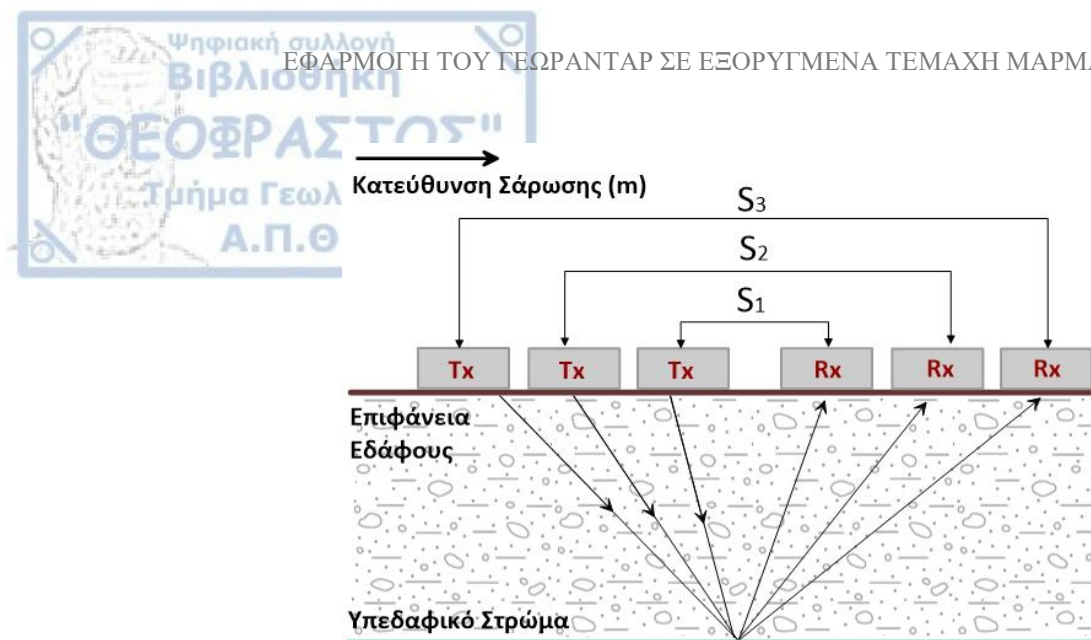
Αν είναι γνωστή η ηλεκτρική διαπερατότητα του υπεδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των H/M κυμάτων στο μέσο, από τα προφίλ που συλλέγονται κάθετα σε έναν υπεδαφικό σκεδαστή (Cross & Knoll, 1991; al Hagrey & Muller, 2000; Conyers, 2013). Ακόμη, για τον υπολογισμό της ταχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια μέθοδος προσαρμογής υπερβολής (Stolte, 1994), η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε πολλά προγράμματα επεξεργασίας GPR.



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου σταθερής απόστασης πομπού - δέκτη ενός διστατικού συστήματος γεωραντάρ.

3.11.2. Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (CMP)

Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου εφαρμόζεται από τα συστήματα GPR που πομπός και δέκτης είναι ξεχωριστά κουτιά, και εφαρμόζεται κυρίως για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του Η/Μ σήματος στο υπέδαφος ως προς το βάθος και εφαρμόζεται κυρίως στον εντοπισμό υπεδάφινων στρωμάτων. Κατά τη συλλογή των δεδομένων, επιλέγεται στην επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο, εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται οι δύο ξεχωριστές κεραίες εκπομπής (Tx) και λήψης (Rx), των οποίων η απόσταση μεταβάλλεται σταδιακά κατά μία καθορισμένη απόσταση ($S_1, S_2, S_3, \dots$), διατηρώντας ωστόσο κάθε φορά το κέντρο της διάταξης σταθερό (εικ. 13). Με τον τρόπο αυτόν, μετρούνται οι αντίστοιχες μεταβολές του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης, όπου ο πομπός-δέκτης απομακρύνονται από ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο. Ειδικότερα, αφού προσδιοριστεί το σημείο του ανακλαστήρα που θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο, οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση (ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist, n_x) με τα ηλεκτρικά τους πεδία παράλληλα. Κάθε κεραία απομακρύνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης κατά $n_x/2$. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπεράσει το βάθος του ανακλαστήρα.



Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου συλλογής δεδομένων GPR του κοινού μεσαίου σημείου.

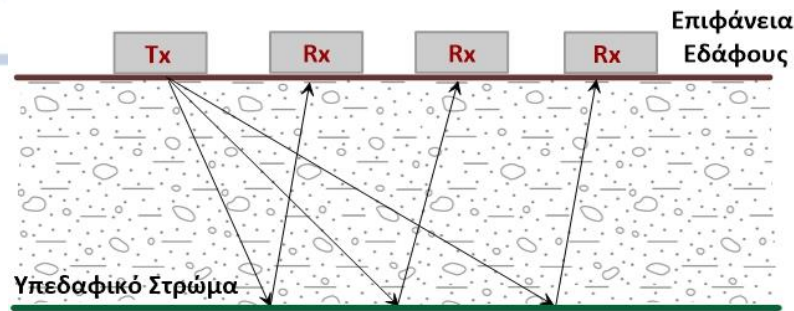
Παρόλο που μόνο μερικά συστήματα GPR έχουν τις κεραίες που μπορούν να χωριστούν κατά αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος μπορεί να γίνει με δύο κεραίες ίδιων ή παρόμοιων συχνοτήτων, εφ' όσον είναι διαθέσιμος ένας διαχωριστής καλωδίων, ή ο υπολογιστής έχει δύο κανάλια για να λάβει τα δεδομένα ταυτόχρονα. Εάν οι δοκιμές ταχύτητας δεν πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της συλλογής των δεδομένων, αυτή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη θεωρητική γεωμετρία των υπερβολών, η οποία με τη σειρά της μπορεί να υλοποιηθεί εφαρμόζοντας μια απλή εξίσωση ή κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας (Bevan, 1998).

3.11.3. Διάταξη ευρυγώνιας ανάκλασης και διάθλασης (WARR)

Στην περίπτωση όπου η κεραία του πομπού παραμένει σταθερή σε μία συγκεκριμένη θέση και μόνο η κεραία του δέκτη απομακρύνεται από τον πομπό, τότε η διάταξη αυτή ονομάζεται **διάταξη ευρυγώνιας ανάκλασης και διάθλασης (εικ. 14)**. Η παρούσα διάταξη χρησιμοποιείται από τα συστήματα γεωραντάρ που έχουν ξεχωριστά πομπό και δέκτη. Ομοίως με τη διάταξη CMP, εφαρμόζεται κυρίως στην περίπτωση ανίχνευσης οριζόντιων υπεδαφικών στρωμάτων, ενώ παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης στο μέσο.



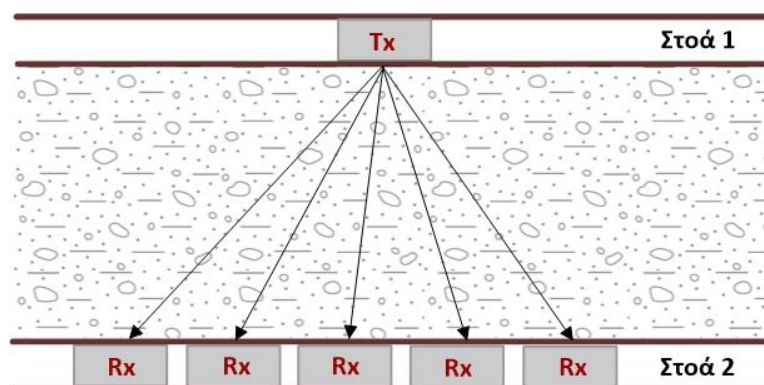
Κατεύθυνση Σάρωσης (m)



Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης της ευρυγώνιας ανάκλασης ενός συστήματος γεωραντάρ.

3.11.4. Μέθοδος τομογραφίας

Σύμφωνα με τη **μέθοδο της τομογραφίας**, ο πομπός και ο δέκτης τοποθετούνται ξεχωριστά σε κοντινές γεωτρήσεις, εκατέρωθεν τοίχων ή στοών μεταλλείων. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μετακινώντας και τις δύο κεραίες ή τη μία μόνο γύρω από το στόχο. Σε αυτή τη μέθοδο τα κύματα δεν ανακλώνται αλλά διέρχονται από το μέσο (**εικ. 15**).



Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της τομογραφίας ενός συστήματος γεωραντάρ.

3.12. Εφαρμογές

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας προσέφερε σημαντική ανάπτυξη στο GPR, με αποτέλεσμα σήμερα να κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών¹⁶. Οι εφαρμογές του μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με την κεντρική συχνότητα εκπομπής, τη διακριτική ικανότητα και το βάθος διασκόπησης που απαιτείται για το σκοπό της εκάστοτε

¹⁶ Ο Olhoeft (1988) παρέχει εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα για τις χρήσεις του GPR.

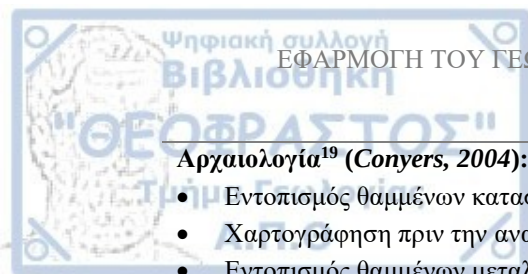
έρευνας (Travassos *et al.*, 2018). Στον **Πίνακα 6**, παρουσιάζεται εκτενέστερα το σύνολο των εφαρμογών της μεθόδου του γεωραντάρ, αναφορικά με διάφορους κλάδους επιστημών.

Πίνακας 6. Εύρος χρήσεων της μεθόδου GPR (Reynolds, 1998; Mellet, 1995; Toshioka *et al.*, 1995; Tsoflias, 1999).

Εφαρμογές GPR/Γεωραντάρ
Εφαρμογές σε τεχνικά έργα¹⁷: - Ανάλυση πάχους δρόμων - Ανίχνευση αστοχιών οπλισμού στο τσιμέντο (Lorenzo <i>et al.</i>, 2001) - Εντοπισμός σωλήνων και καλωδίων - Έλεγχος επένδυσης σηράγγων και υπονόμων και ανίχνευση κενών χώρων - Επιθεώρηση κατάστασης γεφυρών και κτηρίων (Diamanti <i>et al.</i>, 2017) - Έλεγχος γεωτρήσεων - Έλεγχος ποιότητας ασφάλτου δρόμων (Sternberg & McGill, 1995; Diamanti <i>et al.</i>, 2021)
Γεωλογικές – Περιβαλλοντικές¹⁸: - Χαρτογράφηση ρυπασμένων περιοχών (Greenhouse & Brewster, 1993; Brewster & Annan, 1994; Benson <i>et al.</i>, 1997; Orlando, 2002) - Έρευνες σε χωματερές - Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών (Vargemezis <i>et al.</i>, 2022) - Εντοπισμός διαρροής αερίων - Έρευνες για εντοπισμό νερού και προσδιορισμού της διαπερατότητας (Corbeanu <i>et al.</i>, 2002) - Χαρτογράφηση υδροφόρων οριζόντων (Annan, 2005) - Απεικόνιση γεωλογικών σχηματισμών, ρηχών δομών σε υψηλή ανάλυση - Μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων - Ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού (Thierbach, 1974; Funk <i>et al.</i>, 2016) - Ανίχνευση ρωγμών, εγκοίλων (Spanoudakis <i>et al.</i>, 2004; Diamanti & Redman, 2012) και ασυνεχειών σε πετρώματα (Toshioka <i>et al.</i>, 1995) - Χαρτογράφηση βυθισμάτων, επιφανειακών κοιτασμάτων, ρωγμών σε ορυκτό αλάτι, προσχώσεων, επίπεδων ασυνεχειών, γεωλογικών δομών, λιμναίων και ποταμίων ιζημάτων - Προσδιορισμός στρωματογραφίας (Davis & Annan, 1989; Dominic <i>et al.</i>, 1995) - Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγησή του - Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων - Έλεγχος καταλληλότητας υπεδάφους για αγροτική ανάπτυξη - Έρευνα γεωθερμικών πεδίων
Επιστήμη μελέτης παγετώνων (Annan, 2002): - Χαρτογράφηση του πάχους του στρώματος του πάγου, του χιονιού και καναλιών ροής νερού στους παγετώνες - Προσδιορισμός της εσωτερικής δομής των παγετώνων, μελέτη κίνησης των πάγων και ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων - Μελέτη ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα

¹⁷ Στις εφαρμογές τεχνικών έργων, η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο και οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

¹⁸ Για γεωλογικούς σκοπούς, όταν το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από τη διακριτική ικανότητα, χρησιμοποιούνται κεραίες κεντρικής συχνότητας 10-50MHz.

**Αρχαιολογία¹⁹ (Conyers, 2004):**

- Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών, τάφων, τοιχίων, κτισμάτων και αρχαίων δρόμων
- Χαρτογράφηση πριν την ανασκαφή
- Εντοπισμός θαμμένων μεταλλικών και μη μεταλλικών αντικειμένων

Άλλες επιστήμες:

- Πλανητικές εξερευνήσεις (Fa, 2013)
- Στην εγκληματολογία για τον εντοπισμό σωρών και στοιχείων για επιλύσεις υποθέσεων
- Στη στρατιωτική βιομηχανία για εντοπισμό ναρκών και εκρηκτικών μηχανισμών στο υπέδαφος (Giannakis et al., 2016)

3.13. Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα μεθόδου GPR

Η μέθοδος του γεωραντάρ έχει πολλά πλεονεκτήματα καθιστώντας την πολλές φορές ως την καταλληλότερη επιλογή σε περιπτώσεις εξέτασης του υπεδάφους, καθώς και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7**.

Πίνακας 7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής της μεθόδου του γεωραντάρ.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Μη καταστρεπτική μέθοδος. 2. Ευκολία χρήσης και μετακίνησης του μηχανήματος. 3. Βάθος διασκόπησης έως 15–20m σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές αγωγιμότητας, με τη χρήση κεραιών χαμηλής συχνότητας. Αντίθετα, υψηλή ανάλυση των αποτελεσμάτων σε μικρά βάθη, μέχρι τα 4-5m, με χρήση κεραίας υψηλής συχνότητας. 4. Μεγάλη ταχύτητα και ευκολία στη συλλογή των δεδομένων, επιτρέποντας την κάλυψη μεγάλων περιοχών και απεικόνιση τους σε πραγματικό χρόνο. 5. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων. 6. Περιορισμός πιθανοτήτων ατυχημάτων τόσο για τους χειριστές, όσο και για τους περαστικούς. Μη επιβλαβής έκθεση σε ακτινοβολία. 7. Πολλές δυνατότητες και επιλογές παραμέτρων. 8. Συμβατότητα με άλλες γεωφυσικές μεθόδους. 9. Δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση και από τις δύο πλευρές ενός αντικειμένου. 10. Υπό ευνοϊκές συνθήκες, και παράλληλα με την γνώση των γεωλογικών δεδομένων, το GPR μπορεί να εντοπίσει αποτελεσματικά	1. Δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων. 2. Απαιτεί μεγάλο κόστος εξοπλισμού και λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων με την απαραίτητη ανθρώπινη τεχνογνωσία. 3. Περιορισμός μετρήσεων από μη ιδανικές καιρικές συνθήκες. 4. Ο χρόνος επεξεργασίας και ερμηνείας ενδέχεται να είναι υψηλός. 5. Για να μπορεί να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση, πρέπει η αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες ανάμεσα στο στόχο και στο μέσο διάδοσης να είναι ουσιαστική. 6. Χαμηλές αποδόσεις σε μεγάλα βάθη διασκόπησης λόγω απωλειών ενεργείας. 7. Διασκορπισμός των ραδιοκυμάτων εξαιτίας μεγάλων χαλίκων και τεμαχών πετρώματος, γεγονός το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση κεραίας χαμηλότερης συχνότητας. 8. Μη ικανότητα διασκόπησης σε αγωγίμα περιβάλλοντα. Είναι σημαντικό να προστεθεί, πως η

¹⁹ Χρησιμοποιούνται κεραίες από 100-500MHZ, με βάθος διασκόπησης που κυμαίνεται από 0.5–3m και μερικές φορές τα 5m, σε πολύ ευνοϊκές συνθήκες.

ανακλάσεις από το βραχώδες υπόβαθρο, την επιφάνεια αργιλικών στρωμάτων, κενούς χώρους αλλά και ρήγματα.

11. Όταν τα προφίλ των μετρήσεων βρίσκονται κοντά σε γεωτρήσεις ή άλλες πηγές που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη στρωματογραφία, τα πρωτογενή δεδομένα μπορούν, αν αναλυθούν σε σωστή κλίμακα, να ερμηνευθούν επί τόπου, και να παρέχουν αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, παράλληλα με τις μετρήσεις.

υγρασία του εδάφους, ιδιαίτερα όταν τα επίπεδα αργίλου είναι υψηλά, περιορίζει την απόδοση της μεθόδου αυτής (Dolphin, 1997).

Χαρακτηριστικά, το βάθος διασκόπησης μπορεί να είναι εξαιρετικά περιορισμένο ($< 0.5\text{m}$), αν η αγωγιμότητα του εδάφους είναι υψηλή ($> 30\text{mS/m}$). Μάλιστα, αν η περιοχή έρευνας καλύπτεται από ένα αργιλικό στρώμα, αυτό πρέπει να αφαιρεθεί, προκειμένου να μπορεί η μέθοδος να εφαρμοστεί αποτελεσματικά.

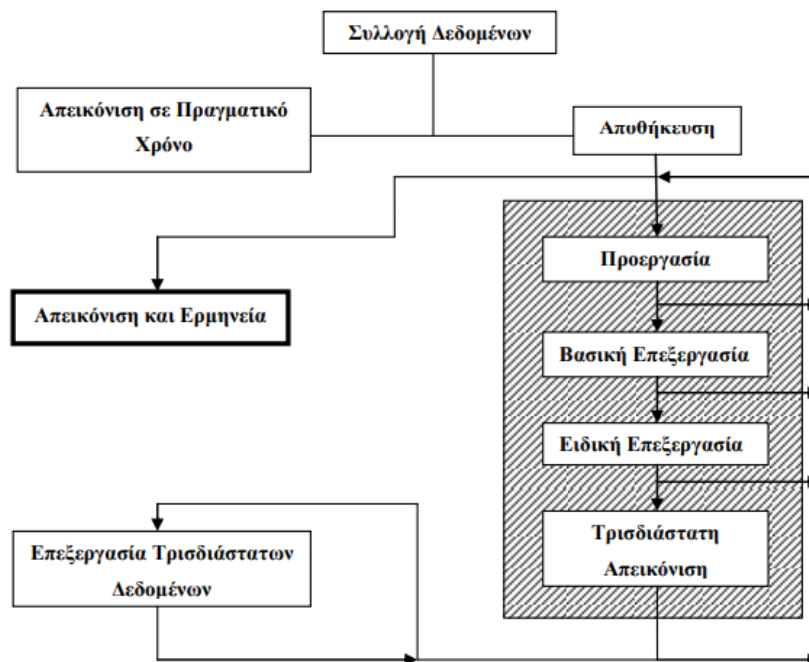
9. Δυσκολία στην εφαρμογή της μεθόδου σε «ανώμαλα» εδάφη, λόγω αδυναμίας κατευθυντικότητας των κυμάτων προς το εσωτερικό του εδάφους.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 4^ο

Επεξεργασία & Απεικόνιση Δεδομένων GPR

Τα δεδομένα GPR συλλέγονται και σε πραγματικό χρόνο είναι άμεσα διαθέσιμα για να περιγράψουν και να ερμηνεύσουν τη στρωματογραφία κάτω από την επιφάνεια διασκόπησης, ακόμη και πριν ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων (Jol, 2009). Έπειτα, με στόχο την ανάδειξη των πληροφοριών που αφορούν τον σκοπό της έρευνας, υποβάλλονται σε επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Annan, 2009):

- Προεργασία (Pre-processing/ editing)
- Βασική επεξεργασία (Basic processing)
- Ειδική επεξεργασία (Special/ advanced processing)



Εικόνα 16. Διάγραμμα ροής των δεδομένων γεωραντάρ (Annan, 2009).

4.1. Συλλογή δεδομένων

Για τη συλλογή των δεδομένων με συγκεκριμένο βήμα διασκόπησης, απαιτείται αρχικά η προσαρμογή των ρυθμίσεων του οργάνου στις ανάγκες της έρευνας. Αφότου ενεργοποιηθεί το όργανο, επιλέγεται το χρονικό παράθυρο για την αποστολή του σήματος και ο αριθμός των σαρώσεων πάνω από ένα σημείο. Στη συνέχεια, ρυθμίζεται ο τρόπος απόκτησης των δεδομένων (Acquisition control). Δεδομένα “GPS”, χρησιμοποιούνται μονάχα εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Έπειτα, σχετικά με τις παραμέτρους απεικόνισης των δεδομένων, επιλέγεται η ενίσχυση που θέλει να εφαρμόσει ο χρήστης. Τέλος, επιλέγεται η αποθήκευση των δεδομένων, προκειμένου αυτά να εξαχθούν μετέπειτα στον υπολογιστή.

4.2. Προεργασία

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται στα δεδομένα ένα είδος προεργασίας, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει συγχώνευση ή απομάκρυνση δεδομένων, αλλαγή στην κλίμακά τους, ή και συνδυασμός τους με τα δεδομένα GPS (Annan, 2001), διόρθωση ή ολική αφαίρεση προβληματικών ιχνών, καθώς και αναδειγματοληψία (Resampling), τόσο στον άξονα των αποστάσεων, όσο και στον άξονα των χρόνων.

4.3. Βασική επεξεργασία

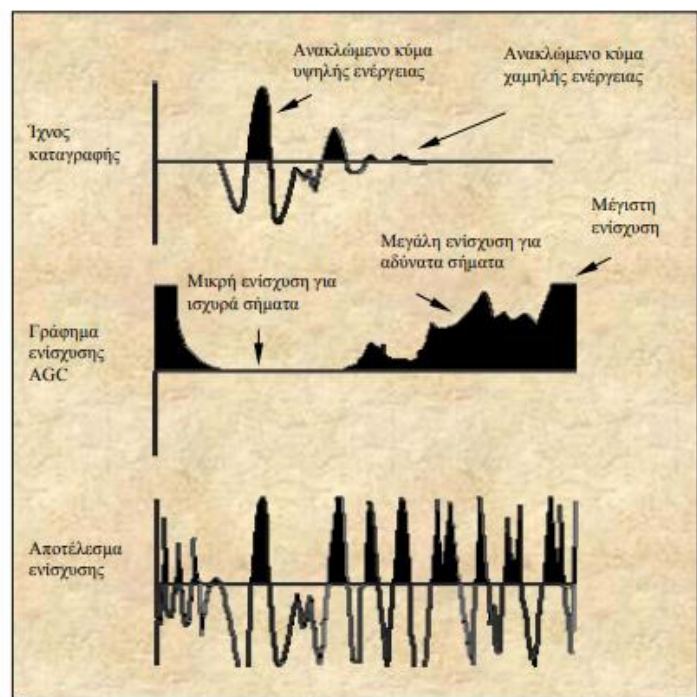
Κατά το στάδιο τη βασικής επεξεργασίας, ενισχύονται τα δεδομένα με το χρόνο και χρησιμοποιούνται φίλτρα ανάλογα με τη συχνότητα, με σκοπό να βελτιωθεί η ποιότητα της εικόνας που προορίζεται για ερμηνεία, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση πιθανά βαθύτερων οριζόντων ή κεκλιμένων στρωμάτων, τα οποία λόγω θορύβου δεν είναι διακριτά πριν το φιλτράρισμα (Αποστολόπουλος, 2013).

4.3.1. Ενίσχυση σήματος

Το φίλτρα ενίσχυσης του σήματος με βάση τη συχνότητα ή το χρόνο διαδρομής, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το H/M κύμα είναι ασθενές, λόγω του φαινομένου της απόσβεσης, για την ενίσχυση των ανακλάσεων χαμηλών πλατών. Η υπερενίσχυση ενός σήματος, μπορεί να οδηγήσει σε μη αληθή συμπεράσματα, ενισχύοντας το θόρυβο, ενώ αντίθετα η μείωση της ισχύος του σήματος μπορεί να εξαφανίσει χρήσιμα δεδομένα. Ο Annan (1999) προτείνει την εξέταση των γραφημάτων μέσου χρονικού πλάτους των δεδομένων, πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης, για να διασφαλιστεί ότι αυτό έχει εφαρμοστεί σωστά. Πριν από την

εφαρμογή των φίλτρων ενίσχυσης, η γραφική παράσταση πρέπει να δείχνει πτώση του πλάτους σήματος, ενώ μετά την εφαρμογή του ιδανικού τρόπου ενίσχυσης, το πλάτος του σήματος θα πρέπει να παραμένει σταθερό μετά τη μέγιστη τιμή του. Οι σημαντικότεροι τρόποι ενίσχυσης των δεδομένων GPR, σύμφωνα με τον *Jol (2009)*, είναι οι ακόλουθοι:

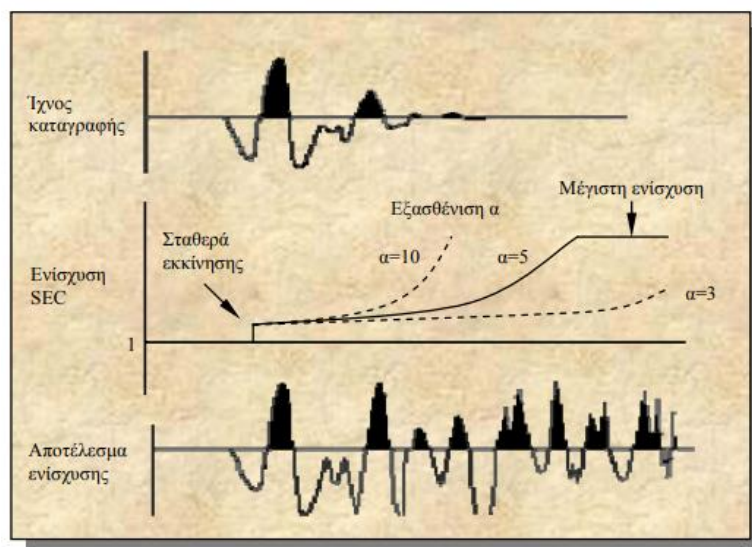
- **Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic Gain Control, AGC):** Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει το αντίστροφο της μέσης τιμής (ή μέση ενέργεια) γύρω από το κεντρικό σημείο του ίχνους και ακολούθως πολλαπλασιάζει τον αντίστροφο της μέσης τιμής με τα αρχικά δεδομένα. Πρακτικά, εφαρμόζεται μία ενίσχυση που υπολογίζεται αυτόματα από τη μέση μείωση της ισχύος του σήματος, με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, τα μεγάλα πλάτη ενισχύονται λίγο ή και καθόλου, ενώ για τα μικρά πλάτη έχει μεγάλη τιμή (εικ. 17). Από τη στιγμή που θα εφαρμοστεί ο τύπος ενίσχυσης AGC, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από τη συσχέτιση των πλατών των κυμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς ανακλαστήρες. Με χρήση της συγκεκριμένης ενίσχυσης, τονίζεται πολύ ο θόρυβος στα δεδομένα²⁰.



Εικόνα 17. Απεικόνιση της ενίσχυσης AGC και της επίδρασής της στο σήμα καταγραφής (Πουλιούδης, 1999).

²⁰ Βλ. *Sensors & Software (2003)* για περισσότερες λεπτομέρειες.

- **Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (Spherical & Exponential Compensation, SEC):** Η ενίσχυση SEC²¹ αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης, η οποία εξαρτάται από το χρόνο. Ο συγκεκριμένος τύπος ενίσχυσης, δύναται να αντισταθμίσει τις απώλειες της γεωμετρικής διασποράς και την εκθετική εξασθένιση της ενέργειας (*van Overmeeren, 1998*). Παράλληλα, συμπυκνώνεται το δυναμικό εύρος του παλμού, δηλαδή μικραίνει ο λόγος της πιο ισχυρής προς την πιο ασθενή καταγραφή (*Annan, 1999*). Η ενίσχυση SEC μέχρι να προσεγγίσει τη μέγιστη τιμή της πραγματοποιείται με εκθετικούς ρυθμούς, ενώ στη συνέχεια παραμένει σταθερή (**εικ. 18**). Ο *Leckebusch (2003)* συνιστά τη χρήση του SEC έναντι του AGC, καθώς το τελευταίο παραμορφώνει τα σχετικά πλάτη.



Εικόνα 18. Η ενίσχυση SEC (*Πουλιούδης, 1999*).

- **Σταθερή, γραμμικά εκθετική (Constant Gain):** Η σταθερή ενίσχυση είναι ο πιο απλός τύπος ενίσχυσης. Κατά την εφαρμογή της, όλα τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με μία σταθερά. Με τον τρόπο αυτό, δε βελτιώνεται ουσιαστικά η εικόνα, αφού η αναλογία μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών στα δεδομένα παραμένει σταθερή.

²¹ Βλ. *Cassidy (2009)*, *Leckebusch (2003)* και *Sensors & Software (2003)* για περισσότερες λεπτομέρειες.

4.3.2. Φίλτρα

- **Διόρθωση των χρόνων πρώτης άφιξης (Time Zero Shift Correction):**

Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου οι πρώτες αφίξεις δεν ανιχνεύονται με ακρίβεια από το GPR, με αποτέλεσμα οι ανακλάσεις να ευθυγραμμίζονται λανθασμένα²². Επομένως, απαιτείται η διόρθωσή τους, με σκοπό την μετακίνηση τους στη σωστή τους θέση στην κατακόρυφη κλίμακα (*Lejzerowicz et al., 2014*). Αναλυτικότερα, τα μετρούμενα ίχνη κατά μήκος ενός προφίλ μετρήσεων, μετατοπίζονται μεμονωμένα κατά μήκος του άξονα του χρόνου, έτσι ώστε ένα αναγνωρίσιμο χαρακτηριστικό που είναι κοινό σε κάθε ίχνος, να ευθυγραμμίζεται σε ένα κοινό χρονικό σημείο. Η διόρθωση λοιπόν των χρόνων πρώτης άφιξης, βελτιώνει τη χωρική συνοχή του χρονικού τμήματος που προκύπτει και το προετοιμάζει για περαιτέρω επεξεργασία.

- **Φίλτρα επεξεργασίας δεδομένων βάσει της συχνότητας (Frequency Domain Filtering):** Αποτελούν κατακόρυφα και οριζόντια φίλτρα, τα οποία χωρίζονται σε

δύο κατηγορίες, οι οποίες με την σειρά τους, όταν εφαρμόζονται ταυτόχρονα, αφήνουν να διατηρηθεί ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων, ενώ απορρίπτουν τα υπόλοιπα (Band Pass Filtering). Ακόμη, αποσκοπούν στη μείωση του ανεπιθύμητου θορύβου στα χαμηλά και υψηλά άκρα του φάσματος πλάτους (*Best et al., 2006; Cassidy & Jol, 2009*).

1. Πρώτη κύρια κατηγορία φίλτρων, αποτελούν τα **φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Low Pass Filters)**, που συμβάλουν στην απομάκρυνση του υψίσυχνου θορύβου. Όμως, λόγω της διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, είναι δυνατό να απομακρυνθούν παράλληλα και χρήσιμα δεδομένα.
2. Στην δεύτερη κύρια κατηγορία φίλτρων, υπάγονται τα **φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (High Pass Filters)**, τα οποία επιτρέπουν την ενίσχυση της τοπικής λεπτομέρειας. Τα φίλτρα αυτά, στηρίζονται στην τεχνική της παραγωγού και χρησιμοποιούνται στα δεδομένα και στους δύο άξονες, ενώ βοηθούν στην επιλεκτική διατήρηση χρήσιμων δεδομένων.

Ένα χαρακτηριστικό φίλτρο της συγκεκριμένης κατηγορίας, αποτελεί το μονοδιάστατο φίλτρο **“Dewow”** ή αλλιώς **διόρθωση κορεσμού σήματος**

²² Η κακή αυτή ευθυγράμμιση προκαλείται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της μετατόπισης στα ηλεκτρονικά των κεραιών και μικρές παραλλαγές κατά μήκος του προφίλ μετρήσεων, τόσο στην απόσταση, όσο και στον προσανατολισμό της κεραίας πομπού-δέκτη.

(Cassidy & Jol, 2009), αποκοπής των χαμηλών συχνοτήτων (θόρυβος WOW) από τα δεδομένα. Το πεδίο που βρίσκεται κοντά στον πομπό περιέχει χαμηλής συχνότητας ενέργεια, η οποία σχετίζεται με ηλεκτροστατικά και επαγωγικά πεδία, που εξασθενεί ραγδαία με την απόσταση (Annan, 2005). Η ενέργεια αυτή αναγκάζει τη βάση του σήματος που καταγράφεται να κυρτωθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Να σημειωθεί εδώ, ότι τα φίλτρα μίας διάστασης μπορούν να σχεδιαστούν και να εφαρμοσθούν σε δεδομένα που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, ή σε δεδομένα διαφορετικών ιχνών, που όμως καταγράφηκαν την ίδια χρονική στιγμή. Για το λόγο αυτό, το χρονικό εύρος παραθύρου, θα πρέπει να οριστεί περίπου ίσο με μία κύρια περίοδο χρόνου, σε κάθε σημείο του ίχνους. Κατόπιν, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων που ανήκουν στο χρονικό παράθυρο, η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Στη συνέχεια, το παράθυρο μετατοπίζεται κατά ένα σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

4.4. Ειδική επεξεργασία

Το στάδιο της ειδικής επεξεργασίας, αφορά την εφαρμογή μετασχηματισμών από την επεξεργασία σήματος και τον υπολογισμό μιγαδικών χαρακτηριστικών, όπως είναι η στιγμιαία συχνότητα ή το στιγμιαίο πλάτος. Αναλυτικότερα, αφορά την αποσυνέλιξη, την αφαίρεση των πολλαπλών ανακλάσεων, την εφαρμογή φίλτρων στο χώρο της συχνότητας–κυματοαριθμού (FK) και την απομάκρυνση του θορύβου του υποβάθρου.

4.4.1. Αναλυτικό σήμα και μιγαδικά χαρακτηριστικά

Οι μετασχηματισμοί δεδομένων από μια μορφή σε μια άλλη, είναι συνηθισμένοι στην ανάλυση σημάτων, και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών από χρονοσειρές²³. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης των δεδομένων έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή σχέσεων και συμπερασμάτων που διαφορετικά δεν θα ήταν κατανοητά. Αν και ο μετασχηματισμός δεδομένων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων, με χρήση του μετασχηματισμού Fourier, δίνει τη δυνατότητα μελέτης μιας χρονοσειράς σε ολόκληρο το χρονικό εύρος της, δεν επιτρέπει τη μελέτη των τοπικών διακυμάνσεων, οι οποίες περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την ερμηνεία των μη γραμμικών και μη στάσιμων σημάτων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία στους υπολογισμούς, το σήμα που λαμβάνεται από

²³ Σεισμικά δεδομένα, δεδομένα GPR κτλ.

το GPR δύναται να μετατραπεί από πραγματικό σε μιγαδικό αριθμό. Η μιγαδική ανάλυση των ιχνών αποτελεί μία τεχνική που εξασφαλίζει την τοπική λεπτομέρεια και έχει ως αποτέλεσμα το φυσικό διαχωρισμό του πλάτους, της φάσης και της συχνότητας μιας κυματομορφής (Balch, 1970; Taner et al., 1979). Ο μετασχηματισμός Hilbert αποτελεί μία ακόμα μορφή επεξεργασίας, κατά την οποία αναδεικνύονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του καταγεγραμμένου ανακλώμενου H/M κύματος και τα οποία αφορούν το συχνοτικό του περιεχόμενο ή την ισχύ του, για τη εύρεση του στιγμιαίου πλάτους. Με άλλα λόγια, από το αναλυτικό σύνθετο σήμα μπορούν να ανακτηθούν όλες εκείνες οι πληροφορίες από την εικόνα του αρχικού σήματος, οι οποίες είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων (Σπανουδάκης, 2002).

4.4.2. Διαδικασία αντιστροφής

Η αντιστροφή είναι η μαθηματική τεχνική που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εξαγωγή φυσικών μετρήσιμων παραμέτρων, από ένα σύνολο παρατηρούμενων δεδομένων. Ένα σύστημα μέτρησης, λαμβάνει δεδομένα σε έναν αριθμό χωρικών σημείων που περιέχουν έναν αριθμό διαφορετικών συχνοτήτων ή διαφορετικών χρονικών καθυστερήσεων. Στόχος είναι ο υπολογισμός της χωρικής αυτής κατανομής των ιδιοτήτων του υλικού, που προκαλούν την παρατηρούμενη απόκριση. Η μοντελοποίηση του ευθέους προβλήματος (Forward problem), παρέχει τα εργαλεία με τα οποία οι αποκρίσεις μπορούν να προβλεφθούν, εάν δοθεί μια γνωστή κατανομή φυσικών ιδιοτήτων, με την αντιστροφή (Inversion) να αποτελεί το αντίστροφο αυτής της διαδικασίας (εικ. 19). Δεδομένων των παρατηρούμενων πεδίων, αυτές οι παρατηρήσεις πρέπει να μετατραπούν ξανά σε μια χωρική κατανομή φυσικών ιδιοτήτων, οι οποίες επιζητείται να είναι μοναδικές και αξιόπιστες.

Η πρώτη επιτυχημένη εξαγωγή φυσικών ιδιοτήτων από το GPR περιγράφεται από τον van der Kruk (2001). Σε αυτή την εργασία, τα διανυσματικά πεδία στην επιφάνεια ως συνάρτηση του χρόνου, επεξεργάζονται για να εξαχθούν αλλαγές στην ηλεκτρική διαπερατότητα και την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Η λύση διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τη λύση της ολοκληρωτικής εξίσωσης προσέγγισης Born (1999). Η συγκεκριμένη εργασία, παρέχει μια εξαιρετική βάση για την κατανόηση της μελλοντικής εξέλιξης των αντιστροφών των αποκρίσεων GPR σε μετρήσιμες ιδιότητες υλικού. Μέχρι σήμερα, όσο αφορά το GPR, προτιμάται η εφαρμογή των τεχνικών μετανάστευσης (Migration) σε αντίθεση με την πλήρη αναστροφή.



Εικόνα 19. Τα βήματα της διαδικασίας της αντιστροφής των αποκρίσεων του γεωραντάρ (Annan, 2003).

4.4.3. Φίλτρα ειδικής επεξεργασίας

- **Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου ή αφαίρεσης φόντου (Background Subtraction):** Το συγκεκριμένο φίλτρο, ενισχύει τις υπερβολικές ανακλάσεις, οι οποίες προκύπτουν από σημειακούς ή/και γραμμικούς υπεδαφικούς στόχους και υπερκαλύπτονται από ισχυρότερες ανακλάσεις στα ίδια βάθη. Ακόμη, αφαιρεί τις αποκρίσεις από τα απευθείας κύματα αέρα και εδάφους και μειώνει το θόρυβο χαμηλής συχνότητας. Όμως, πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή, έτσι ώστε να μη διαγραφούν ανακλάσεις που προκύπτουν από οριζόντιες δομές.
- **Αποσυνέλιξη (Deconvolution):** Η αποσυνέλιξη των δεδομένων χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των πολλαπλών ανακλάσεων, του θορύβου που οφείλεται στην αντήχηση των κεραιών (antenna ringing), η οποία εμφανίζεται στα δεδομένα ως οριζόντιοι ανακλαστήρες, καθώς και για την αύξηση της χρονικής ανάλυσής τους.

- **Φίλτρο επανατοποθέτησης ιχνών στο χώρο (Migration)²⁴:** Στόχος του συγκεκριμένου φίλτρου, είναι να διορθώσει τις γεωμετρικές διαστρεβλώσεις στα δεδομένα του GPR, δηλαδή να μεταφέρει την κάθε ανάκλαση και ενέργεια περίθλασης στην πραγματική τους θέση (Orlando, 2007; Ren et al., 2013). Ειδικότερα, η εφαρμογή της τεχνικής αυτής, συμπύσσει τις αποκρίσεις των ανακλώμενων H/M κυμάτων υπερβολικής μορφής και αναδεικνύει τις σημειακές τους πηγές. Συχνά, εφαρμόζεται και για την εξάλειψη των «ουρών» των υπερβολών περίθλασης (Böniger & Tronicke, 2010). Ο Annan (1999), προειδοποιεί ότι η μετανάστευση μπορεί να εισάγει ψευδείς ανακλάσεις και ο Conyers (2004) προειδοποιεί ότι μπορεί να παραμορφώσει τις ήδη υπάρχουσες, ενώ παράλληλα συνιστά την ανάλυση των δεδομένων πριν από τη μετανάστευση, καθώς η παρουσία υπερβολών μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση υπεδάφινων στόχων. Το σχήμα των υπερβολών εξαρτάται από την ταχύτητα των H/M κυμάτων στον υπό μελέτη χώρο, επομένως η μετανάστευση απαιτεί η ταχύτητα που δηλώνεται να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη. Δεδομένου ότι ένα σφαιρικό ή/και πεπερασμένο γραμμικό αντικείμενο παράγει μια υπερβολική ανάκλαση, η μετανάστευση που χρησιμοποιεί τη σωστή ταχύτητα, πρέπει να οδηγήσει σε μια ανάκλαση που μιμείται το μέγεθος και τη θέση της κορυφής της σφαίρας ή/και του κυλίνδρου. Εάν μια σειρά δοκιμών μετανάστευσης εκτελείται χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες, αυτή που παράγει το ακριβέστερο αποτέλεσμα, θεωρείται πως αντιπροσωπεύει τη μέση ταχύτητα για το υπέδαφος (του χώρου μεταξύ της επιφάνειας διασκόπησης και της κορυφής της σφαίρας (Leckebusch, 2003)). Εάν η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλή, τα δεδομένα θα υπό-μεταναστεύσουν, ενώ εάν η ταχύτητα είναι υψηλότερη από την πραγματική, τα δεδομένα θα μεταναστεύσουν υπερβολικά. Η βέλτιστη ταχύτητα μπορεί να προσδιοριστεί με πειραματισμό ή να μετρηθεί χρησιμοποιώντας το εργαλείο “Hyperbola Velocity Calibration” στο εκάστοτε λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων GPR. Οι ευρέως δύο χρησιμοποιούμενοι τρόποι μετανάστευσης, είναι οι ακόλουθοι:

→ Τα δεδομένα GPR, αφού μετασχηματιστούν μέσω της ανάλυσης Fourier σε επίπεδα κύματα σε μονοχρωματική συχνότητα, στη συνέχεια επεξεργάζονται

²⁴ Περισσότερες πληροφορίες για τη διαδικασία της μετανάστευσης υπάρχουν στο εγχειρίδιο του Yilmaz (2001).

μεμονωμένα για να υπερθέσουν την ενέργεια του στόχου. Αυτός ο μετασχηματισμός επινοήθηκε από τον *Stolt* (1978) και ονομάζεται “*Stolt Migration*” ή “*FK Migration*”. Η μετανάστευση FK έχει μια εγγενή υπόθεση ότι τα δεδομένα GPR έχουν μηδενική ή πολύ μικρή απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη και χρησιμοποιεί ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων, παρόλο που απαιτείται μόνο ένα μέρος αυτών για τη μετανάστευση.

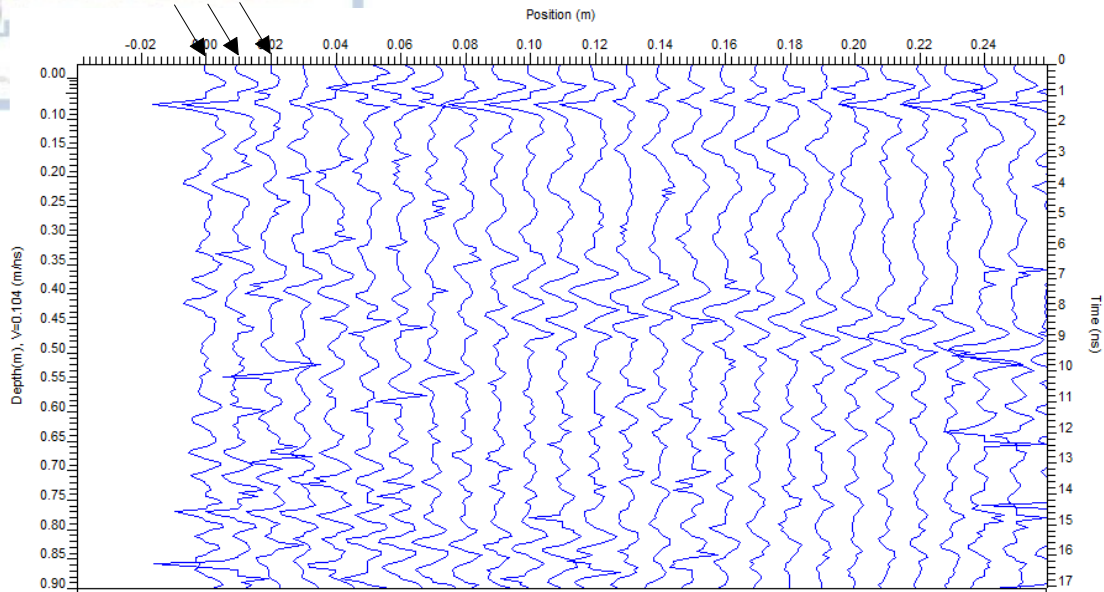
→ Αντίθετα, η μετανάστευση Kirchhoff χρησιμοποιεί μια πεπερασμένη περιοχή δεδομένων γύρω από το στόχο και έχει την επιλογή για το χρήστη να ορίσει το λειτουργικό εύρος.

4.5. Απεικόνιση δεδομένων

Τα δεδομένα που ανακτώνται από τις μετρήσεις του GPR, μπορούν να παρουσιαστούν ως μονοδιάστατα ίχνη (1D), ως δισδιάστατες τομές (2D) ή/και ως τρισδιάστατες αναπαραστάσεις (3D), απεικονίζοντας τη χωρική μεταβολή στις μετρούμενες ιδιότητες. Η σωστή απεικόνιση των δεδομένων, διευκολύνει την ερμηνεία τους. Η ερμηνεία στηρίζεται κυρίως στην εμπειρία του γεωφυσικού και ουσιαστικά επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση των φυσικομαθηματικών μοντέλων που παράγονται μετά την επεξεργασία των δεδομένων, με τη γεωλογική δομή της περιοχής της έρευνας.

4.5.1. Μονοδιάστατα ίχνη

Το διάγραμμα καταγραφής ενός μονοδιάστατου ίχνους GPR (**Amplitude Scan, A-Scan**) αναπαριστά το εύρος ή πλάτος του σήματος (amplitude). Στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η θέση της κεραίας (m) και στον κατακόρυφο ο χρόνος διπλής διαδρομής του σήματος (ns), ο οποίος στη συνέχεια μετατρέπεται στο αντίστοιχο βάθος (**εικ. 20**).

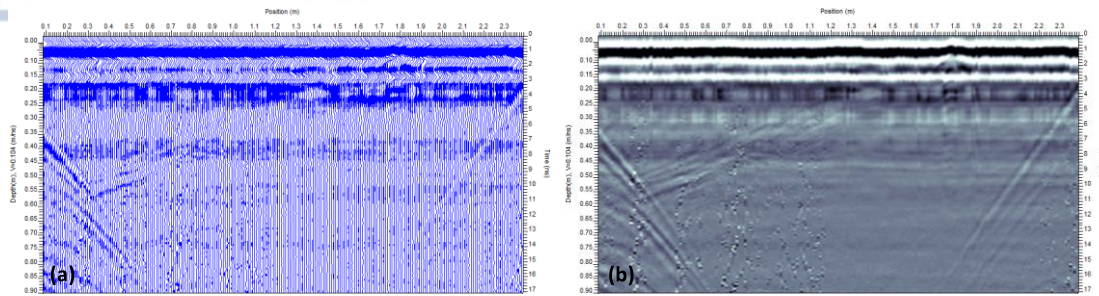


Εικόνα 20. Απεικονίζεται η καταγραφή πολλών ιχνών στη σειρά (μαύρα βέλη).

4.5.2. Δισδιάστατη απεικόνιση

Πολλά ίχνη μαζί τα οποία έχουν προέλθει από τη συνεχή καταγραφή κατά την μετακίνηση της κεραίας οριζόντια και με σταθερό βήμα, αφού τοποθετηθούν σε σειρά, μπορούν να παράγουν διαφορετικούς τύπους εικόνων που απεικονίζουν τις αλλαγές στις ιδιότητες του υπεδάφους, στην κάθετη και την οριζόντια διάσταση (Leckebusch, 2003; Conyers, 2004; Annan, 2009). Μία τυπική απεικόνιση αποτελεί το **ραδιόγραμμα ανάκλασης GPR (Radagram)** ή αλλιώς **τομή GPR (Cross Section ή Brightness Scan, B-Scan)**, με τον οριζόντιο άξονα να αντιπροσωπεύει την απόσταση (m) που διένυσε η κεραία κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης, και τον κατακόρυφο άξονα να αντιστοιχεί στο διπλό χρόνο διαδρομής (ns) του H/M κύματος από τον πομπό στο δέκτη (**εικ. 21α**). Ειδικότερα, τα πλάτη των H/M κυμάτων κωδικοποιούνται με τη μορφή χρωμάτων, αντιστοιχίζοντας την ισχύ (εύρος) του καταγεγραμμένου σήματος με συγκεκριμένη απόχρωση (λαμπρότητα) της παλέτας που έχει επιλεγεί (Daniels, 2000). Η λαμπρότητα (brightness) ή ισχύς μίας υπερβολικής ανάκλασης, εξαρτάται από τη διαφορά στις διηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του μέσου και του στόχου, με μεγαλύτερη αντίθεση να αντιστοιχεί σε πιο ισχυρή παραγόμενη ανάκλαση. Σε μία χρωματική κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρι, αν θεωρηθεί μία κεραία της οποίας ο εκπεμπόμενος παλμός παρουσιάζει αλληλουχία πολικότητας απαρτιζόμενη πρώτα από μία θετική κορυφή και ακολουθούμενη από μία αρνητική κορυφή (και πιθανώς ακολουθούμενη από μία δεύτερη θετική) (**εικ. 21b**), τα θετικά σήματα (κορυφές)

αντιπροσωπεύονται με λευκά χρώματα και τα αρνητικά σήματα (γούρνες) με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 21. (a) Ραδιόγραμμα στο οποίο είναι διακριτά τα ίχνη από τα οποία αποτελείται. **(b)** Παράδειγμα διδιάστατης τομής GPR, κωδικοποιημένη σε χρωματική κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρι, σχηματιζόμενη από την υπέρθεση πολλαπλών μονοδιάστατων ιχνών.

Οι ανακλάσεις που προέρχονται από μικρούς ή σημειακούς σκεδαστές-στόχους που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, εμφανίζονται στην τομή GPR, ως περιθλάσεις υπερβολικής μορφής (Diffraction Hyperbolas). Αυτό συμβαίνει καθώς τα Η/Μ κύματα εκπέμπονται από την κεραία με τη μορφή ευρείας κωνικής δέσμης, με αποτέλεσμα ο δέκτης να λαμβάνει τα ανακλώμενα σήματα από έναν υπεδαφικό στόχο όχι μόνο όταν διέρχεται ακριβώς πάνω από τη θέση στην οποία αυτός βρίσκεται, αλλά επίσης, και σε πολλές σαρώσεις πριν και μετά τη θέση αυτή. Συνεπώς, οι ανακλάσεις προέρχονται πάντα από την κορυφή του σημειακού στόχου, και το μέγιστο (κορυφή) της καταγεγραμμένης καμπύλης υπερβολής, αντιστοιχεί ακριβώς στη θέση στην οποία βρίσκεται ο στόχος. Η συγκεκριμένη υπόθεση, επαληθεύεται μέσω της γεωμετρίας του συστήματος συντεταγμένων, έχοντας υποθέσει έναν ομοιογενή ημιχώρο με ταχύτητα διάδοσης V και κεραία με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη. Επομένως, ένας σημειακός σκεδαστής που βρίσκεται σε μία θέση $(0, z_0)$ στον ημιχώρο, θα ανιχνευθεί από την κεραία που είναι τοποθετημένη στη θέση $(x, 0)$, σε μία απόσταση ίση με $\sqrt{x^2 + z_0^2}$. Ως εκ τούτου, η επιστρέφουσα κυματομορφή θα εμφανίζεται παραγόμενη σε φαινόμενο βάθος $Vt/2$ κάτω από το δέκτη, διότι ο χρόνος διαδρομής οφείλει να υπακούει στην παρακάτω υπερβολική εξίσωση:

$$\left(\frac{Vt}{2}\right)^2 - x^2 = z_0^2 \quad (4.1)$$

Συνήθως, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος (διάμετρος) ενός σημειακού σκεδαστή, τόσο πιο ισχυρή (μεγαλύτερου εύρους) είναι η παραγόμενη υπερβολική ανάκλαση. Το

σχήμα της ανακτώμενης υπερβολής από το δέκτη, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

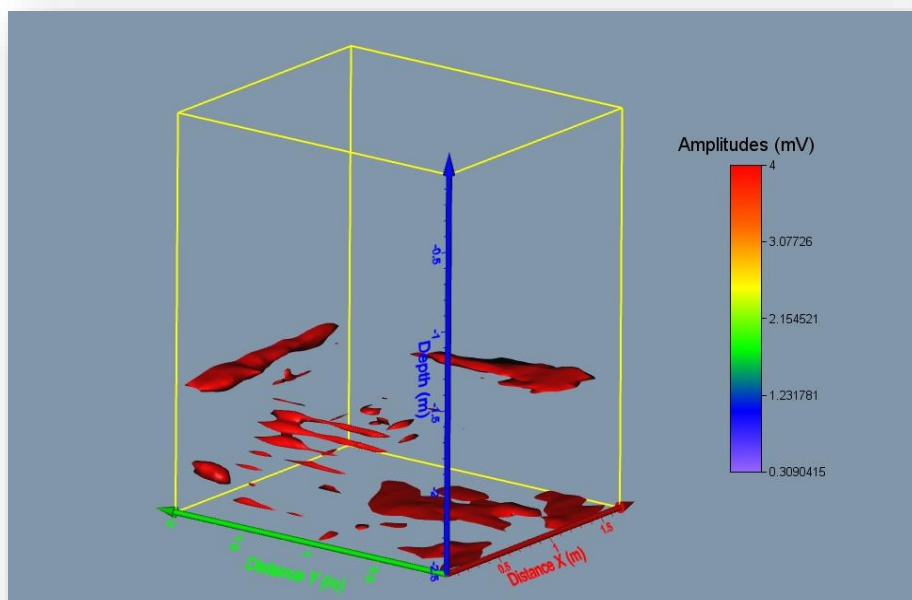
- **Τη διάταξη της κεραίας:** Όταν η κεραία διασχίζει έναν υπεδαφικό γραμμικό στόχο σωληνοειδούς μορφής εγκάρσια, δηλαδή κάθετα ως προς τον κατά μήκος άξονα του στόχου, τότε η ανάκλαση που καταγράφεται θα εμφανίζει υπερβολική μορφή, ομοίως με την περίπτωση της περίθλασης από σημειακούς σκεδαστές. Στην περίπτωση που η κεραία κινείται παράλληλα με τον υπεδαφικό γραμμικό στόχο σωληνοειδούς μορφής, δηλαδή κατά μήκος του στόχου, τότε η ανάκλαση θα εμφανίζεται ως συνεχής ευθεία γραμμή, εφόσον η απόστασή της κεραίας από τον υπεδαφικό στόχο παραμένει σταθερή. Οι διάφορες υπεδαφικές ανομοιογένειες, όπως οι ρωγμές με αέρα, παράγουν ισχυρές ανακλάσεις χωρίς συγκεκριμένο σχήμα. Υπάρχουν τρία σφάλματα τα οποία εμφανίζονται σε ένα ραδιόγραμμα, ως αποτέλεσμα της διάταξης των κεραιών, τα οποία δύναται να συμβούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους, και είναι τα ακόλουθα:
 - Εισαγωγή διαφοράς φάσης.
 - Ασυμφωνία πλάτους.
 - Παραμόρφωση του παλμού ως προς τη θέση, το μέγεθος και το σχήμα του.
- **Το βάθος του σκεδαστή:** Σε μεγαλύτερα βάθη, οι υπερβολές εμφανίζουν μεγαλύτερο μέγεθος, γιατί αποτελούνται από περισσότερες σαρώσεις.
- **Την ταχύτητα των Η/Μ κυμάτων στο μέσο διάδοσης:** Υψηλότερη ταχύτητα Η/Μ κυμάτων παράγει ευρύτερες (πιο «ανοιχτές») υπερβολές και αντίστροφα.

4.5.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση

Πραγματοποιώντας πολλαπλές οριζόντιες και ισαπέχουσες σαρώσεις σε ένα Χ,Υ αξονικό επίπεδο συντεταγμένων υπό τη μορφή ορθογώνιου πλέγματος ή πολλαπλές παράλληλες δισδιάστατες τομές, επιτυγχάνεται η συλλογή ενός τρισδιάστατου σετ δεδομένων (**Contrast Scan, C-scan**), το οποίο αξιοποιείται για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων του υπεδάφους. Η τρισδιάστατη απεικόνιση προκύπτει από το στιγμιαίο πλάτος, το οποίο υπολογίζεται για όλες τις εγκάρσιες τομές του GPR και στη συνέχεια, δημιουργείται ένας τρισδιάστατος όγκος με άξονες Χ (m), Υ (m) και Ζ (m) (εικ. 22). Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση της υπεδαφικής περιοχής

ενδιαφέροντος, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη θέση, το βάθος αλλά και τον προσανατολισμό των εσωτερικών ανακλάσεων.

Σήμερα, τα περισσότερα λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων GPR παρέχουν τη δυνατότητα απεικόνισης των 3D δεδομένων με διάφορους τρόπους, όπως με τη μορφή οριζόντιων τομών ανά καθορισμένα χρονικά εύρη, που αντιστοιχούν σε βάθη παράλληλα με το επίπεδο καταγραφής ή/και με τη μορφή 3D όγκων. Πιο συγκεκριμένα, η κάθε εγκάρσια τομή, προβάλλεται στους άξονες Y και Z, σε ανταπόκριση με την γεωμετρία του καννάβου διασκόπησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα προβολής οριζόντιων τομών (άξονες X και Y), ως προς ένα συγκεκριμένο χρόνο που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Ο συνδυασμός των ραδιογραμμάτων, με σκοπό τη ψευδό-τρισεδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων ή η δημιουργία οριζόντιων χαρτών με ανάπτυξη σε βάθος (Depth Slices), καθιστούν έναν ακόμη τρόπο απεικόνισης των δεδομένων. Όσον αφορά τις οριζόντιες τομές, πολλές φορές βοηθά η απεικόνιση ισότιμων καμπυλών, επιφανειών σταθερού πλάτους, καθώς και χαρτών ανάγλυφου. Ο συνδυασμός των διαφόρων τρόπων απεικόνισης μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο για την ερμηνεία των δεδομένων, επιλέγοντας προσεκτικά τη χρωματική κλίμακα, την οπτική γωνία και τον αριθμό των χρωμάτων απεικόνισης.



Εικόνα 22. Παράδειγμα τρισεδιάστατης απεικόνισης (3D) δεδομένων γεωραντάρ που λήφθηκαν από την έρευνα ενός εξορυχθέντος τεμάχους μαρμάρου.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 5^ο

GPR & Ασυνέχειες Πετρωμάτων

5.1. Εισαγωγή

Τα ρήγματα, οι ασυνέχειες, οι ρωγματώσεις και τα κενά εντός του συμπαγούς πετρώματος, αποτελούν κρίσιμο πρόβλημα όταν το εξορυγμένο προϊόν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για διακοσμητικούς σκοπούς. Οι θραύσεις αυτές κυμαίνονται από μερικά μικρόμετρα για μικρό-ρωγμές, έως κάποια χιλιόμετρα για μεγάλα ρήγματα. Ο σχηματισμός τους, μπορεί να οφείλεται σε γεωλογικά φαινόμενα, όπως είναι η παραμόρφωση του πετρώματος υπό τεκτονικές δυνάμεις, καθώς και σε ανακατανομή των επιτόπιων τάσεων από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως είναι η εξόρυξη του βράχου, η διάνοιξη σήραγγας, οι γεωτρήσεις ή η χρήση εκρηκτικών σε λατομεία. Η πιθανή χαρτογραφική περιγραφή τέτοιων ζωνών, μέσω έμμεσων τεχνικών δύναται να βοηθήσει στον υπολογισμό των αποθεμάτων, στον σχεδιασμό των προπορευόμενων μετώπων ενός λατομείου και στην αξιολόγηση της ποιότητας των τελικών προϊόντων, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους εξόρυξης.

5.2. Χρήση σε λατομεία

Οι γεωφυσικές μέθοδοι έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά εργαλεία για τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση θραυσιγενών ζωνών, συμβάλλοντας σημαντικά στον ποιοτικό έλεγχο και τη βελτίωση της παραγωγικότητας στον κλάδο των λατομείων. Η επιλογή της γεωφυσικής μεθόδου, εξαρτάται από τη φύση του εκάστοτε προβλήματος, καθώς και από τα διαθέσιμα κεφάλαια. Το GPR, ως μία μη-καταστρεπτική Η/Μ γεωφυσική μέθοδος, έχει κερδίσει εξέχουσα θέση λόγω της αποτελεσματικότητάς της και της οικονομικής αποδοτικότητάς της σε εφαρμογές εξόρυξης (Davis & Annan, 1989; Grandjean & Gourry, 1996; Ferrero et al., 2007). Το γεωραντάρ χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ασυνεχειών και ρωγματώσεων εσωτερικά της βραχομάζας εδώ και σχεδόν 40 χρόνια (Stewart & Unterberger, 1976), μέσω της καταγραφής των ανακλώμενων κυμάτων που δημιουργούν οι αστοχίες αυτές, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν ορυκτά υψηλής αγωγιμότητας. Η ανακλαστικότητά τους

ποικίλλει ανάλογα με το υλικό πλήρωσης των ζωνών αυτών (το οποίο ενδέχεται να είναι αέρας, άργιλος, νερό κ.λπ.), το μέγεθος και την τραχύτητα τους (Grandjean & Gourry, 1996; Giannopoulos & Diamanti, 2008; Diamanti & Redman, 2012). Τα πετρώματα γενικά, προσφέρουν ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης της Η/Μ λόγω της σχετικά χαμηλής απορρόφησής τους, στη ζώνη των συχνοτήτων των συστημάτων GPR (Annan, 2001).

Συνοπτικά, οι κύριοι τομείς χρήσης της μεθόδου του GPR αφορούν:

- Την αναζήτηση νέων λατομικών χώρων, που δύναται να αναπτυχθούν στο μέλλον, μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης των ρωγματώσεων στις περιοχές διασκόπησης.
- Την αξιολόγηση της βραχομάζας σε ενεργά λατομεία και τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης, σύμφωνα με τις ασυνέχειες μικρής και μεγάλης κλίμακας της βραχώδους μάζας. Αναλυτικότερα, το GPR προσφέρει τη δυνατότητα διερεύνησης της περιοχής γύρω από την οποία λαμβάνει χώρα η εξόρυξη, καθώς και των ανοιχτών μετώπων εξόρυξης, προκειμένου να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν ρηξιγενείς ζώνες στους υπό εξόρυξη όγκους πετρώματος.
- Την τελική αξιολόγηση του εξορυγμένου πετρώματος, μέσω της χρήσης κεραιών υψηλής κεντρικής συχνότητας.

5.3. Χρήση σε τεμάχια μαρμάρου

Μετά την εξαγωγή των τεμαχών πετρώματος, είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί η εσωτερική τους δομή πριν ξεκινήσει η διαδικασία της τελικής τους κοπής, καθώς η εμπορεύσιμη αξία τους εξαρτάται από το πόσο «υγιές» / συμπαγές είναι το πέτρωμα. Ειδικότερα, το μάρμαρο, λόγω των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων, είναι ένα ιδανικό μέσο για εφαρμογές GPR, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την εσωτερική του δομή, η οποία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιολόγηση της ποιότητας του και τον μετέπειτα σχεδιασμό βέλτιστων στρατηγικών εξόρυξης. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή του GPR, με χρήση κεραιών υψηλής κεντρικής συχνότητας, με στόχο:

- Τον ποιοτικό έλεγχο των τεμαχών μαρμάρου πριν από τη μεταφορά τους στο κοπήριο και μετά τον ορθογωνισμό, διαδικασία η οποία είναι πολύ κερδοφόρα

όταν η τοποθεσία του λατομείου είναι αρκετά μακριά από τις εγκαταστάσεις της εταιρείας. Αναλυτικότερα, ο προσδιορισμός της υφής, η χωρική κατανομή των δομικών ασυνεχειών, όπως κοιλότητες, ρωγμές²⁵, φυλλώσεις κ.λπ., είναι υψίστης σημασίας για τον σχεδιασμό των εργασιών, τη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης και έπειτα την αύξηση της κερδοφορίας.

- Την αξιολόγηση σχετικά με το εάν απαιτείται η βελτίωση της ποιότητας των τεμαχών πετρώματος με πολυεστερικές ή εποξειδικές ρητίνες, τσιμέντο ή άλλα συστατικά (Izadi-Yazdanabadi et al., 2022).
- Τη βελτιστοποίηση της κοπής των τεμαχών μαρμάρου στο κοπήριο²⁶, για την παραγωγή πλακών και την ενίσχυση της αναλογίας ανάκτησης. Ανάλογα με τον προσανατολισμό της θραύσης, ή τη θέση του εσωτερικού ελαττώματος, μπορεί να επιλεγεί ένα κατάλληλο επίπεδο κοπής, διαφορετικά μπορεί να αποφασιστεί άλλη χρήση του τεμάχους.
- Την ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων που προκαλούνται από την παρουσία φυσικών ρωγμών, με αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανίας επεξεργασίας υλικού. Ένα κατάλληλο εξορυγμένο τέμαχος μαρμάρου, χαρακτηρίζεται από ρηξιγενείς επιφάνειες που μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια κομματιών του, κατά τη διάρκεια των φάσεων επεξεργασίας του.

5.4. Παραδείγματα εφαρμογών

Αρκετές έρευνες GPR έχουν ασχοληθεί με την ανίχνευση ρωγμών εντός των πετρωμάτων για να χαρακτηρίσουν τοποθεσίες εξόρυξης (Annan et al., 1988; Grandjean & Gourry, 1996; Orlando, 2002; Grasmueck, 1996; Tsofilas et al., 2004; Grasmueck et al., 2005), λατομεία (π.χ. Botelho & Mufti, 1998; Kadioglu, 2008; Luodes & Sutinen, 2011; Mysaiah et al., 2011; Grasmueck et al., 2010; Pipan et al., 2000), βραχώδεις μάζες (Pipan et al., 2003), ασταθείς πλαγιές βράχων (Heincke et al., 2005), παραμέτρους θραύσης βράχου, το πάχος και το υλικό πλήρωσης τους (Deparis & Garambois, 2009; Grégoire & Hollender, 2004). Οι έρευνες αυτές, είναι προφανώς

²⁵ Η μεγάλη ρωγή ονομάζεται «κωμός» και οι μικρές ρωγμές (μικρότερες από ένα χιλιοστό σε πάχος), οι οποίες έχουν προκληθεί εξαιτίας τεκτονικής καταπόνησης, ονομάζονται «σπαθιές».

²⁶ Το μέγεθος των τελικών τεμαχών, ελέγχεται κυρίως από την απόσταση και τον αριθμό των ασυνεχειών (International Society of Rock Mechanics, 1979).

μεγάλης σημασίας για λόγους ασφαλείας, αλλά και για την παραγωγή και ανάλυση των «διακοσμητικών» λίθων, τόσο πριν, όσο και μετά την εξόρυξη των τεμαχών πετρώματος (Lualdi & Zanzi, 2004; Porsani et al. 2006; Onur & Bakrac 2009; Arosio, Munda & Zanzi 2012; Domenico et al. 2013; Arosio et al. 2015; Rey et al. 2015). Τα αποτελέσματα των ερευνών μέσα στα χρόνια, έδειξαν ότι το GPR παρέχει πληροφορίες υψηλής ανάλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της εσωτερικής δομής σε «διακοσμητικούς» λίθους, όπως είναι το μάρμαρο και ο τραβερτίνης, με τον Sigurdsson (1993, 1994) να πραγματοποιεί τις πρώτες μελέτες σε λατομεία ασβεστόλιθου για τον προσδιορισμό των λιθογραφικών χαρακτηριστικών του.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 6^ο

Εφαρμογή GPR σε Τεμάχη Μαρμάρου

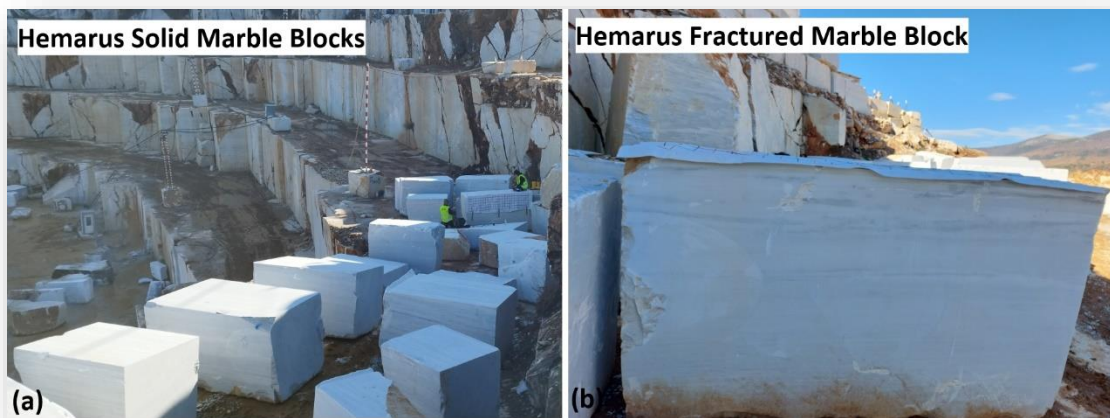
Στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζονται μετρήσεις σε εξορυγμένα τεμάχη μαρμάρου που πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή της μη-καταστρεπτικής γεωφυσικής **μεθόδου του γεωραντάρ (GPR)**. Η συγκεκριμένη έρευνα, στοχεύει στο να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την αξιολόγηση της ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου και την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων GPR. Επιπλέον, επιδιώκει να απαντήσει το ερευνητικό ερώτημα που τίθεται, εάν μια γραμμή μέτρησης GPR τυχαίας διεύθυνσης που εφαρμόζεται σε ένα τέμαχος μαρμάρου με δειγματοληψία διαφορετική από αυτή που ενδείκνυται για τον εντοπισμό λεπτών ρωγματώσεων, μπορεί να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την επακόλουθη ταξινόμηση της ποιότητάς του, βελτιστοποιώντας έτσι τις διαδικασίες εξόρυξης του μαρμάρου στο εξεταζόμενο λατομείο. Ειδικότερα, κύριοι μελετητικοί άξονες αποτέλεσαν:

- Αρχικά, ο εντοπισμός και η απεικόνιση των ρωγματώσεων, των κενών και των ασυνεχειών που χαρακτηρίζουν τα εξορυγμένα τεμάχη μαρμάρου, καθώς και η χαρτογράφηση της εσωτερικής συνέχειας εκείνων των ρωγματώσεων που έχουν ήδη ανιχνευθεί από την οπτική επιθεώρηση των τεμαχών μαρμάρου.
- Η αξιολόγηση της ποιότητας των υπό μελέτη τεμαχών μαρμάρου, μέσω της καταγραφής και της ενδελεχούς εξέτασης των διακυμάνσεων των τιμών του H/M πλάτους που τα χαρακτηρίζει. Η διαδικασία αυτή, περιλαμβάνει τη μελέτη των διαφορών στην ανακλαστικότητα μεταξύ των τεμαχών μαρμάρου διαφόρων ποιοτήτων από το υπό μελέτη λατομείο.
- Ο προσδιορισμός της βέλτιστης απόστασης των γραμμών μέτρησης του GPR και ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών πλάτους, με σκοπό την απλοποίηση των μετρήσεων GPR, μειώνοντας ταυτόχρονα τη συνολική διάρκειά τους.

- Η υλοποίηση μετρήσεων με διαφορετικούς τρόπους και αξιοποιώντας διαφορετικά συστήματα GPR, με σκοπό να εντοπιστεί η ιδανικότερη συνθήκη μέτρησης που αφορά τα τεμάχια μαρμάρου.

6.1. Μετρήσεις υπαίθρου

Οι μετρήσεις υπαίθρου, πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο μαρμάρου “Hemarus Grey”, της εταιρείας Stone Group International, στην τοποθεσία Νικητές, στην Καβάλα (εικ. 23). Αναλυτικότερα, μετρήθηκαν συνολικά έξι τεμάχια μαρμάρου “Hemarus Grey”, εκ των οποίων τα δύο ήταν συμπαγή/ υγιή και τα τέσσερα επιφανειακά ρωγματοωμένα (βλ. Πίνακα 8).



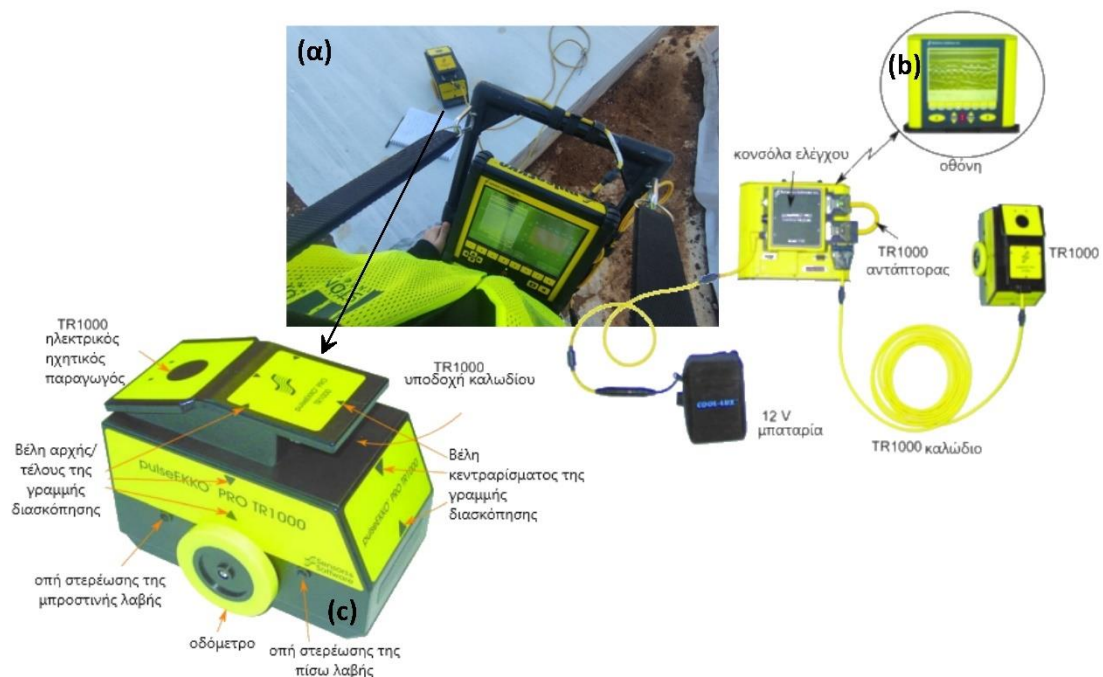
Εικόνα 23. Απεικονίζονται: (α) Φωτογραφία ορισμένων εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρων στο λατομείο μαρμάρου “Hemarus Grey” στην τοποθεσία Νικητές, στην Καβάλα. (β) Η φωτογραφία ενός επιφανειακά ρωγματοωμένου τεμάχους μαρμάρου “Hemarus Grey”.

6.2. Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια της μελέτης, περιλάμβανε το σύστημα GPR TR1000, της εταιρείας Sensors & Software Inc., από τον Καναδά (εικ. 24α). Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός, συνδυάζει έναν πομπό και ένα δέκτη με **κεντρική συχνότητα 1000MHz** και έναν μετρητή οδομέτρου σε ένα περίβλημα. Ο ενσωματωμένος οδομετρητής χρησιμεύει στον προσδιορισμό της θέσης και του βήματος δειγματοληψίας, ενεργοποιώντας την κεραία εκπομπής. Αξίζει να αναφερθεί, πως πριν την έναρξη των μετρήσεων, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση (calibration) του οδομέτρου. Η συγκεκριμένη διαδικασία μεταφράζει τις περιστροφές του τροχού του GPR σε απόσταση, και πρέπει να πραγματοποιείται κάθε φορά που αλλάζει η μορφολογία του εδάφους πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση. Επιπλέον, οι γραμμές μέτρησης πρέπει να ξεκινούν και να τερματίζουν

σύμφωνα με τα βέλη πάνω από τον μετρητή οδομέτρου, αλλά και να είναι ταυτόχρονα κεντραρισμένες στα βέλη του μπροστινού και πίσω μέρους του μηχανήματος GPR. Παράλληλα, η επιλογή των χρόνων πρώτης άφιξης πραγματοποιείται πριν από την έναρξη των μετρήσεων. Αναλυτικότερα, το σύστημα GPR που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, αποτελείται συνοπτικά από τα εξής μέρη (εικ. 24):

- Μία **κονσόλα ελέγχου και απεικόνισης των δεδομένων (Digital Video Logger – DVL)**, η οποία αποτελεί την κεντρική μονάδα ελέγχου, απεικόνισης, βασικής επεξεργασίας, καταγραφής και τέλος αποθήκευσης των δεδομένων GPR, χρησιμοποιώντας λειτουργικό σύστημα “Unix”.
- **Θωρακισμένο σύστημα κεραιών (Shielded Transducers)** για την εκπομπή και λήψη του σήματος ηλεκτρονικά, το οποίο συνδέεται με καλώδιο με την κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος. Οι διαστάσεις αυτού του πομποδέκτη είναι $0.13\text{m} \times 0.19\text{m}$.



Εικόνα 24. (α) Στη φωτογραφία παρουσιάζεται το σύστημα GPR TR1000 κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ενός τεμάχους μαρμάρου. Πιο συγκεκριμένα, στα δεξιά της φωτογραφίας απεικονίζονται (b) τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το σύστημα GPR TR1000. (c) Με μαύρο βέλος, απεικονίζεται το GPR TR1000, ενώ με **πορτοκαλί βέλη** σημειώνονται ονομαστικά όλα τα στοιχεία από τα οποία αυτός αποτελείται.

6.3. Παράμετροι μετρήσεων

Πέρα από κάποιες μεμονωμένες γραμμές διασκόπησης, οι μετρήσεις με το GPR πραγματοποιήθηκαν υπό την μορφή καννάβου, με τις γραμμές μέτρησης να είναι παράλληλες μεταξύ τους, σε δύο κάθετους άξονες X και Y, διασχίζοντας τις ορατές ρωγματώσεις στα τεμάχια μαρμάρου κάθετα και οριζόντια. Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός πετάσματος διαστάσεων 2m×3m, πάνω στο οποίο ήταν σχεδιασμένος κάνναβος με απόσταση μεταξύ των γραμμών ίση με 0.1m (εικ. 25). Η επιλεγθείσα μικρή απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εντοπιστούν πιθανές ασυνέχειες μικρής κλίμακας. Αξίζει να προστεθεί πως οι γραμμές διασκόπησης πραγματοποιήθηκαν παράλληλα με τις πλευρές των τεμαχών μαρμάρου, ξεκινώντας από κάποια απόσταση από τα άκρα τους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις της διεπιφάνειας των άκρων με τον αέρα ή/και το έδαφος.



Εικόνα 25. Στις φωτογραφίες (a) και (b) απεικονίζεται το «πέτασμα» το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων τεμαχών μαρμάρου, με το σύστημα GPR TR1000.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια ενδελεχής έρευνα σε κάθε τέμαχος μαρμάρου, ικανή να χαρτογραφήσει οποιοδήποτε επίπεδο θραύσης, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του, πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες έρευνες από τουλάχιστον τρεις ορθογώνιες πλευρές των τεμαχών. Η απόκτηση των δεδομένων συντελέστηκε με την μέθοδο σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη (Common Offset Setup) σε λειτουργία ανάκλασης (Reflection mode), ακολουθώντας τις παραμέτρους μετρήσεων που παρατίθενται στον **Πίνακα 8**.

Πίνακας 8. Οι παράμετροι των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν με το σύστημα GPR TR1000, κεντρικής συχνότητας 1000MHz, στα εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου.

Τύπος τεμαχών μαρμάρου	Όνομα τεμάχους	Διαστάσεις	Αριθμός καννάβων (μετρούμενων πλευρών)	Απόσταση γραμμών μέτρησης	Απόσταση κερατών	Απόσταση δειγματοληψίας	Ολικός χρόνος καταγραφής	Αριθμός τυχών σάρευσης	Διάστημα δειγματοληψίας
		m		m	m	m	ns		ps
Σομπαρή	A	2.67 × 1.45 × 1.67	4	0.1	0.07	0.01	60	8	100
	B	3 × 1.39 × 1.39	5				57 & 70		
Επιφανειακά Ρωγματοποιημένα	C	2.81 × 1.08 × 1.63	4				30, 40 & 60	16	
	D	2.51 × 1.57 × 1.67					60	8	
	E	2.24 × 1.9 × 1.68	1				43	4	
	F	2.48 × 1.9 × 1.71					50	8	

6.4. Επεξεργασία δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων πεδίου, ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων του GPR με τα λογισμικά πακέτα EKKO_Project™ της εταιρείας Sensors & Software Inc., και Voxler της εταιρείας Golden Software. Τα συγκεκριμένα λογισμικά, χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση και ερμηνεία των «ελαττωμάτων» στα τεμάχια μαρμάρου, τόσο επιφανειακά, όσο και εσωτερικά αυτών. Ειδικότερα, το λογισμικό πακέτο EKKO_Project, χρησιμοποιήθηκε για τη βασική και ειδική επεξεργασία των δεδομένων (εικ. 26), ακολουθώντας τα βήματα επεξεργασίας που περιγράφονται στον Πίνακα 9, ενώ το λογισμικό πακέτο Voxler, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία τρισδιάστατων εικόνων, χρησιμοποιώντας τα αρχεία τύπου “.HDF”, που εξάγονται από το πρώτο λογισμικό.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι το βήμα επεξεργασίας της μετανάστευσης (2D FK Migration) δοκιμάστηκε αλλά δεν εφαρμόστηκε στο τέλος, λόγω της εμφάνισης ορατών ψευδών ανακλάσεων (artifacts) στα ραδιογράμματα μετά την εφαρμογή του. Επιπλέον, με τη χρήση της διαδικασίας της μετανάστευσης υπάρχει η πιθανότητα η μικρής κλίμακας υποκατακόρυφες ρωγματώσεις να παραμείνουν μη ανιχνεύσιμες, όπως αναφέρεται από τους Grasmueck et al. (2005). Μετά τη φάση της επεξεργασίας,

εξήχθησαν οι τιμές πλάτους του κάθε ίχνους της κάθε γραμμής διασκόπησης, για κάθε κάρναβο μέτρησης.

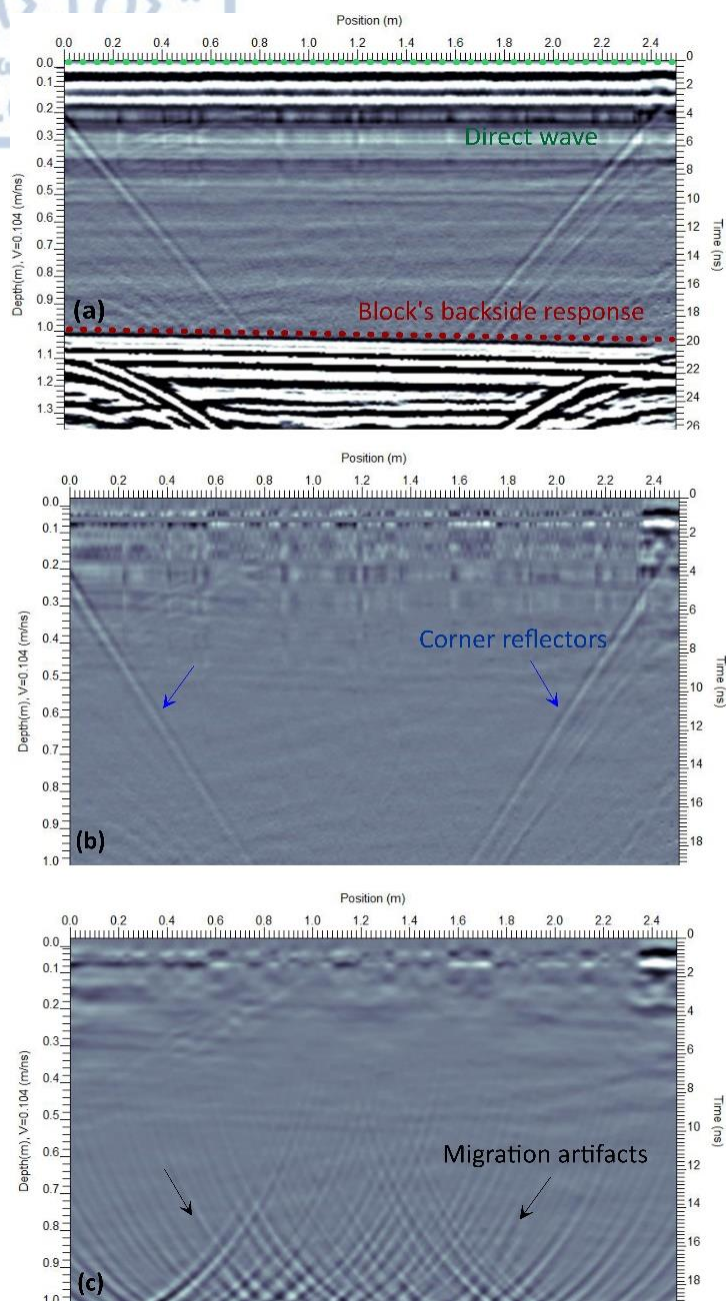
Πίνακας 9. Τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων GPR με χρήση του λογισμικού πακέτου EKKO_Project.

Βήματα Επεξεργασίας	Περιγραφή
Φίλτρο αποκοπής συχνοτήτων (Dewow)	Αφαίρεση του θορύβου πολύ χαμηλών συχνοτήτων από το κάθε ίχνος, στο σύνολο των δεδομένων.
Φίλτρο αντιστάθμισης της γεωμετρικής διασποράς του σήματος (SEC2 Gain)	Αύξηση της ευκρίνειας των δεδομένων και ενίσχυση των «ασθενέστερων» ανακλάσεων.
Υπολογισμός ταχύτητας του GPR στο μάρμαρο	Μετατροπή του χρόνου σε βάθος, με τη χρήση μεταλλικής πλάκας για τον υπολογισμό της ταχύτητας (0.104 m/ns) ²⁷ .
Φίλτρο αφαίρεσης φόντου (Background Subtraction)	Αφαίρεση της επίδρασης των οριζόντιων ανακλαστήρων και του θορύβου. Παράλληλα, ενισχύονται οι ανακλάσεις από λεπτές ρωγμές.
Περικοπή απευθείας κυμάτων (Direct Waves Truncation)	Αφαίρεση των απευθείας κυμάτων από 0 έως 3.5ns, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές πλάτους.
Δυναμική περικοπή χρόνων (Dynamic Time Truncation)	Από όλα τα ραδιογράμματα, αφαιρέθηκαν τα δεδομένα κάτω από επιλεγμένα βάθη διεύθυνσης ανάλογα με το πάχος του τεμάχους (Πίνακες 10, 11 του Παραρτήματος Β').
Φίλτρο επανόρθωσης (Rectify) ²⁸	Το συγκεκριμένο φίλτρο αντικαθιστά κάθε σημείο ενός ίχνους με τη θετική του τιμή.
Φίλτρο μετανάστευσης (FK Migration)	Η διαδικασία της μετανάστευσης FK στοχεύει στην επανατοποθέτηση του στόχου στην πραγματική του θέση στο ραδιόγραμμα, χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ταχύτητα του μέσου. Δεν εφαρμόστηκε στα δεδομένα που ελήφθησαν για περαιτέρω επεξεργασία με τους αλγόριθμους ²⁹ .

²⁷ Επεξηγείται αναλυτικά στην υπό ενότητα 6.4.1

²⁸ Προτιμήθηκε το συγκεκριμένο φίλτρο αντί του φίλτρου “Envelope”, παρότι παράγουν παρόμοια αποτελέσματα, καθώς φαίνεται να διατηρεί μεγαλύτερη οριζόντια συνέχεια στους ανακλαστήρες (Dojack, 2012).

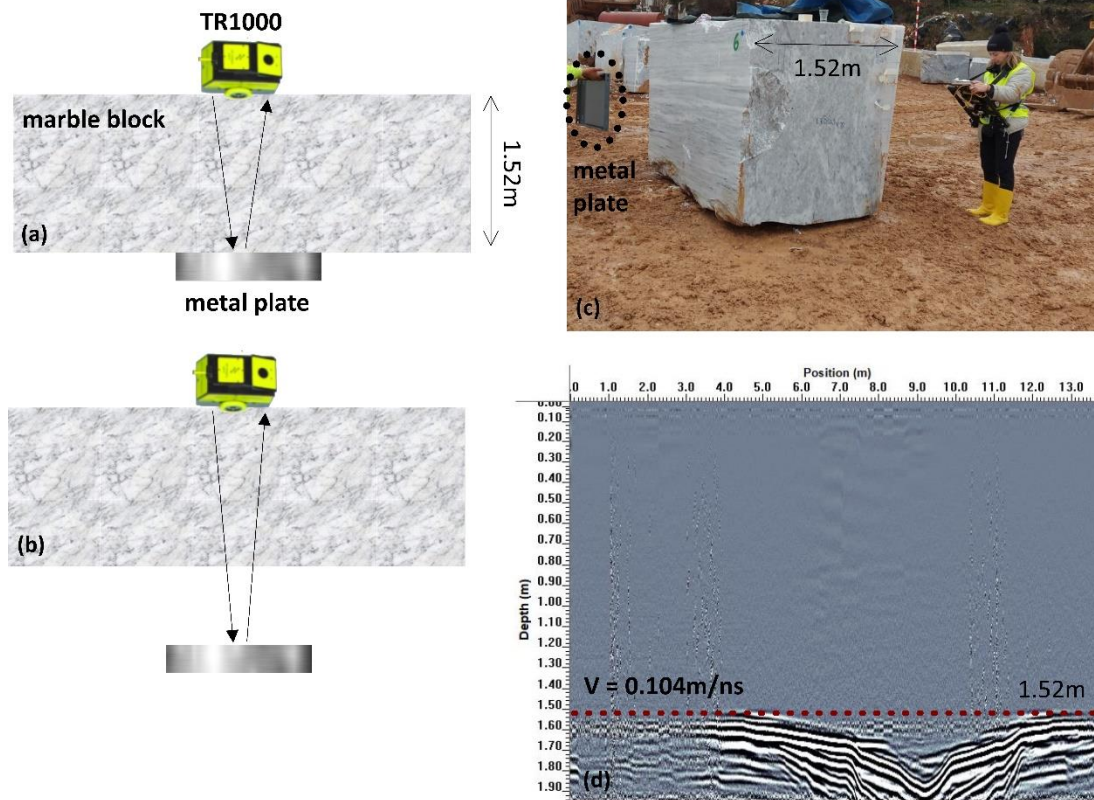
²⁹ Κεφ. 8



Εικόνα 26. Απεικονίζονται τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων GPR. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται: **(α)** Τα ακατέργαστα δεδομένα, όπως λήφθηκαν μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων και έπειτα από τη διόρθωση της ταχύτητας του σήματος του GPR στο μάρμαρο. Με πράσινη διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το απευθείας κύμα (Direct wave), ενώ με **μπουντό διακεκομμένη γραμμή** παρατηρείται η διεπιφάνεια του τεμάχους μαρμάρου με το έδαφος ή με τον αέρα (Block's backside response). **(β)** Τα δεδομένα μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης "SEC2 Gain", του φίλτρου "Background Subtraction" και ύστερα από τη δυναμική περικοπή χρόνων (Dynamic Time Truncation). Με **μπλε βέλη** σημειώνονται τεχνητές ανακλάσεις που δημιουργούνται λόγω των γωνιών του τεμάχους μαρμάρου («γωνιακοί ανακλαστήρες» ή corner reflectors). Ειδικότερα, για να διαπιστωθεί πως οι συγκεκριμένες ανακλάσεις δεν αποτελούν κύματα αέρα (Air waves), υπολογίστηκε η κλίση της γωνίας τους, η οποία και διαφέρει από την κλίση των κυμάτων αέρα (ίση με $1/c$, καθώς τα σήματα αυτά ταξιδεύουν μέσω του αέρα με την ταχύτητα του φωτός). Τέλος, **(γ)** τα δεδομένα μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μετανάστευσης (FK Migration), το οποίο **απαλείφει** τους «γωνιακούς ανακλαστήρες» αλλά δημιουργεί ψευδής ανακλάσεις (Migration artifacts) κατά την εφαρμογή του (μαύρα βέλη).

6.4.1. Ταχύτητα Η/Μ κυμάτων στο μάρμαρο

Η αντιπροσωπευτική ταχύτητα του σήματος GPR στο μάρμαρο “Hemarus Grey”, υπολογίστηκε ίση με $V=0.104\text{m/ns}$, με σκοπό οι ανακλάσεις να επανατοποθετηθούν στο πραγματικό βάθος παραγωγής τους και να εντοπιστεί το πραγματικό βάθος των ρωγματοώσεων. Ο υπολογισμός της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μιας μεταλλικής πλάκας, η οποία αρχικά τοποθετήθηκε στην απέναντι από την μετρούμενη πλευρά ενός υγιούς τεμάχους μαρμάρου, πάχους 1.52m (**εικ. 27a**). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η μεταλλική πλάκα απομακρύνθηκε από το τέμαχος του μαρμάρου (**εικ. 27b, c**), έτσι ώστε να προσδιοριστεί το βάθος στο οποίο η πλάκα ακουμπούσε την πλευρά του μαρμάρου. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν δυο γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα X, όπου σύμφωνα με τα παραγόμενα ραδιογράμματα αυτών (στην **εικόνα 27d** παρουσιάζεται ενδεικτικά το ραδιόγραμμα που αντιστοιχεί στην μία εκ των δύο γραμμών μέτρησης), προσδιορίστηκε η σωστή ταχύτητα, μετατοπίζοντας τις ανακλάσεις που προέκυψαν από την μεταλλική πλάκα, όσο εκείνη ακουμπούσε το τέμαχος, στο σωστό βάθος, το οποίο αντιστοιχεί στο πάχος του συγκεκριμένου τεμάχους μαρμάρου (μπορντό διακεκομμένη γραμμή στην τομή της **εικόνας 27d**).



Εικόνα 27. Απεικονίζονται: Η στιγμή κατά την οποία η μεταλλική πλάκα ακουμπά στο τέμαχος μαρμάρου παρουσιάζεται στο σκαρίφημα (α), ενώ όταν αυτή απομακρύνεται από εκείνο, παρουσιάζεται στο σκαρίφημα (β). Φωτογραφία από το υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου (c), πάχους 1.52m, καθώς και η μεταλλική πλάκα (περιβάλλεται σε μαύρο κύκλο) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας του σήματος GPR στο μάρμαρο “Hemarus Grey”. (d) Το ραδιόγραμμα που προέκυψε από μία γραμμή διασκόπησης, που υλοποιήθηκε κατά τη διεύθυνση X στο υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου. Το πάχος του μαρμάρου υποδεικνύεται με **μπορντό διακεκομμένη γραμμή**, η οποία αντιστοιχεί στη σωστή ταχύτητα διάδοσης των H/M κυμάτων στο μάρμαρο (0.104 m/ns).

6.5. Εναλλακτικοί τρόποι μετρήσεων

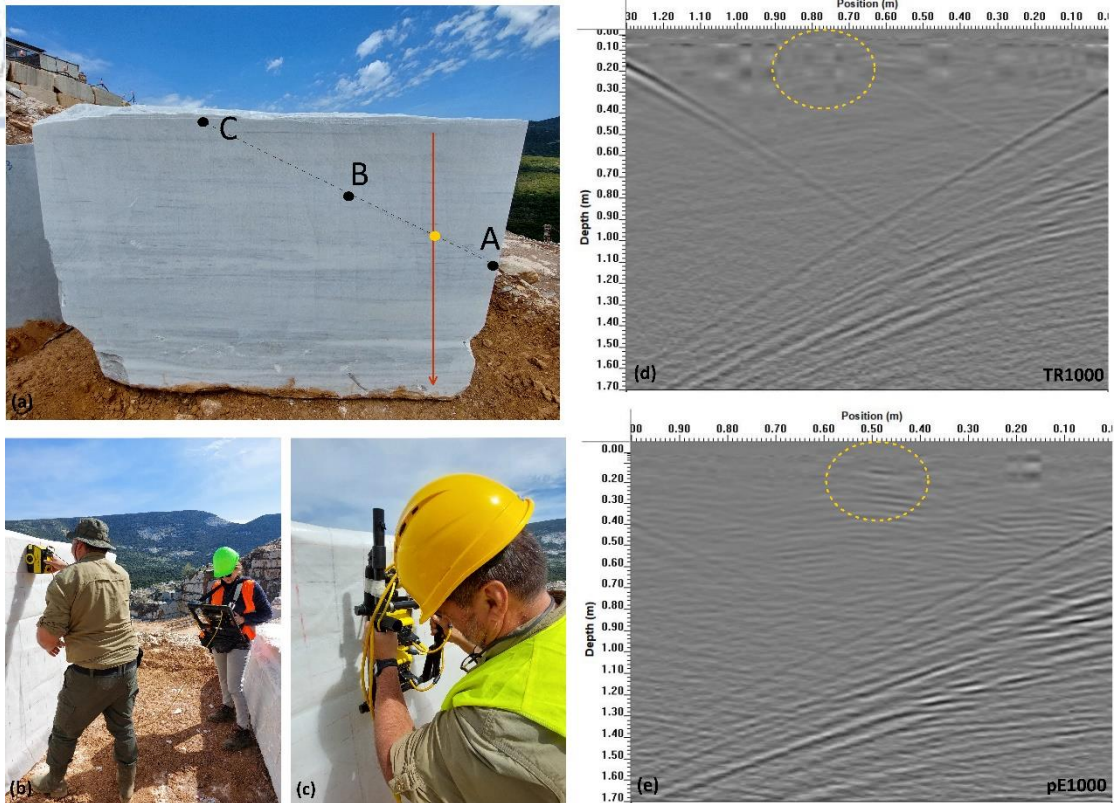
Προκειμένου να αποφευχθεί η υπέρθεση των επιθυμητών ανακλάσεων από τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις («γωνιακοί ανακλαστήρες»), αλλά και να μελετηθεί η διαφοροποίηση στις τιμές του H/M πλάτους, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με χρήση πλάκας διογκωμένης πολυστερίνης (φελιζόλ) τοποθετημένα μεταξύ ενός τεμάχους μαρμάρου και του συστήματος GPR. Οι ανακλάσεις αυτές, οι οποίες τείνουν να διαταράσσουν την εικόνα ενός ραδιογράμματος, προκύπτουν όταν η κεραία του συστήματος GPR, πλησιάζει στην αρχή ή στο τέλος ενός προφίλ μετρήσεων, και πιο συγκεκριμένα στις γωνίες των τεμαχών μαρμάρου. Αξίζει να σημειωθεί, πως το

φελιζόλ είναι «διάφανο» μέσο για τα Η/Μ κύματα, καθώς αυτά δεν αποσβένουν όταν ταξιδεύουν μέσα σ' αυτό. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα GPR κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τοποθετώντας τον εξοπλισμό τόσο σε άμεση επαφή με το τέμαχος μαρμάρου (**εικ. 28**), όσο και απομακρύνοντάς τον από την επιφάνεια του μπλοκ με τη χρήση φελιζόλ (**εικ. 29**), με σκοπό να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των τιμών του πλάτους που αντιστοιχούν σε καθένα από τα παραπάνω συστήματα μέτρησης. Με σκοπό λοιπόν να εντοπιστεί η καταλληλότερη συνθήκη μέτρησης GPR, μετρήθηκε μία πλευρά του ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου «F» (βλ. **Πίνακα 8**) τέσσερις διαφορετικές φορές, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Με χρήση του συστήματος GPR TR1000, σε άμεση επαφή με το τέμαχος μαρμάρου.
- Με χρήση του συστήματος GPR TR1000 και παρεμβολή μεταξύ του μηχανήματος και του τεμάχους μαρμάρου, ενός κομματιού φελιζόλ λευκού χρώματος και πάχους 2.5cm.
- Με χρήση του συστήματος GPR pulseEKKO® PRO 1000, σε άμεση επαφή με το τέμαχος μαρμάρου.
- Με χρήση του συστήματος GPR pulseEKKO® PRO 1000 και παρεμβολή μεταξύ του μηχανήματος και του τεμάχους μαρμάρου ενός κομματιού φελιζόλ πράσινου χρώματος και πάχους 2cm.

Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν τρεις γραμμές διασκόπησης (GPR lines) με το σύστημα pulseEKKO® PRO 1000 όπου:

- Η πρώτη γραμμή πραγματοποιήθηκε σε άμεση επαφή με το τέμαχος μαρμάρου.
- Η δεύτερη γραμμή πραγματοποιήθηκε πάνω από το λευκό φελιζόλ πάχους 2.5cm.
- Η τρίτη γραμμή πραγματοποιήθηκε πάνω από το πράσινο φελιζόλ πάχους 2cm.



Εικόνα 28. Μετρήσεις με δύο διαφορετικά συστήματα GPR, στο ρωγματωμένο τέμαχος μαρμάρου «F». **(α)** Στο τέμαχος μαρμάρου, με γκρι διακεκομμένη γραμμή, σημειώνεται μια επιφανειακή ρωγή, με το σημείο A να βρίσκεται σε ύψος 75cm από την κορυφή του τεμάχους και σε πλάτος 0cm από την αριστερή πλευρά του (όπως φαίνεται στη φωτογραφία), το σημείο B να βρίσκεται σε ύψος 53cm και πλάτος 60cm, και το σημείο Γ εντοπίζεται σε ύψος 6cm και πλάτος 170cm. Ακόμη, με **κόκκινο βέλος** απεικονίζεται ποιοτικά μια γραμμή μέτρησης κατά τον άξονα Y, και με **κίτρινη βούλα** σημειώνεται το σημείο όπου η γραμμή διασκόπησης περνάει πάνω από την επιφανειακή και υπό μελέτη ρωγή. **(β)** Επιπλέον, απεικονίζονται οι μετρήσεις με το σύστημα GPR TR1000, **(c)** και οι μετρήσεις με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO 1000, κεντρικής συχνότητας 1000MHz. Τέλος, στα **(d)** και **(e)** απεικονίζονται δύο ραδιογράμματα που προέκυψαν από τη μέτρηση κατά τη διεύθυνση του **κόκκινου βέλους**, με χρήση των συστημάτων GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000, αντίστοιχα. Σε **κίτρινο κύκλο** σημειώνεται και στα δύο ραδιογράμματα, η ανάκλαση σε βάθος περίπου ίση με 0.2m, που είναι πιθανό να οφείλεται στην επιφανειακή ρωγή, στο σημείο της **κίτρινης βούλας**.



Εικόνα 29. Χρήση φελιζόλ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με δύο διαφορετικά συστήματα GPR, στο ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου «F». Αναλυτικότερα, απεικονίζονται **(a)** οι μετρήσεις με το σύστημα GPR TR1000, πάνω από φελιζόλ πάχους 2.5cm, **(b)** και οι μετρήσεις με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO, κεντρικής συχνότητας 1000MHz, πάνω από φελιζόλ πάχους 2cm.

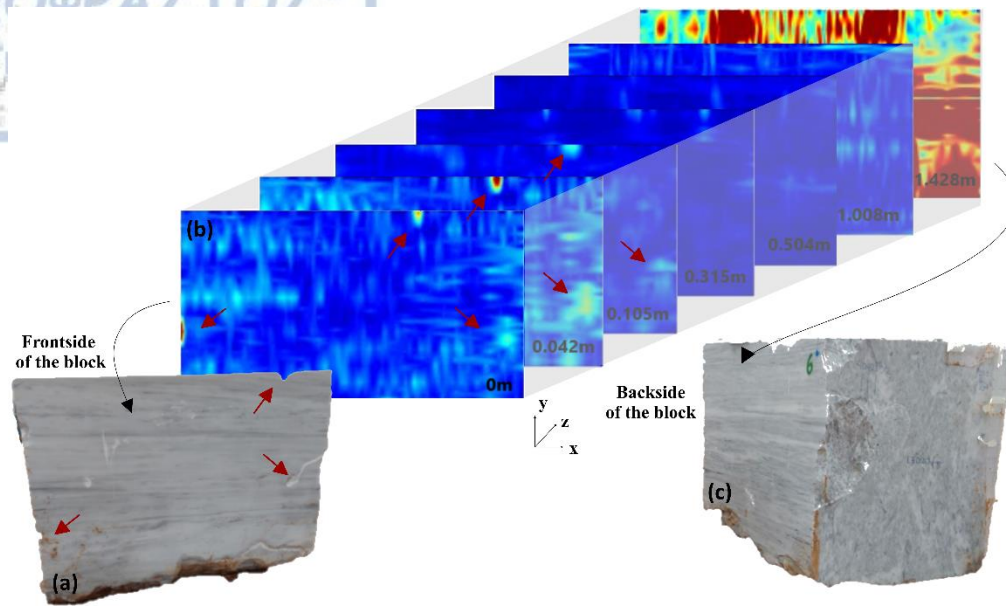
Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 7^ο

Αποτελέσματα 2D & 3D τομών

Η γεωφυσική έρευνα με χρήση της μεθόδου του GPR, για τον εντοπισμό των ασυνεχειών, των καρστικοποιημένων περιοχών και των ρωγμών διαφόρων μεγεθών στα εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου, συνδέεται με τη δημιουργία μεγάλου πλάτους ανακλάσεων του H/M κύματος. Οι ανακλάσεις αυτές, παρουσιάζονται στα ραδιογράμματα ως υπερβολές με τα κοίλα προς τα κάτω, με τη χρήση προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας βάσει του πλάτους του σήματος. Αμέσως παρακάτω, παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές δισδιάστατες (2D) και τρισδιάστατες τομές (3D) επιλεγμένων τεμαχίων μαρμάρου.

7.1. Συμπαγή τεμάχια

Στην **εικόνα 30** παρατίθεται η ψευδό-τρισδιάστατη απεικόνιση ενός υγιούς ή αλλιώς συμπαγούς τεμάχους μαρμάρου, που παρουσιάζει κάποια επιφανειακά και μικρής κλίμακας «ελαττώματα». Τα συγκεκριμένα επιφανειακά «ελαττώματα» δεν εκτείνονται εσωτερικά, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν την τελική του ποιότητα. Αξίζει να σημειωθεί, πως η πίσω πλευρά του τεμάχους μαρμάρου, που αντιστοιχεί στην τελευταία «φέτα» βάθους της ψευδό-τρισδιάστατης απεικόνισης, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές του H/M πλάτους λόγω της εγγύτητας της διεπιφάνειας αυτής με τον αέρα.

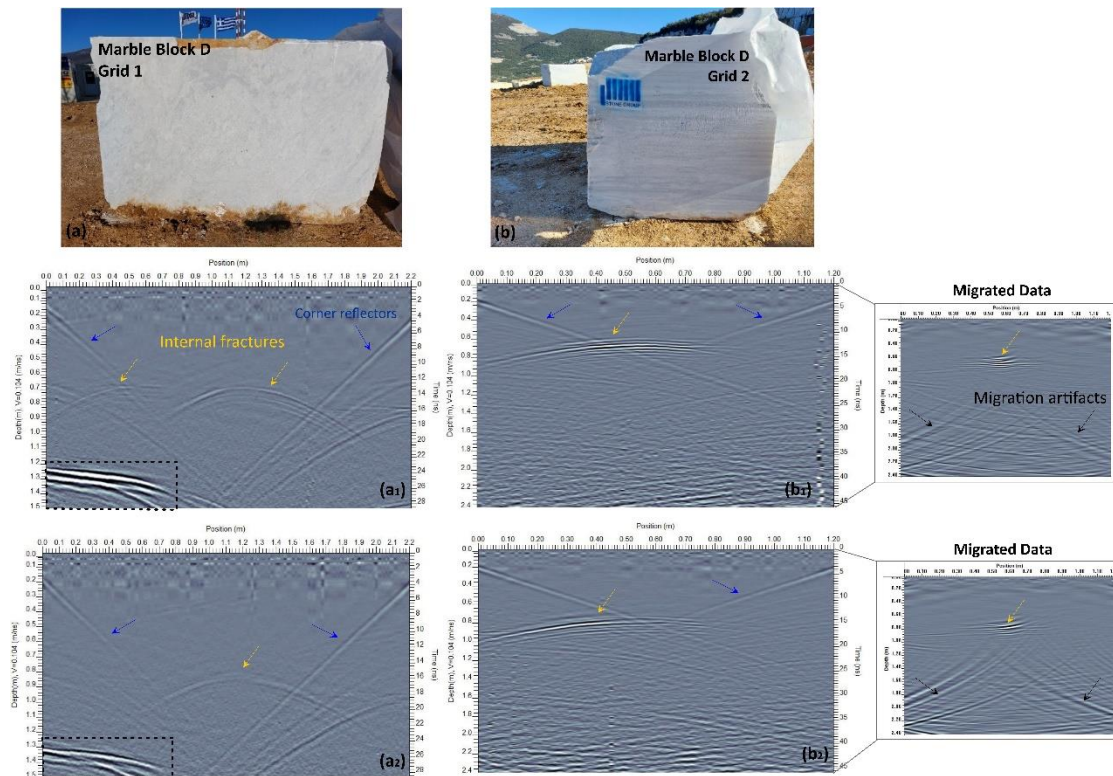


Εικόνα 30. (a) Η πρώτη «φέτα» βάθους της ψευδο-τριδιάστατης απεικόνισης, αντιστοιχεί στην μπροστινή πλευρά του τεμάχους μαρμάρου (Frontside of the block), όπου και διακρίνονται διάφορα «ελαττώματα» μικρής κλίμακας. Με **κόκκινα βέλη**, αντιστοιχίζονται οι επιφανειακές «ατέλειες» του τεμάχους μαρμάρου, με τις «φέτες» βάθους, στις οποίες και εντοπίζονται. **(b)** Ψευδο-τριδιάστατη απεικόνιση ενός υγιούς τεμάχους μαρμάρου, το οποίο εμφανίζει κάποια επιφανειακά «ελαττώματα», που εκτείνονται σε βάθος ίσο μέχρι τα 0.105m. **(c)** Η πίσω πλευρά του τεμάχους μαρμάρου (Backside of the block), που αντιστοιχεί στην τελευταία «φέτα» βάθους της ψευδο-τριδιάστατης απεικόνισης, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές του H/M πλάτους, λόγω της εγγύτητας της διεπιφάνειας αυτής με τον αέρα.

7.2. Ρωγματοωμένα τεμάχια

Στην **εικόνα 31**, απεικονίζονται κάποια χαρακτηριστικά ραδιογράμματα που προέκυψαν από τη μελέτη ενός επιφανειακά ρωγματοωμένου τεμάχους μαρμάρου, με όνομα «D», επιβεβαιώνοντας τις εκτιμήσεις για την υποδεέστερή του ποιότητα. Ειδικότερα, λόγω της χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα ($\epsilon_{r,air} = 1$), στη διεπιφάνεια μαρμάρου και αέρα, παρατηρείται μια αναστροφή φάσης (phase inversion), δηλαδή μία ξαφνική αλλαγή της κανονικής αλληλουχίας της πολικότητας. Ως εκ τούτου, αντί για μία θετική-αρνητική-θετική κορυφή (λευκό-μαύρο-λευκό), η ακολουθία της ανεστραμμένης φάσης παρουσιάζεται ως αρνητική-θετική-αρνητική (μαύρο-λευκό-μαύρο). Συμπερασματικά, η παρουσία διαφόρων εσωτερικών ρωγμών (internal fractures), δύναται να ανιχνευτούν υπό τη μορφή ανακλάσεων ανεστραμμένης φάσης, χωρίς συγκεκριμένο σχήμα. Αξίζει να τονιστεί, πως ο αέρας είναι διάφανο μέσο για τα ραδιοκύματα, δηλαδή το H/M κύμα δεν υφίσταται απόσβεση και για το λόγο αυτόν, οι ρωγμές που εμπεριέχουν αέρα μπορούν να απεικονιστούν ικανοποιητικά. Μελετώντας λοιπόν την παρούσα εσωτερική ρωγμάτωση, φαίνεται πως παρουσιάζει

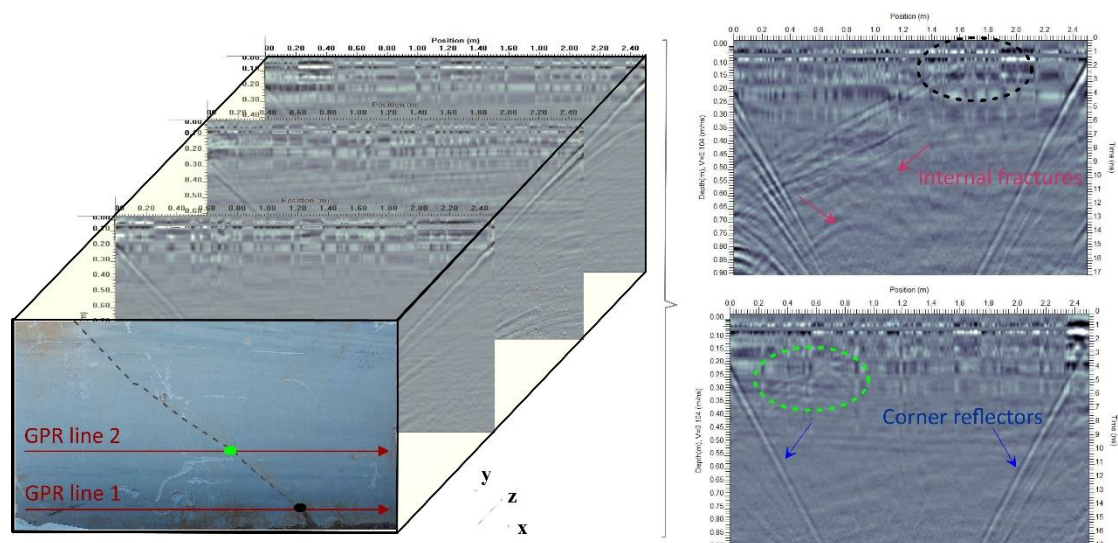
κλίση, καθώς το βάθος που αυτή εντοπίζεται μεγαλώνει, όσο οι γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα X πλησιάζουν το έδαφος. Ακόμη, παρατηρείται μέρος ενός πιθανού επιπέδου ασυνέχειας μικρής κλίμακας, σε βάθος περίπου ίσο με 1.25m (μαύρο πλαίσιο).



Εικόνα 31. Απεικονίζονται οι φωτογραφίες από δύο μετρούμενες πλευρές (Grid 1 & 2) ενός επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου με όνομα «D», και από κάτω τους παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά ραδιογράμματα που προέκυψαν από τη μέτρηση της κάθε πλευράς αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, στα ραδιογράμματα σημειώνονται: **A.** Οι «γωνιακοί ανακλαστήρες» (corner reflectors), ως αποτέλεσμα της επαφής του συστήματος GPR με τις γωνίες του τεμάχους μαρμάρου (μπλε βέλη). **B.** Διάφορες ανακλάσεις ως αποτέλεσμα της εσωτερικής ρωγμάτωσης (internal fracture) του τεμάχους μαρμάρου (κίτρινα βέλη), που εντοπίζονται στα ραδιογράμματα a_2 , b_2 σε βάθος 0.8m και στα ραδιογράμματα a_1 , b_1 σε βάθος 0.7m. Μελετώντας τα παραπάνω βάθη, η εσωτερική αυτή ρωγμάτωση φαίνεται να παρουσιάζει κλίση, καθώς το βάθος που αυτή εντοπίζεται μεγαλώνει, όσο οι γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα X πλησιάζουν το έδαφος. **Γ.** Μέρος ενός πιθανού επιπέδου ασυνέχειας μικρής κλίμακας, σε βάθος περίπου ίσο με 1.25m (μαύρο πλαίσιο). **Δ.** Στα δεξιά από τα ραδιογράμματα b_1 και b_2 , έχουν τοποθετηθεί ενδεικτικά τα αντίστοιχα ραδιογράμματα στα οποία έχει εφαρμοστεί το φίλτρο της μετανάστευσης (Migrated data). **Ε.** Τα «τεχνουργήματα» (artifacts) ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της διαδικασίας της μετανάστευσης (μαύρα βέλη).

Στην **εικόνα 32**, δίνεται ένα παράδειγμα ψευδό-τρισεδιάστατης απεικόνισης των δεδομένων GPR ενός επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου με όνομα «C». Μία σχεδόν κάθετη και επιφανειακή λεπτή ρωγμή (παριστάνεται με γκρι διακεκομμένη

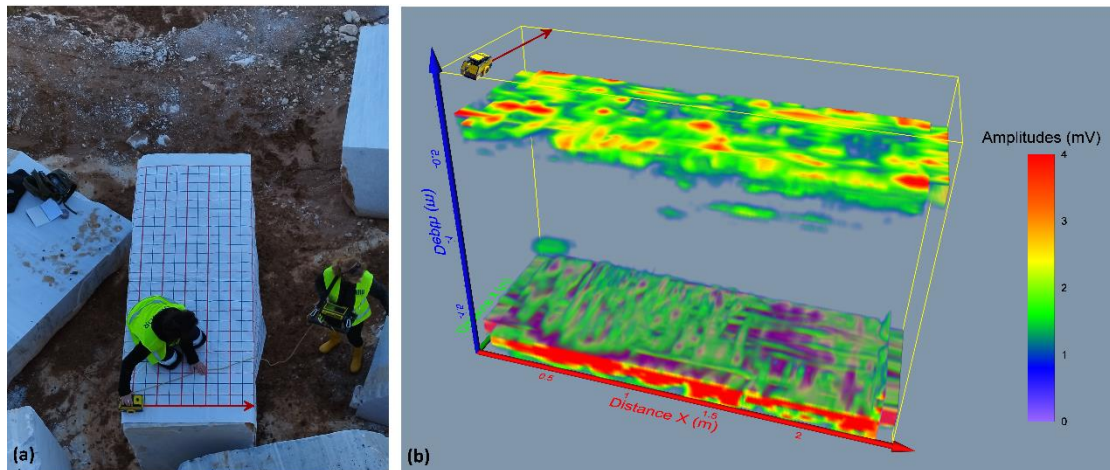
γραμμή), φαίνεται να είναι υπεύθυνη για δύο ανακλάσεις (εντός του μαύρου και πράσινου κύκλου αντίστοιχα) που καταγράφηκαν όταν το σύστημα GPR τη διέσχισε επιφανειακά, κατά μήκος δύο γραμμών διασκόπησης (GPR line 1, GPR line 2). Επιπλέον, παρατηρούνται κάποιες ανακλάσεις (σημειώνονται με ροζ βέλη), οι οποίες δε σχετίζονται με την επιφανειακή ρωγμάτωση που αναλύθηκε προηγουμένως, αλλά πιθανότατα οφείλονται σε λεπτές μικρό-ρωγματώσεις εσωτερικά του τεμάχους μαρμάρου, οι οποίες δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν κατά την οπτική παρατήρηση του.



Εικόνα 32. Απεικονίζεται η ψευδο-τριδιάστατη εικόνα ενός επιφανειακά ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου με όνομα «C». Σε αυτό, παρατηρείται μία επιφανειακή λεπτή και υπό-κατακόρυφη ρωγμάτωση (γκρι διακεκομμένη γραμμή). Με μπλε βέλη, σημειώνονται οι ανακλάσεις, εξαιτίας των γωνιών του τεμάχους μαρμάρου, όταν σε αυτές πλησιάζει το μηχάνημα GPR («γωνιακοί ανακλαστήρες»). Παράλληλα, απεικονίζονται ποιοτικά δύο ενδεικτικές γραμμές διασκόπησης κατά τον άξονα X, οι οποίες διασχίζουν την παρατηρούμενη επιφανειακή ρωγμάτωση (GRP line 1 & 2). Με μαύρη βούλα, σημειώνεται το σημείο στο οποίο η πρώτη γραμμή διασκόπησης (GPR line 1) διασχίζει τη ρωγμάτωση, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάκλαση που σημειώνεται εντός του μαύρου κύκλου στο πάνω ραδιόγραμμα. Αντίστοιχα, με **πράσινη βούλα** σημειώνεται άλλο ένα σημείο στο οποίο μια δεύτερη γραμμή διασκόπησης (GPR line 2) διασχίζει την επιφανειακή ρωγμάτωση, προκαλώντας τη δημιουργία της ανάκλασης που εντοπίζεται εντός του **πράσινου κύκλου**, στο κάτω ραδιόγραμμα. Στο συγκεκριμένο σημείο, η επιφανειακή ρωγμάτωση φαίνεται να εκτείνεται σε βάθος μέχρι τα 0.2m περίπου. Τέλος, σε βάθη περίπου ίσα με 0.35m και 0.7m, παρατηρούνται ανακλάσεις (**ροζ βέλη**), οι οποίες φανερώνουν εσωτερικές ρωγμές που δεν εκτείνονται επιφανειακά, και για το λόγο αυτόν, δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν κατά την οπτική παρατήρηση του τεμάχους μαρμάρου.

Οι ίσο-επιφάνειες είναι πραγματικές τριδιάστατες εικόνες που αποτυπώνουν την ανακλαστικότητα. Πολλαπλές ίσο-επιφάνειες διαφορετικής τιμής πλάτους, μπορούν να κωδικοποιηθούν με χρώμα και να εμφανιστούν ταυτόχρονα, ακόμη και να εξαχθούν σε προγράμματα GIS (Leckebusch & Peikert, 2001). Η αποτύπωση των δεδομένων GPR

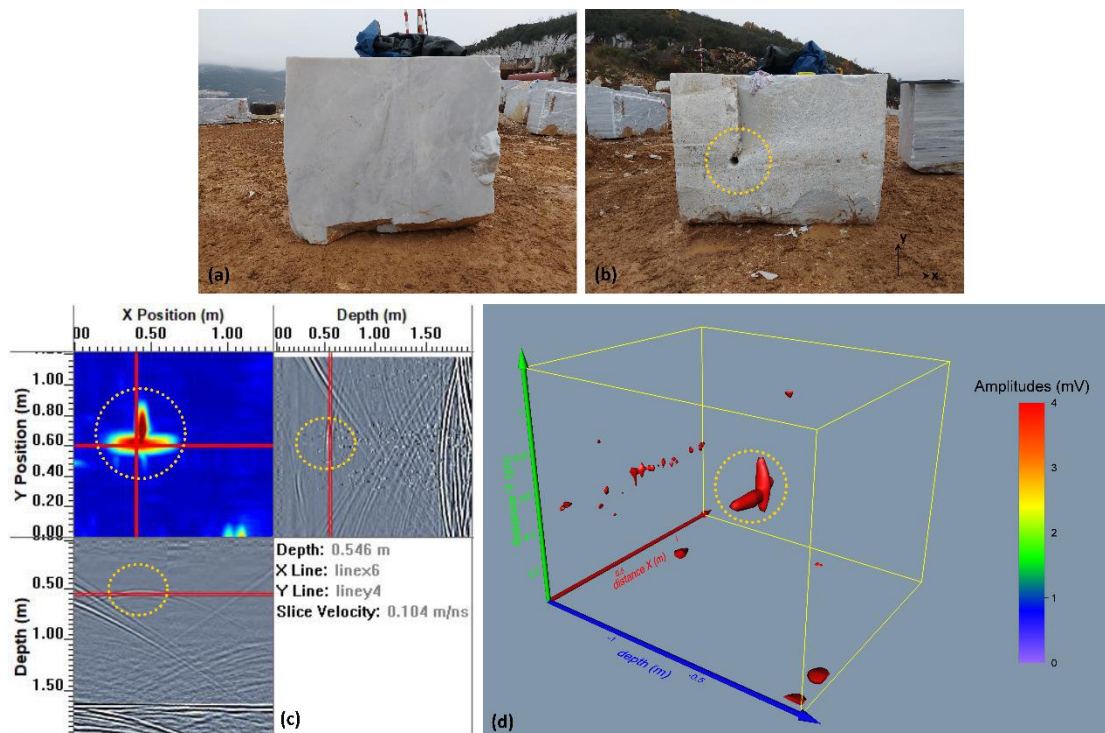
μέσω των ίσο-επιφανειών προτείνεται ως η καλύτερη μέθοδος για την απεικόνιση περιοχών μικρής κλίμακας με υψηλή λεπτομέρεια (Leucci & Negri, 2006). Βάσει όλων των παραπάνω, στην **εικόνα 33**, απεικονίζεται η ίσο-επιφάνεια που προέκυψε από τις μετρήσεις της άνω πλευράς του επιφανειακά ρωγματομένου τεμάχους μαρμάρου «C», όπως καταδεικνύεται με το κόκκινο βέλος από μια ενδεικτική GPR όδευση. Όπως διαπιστώθηκε, το τέμαχος του μαρμάρου εμφανίζει εσωτερικές λεπτές ρωγματώσεις, τόσο κοντά στην μετρούμενη επιφάνεια, όσο και εσωτερικά, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται από την αποτύπωση της ανακλαστικότητάς του μέσω της ίσο-επιφάνειας. Με υψηλότερες τιμές πλάτους, κοντά στα 4mV εντοπίζεται η διεπιφάνεια μαρμάρου-εδάφους. Αξίζει να επισημανθεί, πως μετρώντας την άνω πλευρά ενός τεμάχους μαρμάρου, μειώνεται σε πλάτος η καταγραφή θορύβου που προκαλείται από τη διεπιφάνεια του τεμάχους μαρμάρου με τον αέρα.



Εικόνα 33. Απεικονίζεται (α) μία φωτογραφία της μετρούμενης πλευράς του τεμάχους μαρμάρου «C» με το σύστημα GPR TR1000, στο οποίο είναι τοποθετημένο το «πέτασμα», δηλαδή το πανί με τον κατασκευασμένο κάνναβο, καθώς και (β) η ίσο-επιφάνεια που προέκυψε από τις μετρήσεις της άνω πλευράς του τεμάχους, όπως καταδεικνύεται με το κόκκινο βέλος που συμβολίζει μια ενδεικτική όδευση. Γίνεται αντιληπτό, πως το τέμαχος μαρμάρου εμφανίζει εσωτερικές λεπτές ρωγματώσεις, τόσο κοντά στην μετρούμενη επιφάνεια και απέναντι αυτής, όσο και εσωτερικά.

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 34** επιβεβαιώνουν τη μεγάλη διακριτική ικανότητα που προσφέρει το συγκεκριμένο σύστημα GPR κατά τη μέτρηση ενός τεμάχους μαρμάρου, αποκαλύπτοντας με μεγάλη ακρίβεια την εσωτερική του δομή. Εκτενέστερα, μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης του τεμάχους μαρμάρου «E», φανερώθηκε η διατάραξη του συμπαγούς μαρμάρου εξαιτίας της δειγματοληπτικής γεώτρησης που είχε πραγματοποιηθεί σε αυτό. Εκ πρώτης όψεως, θεωρήθηκε πως η

τρύπα που δημιουργήθηκε εκτείνεται προς μία κατεύθυνση, αντίστοιχη της δειγματοληπτικής γεώτρησης. Αποδείχτηκε όμως, πως το κενό αυτό εκτείνεται και σε έναν άξονα κάθετο από τον προβλεπόμενο (σχηματίζοντας έναν σταυρό), ο οποίος δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθεί ύστερα από την οπτική επιθεώρηση του τεμάχους μαρμάρου. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτή η κρισιμότητα της τρισδιάστατης απεικόνισης της εσωτερικής δομής των τεμαχών μαρμάρου, καθώς μονάχα με αυτόν τον τρόπο δύναται να απεικονιστούν ασυνέχειες, να προσδιοριστεί ο προσανατολισμός τους, καθώς και να εντοπιστεί το βάθος έκτασής τους (0.546m).



Εικόνα 34. Παρουσιάζονται στις φωτογραφίες (a), (b) δύο πλευρές του τεμάχους μαρμάρου «Ε», όπου στην μία εκ των δύο, σημειώνεται με **κίτρινο κύκλο** το αποτύπωμα μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης. (c) Οι ανακλάσεις οι οποίες προκλήθηκαν εξαιτίας της τρύπας που δημιουργήθηκε στο τέμαχος μαρμάρου, σημειώνονται αντίστοιχα με **κίτρινους κύκλους** στα ραδιογράμματα. Αναλυτικότερα, στο σχήμα (c) παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά ραδιογράμματα, τα οποία προέκυψαν από δύο γραμμές μέτρησης, μία κατά τον άξονα X και μία κατά τον άξονα Y, αλλά και η παραγόμενη «φέτα» βάθους (depth slice) ίση με 0.546m. Ακόμη, απεικονίζεται (d) η ίσο-επιφάνεια που προέκυψε ως αποτέλεσμα των μετρήσεων, σύμφωνα με την οποία γίνεται φανερό πως το κενό που δημιουργήθηκε από τη γεώτρηση, εκτείνεται σε δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους (σχηματίζοντας έναν σταυρό), αντί σε έναν, όπως αρχικά θεωρήθηκε ύστερα από την οπτική διασκόπηση του τεμάχους, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται και από την τομή βάθους. Τέλος, στην ίσο-επιφάνεια παρατηρούνται κάποιες εσωτερικές μικρό-ρωγματώσεις, οι οποίες δε φαίνεται να σχετίζονται με τη διαταραχή του συμπαγούς μαρμάρου από τη χρήση της δειγματοληπτικής γεώτρησης.

7.3. Χρήση φελιζόλ

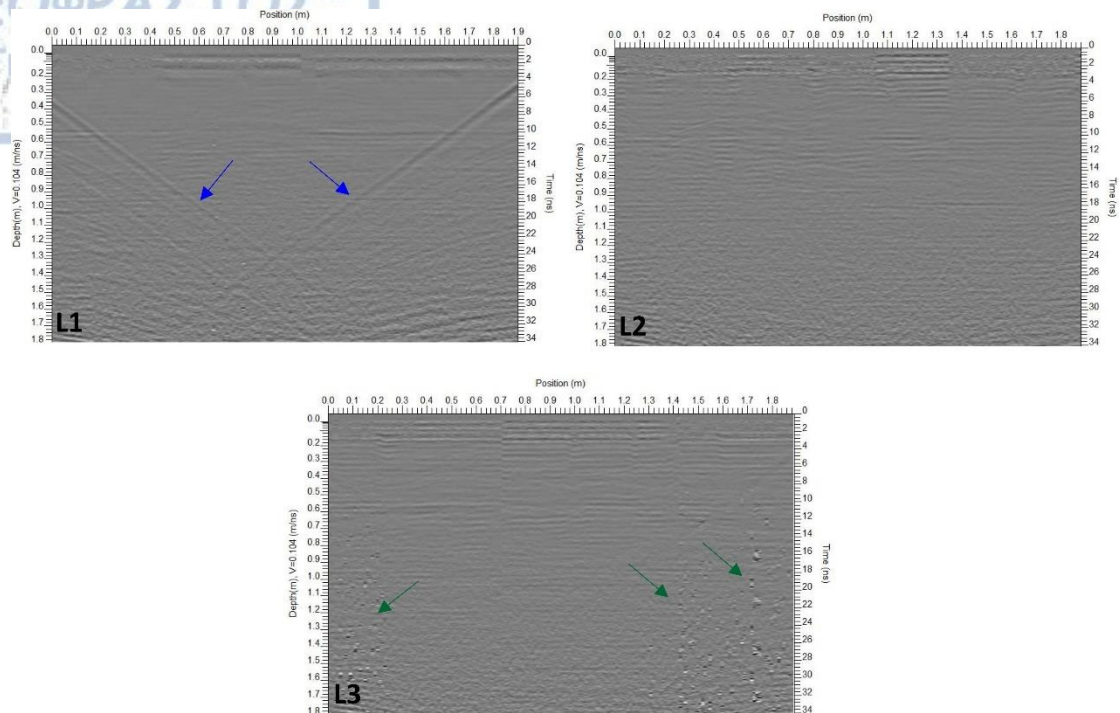
Με σκοπό τα ραδιογράμματα να απαλειφθούν από τους «γωνιακούς ανακλαστήρες» οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας και τις τιμές του πλάτους, αντί για την εφαρμογή της διαδικασίας της μετανάστευσης κατά το στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν δύο κομμάτια φελιζόλ, διαφορετικού πάχους, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (βλ. υπό ενότητα 6.5). Από τη χρήση του φελιζόλ ως μέσο παρεμβολής μεταξύ του μηχανήματος GPR και του τεμάχους μαρμάρου κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

- Με χρήση του φελιζόλ, οι τεχνητές ανακλάσεις («γωνιακοί ανακλαστήρες») που προκύπτουν ως αποτέλεσμα των γωνιών του τεμάχους μαρμάρου, όταν σε αυτές πλησιάζει το μηχάνημα του GPR, εξαλείφονται (**εικ. 35 → L2, L3**).

→ Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση φελιζόλ πάχους 2.5cm κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με το σύστημα GPR TR1000 (**εικ. 35 → L2**), φαίνεται να απαλείφονται πλήρως οι «γωνιακοί ανακλαστήρες» που αλλοιώνουν την εικόνα του ραδιογράμματος.

→ Με τη χρήση φελιζόλ πάχους 2cm κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO, κεντρικής συχνότητας 1000MHz, περιορίζονται πάλι οι ανεπιθύμητες αυτές ανακλάσεις. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν στο ραδιόγραμμα ορισμένες παρεμβολές από ηλεκτρονικές πηγές, οι οποίες δεν σχετίζονται φυσικά με τη χρήση του φελιζόλ. (**εικ. 35 → L3**).

Επομένως, βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, η χρήση και των δύο συστημάτων γεωραντάρ πάνω από κομμάτια φελιζόλ, ελαχιστοποίησε τις επιδράσεις των γωνιών της μετρούμενης πλευράς του τεμάχους μαρμάρου.



Εικόνα 35. Απεικονίζονται τα ραδιογράμματα που προέκυψαν από τις τρεις γραμμές μέτρησης GPR (L1, L2 και L3) που πραγματοποιήθηκαν στην ίδια πλευρά του τεμάχους μαρμάρου «F». Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα ραδιογράμματα που προέκυψαν: **(L1)** Χωρίς φελιζόλ με το σύστημα GPR TR1000. Με **μπλε βέλη** σημειώνονται οι «γωνιακοί ανακλαστήρες». **(L2)** Με φελιζόλ πάχους 2.5cm, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPR TR1000. **(L3)** Με φελιζόλ πάχους 2cm, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPR pE1000. Με **πράσινα βέλη** σημειώνονται κάποιες περιοχές στα ραδιογράμματα οι οποίες αποτελούν παρεμβολές από διάφορες ηλεκτρονικές πηγές.

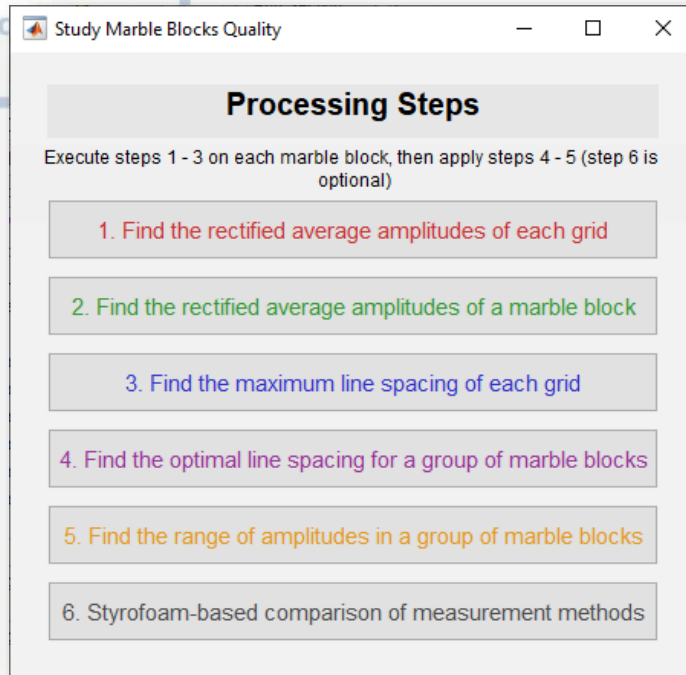
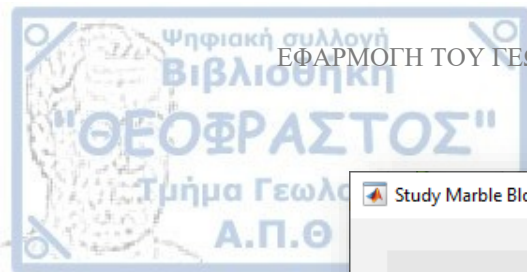
Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 8^ο

Ανάπτυξη Αλγορίθμων

8.1. Συνοπτική περιγραφή

Δημιουργήθηκε το πρόγραμμα **“Study Marble Blocks Quality”** («Μελέτη Ποιότητας Τεμαχών Μαρμάρου») μέσω της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB, το οποίο εμπεριέχει έξι αλγόριθμους, με σκοπό τη λεπτομερή ανάλυση και μελέτη των τιμών πλάτους του ηλεκτρομαγνητικού (H/M) κύματος που μετρήθηκαν σε εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου (εικ. 36)³⁰. Εκτενέστερα, ανακλάσεις υψηλού πλάτους αντιστοιχούν στα όρια μεταξύ των ρωγμών και του συμπαγούς μαρμάρου, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες. Αντίθετα, τιμές χαμηλού πλάτους αντικατοπτρίζουν υλικό με παρόμοιες ιδιότητες (Conyers, 2004), δηλαδή το υγιές μάρμαρο. Η κατασκευή λοιπόν των συγκεκριμένων αλγορίθμων, πραγματοποιήθηκε με απώτερο στόχο την αξιοποίησή τους μελλοντικά για την αξιολόγηση με μεγαλύτερη ακρίβεια της ποιότητας των εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρου και τη βελτίωση της διαδικασίας διεκπεραίωσης των μετρήσεων.

³⁰ Η χορήγηση των αλγορίθμων θα γίνεται ύστερα από προσωπική επικοινωνία με τη συγγραφέα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.



Εικόνα 36. Κύριο μενού του προγράμματος “Study Marble Blocks Quality” («Μελέτη Ποιότητας Τεμαχών Μαρμάρου»), το οποίο αποτελείται από έξι διαφορετικούς αλγορίθμους, ως βήματα επεξεργασίας των τιμών H/M πλάτους. Οι αλγόριθμοι 1 έως 3 εκτελούνται για κάθε τεμάχος μαρμάρου ξεχωριστά κι έπειτα, εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι 4 και 5 για το σύνολο των μετρούμενων τεμαχών μαρμάρου. Η χρήση του 6^{ου} αλγόριθμου είναι προαιρετική.

8.1.1. 1^{ος} αλγόριθμος

Το 1^ο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με τίτλο “Find the rectified average amplitudes of each grid” ή αλλιώς «Υπολογισμός απόλυτων τιμών μέσου πλάτους για κάθε κάνναβο» (εικ. 37), είχε σκοπό τον υπολογισμό της μέσης τιμής πλάτους, που προκύπτει από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε κάνναβο, ο οποίος αντιστοιχεί σε κάθε μετρούμενη πλευρά, ενός συγκεκριμένου τεμάχους μαρμάρου. Αναλυτικότερα, υπολογίστηκαν οι απόλυτες τιμές μέσου πλάτους για κάθε άξονα διασκόπησης, δηλαδή κατά X, Y και X&Y, για κάθε μία από τις μετρούμενες επιφάνειες ενός τεμάχους μαρμάρου. Κατά τη χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου, «κόβονται» τα πλάτη σε κάθε ίχνος που αντιστοιχούν σε χρόνους μικρότερους από τα 3.5ns, καθώς όπως προαναφέρθηκε, τα πλάτη αυτά αφορούν τα απευθείας κύματα εδάφους (μαρμάρου στην συγκεκριμένη περίπτωση) και αέρα. Επιπλέον, «κόβονται» τα πλάτη που αφορούν χρόνους κάτω από τους οποίους τα δεδομένα θεωρούνται θόρυβος, υποδεικνύοντας τη διεπαφή του τεμάχους μαρμάρου με τον αέρα ή με το έδαφος πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το μπλοκ. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν

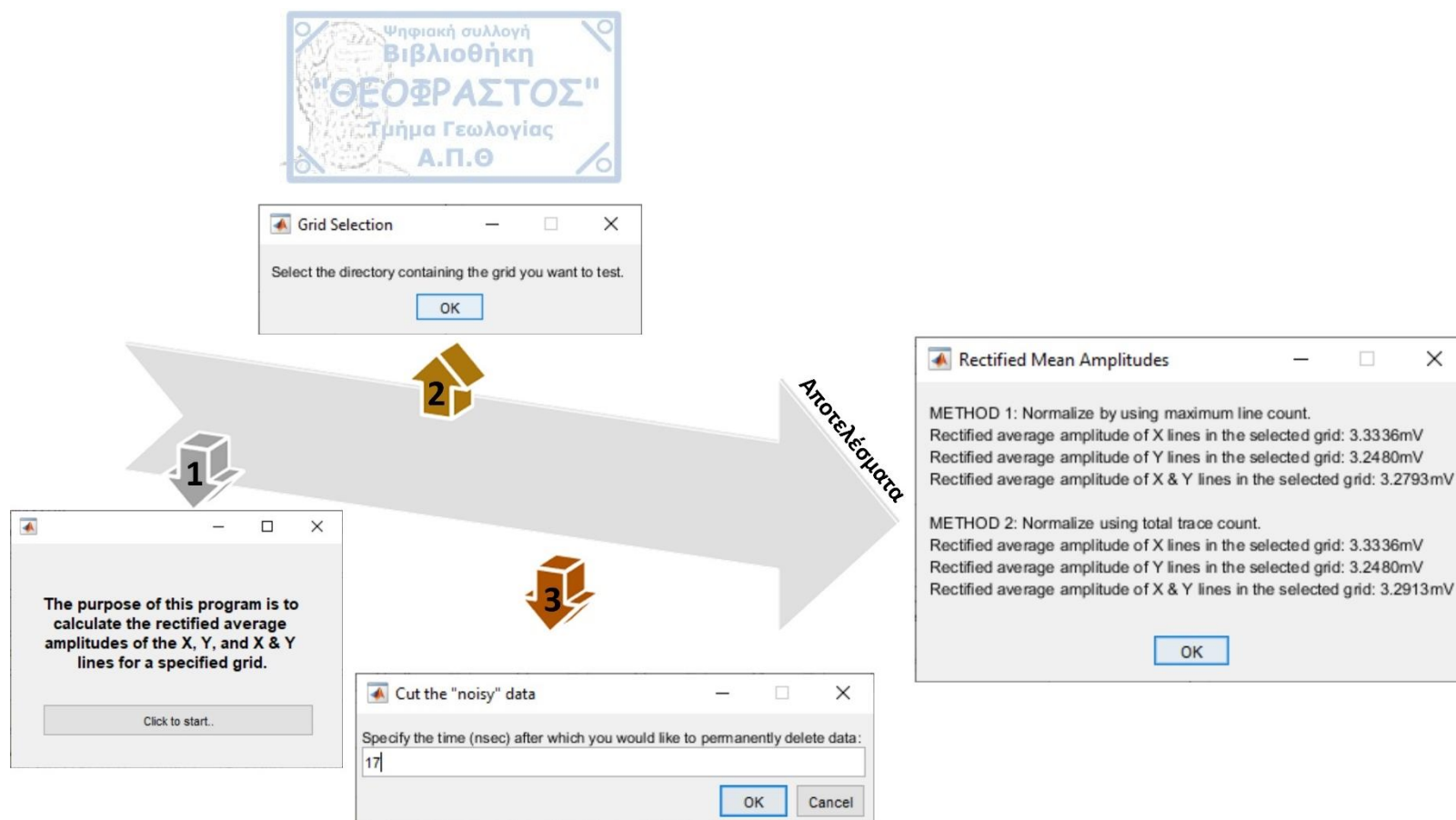
δύο μέθοδοι «κανονικοποίησης» των δεδομένων, προκειμένου οι απόλυτες τιμές του μέσου πλάτους που προκύπτουν από ένα ή και διαφορετικά τεμάχια μαρμάρου, να μπορούν μετέπειτα να συγκριθούν μεταξύ τους με αξιοπιστία. Οι μέθοδοι αυτοί, περιγράφονται αμέσως παρακάτω:

1. Μέθοδος «κανονικοποίησης» σύμφωνα με το μέγιστο αριθμό γραμμών:

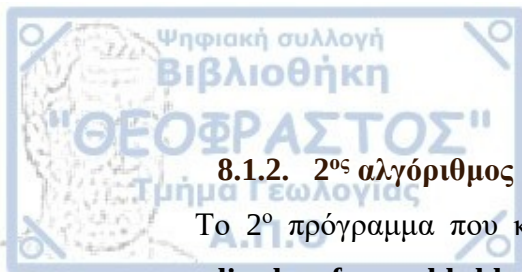
Σύμφωνα με την 1^η μέθοδο «κανονικοποίησης», ως πρώτο βήμα υπολογίστηκε η μέση τιμή απόλυτου πλάτους που αντιστοιχεί σε κάθε γραμμή διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ακολούθως, προστέθηκαν οι τιμές μέσου πλάτους που αφορούσαν όλες τις γραμμές για κάθε διεύθυνση μέτρησης, για παράδειγμα κατά τον άξονα X, και διαιρέθηκαν με τον μέγιστο αριθμό γραμμών όδευσης που πραγματοποιήθηκαν κατά αυτόν τον άξονα, στον συγκεκριμένο κάρναβο. Η διαδικασία αυτή, επαναλήφθηκε για τις τιμές μέσου πλάτους που αφορούσαν τον άξονα Y, ενώ για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους και των δύο αξόνων συνδυαστικά, προστέθηκαν όλες οι υπολογισμένες τιμές μέσου πλάτους, ανεξαρτήτως κατεύθυνσης και έπειτα διαιρέθηκαν με το άθροισμα του συνολικού αριθμού γραμμών διασκόπησης, που αφορούν τον συγκεκριμένο κάρναβο μετρήσεων.

2. Μέθοδος «κανονικοποίησης» σύμφωνα με το μέγιστο αριθμό ιχνών: Σύμφωνα με την 2^η μέθοδο «κανονικοποίησης», αφού υπολογίστηκε η μέση τιμή απόλυτου πλάτους για όλα τα ίχνη από όλες τις γραμμές διασκόπησης που μετρήθηκαν για κάθε διεύθυνση, για παράδειγμα κατά τον άξονα X (αθροίστηκαν δηλαδή όλες οι απόλυτες τιμές μέσου πλάτους που αφορούσαν όλες τις γραμμές διασκόπησης που πραγματοποιήθηκαν κατά τον άξονα X στον υπό μελέτη κάρναβο κι έπειτα, το συγκεκριμένο άθροισμα διαιρέθηκε με το συνολικό αριθμό των ιχνών που ελήφθησαν κατά τον συγκεκριμένο άξονα). Η διαδικασία αυτή, επαναλήφθηκε για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους που αφορούσαν τον άξονα Y, ενώ για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους και των δύο αξόνων συνδυαστικά, προστέθηκαν όλες οι υπολογισμένες τιμές μέσου πλάτους, ανεξαρτήτου κατεύθυνσης και στη συνέχεια, το συγκεκριμένο άθροισμα διαιρέθηκε με το συνολικό αριθμό των ιχνών που πραγματοποιήθηκαν και στους δύο άξονες έρευνας.

Τα αποτελέσματα του 1^{ου} αλγορίθμου, αποθηκεύονται σε ξεχωριστά αρχεία excel για κάθε κάνναβο και για κάθε μέθοδο «κανονικοποίησης», ενώ η διαφορά στις τιμές μέσου πλάτους που προέκυψε από κάθε μέθοδο «κανονικοποίησης», δίνεται μέσω διαγραμμάτων.

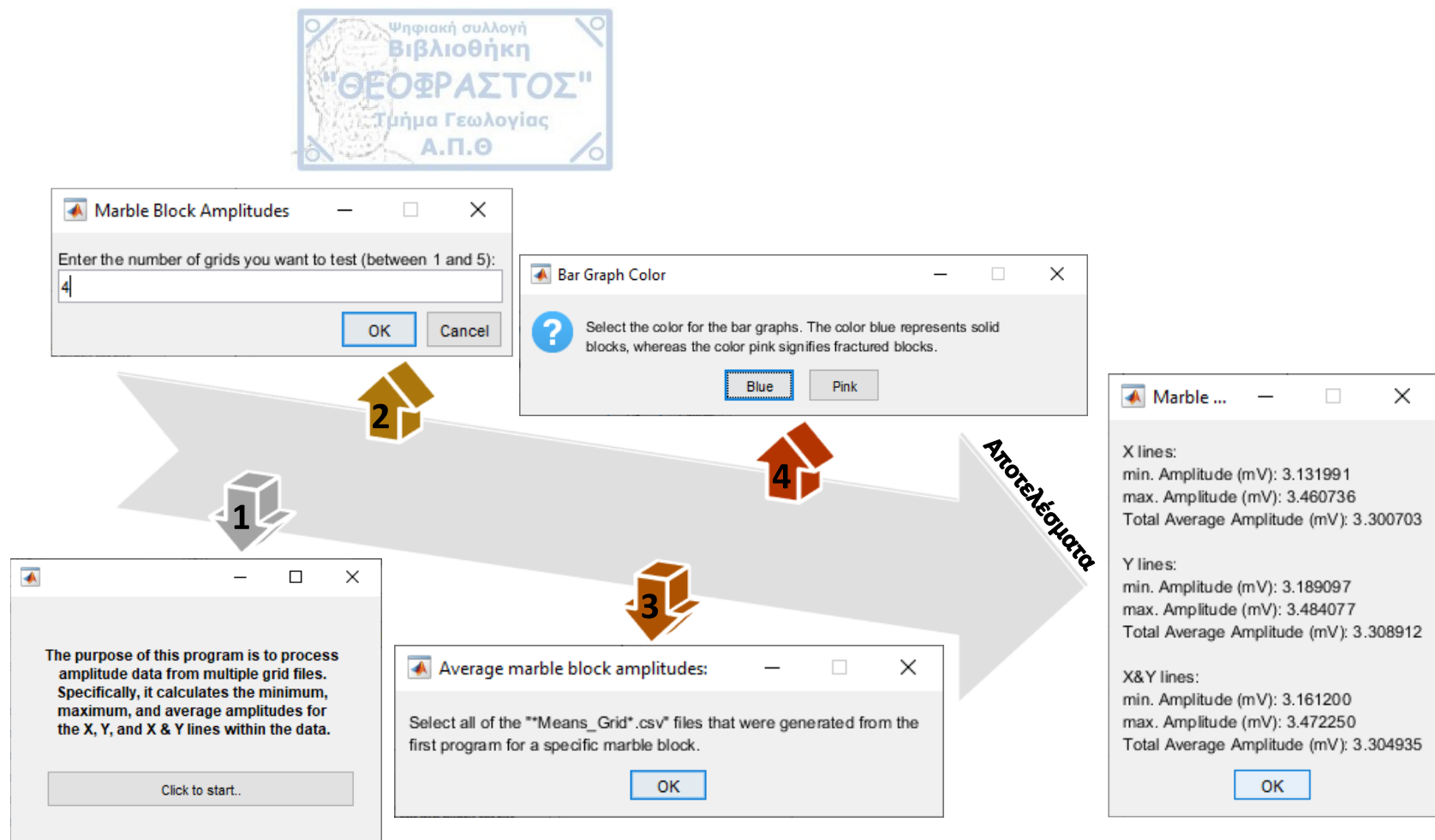


Εικόνα 37. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 1^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου αλγορίθμου. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει τον κάνναβο που θέλει να επεξεργαστεί. **(3)** Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το χρόνο (σε ns) κάτω από τον οποίο επιθυμεί να «κόψει» τα δεδομένα. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους για κάθε μέθοδο «κανονικοποίησης» και για κάθε κατεύθυνση μέτρησης X, Y και X&Y. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων), για την 1^η (“Normalization using the maximum line count”) και την 2^η μέθοδο «κανονικοποίησης» (“Normalization using the total trace count”) των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους αντίστοιχα.



8.1.2. 2^{ος} αλγόριθμος

Το 2^ο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με τίτλο **“Find the rectified average amplitudes of a marble block”** ή αλλιώς **«Υπολογισμός των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους που αφορούν ένα τέμαχος μαρμάρου»** (εικ. 38), είχε ως στόχο την επεξεργασία των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους που προέκυψαν από όλους τους κάρναβους που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε μετρούμενο τέμαχος μαρμάρου. Σκοπός της επεξεργασίας αυτής, ήταν ο υπολογισμός της ελάχιστης, της μέγιστης και της μέσης απόλυτης τιμής πλάτους που αντιστοιχεί σε κάθε μετρούμενο τέμαχος μαρμάρου, για κάθε μία από τις κατευθύνσεις μέτρησης X, Y και X&Y, με σκοπό την μετέπειτα κατηγοριοποίησή τους βάσει της ποιότητας και τη συσχέτιση αυτής, με συγκεκριμένα εύρη τιμών μέσου πλάτους. Τα αποτελέσματα του 2^{ου} αλγορίθμου, αποθηκεύονται σε ένα αρχείο excel, για κάθε μέθοδο «κανονικοποίησης» των τιμών μέσου πλάτους και αναπαρίστανται γραφικά μέσω δύο διαφορετικών τύπων διαγραμμάτων.



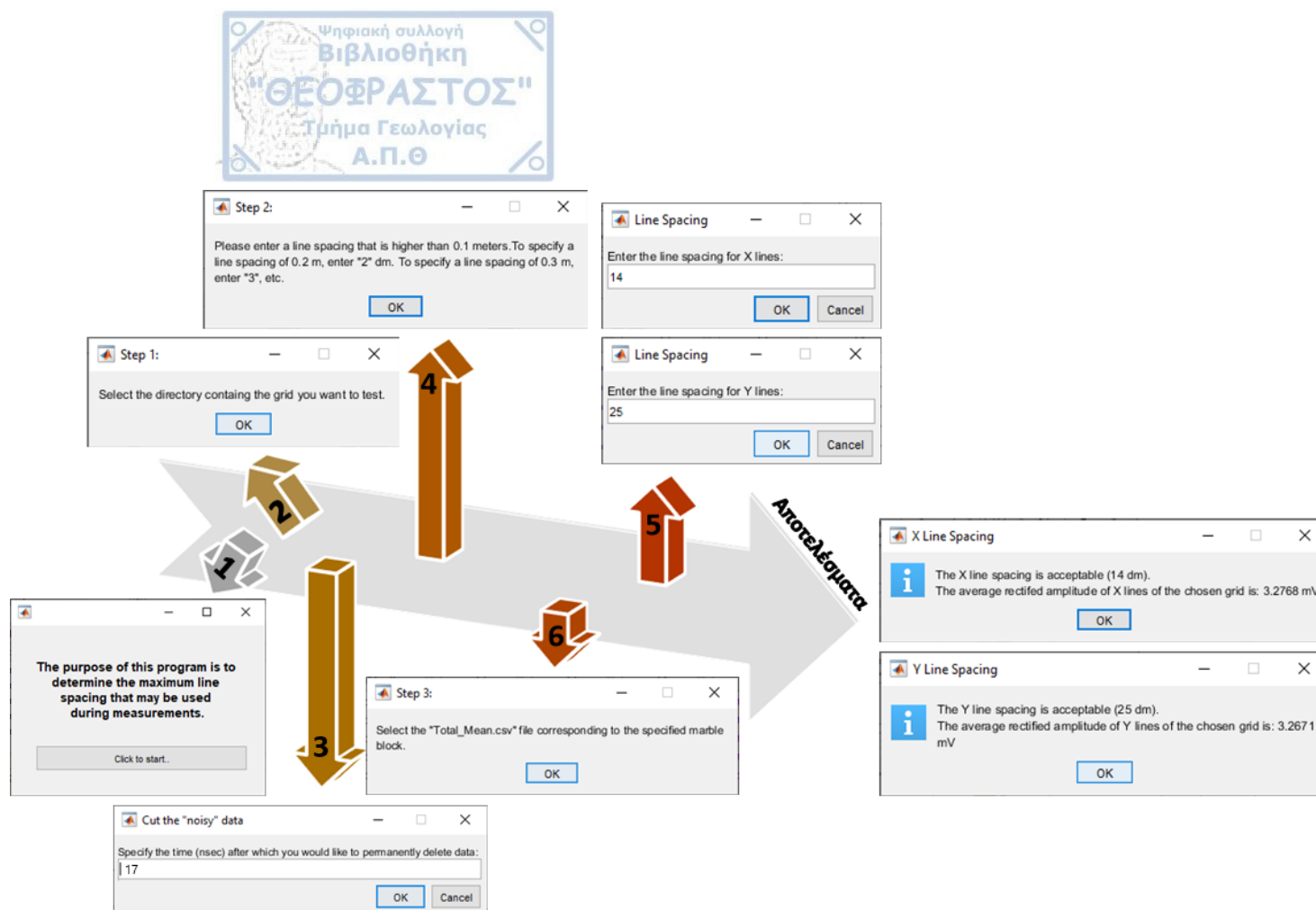
Εικόνα 38. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 2^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των καννάβων που έχει πραγματοποιηθεί σε ένα τέμαχος μαρμάρου. **(3)** Στο βήμα 3^ο δίνεται η οδηγία επιλογής των αρχείων excel που δημιουργήθηκαν από το 1^ο πρόγραμμα και τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους κατά τους άξονες X, Y και X&Y, για κάθε μετρούμενη πλευρά αντίστοιχα. **(4)** Στο 4^ο βήμα επιλέγεται το χρώμα του γραφήματος, αναφορικά με τον αν αυτό είναι υγιές/ συμπαγές τέμαχος (**μπλε χρώμα**) ή αν αυτό έχει χαρακτηριστεί ως ρωγματομένο (**ροζ χρώμα**). Τέλος, παρουσιάζονται οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες απόλυτες τιμές πλάτους για κάθε άξονα μέτρησης (X, Y και X&Y) για το επιλεγμένο τέμαχος μαρμάρου. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων).

8.1.3. 3^{ος} αλγόριθμος

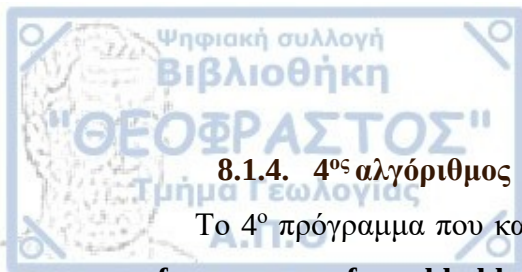
Το 3^ο πρόγραμμα με τίτλο “Find the maximum line spacing of each grid” ή αλλιώς «Υπολογισμός της μέγιστης δυνατής απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης για κάθε κάρναβο» (εικ. 39), κατασκευάστηκε με την προοπτική της διευκόλυνσης του χρήστη κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, για τον εντοπισμό μικρο-ρωγματώσεων εντός του τεμάχους μαρμάρου, αυξάνοντας σταδιακά την απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης. Ειδικότερα, στοχεύει στην απλούστευση των μετρήσεων, με τη διεκπεραίωση πιο αραιών γραμμών μέτρησης είτε κατά τη διεύθυνση X, είτε κατά τη διεύθυνση Y, οι οποίες όμως δύναται να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα πλάτους με αυτά που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις παραμέτρους μετρήσεων που επισημαίνονται στον **πίνακα 8**. Αξίζει να σημειωθεί, πως το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να εφαρμοστεί σε τεμάχη μαρμάρου στα οποία μετρήθηκαν περισσότερες από μία πλευρές, καθώς απαιτεί για τη λειτουργία του δεδομένα από κάθε κάρναβο για επεξεργασία και σύγκριση αυτών. Αναλυτικότερα, υπολογίστηκαν:

- Το εύρος της απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης που μπορεί να πραγματοποιήσει ο χειριστής του συστήματος GPR κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε ένα τέμαχος μαρμάρου, σε κάθε του πλευρά και για κάθε άξονα μέτρησης ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, κάθε αποδεκτή από τον αλγόριθμο απόσταση των γραμμών όδευσης του συστήματος GPR, είναι αποτέλεσμα της σύγκρισης της τιμής μέσου πλάτους, που προκύπτει από την νέα απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης που έχει πληκτρολογήσει ο χρήστης, με το εύρος των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους, το οποίο προέκυψε με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης ίσο με 0.1m (αποτελέσματα 2^{ου} αλγορίθμου). Αν η νέα τιμή μέσου πλάτους, εντοπίζεται μέσα στο παραπάνω εύρος τιμών μέσου πλάτους, τότε η νέα απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης γίνεται αποδεκτή από τον αλγόριθμο.
- Η απόλυτη τιμή του μέσου πλάτους που προκύπτει από κάθε επιλεγμένη και αποδεκτή απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης που έχει επιλέξει ο χρήστης, καθώς και η σύγκρισή αυτής με την τιμή μέσου πλάτους που προκύπτει για την πιο πυκνή δειγματοληπτική απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης του συστήματος GPR (που είναι 0.1 m).

Τα αποτελέσματα του 3^{ου} αλγορίθμου (αποδεκτές αποστάσεις μεταξύ των γραμμών διασκόπησης και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν), αποθηκεύονται σε ένα αρχείο “.TXT”.

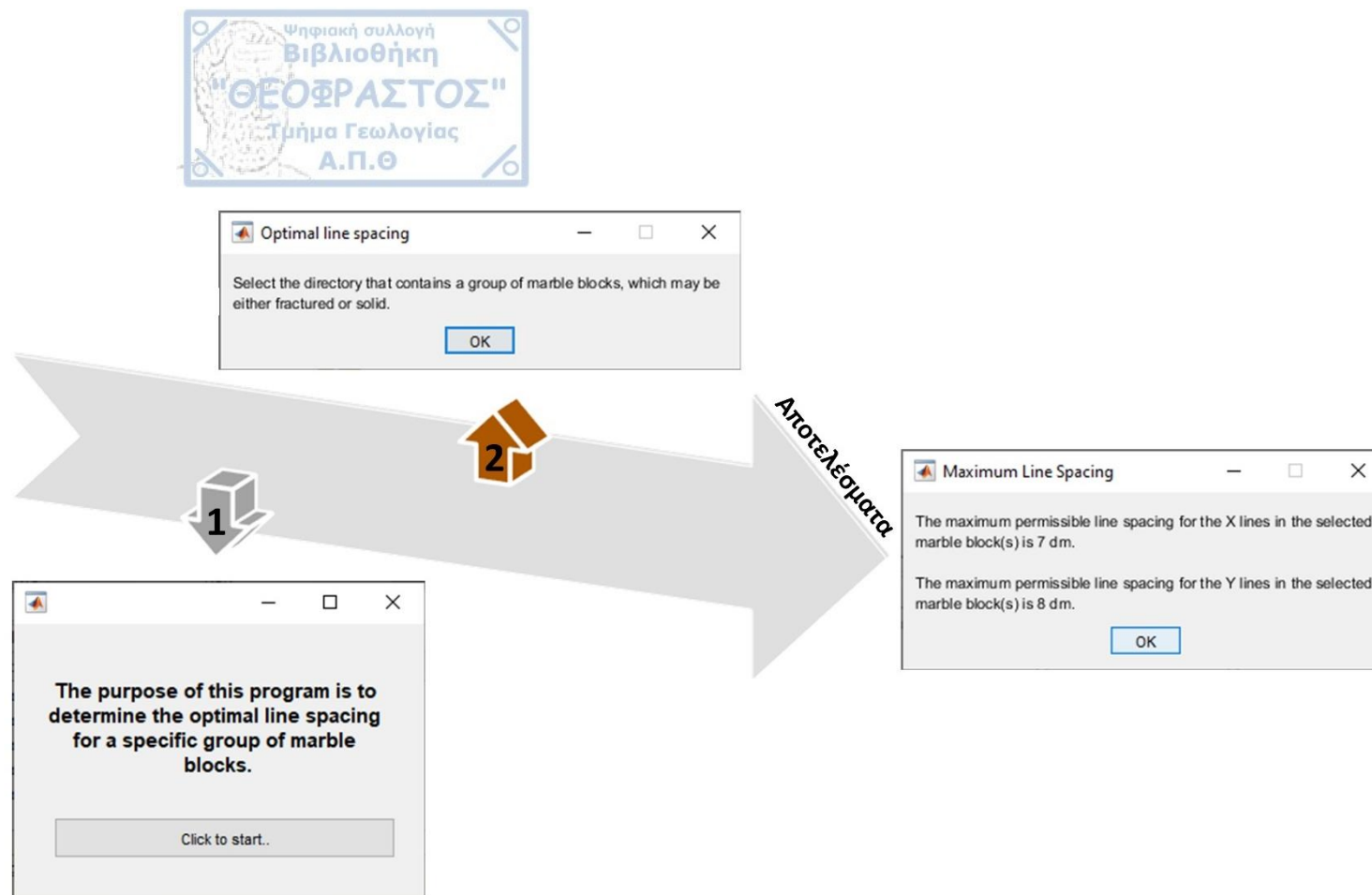


Εικόνα 39. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 3^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει τον επιθυμητό κάνναβο. **(3)** Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το χρόνο (σε ns) κάτω από τον οποίο επιθυμεί να «κόψει» τα δεδομένα. **(4)** Στο 4^ο βήμα δίνεται η οδηγία στο χρήστη, για το πως να πληκτρολογήσει το επιθυμητό βήμα δειγματοληψίας στο αμέσως επόμενο παράθυρο του αλγορίθμου. **(5)** Στο 5^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί το επιθυμητό βήμα δειγματοληψίας (σε dm) για τον άξονα X και Y αντίστοιχα και **(6)** στο 6^ο βήμα, δίνεται η οδηγία επιλογής του κατάλληλου αρχείου excel, που κατασκευάστηκε από τον 2^ο αλγόριθμο, και περιέχει τα εύρη διακύμανσης των τιμών του πλάτους, στο υπό μελέτη τέμαχος μαρμάρου. Τέλος, παρουσιάζονται οι αποδεκτές αποστάσεις μεταξύ των γραμμών διασκόπησης και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν το τέμαχος μαρμάρου «C» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων).

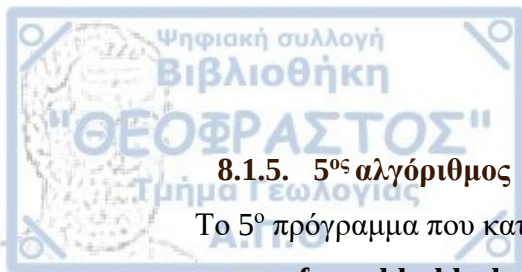


8.1.4. 4^{ος} αλγόριθμος

Το 4^ο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με τίτλο **“Find the optimal line spacing for a group of marble blocks”** ή αλλιώς **«Υπολογισμός της ιδανικής απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, για ένα σύνολο τεμαχών μαρμάρου»** (εικ. 40), είχε ως στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, προς κάθε κατεύθυνση, που μπορεί να εφαρμοστεί από το χειριστή του GPR, σε ομάδες τεμαχών μαρμάρου με ποικίλες ποιότητες. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ιδανικής απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, που ενδείκνυται για μάρμαρα του υπό μελέτη λατομείου, λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά τους χαρακτηριστικά, αξιοποιώντας τα παραγόμενα αρχεία αποτελεσμάτων του 3^{ου} αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα του 4^{ου} αλγορίθμου (αποδεκτές αποστάσεις μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, για κάθε κατεύθυνση μέτρησης), αποθηκεύονται σε ένα αρχείο “.TXT”.

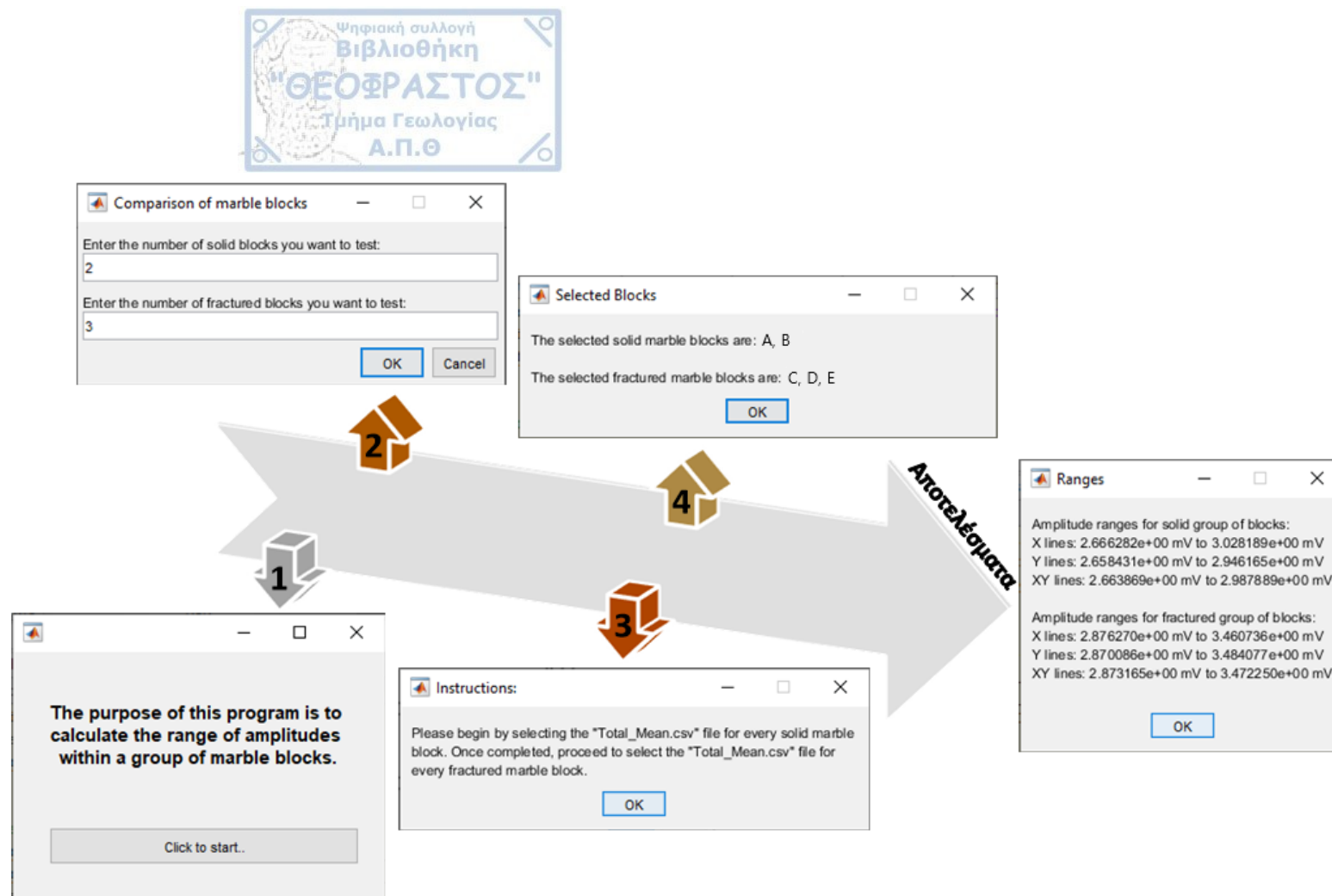


Εικόνα 40. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 4^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει το φάκελο που περιέχει το σύνολο των τεμαχών μαρμάρου, για τα οποία επιθυμεί να υπολογίσει την ιδανική απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδανικής απόστασης μεταξύ των γραμμών μέτρησης, για κάθε σύνολο τεμαχών μαρμάρου που έχει επιλεγεί (υγιή και ρωγματωμένα). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα που αφορούν τα υγιή τεμάχη μαρμάρου «Α» και «Β» (βλ. πίνακα 8 με παραμέτρους των μετρήσεων).



8.1.5. 5^{ος} αλγόριθμος

Το 5^ο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με τίτλο **“Find the range of amplitudes in a group of marble blocks”** ή αλλιώς **«Υπολογισμός του εύρους των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους που αντιστοιχεί σε μία ομάδα τεμαχών μαρμάρου»** (εικ. 41), είχε ως στόχο τον υπολογισμό του εύρους των τιμών μέσου πλάτους, μιας ομάδας τεμαχών μαρμάρων συγκεκριμένης ποιότητας (υγιή, ενδιάμεσης ποιότητας ή ρωγματωμένα) και τη σύγκριση αυτών μεταξύ τεμαχών μαρμάρου διαφορετικών ποιοτήτων. Συμπληρωματικά, προσδιορίστηκε η διακύμανση της ανακλαστικότητας των ρωγματωμένων μαρμάρων συγκριτικά με τα υγιή/ συμπαγή τεμάχη μαρμάρου, δηλαδή ή αύξηση ή η μείωση των τιμών μέσου πλάτους. Τα αποτελέσματα του 5^{ου} αλγορίθμου παρουσιάζονται μέσω διαφόρων τύπων διαγραμμάτων.

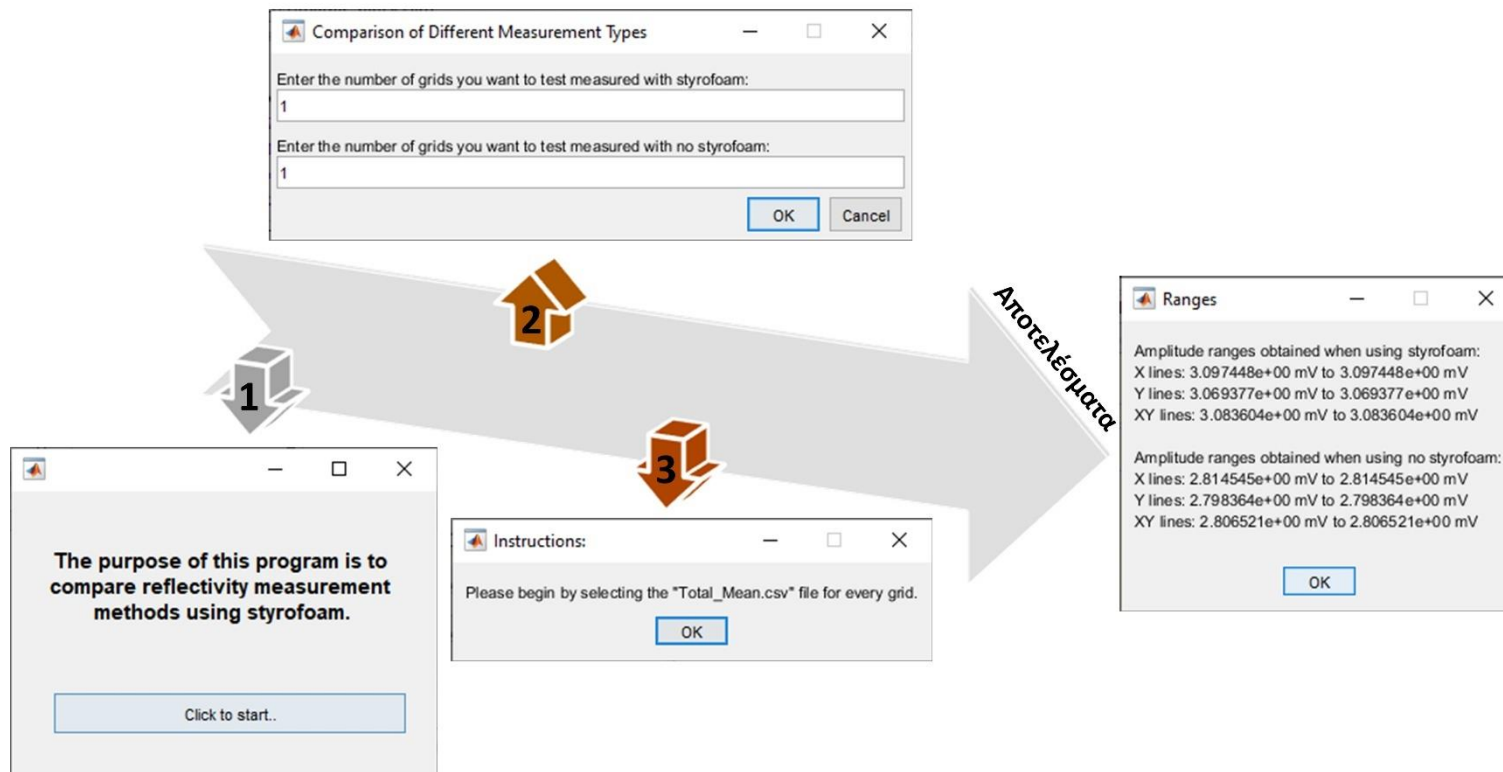


Εικόνα 41. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 5^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί τον αριθμό των συμπαγών αλλά και των ρωγματομένων τεμαχών μαρμάρου που επιθυμεί να μελετήσει. **(3)** Στο 3^ο βήμα ο χρήστης επιλέγει τα αρχεία excel (τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους για τις διευθύνσεις X, Y και X&Y) που κατασκευάστηκαν από το 2^ο αλγόριθμο και αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα συμπαγή ή ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου, που έχει δηλώσει ο χρήστης στο 2^ο βήμα της επεξεργασίας. **(4)** Στο 4^ο βήμα εμφανίζεται στην οθόνη του χρήστη ένα παράθυρο το οποίο αναφέρει τα ονόματα των υγιών και ρωγματομένων τεμαχών μαρμάρου που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα της επεξεργασίας. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους για τις κατευθύνσεις X, Y και X&Y, που αφορούν τα υγιή και τα ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τεμάχια μαρμάρου «Α», «Β», «C», «D» και «Ε» (βλ. πίνακα 8 με τις παραμέτρους των μετρήσεων).

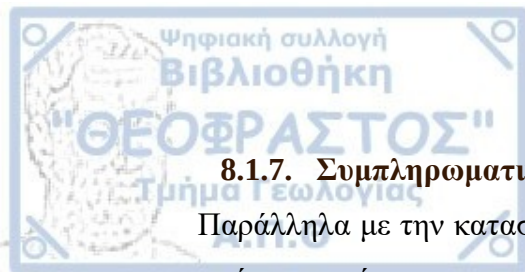
8.1.6. 6^{ος} αλγόριθμος

Το 6^ο και τελευταίο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με τίτλο **“Styrofoam-based comparison of measurement methods”** ή αλλιώς **«Σύγκριση μεθόδων μέτρησης με χρήση φελιζόλ»** (εικ. 42), στοχεύει στη μελέτη της ανακλαστικότητας, κατά τη χρήση δύο διαφορετικών τρόπων υλοποίησης των μετρήσεων. Η πρώτη προσέγγιση, αποτελεί και τον «κλασσικό» τρόπο διεκπεραίωσης των μετρήσεων, δηλαδή την πραγμάτωση τους με άμεση επαφή του συστήματος GPR με το τέμαχος μαρμάρου, ενώ η δεύτερη προσέγγιση, εισάγει την παρεμβολή ενός λεπτού στρώματος φελιζόλ, μεταξύ του συστήματος GPR και του τεμάχους μαρμάρου³¹. Τα αποτελέσματα του 6^{ου} αλγορίθμου παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων.

³¹ Βλ. υπό ενότητα 6.5 για τις παραμέτρους μετρήσεων



Εικόνα 42. Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των βημάτων που εκτελεί ο χρήστης στον 6^ο αλγόριθμο. Αναλυτικότερα: **(1)** Στο 1^ο βήμα περιγράφεται ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος. **(2)** Στο 2^ο βήμα ο χρήστης πληκτρολογεί τον αριθμό των καννάβων που μέτρησε σε ένα τέμαχος μαρμάρου, με τη χρήση και χωρίς τη χρήση του φελιζόλ αντίστοιχα. **(3)** Στο 3^ο βήμα δίνεται η οδηγία επιλογής των αρχείων excel που δημιουργήθηκαν από το 2^ο πρόγραμμα, τα οποία περιέχουν τις τιμές μέσου πλάτους για τις διευθύνσεις X, Y και X&Y, που αντιστοιχούν στο επιλεγμένο τέμαχος μαρμάρου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, δηλαδή οι τιμές μέσου πλάτους για τις κατευθύνσεις X, Y και X&Y που προκύπτουν από τη χρήση και μη του κομματιού φελιζόλ. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν το ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου «Ε» (βλ. πίνακα 8 με τις παραμέτρους των μετρήσεων).



8.1.7. Συμπληρωματικός αλγόριθμος

Παράλληλα με την κατασκευή των κύριων έξι αλγορίθμων, οι οποίοι αναλύθηκαν εκτενώς παραπάνω, κατασκευάστηκε ένας επιπλέον αλγόριθμος παρόμοιος με τον 5^ο αλγόριθμο. Ο παρών αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των μεταβολών στην ανακλαστικότητα, δηλαδή στις τιμές μέσου πλάτους ανά κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y), όταν εφαρμόζεται το βήμα επεξεργασίας της μετανάστευσης (FK Migration), όταν χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά συστήματα GPR για την υλοποίηση των μετρήσεων, καθώς και όταν μεταβάλλεται η καθορισμένη απόσταση (0.1m) μεταξύ των γραμμών μέτρησης.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 9^ο

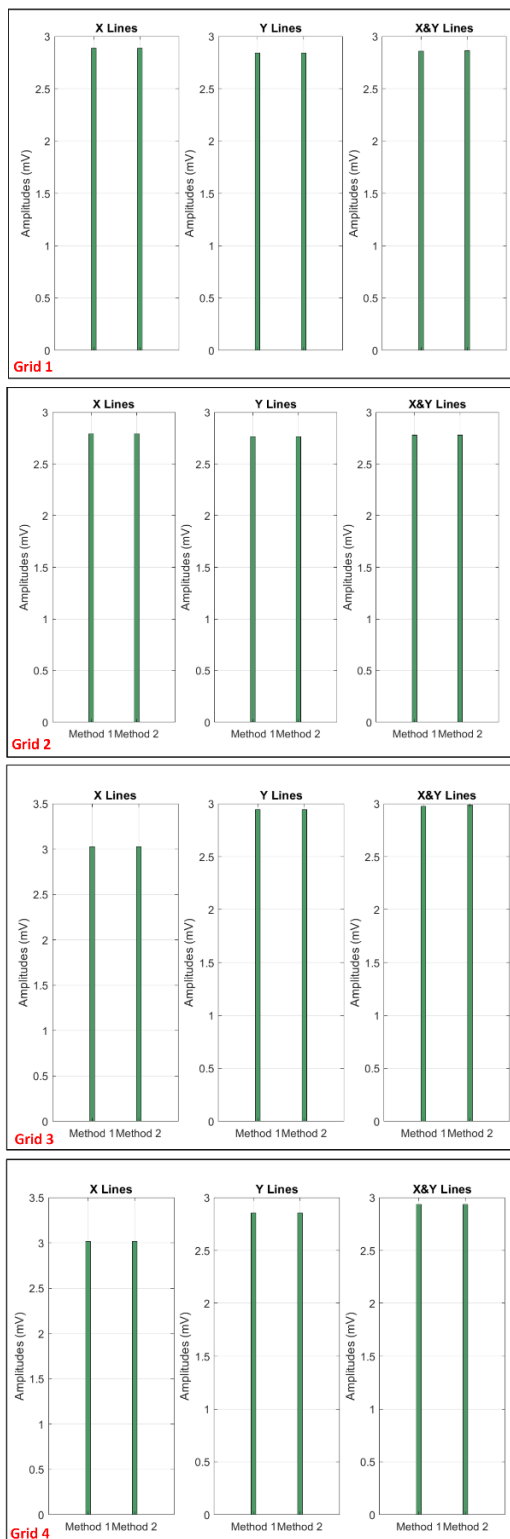
Αποτελέσματα Αλγοριθμικής Επεξεργασίας

9.1. Αποτελέσματα Εφαρμογής Αλγορίθμων

Η σύγκριση των δύο μεθόδων «κανονικοποίησης» των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α», σε κάθε πλευρά και κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y), παρουσιάζεται στα διαγράμματα της **εικόνας 43**. Οι δύο αυτές μέθοδοι, δεν παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους (με τις διαφορές να εντοπίζονται από το τρίτο δεκαδικό ψηφίο και έπειτα), γεγονός το οποίο αποδεικνύει την εγκυρότητα τους, με αποτέλεσμα και οι δύο να μπορούν να αξιοποιηθούν για τους υπολογισμούς του μέσου πλάτους³². Ωστόσο, μονάχα η δεύτερη μέθοδος «κανονικοποίησης», βάσει του συνολικού αριθμού των ιχνών ανά κατεύθυνση μέτρησης, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί και στα υπόλοιπα δεδομένα GPR, για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους. Η συγκεκριμένη επιλογή, κρίθηκε ως η καταλληλότερη και πιο ακριβής, αφού υπολογίζει τη συνολική μέση τιμή πλάτους για όλα τα ίχνη ενός καννάβου και δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των ιχνών που περιέχει η κάθε γραμμή διασκόπησης. Το γεγονός αυτό, καθιστά τη 2^η αυτή μέθοδο πιο αντιπροσωπευτική των μεταβολών των τιμών πλάτους.

³² Βλ. Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακας 12

Bar Plots Illustrating the Comparison of Normalization Methods for Rectified Mean Amplitudes



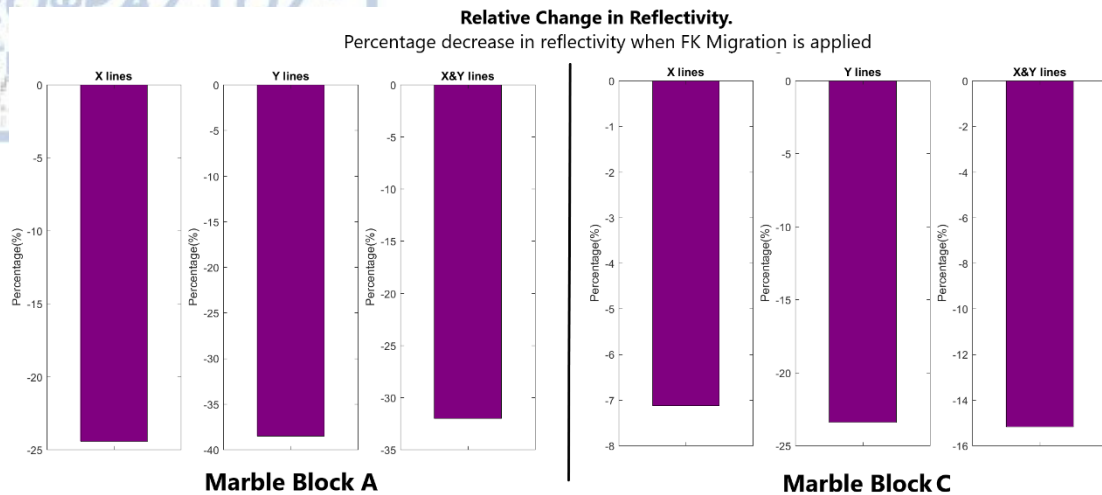
Εικόνα 43. Διαγράμματα σύγκρισης των δύο μεθόδων «κανονικοποίησης» των δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απόλυτων τιμών μέσου πλάτους για το συμπαγές μαρμαρίνο τέμαχος «Α», σε κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y). Η 1^η μέθοδος αντιπροσωπεύει τη μέθοδο «κανονικοποίησης» βάσει του μέγιστου αριθμού γραμμών ανά κατεύθυνση, ενώ η 2^η μέθοδος βασίζεται στο συνολικό αριθμό ιχνών ανά κατεύθυνση. Οι δύο μέθοδοι «κανονικοποίησης» δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, με τα πλάτη να κυμαίνονται μεταξύ 2.5-3mV.

Κατόπιν της επιλογής της μεθόδου «κανονικοποίησης» των δεδομένων, υπολογίστηκαν οι απόλυτες τιμές μέσου πλάτους με και χωρίς την εφαρμογή του φίλτρου της μετανάστευσης (FK Migration) σε δύο τεμάχια μαρμάρου, σε ένα συμπαγές με όνομα «Α» και σε ένα επιφανειακά ρωγματομένο με το όνομα «C», με σκοπό να παρατηρηθούν οι μεταβολές των τιμών μέσου πλάτους, όταν εφαρμόζεται το συγκεκριμένο βήμα επεξεργασίας³³. Οι *Goodman et al. (2009)* σημειώνουν πως κατά την εφαρμογή της διαδικασίας της μετανάστευσης σε τομές χρόνου ή βάθους, μειώνεται το πλάτος του σήματος, γεγονός το οποίο μπορεί να περιπλέξει την ανίχνευση των υπεδαφικών χαρακτηριστικών.

Η σύγκριση των τιμών μέσου πλάτους απέδειξε πως το φίλτρο μετανάστευσης FK μειώνει τις τιμές πλάτους σε κάθε μετρούμενη κατεύθυνση (X, Y και X&Y). Για την ακρίβεια, στα δεδομένα GPR που συλλέχθηκαν προς την κατεύθυνση X, η μετανάστευση είχε ελάχιστο αντίκτυπο στα πλάτη, σε σύγκριση με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την κατεύθυνση Y, και για τα δύο τεμάχια μαρμάρου (εικ. 44). Η μείωση στα πλάτη, μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στην εξάλειψη των «γωνιακών ανακλαστήρων» και στην κατάρρευση των υπερβολών, κατά την εφαρμογή του φίλτρου³⁴. Εντούτοις, λόγω των σημαντικών ψευδών ανακλάσεων (artifacts) που εισήχθησαν στα ραδιογράμματα από τη διαδικασία της μετανάστευσης, τα οποία επηρέασαν τις τιμές πλάτους, το παρόν βήμα δεν εφαρμόστηκε περαιτέρω στα δεδομένα GPR που χρησιμοποιήθηκαν από τους αλγόριθμους.

³³ Βλ. Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακας 13

³⁴ Υπό ενότητα 6.4



Εικόνα 44. Δύο διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα, κατά την εφαρμογή του φίλτρου μετανάστευσης (FK Migration) στα δεδομένα GPR. Στην αριστερή πλευρά, εμφανίζεται η ποσοστιαία μείωση στις τιμές του μέσου πλάτους για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α». Συγκεκριμένα, στην κατεύθυνση X, τα πλάτη μειώθηκαν κατά 24.4%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν κατά 38.5%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y, η μείωση ήταν ίση με 32%. Αντίθετα, στα διαγράμματα της δεξιάς πλευράς, φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των τιμών μέσου πλάτους για το επιφανειακά ρωγματωμένο τέμαχος μαρμάρου «C». Στην κατεύθυνση X, τα πλάτη μειώθηκαν κατά 7.1%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν κατά 23.4%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y, η μείωση ήταν της τάξης του 15.2%.

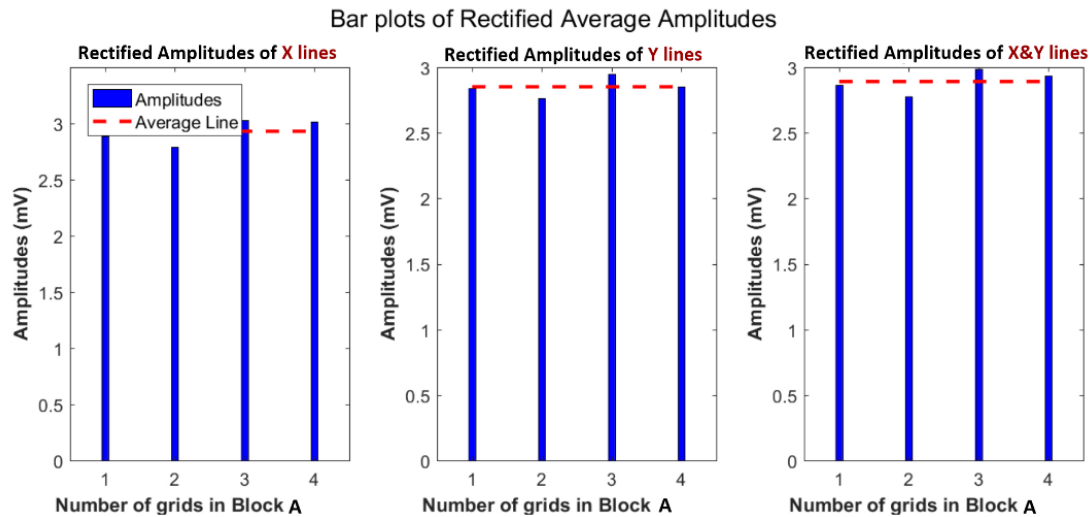
9.1.1. Μάρμαρα Hemarus Grey

Μέσω των αποτελεσμάτων των δύο πρώτων αλγορίθμων, παρέχεται η ευκολία σε επόμενους χρήστες του GPR, έχοντας υλοποιήσει μετρήσεις σε τεμάχια μαρμάρου, να μην προβούν στη διαδικασία επεξεργασίας των τιμών πλάτους, καθώς και να κατατάξουν με μεγαλύτερη ευκολία ως προς την ποιότητά τους τα εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου, συγκρίνοντας τις τιμές του μέσου πλάτους, με αυτές που προέκυψαν από τους αλγορίθμους³⁵. Είναι φανερό, πως από όποια πλευρά και αν μετρηθεί ένα ρωγματωμένο ή υγιές τέμαχος μαρμάρου, τα αποτελέσματα των τιμών πλάτους θα πρέπει να είναι παρεμφερή μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτόν, ανάλογα με τον σκοπό της έρευνας και το διαθέσιμο χρόνο, δεν απαιτείται πάντοτε η μέτρηση όλων των πλευρών ενός τεμάχους μαρμάρου έτσι ώστε να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα αναφορικά με τα πλάτη τα οποία τα χαρακτηρίζουν.

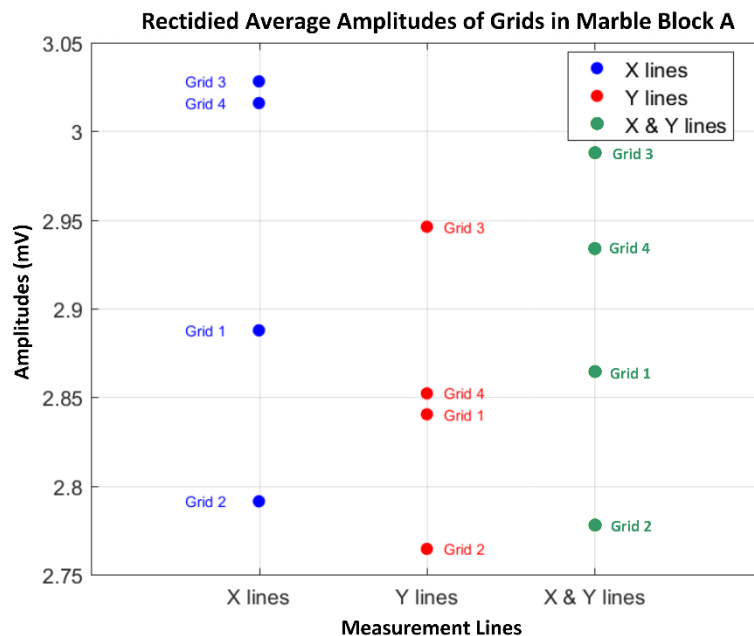
Αμέσως παρακάτω, παρατίθενται κάποια διαγράμματα στα οποία αναπαρίστανται οι τιμές του μέσου πλάτους που υπολογίστηκαν για κάθε κάρναβο μέτρησης, για το υγιές τέμαχος μαρμάρου «Α» (εικ. 45, 46) και για το επιφανειακά ρωγματωμένο

³⁵ Βλ. Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακες 14 & 15

τέμαχος μαρμάρου «C» (εικ. 47, 48), αντίστοιχα. Παρατηρείται, πως η διαφορά στις τιμές του πλάτους μεταξύ των υγιών τεμαχών μαρμάρου και των ρωγματομένων τεμαχών, είναι σχετικά μικρή, με τα υγιή μάρμαρα να εμφανίζουν πλάτη περίπου ίσα με 2.5-3mV, και τα ρωγματομένα μάρμαρα να χαρακτηρίζονται από πλάτη περίπου ίσα με 3-3.5mV (εικ. 49)³⁶.

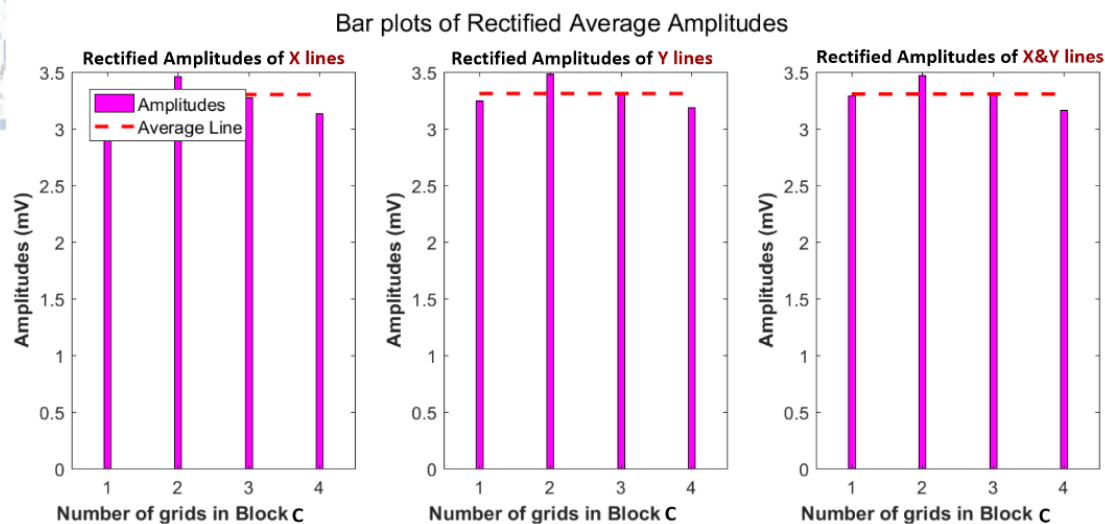


Εικόνα 45. Διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται οι τιμές μέσου πλάτους για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου Hemarus Grey «A», για κάθε κάνναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y). Τα πλάτη κυμαίνονται μεταξύ 2.5-3mV.

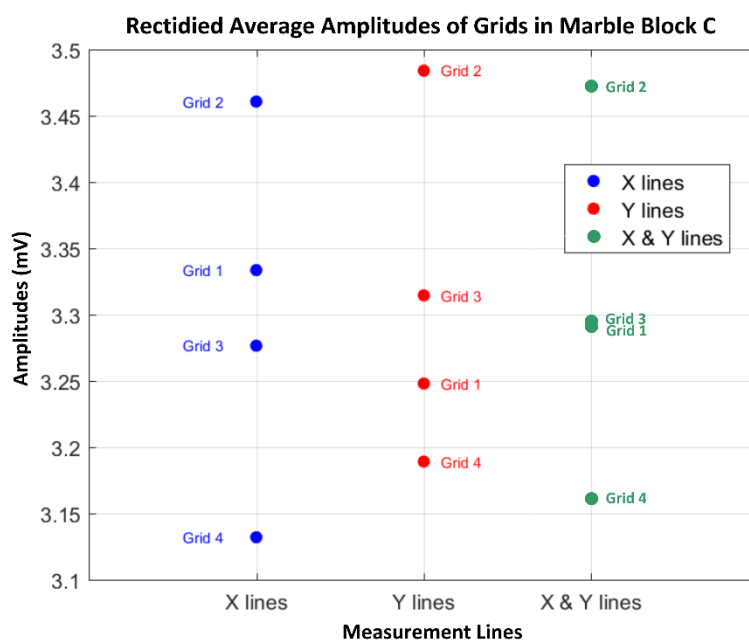


Εικόνα 46. Διάγραμμα απεικόνισης των τιμών μέσου πλάτους για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου Hemarus Grey «A», για κάθε κάνναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y).

³⁶ Βλ. Παράρτημα Β': Αποτελέσματα – Διαγράμματα κ.α.

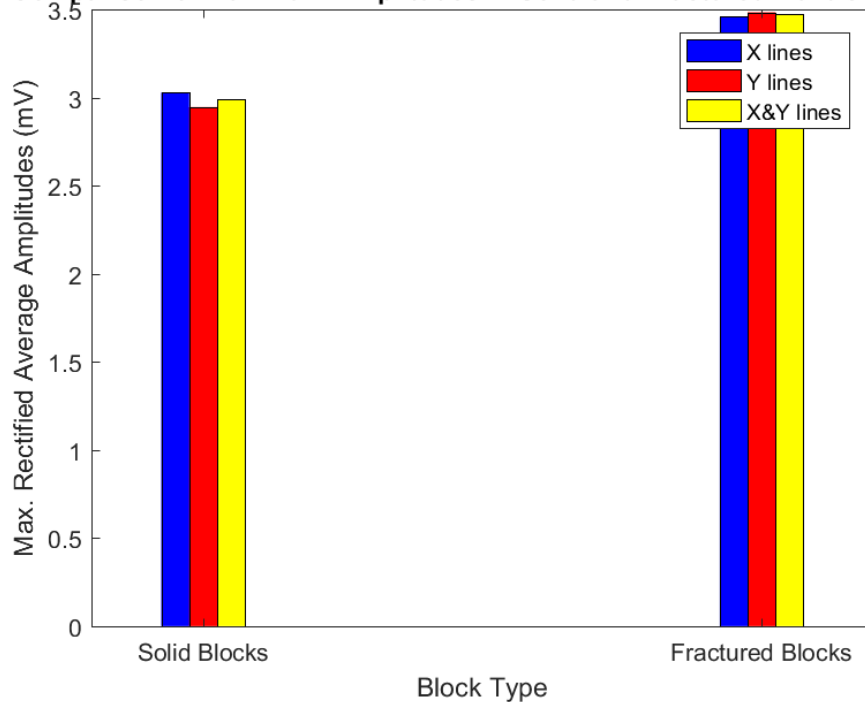


Εικόνα 48. Διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται οι τιμές μέσου πλάτους σε κάθε κάρναβο και κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y), του επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου Hemarus Grey «C». Τα πλάτη κυμαίνονται μεταξύ 3-3.5mV.



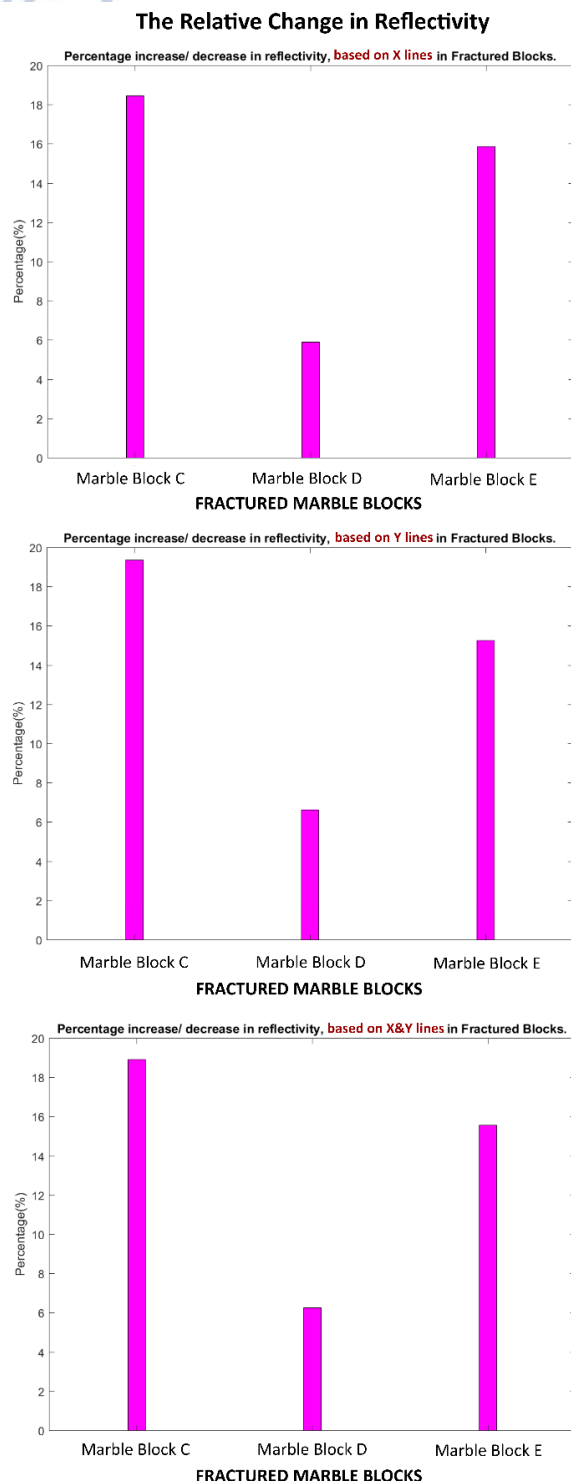
Εικόνα 47. Διάγραμμα απεικόνισης των τιμών μέσου πλάτους σε κάθε κάρναβο μέτρησης του επιφανειακά ρωγματωμένου τεμάχους μαρμάρου Hemarus Grey «C», για κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X, Y και X&Y).

Comparison of Maximum Amplitudes in Solid and Fractured Marble Blocks



Εικόνα 49. Διάγραμμα απεικόνισης των μέγιστων τιμών μέσου πλάτους του συνόλου των μετρούμενων συμπαγών (Solid Blocks) και ρωγματομένων τεμαχών (Fractured Blocks) μαρμάρου Hemarus Grey, για κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y). Η διαφορά στις τιμές του πλάτους μεταξύ των υγιών τεμαχών μαρμάρου και των ρωγματομένων τεμαχών, δεν είναι μεγάλη, με τα υγιή μάρμαρα να εμφανίζουν πλάτη περίπου ίσα με 2.5-3mV, και τα ρωγματομένα μάρμαρα να χαρακτηρίζονται από πλάτη περίπου ίσα με 3-3.5mV.

Τέλος, σύμφωνα με τα διαγράμματα της **εικόνας 50**, η ανακλαστικότητα αυξάνεται από τα υγιή στα ρωγματομένα τεμάχια μάρμαρου, έως και ~20%. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι είναι γύρω στο 6-19%, σε όλες τις κατευθύνσεις μέτρησης (X, Y και X&Y). Αν και το ποσοστό αυτό είναι σημαντικό, δε θεωρείται υπερβολικά υψηλό. Η παραπάνω παρατήρηση, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα διαγράμματα, επιβεβαιώνει ότι το υπό μελέτη λατομείο εξορύσσει ως επί το πλείστον τεμάχια μαρμάρου «καλής» ποιότητας, χωρίς την ένδειξη έντονων εσωτερικών ρωγματώσεων που μπορούν να επηρεάσουν και να μεταβάλλουν την ποιότητά του. Το μαρμάρينو τέμαχος με το όνομα «D» είναι άξιο ιδιαίτερης προσοχής, για την ανώτερη ποιότητά του σε σύγκριση με τα άλλα δύο μετρούμενα ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου Hemarus Grey.

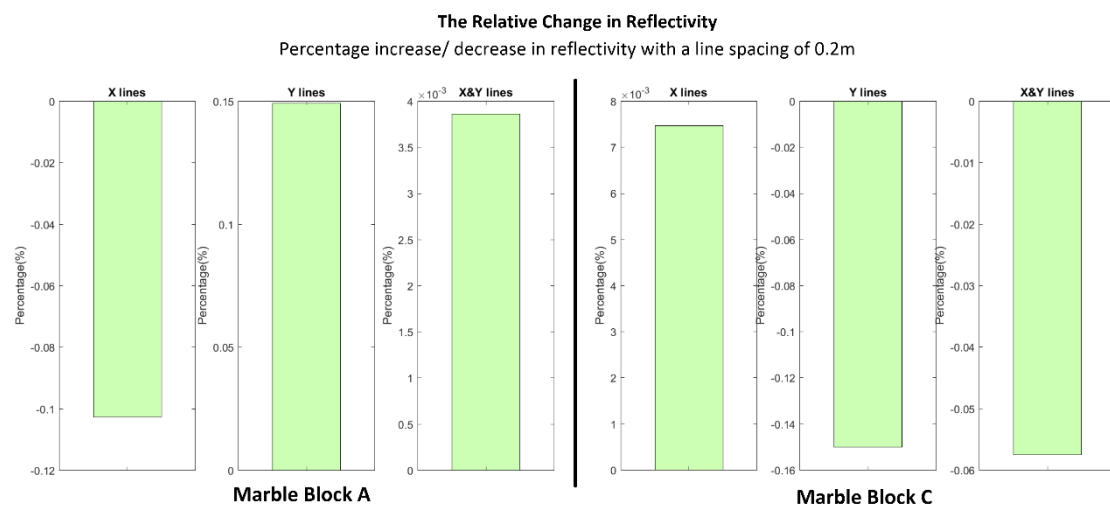


Εικόνα 50. Διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μεταβολή της ανακλαστικότητας από τα υγιή τεμάχια μαρμάρου, στα ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου, σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται πως από τα υγιή στα ρωγματομένα τεμάχια μαρμάρου, η ανακλαστικότητα αυξάνεται, λόγω της ύπαρξης εσωτερικών ρωγματώσεων. Ωστόσο, η αύξηση αυτή, παρατηρείται σε μικρά ποσοστά προς κάθε κατεύθυνση, υποδηλώνοντας την υψηλή ποιότητα του μαρμάρου Hemarus Grey. Για τα τεμάχια μαρμάρου «C», «D» και «E», τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 18.5%, 5.9% και 15.9% στην κατεύθυνση X και 19.4%, 6.6% και 15.3% στην κατεύθυνση Y, αντίστοιχα. Στο συνδυασμό των κατευθύνσεων X&Y, η αύξηση στην ανακλαστικότητα ήταν περίπου ίση με 19%, 6.3% και 15.6%, για τα τεμάχια «C», «D» και «E».

9.1.2. Γραμμές διασκόπησης

Παρακάτω, αναλύονται και παρουσιάζονται τα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκαλείται με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης διαφορετική από 0.1 m, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το επιφανειακά ρωγματωμένο τέμαχος μαρμάρου «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y και X&Y)³⁷. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η αυτοματοποιημένη επεξεργασία ανάλυσης πλάτους, αυξάνοντας σταδιακά την απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης του GPR από την προεπιλεγμένη απόσταση κατά τη διαδικασία απόκτησης των δεδομένων, ίση με 0.1m.

Αρχικά, εξετάστηκε η μεταβολή της ανακλαστικότητας που προκύπτει με αύξηση της απόστασης των γραμμών μέτρησης από 0.1m σε 0.2m (εικ. 51). Για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου, οι τιμές του πλάτους μεταβλήθηκαν κατά 0.004-0.15%, ενώ για το επιφανειακά ρωγματωμένο τέμαχος οι τιμές του πλάτους μεταβλήθηκαν κατά 0.008-0.15%. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, φανερώνει πως τα πλάτη παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές όταν η απόσταση των γραμμών διασκόπησης αυξάνεται κατά 0.1m.

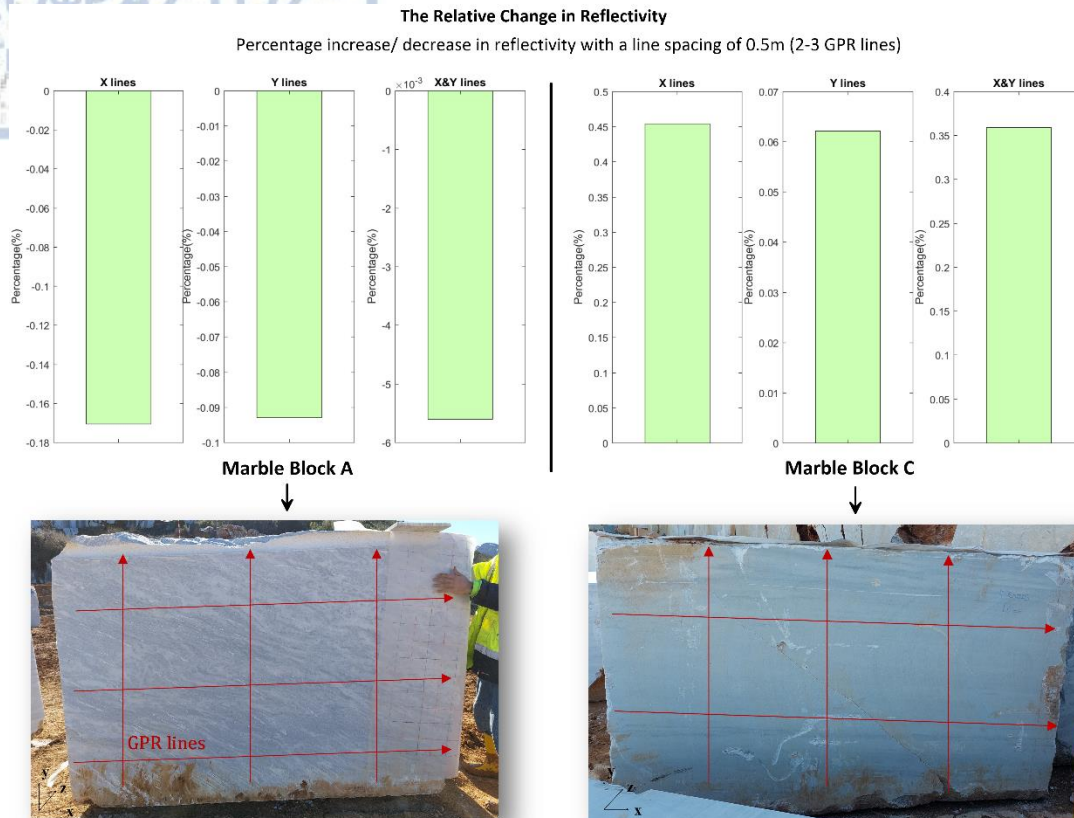


Εικόνα 51. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης διαφορετική από 0.1m, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το επιφανειακά ρωγματωμένο τέμαχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους όταν χρησιμοποιήθηκε απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης ίση με 0.2m. Για το τέμαχος «Α», στην κατεύθυνση X τα πλάτη μειώθηκαν περίπου 0.1%, αυξήθηκαν περίπου 0.15% στην κατεύθυνση Y και αυξήθηκαν περίπου 0.004% και στις δύο κατευθύνσεις X&Y. Για το τέμαχος «C», στην κατεύθυνση X τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.008%, μειώθηκαν περίπου 0.15% στην κατεύθυνση Y και μειώθηκαν περίπου 0.06% και στις δύο κατευθύνσεις X&Y.

³⁷ Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακες 18, 19, 20 & 21

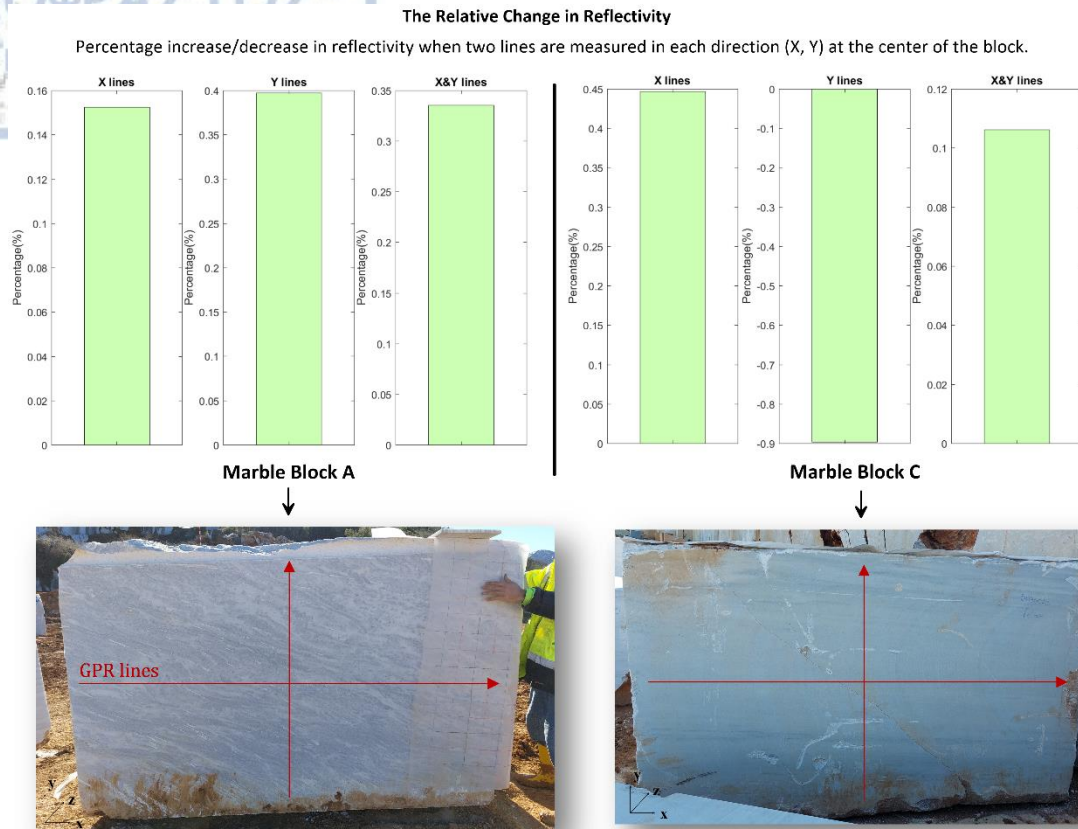
Έπειτα, αυξάνοντας σταδιακά την απόσταση των γραμμών μέτρησης κατά 0.1m, με χρήση του 3^{ου} αλγόριθμου, εντοπίστηκαν οι αποστάσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στο σύνολο των υπό μελέτη τεμαχών μαρμάρου (υγιή και ρωγματομένα). Ειδικότερα, για το σύνολο των μετρούμενων τεμαχών μαρμάρου, προτείνεται απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης του GPR ίση με 0.7m κατά την κατεύθυνση X και 0.5m κατά την κατεύθυνση Y. Είναι σημαντικό να τονιστεί, πως οι παραπάνω αποστάσεις θα πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη σε συνδυασμό με τις διαστάσεις των υπό μελέτη τεμαχών μαρμάρου και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν πιλοτικά και σε άλλα τεμάχια μαρμάρου παρόμοιων διαστάσεων από διαφορετικά λατομεία. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, απλοποιεί τη διαδικασία υλοποίησης των μετρήσεων, επιτρέποντας να πραγματοποιηθούν πιο αραιές γραμμές μετρήσεων, 1 έως 3 ανά κατεύθυνση, προκειμένου τα τεμάχια μαρμάρου να ταξινομηθούν ως προς την εσωτερική τους συμπαγή ή/και μη δομή, και άρα ως προς την ποιότητα τους. Ακολουθώντας, η διεκπεραίωση λιγότερων γραμμών διασκόπησης καθιστά μη αναγκαία τη χρήση του βοηθητικού πετάσματος, μειώνοντας τελικά το συνολικό χρόνο διεξαγωγής των μετρήσεων.

Αμέσως μετά, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης ίση με 0.5m ανά κατεύθυνση, ξεκινώντας από το κέντρο του εκάστοτε υπό μελέτη τεμαχούς μαρμάρου, προκειμένου να μελετηθούν οι διαφορές στις τιμές μέσου πλάτους συγκριτικά με αυτές που προκύπτουν για απόσταση μεταξύ των γραμμών ίση με 0.1m, αναφορικά με τα δύο τεμάχια μαρμάρου (**εικ. 52**). Η μεταβολή λοιπόν στην ανακλαστικότητα υπολογίστηκε περίπου ίση με 0.006-0.17% για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου και περίπου ίση με 0.06-0.45% για το επιφανειακά ρωγματομένο τέμαχος. Επομένως, οι ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών μέσου πλάτους υπολογίζονται αρκετά μικρές, όμως σαφώς λίγο μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές που προέκυψαν όταν χρησιμοποιήθηκε απόσταση μεταξύ των γραμμών μέτρησης ίση με 0.2m. Αξίζει να τονιστεί, πως με χρήση της συγκεκριμένης απόστασης υλοποιούνται 2 έως 3 γραμμές όδευσης του GPR ανά άξονα μέτρησης, οι οποίες ενδείκνυται και προτείνονται για τη μετέπειτα αξιολόγηση των τεμαχών μαρμάρου.



Εικόνα 52. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης ίση με 0.5m για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου «Α», καθώς και για το επιφανειακά ρωγματωμένο τεμάχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους, που προκύπτει κατά την υλοποίηση 2-3 γραμμών μέτρησης, ξεκινώντας από το κέντρο του κάθε τεμάχους και για κάθε κατεύθυνση (GPR lines – **κόκκινα βέλη**). Για το τεμάχος μαρμάρου «Α», στην κατεύθυνση X τα πλάτη μειώθηκαν περίπου 0.16%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν περίπου 0.1%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η μείωση ήταν της τάξης του 0.006%. Για το τεμάχος μαρμάρου «C», στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.45%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν περίπου 0.06%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.35%.

Παράλληλα, εξετάστηκε η ιδανική συνθήκη μέτρησης των δύο τεμαχών μαρμάρου που προαναφέρθηκαν, με υλοποίηση μία γραμμής διασκόπησης, ανά άξονα μέτρησης (**εικ. 53**). Σύμφωνα με την παραπάνω συνθήκη, υπολογίστηκαν οι ποσοστιαίες μεταβολές στις τιμές του πλάτους σε σύγκριση με τις τιμές του πλάτους που προέκυψαν όταν πραγματοποιήθηκε έρευνα με απόσταση των γραμμών μέτρησης ίση με 0.1m. Συνεπώς, η διεκπεραίωση μίας γραμμής διασκόπησης ανά άξονα μέτρησης, επέφερε μεταβολή στις τιμές μέσου πλάτους περίπου ίση με 0.15-0.4% για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου και μικρότερες από ~0.9% για το επιφανειακά ρωγματωμένο τεμάχος.



Εικόνα 53. Η σχετική μεταβολή στην ανακλαστικότητα που προκύπτει με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης διαφορετική από 0.1m, για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου «Α» και το επιφανειακά ρωγματωμένο τεμάχος «C», σε κάθε κατεύθυνση μέτρησης (X, Y and X&Y). Ειδικότερα, παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση/ μείωση του πλάτους, που προκύπτει κατά τη χρήση μίας γραμμής μέτρησης στο κέντρο του κάθε τεμάχους κατεύθυνση (GPR lines – **κόκκινα βέλη**). Για το τεμάχος μαρμάρου «Α», στην κατεύθυνση X τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.2%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν περίπου 0.4%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.3%. Για το τεμάχος μαρμάρου «C», στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν περίπου 0.5%, στην κατεύθυνση Y μειώθηκαν περίπου 0.9%, και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν της τάξης του 0.1%.

Συμπερασματικά, οι σχετικά μικρές ποσοστιαίες αλλαγές στην ανακλαστικότητα υποδεικνύουν ότι τα πλάτη που αναφέρονται παραπάνω, εντοπίζονται εντός του εύρους που κυμαίνονται οι τιμές μέσου πλάτους που υπολογίστηκαν με απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης ίση με 0.1m. Τα πλάτη ενδέχεται να μειωθούν με αύξηση της απόστασης των γραμμών μέτρησης, καθώς εσωτερικές μικρό-ρωγματώσεις μπορεί να μην καταγραφούν. Η κατεύθυνση στην οποία σημειώνονται οι μικρότερες αποκλίσεις στην ανακλαστικότητα, αποτελεί και την καταλληλότερη για την παρακολούθηση της ποιότητας ενός τεμάχους μαρμάρου. Η επιλογή της διεκπεραίωσης 1 έως 3 γραμμών μέτρησης ανά κατεύθυνση, ξεκινώντας από το κέντρο του υπό μελέτη τεμάχους μαρμάρου και αποφεύγοντας τη συλλογή οδεύσεων στα άκρα του, επιφέρει μικρές

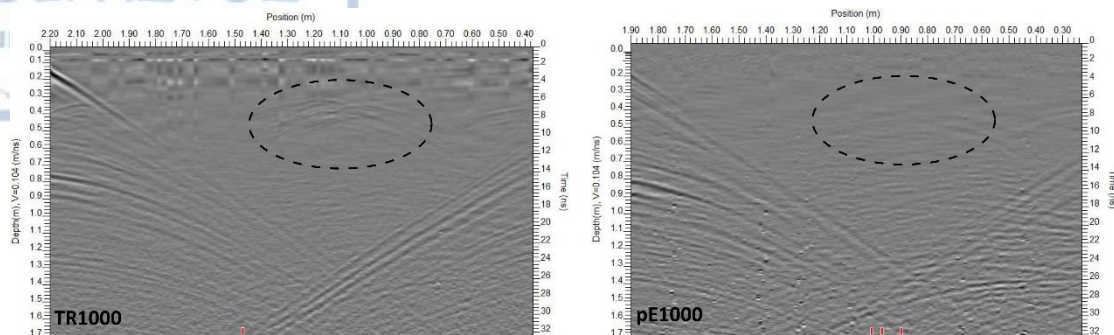
μεταβολές στα πλάτη όταν αυτά συγκρίνονται με την περίπτωση της λεπτομερούς διασκόπησης του τεμάχους με απόσταση γραμμών ίση με 0.1m. Αξίζει να σημειωθεί, λοιπόν, πως οι γραμμές μέτρησης κοντά στις άκρες των πλευρών των τεμαχών μαρμάρου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των πλατών, καθώς καταγράφουν και τον θόρυβο που προκαλείται από τις γωνιακές ανακλάσεις λόγω της γειτνιάσής τους με τη διεπιφάνεια του αέρα ή του εδάφους.

9.1.3. Συστήματα GPR

Όπως ήδη αναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν κάποιες μετρήσεις με δύο συστήματα GPR, το TR1000 και το pulseEKKO PRO 1000 κεντρικής συχνότητας 1000MHz, σε ένα επιφανειακά ρωγματομένο τέμαχος μαρμάρου με όνομα «F»³⁸. Οι μετρούμενες τιμές πλάτους με τα δύο αυτά συστήματα GPR παρουσίασαν απόκλιση μεταξύ τους, με τις τιμές πλάτους καταγραφής να μειώνονται κατά τη χρήση του συστήματος pulseEKKO PRO 1000. Η μείωση αυτή ήταν αναμενόμενη και οφείλεται στις τεχνικές διαφορές στην κατασκευή των δύο συστημάτων GPR, με την κύρια διαφορά τους να είναι η διαφορετική απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη στα δύο συστήματα. Το σύστημα TR1000 έχει απόσταση πομπού-δέκτη ίση με 0.07m, ενώ το σύστημα pulseEKKO PRO 1000 έχει απόσταση ίση με 0.15m. Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη θεωρία³⁹, μεγαλύτερη απόσταση πομπού-δέκτη, οδηγεί στην καταγραφή ασθενέστερων σημάτων και ενέχει τη πιθανότητα μη καταγραφής στόχων μικρών διαστάσεων. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή, φαίνεται πως το σύστημα GPR TR1000 εξυπηρετεί καλύτερα τον σκοπό της έρευνας λόγω του πιο μικρού μεγέθους του καθώς και κυρίως λόγω του αυξημένου πλάτους που καταγράφει για τον εντοπισμό λεπτών και πολύ μικρής κλίμακας στόχων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί καλύτερα τη χαρτογράφηση μικρό-ρωγματώσεων εσωτερικά των τεμαχών μαρμάρου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στα ραδιογράμματα της **εικόνας 54**. Το πλάτος που καταγράφεται κατά τη χρήση του, είναι σαφώς μεγαλύτερο μιας και πομπός και δέκτης βρίσκονται κοντύτερα μεταξύ τους.

³⁸ Βλ. Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακας 22

³⁹ Βλ. υπό ενότητα 3.10.5.1



Εικόνα 54. Απεικονίζονται δύο ραδιογράμματα τα οποία προέκυψαν από την ίδια γραμμή μέτρησης στο τέμαχος μαρμάρου «F», χρησιμοποιώντας τα συστήματα GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000 αντίστοιχα. Σε μαύρο κύκλο στο αριστερό ραδιογράμμα (TR1000) σημειώνονται κάποιες ανακλάσεις οι οποίες όμως δεν αποτυπώνονται ξεκάθαρα στην αντίστοιχη θέση, εντός του μαύρου κύκλου, στο δεξί ραδιογράμμα (pulseEKKO PRO 1000) μιας και τα πλάτη στη δεύτερη αυτή περίπτωση είναι μικρότερα.

9.1.4. Χρήση φελιζόλ

Ένα ακόμη αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης, αφορά τα πλάτη που προέκυψαν από τη χρήση του φελιζόλ κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης των μετρήσεων GPR⁴⁰. Με χρήση του συστήματος GPR TR1000 και του κομματιού φελιζόλ πάχους 2.5cm, η ανακλαστικότητα αυξήθηκε περίπου 9-10% προς όλες τις κατευθύνσεις μέτρησης (**εικ. 55**). Ειδικότερα, σε κάθε άξονα μέτρησης η ανακλαστικότητα υπολογίστηκε ως εξής:

- Άξονας X: Αύξηση 10.1%
- Άξονας Y: Αύξηση 9.7%
- Άξονες X&Y: Αύξηση 9.9%

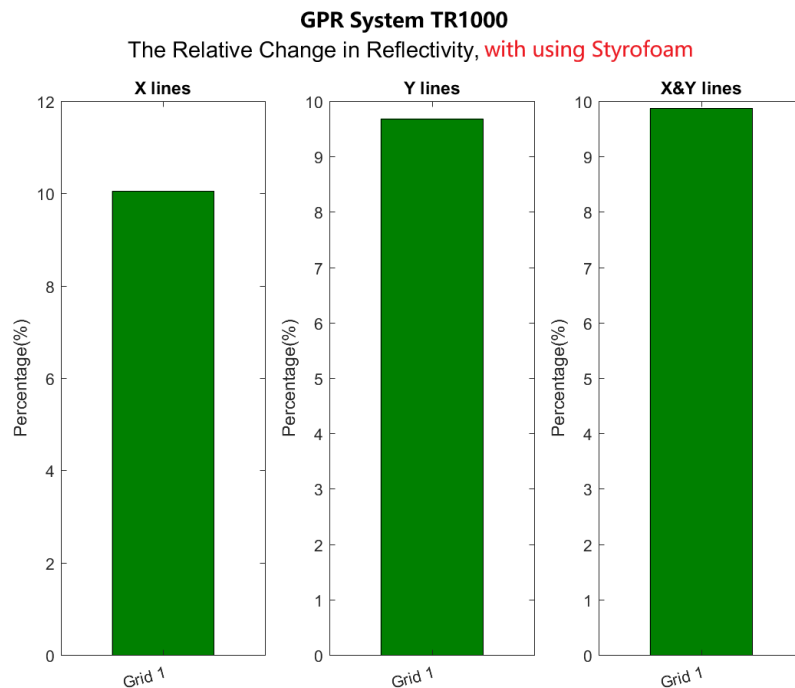
Επιπροσθέτως, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPR pulseEKKO PRO 1000 και φελιζόλ πάχους 2cm, η ανακλαστικότητα αυξήθηκε περίπου 12-14% προς όλες τις κατευθύνσεις μέτρησης (**εικ. 56**).

- Άξονας X: Αύξηση 12%
- Άξονας Y: Αύξηση 13.6%
- Άξονες X&Y: Αύξηση 12.8%

Η αύξηση της ανακλαστικότητας που παρατηρήθηκε γέννησε ερωτήματα σχετικά με τις αιτίες που οδήγησαν στη συγκεκριμένη μεταβολή των τιμών του μέσου πλάτους. Αν και αρχικά είχε εκτιμηθεί πως η ανακλαστικότητα θα μειωθεί με χρήση του φελιζόλ,

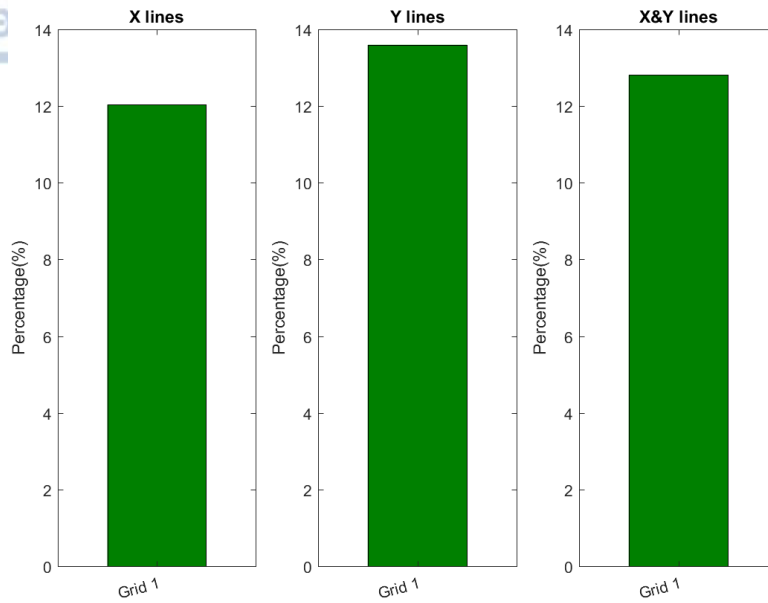
⁴⁰ Βλ. Παράρτημα Α': Αποτελέσματα → Πίνακας 22

αφού δεν συμπεριλαμβάνονται πλέον στα δεδομένα οι τιμές υψηλού πλάτους που οφείλονται στους «γωνιακούς ανακλαστήρες», τα αποτελέσματα της έρευνας διέψευσαν την εκτίμηση αυτή, καθώς τα πλάτη αυξήθηκαν. Το γεγονός αυτό, μπορεί να οφείλεται στο ότι ο εκπεμπόμενος παλμός έγινε πιο κατευθυντικός με τη χρήση του φελιζόλ. Εν κατακλείδι, για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου επίδρασης του φελιζόλ στις μετρήσεις των τεμαχών μαρμάρου με GPR, απαιτείται πιο εξειδικευμένη έρευνα μελλοντικά.



Εικόνα 55. Η σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα σε κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X, Y και X&Y), που προκύπτει από τη χρήση φελιζόλ πάχους 2.5cm κατά τη διάρκεια μέτρησης του τεμάχους μαρμάρου «F», με το σύστημα GPR TR1000. Στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν κατά 10.1%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν κατά 9.7% και στις δύο κατευθύνσεις X&Y η αύξηση ήταν 9.9%.

GPR System PulseEKKO 1000

The Relative Change in Reflectivity, *with using Styrofoam*

Εικόνα 56. Η σχετική αλλαγή στην ανακλαστικότητα σε κάθε κατεύθυνση διασκόπησης (X, Y και X&Y), που προκύπτει από τη χρήση φελιζόλ πάχους 2cm κατά τη διάρκεια μέτρησης του τεμάχους μαρμάρου «F», με το σύστημα GPR pulseEKKO PRO 1000 (κεντρικής συχνότητας 1000MHz). Στην κατεύθυνση X, τα πλάτη αυξήθηκαν κατά 12%, στην κατεύθυνση Y αυξήθηκαν κατά 13.6% και προς τις δύο κατευθύνσεις (X&Y) η αύξηση ήταν 12.8%.

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 10^ο

Συμπεράσματα & Σχόλια

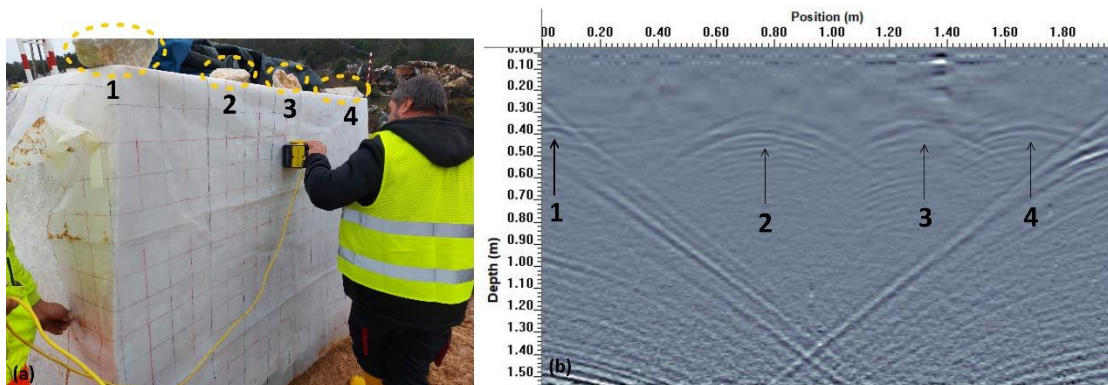
10.1. Γενικά συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει ευρήματα που συμβάλλουν σημαντικά στην ποιοτική αξιολόγηση και το χαρακτηρισμό των εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρου, η οποία έπεται της παραγωγικής διαδικασίας της εξόρυξης, αξιοποιώντας τα ηλεκτρομαγνητικά (H/M) πλάτη που προέρχονται από τις μετρήσεις με τη γεωφυσική μέθοδο του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR). Κινητήριος δύναμη της παρούσας μελέτης αποτέλεσε η ανάγκη του καλύτερου σχεδιασμού κοπής των τεμαχών μαρμάρων, καθώς και η αύξηση της αποληψιμότητας του υγιούς μαρμάρου στο ιδιόκτητο λατομείο της εταιρείας Stone Group International, στην τοποθεσία Νικητές. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν στα εξορυγμένα τεμάχια μαρμάρου, παρείχαν τις εξής χρήσιμες πληροφορίες και στοιχεία:

- Η επιλογή και η καταλληλότητα της μεθόδου του GPR, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ευκολία χρήσης του συγκεκριμένου μηχανήματος, καθώς και την αξιοπιστία της μεθόδου, αφού παρείχε τις απαραίτητες πληροφορίες, χωρίς να υπάρχει απαιτούμενος χρόνος λήψης των μετρήσεων εις βάρος της παραγωγικής διαδικασίας. Επιπλέον, ο όγκος των εξαρτημάτων και του εξοπλισμού, επέτρεψε την εύκολη και γρήγορη μετακίνησή του στο λατομείο κατά τη διάρκεια της εξόρυξης σε διαφορετικά μέτωπα, προκειμένου να είναι εφικτός παράλληλα ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης.
- Η συγκεκριμένη γεωφυσική μέθοδος, δεν απαιτεί ο χειρισμός της να πραγματοποιείται από γεωφυσικό. Για το λόγο αυτό, έναν μελλοντικό στόχο αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου από μη εξειδικευμένους χρήστες στον χειρισμό του εξοπλισμού GPR (για παράδειγμα, από το προσωπικό της εταιρείας).
- Η μέθοδος του GPR παρουσίασε μεγάλη επιτυχία στην αποτύπωση των ρωγματώσεων εσωτερικά των τεμαχών μαρμάρου. Η απουσία ανακλάσεων σε συγκεκριμένες περιοχές στα ραδιογράμματα, σχετίζεται με τη διάδοση του σήματος

μέσα στο συμπαγές ασβεστίτικο πέτρωμα, σε αντίθεση με την ύπαρξη ανακλάσεων οι οποίες φαίνεται να συνδέονται με ρωγματωμένα και αποσαθρωμένα μέρη του πετρώματος. Ειδικότερα, η επιλογή κεραίας υψηλής κεντρικής συχνότητας, αποδείχτηκε πως είναι η ευνοϊκότερη καθώς:

- Εξασφαλίζει τη διεύθυνση του σήματος που ανταποκρίνεται στο τυπικό μέγεθος των εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρου, με το μάρμαρο να αποτελεί ένα ευνοϊκό υλικό για τη διάδοση του H/M κύματος, λόγω της χαμηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας.
- Παρέχει μεγάλη ευαισθησία κατά τη χαρτογράφηση κάθε εσωτερικής «ατέλειας», που μπορεί να έχει αντίκτυπο στη διαδικασία κοπής των τεμαχών μαρμάρου.
- Όλα τα αντικείμενα πλησίον του συστήματος GPR κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, όπως είναι πέτρες, μεταλλικά αντικείμενα κ.α., έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία «ψευδών» ανακλάσεων, δηλαδή ανακλάσεων που δεν προκύπτουν από «ελαττώματα» εσωτερικά του πετρώματος, αλλά από εξωτερικούς στόχους (εικ. 57). Επομένως, απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, προκειμένου να μην εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 57. (α) Στα αριστερά απεικονίζονται οι μετρήσεις σε ένα υγιές τέμαχος μαρμάρου, με το σύστημα GPR TR1000 κεντρικής συχνότητας 1000MHz. **(β)** Στο ραδιόγραμμα στα δεξιά, σημειώνονται οι ανακλάσεις (μαύρα αριθμημένα βέλη), που οφείλονται στις πέτρες (κίτρινοι κύκλοι με τους αντίστοιχους αριθμούς) που έχουν τοποθετηθεί πάνω στο «πέτασμα», για να το συγκρατούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε πως η ανάλυσή των τιμών μέσου πλάτους δύναται να παίζει ουσιαστικό ρόλο στην αξιολόγηση της ποιότητας των εξορυγμένων τεμαχών μαρμάρου. Βάσει λοιπόν των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω της χρήσης των αλγορίθμων που κατασκευάστηκαν, σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Αποδείχτηκε ότι η επιλογή των μεθόδων «κανονικοποίησης» (normalization methods) για τον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους, προκειμένου τα πλάτη αυτά να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ καννάβων που αφορούν το ίδιο τέμαχος μαρμάρου, αλλά και μεταξύ διαφορετικών τεμαχών μαρμάρου, παίζει καθοριστικό ρόλο για την μετέπειτα αξιοποίησή τους. Ειδικότερα, η επιλεγμένη μέθοδος «κανονικοποίησης» των τιμών πλάτους, βάσει το συνολικό αριθμό ιχνών ανά κατεύθυνση, κρίθηκε ως η πιο ακριβής, προσφέροντας μεγαλύτερη ευαισθησία στον υπολογισμό των τιμών μέσου πλάτους, αφού οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για όλα τα ίχνη συνολικά, χωρίς να παίζει ρόλο ο αριθμός των ιχνών σε κάθε γραμμή μέτρησης.
- Ταυτόχρονα, τονίστηκε η εξαιρετική σημασία των κατάλληλων βημάτων επεξεργασίας των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της διαδικασίας της μετανάστευσης (FK Migration) και η επίπτωση αυτής στο να εισάγει σημαντικές ψευδείς ανακλάσεις (artifacts) στα δεδομένα GPR, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τις τιμές του πλάτους, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της μη εφαρμογής της στα δεδομένα.
- Επιβεβαιώθηκε πως το λατομείο στην περιοχή Νικητές εξορύσσει μάρμαρο «καλής» ποιότητας, απαλλαγμένο από εσωτερικές εκτεταμένες ρωγματώσεις, που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία, με ελάχιστες διακυμάνσεις στις τιμές του πλάτους μεταξύ των συμπαγών και ρωγματωμένων τεμαχών μαρμάρου που διασκοπήθηκαν. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι ορισμένα μαρμάρινα τεμάχια, όπως αυτό που ονομάστηκε «D» για διευκόλυνση της έρευνας, χαρακτηρίστηκαν ως ρωγματωμένα ύστερα από οπτική επιθεώρηση της κάθε πλευράς τους. Ωστόσο, συγκεκριμένα για το τέμαχος «D», οι τιμές πλάτους κατέδειξαν την απουσία σημαντικών εσωτερικών «ελαττωμάτων» ικανών να επηρεάσουν την ποιότητά του. Το γεγονός αυτό, υπογραμμίζει τη μεγάλη σημασία της ανάλυσης των τιμών πλάτους, για μια πιο ενδελεχή αξιολόγηση της ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου.

- Επιπλέον, η ανάλυση των τιμών μέσου πλάτους κατέδειξε πως ενώ η μείωση του αριθμού των γραμμών μέτρησης (αύξηση της μεταξύ τους απόστασης) μπορεί να διευκολύνει τη διαδικασία απόκτησης των δεδομένων και την επακόλουθη αξιολόγηση της ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου, ενδέχεται όμως να μην παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για την εσωτερική τους δομή, δηλαδή τη θέση και το βάθος των ρωγμών, δεδομένα τα οποία είναι υψίστης σημασίας για τη μετέπειτα διαδικασία κοπής. Ο συγκεκριμένος περιορισμός, προκύπτει καθώς οι πιο απομακρυσμένες γραμμές διασκόπησης, ενδέχεται να μην διασχίσουν εσωτερικές ρωγμές μικρής κλίμακας, εμποδίζοντας την αναπαράσταση τους στα αντίστοιχα ραδιογράμματα και εν συνεχεία, να αποτελέσουν τροχοπέδη στην τρισδιάστατη απεικόνισή τους. Παράλληλα, οι γραμμές μέτρησης που βρίσκονται κοντά στις άκρες των πλευρών των μαρμαρίνων τεμαχών, σε αντίθεση με αυτές που πραγματοποιούνται προς το κέντρο τους, δύναται να είναι πιο ευαίσθητες, εισάγοντας θόρυβο στα δεδομένα εξαιτίας της επαφής μαρμάρου-αέρα ή μαρμάρου-εδάφους, και οδηγώντας σε τιμές μέσου πλάτους οι οποίες μπορεί να μην είναι ακριβείς και να εμπεριέχουν σφάλματα. Ως εκ τούτου, θεωρείται πως η κατεύθυνση με τις μικρότερες αλλαγές στις τιμές πλάτους μεταξύ των γραμμών μέτρησης, αποτελεί και την καταλληλότερη για την αξιολόγηση της ποιότητας των τεμαχών μαρμάρου. Αξίζει να αναφερθεί, πως η υλοποίηση 1-3 γραμμών διασκόπησης ανά κατεύθυνση κοντύτερα στο κέντρο κάθε καννάβου μέτρησης, δύναται να μειώσει σημαντικά το συνολικό χρόνο διεκπεραίωσης των μετρήσεων. Το γεγονός αυτό, μπορεί να συμβάλλει θετικά στη παραγωγική διαδικασία. Επομένως, κρίνεται απαραίτητο πριν την υλοποίηση της διαδικασίας των μετρήσεων, οι υπεύθυνοι της μελέτης να καθορίσουν ποιος είναι ο στόχος κάθε φορά, έτσι ώστε να επιλέγεται η καταλληλότερη απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης.
- Συγκριτικά με τα δύο συστήματα GPR τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, κρίθηκε πως το σύστημα GPR TR1000 είναι το καταλληλότερο για μετρήσεις τεμαχών μαρμάρου, κυρίως διότι λόγω του μικρότερου μεγέθους του, παρέχει μεγαλύτερη ευκολία χειρισμού, συνδεσμολογίας εξοπλισμού και μετακίνησης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Επίσης, παρέχει υψηλότερα πλάτη καταγραφής λόγω της μεγαλύτερης εγγύτητας πομπού και δέκτη και δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης ρωγματώσεων μικρής κλίμακας.

- Τέλος, η χρήση του φελιζόλ ως μέσο παρεμβολής του μηχανήματος GPR και του τεμάχους μαρμάρου, αποδείχτηκε χρήσιμο εργαλείο για την εξάλειψη των «γωνιακών ανακλαστήρων» από τα ραδιογράμματα, διευκολύνοντας την «καθαρότερη» απεικόνιση της εσωτερικής δομής των τεμαχών μαρμάρου. Οι συγκεκριμένες ανακλάσεις, είναι σημαντικό να απαλειφθούν πριν την οποιαδήποτε επεξεργασία των δεδομένων, γιατί μεταβάλλουν τα H/M πλάτη. Η διαδικασία των μετρήσεων με χρήση του φελιζόλ, απαιτεί καλή επαφή μεταξύ αυτού και του τεμάχους μαρμάρου, και κατ' επέκταση καλή επαφή του μηχανήματος GPR με το κομμάτι φελιζόλ που χρησιμοποιείται. Παρόλα αυτά, η χρήση του φελιζόλ αυξάνει το χρόνο διεκπεραίωσης των μετρήσεων, καθώς και την πολυπλοκότητά τους, απαιτώντας την ύπαρξη περισσότερων των δύο ατόμων για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, ενώ παράλληλα επηρεάζει και διαφοροποιεί τις μετρούμενες τιμές πλάτους.

Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις, συμβάλλουν στη βελτίωση των μετρήσεων με τη μέθοδο του GPR, καθώς και στις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου, ενισχύοντας τις ήδη υπάρχουσες πρακτικές της βιομηχανίας μαρμάρου και διασφαλίζοντας την παράδοση προϊόντων μαρμάρου υψηλής ποιότητας.

10.2. Σχόλια και προτάσεις

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας με το GPR σε σχέση με τους στόχους που τέθηκαν, προκύπτουν τα εξής σχόλια και προτάσεις:

- Η επιτυχία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, αποδεικνύει τη δυνατότητα εφαρμογής της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, βελτιώνοντας το βαθμό απόληψης του συμπαγούς μαρμάρου και επομένως, την οικονομικότητα της εκμετάλλευσης. Κρίσιμη παράμετρος προς αυτή την κατεύθυνση, αποτελεί η ευκολία χρήσης και το κόστος εφαρμογής του GPR. Άρα, η οικονομοτεχνική αξιολόγηση της εφαρμογής της μεθόδου, κρίνεται απαραίτητη σε επόμενο στάδιο, προκειμένου να ενταχθεί στην παραγωγική διαδικασία.
- Προτείνεται η χρήση της γεωφυσικής μεθόδου του GPR και σε άλλα λατομεία μαρμάρου, λόγω της μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας του σήματος του GPR στα μάρμαρα. Αναλυτικότερα, αξίζει να εξεταστεί από τη βιομηχανία διακοσμητικών

λίθων η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, πριν από τη μεταφορά των μαρμάρινων τεμαχίων στη μονάδα τελικής επεξεργασίας με σκοπό την κοπή τους, η οποία ενδέχεται να οδηγήσει σε αναδιαμόρφωση του μεγέθους τους, σύμφωνα με τις εσωτερικές τους ασυνέχειες.

- Προτείνεται να χρησιμοποιηθούν και άλλα συστήματα GPR σε μετρήσεις τεμαχίων μαρμάρου, διαφορετικών διατάξεων, έτσι ώστε να εντοπιστεί η ιδανικότερη εξ' αυτών για τέτοιου είδους συνθήκες μέτρησης. Για παράδειγμα, η επιτόπια δραστηριότητα μπορεί να επωφεληθεί από τη χρήση διατάξεων διπλής πόλωσης, που διασφαλίζουν τη σωστή απεικόνιση των ορίων του συμπαγούς πετρώματος με κάποια ασυνέχεια, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση διαμόρφωσης του προφίλ μετρήσεων.
- Παρομοίως, θα μπορούσε να αναπτυχθεί μελλοντικά ένα λογισμικό ικανό να επεξεργάζεται, να ερμηνεύει και να μοντελοποιεί τρισδιάστατα (3D) την εσωτερική δομή των μαρμάρινων τεμαχίων, καθώς και ένα ημιαυτόματο σύστημα για τον ποιοτικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των τεμαχίων μαρμάρου.
- Ακόμη, αξίζει τον κόπο να μελετηθεί, η χρήση ενός τρισδιάστατου φίλτρου μετανάστευσης, για την αξιολόγηση των αλλαγών στην ανακλαστικότητα.
- Τέλος, θα ήταν ωφέλιμο σε μελλοντικές έρευνες να διερευνηθούν εναλλακτικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων GPR, για την αφαίρεση των «γωνιακών ανακλαστήρων» από τα ραδιογράμματα, προωθώντας τις διαδικασίες αξιολόγησης της ποιότητας του μαρμάρου. Η χρήση του φελιζόλ ως μέσο παρεμβολής μεταξύ του μηχανήματος GPR και του τεμάχους μαρμάρου, απέδειξε πως παρήγαγε ευνοϊκά αποτελέσματα. Μπορεί, για παράδειγμα, να κατασκευαστεί ένα «πέτασμα» από φελιζόλ. Ωστόσο, το φελιζόλ, φαίνεται να επηρεάζει τις τιμές πλάτους, γεγονός το οποίο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και μελλοντική έρευνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αποστολόπουλος Γ. (2013). Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Αθήνα.
- Βαφειδής Α. (2001). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II., Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Εξαδάκτυλος Γ. (2007). Σχεδιασμός συστημάτων υπογείων έργων για την εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας Διακοσμητικών Πετρωμάτων «Λίθος». Ημίλευκο Στενωπού. Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε.).
- Ιωαννίδου Ε. & ΣΙΑ Ο.Ε. (2004). Τεχνική Μελέτη του Άρθρου 4 του Κ.Μ.Α.Ε. για την Εκμετάλλευση Λατομείου Μαρμάρου (Δ.Δ. Μακρυχωρίου του Δήμου Ορεινού του Ν. Καβάλας). Τεχνική Μελέτη.
- Πουλιούδης Γ. (1999). Γεωφυσική διασκόπηση με τη Μέθοδο του Υπεδάφειου Ραντάρ στον Αρχαιολογικό Χώρο της Ιτάνου Λασιθίου. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σπανουδάκης Ν., (2001). Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σπανουδάκης Ν., (2002). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τρίτσης Α., (2023). Παρεμβάσεις και δράσεις βελτίωσης της διαχείρισης ενέργειας και αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στις υποδομές διαχείρισης υδάτων και λυμάτων στον Δήμο Καβάλας. Τεχνική Περιγραφή, Σελ. 10-11.
- Χατζηπαναγής Ι., Βουγιούκας Δ., (2005). Τα μάρμαρα της Αν. Μακεδονίας. Βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν την εμπορικότητα τους σαν διακοσμητικά πετρώματα. Ποιότητες-παράγωγη-τιμές-αποθέματα. 2ο Συνέδριο της Επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας, Γεωχημείας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Θεσσαλονίκη, Σελ. 387-396.

Διεθνής

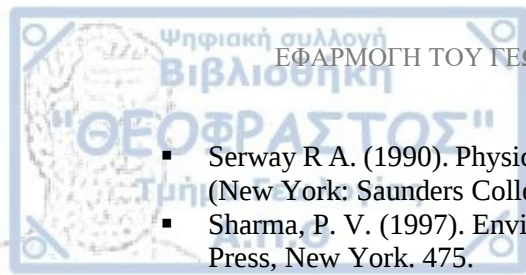
- Al Hagrey S.A., Müller C. (2000). GPR study of pore water content and salinity in sand. Geophysics. Prospect. 48, 63–85.
- Annan A. P., Davis J.L., Gendzwill D. (1988). Radar Sounding in Potash Mines: Saskatchewan, Canada. Geophysics, Vol. 53, 1556-1564.
- Annan A.P., Cosway S.W. (1992). Ground Penetrating Radar Survey Design: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP'92, April 26-29, 1992, Oakbrook, IL, 329-351.
- Annan A.P. (1999). Practical Processing of GPR Data. In Proceedings of the Second Government Workshop on Ground Penetrating Radar. Columbus, Ohio.
- Annan A.P. (2001) Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, September 2001, 192.
- Annan, A. P. (2002). GPR—History, trends, and future developments. Subsurface sensing technologies and applications, 3(4), 253-270.
- Annan A. P. (2003). Ground Penetrating Radar Principles, Procedures and Applications. Sensors & Software Inc. Workshop Notes. Canada.
- Annan. A.P. (2005). GPR Methods for Hydrogeological Studies. In: Rubin, Y., and S. Hubbard (eds) Hydrogeophysics. Water Science and Technology Library, vol 50, Springer, Dordrecht. P, 185-213.

- Annan A.P. (2009): Electromagnetic principles of ground penetrating radar. Chapter 1. In: Joll H.M. (ed.): Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam, 4–37.
- Archie G.E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Transactions of the AIME, 146, 54-62.
- Arosio D., Munda S. and Zanzi L. (2012). Quality control of stone blocks during quarrying activities. Presented at the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Shanghai, China.
- Arosio D., Zanzi L., Longoni L. and Papini M. (2015). Fracture thickness from GPR measurements. 8th international workshop on advanced ground penetrating radar, 1–4.
- Baker G.S., Jordan T.E., Pardy J. (2007). An introduction to Ground Penetrating Radar (GPR), Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 432.
- Balch A.H. (1970), Color sonograms: A new dimension in seismic data interpretation: Geophysics, Vol. 36, 1074-1098.
- Benson A.K., Payne K.L., Stubben M.A. (1997). Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods. Geophysics, 62, 80-86.
- Bernabini M., Pettinelli E., Pierdicca N., Piro S., Versino L. (1995). Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation: J. Appl. Geoph., 33, 63-76.
- Best J., Woodward J., Ashworth P., Smith G.S., Simpson Ch. (2006). Bar-top hollows: a new element in the architecture of sandy braided rivers. Sedimentary Geology 190, 241–255.
- Bevan B.W. (1998). Geophysical Exploration for Archaeology: An Introduction to Geophysical Exploration. National Park Service, Midwest Archaeological Center, Lincoln, NE.
- Böniger U., Tronicke J. (2010). Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: application to tomb detection. J. Archaeolog. Sci., 37, 672-679.
- Born M., Wolf E. (1999). Principles of Optics, 7th ed., Cambridge U. Press.
- Botelho M.A.B., Mufti I.R. (1998). Exploration of limestone quarries in Brazil with depth migrated ground penetrating radar data. In: Proceedings of the 68th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 2, 898-903.
- Brewster, M. L., & Annan, A. P. (1994). Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. Geophysics, 59(8), 1211-1221.
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (2006). Introduction to applied geophysics: exploring the shallow subsurface. New York Norton & Company. with appendix. 554.
- Cassidy N.J., 2009. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: Jol, H.M. (Ed.), Ground Penetrating Radar Theory and Applications, 41–72.
- Cassidy N. J., Jol H. M. (2009). Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In H. M. Jol (Ed.), Ground penetrating radar: Theory and applications, pp. 141–176, Amsterdam: Elsevier Science.
- Chen C., Zhang J. (2009). A review on GPR applications in moisture content Determination and pavement condition assessment. In Characterization, Modeling, and Performance of Geomaterials: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference, pp. 138-143.
- Conyers L.B. (2004) Ground Penetrating Radar for Archaeology. Altamira Press, USA.
- Conyers L.B. (2013). Ground-penetrating Radar for Archaeology, 3rd edn. Rowman and Littlefield Publishers, Alta Mira Press, Latham, Maryland.
- Cook J. C. (1975). Radar transparencies of mine and tunnel rocks. Geophysics, 40(5), 865-885.
- Corbeanu, R. M., McMechan, G.A., Szerbiak, R. B., Soegaard, K. (2002). Prediction of 3-D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah: Geophysics, 67, 1495–1504.

- Cross G. M., Knoll M. D. (1991). Diffraction-based velocity estimates from optimum offset seismic data. *Geophysics*, 56(12), 2070-2079.
- Daniels J.J., Grumman D., Vendl M. (1997). Vertical Incident Three Dimensional GPR: *Jour. Env. Eng. Geoph.*, V. 2, No. 2, 1-9.
- Daniels, J.J., Brower, J., Baumgartner, F. (1998). High-resolution GPR at Brookhaven National Laboratory to delineate complex subsurface targets. *J. Environ. Eng. Geophys.* 3 1, 1–5.
- Daniels D. J. (2000). Ground Penetrating Radar Fundamentals. U.S. EPA Region V, 21.
- Daniels D. J. (2004). Ground Penetrating Radar. 2nd Edition, IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15 (Ed.). The Institution of Electrical Engineers, London.
- Dannowski G., Yaramanci U. (1999). Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectrical measurements. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 4, 71–85.
- Davis J.L., Annan A.P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, vol. 37, 531-551.
- De Domenico, D., Campo, D., Teramo, A. (2013). FDTD modelling in high-resolution 2D and 3D GPR surveys on a reinforced concrete column in a double wall of hollow bricks. *Near Surface Geophysics*, 11(1), 29-40.
- Deparis J., Garambois S. (2009). On the use of dispersive APVO GPR curves for thin-bed properties estimation: Theory and application to fracture characterization, *Geophysics*, 74(1), J1–J12.
- Diamanti N., Redman D. (2012). Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics* 81, 106–116.
- Diamanti N., Annan A. P. (2017). Air-launched and ground-coupled GPR data. In 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) (pp. 1694-1698). IEEE.
- Diamanti N., Annan A.P., Redman J.D. (2017). Concrete bridge deck deterioration assessment using ground penetrating radar (GPR). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 22 (2), 121-132.
- Diamanti N., Annan A.P., Jackson S.R., Klazinga D. (2021). A GPR-based pavement density profiler: operating principles and applications. *Remote Sensing* 13 (13), 2613.
- Dojack L. (2012). Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists.
- Dolphin, L.T., T., Beatty, W. B., and Tanzi, J. D. (1978). Radar Probing of Victorio Peak, New Mexico, *Geophysics*, Dec., Vol. 43, No. 7, 1441-1448.
- Dolphin L. (1997). Ground-penetrating radar (GPR) usage and limitations, SRI International, Menlo Park, California.
- Domenico D. De. D., Campo, D., Teramo, A. (2013). FDTD modelling in high-resolution 2D and 3D GPR surveys on a reinforced concrete column in a double wall of hollow bricks. *Near Surface Geophysics* 11 (1), 29-40.
- Dominic D.F., Egan K., Carney C., Wolfe P.J., Boardman M.R. (1995). Delineation of shallow stratigraphy using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 167-175.
- Fa W. (2013). Simulation for ground penetrating radar (GPR) study of the subsurface structure of the Moon. *Journal of Applied Geophysics* Vol. 99, 98-108.
- Ferrero L., Bolzacchini E., Petraccone S., Perrone M. G., Sangiorgi G., Lo Porto C., Lazzati Z., Ferrini B. (2007): Vertical profiles of particulate matter over Milan during winter 2005/2006, *Fresen. Environ. Bull.*, 16, 697–700, 20.
- Funk C.W., Brehm R., Errington A.F.C., Backstrom K. (2016). An apparatus for collecting upward-looking GPR surveys in potash mines. 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, China, 6.
- Gacitúa G., Tamstorf M. P., Kristiansen S. M., Uribe J. A. (2012). Estimations of moisture content in the active layer in an Arctic ecosystem by using ground-penetrating radar profiling. *Journal of Applied Geophysics* 79, 100–106.

- Giannakis I., Giannopoulos A., Yarovsky A. (2016). Model-Based Evaluation of Signal-to-Clutter Ratio for Landmine Detection Using Ground-Penetrating Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54 (6), 3564-3573.
- Giannopoulos A., Diamanti N. (2008). Numerical modeling of Ground Penetrating Radar response from rough subsurface interfaces. *Near Surface Geophysics* 6(6): 357-369.
- Goodman D., Piro S., Schneider K., Nishimur Y., Hongo H., Higashi N., Steinberg J., Damata B. (2009). *GPR Archaeometry in GPR Theory and Applications*, ed. H. Jol, Elsevier, ISBN 978-0- 444-53348-7, 479-508.
- Grandjean G., Gourry J. C. (1996). GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece). *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 36, Issue 1, 19-30.
- Grasmueck M. (1996). 3D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss: *Geophysics*, 61, 1050–1064.
- Grasmuck D., Scholz R., Risk, W. (2005). Perception of Heavy Metal Soil Contamination by High-Exposed and Low-Exposed Inhabitants: The Role of Knowledge and Emotional concerns. *Risk Analysis*, 25(3), 611-622.
- Grasmueck M., Marchesini P., Eberli G.P., Zeller M., VanDam R. L. (2010), 4D tracking of water infiltration in fractured high-porosity limestone, in 2010 13th International Conference on Ground Penetrating Radar, Issue Date 21-25 June 2010, 1-6.
- Greenhouse J., Brewster M. (1993). Geophysics and solvents: The Borden experiment. *The Leading Edge*, 261-267.
- Grégoire C., Hollender F. (2004). Discontinuity characterization by the inversion of the spectral content of ground penetrating radar (GPR) Reflections – application of the Jonscher model, *Geophysics*, 69, 1414– 1424.
- Haenninen P., Koponen, L., Koskiahde, A., Maijala, P., Pollari, R., Saarenketo, T. and Sutinen, R. (1992). Ground-penetrating radar. *Finish Geotechnical Society, Geophysical Research Methods*, 64.
- Hamran S-E., Gjessing D. T., Hjelmstad J., Aarholt E. (1995). Ground Penetrating Synthetic Pulse Radar: Dynamic Range and Modes of Operation, *Journal Applied Geophysics*, 33(1-3), 7-14.
- Heincke B., van der Kruk J., Green A.G., Horstmeyer H. (2005). Acquisition and processing strategies for 3-D georadar surveying a region characterized by rugged topography. *Geophysics* 70, 53–61
- International Society of Rock Mechanics (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomechanics*. Vol. 16, No. 2, 138-140.
- Izadi-Yazdanabadi M., Hojat A., Zanzi L., Karimi-Nasab S., Arosio D. (2022). Analytical Models and Laboratory Measurements to Explore the Potential of GPR for Quality Control of Marble Block Repair through Resin Injections. *Applied Sciences*, 12, 987.
- Jol H. M. (1995). Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. *Geophysical Prospecting*, 43: 693–709.
- Jol H.M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 509.
- Kadioglu S. (2008). Photographing Layer Thicknesses and Discontinuities in a Marble Quarry with 3-D GPR Visualisation, *J. Appl. Geophys.*, 64, 109–114.
- Leckebusch J., Peikert R. (2001). Investigating the true resolution and three-dimensional capabilities of ground-penetrating radar data in archaeological surveys: measurements in a sand box. *Archaeological Prospection*, 8: 29–40.
- Leckebusch J. (2003). Ground-Penetrating Radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10 (4): 213-41.
- Lejzerowicz A., Kowalczyk S., Wysocka A. (2014). The usefulness of ground-penetrating radar images for the research of a large sand-bed braided river: case study from the Vistula River (central Poland). *Geologos*, 20(1), 35-47.

- Leucci G., Negri S. (2006). Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area. *Journal of Archaeological Science* 33, 502–512.
- Lorenzo H., Cuellar V. Hernandez M.C. (2001). Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. *Journal of Applied Geophysics* 47, 327–336
- Luodes H., Sutinen H. (2011). Evaluation and modelling of natural stone rock quality using ground penetrating radar (GPR). In: K. Nenonen & P.A. Nurmi (eds.), *Geoscience for Society. 125th Anniversary Volume. Geological Survey of Finland, Special Paper 49*, 83–90.
- Mellet J.S., (1995). Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. *Journal of Applied Geophysics* 33, 157 – 166.
- Molenaar H., De Vreng, A. (2004). Guidelines for using the pulseEKKO 1000 GPR system and analyzing its output. Technical manual.
- Mosch S., Nikolayew D., Ewiak O., Siegesmund S. (2011). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sci.* 63(7–8): 1911–1924.
- Mysaiah D., Maheswari K., Srihari Rao M., Senthil Kumar P., Seshunarayana T. (2011). Ground-penetrating radar applied to imaging sheet joints in granite bedrock. *Curr. Sci.* 100, 473–475.
- Olhoeft G.R. (1998). Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. *Proceeding of the 7th Int. Conference GPR 1998*, Lawrence, KS, USA, 177 – 182.
- Onur A., Bakrac S. (2009). Determination of discontinuities in marble blocks via a non-destructive ultrasonic technique. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, Number 5, 487.
- Orlando L. (2002). Detection and analysis of LNAPL using the instantaneous amplitude and Frequency of ground-penetrating radar data. *Geophysical Prospecting*, 50, 1, 27–41.
- Orlando L. (2007). Georadar data collection, anomaly shape and archaeological interpretation – a case study from central Italy. *Journal Archaeological Prospection*, 14(3): 213–225.
- Pipan M., Baradello L., Forte E., Prizzon, A. (2000). Polarization and Kinematic effects in Azimuthal investigations of linear structures with ground penetrating radar, in *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Keystone, CO, 407–413.
- Pipan M., Forte E., Guangyou F., Finetti I. (2003). High resolution GPR imaging and joint characterization in limestone: *Near Surface Geophysics*, 1, 39–55.
- Porsani J. L., Borges W. R., Rodrigues S. I., Hiedo F. Y. (2006). O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, 49–61.
- Powers M. H. (1997). Modeling frequency-dependent GPR. *The Leading Edge* 16: 1657–1662.
- Prego F. J., Solla, M., Puente, I., Arias, P. (2017). Efficient GPR data and acquisition to detect underground pipes. *NDT and E International* 91, 22–31.
- Ren L.-J., Li J., Hu Y.-W., Ji X.-J., Huang H. (2013). Utilization of cane molasses for docosaheptaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. CCTCC M209059. *Korean J. Chem. Eng.*, 30 (4), 787–789.
- Rey H. G., Pedreira C., Quiroga R. Q. (2015). Past, present and future of spike sorting techniques. *Brain Res, Bull*, 1–12.
- Reynolds J. M. (1998). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons Ltd.
- Saarenketo T. (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of applied geophysics*, 40(1-3), 73–88.
- Sensors & Software. (2003). *EKKO_View Enhanced & EKKO_View Deluxe User's Guide*. Sensors & Software, Mississauga.



- Serway R A. (1990). Physics for Science and Engineering with Modern Physics 3rd edition (New York: Saunders College Publishing).
- Sharma, P. V. (1997). Environmental and Engineering Geophysics: Cambridge University Press, New York. 475.
- Sheriff R. E. (1997). Seismic resolution a key element. Geophysical corner.
- Simmons G., Meyer J. W., Baker R. H., Strangway D. W. (1972). A brief introduction to the Surface Electrical Properties experiment: Apollo XVII (PDF). Massachusetts Institute of Technology.
- Sigurdsson, T. (1993). Ground penetrating radar for geological mapping. Doctoral thesis, Aarhus University. Aarhus ° Geoscience, 3, 1995.
- Sigurdsson, T. (1994). Application of GPR for geological mapping, exploration of industrial mineralizations and sulphide deposits. GPR '94, Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 3, pp. 941–955.
- Skolnik M. I. (1980). Introduction to radar systems.(2nd ed.). New York: McGraw.
- Spanoudakis S. N., Vafidis A., Papavasiliou A. (2004). Delineating a doline system using 3D Ground Penetrating Radar (GPR) data, complex trace attributes and neural networks: a case study in Omalos Highlands, Chania, Crete. AMIREG. 1st International Conference, 7-9 June, Hania, Crete, Greece.
- Sternberg B.K., McGill J.W. (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics 33, 209–225.
- Stewart R.D., Unterberger R.R. (1976). Seeing through rock salt with radar. Geophysics 41, 123–132.
- Stolt R.H. (1978). Migration by Fourier transform. Geophysics, 43, 23–48.
- Stolte C. (1994). E-Migration: Image enhancement for subsurface objects of constant curvature in ground probing radar reflection data (Doctoral dissertation, Christian-AlbrechtsUniversität zu Kiel).
- Stratton, J. A. (1941). Electromagnetic Theory. McGraw-Hill, New York.
- Stratton J. A., Chu L. J. (1941). Steady-State Solutions of Electromagnetic Field Problems. I. Forced Oscillations of a Cylindrical Conductor. Journal of Applied Physics, 12(3), 230–235.
- Takahashi K., Igel J., Preetz H., Kuroda S. (2012). Basics and Application of Ground-Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process, Leibniz Institute for Applied Geophysics National Institute for Rural Engineering, Germany, Japan.
- Taner M.T., Koehler F., Sheriff R.E. (1979). Complex seismic trace analysis. GEOPHYSICS 44, 1041–1063.
- Thierbach R., (1974). Electromagnetic reflections in salt deposits. Journal of Geophysics, Vol.40, 633-637.
- Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. Journal of Applied Geophysics, Vol. 33, 119-124.
- Travassos X. L., Avila S. L., Ida N. (2018). Artificial neural networks and machine learning techniques applied to ground-penetrating radar: A review, Appl. Comput. Inf. 17 (2): 1–7.
- Tsoflias, G. P. (1999), Hydrogeologic characterization of fractured carbonate aquifers employing ground-penetrating radar, Ph.D. thesis, Univ. of Tex. at Austin, 1999.
- Tsoflias G.P., Gestel J.-P.V., Stoffa P.L., Blankenship D.D., Sen M. (2004). Vertical fracture detection by exploiting the polarization properties of ground-penetrating radar signals. Geophysics 69 (3), 803–810.
- Ulaby F. T., Michielssen E., Ravaioli U. (2015). Fundamentals of applied electromagnetics. Boston: Pearson.
- United Nations (1976). The development potential of dimension stone. Department of Economic and Social Affairs, ST/ESA/34, 95, New York.
- van Dam R.L., Schlager W. (2000). Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses: Sedimentology, 47, 435-450.

- van der Kruk J., (2001). Three-dimensional imaging of multicomponent ground penetrating radar data. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.
- van Overmeeren R.A. (1998). Radar facies of unconsolidated sediments in the Netherlands: a radar stratigraphic interpretation method for hydrogeology. Journal of Applied Geophysics 40, 1–18.
- Vargemezis G, Diamanti N., Tsourlos P., Fikos I., Louvaris P., Polydoropoulos K. (2022). Application of Multiple Geophysical Methods to the Investigation of Underground Storage Tanks. Near Surface Geoscience 2022, 4 pp., Belgrade, Serbia.
- Vickers R. S., Dolphin L. T., Johnson D. (1976). Archaeological Investigations at Chaco Canyon Using Subsurface Radar. In Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies: Non-Destructive Methods of Archaeological Exploration, Survey, and Analysis, edited by T. R. Lyons, Chaco Center, USDI-NPS and the University of New Mexico, Albuquerque, 81-101.
- Waite A. H., Schmidt S. J. (1962). Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. Proceedings of the IRE, 50(6), 1515-1520.
- Watts R.D., England A.W. (1976). Radio-echo sounding of temperate glaciers: Ice properties and sounder design criteria: Journal of Glaciology, v. 21, no. 85, 39-48.
- Witten A.J. (2006). Handbook of Geophysics and Archaeology. London: Equinox Publishing.
- Yilmaz Ö. (2001). Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, EarthArXiv.

Χρήσιμοι Σύνδεσμοι

1. Stone News. <https://stonenews.eu/>
2. Stone Group International. <https://stonegroup.gr/>
3. Ελληνικά Ορυκτά. <https://www.orykta.gr/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α': Αποτελέσματα - Πίνακες

Πίνακας 10. Οι επιλεγμένοι χρόνοι (ns) μεγαλύτεροι των οποίων «κόπηκαν» τα δεδομένα πλάτους, για τα υπό μελέτη συμπαγή τεμάχια μαρμάρου.

Συμπαγή/ Υγρή τεμάχια μαρμάρου									
Όνομα τεμάχους Κάναβος	Α				Β				
	1	2	3	4	1	2	3	4	5
Χρόνοι περικοπής πλατών (ns)									
Χωρίς μετανάστευση	26	45	26	43	24	50	24	50	24
Με μετανάστευση	19	34	19	34	20	29	20	29	20

Πίνακας 11. Οι επιλεγμένοι χρόνοι (ns) μεγαλύτεροι των οποίων «κόπηκαν» τα δεδομένα πλάτους, για τα υπό μελέτη ρωγματομέταλλα τεμάχια μαρμάρου.

Ρωγματομέταλλα τεμάχια μαρμάρου													
Όνομα τεμάχους	C				E	D				F			
Κάναβος	1	2	3	4	1	1	2	3	4	1	2	3	4
Χρόνοι περικοπής πλατών (ns)													
Χωρίς μετανάστευση	17		26	45	29	28	43	28	45	32			
Με μετανάστευση	15				28	22	42	24	38	29		27	

Πίνακας 12. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν με την εφαρμογή των δύο μεθόδων «κανονικοποίησης» των δεδομένων, αναφορικά με το συμπαγές τεμάχιο μαρμάρου «Α».

Συμπαγή τεμάχια μαρμάρου									
Όνομα τεμάχους		Α							
Μέθοδος «νορμαλοποίησης»		1 ^η Μέθοδος (Σύμφωνα με το μέγιστο αριθμό γραμμών)				2 ^η Μέθοδος (Σύμφωνα με το μέγιστο αριθμό ιχνών)			
Κάναβος		1	2	3	4	1	2	3	4
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	2.89	2.79	3.03	3.02	2.89	2.79	3.03	3.02
	Y	2.84	2.76	2.95	2.85	2.84	2.76	2.95	2.85
	X&Y	2.86	2.78	2.97	2.94	2.86	2.78	2.99	2.93

Πίνακας 13. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν με την εφαρμογή του φίλτρου της μετανάστευσης στα δεδομένα (FK Migration), αναφορικά με το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματοωμένο τεμάχος «C».

Συμπαγή τεμάχη μαρμάρου									
Τύπος		Συμπαγές τεμάχος				Ρωγματοωμένο τεμάχος			
Όνομα τεμάχους		Α				C			
Κάναβος		1	2	3	4	1	2	3	4
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	2.24	2	1.38	2.23	3.01	3.1	2.48	1.7
	Y	1.78	1.35	2.49	1.39	2.48	2.6	1.73	1.58
	X&Y	2.02	1.65	2.43	1.77	2.78	2.8	2.13	1.64

Πίνακας 14. Τιμές μέσου πλάτους για κάθε κάναβο και σε κάθε άξονα μέτρησης (X, Y και X&Y), για τα συμπαγή τεμάχη μαρμάρου.

Συμπαγή τεμάχη μαρμάρου										
Όνομα τεμάχους		Α				B				
Κάναβος		1	2	3	4	1	2	3	4	5
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	2.89	2.79	3.03	3.02	2.87	2.68	2.82	2.67	2.9
	Y	2.84	2.76	2.95	2.85	2.85	2.66	2.79	2.66	2.9
	X&Y	2.86	2.78	2.99	2.93	2.86	2.67	2.81	2.66	2.9

Πίνακας 15. Τιμές μέσου πλάτους για κάθε κάναβο και σε κάθε άξονα μέτρησης (X, Y και X&Y), για τα ρωγματοωμένα τεμάχη μαρμάρου.

Ρωγματοωμένα τεμάχη μαρμάρου										
Όνομα τεμάχους		C				D				E
Κάναβος		1	2	3	4	1	2	3	4	1
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	3.33	3.46	3.28	3.13	3.01	2.88	3.04	2.88	3.23
	Y	3.25	3.48	3.31	3.19	3.05	2.87	3.03	2.88	3.2
	X&Y	3.29	3.47	3.29	3.16	3.03	2.87	3.03	2.88	3.2

Πίνακας 16. Τιμές μέσου πλάτους για τους άξονες μετρήσεων X, Y και X&Y, για τα συμπαγή τεμάχια μαρμάρου Hemarus.

Συμπαγή τεμάχια μαρμάρου		
Όνομα τεμάχους	A	B
Τιμές μέσου πλάτους (mV)		
X	2.93	2.79
Y	2.85	2.77
X&Y	2.89	2.78

Πίνακας 17. Τιμές μέσου πλάτους για τους άξονες μετρήσεων X, Y και X&Y, για τα επιφανειακά ρωγματοωμένα τεμάχια μαρμάρου Hemarus.

Ρωγματοωμένα τεμάχια μαρμάρου			
Όνομα τεμάχους	C	D	E
Τιμές μέσου πλάτους (mV)			
X	3.30	2.95	3.23
Y	3.31	2.96	3.20
X&Y	3.30	2.95	3.21

Πίνακας 18. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν από απόσταση μεταξύ των γραμμών όδευσης του GPR ίση με 0.2m, για τους άξονες μετρήσεων (X, Y και X&Y) και σε κάθε κάρναβο, για το συμπαγές τεμάχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματοωμένο τεμάχος «C».

Τύπος		Συμπαγές τεμάχος				Ρωγματοωμένο τεμάχος			
Όνομα τεμάχους		A				C			
Κάρναβος		1	2	3	4	1	2	3	4
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	2.89	2.79	3.03	3.01	3.33	3.45	3.29	3.13
	Y	2.84	2.77	2.95	2.86	3.25	3.47	3.31	3.19
	X&Y	2.87	2.78	2.99	2.93	3.29	3.46	3.30	3.16

Πίνακας 19. Οι τιμές μέσου πλάτους που προκύπτουν από δύο γραμμές μέτρησης του GPR ανά κατεύθυνση (X, Y και X&Y) και στο κέντρο κάθε καννάβου, για το συμπαγές τέμαχος μαρμάρου «Α» και το ρωγματομένο τέμαχος «C».

Τύπος		Συμπαγές τέμαχος				Ρωγματομένο τέμαχος			
Όνομα τεμάχους		Α				C			
Κάναβος		1	2	3	4	1	2	3	4
Μέση τιμή πλάτους (mV)	X	2.89	2.80	3.03	3.02	3.33	3.47	3.34	3.12
	Y	2.83	2.77	3.00	2.84	3.19	3.47	3.27	3.19
	X&Y	2.87	2.78	3.02	2.93	3.28	3.47	3.32	3.17

Πίνακας 20. Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των γραμμών όδευσης του GPR και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους, για κάθε άξονα μέτρησης και για κάθε καννάβο στα συμπαγή τεμάχη μαρμάρου.

Συμπαγή τεμάχη μαρμάρου									
Όνομα τεμάχους			Α				Β		
Κάναβος	1	2	3	4	1	2	3	4	5
Μέγιστη απόσταση γραμμών διασκόπησης (m)									
X	1.3	1.2	1.3	0.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0
Y	2.3	0.8	1.2	1.1	2.7	1.1	2.5	1.1	0.5
Μέση τιμή πλάτους (mV)									
X	2.88	3.02	3.01	2.79	2.86	2.67	2.83	2.7	2.89
Y	2.84	2.94	2.93	2.76	2.85	2.67	2.89	2.66	2.9

Πίνακας 21. Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των γραμμών όδευσης του GPR και οι αντίστοιχες τιμές μέσου πλάτους, για κάθε άξονα μέτρησης και για κάθε κάρναβο στα ρωγματομέτα τμήματα μαρμάρου.

Ρωγματομέτα τμήματα μαρμάρου								
Όνομα τεμάχου	C				D			
Κάρναβος	1	2	3	4	1	2	3	4
Μέγιστη απόσταση γραμμών διασκόπησης (m)								
X	1.4	1.4	0.9	0.9	0.7	1.4	1.2	1.3
Y	2.5	2.4	2.5	0.8	0.1	1.2	2.2	1.2
Μέση τιμή πλάτους (mV)								
X	3.28	3.44	3.26	3.14	3.01	2.89	2.99	2.95
Y	3.27	3.46	3.32	3.19	3.05	2.88	2.99	2.96

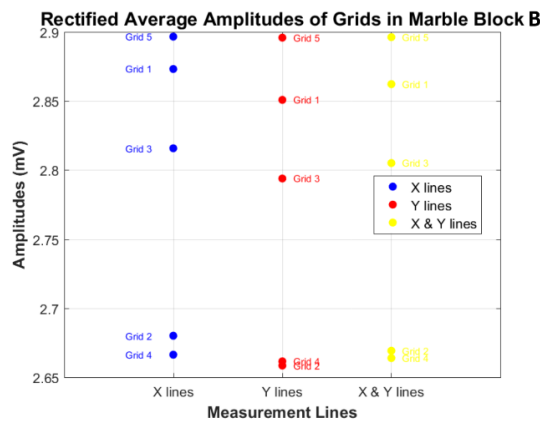
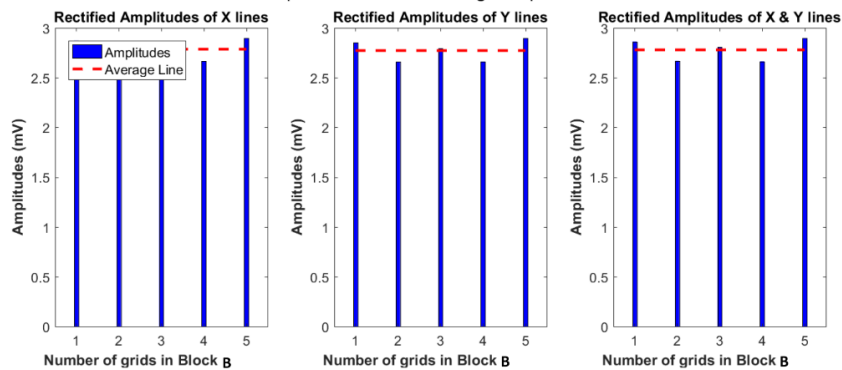
Πίνακας 22. Αποτελέσματα των τιμών μέσου πλάτους κατά την εφαρμογή των συστημάτων GPR TR1000 και pulseEKKO PRO 1000, με ή χωρίς τη χρήση φελιζόλ.

Ρωγματομέτα τμήματα μαρμάρου				
Όνομα τεμάχου	F			
Κάρναβος	1	2	3	4
Όργανο μέτρησης	TR1000	TR1000	pulseEKKO 1000	pulseEKKO 1000
Χρήση φελιζόλ		✓		✓
Συνολικό εύρος πλάτους (mV)				
X	2.81	3.10	0.79	0.89
Y	2.80	3.10	0.79	0.89
X&Y	2.81	3.10	0.79	0.89

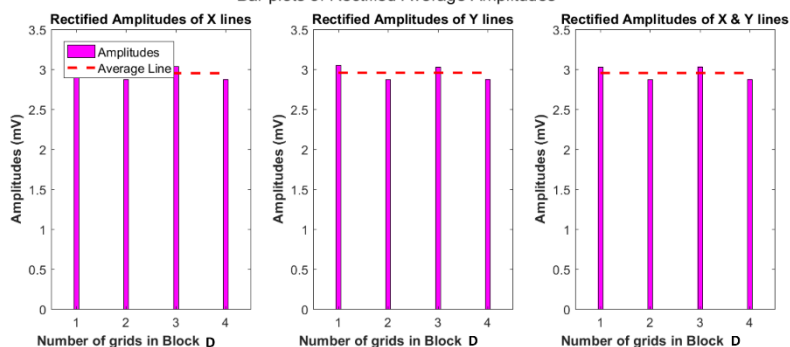
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β': Αποτελέσματα – Διαγράμματα κ.α.



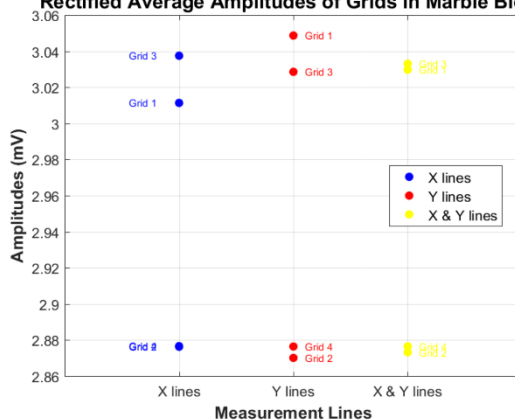
Bar plots of Rectified Average Amplitudes



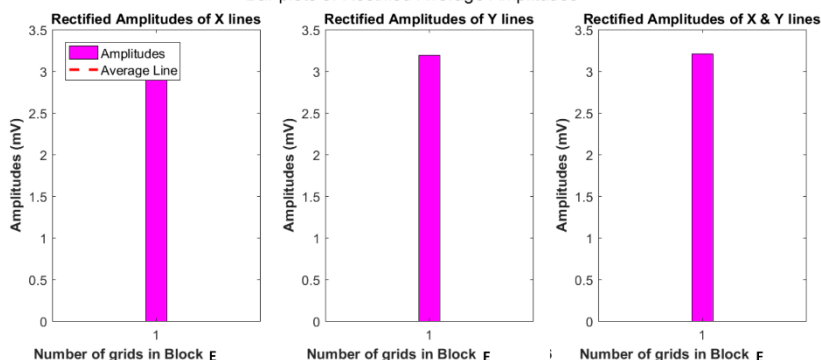
Bar plots of Rectified Average Amplitudes



Rectified Average Amplitudes of Grids in Marble Block D



Bar plots of Rectified Average Amplitudes



Rectified Average Amplitudes of Grids in Marble Block E

